

金属橡胶材料结构及关键性能的实验与建模研究

董秀萍

北京科技大学

分类号: TG142.71

密 级: 公开

U D C:                     

单位代码: 1 0 0 0 8

北京科技大学

# 博士学位论文

论文题目: 金属橡胶材料结构及关键性能的  
实验与建模研究



学 号: B20040208

作 者: 董秀萍

专 业 名 称: 材料学

2008年06月05日



金属橡胶材料结构及关键性能的  
实验与建模研究

**Experimental and Modeling Research on Structures and  
Pivotal Performances of Metal Rubber Materials**

研究生姓名：董秀萍

指导教师姓名：刘国权

北京科技大学材料科学与工程学院

北京 100083，中国

Doctor Degree Candidate: Dong Xiuping

Supervisor: Liu Guoquan

School of Materials Science and Engineering

University of Science and Technology Beijing

30 Xueyuan Road, Haidian District

Beijing 100083, P.R.CHINA

## 独 创 性 说 明

本人郑重声明：所提交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含为获得北京科技大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵循此规定)

签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

## 摘 要

由不锈钢丝编织压制成型制作的金属橡胶 (Metal Rubber, 简称 MR) 多孔材料兼有金属和橡胶的双重特性, 在高低温、腐蚀等恶劣环境均保持阻尼、过滤、抗噪、隔热、密封等一系列优异特性, 在航空、航天和空间技术领域有较大的潜在应用价值。为了填补国内目前对此类新型材料研究方面的有关技术空白, 本文主要就 MR 多孔材料用不锈钢钢丝的微观组织结构、MR 隔振材料中微丝的微动磨损行为与破坏特征、MR 材料内不锈钢微丝空间分布规律及其参数化结构模型、基于模型对材料内微丝接触点数及固相体积分数等参量的计算预报、MR 材料关键性能与其钢丝材料性能参数及钢丝结构特征参数的定量关系等几个方面展开研究。

首先分析了制备 MR 的原材料即 18-8 系奥氏体不锈钢丝的生产工艺, 以光学显微镜、扫描电镜、透射电镜和电子背散射衍射技术详细观察分析了不锈钢细丝径向和轴向的微观组织。由于冷拉拔不锈钢细丝过程的大量变形诱发 18-8 系奥氏体不锈钢发生马氏体转变, 所生成的马氏体为  $\epsilon$  相, 其亚结构既有层错又有位错; 钢丝轴向与径向截面上奥氏体晶粒碎化后的晶界在光学显微镜观察和扫描电镜观察实验中均不可见, 但可通过电子背散射衍射技术观测到; 轴向截面可见以硬质颗粒为核心、两端与基体脱开形成梭形孔洞的典型形貌。

其次, 由于 MR 隔振构件内部耗散能量的最小单元是两段不锈钢细丝组成的微动摩擦副, 本文改进传统的摩擦实验方法, 实现了两段 400 °C 回火处理 Cr-Ni-Mn 系不锈钢  $\phi 0.3$  mm 细丝的微动对磨。研究发现, “微动单元”的磨损可以划分为表面打磨、接触面粘着、第三体床形成和稳定磨损 4 个阶段, 其中的稳定磨损阶段持续时间最长, 摩擦系数也比较稳定。磨痕表面光滑程度高于基体的原始表面, 在载荷 10 N, 频率 5 Hz, 振幅 0.4 mm, 夹角 30° 的摩擦条件下, 经历 144000 个振动周次时, 钢丝磨损深度介于 50~60  $\mu\text{m}$  之间。微动疲劳引发的钢丝断裂断口附近没有宏观的塑性变形, 属于脆性断口; 不锈钢丝表面的每圈周长上平均存在 50 余个微米量级的凹凸体, 其高度的算术平均偏差 Ra 为 3.447  $\mu\text{m}$ , 在交变应力作用下, 较大的凹凸体充当原始裂纹向心部逐渐扩展; 疲劳裂纹起源于表面, 并且呈现“多源”特征; 进一步的分析说明, 提高钢丝的表面光滑程度更有利于显著增加隔振构件的疲劳寿命。

基于上述实验数据, 结合 MR 材料的典型制备工艺, 提取钢丝直径  $d$ 、螺旋卷直径  $D$ 、螺旋卷螺距  $h_j$ 、编织二维毛坯的点阵边长  $a$ 、 $b$  及其夹角  $\alpha$ 、二维毛坯宽度  $W$ 、长度  $L$ 、构件外形尺寸高度  $H_{MR}$  和直径  $D_{MR}$ , 共计 10 个描述 MR 材料中钢丝空间结构的特征参

数，归纳了 5 种编织二维毛坯的点阵类型，在均匀性假设和构件冲压过程钢丝径向拓扑关系不变的假设基础上，建立了 MR 材料内钢丝空间分布的参数化结构模型。利用该种材料特有的固相体积分数与相对密度相等的物理原理，验证了模型的可靠性。

最后，在现有 A.И.Белюсов 模型、接触作用模型和能量耗散模型的工作思想的基础上，摒弃现有模型将螺旋线匝假设为在三维空间均匀分布的做法，从所建立参数化三维钢丝空间分布模型出发，量化了 MR 材料内部固相体积分数（相对密度）、钢丝接触点数与材料制备参数的关系。结果发现 MR 材料内部固相体积分数  $k$  与钢丝直径的平方  $d^2$  成正比关系，与材料的压缩比  $\bar{H}$  成正比关系，固相体积分数  $k=0.3$  左右时，对应着构件高度  $H_{MR}$  的变化平台，此时固相体积分数对构件高度变化处于不敏感阶段；钢丝接触点数  $N$  与 MR 材料的固相体积分数近似成正比关系。最后，利用钢丝微动实验分析结果和钢丝接触点数模型统计分析了 MR 多孔材料的循环脉动加压滞环变形回线，推知 MR 隔振材料迟滞曲线包围面积，即因摩擦而耗散的能量，与其相对密度近似成线性关系；利用弹簧的串并联模型建立了进一步建立了 MR 多孔材料的静态力学性能预报模型；以模型中固相体积分数推知其孔隙度，预报了 MR 多孔材料的过滤性能。

综上所述，MR 材料的微观结构和宏观结构都对其关键性能有重要影响，其宏观结构对关键性能的影响更加直接，本文的预报模型建立了此类新型多孔金属材料结构特征参数与其关键性能的定量关系。

**关键词：**金属橡胶（Metal Rubber），18-8 奥氏体不锈钢丝，微动，参数化结构模型，关键性能

## **Experimental and Modeling Research on Structures and Pivotal Performances of Metal Rubber Materials**

### **Abstract**

Being made of interweaved stainless steel wires, Metal Rubber (MR) has double performance of both metal and rubber and it can serve as dampers, filters, yawp reducer, heat insulating cover, airproof component in low and high temperatures or in corrosive environments. This new type of material has potential applications in aviation, spaceflight, national defense and other pivotal industries. In order to investigate the new type of porous material from the point of materials science and fill the relevant technical blanks, research work here was focused on microstructures of Cr-Ni-Mn austenitic stainless steel wires in MR, wire's fretting wear and breakage behaviours, wires distribution rules and parameteric structure modeling, calculation and forecast of structure parameters such as number of contact unit and solid volume fraction, quantification relationship between MR macro performances and wire's microstructures and its distribution characteristic parameters.

Firstly cool-drawing process of 18-8 austenitic stainless steel wires as MR's raw materials was analyzed. By the OM, SEM, TEM, and EBSD, microstructures of cool-drawing austenitic stainless steel wires used for metal rubber were studied. The results showed that cool-drawing deformation induced martensite transformation and the microstructures of these steel wires were made up of  $\epsilon$  martensite phase, presenting stacking fault and dislocation substructures, and residual austenite phase which was refined into micron dimension. Austenite boundaries could not be found by OM and SEM in cross and longitudinal sections and those could be observed by EBSD. The results also presented that there were shuttle-shaped micro-holes in these steel wires, lugging along drawing axis and cored by the hard particles second-phase.

Secondly, twain fret wires are the least unit for energy dissipation in MR.  $\phi$  0.3 mm cool-drawn 1Cr18Ni9 stainless steel wires' dry fretting experiments at different load were made on SRV high temperature wear machine by techniques of cutting and fixing wires on traditional column-block samples. Wires' fretting friction and wear behavior was analyzed. Friction coefficients were collected and wear course of 'fretting cell' could be plotted as four phases: polish, adherence, forming of the third bed and stabilization, quantitatively. The stabilization phase, in which the friction coefficients were stable, dominated the whole course. LSCM of wire original surface and fret traces detected that roughness degree Ra on wire's original surface is 3.447  $\mu\text{m}$ , higher than that of on traces. Wear depth is between 50 to 60  $\mu\text{m}$  under load of 10

N, frequency of 5 Hz, swing of 0.4 mm, angle of  $30^\circ$  and 144000 cycles. Wires fracture caused by fretting falls into brittleness fatigue fractures. There are over 50 micron concaves and protrudings on each circle of wires on average. Under alterative load, the biggest concave may serve as an orgin crack and start to expand. Each fracture has more than one crack origins. Further studies discover that surface quality greatly affects MR component' fatigue life span.

Based on the above experimental data, combined with typical preparation of cylinder-shaped MR, 5 lattice types of weave patterns in sheet roughcast were induced., 10 structure characteristic parameters are picked up to describe wires structure in MR. In hypothesis of uniformity and unaltered topological relation in punch process, parametrical 3D structure model was founded for cylinder MR. According to principle of wires volume fraction equals to MR's comparative density, model's dependability was validated.

Finally, in the light of current modeling research, А.И.Белоусов model, element interaction model and energy dissipation model, based on the above parametrical 3D structure model, instead of taking granted that wires distributed uniformly in three-dimension space, geometry parameters i.e. volume fraction of wires, porosity, number of contact unit are calculated and relevant curves *vs* main structure characteristic parameters are obtained. Results indicated that wires volume fraction  $k$  is directly proportional to square of wire's diameter  $d^2$  and to compress ratio  $\bar{H}$ . Curve of  $k$  *vs*  $H_{MR}$  was flat at  $k=0.3$  where  $k$  does not vary intensively with  $H_{MR}$ . Number of wires contact unit  $N$  is directly proportional to  $k$ . In addition to analysis on fretting experiments and the rules that MR's area of load-displacement loop under recurrent load is directly proportional to its energy dissipation. Thus MR's energy dissipation is directly proportional to  $k$  approximately. macro performances are analyzed integrated with its inner wires structure characteristic parameters quantificationally. MR's static state mechanics performance modeling was established by helix springs series-paralled connection model. Porisy of MR can be calculated by wires volume fraction and its filtration capability can be predictd based on th above 3D structure model.

Both MR's microstructures and macro structures has significantly effects on its mechanical and filtration performance. But macro structures influence was more straightforward. Predication modeling here sets up quantification relationship between structure characteristic parameters and pivotal performances for such new porous metal.

**Key Words: Metal Rubber, 18-8 austenitic stainless steel wires, Parameterized structure model, Pivotal Performances**

## 目 录

摘 要 .....	(1)
Abstract .....	(3)
注释说明清单 .....	(9)
引 言 .....	- 1 -
1 文献综述 .....	- 3 -
1.1 金属橡胶材料概述 .....	- 3 -
1.1.1 金属橡胶材料简介 .....	- 3 -
1.1.2 金属橡胶材料的制备 .....	- 5 -
1.1.3 金属橡胶材料的应用 .....	- 6 -
1.2 国内外对金属橡胶材料的研究现状 .....	- 8 -
1.2.1 对金属橡胶材料制备工艺的研究 .....	- 8 -
1.2.2 对金属橡胶材料结构参数与关键性能关系的研究 .....	- 9 -
1.2.3 金属橡胶材料的建模和仿真研究 .....	- 11 -
1.2.4 目前存在的问题 .....	- 14 -
1.3 金属橡胶材料的材料学问题概述 .....	- 15 -
1.3.1 18-8 系奥氏体不锈钢概述 .....	- 15 -
1.3.2 18-8 系奥氏体不锈钢冷变形强化机制 .....	- 15 -
1.3.3 18-8 系不锈钢准微丝结构特点对其疲劳性能的影响 .....	- 16 -
1.4 不锈钢丝摩擦、磨损现象研究 .....	- 17 -
1.4.1 摩擦学问题 .....	- 17 -
1.4.2 磨损问题 .....	- 19 -
1.4.3 微动问题 .....	- 19 -
1.4.4 摩擦学白层 .....	- 21 -
1.5 本文研究工作简介 .....	- 23 -
1.5.1 课题研究背景 .....	- 23 -

1.5.2 课题研究内容.....	- 24 -
2 奥氏体不锈钢丝的制备工艺及微观组织.....	- 26 -
2.1 不锈钢丝的制备.....	- 26 -
2.2 实验材料与实验方法.....	- 31 -
2.3 钢丝微观组织观察实验结果与分析.....	- 31 -
2.3.1 冷拉拔不锈钢丝的显微组织变化.....	- 31 -
2.3.2 冷拉拔不锈钢丝的SEM分析.....	- 31 -
2.3.3 冷拉拔不锈钢丝的TEM分析.....	- 33 -
2.3.4 冷拉拔不锈钢丝的EBSD分析.....	- 35 -
2.4 关于金属橡胶用奥氏体不锈钢丝化学成分的讨论.....	- 36 -
2.5 本章小结.....	- 36 -
3 MR材料中微动单元的分析.....	- 37 -
3.1 概念引入—“微动单元（Fretting Cell）”.....	- 37 -
3.2 隔振构件疲劳实验.....	- 39 -
3.2.1 实验材料与实验方法.....	- 39 -
3.2.2 实验结果与分析.....	- 40 -
3.3 实验用不锈钢丝表面激光扫描共焦（LSCM）观察与分析.....	- 42 -
3.3.1 实验材料与实验方法.....	- 43 -
3.3.2 实验结果与分析.....	- 43 -
3.4 FC模拟实验—钢丝对磨实验.....	- 44 -
3.4.1 实验材料与实验方法.....	- 45 -
3.4.2 实验结果与分析.....	- 47 -
3.5 金属橡胶减震构件中钢丝的疲劳断裂分析.....	- 57 -
3.5.1 实验材料和实验方法.....	- 58 -
3.5.2 实验结果与分析.....	- 58 -
3.5.3 钢丝微动疲劳特征分析.....	- 62 -
3.6 本章小结.....	- 62 -

4 MR材料三维结构模型的研究 .....	- 64 -
4.1 MR材料的典型制备过程 .....	- 64 -
4.2 基本假设 .....	- 64 -
4.2.1 均匀性假设 .....	- 64 -
4.2.2 冲压过程径向拓扑关系不变假设 .....	- 65 -
4.3 螺旋卷模型建立 .....	- 65 -
4.4 二维毛坯模型建立 .....	- 66 -
4.4.1 三种编织二维毛坯的方法描述 .....	- 66 -
4.4.2 模型参数提取 .....	- 68 -
4.4.3 模型实例 .....	- 69 -
4.5 三维毛坯模型的建立 .....	- 69 -
4.6 三维毛坯冲压模型的建立 .....	- 71 -
4.7 三维模型的评价 .....	- 72 -
4.8 MR材料计算机辅助设计 (CAD) 系统的开发 .....	- 76 -
4.8.1 开发环境 .....	- 76 -
4.8.2 数学基础 .....	- 76 -
4.8.3 螺旋弹簧的创建 .....	- 78 -
4.8.4 阿基米德螺旋线的创建 .....	- 78 -
4.8.5 三维构件的建立 .....	- 78 -
4.9 本章小结 .....	- 78 -
5 基于结构模型的几种关键性能预报 .....	- 80 -
5.1 现有金属橡胶材料模型的分析 .....	- 80 -
5.1.1 A.И.Белоусов模型 .....	- 80 -
5.1.2 接触作用模型 .....	- 83 -
5.1.3 能量耗散计算模型 .....	- 83 -
5.2 参数化三维模型对材料几何参数的预报预测 .....	- 84 -
5.2.1 模型固相体积分数与MR材料的相对密度计算 .....	- 84 -
5.2.2 模型固相体积分数与构件高度的关系 .....	- 85 -

5.2.3 模型固相体积分数与MR材料中钢丝直径的关系 .....	- 87 -
5.3 模型中钢丝接触点数与循环脉动加压滞环变形回线面积的关系 .....	- 88 -
5.4 刚度特性和本构关系的建模研究 .....	- 92 -
5.5 过滤性能的建模研究 .....	- 95 -
5.6 本章小结 .....	- 99 -
结 论 .....	- 101 -
参 考 文 献 .....	- 104 -
在学研究成果 .....	- 113 -
致 谢 .....	- 114 -

## 注释说明清单

## 符 号

- $d$ —钢丝直径, mm  
 $D$ —螺旋卷中钢丝中心线直径, mm  
 $h_j$ —螺旋卷的螺距, mm  
 $\theta_j$ —制备螺旋卷时钢丝的缠绕角度, (rad)  
 $\omega_j$ —制备螺旋卷时钢丝的缠绕角速度, (rad/s)  
 $t$ —时间, (s)  
 $a$ —螺旋卷平面编织时其点阵单元的边长, mm  
 $b$ —螺旋卷平面编织时其点阵单元的边长, mm  
 $\alpha$ —螺旋卷平面编织时其点阵单元两边所夹锐角, (rad)  
 $W$ —二维毛坯的宽度, mm  
 $L$ —二维毛坯的长度, 即制备三维毛坯时卷绕形成阿基米德螺旋线的弧长, mm  
 $\rho_s$ —实验用不锈钢丝的密度,  $\text{g/mm}^3$   
 $\rho_{MR}$ —金属橡胶材料的密度,  $\text{g/mm}^3$   
 $\bar{\rho}$ —金属橡胶的相对密度,  $\bar{\rho} = \rho_{MR}/\rho_s$   
 $S_s$ —钢丝的径向截面积,  $\text{mm}^2$   
 $L_s$ —构件内部钢丝的总长, mm  
 $V_s$ —构件内部钢丝的总体积,  $\text{mm}^3$   
 $L_{2\pi}$ —每匝螺旋卷的弧长, mm  
 $k$ —钢丝固相体积分数,  $k = V_s/V_{MR}$ , 钢丝在材料中占有的有效体积, 与材料的相对密度  $\bar{\rho}$  相等  
 $S_{MR}$ —圆柱形金属橡胶构件的底面积,  $\text{mm}^2$   
 $H_{MR}$ —圆柱形金属橡胶构件的高度, mm  
 $D_{MR}$ —圆柱形金属橡胶构件的截面直径, mm  
 $H_R$ —圆柱形毛坯的高度, 与二维毛坯宽度  $W$  相等, mm  
 $\bar{H}$ —圆柱形构件冲压时的轴向压缩比, 即  $H_{MR}/W$  或  $H_{MR}/H_R$   
 $V_{MR}$ —圆柱形金属橡胶构件的体积,  $\text{mm}^3$

$N_{FC}$ —单位体积内接触点的数量

$\Delta$ —判定钢丝接触的判据, 阈值, mm

$\varepsilon$ —孔隙度

$\mu$ —摩擦系数

### 脚 标

j—螺旋卷

s—钢丝

R—毛坯

MR—金属橡胶

FC—微动单元

## 引 言

现代工业的发展向人们提出了新的课题。在国防、宇航、船舶等高端技术领域，振动、冲击与噪声问题尤为突出。虽然阻尼材料已广泛地用于航海、航空、机械工程和宇航领域中结构的抗振保护，但由于多数阻尼材料的适用温度范围较窄、耐腐蚀能力有限而限制了其应用。在较差的环境条件下，选用干摩擦阻尼隔振器可适用于较宽温度和具有一定频率范围的结构振动抑制和缓和冲击振动，是结构抗振保护的另一种有效途径。而金属橡胶材料的一些独特的性质正使其能在隔振器中作为干摩擦阻尼元件来使用。

所谓的金属橡胶(Metal-Rubber)材料是一种均质的弹性多孔物质，经特殊的工艺方法，将一定质量的、拉伸开的、螺旋状态的金属丝有序的排放在冲压或碾压模具中，然后用冷冲压的方法而压制成型以及必要的热处理工艺制备而成，因其呈现类似橡胶材料的弹性和阻尼性能，同时保持金属外观行为，故而得名“金属橡胶”。

金属橡胶材料的内部结构是金属丝相互交错勾联形成的类似橡胶高分子结构那样的空间网状结构，在受到振动位移时可以耗散大量能量而起到阻尼作用，因为其本身实是金属而非橡胶，故金属橡胶制品具有承载能力高、大阻尼、可在较宽频带内减振、抗冲击、抗油、抗腐蚀、耐高低温、抗湿、耐老化、不挥发、易维护、可以根据需要制成各种结构形状等优点，特别适合于制备航空航天、国防、机械、交通运输等在特殊工况下的阻尼减振、冲击防护、过滤、密封、噪声控制及热传导等构件，可以用在传统橡胶材料不能使用的有特殊要求的空间飞行器及其它构件上<sup>[1-14]</sup>，以完成弹簧隔振器和橡胶减振、缓冲、阻尼元件无法承担和完成的任务。另外作为金属多孔材料，由于其具有承载能力高、抗堵塞能力强、孔隙度大小随压力变化且连续可调等特点，金属橡胶制品又适用于制备各种节流器和过滤器<sup>[8-12]</sup>。

金属橡胶材料的研制成功，不仅扩大了已有金属材料的适用范围，而且解决了某些构件在特殊工作环境中对材料提出的特殊性能要求，它可以满足国防和空间技术装备上的特殊需要，解决高温、高压、高真空、超低温及剧烈振动等环境下的减振、过滤、密封等问题。金属橡胶材料的弹性和毛细多孔结构同其它多孔材料相比，具有不可比拟的优良特性。由金属橡胶制成的弹性阻尼元件在苛刻条件（超低温、高温、超高真空）下仍然具有十分优良的性能，因此它在各个领域具有广泛的应用前景。

俄罗斯在金属橡胶技术的研究领域中处于领先地位，特别是作为金属橡胶技术发源地的俄罗斯萨玛拉国立航空航天大学，对金属橡胶技术的研究做出了巨大的贡献，如今俄罗斯萨航在金属橡胶技术研究领域取得的研究成果已居世界前列。我国对金属橡胶材

料的研究工作开展的比较晚，近年来这种新型材料在我国才日益获得重视，同时国防工业、民品市场对金属橡胶材料的需求也十分迫切，例如将试制金属橡胶弹性阻尼元件用于某型自行火炮闷体挡杆缓冲装置<sup>[13]</sup>、月球着陆器样机的缓冲腿<sup>[14]</sup>、将金属橡胶与聚四氟乙烯或铜组合制成的金属橡胶密封环用于某型号直升飞机的起落架等。但总体来说，我国在该领域的研究工作尚于起步阶段，国内外对金属橡胶材料的研究探索大多在机械制造和应用以及力学研究领域进行，而基于现代材料科学的研究工作基本上仍为空白，从制备金属橡胶材料的金属丝原材料入手对其进行原材料及工艺方面的研究目前还未见报道。本论文依托所在学科优势拟在此领域做一些探索工作。另外以前的计算机建模多见于干摩擦机理的模拟分析，难以将单个的微动单元的描述与金属橡胶材料的整体阻尼行为结合起来。本文希望借鉴所在学术团队多年来在材料优化设计及计算机在材料学领域中应用方面的研究优势，对MR多孔材料中金属丝在三维空间的排列规律建立数学模型，以实现金属橡胶材料内部结构特征参数化表征，进而建立MR多孔材料的循环脉动加压滞环变形回线、刚度、过滤性能等关键性能与其钢丝材料性能参数及MR材料结构特征参数的定量关系与预报模型，为未来研究异形丝和圆形丝的对比及MR多孔材料材料制备的优化设计以及MR多孔材料的关键性能设计与控制提供依据和必要基础。

# 1 文献综述

## 1.1 金属橡胶材料概述

金属橡胶材料是兼有金属与橡胶双重特性的减振器件。它既能像橡胶那样大量损耗能量，又因为以金属为原料，具有极大的环境适应能力，耐高温、耐低温、耐腐蚀，大阻尼特性不随温度而改变，从根本上弥补了普通橡胶的不足。金属橡胶减振器适应于机载、舰载、弹载、星载仪表和重型民用设备的减振保护，适应坦克、火车减振台等恶劣环境中的减振器件。用金属橡胶技术开发的多种产品可代替现有减振器，克服现有的减振器件易挥发、储存时间短、易老化、温度范围窄等缺陷。金属橡胶减振器及其金属橡胶技术具有广阔的应用前景。

### 1.1.1 金属橡胶材料简介

金属橡胶是橡胶的模拟制品，用金属螺旋细丝压制而成。具有疏松的金属结构，其内部呈网状、类似天然橡胶的大分子结构。在交变的应力应变作用下能消耗大量的振动能量，其阻尼特性与施加于其上的应变有关。对大振幅运动阻尼很大；而对小振幅运动阻尼适中。阻尼比达 0.2~0.3。其刚度特性也随振幅增加呈现线性-软特性-硬特性变化的非线性特性。可以说金属橡胶是一种具有高弹性和良好阻尼特性的疏松结构材料，其比重仅为金属的 0.3 左右。

金属橡胶产生于 70 年代初期的原苏联，是一种均质的弹性多孔材料，其内部结构是金属丝之间相互嵌合、勾联而形成的类似于橡胶分子结构的网状空间结构。当受到外界振动位移影响时，金属丝之间产生滑移，由此产生的干摩擦力耗散了大量能量而起到阻尼作用。由于金属橡胶材料可以耐高温、高压、高真空、超低温，在空间环境下不蒸发，不怕空间辐射和粒子的撞击，选择不同的金属还可以工作在腐蚀环境中，不产生老化现象<sup>[15]</sup>，因此，由其制成的各种元件不仅可以工作在上述苛刻的环境下，并且在该环境下仍然保持十分优良的性质，能够满足国防用空间飞行器上的特殊需要及某些在特殊工作环境中对构件材料提出的特殊要求。以其代替橡胶做减振、阻尼和密封件对提高航空航天产品的寿命、可靠性和性能有很大好处。其干摩擦阻尼特性可以用“宏观滑移”和“微观滑移”来描述，它们分别用来表征材料表面之间相互滑移粘结及接触区内部分接触点滑移部分接触点粘结的情况<sup>[16]</sup>。

资料表明，外界载荷的不同状态<sup>[17]</sup>，即不同的大小、不同的作用方向、不同的变化过程，都将对材料的干摩擦阻尼特性产生一定的影响<sup>[18]</sup>。

用金属橡胶制成的减振、隔振元件，特点是体积小、重量轻，可做成用于多轴减振隔振器，适用于各类电子仪器，动力设备和管路的减振动隔振，尤其适用于航空、航天、航海、化工等恶劣环境下使用。金属橡胶是全金属材料，可以在高、低温、腐蚀环境下工作，没有老化问题。同时由于金属橡胶具有毛细疏松结构，它除了可以用于减振以外还可以应用于降噪、过滤及热管系统。

金属橡胶材料具有材料性能（钢丝的材料性能）、物理性能、力学性能和化学性能等四大性能，可以用图 1.1 来表示。

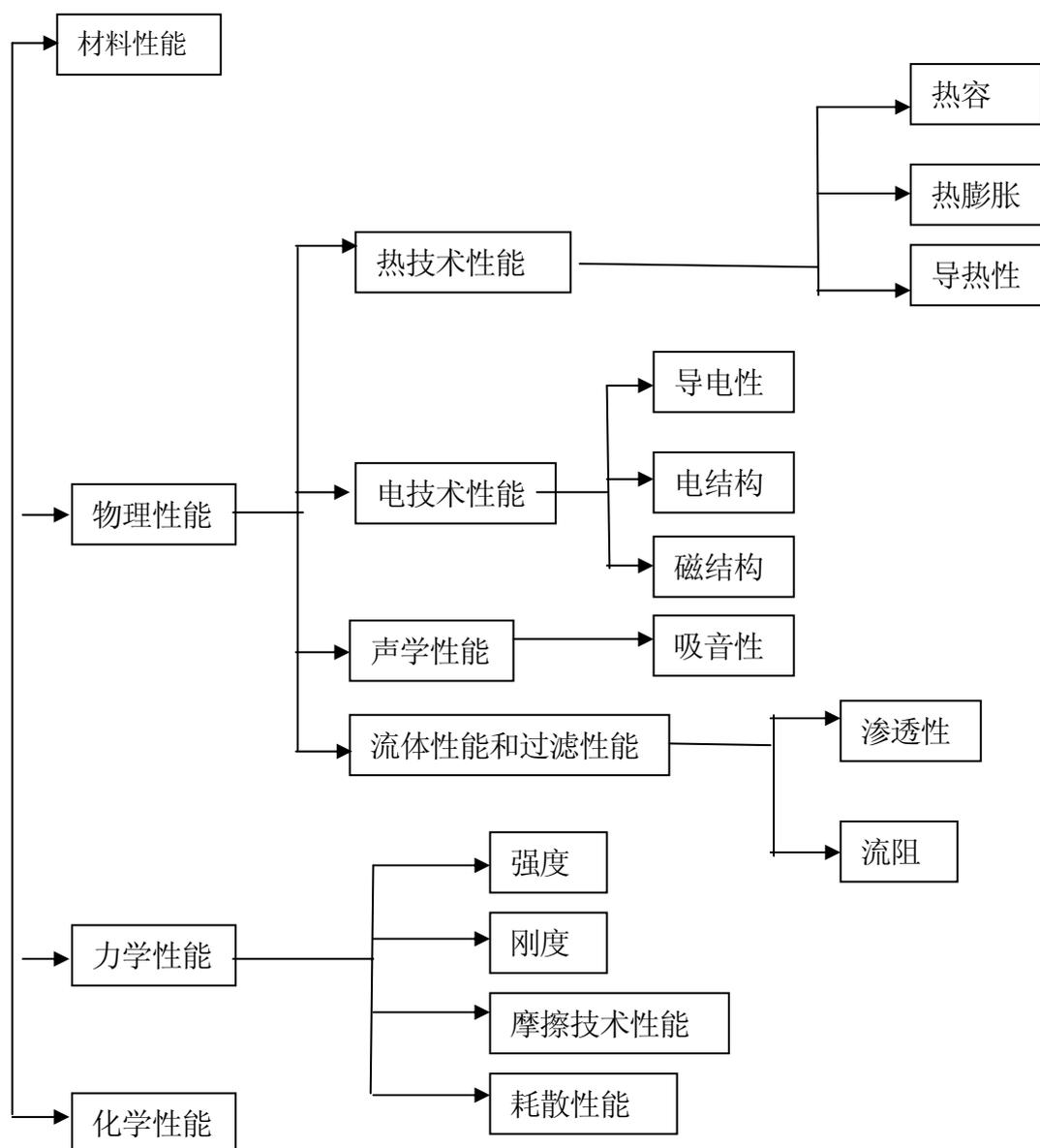


图 1.1 金属橡胶材料的性能

### 1.1.2 金属橡胶材料的制备

金属橡胶是一种均质的弹性多孔物质，原材料是金属丝，用一定的方法将质量配好的拉伸开的螺旋状态的金属丝堆放好，然后用冷冲压工艺成型<sup>[19]</sup>，其主要制备工艺流程如下：

#### ① 金属丝的选择

制造金属橡胶的重要原材料为金属丝，具体化学成分由工作条件(如温度、湿度、侵蚀性介质、载荷等因素)决定。目前使用和研究最多的金属丝材料是奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 和 0Cr18Ni9Ti。

#### ② 确定金属丝的牌号和直径

作为金属橡胶的最基本单元，丝线的弹性模量与强度同时要求有较大的值，这两个参数直接影响金属橡胶的力学性能，弹性模量决定材料的刚度，强度大但弹性模量低的材料不适合作为结构材料使用，因为对零件施加载荷时，由这种材料制成的结构有很大的残余变形。合理选择丝线的牌号在制造金属橡胶元件的过程中处于重要的地位。丝线的直径取决于制品的尺寸及所要求的零件具有的力学性能。通常来讲金属丝的直径范围是 0.05~2 mm，多数实际条件下使用直径为 0.3 mm 左右的丝线<sup>[19]</sup>。

#### ③ 螺旋卷缠绕

制造金属橡胶件所用的螺线卷是构成金属橡胶件的基本单元，直接关系到产品最终的性能，螺线卷是金属丝在滚轮和锥形型芯之间经碾压而成的，其形成原理见图 1.2 (a)。在缠绕过程中，缠好的每匝螺线在丝线弹性恢复力的作用下其直径增加，从而能自由地离开后续线圈所在的型芯位置，保证了能连续地在同一选定直径处缠绕螺线卷。图 1.2 (b) 即为实际缠绕的螺旋卷照片。在实际生产中螺旋卷的直径选取为金属丝直径的 10—15 倍。

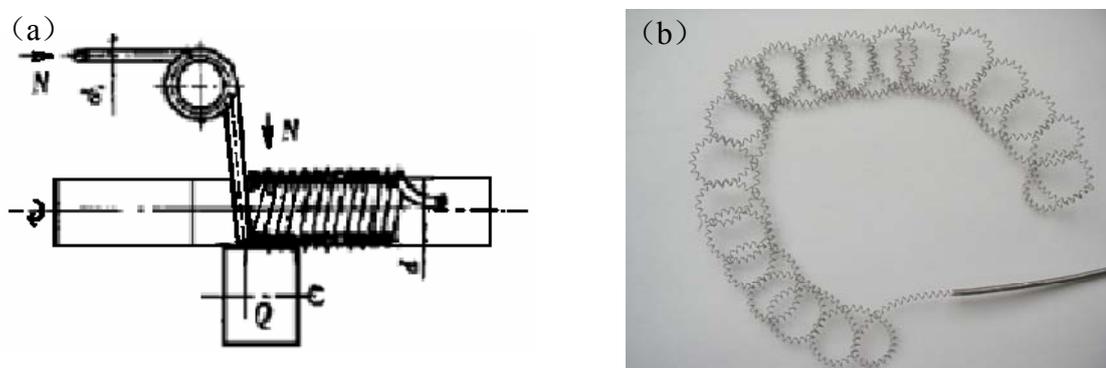


图 1.2 螺旋卷制备 (a) 缠绕; (b) 拉伸

#### ④ 制造毛坯

将缠绕好的螺旋卷拉伸使其螺距和螺旋卷直径大致相等，这个过程尚需要人工完成。然后根据成型后构件的受力特点将拉伸后的螺旋卷沿着模具横向、纵向、或者择优受力方向排列铺放，得到金属橡胶坯料。金属橡胶零件尺寸、孔隙度和力学性能很大程度上与坯料的铺设方向有关。

#### ⑤ 冲压与碾压

制得的金属橡胶毛坯塞入冲压模具中，经冲压达到所要求的几何外形和性能。冲压是经多次循环加压情况下完成的。对于隔振器弹性阻尼件，压制时要叠加振动，振动强度为实际工况振动强度的  $1/6 \sim 1/2$ 。为使金属橡胶制件工作在  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的环境中，在初步冲压后对材料进行热稳定性处理。

#### ⑥ 后期处理

金属橡胶件后期处理主要取决于工作环境和特殊使用性能。压制过程中产生的金属屑和污物等杂质会影响金属橡胶的最终性能，故一般都要进行清洗。对无特殊要求的元件可以用清洁剂清洗，对于弹性阻尼件一类的元件，要采用超声波清洗才行。为调整制件的硬度和塑性，必要时要对制件进行热处理。如有耐腐蚀的工作要求，则要涂敷保护膜<sup>[19]</sup>。

整体来说，目前我国金属橡胶材料的制备工艺还处于相对落后状态，机械化程度比较低，主要工艺参数依靠经验积累，产品质量稳定性不高。在改进金属橡胶材料制备方面还有大量工作要做。

### 1.1.3 金属橡胶材料的应用

由于金属橡胶材料是一种弹性、多孔结构，其内部是金属丝的相互嵌合、勾联，在受到来自外部的振动、冲击时，金属丝之间发生滑移，靠由此产生的金属丝间的摩擦力来耗散振动或冲击能量。同时，金属橡胶材料的毛细多孔性使它能够作为阻尼元件工作在流体介质中，当通过金属橡胶材料的介质压力骤增时，材料产生变形，其内部的毛细孔有效面积相应减小，且滑动的金属丝接触面积增加，不仅缓和了介质压力的骤增，也耗散更多的能量。金属橡胶材料制的阻尼减特性已经作为其一种主要性能广泛地应用于各种缓冲减振装置中。例如，在俄罗斯HK-89型火箭发动机的转子弹性阻尼支承结构中也采用了金属橡胶材料作为阻尼元件<sup>[15]</sup>；我国某型自行火炮闩体挡杆缓冲装置也对其加以应用<sup>[13]</sup>。除此以外，金属橡胶材料还作为过滤材料、多孔材料、密封材料在节流、轴承、医学等民用领域得到了广泛的应用<sup>[1-18, 20-25]</sup>。

金属橡胶材料的主要用途概括起来有阻尼、隔振、密封、过滤、节流等几方面。具体有：

A. 减振、防振、热防护及噪声吸收方面的应用：

a) 阻尼器、减振器：如用于弹性吸收毡结构、弹性波形阻尼器、阻尼可调的阀门装置套筒、流体力学阻尼器的防冲击垫；

b) 隔振器中的弹性阻尼元件；

c) 噪声吸收：作为多孔垫片降低管路配件的振动和噪声问题；

d) 热防护：作为散热壳体。

B. 金属橡胶过滤装置：其具有有效孔隙度、能根据轴向改变自身透过性等独特性质决定了可将其作为新型过滤元件；

C. 在轴承工业中的使用：利用其具备弹性和多孔性的双重优点；

E. 在气液燃料组件的元件和装置中的应用：可做密封件、节流垫圈、阀减压装置；

F. 用金属橡胶材料制成的热交换装置中的热管芯衬金属橡胶热管可使不同化学性质的热载体在其中流动；

G. 可除掉金属表面和导管内表面的腐蚀、溶胶灰、油污及其它结层：可清洁炊具（尤其可用在低温和腐蚀介质中）、零件的外表面（可防腐蚀和焊接缺陷）等；

H. 可用于其它科技领域，具有广泛的前景：

a) 在大污染工作介质中作为刷式新型密封件使用具有更高的可靠性和使用寿命；

b) 金属橡胶催化器可减少催化器结构的金属含量，用冷压法还可以获得任何外形的催化器；

c) 可用于低温时装置和仪表的测量以及制造敏感机构的结构；

d) 应用于医学，特别是制造高精度薄壁零件；

e) 解决导管内表面与液体绕流物体（具有金属橡胶弹性外壳）的外表面清除问题能大大改善物体的声学 and 流体力学特性；

f) 金属橡胶制品的无废渣压制技术；

g) 可制造成金属橡胶滚体的球轴承和柱轴承；

h) 用带有金属橡胶覆盖的钢筋金属橡胶材料制造多件装备是极有前景的。

综上所述，随着对金属橡胶的研究工作进一步深化，以及金属橡胶制品发展的多样化，金属橡胶的应用规模和领域将大大扩展，对其进行工艺和理论研究将具有重大的战略意义及不可估量的经济价值。

## 1.2 国内外对金属橡胶材料的研究现状

金属橡胶作为一种新型的结构阻尼减振材料，在国外的文献杂志上极少看到对其理论研究的文章发表，主要是由于该领域的研究目前在西方国家尚处于技术保密阶段。俄罗斯在金属橡胶的研究领域处于领先地位。目前，俄国已有近 30 余个专门从事金属橡胶研究的院所，其研究的金属橡胶构件在空间飞行器上的应用获得了巨大成功，俄罗斯的空间载人飞船的返回舱中，许多仪表板采用的就是利用金属橡胶技术制成的减振器进行减振，在俄罗斯的军用飞机苏-27 的发动机上的外部管路减振器也是用金属橡胶制成的减振器。

萨玛拉国立航空航天大学的学者对金属橡胶的研究做出了巨大的贡献。俄国在其它国家的刊物中关于金属橡胶的论文总数超过 200 篇；座谈会、学术讨论及国际会议上的报告论题超过 100 项，其中关于金属橡胶的发明仅萨玛拉大学就有 100 余项，这些发明占据金属橡胶结构研制领域全部发明的 80%。

随着科研工作开展的开展，金属橡胶材料优异的性能日益引起我国研究机构的高度重视，例如，我国正在研制的载人航天器仪表板缓冲垫就是用金属橡胶制作的，国家 863 项目“某液氢液氧补燃发动机”中，发动机涡轮泵转子是在超临界状态下工作的柔性转子，为了避免出现美国航天飞机主发动机(SSME)涡轮泵和日本LE-7 发动机涡轮泵的强烈破坏性振动，采用了由金属橡胶制成的阻尼弹性支撑设计方案<sup>[25]</sup>。但我国对于金属橡胶的研究起步较晚，目前，西安交大<sup>[25-38]</sup>、北航<sup>[39-49]</sup>、哈工大<sup>[50-67]</sup>和军械工程学院<sup>[67-78]</sup>、北京科技大学等大学均已开始了对金属橡胶制品理论与实验的研究工作。

从上述研究情况以及文献资料中都可看出，目前国内外对金属橡胶材料的研究多集中于其制造方法和隔振阻尼性能方面，而基于材料科学原理和方法、运用现代材料科学知识，从制备金属橡胶材料的金属丝及其空间分布结构开始对其进行研究分析、并总结与其宏观优异性能的相互关系基本仍为空白，而金属丝本身的性能及其在空间的分布形式对于金属橡胶制品的影响又是不容忽视的，因此本论文的研究工作具有非常重要的意义。

### 1.2.1 对金属橡胶材料制备工艺的研究

石家庄军械学院对金属橡胶材料制备工艺方面的研究报道较多，他们还自行设计制造了绕丝、模压设备，对于金属橡胶技术的国产化作出了突出的贡献。哈尔滨工业大学的学者也在此方面做了大量工作，他们甚至还研究了不同工艺参数，例如簧丝走向对金属橡胶材料性能的影响，通过改变簧丝走向,获得结构相同、几何参数相同的几组金属橡胶样件，并对样件进行了力与变形实验研究。利用MATLAB 绘制金属橡胶样件的弹性

迟滞回线、刚度与变形实验曲线,并对样件和实验曲线进行了理论分析。结果表明,簧丝缠绕方向不同,不仅影响金属橡胶材料的能量耗散性能,而且其承载能力相差 2~3 倍<sup>[54,61,65]</sup>。研究结果为金属橡胶制备工艺的进一步完善提供了依据。

从目前金属橡胶材料的制造工艺过程来看,难于控制的环节较多:如缠绕的金属螺旋径,在单位长度上很难保证完全相同;在编织挤压过程中,也很难保证金属丝编排分布的均匀性,这些都具有一定的分散度。因此,对于成品件的试验值和理论值会存在一定的误差。如果控制好制作过程中的各个环节,提高金属橡胶材料的制造工艺水平,对于更好地设计和利用金属橡胶材料,将会有非常好的工程实用价值。

通过查阅文献我们发现在金属橡胶制备工艺中也存在一些问题:总体上讲,机械化程度不够高,有些环节如拉开簧丝使其螺距略等于簧径、绕丝制造毛坯过程还依赖人工完成,重复性和产品稳定性都很难保证,另外对于丝材的选择大多数情况下还依靠经验的积累或者查阅国外文献,没有形成独立的科学选材体系,更谈不上根据构件服役条件去优化相应的拔丝工艺,今后如果能有更多材料学领域的研究者介入该领域,相信对于以上这些问题都会有较好的解决。

### 1.2.2 对金属橡胶材料结构参数与关键性能关系的研究

金属橡胶是一种新型的阻尼材料,影响其特性的参数很多,可以设计的参数有丝材、丝径、螺旋径、金属丝密度、金属橡胶材料密度、初始螺旋角;可以设计和调节控制的参数有相对密度、螺旋角的变化等。一般来说螺旋直径是金属丝直径的 10—15 倍,当保持其他参数不变,只改变其中一个参数时,就可以得到这个参数金属橡胶材料应力—应变特性的影响。北京航空航天大学的马艳红等学者做了一些这方面的工作<sup>[42,45]</sup>,他们认为:随着金属丝径的增加,非线性弹性模量也增加,以线性段和硬特性段增加的较多,随着金属丝径的增加,其硬特性特征越明显;随着螺旋径的增加,非线性弹性模量降低,以线性段和硬特性段降低的较多,螺旋径越小,硬特性特征越明显;金属丝的材质对金属橡胶材料性能的影响也很大,丝材越硬、刚度越高、丝材本身的弹性模量越高,从而金属橡胶材料的非线性弹性模量越高,硬特性特征也越明显,金属橡胶材料的非线性弹性模量以线性段和硬特性段的变化较大;而金属橡胶材料相对密度的增加,非线性弹性模量也增加,这个变化量主要来自于线性段和软特性段,也就是说金属橡胶材料在受载荷作用后,这个变化量主要发生在挤压阶段前,而进入挤压阶段后,非线性弹性模量的增加不明显,硬特性特征也没有明显的改变。

金属橡胶的力与位移的关系有线性—软特性—硬特性的变化特点。金属橡胶减振器的刚度和阻尼特性与变形有关。当振幅不断改变时,减振器会呈现不同的刚度和阻尼特

性。在振幅很小时，金属橡胶材料中的金属丝之间不发生滑移，仅仅是金属橡胶材料中螺旋弹簧自身的受载变形，其刚度几乎不变阻尼也小。当振幅增大时，金属橡胶材料中的螺旋弹簧相互接触，并有滑移现象发生，使得刚度下降，阻尼也增大。由于接触滑移而产生摩擦，因而产生阻尼耗散能量。当振幅继续增大时，金属橡胶材料中的螺旋弹簧相互接触挤压滑移现象减小，刚度增大。这就是金属橡胶阻尼器的减振机理。

许建东<sup>[46]</sup>等研究者通过对金属橡胶材料进行振动特性实验，总结了不同激励水平、不同相对密度以及不同材质对其振动特性的影响。在考虑非线性刚度和非线性阻尼的基础上，给出了描述金属橡胶材料动态特性的方法，进行了稳态振动响应计算，并与试验结果进行对比，结果表明：振动越大金属橡胶的减振效果越好。

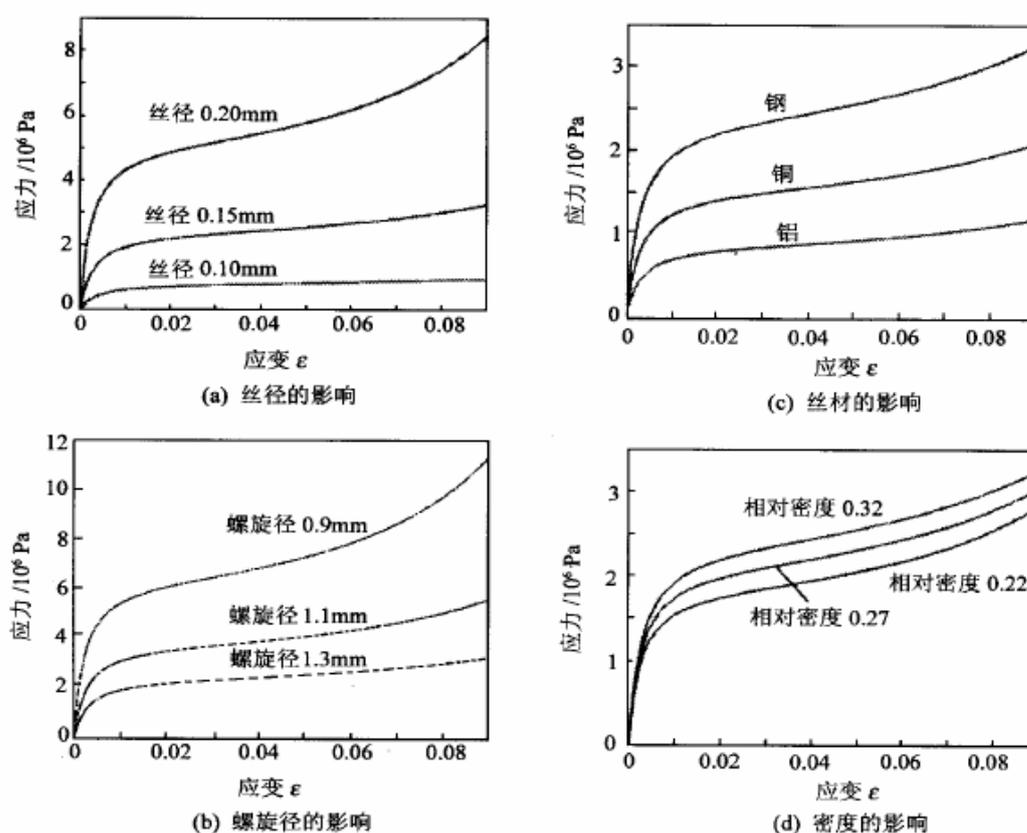


图 1.3 不同工艺参数对金属橡胶应力—应变曲线的影响<sup>[46]</sup>

中外文献在对于金属橡胶隔振和阻尼性能方面的研究，而对该材料在其他领域应用的技术性文章不太多见，哈尔滨工业大学的夏宇宏等研究了 0Cr18Ni9Ti 金属橡胶多孔材料的气体渗透性<sup>[8-10]</sup>，认为金属橡胶材料应用于制备节流元件，其较高的承载能力、抗

堵塞能力及节流孔隙随压力连续可调性能是其它多孔材料所无法比拟的。文中对金属橡胶多孔材料的基本性能进行了实验研究,测量了具有不同丝径、不同结构尺寸的金属橡胶多孔材料的最大孔隙直径和平均孔隙直径。得出了最大孔隙直径、平均孔隙直径与孔隙度、金属丝直径和液压直径之间的关系。

### 1.2.3 金属橡胶材料的建模和仿真研究

为了进行减振系统的动力学设计和动力学优化,需要建立金属橡胶材料的动态力学模型。由金属橡胶材料构成的迟滞非线性系统,其建模方法通常有非参数模型和参数模型,采用正交多项式逼近非线性力的非参数模型<sup>[79-80]</sup>不含系统参数,物理意义不明晰;属于参数模型的双折线模型<sup>[28-31]</sup>,用微分方程描述迟滞系统的恢复力,但是各个参数的物理意义不够明确,其微分形式不利于系统识别,较难用于分析迟滞系统的稳态响应。石家庄军械学院的李宇明等人提出了一种能综合反映金属橡胶动态力学性能的新方法,建立了金属橡胶材料的动态模型<sup>[77]</sup>。他们认为金属橡胶的阻尼分为两类:内部微元弹簧接触面之间的摩擦力所引起的阻尼归结为结构阻尼;另一方面由于部分金属丝之间的滑移和扭转变形不能完全恢复,产生永久性变形,表现为粘性阻尼。因为对金属橡胶材料内部微元弹簧之间接触点的数量和接触面之间的摩擦力没有充分了解,在考虑结构阻尼时采用等效粘性阻尼的方法<sup>[81]</sup>。采用高阶非线性多项式表示的非线性弹性恢复力和等效粘性阻尼力叠加的方法构造的金属橡胶动态模型,可以比较准确地描述金属橡胶材料在减振系统中的迟滞恢复力,滞后曲线的形状与振幅和频率有关,随着激振频率的增加,阻尼系数表现出递增趋势;在振幅较小时,金属橡胶材料表现为粘性阻尼特性,随着振幅增加,逐渐转变为结构阻尼特性。

由于金属橡胶主要依靠内部金属丝之间相互摩擦消耗大量能量而起到减振作用,因此对于单个微动单元的简化建模分析尤为重要,如北京航空航天大学邓建波提出的小曲梁受力模型<sup>[44]</sup>。

北京航空航天大学的陈艳秋、郭宝亭<sup>[42]</sup>做了金属橡胶减振垫刚度特性和本构关系的研究,详细分析了密度、厚度、丝材对其刚度曲线的影响。由于金属橡胶由金属丝经过螺旋成型拉长,相互缠绕模压而成的,金属丝在其成型受压面上基本为平行分布,因此根据文献<sup>[44]</sup>提出的小曲梁受力模型,建立了金属橡胶弹性计算所必须的基本参数的关系式,以描述金属橡胶的变形性能。如图 6 所示, Z 向即为受压方向。根据虚功原理,弹性体的变形能  $U$  等于外力对它所作的功  $W$ , 其中:

$$U = \int_l \frac{T^2(s)}{2GI_p} ds + \int_l \frac{M^2(s)}{2EI} ds \quad (1.1)$$

$$W = \frac{1}{2} * F_z \Delta_z \quad (1.2)$$

根据小梁模型，可以写出其弯矩、扭矩表达式，于是得出力与位移的关系：

$$F_z = \frac{ED^4}{4(4+3\mu)D_c^3} \cdot \Delta_z = K_{zi} \cdot \Delta_z \quad (1.3)$$

其中： $D$ 为金属丝的直径， $E$ 为金属丝的弹性模量， $D_c$ 螺旋直径， $\Delta_z$ 为 $Z$ 向位移。

$K_{zi} = \frac{ED^4}{[4(4+3\mu)D_c^3]}$ 为微弹簧在 $Z$ 方向的刚度系数。

假设在单位面积上有  $n$  个这样的微元弹簧，在单位长度上有  $m$  层弹簧，每层上的小弹簧相互关系为并联，其总的有效刚度为：

$$K_{zj} = \sum_{i=1}^n K_{zi} \quad (1.4)$$

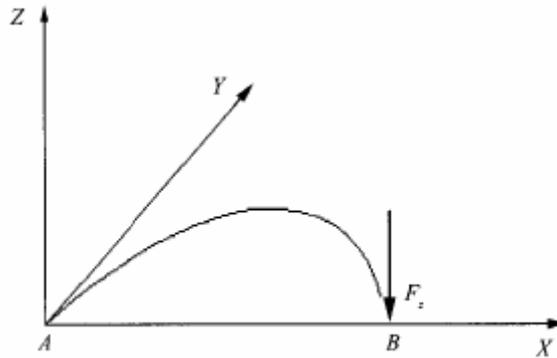


图 1.4 金属橡胶中小曲梁受力模型<sup>[44]</sup>

各层之间的弹簧为串联关系，根据弹簧理论<sup>[81]</sup>其总的等效刚度为：

$$K'_{zj} = \frac{\prod_{j=1}^m K_{zj}}{\sum_{i=1}^m \prod_{j \neq i} K_{zj}} \quad (1.5)$$

虽然各微元弹簧的形态各不相同，一般刚度系数也不同，但总的来说存在一个统计上的平均值，假定以平均值作为微元弹簧的刚度系数，则

$$K_{zj} = nK_{zi} \quad (1.6)$$

$$K'_{zj} = \frac{K_{zj}^m}{mK_{zj}^{m-1}} = \frac{K_{zj}}{m} = \frac{nK_{zi}}{m} \quad (1.7)$$

因此金属橡胶的力和位移的关系是：

$$F_z = K'_{zj} \cdot \Delta_z = \frac{nK_{zi}}{m} \cdot \Delta_z \quad (1.8)$$

对于单位体积的金属橡胶，金属橡胶的本构关系为：

$$\sigma = \frac{nK_{zi}}{m} \cdot \varepsilon \quad (1.9)$$

设金属橡胶的密度为  $\rho_j$ ，金属丝材料的密度为  $\rho$ 。则体积为  $V$  的金属橡胶内总的弹簧螺旋卷数量为：

$$M = n \cdot m = \frac{L}{\pi D_c} = \frac{4\rho V}{\rho \pi^2 D^2 D_c}$$

或者  $M = (4/\pi^2) \cdot (\bar{\rho}/D^2 D_c)$ ，其中  $\bar{\rho} = \rho_j / \rho$

单位面积上的螺旋圈数  $n = \sqrt[3]{M^2}$ ，层数  $m = \sqrt[3]{M}$ 。那么金属橡胶的本构关系可以写成：

$$\sigma = \frac{1}{4(4+3\mu)} \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2}} \cdot E \sqrt[3]{\left[\frac{D}{D_c}\right]^{10}} \bar{\rho} \cdot \varepsilon \quad (1.10)$$

由金属橡胶试件的试验结果表明其应力—应变（或者力—位移）关系是非线性的：应变小时近似线性特征，较大时呈软特性。应变很大时为硬特性。这是因为金属橡胶中相互缠绕接触，当变形量小时，变形力不足以克服摩擦，主要起弹簧的作用，表现为应力—应变关系近似线性。随着位移增加，微元弹簧之间产生滑移使得刚度变小，表现为软特性，当位移（外力）继续增加，由于挤压作用使得微元弹簧失去部分弹性，甚至某些部分的微元弹簧被压死而失效，此时呈硬特性。根据试验和上述分析，对金属橡胶的本构关系式（10）作修正：应力—应变关系是三次曲线，即：

$$\sigma = AE \cdot \sqrt[3]{\left[\frac{D}{D_c}\right]^{10}} \bar{\rho} \cdot \varepsilon + BE \cdot \sqrt[3]{\left[\frac{D}{D_c}\right]^{10}} \bar{\rho} \cdot \varepsilon^2 + CE \cdot \sqrt[3]{\left[\frac{D}{D_c}\right]^{10}} \bar{\rho} \cdot \varepsilon^3 \quad (1.11)$$

其中 A, B, C 为系数，由实验获得。该本构关系可以直接反映出制作金属橡胶的材料及其丝径、密度、螺旋直径、金属橡胶相对密度的影响，是目前来看比较完善的本构关系，但是在这个模型当中微元弹簧这个概念不够清晰，另外没有考虑微元弹簧之间相互倾斜的位置关系所造成的影响。

军械工程学院的李冬伟等<sup>[68,74]</sup>作了金属橡胶弹性元件实验建模研究，基于电液伺服材料试验机精确的位移加载控制，对圆环形金属橡胶弹性元件进行了静态和动态力学试验，结果表明金属橡胶材料具有明显的高次弹性非线性以及迟滞非线性特性，根据动态试验结构建立了迟滞回线拟和分解的高次弹性复合阻尼模型，该模型用非线性刚度和非线性复合阻尼机理构造，模型中的参数由试验数据辨识。用所建模型重构恢复力—位移迟滞回线，结果表明，该模型能很好描述这类非线性振动系统的特性，为进一步实验建模提供了理论依据。哈工大与萨马拉国立航空航天大学的学者提出了一种利用静态实验数据建立数学模型，求解隔振系统的运动微分方程，并根据方程的数值解分析金属橡胶隔振系统的动静态特性<sup>[55]</sup>，这些工作为研究隔振系统的动静态特性提供了新的思路。

#### 1.2.4 目前存在的问题

由于金属橡胶材料的研究多属于军工或敏感领域的项目，前苏联、美国对金属橡胶的研究成果都严密封锁，因此过去我国科技工作者对金属橡胶技术知之甚少。随着前苏联的解体及中俄技术交流的增多，越来越多的中国学者认识到金属橡胶技术的重要价值并致力于该项技术的研究开发。目前国内只有为数不多的几个高校院所从不同角度对金属橡胶技术进行研究，且大多在机械领域进行，研究成果难于满足实际需求，而原材料

的成分、性能、结构等都与金属橡胶的特性有重要关系，因此有必要从材料学角度对其进行较深入的研究。

### 1.3 金属橡胶材料的材料学问题概述

因为金属橡胶材料本质是由细金属丝勾联缠结而成的，研究金属橡胶材料的材料学问题，就是研究构成金属橡胶的金属丝的材料组织和性能。目前制备金属橡胶材料大多是使用奥氏体不锈钢丝作为原材料经过编织等技术制备而成的，因此金属橡胶材料的材料学问题主要就是研究奥氏体不锈钢丝的材料学问题。

#### 1.3.1 18-8 系奥氏体不锈钢概述

在通常的铬镍奥氏体不锈钢中，锰含量一般规定不超过 2%，正常生产中控制在 1.5%左右。而在近期发展的节镍不锈钢中，锰是非常重要的合金元素，其主要作用是与氮、镍等强烈形成奥氏体的元素复合加入到钢中，以节约奥氏体不锈钢中的镍。

铬是奥氏体不锈钢中最主要的合金元素。奥氏体不锈钢的不锈性和耐蚀性的获得主要是由于在介质作用下，铬促进了钢的钝化并使钢保持稳定钝态的结果。镍是奥氏体不锈钢中的主要合金元素，其主要作用是形成稳定奥氏体，使钢获得完全奥氏体的组织，从而使钢具有良好的强度和塑性、韧性的配合，并具有优良的冷、热加工性和冷成形性以及焊接、低温与无磁等性能；同时提高奥氏体不锈钢的热力学稳定性，使之不仅比相同的铬、钼含量的铁素体、马氏体等类不锈钢具有更好的不锈性和抗氧化性、还原性等介质的性能<sup>[87]</sup>。

#### 1.3.2 18-8 系奥氏体不锈钢冷变形强化机制

细丝一般指直径不大于 0.50mm 的钢丝。不锈钢细丝主要用在织网、制绳和弹簧三个方面。金属橡胶材料正是用这种不锈钢细丝为原材料制成的。一般应用于石油、化工、能源等行业的奥氏体不锈钢都要求有极强的耐腐蚀性，所以采用高铬、高镍，甚至添加钛元素以确保形成稳定的奥氏体组织，然而制备金属橡胶时我们希望得到高强度的细金属丝，因而考虑选用亚稳态的奥氏体不锈钢。

这是因为亚稳态的奥氏体不锈钢在冷变形时通过强烈的加工硬化可以提高强度，强化原因有两个方面：一是变形导致亚结构的细化，其二是钢中不稳定的奥氏体由于形变诱发了马氏体转变<sup>[88-94]</sup>。毛萍莉研究1Cr18Ni9Ti不锈钢丝的微观组织发现：随着变形量的增加，奥氏体晶粒逐渐变小，变形层错逐渐增多。当变形量大于60%时，已经分辨不清奥氏体晶粒边界了。而且当变形量大于30%时组织中开始出现黑色的、圆形的形变马氏体，随着变形量增加，形变马氏体的数量不断增加，尺寸在不断减小。当变形量达到97%时，形变马氏体几乎占了一半<sup>[93]</sup>。

马氏体相变的主要特征有二：一是相变过程必定发生切变；第二，在相变过程中不允许系统中产生原子扩散，因此马氏体相变过程中，新相马氏体点阵组成是由母相晶格中的原子集体有规律的迁移完成，而不需要成分的变化。切变既要产生新点阵，又要保持新相同母相在界面上的连接，其结果不仅要产生形变，而且必然有明显的晶体几何关系，如惯习面、切变系统和位向关系等。

马氏体相变有其固定的开始转变温度 $M_s$ 点，即奥氏体在冷却时自发转变为马氏体的温度，由于马氏体相变时，基体要产生均匀的切变，外加应力（应变）有助于马氏体的形成，通过冷加工能诱发产生马氏体的最高温度称为 $M_d$ 点，它一般比 $M_s$ 点要高。 $M_s$ 和钢成分的经验公式如下<sup>[94]</sup>：

$$M_s(^{\circ}\text{C})=1305-41.7\text{Cr}-61.1\text{Ni}-1667(\text{C}+\text{N})-33.3\text{Mn}-27.8\text{Si} \quad (1.15)$$

式中化学符号表示元素的重量百分数，适用的成分范围如下：

Cr10~18%；Ni6~12%；C0.004~0.12%；Si0.3~2.6%；Mn0.6~5%；N0.01~0.06%。

在形变应力作用下，奥氏体的稳定性降低，部分地转变为形变诱发马氏体，经拉伸30%的形变诱发马氏体转变温度的计算公式如下<sup>[94]</sup>：

$$M_d30(^{\circ}\text{C})=413-9.5(\%\text{Ni})-13.7(\%\text{Cr})-8.1(\%\text{Mn})-9.2(\%\text{Si})-18.5(\%\text{Mo})-462(\%\text{C}+\%\text{N}) \quad (1.16)$$

许淳淳<sup>[95]</sup>在低温（-70℃）下拉伸1Cr18Ni9Ti亚稳态奥氏体不锈钢，发现形变诱发产生了 $\alpha'$ 马氏体和 $\epsilon$ 马氏体，并且认为随着变形量的增加， $\alpha'$ 马氏体的含量逐渐增大，而 $\epsilon$ 马氏体含量基本维持稳定在2~3%，文献[92]指出：塑性变形诱发马氏体相变的顺序是 $\gamma-\epsilon-\alpha'$ ， $\epsilon$ 相是 $\gamma$ 相转变成 $\alpha'$ 相的中间相。由于 $\epsilon$ 相含量基本上不随变形量而变化，而 $\alpha'$ 马氏体是铁磁相，如果我们用铁素体测量仪测出铁磁相的含量就可以定量获得形变诱发 $\alpha'$ 马氏体相的含量，这为我们测定马氏体转变量随着冷变形量变化曲线提供了新的思路。

### 1.3.3 18-8系不锈钢准微丝结构特点对其疲劳性能的影响

金属橡胶作为阻尼、减振材料大多应用于航空、航天、武器等重要领域，因此它的疲劳寿命问题一直是大家关注的焦点。在前期的不锈钢准微丝微观组织观察实验工作中我们发现金属丝中有直径约1 $\mu\text{m}$ ，长度几十 $\mu\text{m}$ 大小的孔洞，我们推断这是由于钢中的夹杂物、碳化物、先期形变诱发形成的马氏体等硬度较高的第二相在连续变形时不能

随着塑性相对较好的基体—奥氏体协调变形的结果。这些孔洞的产生有三个方面的意义:

一方面会对用冷拉拔工艺生产直径更小的微丝增加难度;这一点已经在一些文献研究中得到证实<sup>[96-98]</sup>。软态工业用金属丝材一般是指以 304、304L、316、316L 等材料制造,丝径小于 0.1 mm 的微丝,金属橡胶用金属丝的直径一般为 0.1~0.5 mm,因而可以称之为微丝。从理论上讲,只要增大钢丝冷拔时的总减面率,就可以得到高强度的微钢丝,但是在实际操作中因为受到多种因素的制约,难度很大,钢丝被拉拔到一定程度之后,断丝率就会提高,这种现象从侧面说明了硬质颗粒在拉拔后可能会在基体上留下孔洞。拉拔道次之间合理的退火工艺能够改善微丝的质量,并且有利于获得直径更小的、盘重(单丝长度或重量)更大的微丝<sup>[97]</sup>。

另一方面这些孔洞相当于许多微裂纹将对构件的疲劳寿命带来影响,应当引起足够的重视。奥氏体不锈钢丝在被拉拔到不同直径时,随着变形量的增加,由于形变强化和形变诱发马氏体转变,其强度不断增加,有研究表明当累计变形量达到 97% 时钢丝的强度可达到 2000 MPa<sup>[88]</sup>,如此高的强度必然导致极高的缺口敏感性,这就对不锈钢丝的表面质量提出了很高的要求。金属橡胶作为阻尼、减振构件使用时受到冲击或周期载荷的作用,如果金属丝内部有相当数量的孔洞(微裂纹),必然会急剧降低构件的疲劳寿命,因而设计冷拉拔道次之间合理的热处理工艺或者开发新的制丝工艺尤为重要。例如天津大学的李善有研究了改进 18-8 型亚稳奥氏体不锈钢丝的加工方法,认为把温加工和冷加工适当配合的复合变形处理能够使强度达到完全冷变形的水平,同时保持了较好的塑性和韧性,复合变形处理还能提高 18-8 型亚稳奥氏体不锈钢的耐孔蚀性和疲劳性能,获得较好综合性能的弹簧<sup>[99]</sup>。

有研究表明宏观孔洞和微观缺陷的综合作用效应,使得内耗显著提高,有利于获得高阻尼材料<sup>[100]</sup>。另外微观孔洞的存在必将对于金属橡胶制品作为隔热或者噪声吸收元件有重要的意义,因此需要加强这方面的研究。

## 1.4 不锈钢丝摩擦、磨损现象研究

金属橡胶阻尼件在服役过程中,主要依赖金属丝之间的干摩擦来消耗能量,所谓的干摩擦是指名义上无润滑的摩擦,其表面上通常具有从周围介质中吸附来的气体、水气和油脂的薄膜。

### 1.4.1 摩擦学问题

摩擦学(Tribology)一直以来被作为介于机械学和材料学之间的交叉学科领域,直到二十世纪六十年代中期,才得到世界各国学术界的重视和认同,而我国把摩擦学作为

独立的学科进行研究和教育工作始于二十世纪八十年代。在摩擦学领域著名的学者有温诗铸院士、谢友柏院士、徐滨士院士等，著名的研究单位有清华大学摩擦学国家重点实验室、西南交通大学摩擦学研究所、上海交通大学和西安交通大学等，他们为我国的摩擦学事业作了大量工作，不仅对摩擦现象及其本质的研究取得了相当大的进展，还拓展了摩擦学的学科范围<sup>[101]</sup>，尝试了使用全新的技术方法进行研究，例如文献[102、103]运用分形几何的方法在诸如粗糙表面的表征、接触、摩擦温升和磨损预测等方面做了大量工作。但是现代的摩擦学仍然面临巨大的挑战，一方面表现在目前对于产生摩擦的机理性问题认识还不统一<sup>[104-106]</sup>；另外随着其他学科的发展涉及到摩擦学的尺度效应<sup>[107]</sup>也不容忽视。芬兰学者Holmberg从相对尺寸大小（ $10^{-9}\sim 10^{12}\text{m}$ ）的角度，把摩擦学分为九大类<sup>[108]</sup>。由于尺度效应造成摩擦学理论的相对有效性，目前被大家广为接受的摩擦学理论有：

一、 摩擦的粘着理论 该理论的发展经历了三个阶段：简单的粘着理论、修正的粘着理论、有自然污染膜时的干摩擦粘着理论。

二、 分子-机械理论 该理论认为，在相当高的压应力下，摩擦表面间实际接触部分的微凸体相互嵌合，而且较硬表面的微凸体压入较软表面内部，与此同时，还存在着分子之间的吸引力。摩擦力就是各个接触点上由于机械嵌合、犁沟和分子吸引力所引起的切向阻力之和。

三、 摩擦的能量理论 这种理论认为摩擦表面之间的实际接触面积的大小与表面能有关。由于产生粘着，总的表面自由能减少了。而实际上表面能的只占摩擦能量的很小一部分，大部分的摩擦能量消耗在材料的弹、塑性变形过程中，最终表现为热量。

在 1989 年第五界欧洲摩擦学国际会议上，Homola和Israelachvili<sup>[109]</sup>等人提出摩擦研究中应当区分两类摩擦副的接触状态：一类是有磨损的常规摩擦，此时，界面上宏观尺度的磨粒将两个表面隔开，实际接触面积仅占表观接触面积很小的比例；另一类是无磨损的极光滑表面组成的摩擦副，两表面密合而形成分子接触，他们称这类摩擦副为界面摩擦（interfacial friction）。界面摩擦属于纳米摩擦学（nano-tribology）的主要研究对象。

金属橡胶材料内部不锈钢丝的接触面积处于微米量级，既不同于常规的宏观接触，也不同于微观的纳米接触。在其制备的模压成形过程中，内部各不锈钢丝形成的摩擦副接近于上述的第一类接触状态，随后的超声波清洗工艺留下的碎屑即是磨粒磨损的结果。经过模压成形之后，各丝接触的部位就完成了磨合阶段，构件在使用过程中，内部的各个摩擦副都接近于光滑表面，但是还没有形成密合的分子接触，还不完全等同于上

述第二类的界面摩擦。因此金属橡胶材料中各钢丝形成的摩擦副是介于宏观和微观之间的接触状态，需要开拓新的理论来研究这一新问题。

#### 1.4.2 磨损问题

金属橡胶材料内部各钢丝的接触面没有润滑，属于干摩擦，干摩擦将会引起摩擦表面逐渐有微小的颗粒分离出来形成磨屑，使接触表面不断发生尺寸变化与重量损失，即为磨损。在制备材料的模压成形过程中磨损现象尤为突出。因此研究金属丝的磨损行为有着重要意义。

在磨损的过程中，磨屑的形成也是一个变形和断裂的过程，而且这个变形和断裂是反复进行的，一旦磨屑形成后又开始下一循环，所以该过程具有动态特征。这种动态特征标志着金属丝表层的组织变化也具有动态特征。根据文献[110]介绍，机件正常运行的磨损过程一般分为三个阶段：（1）跑合阶段（磨合阶段），在这个阶段摩擦表面逐渐被磨平，实际接触面积增大，故磨损速率减小。（2）稳定磨损阶段，这是磨损速率稳定的阶段，在跑合阶段跑合得越好，稳定磨损阶段的磨损速率就越低。机件在此阶段服役是最佳状态。（3）剧烈磨损阶段，随着机件工作时间的增加，摩擦副接触表面之间的间隙增大，机件表面质量下降，引起剧烈磨损。

而对于金属橡胶材料而言，模压成形过程即是完成其磨损的跑合阶段，此时钢丝的表面已被打磨光滑，接触面积比较平稳。随后构件在服役过程中，其承受的载荷远小于模压成形时的载荷，因此各钢丝的接触应力减小，相对位移也较小，没有进入稳定磨损和剧烈磨损阶段，而是进行二接触表面以微小振幅运动的状态，即微动（详细讨论见下一节）。这种运动状态也会引起表面的磨损，但是相对于模压过程引起的磨损要弱许多。

#### 1.4.3 微动问题

为了区别传统的滑动和滚动，把二接触表面的极小振幅（微米量级）的运动称之为微动（Fretting）。根据微动位移来源不同，微动可以分为微动磨损（Fretting wear）即位移由外界直接强加给一接触体，微动疲劳（Fretting fatigue）即位移由一接触体承受交变载荷时发生的形变<sup>[111]</sup>。一些文献把微动磨损和微动疲劳当作微动的两种模式，也有文献认为两者均是微动的破坏机制。这一概念的模糊不清不仅反映了微动现象的复杂性和目前的研究现状，同时也反映出微动磨损和微动疲劳之间可能具有某些共性。另外，还有一种微动损伤叫做微动腐蚀(Fretting corrosion)，这是指在电解质或者其他腐蚀性溶液中微动与腐蚀联合作用造成的表面损伤<sup>[112]</sup>。

微动通常发生在一个振动环境下近似紧配合的接触表面<sup>[113]</sup>。单一的微动是没有宏观的相对运动的，但是微动的叠加就能产生宏观位移。金属橡胶材料服役时其内部的每一个微动单元实际都是微动体，微动体的叠加作用使得整个材料具有阻尼作用。位移是发生微动的基本条件，其振动幅值大小是微动区别于传统滑动的主要标志。国际上对位移幅值大小与微动的关系有较多看法：有人认为发生微动现象的幅值为微米量级，但也有证据表明幅值在几个纳米时也可发生微动破坏，也有人认为幅值在几个毫米时也属于微动范畴。周仲荣<sup>[113]</sup>认为以位移幅值的绝对大小来衡量微动有欠妥当，因为位移幅值的大小与试样的尺寸、几何接触形式、材料、测试系统刚度、载荷等等因素密切相关。所以他认为以接触区域重叠度作为衡量微动的标准较为妥当，即微动是静止时接触区域与振动到最大位移时的接触区域基本重叠的一种运动形式。

微动作为一类特殊的摩擦现象也将引起表面的磨损，加速疲劳裂纹的萌生和扩展，使构件的疲劳寿命下降，被称为是工业的“癌症”，很多学者围绕微动行为及其参数评定进行了研究<sup>[114-123]</sup>，这些文献大都集中于提升钢丝绳内部高强度钢丝微动领域。

长期以来微动磨损的机理和定量评定一直是难以突破的难点。文献[115、116]尝试采用综合参数来 $pv$ （接触应力和微动速度的乘积）值及 $pvt$ （ $pv$ 值和微动时间的乘积）值来比较全面地反映接触载荷、微动振幅、微动时间和往复频率等参数对微动磨损的影响，建立了一种钢丝微动理论的模型。文献[119]研究了钢丝试样微动磨损深度与接触载荷、微动时间的影响关系，并且建立了有限元模型来分析这些因素对磨损深度的影响趋势。文献[123]研究了带有微动磨损缺口的钢丝的微动疲劳，结构表明钢丝的微动磨损深度随着磨损时间和接触载荷的增加而增加，磨损缺口处的应力集中使其成为裂纹萌生的源头，也使钢丝的疲劳寿命大大降低，微动磨损后钢丝的疲劳寿命和磨损深度成反比关系。文献[124]对钢丝试样的磨损表面进行了微观观察，发现磨损机制随着微动试验条件而变化。文献[125]用非平衡热力学描述摩擦接触下的耗散过程，以熵平衡关系和非平衡过程的稳定性分析为基础建立微动摩擦体系的热力学模型。文献[126]采用有限元方法，分析了半圆柱与平板间径向微动接触区及其区域内的应力分布，发现在接触区域的边缘处存在一个不稳定的内部应力剧烈振荡区，该区域就是混合粘着一滑移区，并且随着微动时间的增加而逐步扩展，最后引发微动磨损或微动疲劳。刘军等<sup>[127]</sup>也利用了有限元方法以微动桥试样来分析微动接触应力，他们分别计算不同名义接触压力和不同摩擦因数条件下的接触状态和接触应力，认为接触区域可以划分为粘着区、滑动区和张开区。微动疲劳过程中接触表面拉应力与剪应力在接触面的粘/滑交界处存在突变，微动疲劳裂纹正是从这一区域萌生并且扩展。

对于一般的金属-金属接触而言，典型的滑移区微动过程的接触表面磨损总体上可以分为以下三个阶段：

(1) 微动初期的二体接触过程

表面膜（包括氧化膜、污染膜和吸附膜等）的清除，局部地区表层发生塑性变形和擦伤，沿微动方向划痕明显，金属与金属实际接触面积增加。随着微动位移幅值或者循环次数的增加，线状擦伤或划痕将连接成片。在这一过程中，摩擦力迅速增加。

(2) 过渡阶段，即二体向三体接触转变的阶段

周期性的塑性变形导致局部地区发生强烈的冷作硬化，材料变脆。部分接触表面在摩擦过程中发生颗粒剥离或撕裂而成为磨屑，即第三体。随着二体向三体接触的转变，摩擦力总体上开始下降。

(3) 三体接触阶段

大量磨屑不断产生并堆积在接触区域，部分溢出接触表面。在三体接触阶段，磨屑的产生和溢出基本达到动态平衡，摩擦力变化较小，处于相对稳定状态。不过，微动斑的形貌随着磨损面积、磨损深度不断加大而改变，初始固定的压力也继续缓慢减少。

而制备金属橡胶材料时的模压过程已经将其内部金属丝的接触表面膜进行了清理，并且模压时强烈的变形可能导致金属丝局部的冷作硬化，材料服役的过程实际是短暂的二体向三体接触转变和稳定的三体接触及第三体的演变过程的组合。因此研究三体接触和第三体的演变具有重要意义。

#### 1.4.4 摩擦学白层

一般来说第三体的演变可以细分为以下几个过程：

(1) 金属颗粒形成。微动过程中，局部接触表面产生“摩擦学白层”，在粘着、疲劳等作用下，较大尺寸的金属颗粒从表面剥离。

(2) 挤压。金属颗粒在微动过程中不断被挤压、碎化。

(3) 氧化。上述碎化了的金属颗粒在空气中进而发生轻度氧化，氧化后的金属颗粒颜色将发生变化。

(4) 再挤压和再氧化。随着微动循环次数的增加，这些氧化颗粒被再度挤压和氧化，成为尺寸较小的氧化磨屑。

(5) 微动调节。这些深度氧化和碎化的磨屑与其他处于不同阶段的磨屑和金属颗粒一起形成第三体层，参与微动的调节，其中的一部分可能溢出接触区域。

微动接触表面产生的重要组织特征是摩擦学白层，通常是在摩擦副表面形成的一种相对于基体材料不易侵蚀、在光学显微镜下无明显特征的硬化层，是产生磨屑的起源

地，对材料的摩擦、磨损性能有着十分重要的影响。在其研究历史上许多学者对该结构的认识不同，于是该层结构有过若干个不同的名称：“白层”、“白色侵蚀层”、“绝热剪切带”、“迁移层”、“再结晶层”、“摩擦学转变结构”等。目前，被大家广为接受的叫法是“TTS”，即Tribologically Transformed Structure<sup>[128]</sup>。

白层是一种形成条件极宽、表现形式也各异的磨损表面组织，关于微动白层的形成机制还存在争论<sup>[128-130]</sup>。它可以在不同材料、不同磨损条件下出现。它的基本特征可以归纳如下：

- (1) 非侵蚀性。铁基材料的白层通常在常规侵蚀剂下不易侵蚀，在光镜下呈现白色，这也是它被称为白层的原因。
- (2) 高硬度。白层的一个最重要特征就是具有较高硬度，通常比基体材料高出许多，有的甚至是基体材料的数倍。
- (3) 超细晶粒度。白层具有超细晶粒的多晶结构，晶粒尺寸在纳米量级，通常为几十纳米至数百纳米。
- (4) 大塑性变形。显著的塑性变形是白层的重要特征之一，已有的学者在微动表面层观察到了马氏体转变和层错，以及白层内变形晶粒中存在层错和滑移线。
- (5) 存在裂纹。白层中存在微观裂纹，是比较普遍的现象。微动白层中的裂纹对于进一步的磨损行为有非常重要的影响，微观裂纹平行于表面扩展将导致大块磨屑的脱落。
- (6) 多层结构。白层通常为具有一定厚度的薄层，一般厚度小于  $100\ \mu\text{m}$ ，较薄的白层有时仅有  $0.1\ \mu\text{m}$ ，最常见的厚度在  $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 。在微动试样中，其剖面如图 1.5 所示，可以分别区分为：磨屑层或氧化层、白层、塑性变形层和基体。
- (7) 与基体相同的化学成分和结构。摩擦学白层与基体具有相同的化学成分和晶体结构。

大量的微动试验分析和研究显示，经过较少的循环次数（一般  $10^4$  次循环左右）后，就可以发现三种具有不同界面动态特征的微动区域，即滑移区、部分滑移区（粘着区）和混合区。

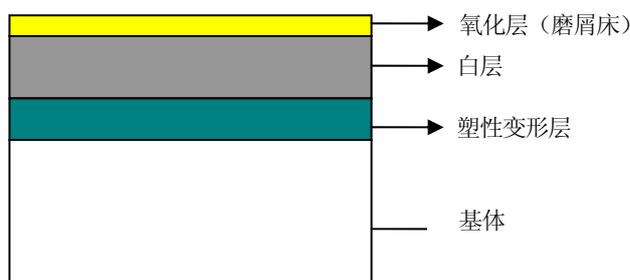


图 1.5 “白层”在微动试样剖面上的结构

## 1.5 本文研究工作简介

### 1.5.1 课题研究背景

目前，西方发达国家对于金属橡胶材料的研究尚处于技术封锁阶段，近年来，由于中俄学术技术交流的增进，更重要的是，“金属橡胶”超越传统材料而具备的优异性能日益引起国防科技领域的极大关注，国内学者们依据基础理论，尝试先进技术手段，并且自行设计实验设备，在 MR 技术领域的研究取得了突飞猛进的进展。按照公开发表的论文统计，目前国内在此技术的主要研究集中在三个方面：MR 制备工艺的研究、制备工艺及结构参数对性能影响的实验研究、建模和本构方程方面的探索研究。这三个方面的工作基础为今后的研究提供了重要的依据，同时，对于该新型材料的认识还存在技术空白区域，主要表现在：

A. 18-8 系不锈钢丝是制备 MR 构件的原材料，其生成工艺、产品质量、微观组织、力学性能等都将影响材料的性能。虽然 18-8 系不锈钢在钢铁研究领域属于常规材料，但是，由于线材特殊的生产工艺造成其结构和性能必将与块体材料有巨大的差异。因此，对于 MR 的制备原材料 18-8 系不锈钢丝，从材料学的角度进行深入系统的研究是目前紧迫任务之一。

B. 目前，MR 的重要应用领域之一即是隔振，借助材料内部大量的不锈钢丝之间交叉接触形成的干摩擦来耗散能量，对于本课题中不锈钢丝组成的微动单元尚缺乏必要的直接研究。

C. MR 材料制备的主要工艺尚需要手工完成，一些工艺参数的选择还依靠经验积累，没有形成科学的依据。其内部钢丝勾连结构的研究相对落后，影响因素较为复杂。目前，尚缺乏描述钢丝空间分布的数值化模型，不利于今后 MR 材料的批量化、规模化生产，限制力学模型和本构关系方面的研究深入。

D. 鉴于上述的第 3 条情况, 目前, 针对 MR 材料关键性能建模预报方面的研究均是建立在把钢丝结构假设成螺旋线匝在三维空间均匀分布的基础上, 目前此方面的建模工作尚不能全面反映 MR 材料中钢丝结构对其关键性能的影响。因此, 关键性能建模预报研究工作尚需要结合 MR 内部钢丝真实空间结构进行必要的改进。

### 1.5.2 课题研究内容

针对目前 MR 研究领域存在的上述技术空白, 结合本课题组的科研优势, 综合考虑本学校的试验设备条件, 本文的研究内容将集中在以下四个方面进行(见图 1.6 的内容结构图)。论文主线是从单根不锈钢丝的化学成分、微观组织结构到两根钢丝的相互作用模型; 再到多根钢丝组成的空间介观(Mesoscale)结构; 再到整个 MR 材料的整体性能, 以实验研究和数学建模相结合的方法完成全文工作。

A. 研究分析 18-8 系奥氏体不锈钢丝的拉拔工艺, 利用金相分析和扫描电镜、透射电镜和背散射电镜分析等技术手段观察钢丝的微观组织结构, 分析元素成分对其性能的影响, 为今后此类材料的科学合理选材提供必要的依据。

B. 深入研究 MR 隔振材料内部耗散能量的最小单元—钢丝“微动单元”, 分析钢丝微动时的摩擦行为以及钢丝表面上遗留的磨损痕迹, 揭示 18-8 系奥氏体不锈钢细丝的微动磨损和微动疲劳过程及其失效机理。该部分实验工作需要首先进行材料整体疲劳试验以确定钢丝微动的实验参数。另外, 改进现有的实验设备, 实现细钢丝的对磨也是重要的技术突破。

C. 以 MR 典型制备工艺中钢丝发生变形的 4 个过程入手, 建立 MR 材料内部钢丝空间分布的参数化三维结构模型, 并以 CAD 技术实现模型的可视化。提取能够唯一确定钢丝空间分布的若干制备参数, 分析各个参数之间的相互关系及其对构件外形尺寸和结构参数的影响, 以期为未来该类隔振材料的优化设计和标准化、规模化生产提供理论依据, 并且为后续的本构关系分析奠定重要的理论基础。

D. 以钢丝空间分布的数值化模型为依据, 计算能够全面反映 MR 材料关键性能的重要参数: 固相体积分数和钢丝接触点数, 整合评价前期文献中提出的若干关键性能建模思想, 从三个方面预报 MR 材料的关键性能: ①MR 材料的力学性能特性之一是其承受交变载荷时的载荷—位移曲线成滞环回线, 该滞环回线的面积能够按照一定比例反映其耗散的能量。因此, 研究 MR 的结构对滞环回线面积的印象规律具有重要的意义; ②对 MR 材料力学行为的大量实验现象证明其应力—应变(载荷—位移)曲线可以划分为三段, 即线性段、软特性段和硬特性段。其力学本构关系与结构特征参数的关系是非常必要的; ③MR 多孔材料因具有孔隙连通和孔隙可调节的特点, 在过滤方面的使用是继

阻尼器之后的第二大应用领域，由钢丝空间分布的数值化模型计算材料的孔隙度，进而预报预测 MR 流体过滤性能的水平。

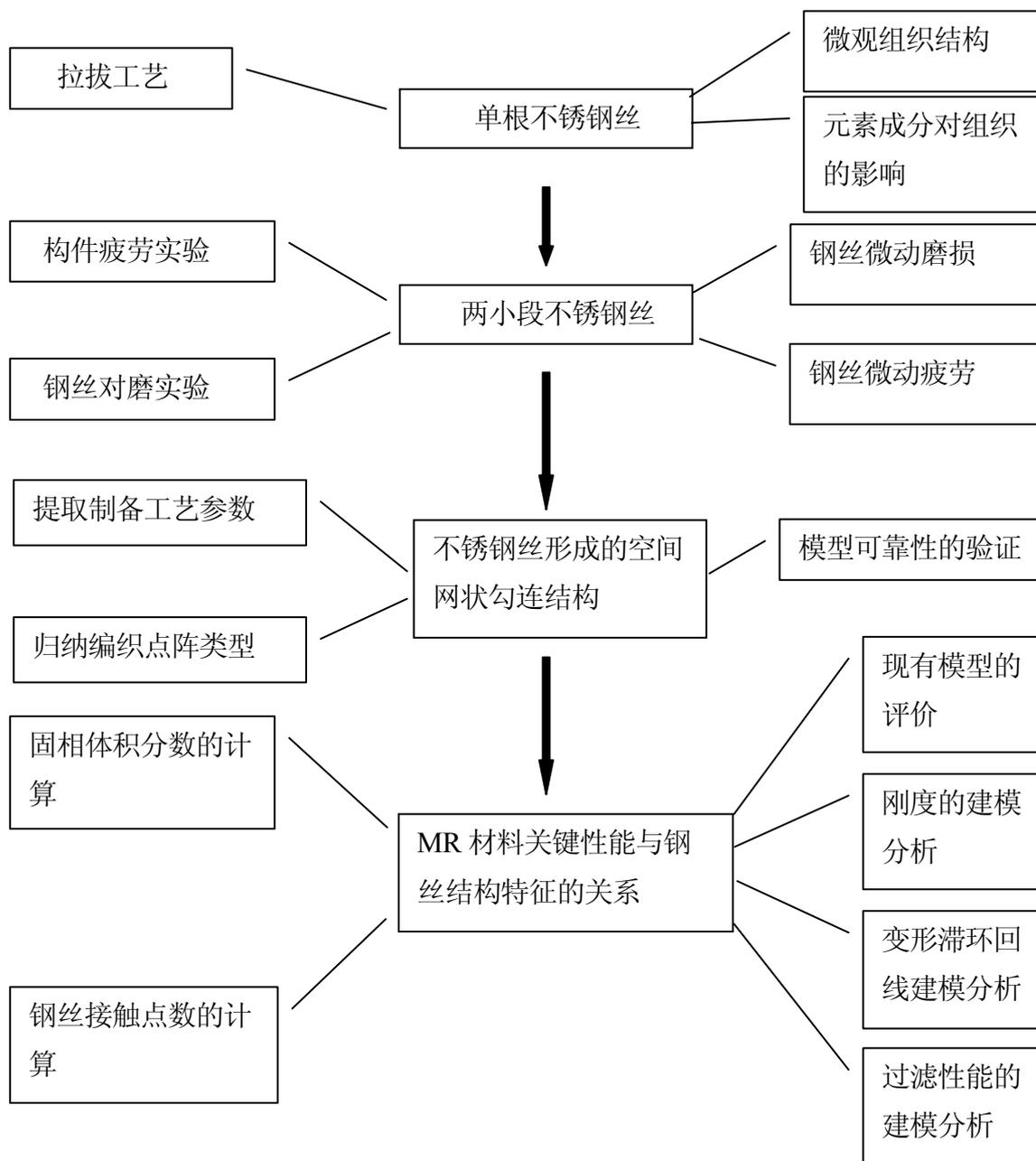


图 1.6 本论文主要研究内容结构图

## 2 奥氏体不锈钢丝的制备工艺及微观组织

目前在金属橡胶材料中使用最多的钢丝是 18-8 系奥氏体不锈钢，其微观组织对于材料的性能有着重要的影响。18-8 系列奥氏体不锈钢是一类相当成熟的钢种，人们对它的了解已经相当深入<sup>[87,94,131]</sup>，同时对于这类奥氏体不锈钢在轧制过程中由于大变形引发的形变诱发马氏体相变也有文献报道<sup>[88~93]</sup>。然而金属橡胶材料用 $\phi 0.1\sim 0.5$  mm 不锈钢微丝系拉拔而成，拉拔所引发的组织变化<sup>[132]</sup>，尤其是电镜组织研究还不多见<sup>[133]</sup>。因此，深入研究冷拉态 0Cr18Ni9Ti 不锈钢丝的拉拔生产工艺和微观结构很有必要。另外，本文的工作对于金属橡胶材料中使用的不锈钢丝材料的合理选择也提出了指导性的建议。

### 2.1 不锈钢丝的制备

制备金属橡胶材料所用的原材料主要是奥氏体不锈钢经过冷拉拔工艺而制成的不锈钢丝。拉拔后的不锈钢丝发生了很大变形，内部组织结构发生变坏，横截面积大大减小，不锈钢丝本身的变化对其组织性能以及金属橡胶材料的性能都产生了重要影响。

钢丝冷拉拔目前主要是以传统工艺为主，它的特点是在实际生产中热处理次数多，生产周期长，能耗高，效率低，拔制的钢丝愈细，所需退火的次数愈多，产品的价格也愈高。虽然现在也有一些新兴的拉拔工艺，例如利用电塑性（材料在电的作用，包括电子照射、电场、电流脉冲等电刺激下，变形抗力降低、塑性增加的一种现象）开发的电塑性加工技术实现了高效低耗<sup>[83]</sup>，但是传统生产工艺设备简单，成本较低，技术便于推广，所以目前应用最广泛的还是传统的冷拉拔工艺，下面详细介绍该工艺。

#### 2.1.1 钢丝拉拔时受力分析

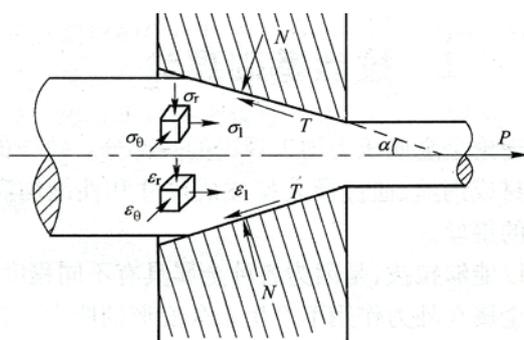


图 2.1 钢丝拉拔时的受力状态<sup>[84]</sup>

钢丝拉拔时一般受到三种力的作用，即拉拔力 $P$ 、模孔壁给钢丝的正压力 $N$ 、模孔与钢丝表面的接触摩擦力 $T$ ，如图 2.1 所示<sup>[84]</sup>。正压力(模壁对钢丝的反作用力) $N$ 和摩擦力 $T$ 是伴随拉拔力而产生的。

模孔壁给钢丝的正压力方向总是垂直于模壁并对钢丝起压缩作用，而摩擦力则是钢丝前进的阻力。拉拔力 $P$ 作用于被拉金属的前端。在拉拔力的作用下，金属在变形区内产生相应内力，轴向则分别为压应力 $\sigma_r$ 和 $\sigma_\theta$ 。因此在拉拔过程中，金属在变形区处于一向受拉和两向受压的应力状态。

### 2.1.2 拉拔变形区内金属流动特点

为了研讨金属在模孔内的变形分布及其流动规律，传统的研究方法是采用网格法。通过拉拔前后坐标网格的变化情况，可以定性分析和定量计算出金属在模孔内的变形情况及其流动规律。

图 2.2 即为采用网格法测得的在锥形模孔内拉拔圆棒材时坐标网格变化的图示。通过对坐标网格拉拔前后的变化分析，可以看到金属在变形区内的流动情况<sup>[84]</sup>。

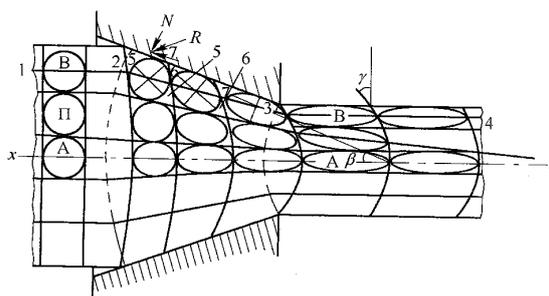


图 2.2 圆棒拉拔时截面坐标网格的变化<sup>[84]</sup>

由图 2.2 可见，拉拔后轴线上的正方形格子 A 变成了矩形，内切圆变成了正椭圆，其长轴和拉伸方向一致。根据格子的变化情况可以认为：金属轴线上的变形是轴向延伸，在径向和周向方向上则被压缩。

拉拔后在周边上的正方形格子 B 变成了平行四边形，在拉拔方向上被拉长，在径向上被压缩，内切圆变成了斜椭圆，其长轴与拉伸方向交成 $\beta$ 角。该角度变化的情况是由入口端向出口端逐渐减小。由此可见，周边上的格子除受到周向拉伸，径向和周向压缩外，还发生了切变形。切变形的大小与模角、减面率、摩擦系数等因素有关。当模角增大、减面率加大以及摩擦系数增加时切变形也将增大。

网格的横截面在拉拔前是直线，进入变形区后开始变成弧形线，凸向钢丝拉拔方向，实际上成一球形弧面。由图 2.2 可知，这些弧形线的曲率由入口到出口端面逐渐增大，直到出口端后才不发生变化。这种网格变化表明：在拉拔过程中周边层的金属流动速度小于中心层。并且随着模角的增大和摩擦系数的增加，这种截面上金属流动速度的不均匀性越加明显，这时因为周边层金属流动阻力较大的缘故。在实际生产中经常能见到拉拔后的圆棒端部呈燕尾形，这就是横截面上金属流动速度差异的例证。

由上述网格变化情况还可以看到，在同一横截面上椭圆长轴与拉拔方向交成 $\beta$ 角，由中心层向周边层逐渐增大。这就清楚地说明，在同一横截面上切变形也是不同的，周边的切变形大于中心的切变形<sup>[84]</sup>。这一点在我们做的不锈钢丝的横截面组织观察实验中得到了验证。

### 2.1.3 钢丝变形程度的表示及计算

钢丝通过模孔拉拔变形的结果是断面尺寸减小而长度伸长。变形程度愈剧烈，上述变化越大。在拉拔生产中常采用下列变形程度指数来反映变形情况：

#### ① 延伸系数

又称拉伸系数，常用 $\mu$ 表示。它是指钢丝拉拔后的长度与原来长度之比，也可用钢丝拉拔前后截面积之比来表示。

$$\mu = \frac{l_k}{l_0} = \frac{F_0}{F_k} \quad (2.1)$$

式中  $l_0$  — 钢丝拉拔前的长度，mm；

$l_k$  — 钢丝拉拔后的长度，mm；

$F_0$  — 钢丝拉拔前截面积， $\text{mm}^2$ ；

$F_k$  — 钢丝拉拔后截面积， $\text{mm}^2$ 。

#### ② 减面率

又称截面压缩率或压缩率，表示钢丝在拉拔后，截面积减小的绝对量与拉拔前钢丝截面积之比。

$$q = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100\% \quad (2.2)$$

式中  $q$  — 减面率, %。

减面率是反映金属拉拔变形特性的重要指标。因为它能直观的反映金属变形的真实情况。在拉拔生产中, 通常钢丝要经过多道次拉拔才能获得所需要的断面尺寸和性能。为此把钢丝要经过多道次拉拔才能获得所需要的断面尺寸和性能。为此把钢丝通过拉拔一个道次的减面率称为道次减面率以  $q$  表示。经多道次拉拔获得成品尺寸的减面率称为总减面率。

### ③ 伸长率

伸长率是指钢丝拉拔后的绝对伸长量与钢丝原长度之比。

$$\lambda = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

## 2.1.4 拉拔条件对钢丝力学性能的影响

金属经冷拔变形之后, 性能产生很大的变化, 尤其是力学性能方面的变化、如强度指标、塑性指标、韧性指标和硬度等。影响钢丝力学性能的主要拉拔条件有如下这些:

### (1) 总减面率固定时拉拔道次的影响

有试验结果表明在总减面率不变的条件下, 增加拉拔道次钢丝抗拉强度下降, 其塑性指标则有所上升。这是因为提高变形的分散度 (即在相同的总变形量的条件下增加拉拔道次或者是在一次变形中减面率减少) 导致钢丝外层剪切变形增加, 残余应力略有提高。这种纵向残余应力的重新分布导致金属外层较早地被破坏, 抗拉强度下降。

### (2) 拉拔速度的影响

拉拔速度对拉拔钢丝的力学性能的影响是比较复杂的。因为拉拔过程的温度和摩擦系数都与拉拔速度有关, 而这些因素对拉拔后金属的力学性能都有相应影响。

### (3) 温度的影响

有文献分别在 100 °C、200 °C、300 °C 的温度条件下进行拉拔实验, 结果表明, 由于拉拔温度的升高, 钢丝的弹性极限和抗拉极限, 尤其是屈服极限都得到增加, 其韧性仍能保持令人满意的结果<sup>[85]</sup>。可能是由于温度条件能够有助于钢丝内部的亚结构发生改变协调变形, 减少内应力的结果, 因此目前许多厂家采用所谓的“温拉法”来拉拔难以变形的钢丝。

### (4) 润滑、模具工作角度的影响

拉拔工艺中一般有干粉润滑湿式润滑和介于两者之间的油润滑<sup>[86]</sup>，通常使用最多的是“干拔”和“湿拔”两种方式。近年来，随着对不锈钢丝品质和表面质量要求的提高，美、英、日、俄等国家为满足客户对钢丝表面光洁度的需求，采用了油性润滑剂来拉拔，油性拉丝润滑剂是介于干式和湿式之间的一种润滑方式，由于油性物质能够很好地吸附在加工丝和模具之间，使得丝和模具之间总保持在既不粘附也不烧结的边界润滑状态，被加工丝的表面能呈现出金属光泽。

实践证明，润滑剂的作用只能在工作锥度很小的条件下才能充分发挥出来。因为在大的 $\alpha$ 角的情况下润滑剂将会很快从变形区内被挤出来；或者说由于 $\alpha$ 角大，润滑剂很难进入变形区，拉拔变形可能是在干摩擦条件下进行的。

关于拉拔模具工作锥角 $\alpha$ 的影响，由于随着工作锥角 $\alpha$ 的增大会引起下述变化：a. 丝材与模具的接触表面减小，使法向应力增大；b. 变形区的润滑条件变坏，导致摩擦力的增加；c. 最终的表面应力并偏重在金属进入模孔的一端。上述这些因素必然引起附加变形增加，金属力学性能差异即会增加。试验结果表明，当减面率较小（10%左右）时，工作锥角对被拉金属抗拉强度的影响已经可以明显看出来，但是大减面率的情况下，力学性能的不均匀变化是不大的。

### 2.1.5 钢丝的热处理

钢丝拉拔一般都是在室温下进行的，属于冷加工范围。钢丝经过拉拔之后，随着变形程度的增大，钢丝的抗拉强度、弹性极限和硬度升高，而延伸率和断面收缩率等韧性指标则相应下降，使得拉拔难以继续，因此各个拉拔道次之间必须进行退化热处理以消除加工硬化并恢复其塑性。另外根据钢丝最终使用状态的不同，在具体工艺设计中还应考虑钢丝的最终热处理或者时效处理。

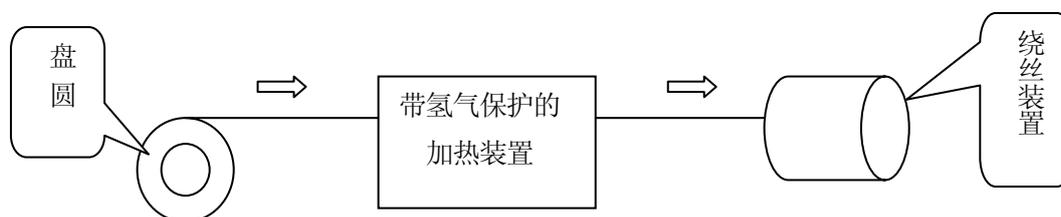


图 2.3 钢丝专用的热处理设备示意图

对钢丝进行热处理是在专用设备中进行的,示意图如 2.3。盘圆中的钢丝在驱动力的作用下以一定的速度进入带有氢气保护气氛的加热炉腔中,经过一定时间的退化热处理被牵引出炉腔再次绕成盘圆,以备下次拔丝之用,必要时在加热炉腔之后还可以配备冷却水腔,以满足某些钢丝需要水冷强化的要求。这种钢丝专用的热处理设备能够实现钢丝的连续热处理,对于消除加工应力、减轻加工硬化非常有效。

## 2.2 实验材料与实验方法

金属橡胶用不锈钢丝的直径一般取  $\phi 0.1\sim 0.5$  mm,文献[132]中的工作已经证实该种不锈钢丝的马氏体的转变量与冷变形量密切相关,为了透射电镜实验制样便利的考虑,我们选用原始直径  $\phi 14$  mm,经多道次冷拉拔至成品直径  $\phi 6.0$  mm 的 0Cr18Ni9Ti 不锈钢丝为研究对象,其总的断面收缩率达到 83.67%,最后一道次的拉拔量约为 35%,已经达到了变形诱发相变进行很充分的阶段。对其纵、横截面进行了光学显微镜、扫描电镜和透射电镜、EBSD 观察实验,以全面分析 0Cr18Ni9Ti 钢丝冷拉拔时形变诱发马氏体转变的机理以及马氏体的亚结构。

## 2.3 钢丝微观组织观察实验结果与分析

### 2.3.1 冷拉拔不锈钢丝的显微组织变化

图 2.4 显示了拉拔 0Cr18Ni9Ti 不锈钢丝纵、横截面的光学显微组织。(a)和(b)图是其横截面的显微形貌,我们看到晶粒比较均匀、细小,晶界不太明晰,500 倍左右能观察到片状马氏体组织。(c)和(d)图显示的是不锈钢丝纵向截面的显微组织,观察发现沿着拉拔方向组织被拉长成纤维状,不易辨认晶界。这是因为钢丝在拉拔变形时不仅其外形发生变化,其内部晶粒也发生了拉伸变形,晶界遭到破坏,并且发生组织相变。

### 2.3.2 冷拉拔不锈钢丝的SEM分析

图 2.5 是冷拉拔 0Cr18Ni9Ti 不锈钢丝扫描电镜分析,(c)图的径向截面上观察到一些近似圆形的凹坑,在(a)图的轴向截面上我们看到这些凹坑是被严重拉长的,其内部有黑色颗粒,经过能谱分析,如(b)(d)图所示,我们推断这些黑色颗粒是 Fe-Ni-Cr-Ti 金属间化合物。

0Cr18Ni9Ti是一种亚稳态的过饱和固溶体, $M_{23}C_6$ 和MC是这类不锈钢中主要的碳化物类型,它们在 $\gamma$ 相中有一个极限的溶解度,其在晶界的沉淀与晶间腐蚀有着密切关系。

发生形变诱发马氏体转变后,强化合金元素在马氏体中形成过饱和固溶体,便得到马氏体基体上弥散着第二相的强化组织。硬而脆的第二相仍然散落在各处,由于其相对基

体比较坚硬，不能跟随基体进行协调变形，因而沿着拉拔方向的两端与基体脱离，形成微孔洞。

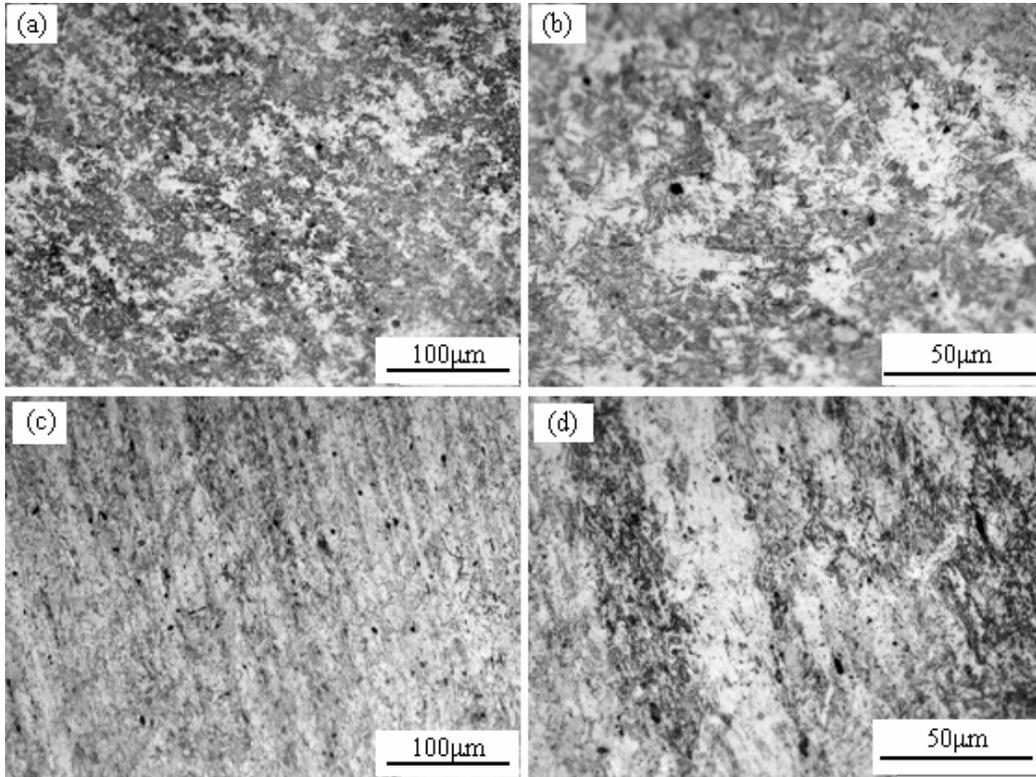


图 2.4 冷拉拔 0Cr18Ni9Ti 不锈钢丝的显微组织

(a) (b) 径向截面； (c) (d) 轴向截面

一般来说经过固溶处理硬而脆的第二相会溶解到基体中，在一定程度上可以防止或者控制第二相沉淀的不利影响。因此在拉拔过程中配合合理的热处理工艺将会改善这些微孔洞的生成。另外适当调整奥氏体钢的合金成分，也能够有效控制微空洞的数量。

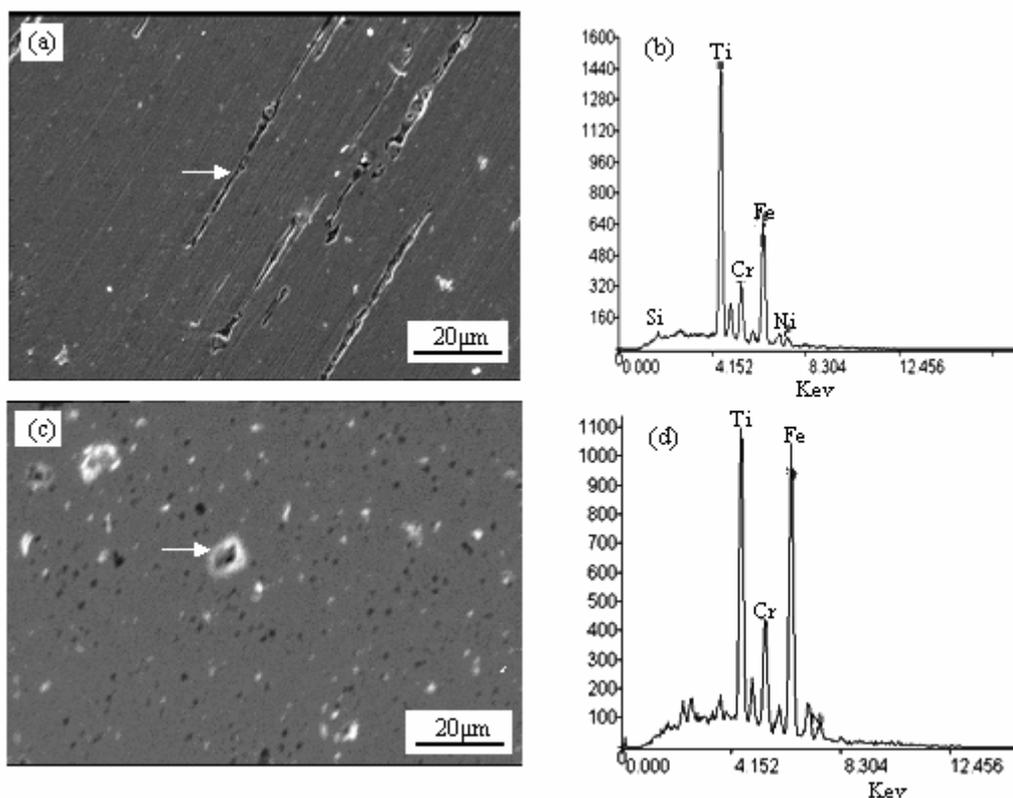


图 2.5 冷拔不锈钢丝的 SEM 分析径向截面形貌

(a) 径向截面形貌; (c) 轴向截面形貌; (b)(d) 微孔洞内部黑色颗粒的能谱分析

### 2.3.3 冷拉拔不锈钢丝的 TEM 分析

通过透射电镜实验，我们详细地观察了马氏体的亚结构，发现既有层错（图 2.6 (a) 为层错的形貌、图 2.6 (b) 为层错的衍射斑点），又有位错（如图 2.6 (c) 所示）。在径向截面试样的局部位置发现了细碎的组织形貌（如图 2.6 (d) 所示），衍射花样为环形斑点（如图 2.6 (e) 所示），其半径的平方比 $R_1^2/R_2^2/R_3^2/R_4^2/R_5^2/R_6^2$ 约等于 3:4:8:11:12:16，标定为 $\gamma$ 相，判断为奥氏体。下面我们详细分析层错和位错马氏体的形成过程，至于局部出现的细碎的组织形貌将在后文 EBSD 实验中一并讨论。

外加应力（应变）有助于马氏体的形成，冷加工诱发产生马氏体的最高温度 $M_d$ 点一般高于奥氏体在冷却时自发转变为马氏体的温度 $M_s$ 点。在冷变形应力作用下，奥氏体的稳定性降低，部分地转变为形变诱发马氏体。经拉伸 30% 的形变诱发马氏体转变温度的经验计算公式如下<sup>[87,131]</sup>：

$$M_{d30}(^{\circ}\text{C})=413-9.5(\%\text{Ni})-13.7(\%\text{Cr})-8.1(\%\text{Mn})-9.2(\%\text{Si})-18.5(\%\text{Mo})-462(\%\text{C}+\%\text{N}) \quad (2.4)$$

式(2.4)中各元素含量为重量百分比。经过计算,实验用直径 $\phi 6.0$  mm的 0Cr18Ni9Ti不锈钢丝形变诱发马氏体转变的最高温度 $M_{d30}$ 为  $20^{\circ}\text{C}$ 。本实验中使用的钢丝冷变形量在 35%以上,从而对应的 $M_d$ 点必然高于  $20^{\circ}\text{C}$ 。文献<sup>[131]</sup>表明在Fe-Ni及Fe-Ni-C合金中单向拉伸使 $M_d$ 升高,而三向水压使 $M_d$ 下降,即拉拔比轧制时的应力状态更有利于形变马氏体相变。因此可以进一步认为,本实验使用的材料必然发生了形变诱发马氏体转变。

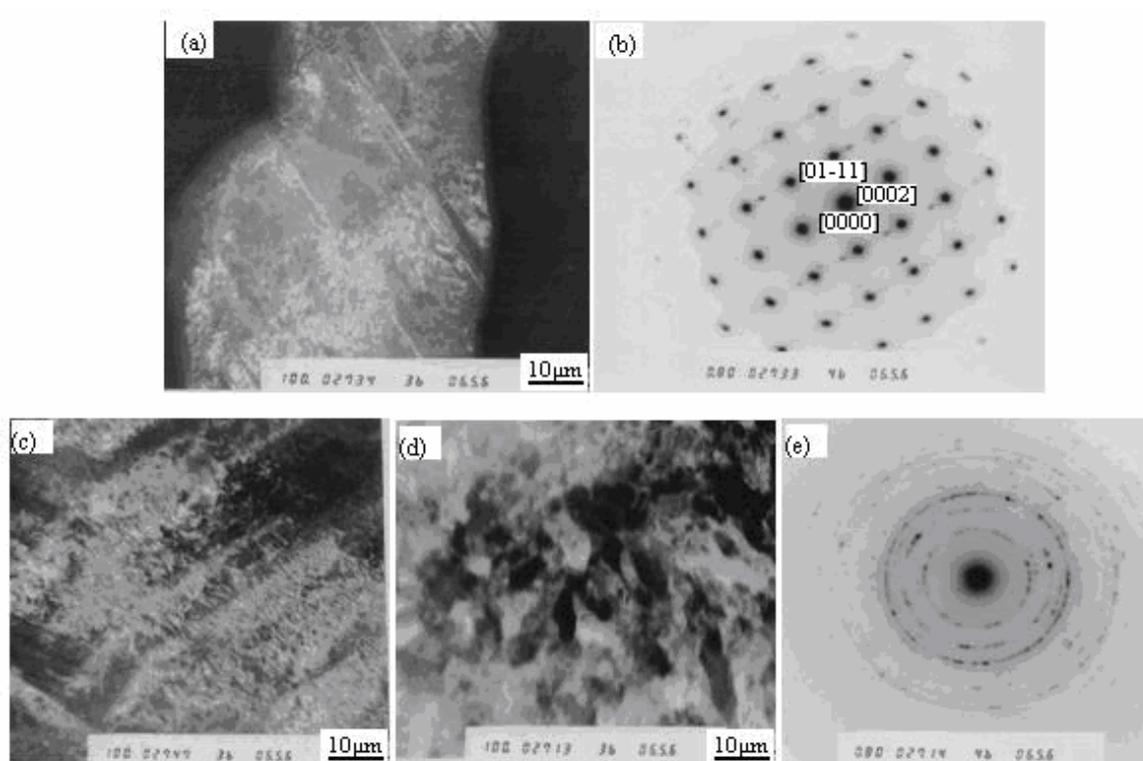


图 2.6 冷拔不锈钢丝的 TEM 分析

(a)  $\epsilon$  马氏体; (b)  $\epsilon$  马氏体衍射斑点; (c) 位错;  
(d) 晶粒破碎的奥氏体形貌; (e) 晶粒破碎的奥氏体衍射斑点

一般认为马氏体相变存在三种方式:  $\gamma \rightarrow \epsilon$ ,  $\gamma \rightarrow \alpha'$ 和 $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ <sup>[131]</sup>。文献[90]认为 $\epsilon$ 为 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 的中间过渡相,在转变过程中其含量一直保持 5%左右。在 $\epsilon$ 相的交界处 $\alpha'$ 容易形核,同时由于 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 有大量切变,于是促使 $\epsilon$ 相的形成。因此,我们认为奥氏体组织的马氏体转变途径是多种多样的,随着具体条件而异。

本研究中，18-8 型不锈钢冷拉拔诱发马氏体相变的观测结果见图 2.6。经衍射花样标定形变诱发所生成的马氏体为 $\epsilon$ 相（图 2.6 (a) (b)）。面心立方晶体中出现层错成 ABABABAB..... 堆垛时，便构成 $\epsilon$ 相的核胚， $\epsilon$ 马氏体和母相 $\gamma$ 的取向关系为 $[111]_{\gamma} // [0001]_{\epsilon}$ ， $\epsilon$ 相一般在 $[111]_{\gamma}$ 滑移面上的板条处出现。 $\epsilon$ 马氏体首先形成，随后 $\alpha'$ 马氏体在 $\epsilon$ 马氏体内或（交叉处）形核并长大。由于连续的冷拉拔变形使得奥氏体晶粒破碎，晶粒尺寸较小，一次滑移开动的位错数量较少，发生二次滑移所需要的应力得不到满足，加工诱发 $\epsilon \rightarrow \alpha'$ 马氏体所需要的二次滑移变得困难。本实验未观测到 $\alpha'$ 马氏体，但是并不能完全排除 $\alpha'$ 相过少而难以观测的可能性。

### 2.3.4 冷拉拔不锈钢丝的 EBSD 分析

由于马氏体相变发生时，点阵常数有突然明显的变化，而且随着合金含量和变形量的不同，其轴比  $c/a$  值也不相同。而 EBSD 实验要求精确确定轴比  $c/a$  值才能标定马氏体。从而在本研究中，EBSD 观测时直接标定马氏体相是困难的。根据前文 TEM 的实验结果，我们采用了“排除法”予以确定。即在 EBSD 实验中我们标定具有面心立方结构的相为奥氏体，其余均为密排六方结构的马氏体。

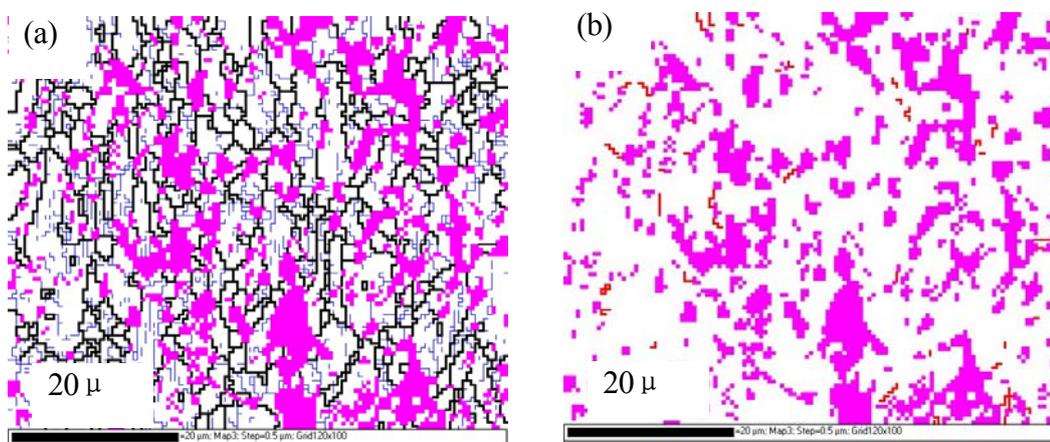


图 2.7 冷拔不锈钢丝的 EBSD 分析

(a) 大角度晶界； (b) 层错界面

图 2.7 中黑色为马氏体，白色为奥氏体。图 2.7(a)中黑粗色线为大角度晶界，黑色细线为小角度晶界，图 2.7(b)中黑线为奥氏体内部的层错界面。

从图 2.7 可以看到，奥氏体晶粒大小为微米尺度。在前文的光学显微镜分析和电镜分析中均未看到奥氏体的晶界，这是由于强烈的大变形使其晶粒破碎，奥氏体断续的晶界使其在衍射时呈现环形花样（图 2.6 (e)）。众所周知，变形能够在一定程度上细化

晶粒，然而 EBSD 实验中我们看到奥氏体的晶粒还远远没有细化到纳米级微晶（图 2.6（d））的程度。因此图 2.6（e）所示 TEM 实验环形的衍射花样应当是由于奥氏体晶界破碎的结果，而不是纳米级微晶的衍射所致。

## 2.4 关于金属橡胶用奥氏体不锈钢丝化学成分的讨论

如前文所述，在 SEM 实验观测中，我们看到由于 0Cr18Ni9Ti 不锈钢中存在强烈促进硬脆相生成的合金元素钛，以及其相对较高的铬、镍含量，冷变形诱发了硬脆相的形成，进而在钢丝中生成了梭形的微孔洞。如果去除合金元素钛，并且适当降低铬、镍含量，必然能在一定程度上抑制硬脆性相的形成。

另外，文献[132]用 X 射线衍射的方法测定 Cr17-Ni7 奥氏体不锈钢丝在冷变形量为 35%时对应的形变诱发马氏体转变量为 80%。经过对前文 EBSD 实验结果（图 2.7）的定量金相分析，0Cr18Ni9Ti 不锈钢丝在冷变形量为 35%时对应的形变诱发马氏体转变量为 38%。这是由于 Cr17-Ni7 系奥氏体钢比 Cr18-Ni8 系更加不稳定，在变形时更容易发生形变诱发马氏体转变。而更多的形变诱发马氏体更有利于钢丝强度的提高。文献[134]的工作认为，目前制备 MR 材料所普遍使用的钢丝成分与国标 18-8 钢有一定差异，其铬、镍含量偏低，锰含量偏高，将使其显微组织中出现较多的弥散碳化物颗粒及铁素体，降低钢丝的抗应力腐蚀和点腐蚀的能力，加入少量钼可改善其抗腐蚀性能。

## 2.5 本章小结

本章利用光学显微镜、SEM、TEM、EBSD 等技术手段，对金属橡胶用冷拉拔奥氏体不锈钢丝的微观组织进行了研究，结果表明：

- (1) 在本实验条件下的不锈钢丝冷拉拔时由于形变诱发了马氏体转变，所生成的马氏体为  $\epsilon$  相，其亚结构为层错和位错；
- (2) 本实验条件下的不锈钢丝冷拉拔时由于大变形使奥氏体晶粒破碎，钢丝轴向与径向截面上奥氏体晶粒碎化后的晶界在光学显微镜观察和扫描电镜观察实验中均不可见，但可通过电子背散射衍射技术观测到；
- (3) 在本实验条件下的不锈钢丝冷拉拔时由于大变形诱发了硬脆性第二相的形成，由于受到拉拔作用力的影响，最终在轴向截面可见以硬质颗粒为核心、两端与基体脱开形成梭形微孔洞的典型形貌。

### 3 MR 材料中微动单元的分析

MR材料以其特有的结构形式而具有较大的干摩擦阻尼，国内许多学者对其常温条件下的阻尼耗能特性进行了大量的理论和实验研究，积累了丰富的实验数据，并与其它阻尼材料的性能进行了对比研究，取得了一系列研究成果，对于推进这种新型阻尼材料的实际应用起到了积极的作用。但是，对于金属橡胶材料承受冲击载荷和循环脉动载荷时其内部耗散能量的最小微动单元—两个微段不锈钢丝组成的摩擦副的研究，仅见于矿井提升机用钢丝绳的微动磨损行为研究<sup>[118-124]</sup>，其钢丝材料及其使用工况均与本研究课题有一定差距。由于该种材料主要是依靠其内部钢丝的相互啮合、干摩擦起到阻尼作用，因此对于钢丝/钢丝摩擦副在本问题中的摩擦参数下的摩擦磨损分析是非常必要同时也具有重要意义的。

#### 3.1 概念引入—“微动单元 (Fretting Cell)”

为了研究问题方便起见，这里首先引入一个概念“微动单元”，即金属橡胶材料在服役过程中其内部存在的相当数量的钢丝接触点/面，并且在接触面上均发生的微小相对位移。在试验中发现该位移大多处于微米量级，因此属于摩擦学中的微动研究领域，于是把“微动单元”称为“FC”即“Fretting Cell”。FC 看似独立，而实际在材料服役过程中其各自的位移却是相互协调的，构件可以看作是一定数量的 FC 组成的空间结构体。这样整个金属橡胶材料的问题就简化为对 FC 的研究和对 FC 的空间结构分析。

每个 FC 就是一个微动体，在环境作用下，微动体的失效形式主要有磨损、疲劳和腐蚀三种形式，三者均直接影响构件的疲劳寿命。而实际工况下金属橡胶的环境影响因素尚可忽略，因此本章将分别对微动磨损和微动疲劳这两个问题进行研究，关于其空间结构问题将放在第 4 章论述。

由圆形截面钢丝制备的金属橡胶构件其内部的接触单元是柱面—柱面接触，根据 Hertz 接触理论，对于两圆柱体（倔强系数分别为  $k_1$ 、 $k_2$ ，曲率半径分别为  $r_1$ 、 $r_2$ ）的接触问题，在线载荷  $P$  (N/m) 的作用下，在接触处形成一条宽度为  $2b$  的狭长矩形接触区，其尺寸为：

$$b = \sqrt{\frac{4r_1r_2P(k_1+k_2)}{\pi(r_1+r_2)}} \quad (3.1)$$

两个圆柱体中心的接近距离  $\delta$  为：

$$\delta = \frac{2P}{\pi} \left[ k_1 \left( \ln \frac{2r_1}{b} + 0.407 \right) + k_2 \left( \ln \frac{2r_2}{b} + 0.407 \right) \right] \quad (3.2)$$

而金属橡胶构件一般都是由相同材料、相同曲率半径的金属丝绕制而成的，即 $k_1 = k_2 = k_0$ ， $r_1 = r_2 = r_0$ ，则：

$$b = 2 \sqrt{\frac{r_0 k_0 P}{\pi}} \quad (3.3)$$

$$\delta = \frac{4Pk_0}{\pi} \left( \ln \frac{2r_0}{b} + 0.407 \right) \quad (3.4)$$

对于 FC 的研究有以下几个难点：

- 一、摩擦学本身属于交叉学科<sup>[101]</sup>，涉及领域有物理、化学、力学、材料、机械、分形学等。各种理论并存，但是目前没有任何一种理论能够完美解释摩擦过程中出现的众多现象。多数文献工作都集中于实验研究，目前最常见的摩擦实验设备即是以环/块或者柱/块摩擦副为研究对象的摩擦实验机。以钢丝为摩擦副的研究方面可以借鉴的文献工作非常少见。
- 二、本课题中各摩擦副均为 $\phi 0.1 \sim 0.4$  mm的不锈钢丝，由于摩擦现象有明显的尺度效应<sup>[107]</sup>，因而常规的环/块或者柱/块摩擦实验不能完全揭示其问题本质，况且环/块或者柱/块材料与冷拉拔钢丝也有较大差异。但是目前尚缺乏以 $\phi 0.1 \sim 0.4$  mm钢丝为摩擦副的干摩擦实验机，于是我们在柱/块摩擦副上刻槽嵌入并固定钢丝，利用清华大学摩擦学国家重点实验室的德国进口 SRV 高温摩擦磨损实验机，首次实现了钢丝对磨。
- 三、为了更加真实地模拟实际工况，需要选择合适的钢丝对磨实验参数，如：载荷、频率、振幅等。而在实际构件中，各个 FC 的这些摩擦参数是各不一致的，某些参数（比如载荷），只能通过估算确定其统计值的大致范围。而另一些参数（比如位移）只能通过采集构件疲劳实验后钢丝上留下的大量磨损痕迹来估计。为此，需要先进行构件的疲劳实验。

## 3.2 隔振构件疲劳实验

为了在后续研究 FC 的性能实验中，采用可靠的实验参数，本文首先做了金属橡胶隔振构件整体的疲劳实验，以相应的技术手段分析结果并得出必要的的数据，用以支撑钢丝对磨实验的可信度。

### 3.2.1 实验材料与实验方法

本实验样品取自圆环形隔振构件，如图 3.1(a)所示，试件厚度 11 mm，外环直径 $D'$ 为 66 mm，内环直径 $d'$ 为 20 mm，质量为 70 g。试件所用钢丝直径为 $\phi 0.3$  mm，选用材料为 Cr-Ni-Mn 系不锈钢丝，其化学成分与 302 不锈钢成分接近，见表 3.1 所示。螺旋卷外径为 2.25 mm，毛坯制取采用正方点阵编网方式，成型压力为 0.517 t/cm<sup>2</sup>，成型后密度 $\rho_{MR}$ 为 2.05 g/cm<sup>3</sup>，试件采用 400 °C 回火处理（在 400 °C 保温 30 min 然后随炉冷却）以消除冷压塑性变形产生的残余应力。

表 3.1 实验用 Cr-Ni-Mn 系不锈钢丝与 302 不锈钢的化学成分对比 (wt%)

钢种代号	化学成分 (wt%)						
	C	Cr	Ni	Ti	P	Mn	其余元素
A	0.11	17.00	8.50	0.039	0.026	1.02	常规含量
302 <sup>[108]</sup>	0.15	17.00~19.00	8.00~10.00	—	0.045	2.00	常规含量

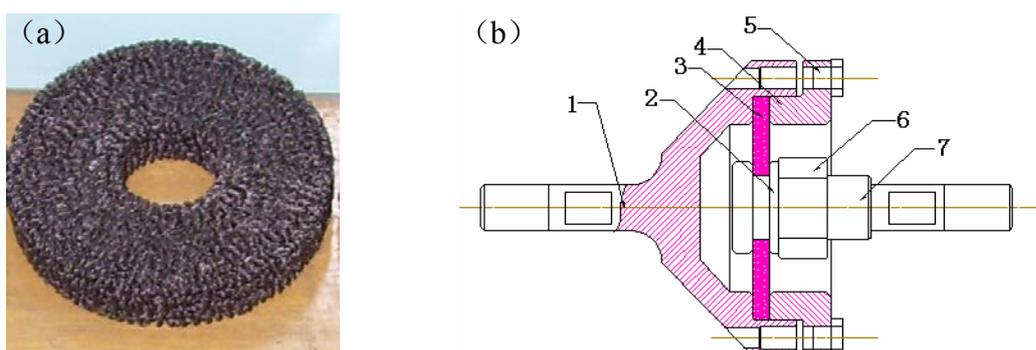


图 3.1 金属橡胶隔振构件振动疲劳实验用样品及装置  
(a) 金属橡胶隔振构件；(b) 实验装置

试验夹具示意图如图 3.1(b)所示, 圆环形金属橡胶件 3 的外沿由四个螺栓 5 压紧在碗形托盘 1 和环形压盘 4 之间, 金属橡胶件 3 的中间部位通过螺母 6 和垫片 2 压紧在中间拉杆 7 的左端。为防止金属橡胶件在变形时被夹具的尖锐棱角损伤, 与试件相接触的碗形托盘 1、压盘 4、拉杆端面 and 垫片均采用倒角结构。在试验时, 夹具两端通过联结杆与材料试验机上下夹头相连, 由上夹头拉动中间拉杆 7 上下振动, 本实验振幅为 2.5 mm, 频率为 5 Hz, 时间为 8 h。本实验由石家庄军械工程学院协助完成。

### 3.2.2 实验结果与分析

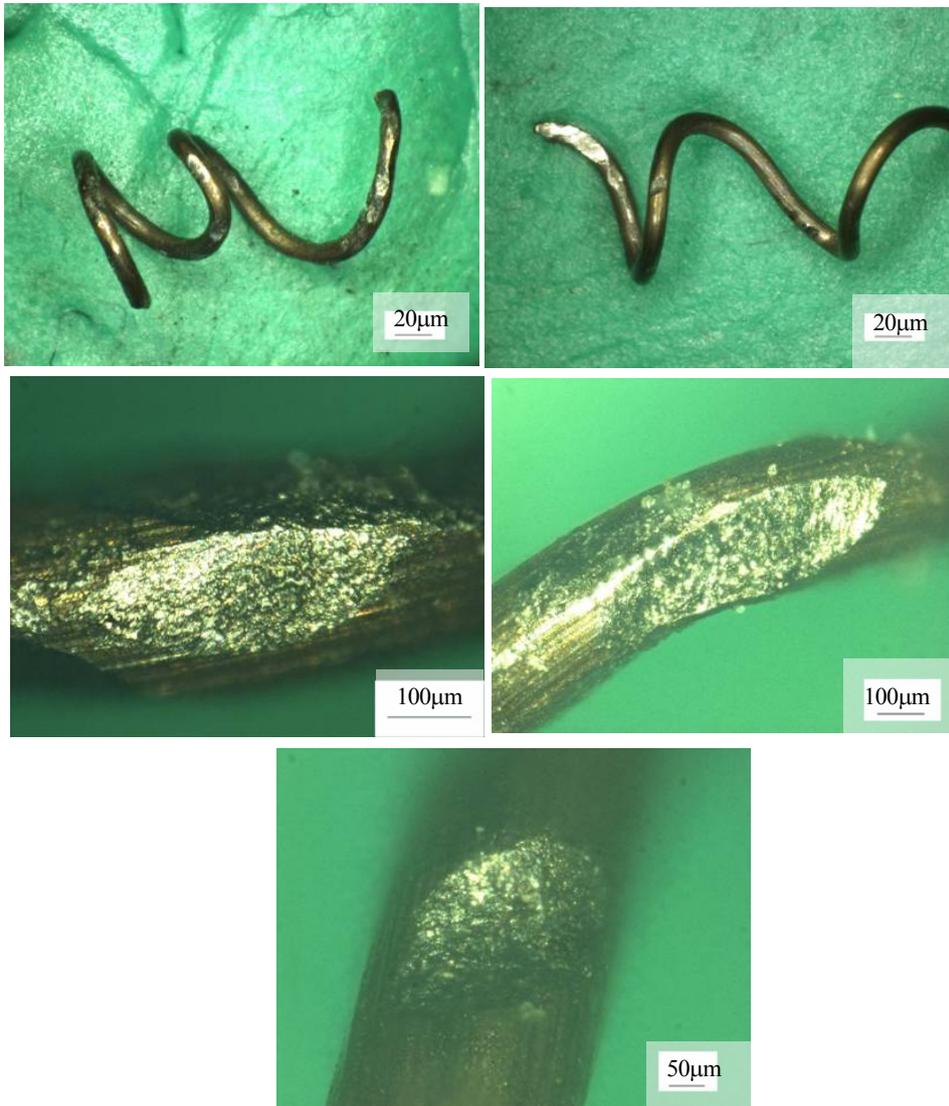


图 3.2 钢丝上的磨损痕迹

疲劳实验后金属橡胶试件产生剪切变形，在距离圆心 18 mm 处钢丝表现出多处断裂，其内部钢丝由于干摩擦出现多处光亮的白点，如图 3.2 所示，即磨损痕迹。收集带有“白亮点”的钢丝，利用 KEYENCE VHX-100K 三维视频显微系统详细观察分析。

圆环形隔振构件在 5 Hz 频率下振动 8 h 后，经历了高达 144,000 个振动周期，由于材料内部钢丝呈网状勾联结构，各个 FC 中两段微丝的接触滑动周次相对较为复杂。那些在构件原始形状下已经接触的钢丝较早发生相对滑动，随着振动的进行，某些接触点处的钢丝还可能发生塑性变形或断裂，从而引发新的钢丝间接触点。因此，在整个隔振构件内部的钢丝 FC 发生磨损、断裂是一个动态的、变化的过程。存在着“此起彼伏”、“此消彼长”的状况，每个 FC 各自经历的摩擦周期不相同，另外由于各个 FC 在构件内部的相对位置不同，其承受的法向载荷和切向载荷也不相同，于是其表面磨损程度很不一致，表现在磨痕形状大小不一，微观形貌差异较大。因此需要用统计的平均值来研究 FC 的行为。

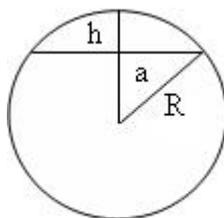


图 3.3 磨痕宽度、磨损深度与钢丝半径的关系

不锈钢丝上的磨痕近似成椭圆形，图 3.3 显示的是磨痕宽度、磨损深度及钢丝半径的关系。根据磨痕的宽度、钢丝的半径，可由式 3.5 和 3.6 估算出磨损深度和磨痕面积。

$$h = R - \sqrt{R^2 - a^2} \quad (3.5)$$

$$S = \pi ab \quad (3.6)$$

式中  $R$  为钢丝半径， $h$  为磨损深度， $S$  为磨痕面积， $a$ 、 $b$  分别为椭圆形磨痕的长、短轴。

表 3.2 磨损痕迹尺寸

磨痕编号	宽度 ( $\mu\text{m}$ )	长度 ( $\mu\text{m}$ )	深度 ( $\mu\text{m}$ )	磨损面积 ( $\mu\text{m}^2$ )
S	210	610	43	4.02
M	180	250	30	1.41
L	130	350	15	1.43
平均值	173	403	29	2.29

由三维视频显微系统的分析，磨痕形状具有以下特点：

A. 磨痕形状近似呈椭圆形，但是两边不对称，磨屑的堆积总是倾向于由一端向另一端涂抹，因此更像是“有头有尾”的“彗星”状。

B. 实验采集的磨痕数量众多，其大小、磨损深度各异，为了统计方便，我们人为地把磨痕分成大(L)、中(M)、小(S)三类，数据汇总于表 3.2。

由表 3.2 的数据可知，单丝摩擦实验时振幅选取  $403 \mu\text{m}$ ，即  $0.4 \text{ mm}$  比较合适。又因为磨痕形状狭长，推知各个 FC 中的两微段钢丝夹角较小，于是单丝摩擦实验时使用两根钢丝小角度接触的模型。

下面计算 FC 中两段钢丝的接触力  $N$ 。本实验中交变载荷幅值  $P$  为  $600 \text{ N}$ ，圆环形构件的横截面积  $S = \pi (D^2 - d^2) / 4$ ，假定钢丝在构件中是均匀分布的，则其固相体积分数  $k = \rho_{\text{MR}} / \rho_{\text{s}}$ ，其中  $\rho_{\text{s}}$  为钢丝密度，于是构件中钢丝所占的有效横截面积  $S' = S \sqrt[3]{k^2}$ ，则：

$$\Delta \sigma = P / S' \quad (3.7)$$

代入数据计算得  $\Delta \sigma = 5.23 \text{ MPa}$ ，将表 3.2 中的平均磨损面积值代入，则  $N = 11.98 \text{ N}$ 。至此，钢丝对磨实验所需的基本参数：载荷、频率、振幅、振动周次均已初步确定。

### 3.3 实验用不锈钢丝表面激光扫描共焦 (LSCM) 观察与分析

由于摩擦现象实质上是两接触表面在发生相对位移时的相互作用，其中发生的磨损行为及磨损各个阶段可能发生的现象都与钢丝原始表面的粗糙程度密切相关，因此有必要先对本实验用钢丝表面轮廓进行定量分析。

### 3.3.1 实验材料与实验方法

为了了解实验用钢丝的表面光滑程度，本实验选用北京元中北奥光学技术有限公司提供的 OLYMPUS LEXT OLS3000 型激光扫描共焦显微镜 (LSCM) 对  $\phi 0.3$  mm 的实验用钢丝表面进行观察。

### 3.3.2 实验结果与分析

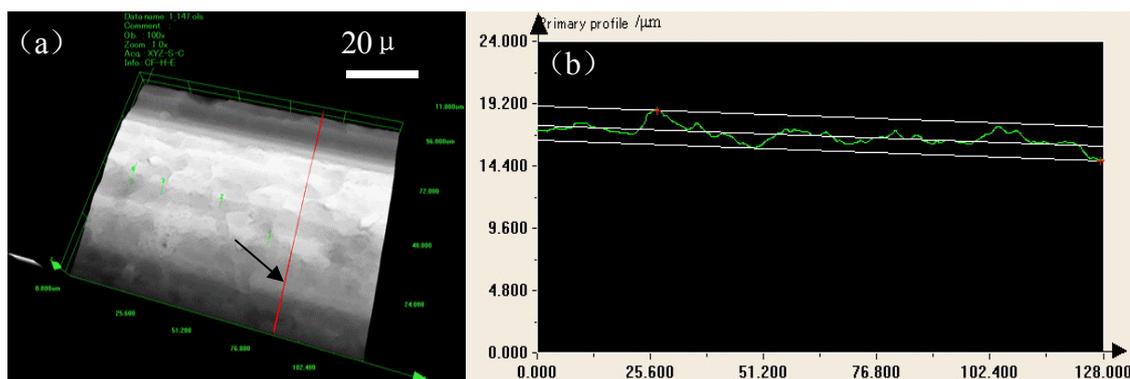


图 3.4 实验用不锈钢丝表面 LSCM 观察  
(a) 表面形貌；(b) 表面轮廓

表 3.3 实验用不锈钢丝的表面粗糙度

符号	Ra	Rz	RSm
名称	轮廓算术平均偏差	微观不平度十点高度	轮廓微观不平度的平均间距
定义	在取样长度内轮廓偏距绝对值的算术平均值	在取样长度内最大轮廓峰高的平均值和最大轮廓谷深的平均值之和	含有一个轮廓峰和相邻一个轮廓谷的一段中线长度
数值 ( $\mu\text{m}$ )	3.447	0.520	17.685

LSCM 表面观察发现，钢丝表面有微米量级的凹凸起伏，见图 3.4 (a) 显示。随机选取其中一位置进行线扫描得到图 3.4 (b) 的表面轮廓曲线，用 LEXT OLS3000 激光扫描共焦显微镜及其自带的软件统计分析得表 3.3 的钢丝表面粗糙度，其中轮廓算术平

均偏差  $Ra$  值为  $3.447 \mu\text{m}$ ，轮廓微观不平度的平均间距为  $17.685 \mu\text{m}$ ，计算表明，在中等大小的磨损痕迹上平均存在二百余个微米量级的凹凸体。表 3.3 显示的是实验用钢丝的表面粗糙度值。

### 3.4 FC 模拟实验—钢丝对磨实验

在前述的材料疲劳实验中，已经初步摸清了 FC 平均的摩擦参数，LSCM 实验也了解了实验用钢丝的表面凹凸质量，为下面的钢丝对磨实验提供了必要的基础。然而，实践中仍然缺乏比较成熟的实现钢丝对磨的实验设备，传统的摩擦实验机都是以环/块或者柱/块材料为摩擦副的，与我们研究的冷拉拔丝材性能相去甚远，而且摩擦的尺度效应不容忽略，因此必须创新或者改进常规方法去实现  $\phi 0.3 \text{ mm}$  细钢丝的对磨。

中国矿业大学的张德坤等<sup>[114-116,118,119,122-124]</sup>在研究矿井提升用钢丝绳的微动磨损行为时设计了钢丝微动磨损实验机，他们把钢丝绳中钢丝之间的微小错动简化为两根钢丝成  $90^\circ$  对磨的形式，其上试样静止，下试样往复振动，如图 3.5 所示。并根据该模型研制了相应的实验机，见图 3.6。其原理是由电机直接带动偏心凸轮转动，凸轮再推动振动横板振动，根据杠杆的比例放大和悬臂梁的弹性弯曲作用，振动横板把微小振幅传至试样架，并带动下试样以恒定的微小振幅往复振动。静止的上试样由一个配合精密的铰接梁夹持，试样之间的载荷通过砝码施加。该实验机构虽然实现了细钢丝的对磨，但是其控制系统相对还是比较简陋，尤其是不能精确采集实验过程中摩擦系数的变化数据，而且在我们关心的课题中，两根钢丝是小角度接触，所以本文拟选择改进现有设备的方法实现钢丝对磨。

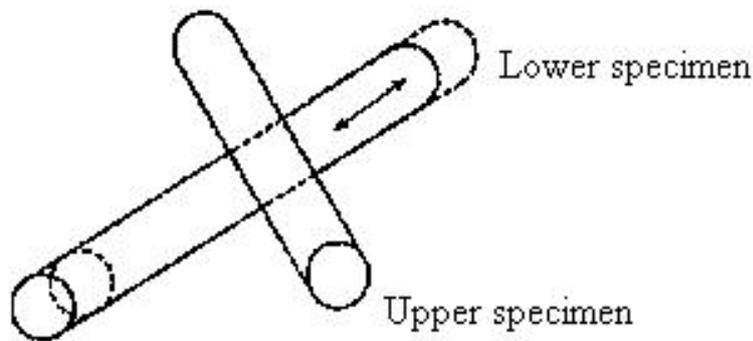


图 3.5 钢丝微动接触形式<sup>[114]</sup>

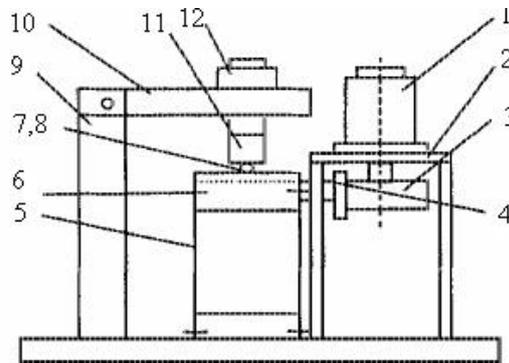


图 3.6 钢丝微动磨损试验机示意图<sup>[114]</sup>

1 电机； 2 电机支持架； 3 凸轮； 4 振动横板； 5 复位弹簧板； 6 下试样支持架；  
7 下试样； 8 上试样； 9 立柱； 10 加载横梁； 11 上试样支持架； 12 砝码

### 3.4.1 实验材料与实验方法

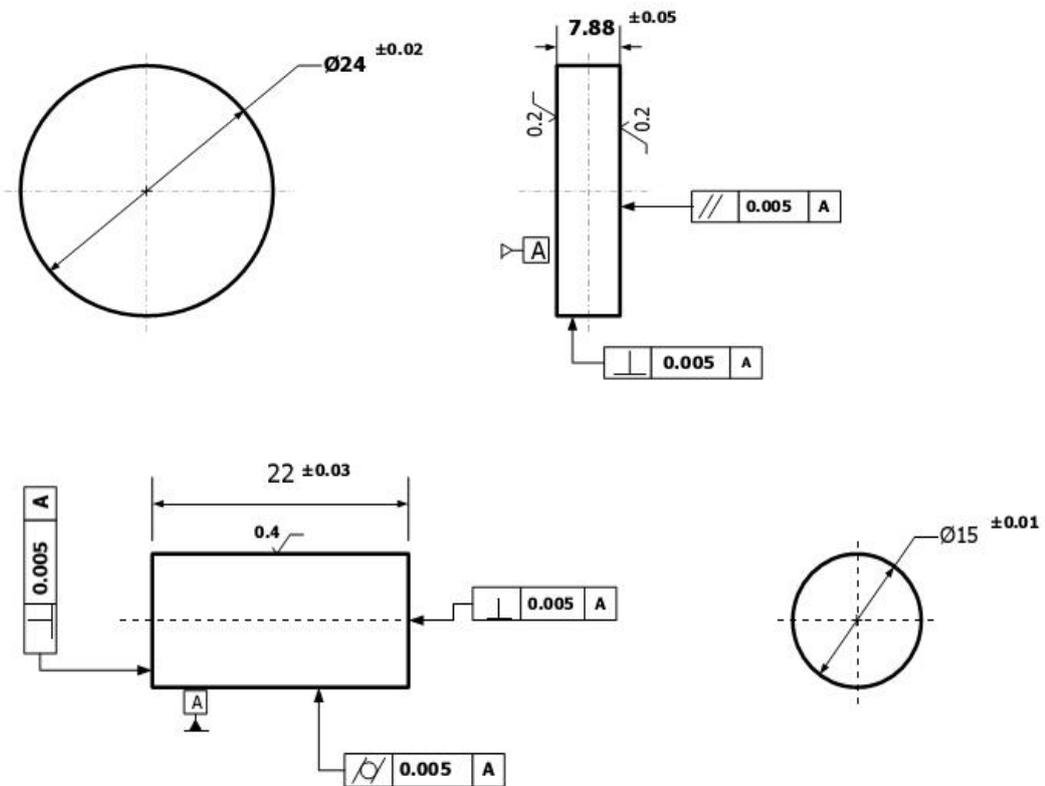


图 3.7 标准的柱/块摩擦样品

清华大学摩擦学国家重点实验室的 SRV 高温摩擦摩擦磨损实验机用途非常广泛，其实验温度可以在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内连续调节，本次只做了常温下的实验。除此以外，该设备的载荷、频率、振幅也都是连续可调的，能够最大限度地模拟实际工况。另外，实验过程中，还可以灵敏地（每分钟采集 60 个数据）实时记录摩擦系数的变化情况。但是此实验机仅适用于传统的以环/块或者柱/块材料为摩擦副的实验，如需实现  $\phi 0.3\text{ mm}$  细钢丝的对磨，必须进行相应的改进。

改进方法是在标准的柱/块摩擦样品（图 3.7 所示）上开槽，经多次实验尝试，最终确定槽的深度和宽度均为  $0.1\text{ mm}$  时，刚好能使实验用钢丝嵌入并固定且不影响其露出部分的对磨，从而形成图 3.8 所示的钢丝摩擦副。由前面隔振构件得到的数据，我们设计了一组在钢丝 SRV 实验机上进行的对磨实验，实验参数选取见表 3.4。

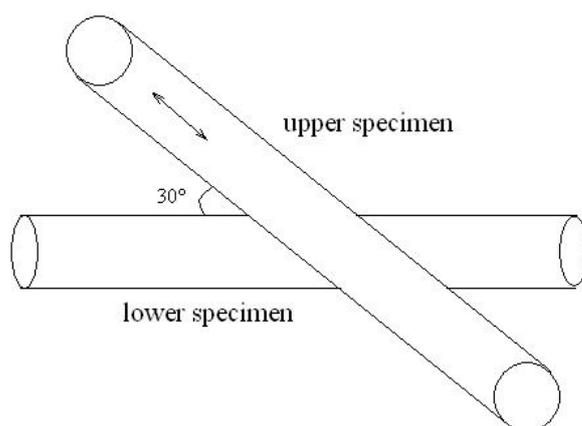


图 3.8 钢丝接触示意图

表 3.4 钢丝对磨实验参数

编号	载荷 (N)	振幅 (mm)	两丝夹角 ( $^{\circ}$ )	频率 (Hz)	振动循环周次
1#	10	0.4	30	5	144 000
2#	20	0.4	30	5	54 000
3#	30	0.4	30	5	27 000

### 3.4.2 实验结果与分析

#### 3.4.2.1 摩擦系数曲线分析

首先分析样品 1#的摩擦系数曲线，它的实验条件最接近实际工况，其振动循环周次也相当于FC在构件疲劳实验中的全过程接触摩擦，实验采集到的摩擦系数曲线见图 3.9 (b)。研究<sup>[136]</sup>表明，钢铁材料微动摩擦系数随循环周次的变化可分为 4 个阶段（见图 3.9 (a)）：① 接触表面膜去除，摩擦系数较低；② 第一、二体之间相互作用增加，发生粘着，摩擦系数上升，并伴随材料组织结构的变化；③ 磨屑剥落，第三体床形成，二体接触逐渐变为三体接触，因第三体的保护作用，粘着受抑制，摩擦系数下降；④ 磨屑不断地形成和排出，其成分和接触表面随时间改变，形成和排除的磨屑达到平衡，微动磨损进入稳定阶段。

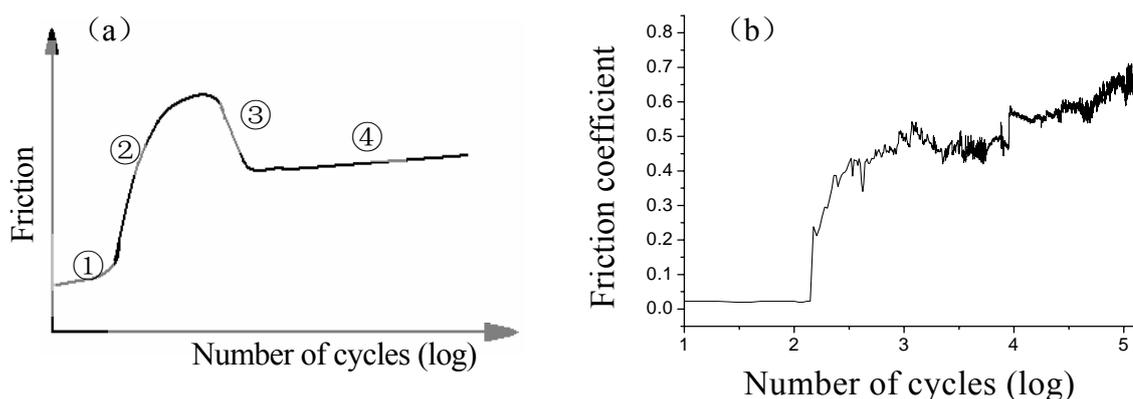


图 3.9 微动磨损的摩擦系数随循环周次变化关系  
(a) 理论分析示意图； (b) 1#样品实验实测曲线

从 1#样品采集到的摩擦系数曲线我们看到其磨损的过程与此非常相似。第 1 阶段去除轮廓算术平均偏差  $Ra$  值为  $3.447 \mu\text{m}$  接触表面膜，经历 140 个振动周次，历时 28 s，平均磨损速率为  $123 \text{ nm/s}$ 。第 2 阶段，二体接触表面的材料发生塑性变形，局部由于“闪温”效应而软化粘连，导致摩擦系数逐渐上升到  $0.56\sim 0.58$  的水平，此时对应的振动周次是 1 500 左右。第 3 阶段是磨屑的剥落，一方面剥落下来的磨屑在接触面之间起到“滚珠”的作用，减小了摩擦系数，另一方面，剥落下来的磨屑由于受到接触面的碾压而涂抹于接触面上形成第三体床，第三体床的形成在一定程度上减弱了粘着作用也

导致摩擦系数比第二阶段的水平下降，在曲线上显示摩擦系数在该阶段下降了 0.1 左右，此时对应的振动周次是 2 000。磨屑的形成和排出是动态并行的过程，随着振动周次的增加，磨屑是不断增多的，刚开始时由于粘着作用的影响，同时接触面积较小，磨屑排出不畅，形成的磨屑多于排出的，逐渐形成第三体床。由于第三体床的形成消耗了一定量的磨屑，再加上接触面积不断增大，第三体床随着振动周次的增加也被打磨平整，有利于磨屑的排出，使得磨屑的排出趋势逐渐增强。磨屑的形成和排出相互竞争最终达到平衡，于是磨损过程也逐渐达到平衡的第 4 阶段，摩擦系数平稳渐升。

从图 3.9 (b) 可以看出，该实验条件下钢丝对磨的稳定磨损阶段较长，其对应的振动周次为 2 000~144 000。以频率是 5 Hz 为例，该钢丝对磨过程可以描述为：28 s 打磨表面膜，28~300 s 接触面粘着、啮合，300~400 s 形成第三体床，400~28800 s 为稳定磨损阶段，摩擦系数在该阶段变化也较为平稳。从整个摩擦过程来看，前 3 个阶段虽然是必经的过程，但是它们经历的时间太短，可以认为它们在整个磨损过程中对于摩擦力做功的贡献是微乎其微的。

另外，从前面磨损过程 4 个阶段的分析我们还看到，在磨损的前 3 个阶段，由于钢丝表面微米凹凸的影响，两钢丝接触区域还没有形成实际意义上的面接触，接触区内应力起伏很大，分布极不均匀，尚难以用赫兹接触理论估算接触面的法向受力，只有到了磨损的第 4 阶段，形成了稳定的三体接触后，接触面积的变化才相对平稳，应力分布相对均匀，以接触理论估算其法向载荷才是可行的。

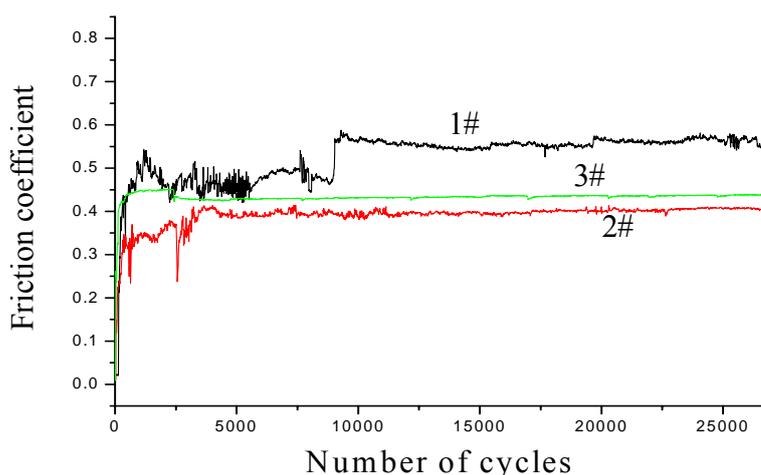


图 3.10 1#, 2#, 3#样品微动磨损的摩擦系数曲线

对钢丝整个磨损过程分析透彻之后，我们再分析外加压应力对其摩擦性能的影响，具体实验参数见表 3.4，在各个实验条件下采集到的摩擦系数如图 3.10 所示。结果表明在各实验载荷条件下，磨损基本都是按照前述的 4 个阶段进行的，均为前三个阶段所需时间十分短暂，而第 4 个阶段持续的时间占绝对优势，而且在第 4 阶段各载荷条件的摩擦系数均非常稳定，只是在该阶段 10 N 载荷下的平均摩擦系数为 0.56，略高于 20 N 下的 0.40 和 30 N 下的 0.44。

综合以上这些实验结果，我们认为以第 4 阶段的平均摩擦系数去估算每个 FC 在整个摩擦过程中的做功情况是完全可行的。

### 3.4.2.2 不锈钢丝以不同角度接触的应力分析

金属橡胶材料中的不锈钢丝工作在弹性状态下，故其钢丝间的接触可视作弹性体间的接触，可以采用 Hertz 理论求解<sup>[137]</sup>。

金属橡胶材料中的不锈钢丝为螺旋卷曲状。但由于钢丝间接触区的尺寸均远小于钢丝尺寸，故下文中以平直钢丝为例加以简化分析，所得结果亦可近似用于金属橡胶材料的情况。

#### 3.4.2.2.1 两不锈钢丝轴线垂直的情况

钢丝直径  $d=0.3$  mm，失效构件所用材料为 Cr-Ni-Mn 系不锈钢丝（化学成分见表 3.1），其弹性模量  $E=210$  GPa，泊松比  $\nu=0.3$ 。则：

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (3.8)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

根据固体接触力学中的 Hertz 接触理论，对  $R_1 = R_2 = R_0$ ，在两圆柱体轴线垂直的情况下，其交截面半径相等时，接触区是一个圆，其半径：

$$a = \sqrt[3]{\frac{3PR}{4E^*}} \quad (3.9)$$

接触区的轴对称压力分布为：

$$P(r) = \frac{3P}{2\pi a^3} \sqrt{a^2 - r^2} \quad (3.10)$$

最大压力在接触圆的中心:

$$P_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} = \sqrt[3]{\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2}} \quad (3.11)$$

最大切应力:

$$\tau_1 = 0.31P_0 \quad (3.12)$$

在  $r = 0, z = 0.48a$  处。

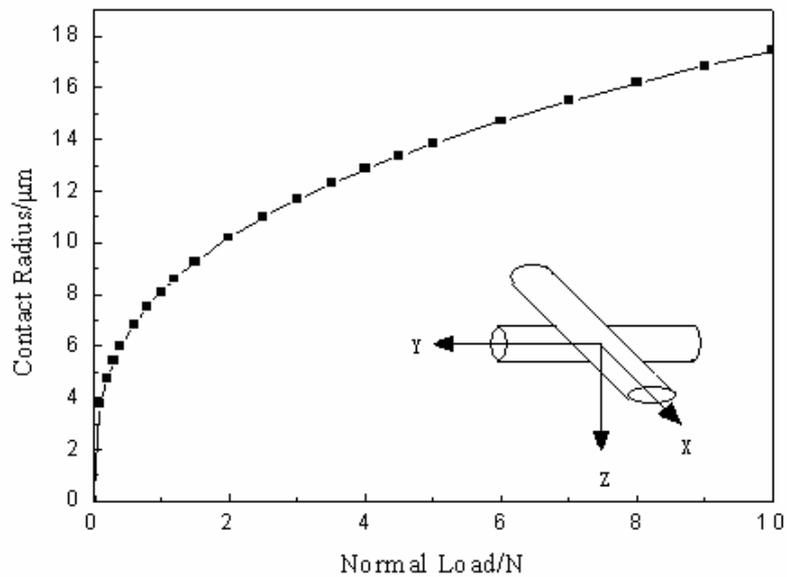


图 3.11 垂直相交不锈钢丝的法向载荷与接触半径关系

最大拉应力:

$$\sigma_r = \frac{1}{3}(1-2\nu)P_0 \quad (3.13)$$

在  $r = a, z = 0$  处。  
 远方点的接近量:

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \sqrt[3]{\frac{9P^2}{16RE^{*2}}} \quad (3.14)$$

当  $P = 10 \text{ N}$ :

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \sqrt[3]{\frac{9P^2}{16RE^{*2}}} = 4.06 \text{ } \mu\text{m} \quad (3.15)$$

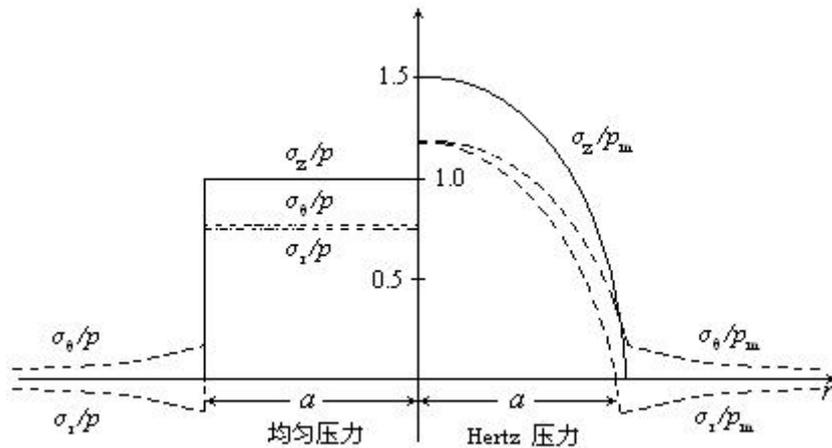


图 3.12 作用的圆形域上的均匀压力（左）和 Hertz 压力（右）

#### 3.4.2.2.2 两不锈钢丝轴线平行的情况

对于两圆柱体轴线平行的接触问题，在线载荷为  $P$  (N/M) 的作用下，在接触区形成一条宽为  $2a$  的狭长矩形接触区，其尺寸由 Hertz 理论可导出:

$$a = \sqrt{\frac{4PR}{\pi E^*}} \quad (3.16)$$

压应力在  $y$  轴上的变化是:

$$P = \frac{P_0}{2} \left(1 - \frac{y^2}{a^2}\right) \quad (3.17)$$

式中  $P_0$  为接触面上最大压应力

$$P_0 = \frac{2P}{\pi a} = \sqrt{\frac{PE^*}{\pi R}} \quad (3.18)$$

最大切应力:  $\tau_1 = 0.30P_0$ , 在  $y = 0, z = 0.78a$  处

远方点接近量:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{6P^2}{16R_e E^{*2}} F_2(R'/R'')} \quad (3.19)$$

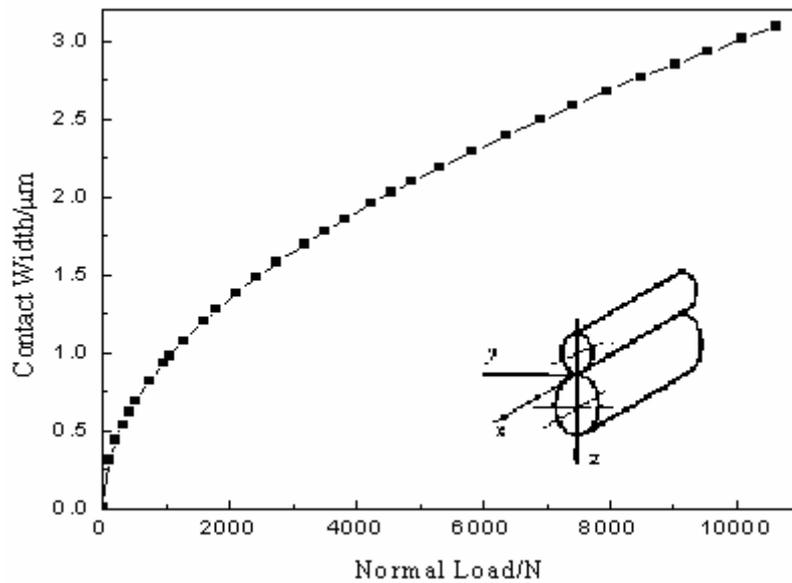


图 3.13 平行不锈钢丝的法向载荷与接触半径关系

### 3.4.2.2.3 两不锈钢丝轴线夹角为锐角的情况

两不锈钢丝夹角为锐角时，其接触区应为椭圆状。a 为长半轴，b 为短半轴。最大接触应力：

$$P_0 = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (3.20)$$

半径为 R，轴线成 45° 的圆柱体相交，相对曲率半径为：

$$R' = \frac{R}{1 - \frac{1}{\sqrt{2}}} = 3.42R \quad (3.21)$$

$$R'' = \frac{R}{1 + \frac{1}{\sqrt{2}}} = 0.585R \quad (3.22)$$

等效半径：

$$R_e = (R'R'')^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2}R \quad (3.23)$$

$$(R'/R'')^{\frac{1}{2}} = 2.41 \quad (3.24)$$

其接触区应为椭圆状。a 为长半轴，b 为短半轴。

$$a/b = (R'/R'')^{\frac{2}{3}} \quad (3.25)$$

$$c = \sqrt{ab} = \left(\frac{3PR_e}{\pi^3 E^*}\right)^{\frac{1}{3}} F_1(R'/R'') \quad (3.26)$$

最大接触应力：

$$P_0 = \frac{3P}{2\pi ab} = \left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R_e}\right)^{\frac{1}{3}} [F_1(R'/R'')]^{-\frac{2}{3}} \quad (3.27)$$

对于半径为  $R$ ，轴线成  $30^\circ$  的圆柱体相交，相对曲率半径为：

$$R' = \frac{R}{1 - \frac{\sqrt{3}}{2}} = 7.464R \quad (3.28)$$

$$R'' = \frac{R}{1 + \frac{\sqrt{3}}{2}} = 0.536R \quad (3.29)$$

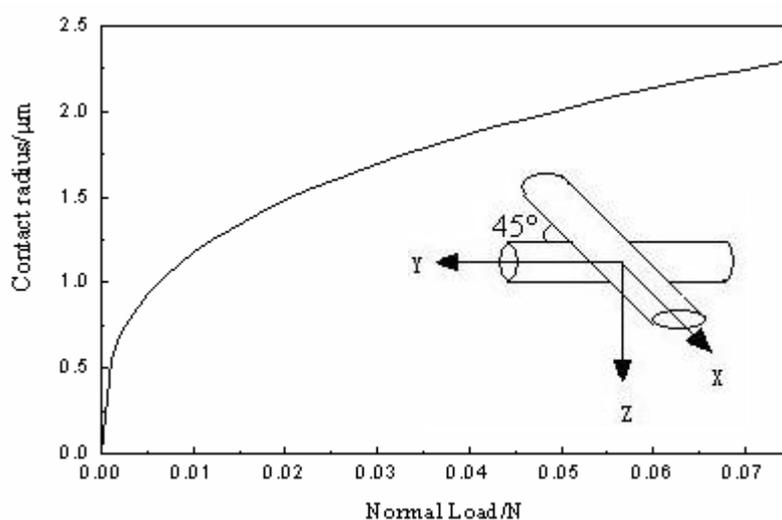


图 3.14 夹角  $45^\circ$  的不锈钢丝的法向载荷与接触半径关系

综上所述，根据Hertz弹性接触理论，钢丝之间接触的区域很小，在微米量级。因此，即使是很小的外加载荷，在接触区压应力和切向应力均很大，甚至可高达  $10^3\text{MPa}$  数量级。但由于接触点附近的材料处于三向受压的应力状态，材料往往仍处于弹性状态，且接触应力应存在于非常小的局部区域，即使超过了屈服极限，也不过在局部区域内发生塑性变形。

### 3.4.2.3 磨损痕迹的激光扫描共焦分析分析

下面来分析两钢丝接触面上由于摩擦而发生的微观变化。首先由上面关于磨损阶段划分的研究发现，在钢丝接触面上形成了第三体床，它是由磨屑和基体的强烈变形层组成的，色泽白亮，见图 3.15 三维视频显微系统的显示。通常被称为“摩擦学白层”，或者更准确的叫法是“TTS”，即Tribologically Transformed Structure<sup>[128]</sup>。

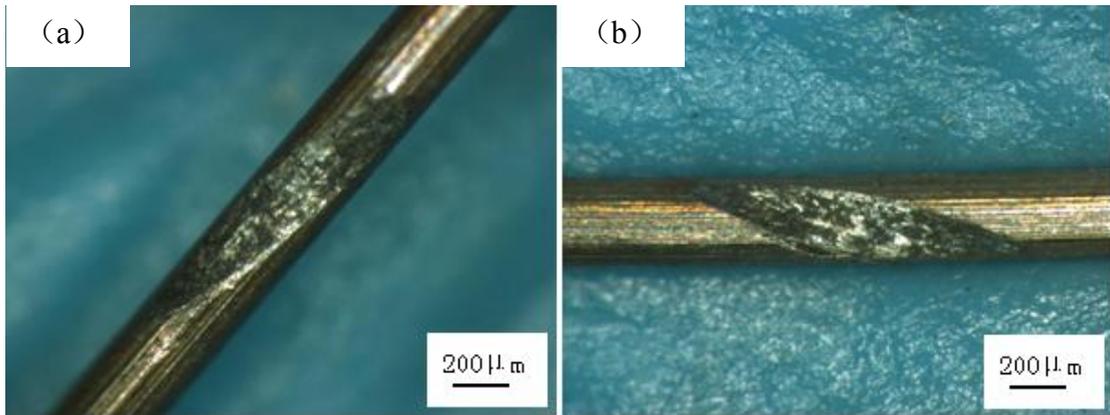


图 3.15 钢丝对磨后磨损痕迹的三维视频显微分析  
(a) 固定于圆柱上的钢丝；(b) 固定于圆台上的钢丝

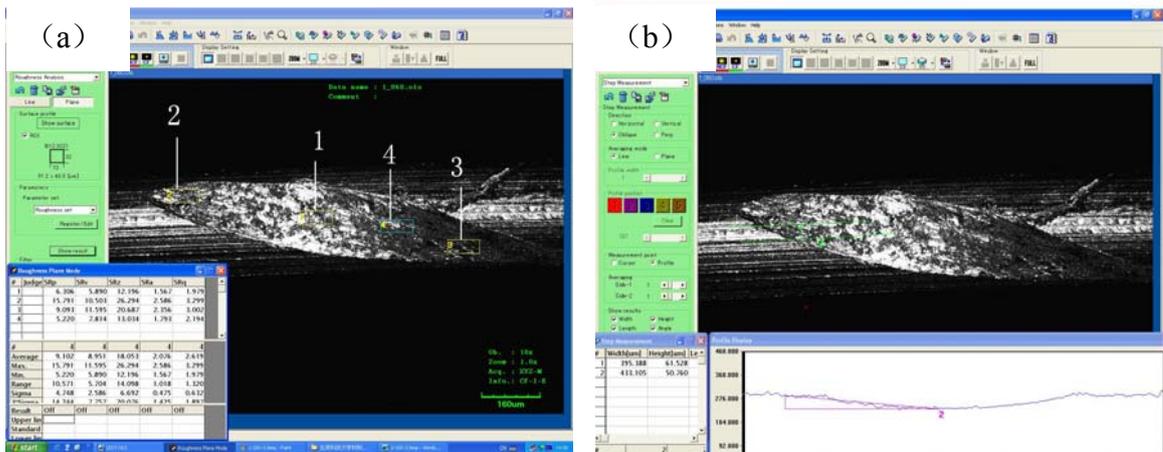


图 3.16 钢丝对磨后磨损痕迹的 LSCM 分析  
(a) 粗糙度分析；(b) 磨损深度分析

进一步的 LSCM 共焦分析（见图 3.16）发现，磨损痕迹整体的表面较为平滑，其光滑程度高于基体的原始表面，而且磨损斑的中间部位又两端部位更为平坦，图 3.14 (a) 中 中间 1、4 处  $Ra$  分别  $1.567 \mu\text{m}$  和  $1.791 \mu\text{m}$ ，仅为原始表面的  $Ra$  值  $3.447 \mu\text{m}$  的一半左右，两端 2、3 处  $Ra$  分别  $2.586 \mu\text{m}$  和  $2.356 \mu\text{m}$ ，也低于原始表面的  $Ra$  值。图 3.14 (b) 中剖面迹线显示磨损深度介于  $50\sim 60\mu\text{m}$ ，与构件疲劳实验后较深的磨损痕迹相当。

由前文关于磨损过程的分析，我们看到第 1 至第 3 阶段主要是由点接触到真正意义上的面接触过渡的过程，到第 4 阶段两根钢丝才在法向发生明显位移，磨损深度递增，由激光扫描共焦分析观察到的磨损痕迹剖面迹线显示磨损深度数据，结合前述第 4 阶段经历的时间，由于磨损是非常缓慢的过程，可以假设其速度是均匀的，于是可以估算出，该实验条件下钢丝的磨损速度约为 2 nm/s。各磨损阶段其它具体信息的比较汇总于表 3.5，其中第 1 阶段磨损速度的估计实际上是表面凹凸被打磨的速度估计值。

表 3.5 1#磨损实验各阶段参数比较

磨损阶段	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	第 4 阶段
经历振动周次	0~140	140~1 500	1 500~2 000	2 000~144000
经历时间 (s)	28	272	100	28400
过程描述	表面打磨	接触面粘着	第三体床形成	稳定磨损
平均磨损速度 (nm/s)	123.11	—	—	2.08

文献[115]中关于钢丝对磨磨损深度的研究认为，磨损深度的变化与磨损过程中接触应力的的大小及磨损机制密切相关。在磨损开始阶段，主要发生材料的粘着转移和磨粒的犁削，钢丝试样的材料损失较大，磨损深度增长迅速，随着磨损时间的延长，磨屑从接触表面排出的难度增大，粘附于接触表面的磨屑可以起到减缓磨损的作用。该文献还尝试使用接触应力与微动速度的乘积 ( $pv$  值) 和  $pv$  值与微动时间的乘积 ( $pvt$  值) 作为评价微动磨损深度的综合参数。

#### 3.4.2.4 磨损痕迹的 SEM 分析

对磨损痕迹进行清理后进行 SEM 分析 (图 3.17)，发现其表面的白亮层主要是磨屑经反复碾压而成，局部还有金属熔融的痕迹。这是由于极细的金属粉末在极短时间内聚集的摩擦热影响造成的，即“闪温”效应。均匀细小的磨屑尺寸大多在 1  $\mu\text{m}$  以下，细小的磨屑由于被反复碾压可以积聚成大块，最大的磨屑块直径可达到 20  $\mu\text{m}$  左右，见图 3.17。而在大块的磨屑上往往存在细小的微裂纹，在后续的振动周次中，大块磨屑很容易发生开裂而脱落。

于是稳定磨损阶段可以描述为：磨屑形成—局部熔融集结成块—碎裂脱落—新鲜的磨屑再形成，这样的过程周而复始使得“白层”不断向内部推进 (见图 3.18 所示)，并且在较长振动周次内维持着表面摩擦性能的相对稳定。由此，我们认为“微动单元”

的稳定磨损阶段实际上是磨屑形成和脱落过程并存竞争的结果，图 3.10 中，1#、2#、3#实验的摩擦系数曲线上在稳定阶段的微小起伏，便是佐证。

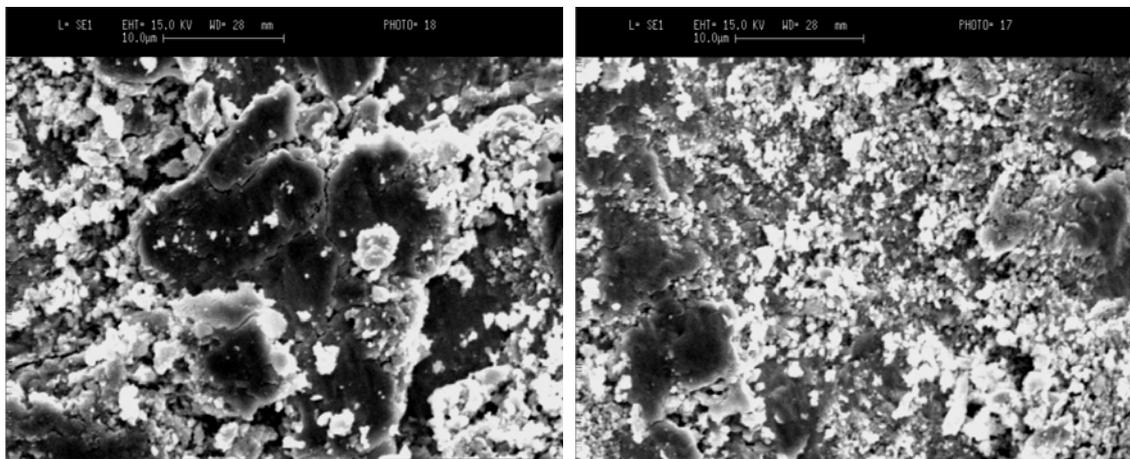


图 3.17 钢丝对磨后磨损痕迹的 SEM 分析

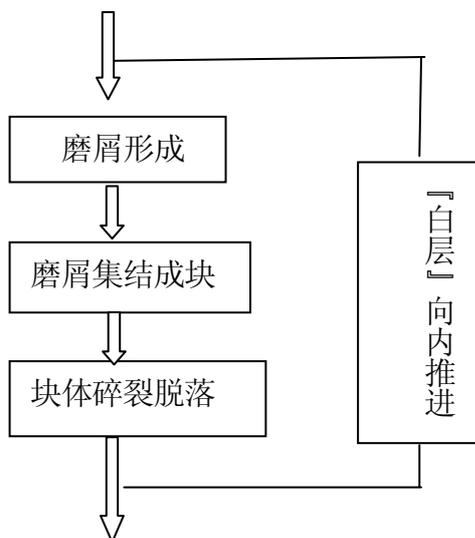


图 3.18 稳定磨损阶段的过程描述

### 3.5 金属橡胶减震构件中钢丝的疲劳断裂分析

在前面的论述中，我们看到疲劳是微动体 FC 的一种重要的失效形式，对于金属橡胶的寿命有显著的影响。随着人们对金属橡胶材料研究的进一步深入以及其应用领域的不断拓展，其寿命问题越来越突出。由于该种材料主要是依靠其内部钢丝的相互啮合、

摩擦起到阻尼作用，服役中若干钢丝的疲劳断裂必将引起其勾连结构的局部中断，一定数量的钢丝疲劳断裂导致总体结构松散，阻尼效能下降。因此，研究材料中钢丝的疲劳断裂对于评估 MR 构件的整体寿命具有十分重要的意义。

### 3.5.1 实验材料和实验方法

详见 3.2 节的隔振构件疲劳实验。

振动后金属橡胶试件产生剪切变形，在距离圆心 18 mm 处钢丝表现出多处断裂，在该区域选取若干钢丝，对其断口清洗后运用 Cambridge S-360 扫描电镜进行观察，以分析该实验条件下不锈钢丝的疲劳断裂特征。并使用 OLYMPUS LEXT OLS3000 型激光扫描共焦显微镜（LSCM）对钢丝表面形貌特征进行观察，以分析其表面特征对断裂的影响。

### 3.5.2 实验结果与分析

#### 3.5.2.1 实验用不锈钢丝表面 LSCM 观察与分析

根据本课题组寇宏宁的工作<sup>[132]</sup>，实验用不锈钢丝在冷拉拔过程中由于严重变形发生应变强化以及形变诱发的马氏体相变，其强度显著增高，变形量 64%的 $\phi 0.3$  mm 钢丝其抗拉强度可达到 1750 MPa，而一般该型号的不锈钢强度仅为 540~660 MPa，延伸率显著下降。据此我们推断该钢丝的缺口敏感性较高。用激光扫描共焦显微镜对其表面进行观察，具体实验结果见前述的钢丝表面 LSCM 观察分析。如果将其表面上的凹处看作微缺口，它们必将对于钢丝的疲劳断裂行为有重要贡献。

#### 3.5.2.2 隔振构件断裂处钢丝断口 SEM 观察与分析

为了分析隔振构件中钢丝的断裂机理，从构件开裂部位采集钢丝断口进行 SEM 观察。从断口全貌来看（图 3.19（a）），断口截面几乎成  $90^\circ$ ，断裂附近钢丝未发现明显塑性变形。断口可以明显地分为两个区域：有白亮辉纹且有微观起伏的亮区（见图 3.19（a）中 C 区）和比较平坦的灰暗区（见图 3.19（a）中 D 区），亮区和灰区所占比例各半。将亮区放大后，如图 3.19（b）所示，看到辉纹密度由表及里逐渐变得稀疏，即随着辉纹从表面向内部发展，其间距也逐渐增大，并且辉纹不是以同一曲率半径向前推进，而是以舌形叠加形式向前发展。

进一步的分析发现，每一条辉纹是裂纹扩展的痕迹即疲劳带。严格来说，疲劳带是一系列基本相互平行的条纹，呈放射状分布。而本实验用钢丝是经多道次拉拔形成的  $\phi 0.3$  mm 超细钢丝，其累计变形量在 90% 以上，内部的夹杂和硬质颗粒由于不能与基体协调变形而与基体脱开形成孔洞<sup>[133]</sup>，裂纹随着载荷周次的增加向内部扩展时，遇到孔洞位置，其前端的应力场松弛，裂纹扩展突然加快，形成一段向前伸出的舌形疲劳带，

钢丝中的多处孔洞造成各部位应力场相互影响，于是形成图 3.19 (c) 所示的舌形叠加的波浪状疲劳带。

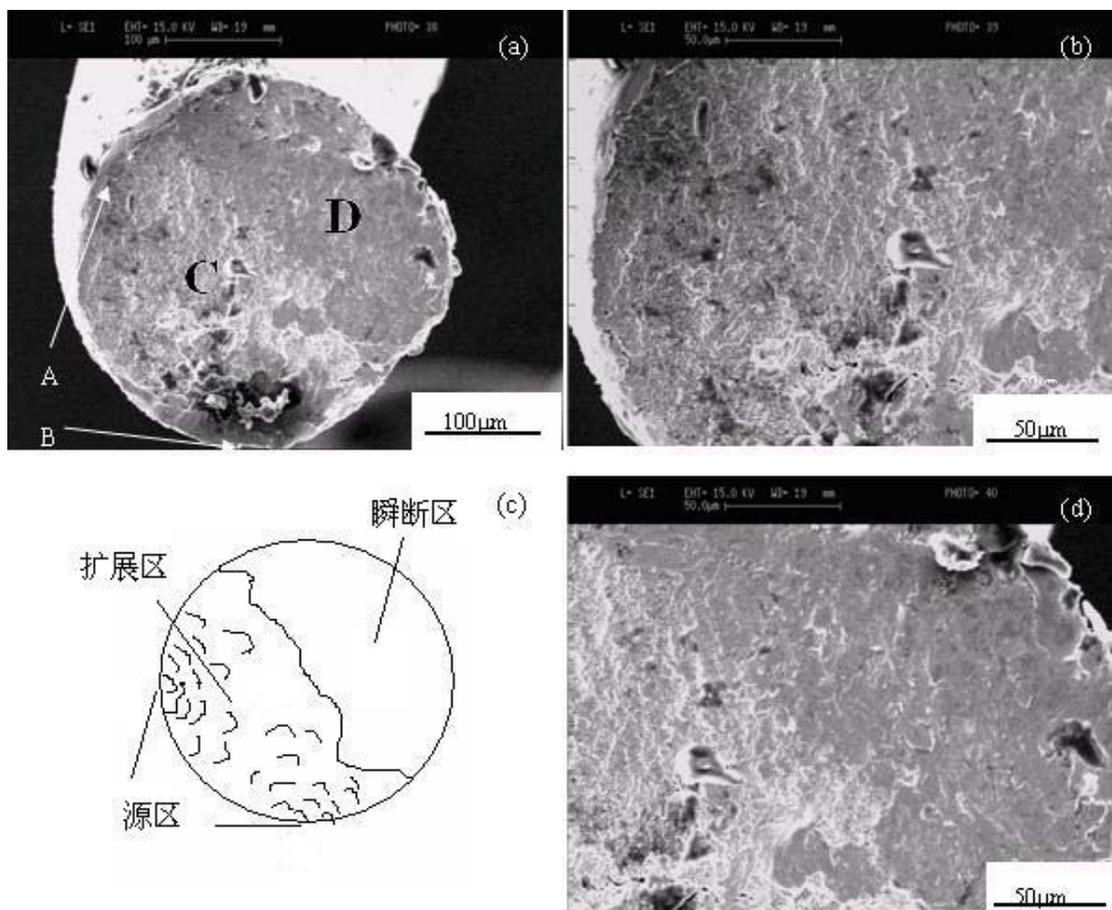


图 3.19 隔振构件中不锈钢丝断口 SEM 观察

(a) 断口全貌； (b) 扩展区； (c) 裂纹扩展示意图； (d) 扩展区与瞬断区

由于疲劳条带方向与局部裂纹扩展方向垂直且条带沿着局部裂纹扩展方向向外凸，沿着疲劳带曲线的法向反推可以找到两个裂纹源，见图 3.19 (a) 中 A、B 处，裂纹源均出现在钢丝的表面。由此认为，钢丝表面微米量级起伏的凹凸处为其疲劳裂纹萌生区域。

构件经过 8 h 频率为 5 Hz 的加载后经历了  $1.44 \times 10^5$  个应力循环，而应力循环与疲劳条带并非存在一一对应关系，往往是几个应力循环才形成一个微观可见的疲劳条带 [137,138]。因为，在一定的压应力状态下，裂纹闭合并且其尖端处于尖锐状态，在随后的拉应力状态下，裂纹尖端应力状态发生改变，拉、压应力循环作用，当拉应力积聚到材

料的屈服极限，裂纹尖端形状才发生塑性钝化，该钝化过程可使裂纹向前扩展一段与裂纹尖端张开位移相同量级的距离。同样，也需要若干应力循环才能使得压应力积聚到材料的屈服极限，裂纹尖端形状重新锐化，裂纹随着其尖端锐化—钝化的循环过程不断扩展并且留下疲劳条带。由于压缩期间的裂纹闭合不能完全消除拉应力造成的钝化，因而，裂纹张开角度逐渐增大，其扩展速度也逐渐增加。

Paris提出了用断裂力学方法来描述疲劳裂纹扩展速率的经验公式<sup>[137,138]</sup>：

$$da / dN = c(\Delta K)^m \quad (3.30)$$

即疲劳裂纹扩展速率 $da/dN$ 与应力强度因子范围成幂律关系，式中： $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ ，其中 $K_{\max}$ 和 $K_{\min}$ 分别为一个疲劳应力循环中应力强度因子的最大值和最小值； $c$ 和 $m$ 为材料常数。对于韧性材料， $m$ 一般在2~4之间。

根据应力强度因子手册，设直径为 $2R$ 的长圆轴含一半椭圆表面裂纹，裂纹长半轴为 $b$ ，短半轴为 $a$ ，受拉压交变应力 $\pm\Delta\sigma$ 时，裂纹尖端的应力强度因子幅值 $\Delta K$ 为：

$$\Delta k = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.31)$$

上式中： $\Delta\sigma$ 为应力幅值。本实验中交变载荷幅值 $P$ 为600 N，圆环形构件的横截面积 $S = \pi(D^2 - d^2)/4$ ，假定钢丝在构件中是均匀分布的，则其固相体积分数 $k = \rho_{MR}/\rho_s$ ，其中 $\rho_s$ 为钢丝密度，根据3.4.2.2节中两小段钢丝Hertz接触应力的计算，得出 $\Delta\sigma = 10^3$ MPa。将(3.31)式代入(3.30)式，得：

$$a^{-m/2} da = c\Delta\sigma^m \pi^{m/2} dN \quad (3.32)$$

上式两边就可以积分：左边的积分限从 $a_0$ （初始缺陷尺寸即表面轮廓算术平均偏差）到 $a_f$ （最终缺陷尺寸即开始发生快速断裂时的裂纹尺寸）；右边的积分限是从0到破坏的循环次数 $N_f$ 。积分的结果（适用于除 $m=2$ 的所有 $m$ 值）是：

$$\frac{2}{(2-m)}(a_f^{1-m/2} - a_0^{1-m/2}) = c\Delta\sigma^m \pi^{m/2} N_f \quad (3.33)$$

当 $m=2$ 时，结果是：

$$\ln(a_f / a_0) = c\pi\Delta\sigma^2 N_f \quad (3.34)$$

在本实验所采集的断口中，灰区和亮区几乎都是各占一半比例，所以最终裂纹深度  $a_f$  取钢丝直径的一半，即  $a_f=0.15$  mm。将钢丝表面的微米凹凸看成初始裂纹，取  $a_0=Ra=0.003447$  mm 代入 (3.35) 式，设该材料的Paris指数  $m$  取 3，则有：

$$-2(a_f^{-1/2} - a_0^{-1/2}) = c\Delta\sigma^3 \pi^{3/2} N_f \quad (3.35)$$

为了提高该种钢丝的疲劳寿命，我们可以选用两种方案：(i) 提高钢丝材料的冶金质量，减少其中夹杂物和孔洞的数量，使裂纹扩展速度减慢；(ii) 提高其表面光滑程度即减小初始裂纹尺寸。

在本实验条件下  $a_0=0.003447$  mm， $a_f=0.15$  mm，有  $c\Delta\sigma^3 N_f=5.194$ ，如果采取方案 (i)，提高钢丝材料的冶金质量，减少其中夹杂物和孔洞的数量，使裂纹缓慢扩展长度达到 0.25 mm，才发生断裂。即使得裂纹扩展到  $0.25/0.3=83.33\%$  直径处才发生突然断裂，则有：

(i) 当  $a_0=0.003447$  mm， $a_f=0.25$  mm，得： $c\Delta\sigma^3 N_{fi}=5.404$ ，此时， $N_{fi}/N_f=5.404/5.194=1.0404$ ，即裂纹缓慢扩展区增加 40%，寿命增加 4.04%。

如果采取方案(ii)，将钢丝表面光滑程度提高一倍，即  $Ra=0.0017235$  mm，则有：

(ii) 当  $a_0=0.0017235$  mm， $a_f=0.15$  mm，得： $c\Delta\sigma^3 N_{fii}=7.730$ ，此时， $N_{fii}/N_f=7.730/5.194=1.4883$ ，即表面光滑程度提高 50%，寿命增加 48.83%。

可以看出，该实验条件下，金属橡胶隔振构件中钢丝的疲劳寿命对于初始裂纹的值即其表面的光滑程度非常敏感，提高钢丝的表面光滑程度比提高材料的韧性更有利于显著增加隔振材料的疲劳寿命。

上述断裂模型分析是建立在假设钢丝表面没有磨损的基础上的，实际上，由于微动磨损在钢丝表面形成的磨痕也能充当较大尺寸的起始裂纹，导致钢丝的提前断裂。MR 材料中少数钢丝的提前断裂对整体力学行为的影响不甚明显，只有当钢丝断裂数量达到一定程度，钢丝的勾连结构发生局部中断，才影响到 MR 材料的使用性能。有关此方面的研究，尚需要进一步的探索。

### 3.5.3 钢丝微动疲劳特征分析

选用冷拉拔 1Cr18Ni9 不锈钢丝制备空心圆柱形金属橡胶隔振构件并进行疲劳实验,对钢丝表面进行激光扫描共焦(LSCM)分析,对钢丝断口进行扫描电镜(SEM)分析,结果表明:

(1) 本实验条件下,隔振构件中钢丝的断裂断口附近没有宏观的塑性变形,属于脆性断口。

(2) 实验用冷拉拔不锈钢丝表面的每圈周长上平均存在五十余个微米量级的凹凸体,其高度的算术平均偏差  $Ra$  为  $3.447\ \mu\text{m}$ ,此值相当于钢丝半径的  $2.298\%$ ,在交变应力作用下,较大的凹凸体充当原始裂纹向心部逐渐扩展。

(3) 断口分析表明:疲劳裂纹起源于表面,并且呈现“多源”特征。扩展区和瞬断区所占比例各半,扩展区有舌形叠加的波浪状疲劳带。

(4) 进一步的分析说明,提高钢丝的表面光滑程度比控制材料的冶金质量更有利于显著增加隔振构件的疲劳寿命。

## 3.6 本章小结

本章以金属橡胶隔振构件疲劳实验得到的数据参数为基础,利用在传统柱一块摩擦样品上刻槽以嵌入并固定钢丝的方法,在 SRV 高温摩擦磨损实验机上,实现了  $\phi 0.3\ \text{mm}$  冷拉拔 1Cr18Ni9 不锈钢钢丝干摩擦实验,首次把材料的隔振性能与其内部“微动单元”的行为联系起来分析。实验中采集了不同载荷条件下的摩擦系数,并且对钢丝表面形貌和各个磨损痕迹进行激光扫描共焦显微术及扫描电镜分析,实验结果表明:在摩擦系数曲线上可以定量地把磨损过程划分为 4 个阶段,其中的稳定磨损阶段在时间上占绝对优势,摩擦系数相对平稳。对于磨损痕迹的分析揭示了在各磨损阶段接触界面处发生的微观变化。得到的主要结论如下:

(1) 本实验条件下,隔振构件中的“微动单元”均属于两根钢丝小角度接触,其平均的法向压力为  $11\ \text{N}$ ,振幅约  $4\ \text{mm}$ ,构件服役过程中各“微动单元”将发生不等量微动磨损,磨损痕迹呈现“有头有尾”的“彗星”状;

(2) 实验用冷拉拔不锈钢丝表面存在微米量级的凹凸体,其高度的算术平均偏差  $Ra$  为  $3.447\ \mu\text{m}$ ,轮廓微观不平度的平均间距为  $17.685\ \mu\text{m}$ ,计算表明,在中等大小的磨损痕迹上平均存在二百余个微米量级的凹凸体。在磨损的初期阶段,约需要  $28\ \text{s}$  的时间打磨这些凹凸体;

(3) 钢丝对磨实验表明,“微动单元”的磨损可以划分为 4 个阶段:表面打磨、接触面粘着、第三体床形成和稳定磨损阶段,其中的稳定磨损阶段持续时间最长,摩擦系

数的也相对比较稳定。经分析认为，可以用此阶段摩擦力做功来估算磨损全过程中的摩擦力做功；

(4) 钢丝之间接触的区域在微米量级。在接触区压应力和切向应力均很大，甚至可高达  $10^3$  MPa数量级。但由于接触点附近的材料处于三向受压的应力状态，材料往往仍处于弹性状态，且接触应力应存在于非常小的局部区域，即使超过了屈服极限，也不过在局部区域内发生塑性变形；

(5) 材料中钢丝的断裂疲劳裂纹起源于表面，并且呈现“多源”特征。扩展区和瞬断区所占比例各半，扩展区有舌形叠加的波浪状疲劳带。提高钢丝的表面光滑程度比提高材料的冶金质量更有利于显著增加隔振材料的疲劳寿命。

## 4 MR 材料三维结构模型的研究

各种 MR 材料均具有金属丝相互交错勾联形成的类似橡胶高分子结构那样的空间网状结构, 然而, 一直以来对于 MR 材料中金属丝的空间勾联结构的研究还停留在相对落后的阶段。一方面表现在制备 MR 材料时, 许多工艺参数如: 相对密度、金属丝直径等还依靠经验积累, 绕丝制做毛坯的过程必须手工完成, 质量不够稳定; 另一方面由于金属丝空间勾联结构的不确定性限制了人们对其隔振机理的定量研究。

MR 材料的制备工艺和技术参数对其性能的影响分析是金属橡胶技术研究领域的主要课题之一, 大量的制备工艺实践和研究工作表明, 构件的尺寸、密度、螺旋卷直径、簧丝走向、选用钢丝的直径、力学性能等技术参数对于材料整体的力学性能和物理性能都有重要影响<sup>[54,65]</sup>。在目前公开的文献之中, 只有不足 10% 的研究工作以实验方法并结合数学上的回归理论分析了若干制备技术参数对材料性能的影响, 对于材料内部金属丝空间结构的认识还未形成定量的数学模型。

本文基于 MR 材料典型制备过程的不锈钢丝螺旋卷制备、螺旋卷编织、二维毛坯卷绕和三维毛坯冲压 4 个基本工序, 以及编织过程的均匀和冲压过程中圆柱形毛坯内部钢丝拓扑关系不变的两条基本假设, 建立了一种实心/空心圆柱形 MR 材料的三维结构模型, 并利用通用的 CAD 技术在计算机上实现了金属丝空间结构的三维实体可视化建模, 以期对此类 MR 制品的优化设计和今后的机械化生产提供必要的参考价值。

### 4.1 MR 材料的典型制备过程

MR 材料的制备过程主要有如下步骤: 选丝—缠绕制备螺旋卷—铺设螺旋卷制造毛坯—冲压或碾压—后期处理<sup>[15,19]</sup>。钢丝发生的形状改变的工艺过程分别是以下 4 步: 第 1 步钢丝由直线变成螺旋卷; 第 2 步由螺旋卷编织成二维毛坯; 第 3 步是由二维毛坯卷绕成三维毛坯; 第 4 步是三维毛坯经冲压而变成构件。因此, 建模也分 4 个阶段分别进行。

### 4.2 基本假设

#### 4.2.1 均匀性假设

为了深入研究螺旋卷在空间分布的几何规律, 我们首先忽略边界效应, 只考虑其内部均匀的编制结构。另外, 毛坯片的长度如果不能满足下一步芯轴缠绕的长度要求, 需要片与片的拼接, 这样在片与片的接头部位必然将出现钢丝结构的局部错位, 引发整个三维结构的不均匀性。还有, 由于是手工完成的编织, 螺旋丝的松紧程度不够均匀, 在数学建模过程中, 忽略钢丝空间结构中一切因人为原因造成的不均匀因素。

首先，不妨先将螺旋卷的中心线提取出来，简化为直线，将螺旋卷之间的交叉点简化为几何点，模仿金属学中空间点阵的情况，我们也把这样的几何点称为阵点。因为MR材料在服役时就是借助这些交叉点进行摩擦，耗散能量来起到阻尼作用的，用这种方法来研究金属橡胶空间勾联结构中交叉点的分布规律，有着重要的实际意义。

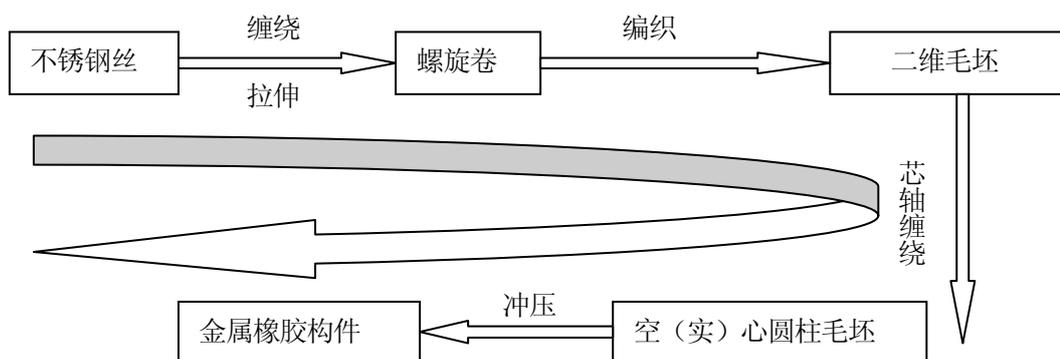


图 4.1 MR 材料的典型制备过程

#### 4.2.2 冲压过程径向拓扑关系不变假设

圆柱形的三维毛坯被塞入模具型腔时，径向尺寸减小，但是由于各层片状毛坯的啮合情况良好，可以认为各层之间的相对位置关系没有改变，只是卷绕更加密实，即各层间的相互嵌入更加紧实。据此，在进行三维毛坯建模时，其卷绕的毛坯外径取构件最终的尺寸，对于空心构件，其卷绕毛坯的内径和外径都取构件最终的尺寸。即冲压时其径向尺寸不再改变，只均匀压缩其轴向距离。

#### 4.3 螺旋卷模型建立

制备隔振元件的金属橡胶制品一般选择直径  $d=0.1\sim 0.5$  mm 的奥氏体不锈钢丝为原料，在凸轮和圆辊碾压或在条式线轴上缠绕成螺旋卷，在缠绕过程中，缠好的每匝螺旋线在丝线弹性的作用下都扩张其直径从而能够自由地离开后续线圈所在的型心位置，这样就保证了连续在同一选定直径处缠绕螺旋卷，螺旋卷的钢丝中心线直径即中径  $D$  的选择由需要制作元件的阻尼特性决定，文献[15]中介绍螺旋卷中径  $D$  一般在 5~15 倍丝线直径范围之内。用上述方法绕好螺旋卷后，需要拉伸螺旋卷使其螺距与螺旋卷直径大致相等，即

$$h_f = D \quad (4.1)$$

这样能使各丝线之间的啮合状况最好并使得最后坯件压制时体积稳定性最高。

简便起见，不妨设钢丝从X轴上的空间点  $(D/2, 0, 0)$  起始，绕着Z轴以角速度  $\omega_j$  右旋转，令  $\theta_j = \omega_j t$ ，此处， $t$  是旋转时间。则钢丝中心线的轨迹可以描述为：

$$\begin{cases} X=D/2\cos \theta_j \\ Y= D/2\sin \theta_j \\ Z= \omega_j t h_j / 2\pi = \theta_j D / 2\pi \end{cases} \quad (4.2)$$

## 4.4 二维毛坯模型建立

### 4.4.1 三种编织二维毛坯的方法描述

二维毛坯的制备过程即为铺设螺旋卷的过程，模仿织物的平面编织技术经纬交错将拉伸好的螺旋卷编织成薄片，在实际操作中通常有钉板编织、织物编织和钩连编织三种方法（见图 4.2）。

首先分析钉板编织，其尺寸受板上固定钉子外围尺寸的影响，如图 4.2(a)所示。此法适用于制备小尺寸的薄片，其重复单元因人工编织方法而异。图 4.2(b)显示的平板编织重复单元为四边形，而实际的编织过程中可以控制螺旋卷的走向制备出长方形、平行四边形等多种重复单元。与平板编织方法相比，织物编织法能够制备出连续长尺寸的带状毛坯（如图 4.2(c)所示），其重复单元比较稳定，均为四边形，而且生产效率相对较高，图 4.2(d)显示其重复单元稳定为四边形，只是四边形的各边松紧不如平板编织的均匀。

钩连编织采用特制的钉板和钩针设备，编织时将拉伸好的螺旋线卷一端固定在钉板上，并顺次缠绕在钉板起始的第一排钉子上，这样在每个钉子周围形成环状螺旋线卷线圈，从第二排钉子开始进行规则地交叉编织，如图 4.2 (e)、(f) 所示，用钩针穿过前排已形成的线圈并钩住螺线，拉钩针向后使螺线穿过线圈并挂于后排对应钉子上，后排钉子周围也形成环状线圈，且前后线圈是交叉的，如此重复交叉编织动作，直至形成一张具有一定面积的平面网。此种编织工艺方法特点也是重复单元规律性好，但是尺寸较小容易造成拼接处的不均匀结构。

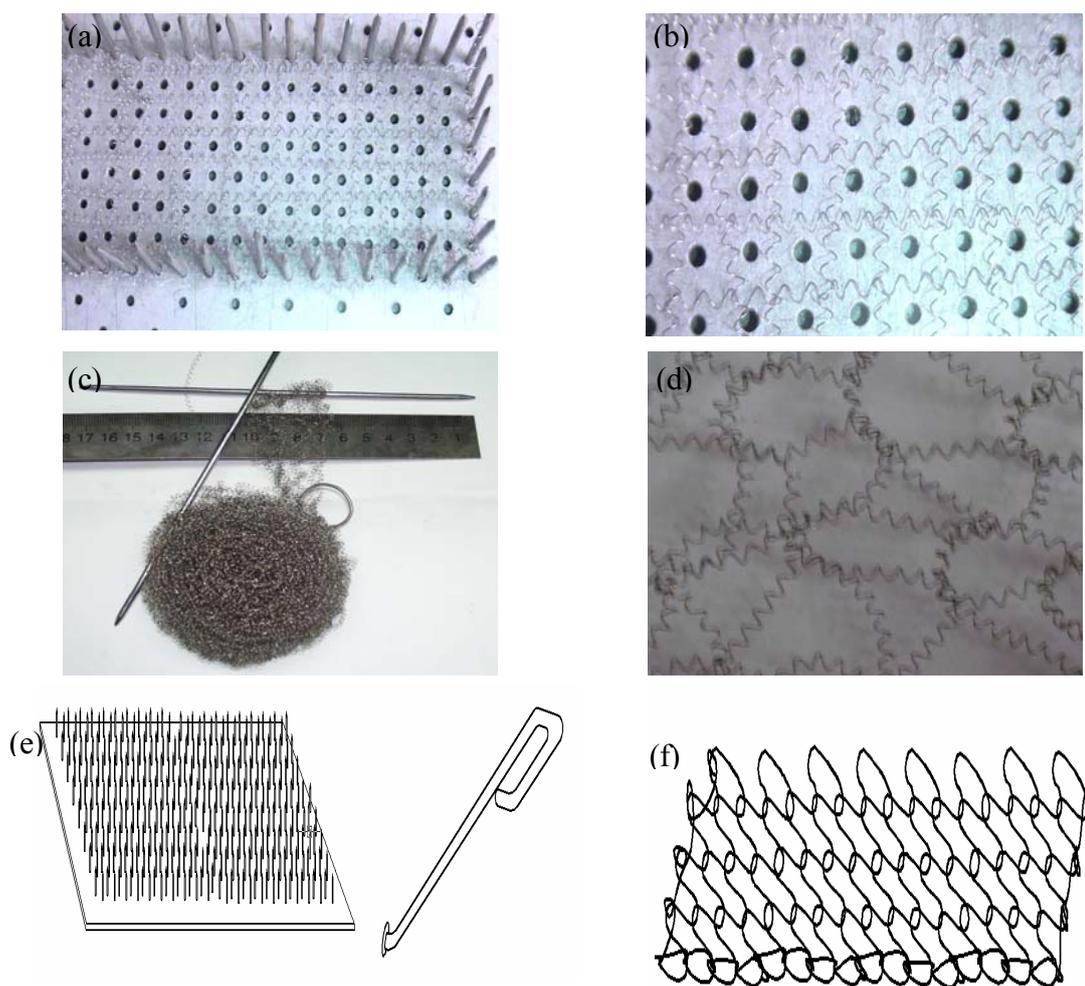


图 4.2 片（带）状毛坯编织模式

(a) 平板编织工具；(b) 平板编织重复单元；(c) 织物编织工具；  
(d) 织物编织重复单元；(e) 钩连编织工具；(f) 钩连编织重复单元

对比分析以上 3 种编织方法，我们发现，钉板编织和钩连编织的优点是平面点阵单元中的边长  $a$ 、 $b$  比较均匀，缺点是毛坯大小由于受到平板尺寸限制，毛坯片的长度不能满足下一步芯轴缠绕的长度要求，需要片与片的拼接，这样在片与片的接头部位必然出现点阵的局部错位，引发整个三维点阵的不均匀性，与理想的数学模型有一定的差距。而织物编织的方法能够制备出长度尺寸足够芯轴缠绕的长带状毛坯，解决了薄片拼接引发点阵错位的问题，但是其平面点阵中的边长  $a$ 、 $b$  不够均匀，也给数学建模带来一定困难。因此，在建模过程中，需要兼顾三种编织工艺技术特点，求同存异，建立最具广泛代表意义的数学模型。

## 4.4.2 模型参数提取

首先，提取螺旋卷的中心线，由于编织的人为因素影响，该中心线可能不完全是直线。但是，毛坯内部因编织而形成的格子大体是均匀的，每个点阵的边长尺寸相对于整个二维毛坯的尺寸来讲相对较小，相当于微小的弧段，如果将微小弧段化曲为直，简化为直线，将螺旋卷之间的交叉点简化为几何点，模仿金属学中原子空间点阵的情形，我们也把这样的几何点称为阵点。

表 4.1 平板编织螺旋卷中心线的平面点阵类型

点阵类型	符号	描述
正方		$a = b$ $\alpha = 90^\circ$
长方		$a \neq b$ $\alpha = 90^\circ$
菱方		$a = b$ $\alpha = 60^\circ$
六方（或等边三角形）		$a = b$ $\alpha = 60^\circ$
斜方		$a \neq b$ $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ $\alpha \neq 60^\circ$

根据均匀性假设，将二维编织的毛坯简化为由各类重复单元组成的点阵模型。按照金属学中晶体点阵理论，空间阵点若在二维空间能够拓扑展开并且完全填满整个二维空间，则这样的点阵有且仅有 5 种不同的排列方式，见表 4.1 所示，称之为 5 种平面点阵<sup>[139]</sup>，而描述每种点阵的几何特征只需要描述其最小重复单元即可。

这 5 种点阵类型分别是正方、长方、菱方、六方（或等边三角形）和斜方。假设点阵中最小重复单元的两个邻边分别是  $a$  和  $b$ ，他们所夹的锐角是  $\alpha$ 。各个点阵的参数描述如表 4.1 所列。从理论上讲，这 5 种点阵类型完全可以代表实际制备过程中三种编织工艺所形成的螺旋卷中心线组成的均匀结构。

#### 4.4.3 模型实例

综合前面的比较分析，从建立三维模型均匀性和数学表达的角度出发，我们仅选取最具代表意义的正方点阵作为螺旋卷平面铺设的模型，在正方点阵中， $a=b$ 。如图 4.3 所示。假定制备的长片状毛坯的宽度为  $W$ ，长度为  $L$ 。此例中， $a=b=5D$ ， $W=2a$ 。

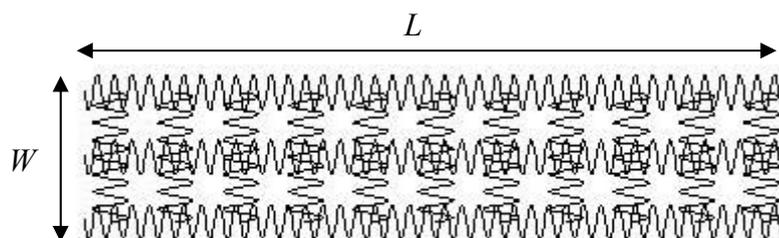


图 4.3 螺旋卷正方点阵的铺设模型

为了卷绕柱形毛坯的需要，通常  $L$  远远大于  $W$ 。实际制备过程中所需的片状毛坯长度  $L$  即为卷绕制备三维毛坯形成的阿基米德螺旋线弧长，具体参数计算见下一节式 4.5。

#### 4.5 三维毛坯模型的建立

有文献<sup>[15]</sup>表明目前大约 70% 的金属橡胶制品是用来制作减振和阻尼元件，而减振和阻尼元件大多数是回转体，如：实心圆柱体、空心圆柱体。接下来的步骤就是将编织好的二维毛坯即钢丝带卷绕起来，制成三维毛坯。如果制造空心圆柱体元件，则在卷绕时加上一定直径的芯轴。

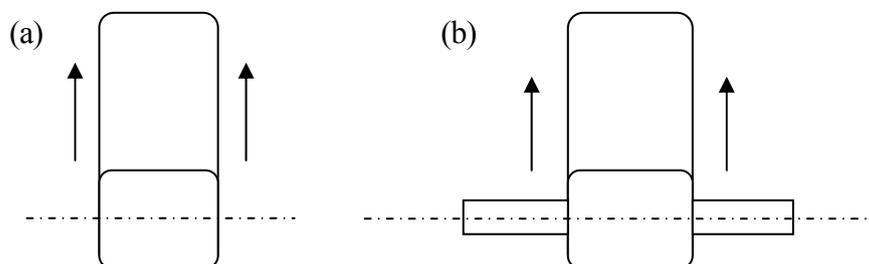


图 4.4 卷绕过程示意图(a)实心圆柱；(b)空心圆柱

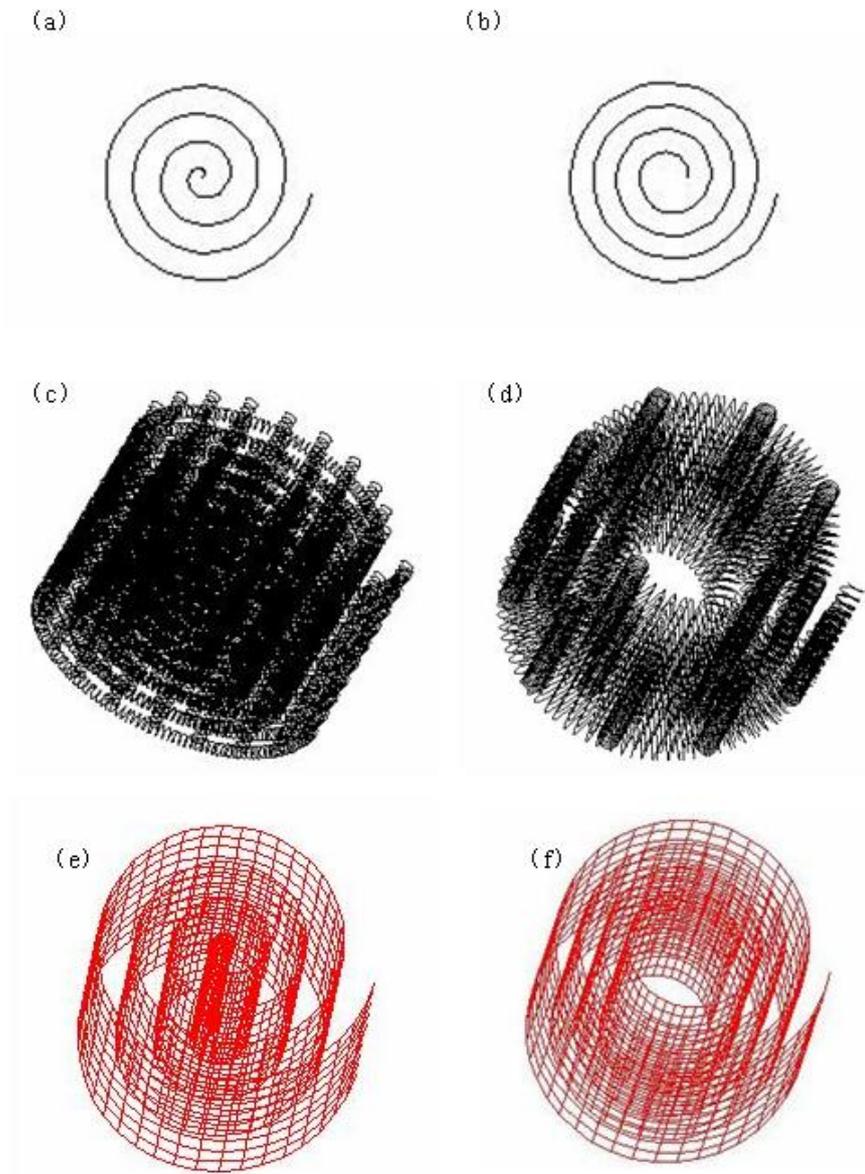


图 4.5 三维毛坯模型

(a) 实心阿基米德螺旋线； (b) 空心阿基米德螺旋线； (c) 实心圆柱三维模型；  
 (d) 空心圆柱三维模型； (e) 实心圆柱线架结构； (f) 空心圆柱线架结构

以卷绕实心圆柱为例，每匝钢丝带的卷绕轨迹构成阿基米德螺旋线（如图 4.5 (a) 所示）：一动点以常速 $v$ 沿一射线运动，而这一射线又以定角速度 $\omega_2$ 绕极点 $O$ 转动时，该点所描述成的轨迹，数学方程为：

$$\rho = \alpha \varphi \quad (4.3)$$

$$a = \frac{v}{\omega_2} \quad (4.4)$$

卷绕空心圆柱时，只需改变一下起点位置即可。为了描述方便起见，约定螺旋线逆时针旋转，其起点和终点都落在 X 轴上。并且，根据第二条假设，其内径和外径尺寸都取成品构件最终的外形尺寸。

在前面建立二维毛坯时，其长度 L 即是此处的阿基米德螺旋线弧长，可以由下式计算得出：

$$L = \frac{a}{n} \left( \varphi \sqrt{\varphi^2 + 1} + \ln \left( x + \sqrt{x^2 + 1} \right) \right) \quad (4.5)$$

简便起见，以平面毛坯取正方点阵为例，分别卷绕制备实心 and 空心圆柱体构件，来讨论钢丝的空间结构。图 4.5 显示的是三维毛坯的模型，为了在设计材料结构时显示清楚的考虑，还建立了以螺旋卷中心线为线架的模型。

#### 4.6 三维毛坯冲压模型的建立

三维毛坯制备完成之后，即被放入模具中冲压，根据前述的冲压过程中毛坯的径向拓扑关系不变的基本假设，冲压时只在轴向距离上发生均匀的压缩。为了显示清楚，以线架模型来分别示意实心 and 空心圆柱体模型的压缩过程，如图 4.6 所示。在实际的冲压过程中，由于钢丝之间相互缠绕、啮合，各匝螺旋卷并不完全均匀地被压缩。对于轴向尺寸较大的构件，不均匀性更加明显，对于此类构件通常需要翻转方向，采用小载荷，多次冲压的方法使其成型，最大限度地改善其结构均匀性。为了衡量冲压过程，还需要引入压缩比的概念，即构件成品高度与三维毛坯高度  $H_R$  的比值，而三维毛坯的高度  $H_R$  与二维毛坯的宽度  $W$  是相等的。于是压缩比为：

$$\bar{H} = \frac{H_{MR}}{H_R} = \frac{H_{MR}}{W} \quad (4.6)$$

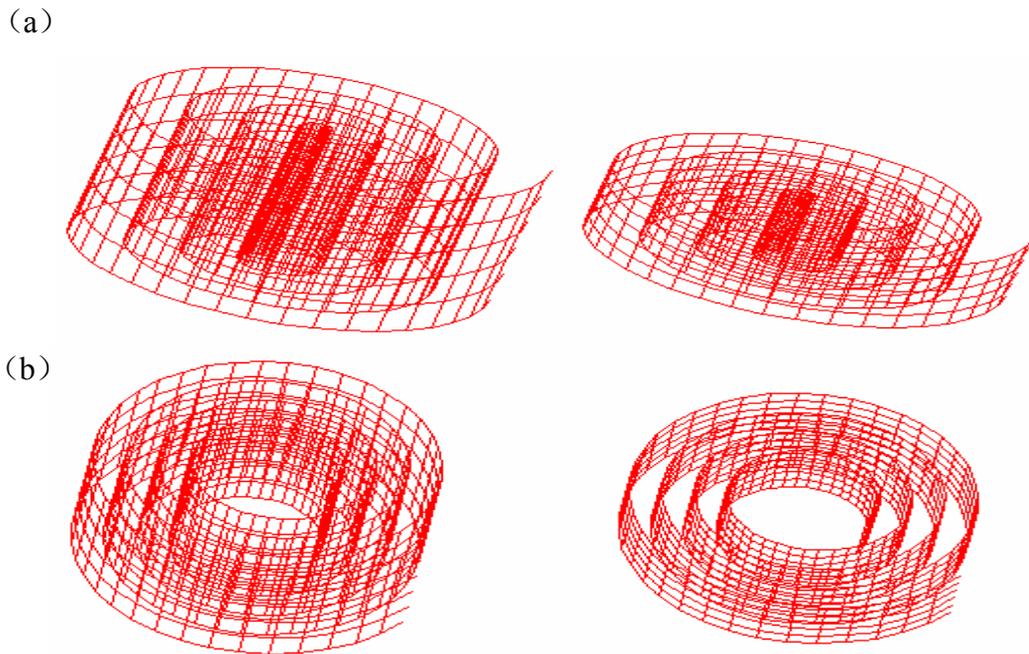


图 4.6 冲压过程模型 (a) 实心圆柱冲压; (b) 空心圆柱冲压

#### 4.7 三维模型的评价

为了检验模型的可靠性,以四方二维点阵为例,以表 4.2 中的制备参数建立三维模型,与在此参数下制备的实际构件进行对比研究。图 4.7 为实际制备好的圆柱形 MR 构件。

在本表中,除了轴向压缩比 $\bar{H}$ 之外,其余 10 个参数均为相对独立的,这些参数将与圆柱形 MR 构件内部的钢丝空间结构存在一一对应的关系,它们能够代表 MR 材料结构的全面信息,称为 MR 材料的十大结构特征参数。

在目前可以查到的关于 MR 材料实验研究的文献资料中,介绍 MR 实验材料时往往只涉及到钢丝直径、螺旋卷直径、构件外形尺寸等结构参数,这些信息对于描述 MR 材料的结构是远远不够的,无法检验和分析文献中提及的性能实验的数据重复性和稳定性,阻碍了这类新产品标准化生产的进程。本文首次提出 MR 材料的十大结构特征参数,并且这些参数都来源于材料的制备过程,可以方便地用于控制 MR 样品的生产,便于实现控制结构因素的实验分析,对于总结此类新型材料的本构关系模型具有非常重要的意义。

表 4.2 制备圆柱形 MR 构件的参数

参数名称	参数符号	数值 (mm)
丝径	d	0.3 mm
螺旋卷直径	D	4.0 mm
螺旋卷螺距	H <sub>j</sub>	4.0 mm
点阵单元边长	a	4.0 mm
点阵单元边长	b	4.0 mm
点阵边长夹角	α	90°
二维毛坯宽度	W	25.0 mm
二维毛坯长度	L	157.8 mm
MR 构件直径	D <sub>MR</sub>	20.0 mm
轴向压缩比	$\bar{H}$	0.524
MR 构件高度	H <sub>MR</sub>	13.1 mm

相对密度  $\bar{\rho}$  是制备金属橡胶材料时需要考虑的一个重要参数，对于此类材料的阻尼性能有着显著的影响，它是MR材料的密度  $\rho_{MR}$  与制备构件所选用的钢丝密度  $\rho_s$  的比值。

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_{MR}}{\rho_s} \quad (4.7)$$



图 4.7 以表 4.2 参数制备的样件

在所建立的模型中，MR 材料是由钢丝和孔隙两相组成的，其固相体积分数  $k$  可以用钢丝占有的有效体积与构件外形体积之比得到。为了计算钢丝总体积，首先要计算钢丝总长度，对于式 (4.2) 的螺旋线，每一匝弧长计算公式如下：

$$L_{2\pi} = \int_0^{2\pi} \sqrt{\frac{D^2}{4} \cos^2 t + \frac{D^2}{4} \sin^2 t + \frac{D^2 t^2}{4\pi^2}} dt \quad (4.8)$$

宽度为  $W$ ，长度为  $L$  的正方点阵毛坯，其内部螺旋线的总长度为：

$$L_{\text{总}} = \frac{a}{D} L_{2\pi} * \frac{W}{a} * (\frac{L}{a} + 1) + \frac{a}{D} L_{2\pi} * \frac{L}{a} * (\frac{W}{a} + 1) \quad (4.9)$$

钢丝总体积为：

$$V_{\text{丝}} = L_{\text{总}} S_{\text{丝}} = L_{\text{总}} \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.10)$$

以  $V_{\text{丝}}$  比上构件的体积，即可得到模型的固相体积分数  $k$ ，从物理意义上看模型中钢丝的固相体积分数与实际 MR 材料的相对密度是同一个概念，其数值应该是相等的。所以，利用模型计算出固相体积分数与材料相对密度相等的原理可以检验模型的准确性。

实际圆柱形构件的体积  $V_{MR}$  可以用其底面积  $S_{MR}$  与高度  $H_{MR}$  的乘积得到，于是：

$$k = \frac{V_{\text{丝}}}{V_{MR}} = \frac{L_{\text{总}} S_{\text{丝}}}{S_{MR} H_{MR}} = \frac{L_{\text{总}} \pi d^2}{4 S_{MR} H_{MR}} = \bar{\rho} \quad (4.11)$$

即在制备方法确定、钢丝直径和模型直径确定的情况下，模型的固相体积分数与构件高度成反比关系；在制备方法及构件体积一定的情况下，模型的固相体积分数与所使用的钢丝的直径的二次方成正比关系。以此参数制备的构件高度为 13.1 mm，经测定其相对密度为 0.3，而经过模型计算的模型固相体积分数为 0.28，相对误差为 6.7%，验证了模型的可靠性。两者的差别是钢丝理论计算长度进而计算出的重量与实际缠绕钢丝的重量偏差引起的。具体原因为：比重误差、接头、缠绕过程中的变形、缠绕结束后的弹性回复变形等。

前述的建模造型过程中基本是按照金属橡胶材料的制备工艺进行的，但是由于数学模型的抽象性，决定了模型和真实的钢丝缠绕还是有一定的差异的，与参数化、均匀化的几何模型相比，真实的钢丝空间结构更加复杂。主要表现在：

一、边界“退化”效应。从建立模型的角度出发，无论是二维螺旋卷的编织铺设，还是三维毛坯的卷绕、压缩，都忽略了边界非均匀性的影响，建模的思想是用函数曲线或者几何图形向二维或三维空间外延而获得实体模型。而在实际制备工艺中，二维毛坯的编织铺设需要边界封闭，即“锁边”，卷成三维毛坯放入模具中冲压时，模具的形腔将修正毛坯的边界外形，相当于三维实体也有类似的“锁边”效应。可以理解为钢丝按照一定的几何特征向空间扩展排列时，发展到临近边界时，其几何特征会逐渐偏离中心部钢丝所遵循的规律，即几何特征逐渐“退化”，呈现出边界“退化”效应。在构件的边界部位，钢丝的分布更加紧密。由于该效应的存在，以此模型统计相对密度、接触点个数等参数时，单位体积内的统计数据比整体构件的统计数据更接近实际情况。

二、钢丝的折点勾连行为。建立数学模型时，螺旋卷编织铺设二维毛坯时经向和纬向是各自断开的，没有发生相互勾连，各自在空间的位置不会互相影响。而在实际编织时，螺旋卷在毛坯的边界部位是首尾相连的，并且在该连接部位，螺旋卷中心线的走向发生突然改变，即在此区域存在折点。在工件随后的冲压工艺或者服役中，由于这些折点附近钢丝的曲率半径较小，钢丝弯折将会损伤其表面质量，由前面 3.5 节中关于钢丝表面光滑程度对其疲劳寿命的研究分析，可以推断它们将处于最不利的应力状态，压缩时可能发生断裂。实际冲压后的清洗过程经常能够看到脱落下来的钢丝碎屑，经分析认为是局部折点附近断裂的钢丝。可以肯定，局部折点处的钢丝在构件制备过程中已经断裂，在材料随后的服役过程中，折点处钢丝断裂仍在继续，但是由于该类断裂发生的判据尚不明确，而且断点个数对于整体阻尼性能的影响效应仍不明晰，所以本文的建模工作均没有考虑折点行为。

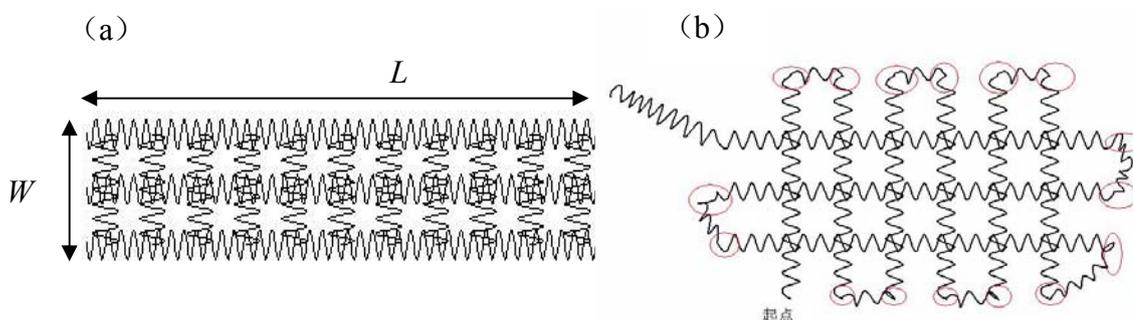


图 4.9 模型与实际二维毛坯的比较 (a) 模型； (b) 实际毛坯

实际构件中存在的边界“退化”效应折点勾连行为都将引起实际构件的相对密度值比模型计算得出的固相体积分数数据偏高，以表 4.2 中的参数制备的 MR 材料其实测的相对密度值比模型计算值偏高 6.7%，这一实验结果说明，MR 材料中钢丝空间结构存在不均匀性，而且在靠近其边缘部位的钢丝结构比心部结构更加紧实。

虽然三维模型在描述钢丝空间位置关系上和真实的 MR 材料还有差距，但是该模型已经能够反映钢丝分布的基本规律，对于预报使用不同直径材料制备构件所需要的钢丝总长、材料相对密度、材料内部钢丝接触点数量变化与压缩比的关系、建立材料整体弹性系数本构关系等都奠定了理论基础。

## 4.8 MR 材料计算机辅助设计 (CAD) 系统的开发

### 4.8.1 开发环境

系统开发环境由以下部分组成:

- 1) 开发语言: C/C++;
- 2) 开发工具: Visual C++;
- 3) 开发平台: 通用绘图 CAD 系统

### 4.8.2 数学基础

(1) 螺旋弹簧数学描述

$$\begin{cases} x = R \cos(\theta) \\ y = R \sin(\theta) \\ z = \frac{h_j}{2\pi} \theta \end{cases} \quad (4.12)$$

其中  $R$  为螺旋的半径,  $\theta$  为旋转的角度, 取值  $0 \rightarrow \infty$ , 逐渐递增,  $h_j$  为螺距。

(2) 阿基米德螺旋线数学描述

$$\rho = \frac{h_j}{2\pi} \theta \quad (4.13)$$

其中  $\theta$  为旋转的角度, 取值  $0 \rightarrow \infty$ , 逐渐递增,  $h_j$  为螺旋间距。

(3) 三维图形几何变换

平移变换

$$[x^* \ y^* \ z^* \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix} = [x+T_x \ y+T_y \ z+T_z \ 1] \quad (4.14)$$

其中  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$  为平移距离。

### 旋转变换

#### A 绕 x 轴旋转

$$[x^* \ y^* \ z^* \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

其中  $\theta$  为旋转的角度。

#### B 绕 y 轴旋转

$$[x^* \ y^* \ z^* \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

其中  $\theta$  为旋转的角度。

#### C 绕 z 轴旋转

$$[x^* \ y^* \ z^* \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

其中  $\theta$  为旋转的角度。

### 4.8.3 螺旋弹簧的创建

二维 CAD 平台提供最基础的直线绘制工具函数，如 `void CreateLine(sds_point pt1, sds_point pt2, int ncolor)`，其中 `pt1`，`pt2` 为三维空间点，`ncolor` 为直线颜色。

螺旋弹簧的生成算法如下：

- 1) 输入螺线的方向 `vect`，起始圆心 `ptCenter`，螺旋的直径 `dMaxRadius`，螺距 `dP`，丝径 `dMinRadius`，螺旋的颜色 `ncolor`，螺旋的长度 `dLength`。
- 2) 螺旋旋转角度  $\theta=0$ ；
- 3) 根据螺旋螺旋弹簧公式计算螺旋线空间点  $(x, y, z)$ ；
- 4) 如果  $\theta$  不等于 0，则绘制一直线 (`CreateLine`)；
- 5)  $\theta=\theta+\Delta$ ；
- 6) 计算螺旋的长度；
- 7) 如果螺旋的长度已达到则执行步骤 8)，否则执行步骤 2)；
- 8) 结束；

### 4.8.4 阿基米德螺旋线的创建

根据阿基米德螺旋线数学公式，为方便程序的实现，把阿基米德螺旋线公式变换如下：

$$\begin{cases} x = (R_k + V \times \theta) \cos(\theta) \\ y = (R_k + V \times \theta) \sin(\theta) \end{cases} \quad (4.18)$$

其中  $R_k$  为阿基米德螺旋线空心半径， $\theta$  为旋转的角度， $V$  为一常数，与螺旋的最大半径，空心半径和缠绕圈数有关，

阿基米德螺旋线的生成算法与螺旋弹簧的生成算法相似，在此不做详述。

### 4.8.5 三维构件的建立

基于螺旋弹簧的生成算法，创建二维金属橡胶毛坯的网格，然后，把二维金属橡胶网格根据阿基米德螺旋线的缠绕算法可以生成实心或者空心的圆柱形三维毛坯。再根据第二条假设，在圆柱形轴向均匀压缩，生成最终的金属橡胶材料模型。

## 4.9 本章小结

本章工作基于实心 and 空心圆柱形金属橡胶材料的制备过程，首次建立了材料内部钢丝空间分布的参数化结构模型，并且以 CAD 技术实现了其内部钢丝空间几何结构的三维可视化，该模型能够精确描述构件中钢丝的空间分布。

分析以往研究 MR 制备工艺的文献资料,发现研究结果都表明:金属橡胶材料中钢丝直径、螺旋卷参数、编织方法等制备工艺参数都极大地影响其力学性能。但是,在研究 MR 力学性能(如阻尼性能、隔振性能)及物理性能(如过滤性能)的文献中,一般只介绍实验选用 MR 的相对密度、外形尺寸、钢丝材料及直径等参数,忽略了钢丝空间结构对 MR 性能的影响。关于 MR 这一新型材料的制备和性能方面的两个层面的工作尚缺乏必要的衔接。本章的工作填补了此方面的研究空白。改变了以往把钢丝结构看成混沌的局面,开拓了今后研究金属橡胶材料的一个新领域。

在表 4.2 中,除了轴向压缩比 $\bar{H}$ 之外,其余 10 个参数均为相对独立的,这些参数将确定圆柱形 MR 材料内部钢丝的空间结构,是圆柱形 MR 材料的结构特征参量。该结构模型显示:圆柱形 MR 材料内部钢丝的结构在轴向和径向所遵循的几何规律是不同的,因此,材料的性能也是各向异性的,在该模型基础上建立其性能本构关系时,必须考虑到这些结构的影响因素。

在该三维结构模型中,由于量化了手工制备金属橡胶材料过程中的各个参数,如平面毛坯编织点阵类型、点阵常数以及缠绕制备三维毛坯的具体参数,并且进一步明确了各个参数之间的函数关系,对于今后推进金属橡胶材料生产的机械化、或者实现某个工艺的机械化提供理论基础。

MR 材料中钢丝空间分布的参数化模型的建立为今后研究该材料的物理、力学性能的本构方程奠定了理论基础。另外,本章定量地分析了 MR 制备工艺参数对于 MR 构件几何参数的影响,该工作达到改变工艺参数即可基于所建立的结构模型预报金属橡胶材料的结构特征参数的水平。

## 5 基于结构模型的几种关键性能预报

由于长期以来对于 MR 材料内部的钢丝结构缺乏必要的定量认识，现有的建模及本构分析都是建立在把钢丝假设为在三维空间均匀分布的基础上，相关结论带有一定的局限性。本章从前面建立的钢丝空间结构的参数化三维模型出发，定量地统计钢丝的总长度、总体积、螺旋卷线匝的数量、MR 材料固相体积分数等数据，再结合钢丝本身的机械和物理性能参数等，能够更加全面地预报预测金属橡胶材料的阻尼、隔振、过滤性能，建立更为可靠的本构关系。

简便起见，本章以螺旋卷的中心线为架构，平面毛坯取正方点阵，卷绕制备实心圆柱形 MR 材料为例讨论钢丝的空间结构。

### 5.1 现有金属橡胶材料模型的分析

#### 5.1.1 A.И.Белоусов模型

在本文的工作之前，A.И.Белоусов教授<sup>[15]</sup>首先引用现象学方法研究金属橡胶材料的性能，他提出假设金属橡胶材料中线匝在三个相互垂直的方向x、y、z轴上是简单的等概率取向分布的模型，该计算模型在一定程度上能够地反应循环加压时金属橡胶材料变形曲线的重要性质。由于假设金属橡胶材料中线匝在三个相互垂直的方向x、y、z轴上是简单的等概率取向分布，如图 5.1 所示。则在单位体积内丝线线匝的匝数为：

$$n_V = \frac{4\bar{\rho}}{\pi^2 D d^2} \quad (5.1)$$

$$\left. \begin{aligned} k_z &= \frac{E_{MRz} d^2}{8D^3}, & e_z &= \frac{1}{k_z} \\ k_{xy} &= \frac{E_{MRxy} d^4}{5D^3}, & e_{xy} &= \frac{1}{k_{xy}} \\ k_{xy} &\approx 4.15k_z \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

沿着x、y、z轴中的任一轴线布置有相同数量的线匝，对于线匝总数为 $n_V$ 的立方体金属橡胶构件，沿每个轴分布的线匝个数为 $n_V/3$ 。同时在法向施加作用力P的xoy平面中沿x和y轴取向的线匝数为 $n_{xy}$ ，而在与作用力P方向重合的xoy平面内沿z轴取向的线匝数为 $n_z$ ，则

$$n_{xy} = \frac{2}{3} n_V \quad (5.3)$$

$$n_z = \frac{1}{3} n_V \quad (5.4)$$

实际上各种取向线匝的分布是不均匀的，大部分线匝在冲压时使自身平面垂直与冲压方向，此外还与各轴线成不同的角度。这些特殊性在该模型中均通过修正系数来核算，而修正系数是通过金属橡胶样件在具体冲压条件下的实验数据加以处理而得到的。

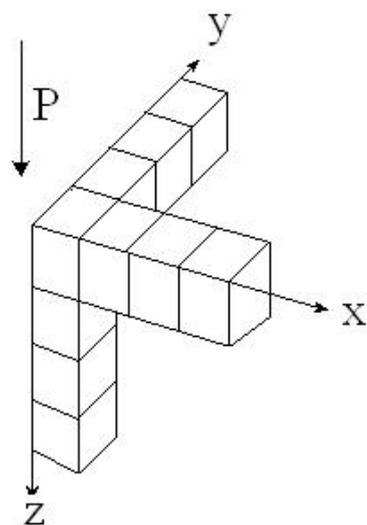


图 5.1 三垂直轴等概率分布图

样件中line匝在三个相互垂直的平面中沿 x、y、z 轴方向分布。若假设立方体样件在三个基本方向中的每个方向能划分出  $i$  个柱块，则

$$i = n^{2/3} \quad (5.5)$$

每个柱块的线匝数为  $n/i$ ，由式 (6.4) 有

$$\frac{n}{i} = n^{1/3} = n_{\text{柱}xy} + n_{\text{柱}z} \quad (5.6)$$

$$\text{式中 } n_{\text{柱}xy} = \frac{2}{3} n^{1/3}$$

$$n_{\text{柱}z} = \frac{1}{3} n^{1/3}$$

其实，在金属橡胶样件中是看不见有序的柱块的。考虑到冲压后样件会有弹性反冲，因而在线匝间会出现间隙，而当载荷作用时是逐步形成附加接触的，所以在开始加压时全部线匝的工作方式从平均角度看才与所采取的方式（一系列柱块形式）对应。上述柱块概念在相对密度较大时与实际情况相距甚远。

假定柱块中的线匝如同在整个试样中那样沿取向方向分离的话，则可求出柱块的柔性系数

$$e_{\text{柱}} = e_{xy} n_{\text{柱}xy} + e_z n_{\text{柱}z} \quad (5.7)$$

为了评定金属橡胶材料的初始弹性模量 $E_{MR0}$ ，取  $1\text{cm}^3$  的微块来研究。按照上述想法，若不考虑摩擦力并认为相邻柱块没有交叉啮合的线匝，则初始压缩模量可确定为：

$$E_{MR0} = \frac{i}{e_{\text{柱}}} = \frac{n^{2/3}}{e_{xy} n_{\text{柱}xy} + e_z n_{\text{柱}z}} \approx \frac{n^{1/3}}{1.62 e_{xy}} \quad (5.8)$$

将式 (6.1) 和 (6.2) 代入式 (6.8) 中得：

$$\left. \begin{aligned} E_{MR0} &= C_0 E_{\text{丝}} \sqrt[3]{\left(\frac{d}{D}\right)^{10} \bar{\rho}} \\ C_0 &= 0.0914 \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

应当考虑到， $C_0=0.0914$  只对纯粹的各向同性样件才是正确的，若在某一方向上，轴线与作用力方向重合的线匝占优势，则在这一方向上的弹性模量会减小，而其它两个方向的弹性模量会增加。

该模型很好地解释了金属橡胶材料在循环脉动载荷下的滞环回线，在一定程度上体现了因内摩擦而耗散能量的机理。但是该模型把钢丝分布看成是完全均匀的，这与实际的钢丝空间分布还有一定差距。

### 5.1.2 接触作用模型

由金属橡胶构件的相互接触作用和弹性阻尼元件循环变形时滞环回线的特征，悬臂梁是一种可能的模型方案，此悬臂梁由一系列根部截面有固定约束的杆形成，杆的一端有托架，在不加载状态下，各托架间的间隙相对，而在加载状态，托架间只沿着很小的表明接触（图 5.2）。端部内的外载荷作用在第一个杆上，系统变形过程中，部分外载荷自沿着“托架”的接触表面传给后续各杆。与此同时杆的长度随着相邻元件最近接触点间的跨距长度的变化而变化。

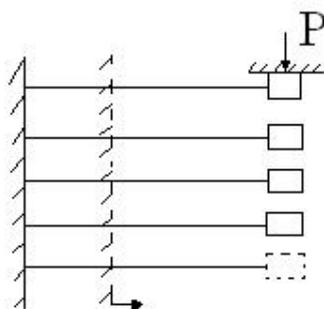


图 5.2 接触作用模型

经受压缩变形的金属橡胶制品可以看成是由彼此串联和并联的杆系形成的结构阻尼系统。按照杆系统可以建立其弹性参数的本构方程，但是杆系统中串联和并联杆的数量还不能与实际材料的结构建立联系。

### 5.1.3 能量耗散计算模型

由前面的分析，金属橡胶材料可以想像为一定数量的弹性梁元件，各元件以在接触点上的法向压力和摩擦力而发生相互作用。弹性元件在这些接触点上发生变形而产生了偏移，在此偏移过程中摩擦力完成了耗散能量的做功过程，金属橡胶材料的变形力  $Q$  沿冲压方向  $y$  的平行方向施加，由此元件在  $y$  方向的刚度可以如下形式给出

$$c_{yi} = c_{ni} \sin^2 \alpha_i \quad (5.10)$$

式中 $\alpha_i$ 是弹性元件取向角（表示元件施力点处的元件轴切线与y轴的夹角）； $c_{ni}$ 是接触点处弹性元件在轴的法线方向的刚度。

元件变形和其非弹性阻尼力间的比例系数由如下表达式确定（该公式中字号偏大）

$$Q_{yi} = fc \sin \alpha_i \cos \alpha_i \quad (5.11)$$

式中 $f$ 为丝线的摩擦系数， $c$ 为金属橡胶构件中螺旋卷的特征几何参数。这种元件的变形循环计为弹性力 $P_i$ 和非弹性变形阻力 $T_i$ 的总合形式

$$Q_i = P_i + T_i = c_{yi}y_i + Q_{yi}y_i \quad (5.12)$$

同时以摩擦力循环功与循环势能之比形式确定的元件能耗系数 $\psi_i$ 表示为：

$$\psi_i = 2f * ctg \alpha_i \quad (5.13)$$

金属橡胶材料的弹性力和非弹性变形阻尼力确定为个别元件对应力的合力。它们既受元件连接方式（串联、并联）的影响，又与元件本身的特性相关。材料能耗系数由相对作用力方向取向的变形元件能耗系数的平均值和丝线的摩擦系数决定。

以上这些模型均是由金属橡胶材料载荷—变形曲线的实验现象出发。虽然对于该种材料的阻尼特性分析在理论上进行了很好的解释，但是它们所建立的本构关系尚不能与材料中钢丝的空间结构结合起来，不能用于分析量化的钢丝空间结构对于材料性能影响，而本文建立参数化三维模型可以用于材料几何参数及各种性能参数的预报预测。

## 5.2 参数化三维模型对材料几何参数的预报预测

### 5.2.1 模型固相体积分数与MR材料的相对密度计算

MR 多孔材料的固相体积分数是制备金属橡胶材料时需要考虑的一个重要参数，它对此类材料的阻尼性能有着显著的影响，因为 MR 多孔材料是由钢丝固体相和孔隙相两相组成的，所以从数值上讲其固相体积分数与该种材料的相对密度是相等的。相对密度为多孔材料的密度 $\rho_{MR}$ 与制备材料的钢丝的密度 $\rho_M$ 的比值。

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_{MR}}{\rho_M} \quad (5.14)$$

在所建立的模型中，钢丝固相体积分数  $k$  可以用钢丝总体积与构件体积之比得到。为了计算钢丝总体积，首先要计算钢丝总长度，对于式 (5.4) 的螺旋线，每一匝弧长计算公式如下：

$$L_{2\pi} = \int_0^{2\pi} \sqrt{\frac{D^2}{4} \cos^2 t + \frac{D^2}{4} \sin^2 t + \frac{D^2}{4\pi^2}} dt \quad (5.15)$$

宽度为  $W$ ，长度为  $L$  的正方点阵毛坯，其内部螺旋线的总长度为：

$$L_{\text{总}} = \frac{a}{D} L_{2\pi} * \frac{W}{a} * (\frac{L}{a} + 1) + \frac{a}{D} L_{2\pi} * \frac{L}{a} * (\frac{W}{a} + 1) \quad (5.16)$$

钢丝总体积为：

$$V_{\text{丝}} = L_{\text{总}} S_{\text{丝}} = L_{\text{总}} \frac{\pi d^2}{4} \quad (5.17)$$

以  $V_{\text{丝}}$  比上构件的体积，即可得到模型的固相体积分数  $k$ ，从物理意义上看模型中的固相体积分数与实际 MR 材料的相对密度是同一个概念。所以，通过模型计算出固相体积分数可以实现对 MR 材料相对密度的预报预测。

### 5.2.2 模型固相体积分数与构件高度的关系

实际圆柱形构件的体积  $V_{MR}$  可以用其底面积  $S_{MR}$  与高度  $H_{MR}$  的乘积得到，于是：

$$k = \frac{V_{\text{丝}}}{V_{MR}} = \frac{L_{\text{总}} S_{\text{丝}}}{S_{MR} H_{MR}} \quad (5.18)$$

即在制备方法确定、钢丝直径确定的情况下，模型的固相体积分数与构件高度成反比关系。为了检验模型的可靠性，以正方二维点阵为例，以表 5.1 的参数基础上绘制固相体积分数与构件高度的关系曲线，见图 5.3 (a)。

在图 5.3 的  $k-H_{MR}$  曲线中, 当固相体积分数  $k$  值高于 0.5 时, 由于钢丝固相体积分数太大, 冲压时钢丝断裂严重, 制备的 MR 材料失去实用价值, 略去此段不予讨论。当固相体积分数  $k$  值低于 0.2 时, MR 材料的外形尺寸不够稳定, 实用价值也不高。此处重点讨论固相体积分数  $k$  从 0.2 到 0.5 时对应构件高度的变化。

表 5.1 制备圆柱形 MR 元件的参数

参数名称	参数符号	数值 (mm)
钢丝直径	$d$	0.3 mm
螺旋卷直径	$D$	4.0 mm
螺旋卷螺距	$H_j$	4.0 mm
点阵单元边长	$a$	4.0 mm
点阵单元边长	$b$	4.0 mm
点阵边长夹角	$\alpha$	$90^\circ$
二维毛坯宽度	$W$	25.0 mm
二维毛坯长度	$L$	157.8 mm
MR 元件直径	$D_{MR}$	20.0 mm

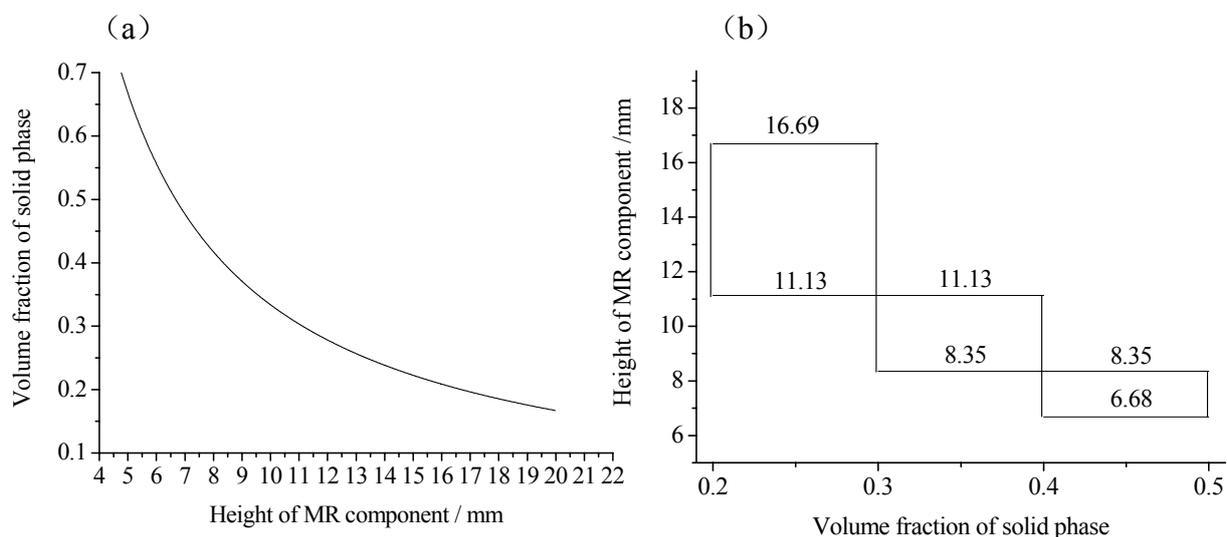


图 5.3 模型中固相体积分数与构件高度的关系

图 5.3 (b) 显示了钢丝固相体积分数  $k$  从 0.2 到 0.5 变化时, 对应构件高度变化幅值。当  $k$  从 0.2 增加到 0.3 时, 构件高度从 16.69 mm 压缩到 11.13 mm, 压缩幅值为 5.56 mm;  $k$  从 0.3 增加到 0.4 时, 构件高度从 11.13 mm 压缩到 8.35 mm, 压缩幅值为 2.78 mm;  $k$  从 0.4 增加到 0.5 时, 构件高度从 8.35 mm 压缩到 6.68 mm, 压缩幅值为 1.67 mm。

图 5.3 (b) 还说明, 在  $k=0.3$  附近, 构件高度  $H_{MR}$  对应有较大的变化区间, 即钢丝固相体积分数在此水平下, 对于构件高度的变化处于不敏感阶段。这个模型分析结果很好地解释了目前关于 MR 材料实验研究的文献<sup>[3,18,45,46,51,71,72,75,78]</sup>中介绍所使用的 MR 材料的相对密度大多数均是介于 0.25~0.3 之间, 并且, 该模型为今后此类 MR 材料的设计提供了数值化的参考依据。

### 5.2.3 模型固相体积分数与 MR 材料中钢丝直径的关系

根据式 (5.18), 得

$$k = \frac{V_{丝}}{V_{MR}} = \frac{L_{总} S_{丝}}{S_{MR} H_{MR}} = \frac{L_{总} \pi d^2}{4 S_{MR} H_{MR}} \quad (5.19)$$

表 5.2 制备圆柱形 MR 元件的参数

参数名称	参数符号	数值 (mm)
螺旋卷直径	D	4.0 mm
螺旋卷螺距	$H_j$	4.0 mm
点阵单元边长	a	4.0 mm
点阵单元边长	b	4.0 mm
点阵边长夹角	$\alpha$	90°
二维毛坯宽度	W	25.0 mm
二维毛坯长度	L	157.8 mm
MR 元件直径	$D_{MR}$	20.0 mm

在制备方法及 MR 材料体积一定的情况下, 模型的固相体积分数  $k$  与所使用的钢丝的直径的二次方  $d^2$  成正比关系。下面以正方二维点阵为例, 在表 5.2 参数基础上绘制固相体积分数与构件高度的关系曲线, 见图 5.4。图 5.4 显示了构件高度分别为 10 mm、12.5

mm、15 mm和 17.5 mm时，钢丝固相体积分数（即MR材料相对密度）与钢丝直径的关系。

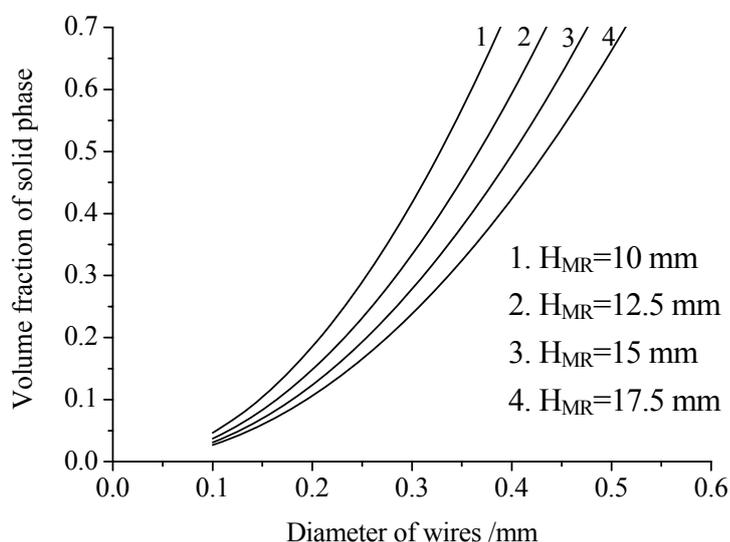


图 5.4 模型中固相体积分数与钢丝直径的关系

### 5.3 模型中钢丝接触点数与循环脉动加压滞环变形回线面积的关系

由于金属橡胶材料服役时主要依靠其内部众多接触点的干摩擦耗散能量而起到阻尼作用，由第 3 章关于微动单元的实验分析发现，微动磨损的第 4 阶段持续时间在整个磨损过程中占有绝对优势，并且在此阶段摩擦系数比较平稳，因此，MR 材料系统中摩擦力做功的多少直接取决于接触点数，于是 MR 材料内部钢丝接触点数将是决定其耗散能量的主要趋势。所以，在其三维模型中提取出钢丝接触点的数量至关重要。文献[15]假设金属橡胶材料中线匝在三个相互垂直的方向上是简单的等概率取向分布，则在单位体积内丝线线匝的匝数为：

$$n_z = \frac{4\bar{\rho}}{\pi^2 D d^2} \quad (5.20)$$

至今，在建立不同载荷作用下的金属橡胶性能方面已经积累了大量的实验分析材料和实践经验。线匝的杂乱分布决定了线匝之间以啮合、滑动形式接触。啮合接触能改变

材料的刚度，而滑动接触能产生内摩擦，弹性力与摩擦力叠加。钢丝的每一段微元上作用有外力  $P$ 、来自相邻微元的弹性力  $P'$  和摩擦力  $F$ 。由此原理，外力可以表示为如下通式

$$P = P'(1 \pm f) \quad (5.21)$$

式中  $f$  为考虑线匝间实际摩擦系数、构件或啮合微元组的几何尺寸、材料特性的实际摩擦系数，它是材料结构函数。本文第 3 章构件疲劳实验和钢丝微动实验结果和分析表明：对于多数试样而言，该系数在材料服役寿命的较大范围内保持恒定，数值上可以用钢丝微动磨损的稳定阶段（第 4 阶段）的摩擦系数估计。

在上述情况基础上，金属橡胶试样在循环脉动加压条件下呈现滞环变形回线，这种曲线示于图 5.5 中。

曲线  $OS$  表示纯粹的弹性变形特性，循环回线  $rtmn$  的起点与点  $P = 0, \varepsilon = 0$  不同。任一带环回线的面积都以一定的比例关系给出一个循环内因摩擦而耗散的能量。直线  $rm$  与横坐标间夹角的正切值表征给定循环的广义刚度，其值在有足够精度的情况下可用作确定系统自振频率的依据。不同密度的金属橡胶样件在循环加压条件下的研究证明了实验数据与模型的相符性。

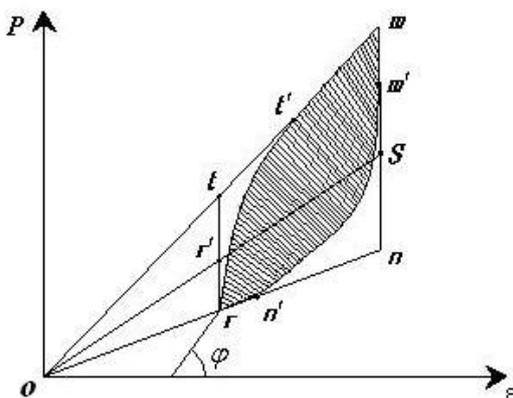


图 5.5 金属橡胶样件循环脉动加压滞环回线

在材料三维线架模型中提取接触点的问题，归结到数学上即为提取空间坐标值接近的点，两点之间距离只要小于判据  $\Delta$ ，即可确定为是一个接触点。这就需要在程序中设

定合适的判据即阈值  $\Delta$ 。显然，对于外形尺寸相同的构件，当平面毛坯编织点阵完全相同，三维毛坯空间卷绕参数一致的情况下，阈值  $\Delta$  只与钢丝直径  $d$  有关，两点之间的直线距离小于钢丝直径  $d$  时判定为两点接触。于是取阈值  $\Delta$  等于钢丝直径  $d$ 。

构件接触点数算法如下：

- 1) 根据接触判定阈值  $\Delta$  离散组成构件的螺旋弹簧。
- 2) 遍历每一段离散弹簧；
- 3) 计算离散弹簧的空间包围盒；
- 4) 如果该段离散弹簧的空间包围盒与其它未标记为接触的离散弹簧空间包围盒相交，则执行步骤 5)，否则执行步骤 6)；
- 5) 如果两段离散弹簧最近点距离小于或等于接触判定阈值  $\Delta$ ，接触点数加 1；同时标记两段离散弹簧已接触。
- 6) 如果离散点已遍历完执行步骤 7)，否则执行步骤 2)；
- 7) 结束。

图 5.6 分别显示了以表 5.1 和 5.2 参数为依据，利用本文模型统计出的接触点数与构件高度和钢丝直径的关系。实际上，接触点数的多少也反应了材料内部钢丝之间相互勾连程度，在表 5.1 的制备参数下，构件高度小于 9 mm 时，接触点数显著增加，构件高度由 10 mm 变化到 18 mm 时，接触点数量缓慢下降，从 2025 下降到 965 的水平，由图 5.3 的  $k-H_{MR}$  曲线可以看到此构件高度变化区间内对应的钢丝固相体积分数（相对密度）为 0.33~0.18。图 5.6 表明接触点数量随着钢丝直径的变化明显，这是因为固相体积分数随钢丝直径变化也较为明显。

结合图 5.3 的数据，绘制图 5.7 接触点数随固相体积分数的变化曲线，结果显示：接触点数与固相体积分数（即材料的相对密度）接近线性关系。综合前述关于接触点数与滞环回线所包围面积的关系的论述，可以认为：MR 隔振材料迟滞曲线包围面积，即因摩擦而耗散的能量，与其相对密度近似成线性关系。

文献[3]研究 MR 材料动态隔振性能时，考察了 MR 材料相对密度和构件轴向预压缩量（构件高度）对 MR 材料迟滞特性的影响规律，见图 5.8。图 5.8 (a) 中材料密度  $1.59 \text{ g/cm}^3$  和  $2.46 \text{ g/cm}^3$  分别对应相对密度为 0.204 和 0.315，从图中可以明显看出较大的相对密度和较大的预压缩量对应的滞环回线所围绕的面积也较大。这是因为，材料相对密度较大和构件高度减少时，根据模型分析得出其内部的钢丝接触点数量增加，微动单元数量较多，因微动摩擦所耗散的能量增加。因此，文献[3]实验工作验证了本文模型的可靠性。

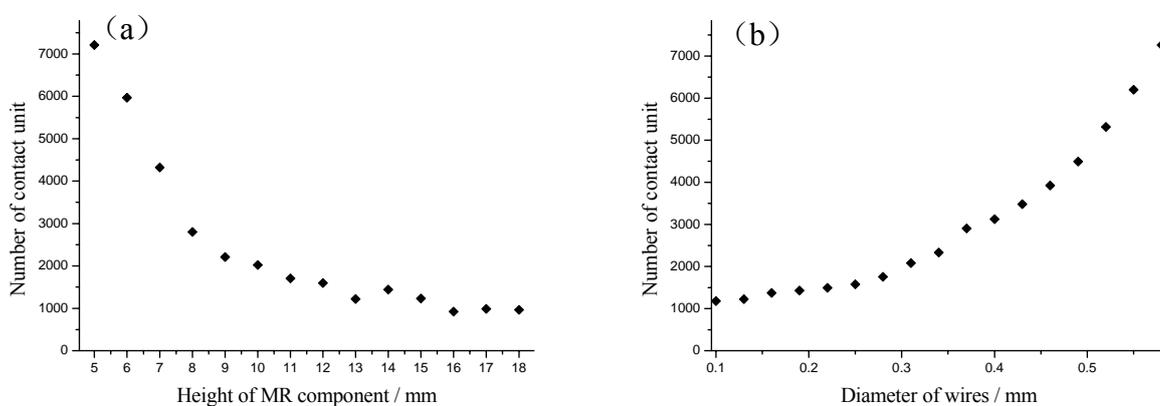


图 5.6 模型中接触点数与结构参数的关系  
(a) 与构件高度的关系； (b) 与钢丝直径的关系

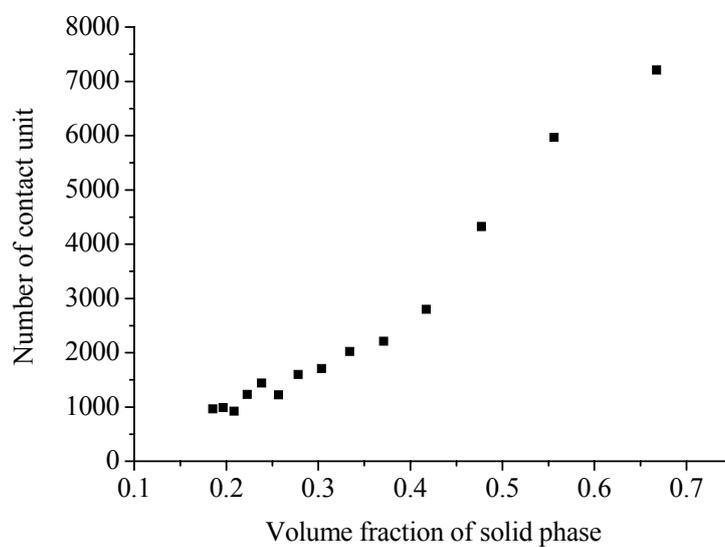


图 5.7 模型中接触点数量与钢丝固相体积分数的关系

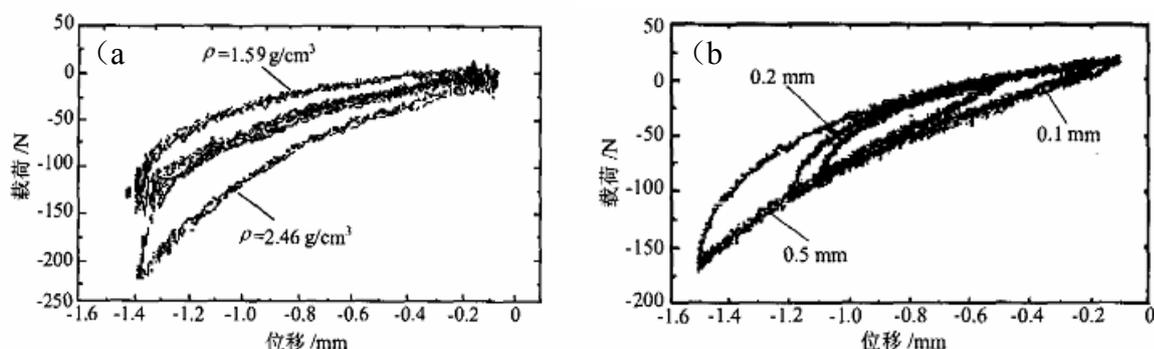


图 5.8 结构参数对迟滞特性的影响规律

(a) 相对密度的影响； (b) 轴向预压缩量的影响<sup>[3]</sup>

#### 5.4 刚度特性和本构关系的建模研究

北京航空航天大学的陈艳秋、郭宝亭<sup>[27]</sup>做了金属橡胶减振垫刚度特性和本构关系的研究，文献<sup>[29]</sup>提出的小曲梁受力模型，将MR材料简化为若干串联和并联的微元弹簧，并且假设螺旋线匝在xyz空间均匀分布，建立了金属橡胶弹性计算所必须的基本参数的关系式，结合实验确定相关的经验系数，以描述金属橡胶的变形性能，具体分析详见第1章。

该本构关系可以直接反映出制作金属橡胶的材料及其丝径、密度、螺旋直径、金属橡胶相对密度的影响，是目前来看比较完善的本构关系，但是在这个模型当中微元弹簧这个概念不够清晰，另外，该模型没有考虑微元弹簧之间相互倾斜的位置关系所造成的影响，而且根据第4章建立的可视化模型，螺旋线匝在轴向和径向分布上有明显的各向异性，把螺旋线匝假设为在xyz空间均匀分布是不够准确的。

在本文建立的模型中也可以将材料简化为若干串联和并联的弹簧，并且各弹簧的参数和位置是可以确定的，以此模型来建立材料的刚度本构关系是更具可靠性的方法。

首先，对于图5.9中的单个弹簧，其切应力 $\tau$ 和变形量 $\delta$ 可以计算如下：

$$\tau = \frac{8\kappa DP}{\pi d^3} \quad (5.22)$$

$$\delta = \frac{8Pn_{act}D^3}{Gd^4} \quad (5.23)$$

其中,  $d$  为丝径, mm;

$D$  为弹簧 (模型中的螺旋卷) 中径, mm;

$P$  为弹簧负荷, kPa;

$n_{act}$  为有效圈数;

$G$  为切变模量,  $\text{kp/mm}^2$ ;

$\kappa$  为曲度系数, 取决于  $D/d$ 。

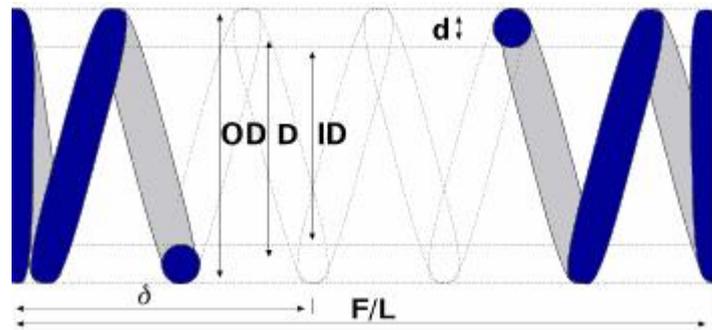


图 5.9 弹簧模型

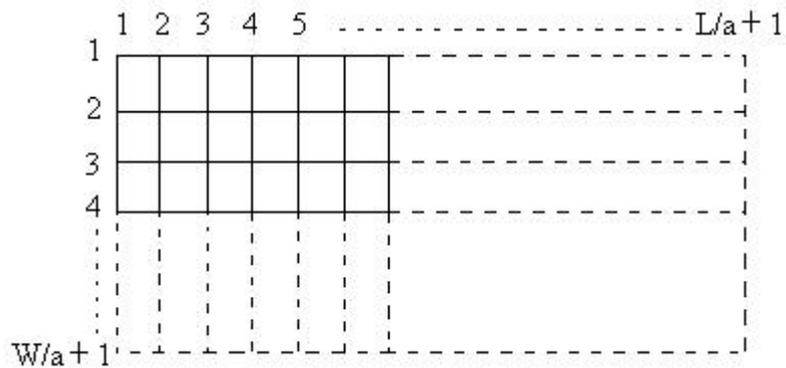


图 5.10 二维毛坯中的弹簧分布模型

以编织正方点阵的二维毛坯为例, 如图 5.10 所示, 将经纬两向所使用的螺旋钢丝分别看做是弹簧, 则在长度方向共有  $L/a+1$  个经向弹簧, 每个弹簧的丝径、中径分别取螺旋卷尺寸, 其有效长度为毛坯宽度  $W$ , 该  $L/a+1$  经向个弹簧并联在一起承受轴向

载荷，根据弹簧设计原理，并联弹簧的刚度系数等于各个并联弹簧刚度系数的叠加；而在宽度方向共有  $W/a+1$  个纬向弹簧，每个纬向弹簧的丝经、中径取法同上，其有效长度为毛坯长度  $L$ ，该  $W/a+1$  个纬向弹簧串联在一起承受切向载荷，根据弹簧设计原理，串联弹簧的刚度系数的倒数等于各个串联弹簧刚度系数倒数的叠加。

每个径向弹簧的载荷一位移关系可以表示为：

$$P = \frac{Gd^4}{8n_{act}D^3} \delta \quad (5.24)$$

此处  $n_{act}=W/D$ ，代入上式得：

$$P = \frac{Gd^4}{8WD^2} \delta \quad (5.25)$$

由于纬向弹簧的切向变形较小，此处可忽略，只计算径向弹簧的变形量。根据弹簧并联的刚度模型， $L/a+1$  个径向弹簧并联后的刚度为各个弹簧刚度的总合。于是，构件整体在弹性阶段的载荷一位移关系是：

$$P = \frac{(\frac{L}{a}+1)Gd^4}{8WD^2} \delta \quad (5.26)$$

由 MR 材料的大量试验结果表明其或者载荷一位移关系曲线是非线性的：应变小时近似线性特征；较大时呈软特性；应变继续增加时应变为硬特性，见图 5.11。这是因为金属橡胶中相互缠绕接触，当变形量小时，变形力不足以克服摩擦，主要起弹簧的作用，表现为载荷一位移关系近似线性。随着位移增加，微元弹簧之间产生滑移使得刚度变小，表现为软特性，当位移（外力）继续增加，由于挤压作用使得微元弹簧失去部分弹性，甚至某些部分的微元弹簧被压死而失效，此时呈硬特性。根据试验和上述分析，对金属橡胶的本构关系式 (5.27) 作修正：载荷一位移关系是三次曲线，即：

$$P = A \frac{(\frac{L}{a} + 1)Gd^4}{8WD^2} \delta + B \frac{(\frac{L}{a} + 1)Gd^4}{8WD^2} \delta^2 + C \frac{(\frac{L}{a} + 1)Gd^4}{8WD^2} \delta^3 \quad (5.27)$$

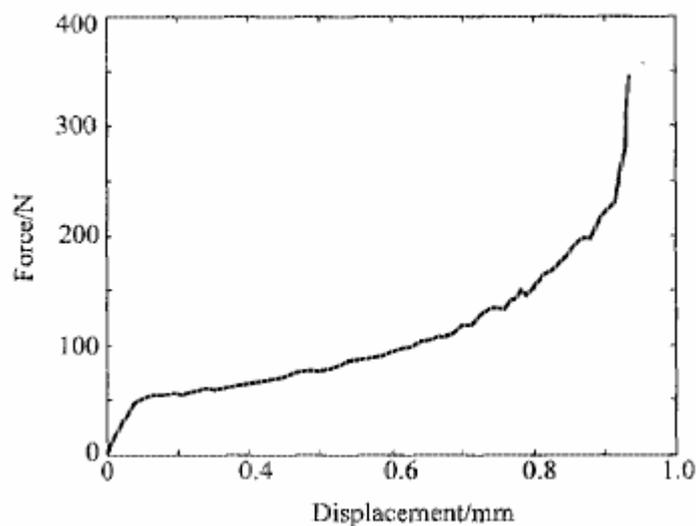


图 5.11 典型 MR 材料的载荷—位移曲线

其中 A, B, C 为系数, 由实验获得。该本构关系可以直接反映出制作金属橡胶的材料及其丝径、螺旋直径、毛坯尺寸、编织点阵类型及编织点阵参数的影响, 是目前最能够全面反应 MR 材料结构特征参数对其力学性能影响效果的本构关系。

### 5.5 过滤性能的建模研究

继阻尼器之后, 过滤装置已经成为金属橡胶应用的第二大领域。俄罗斯已将装有磁化装置的金属橡胶过滤器成功地应用于饮用水的过滤<sup>[15]</sup>。我国关于此类材料的过滤应用也在初步实验研究中<sup>[8~12]</sup>。

金属橡胶是一种新型的弹性多孔材料, 由于特殊的制备工艺, 其内部的孔隙特征与普通烧结多孔金属、陶瓷和纤维制品完全不同。首先, 金属橡胶材料内部的孔隙虽然大小不一, 但是均是连通的, 其次, 其孔隙度可以通过压缩过滤元件的轴向距离而调节。这些特征决定了金属橡胶具有特殊的过滤性能。

如果按照滤芯材料的过滤机制来分类，过滤器可以划分为表面型、深度型和吸附型三类。金属橡胶材料属于深度型，其内部有很多曲折迂回的通道，从滤芯介质的一面贯穿到另一面，每一条通道都有狭窄的孔隙缩口（见图 5.12）。当液流流过介质时，大颗粒污染物被阻截在介质表面空口或者介质内部通道的缩口处；小颗粒污物流经通道时，有的被吸附在通道内壁，或者粘附在纤维表面，有的则沉积在通道内孔穴的液流静止区。这一类过滤材料对污染颗粒既有直接阻截作用，又有一定吸附作用，而且过滤介质对流体的滤除作用发生在介质的整个深度范围内。

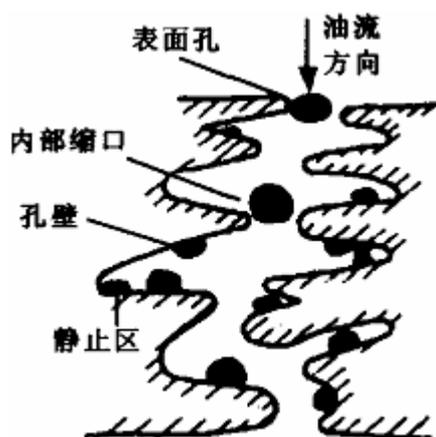


图 5.12 深度型过滤器示意图

金属橡胶材料内部的孔隙如同筛子上的眼，比孔小的颗粒可以通过，比孔大的颗粒则被拦截。当流体流过构件时，一部分尺寸比孔隙大的悬浮颗粒被拦截而留在过滤元件的内部，从而起到过滤作用。所以，金属橡胶材料内部的孔隙越小，过滤构件的长度越长，其过滤效果越好。

MR 构件的总体积是由金属丝和内部的孔隙两部分组成的，金属丝占有的有效体积分数即固相体积分数为  $k$ ，在数值上  $k$  与材料的相对密度是相等的。则孔隙度  $\varepsilon$  为：

$$\varepsilon = 1 - k \quad (5.28)$$

根据模型可以定量计算出钢丝固相体积分数，由式 (5.18)、(5.19) 得到：

$$\varepsilon = 1 - \frac{L_{\text{总}} \pi d^2}{4 S_{MR} H_{MR}} \quad (5.29)$$

由式 (5.16) 对于正方点阵编织而成的宽度为  $W$ ，长度为  $L$  的平面毛坯绕制的圆柱形 MR 构件，其孔隙度为：

$$\varepsilon = 1 - \frac{\frac{a}{D} L_{2\pi} * \frac{W}{a} * (\frac{L}{a} + 1) + \frac{a}{D} L_{2\pi} * \frac{L}{a} * (\frac{W}{a} + 1)}{4S_{MR}H_{MR}} \pi d^2 \quad (5.30)$$

公式 (5.31) 反映钢丝编织型多孔金属的孔隙度与其制备参数的关系，此式可以用来设计不同孔隙度、不同外形尺寸的过滤元件。仿照前文关于钢丝固相体积分数与钢丝直径和构件高度关系的讨论，可以得出图 5.13：孔隙度与钢丝直径和构件高度关系。

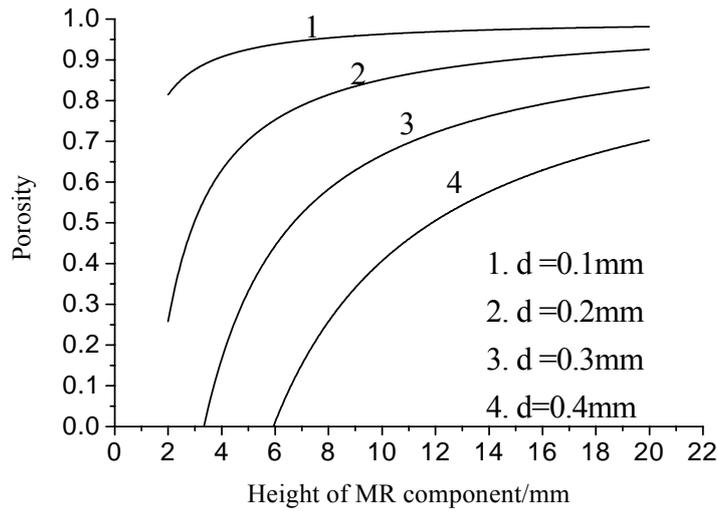


图 5.13 孔隙度与钢丝直径和过滤件厚度的关系

达西 (Darcy) 通过实验得出，液体在透过多孔体时具有如下关系：

$$\frac{Q}{A} = B \frac{\Delta P}{\eta \delta} \quad (5.31)$$

式中  $Q$ —流体流量， $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ；

$A$ —流体所通过的多孔体断面积， $\text{m}^2$ ；

$B$ —透过系数,  $\text{m}^2$ , 它是取决于材料的一个常数;

$\Delta P/\delta$ —压力梯度,  $\Delta P$  为压差, Pa;  $\delta$  为试样厚度, m;

$\eta$ —流体的粘滞系数, Pa.s 或者 P。

上述的达西公式对于实际多孔体的透过规律来说是有普遍性的。因此, 对于材料透过系数  $B$  的研究就有着十分重要的意义。

进一步的实验表明, 多孔材料的结构、孔隙度和厚度对透过系数  $B$  有着重要的影响, 其中孔隙度对透过性  $B$  的影响最大, 多数实验数据表明<sup>[9]</sup>:

$$B = K\varepsilon^n \quad (5.32)$$

其中  $K$ 、 $n$  是材料特征系数, 对于 MR 过滤元件, 不妨取系数  $K=1$ ,  $n=2$ , 根据模型可以计算获得不同丝径制备的 MR 过滤器在一系列过滤厚度下的过滤系数, 如图 5.14 所示。因此, 本文通过 MR 三维模型对其孔隙度的计算实现了预报其过滤性能的目的。

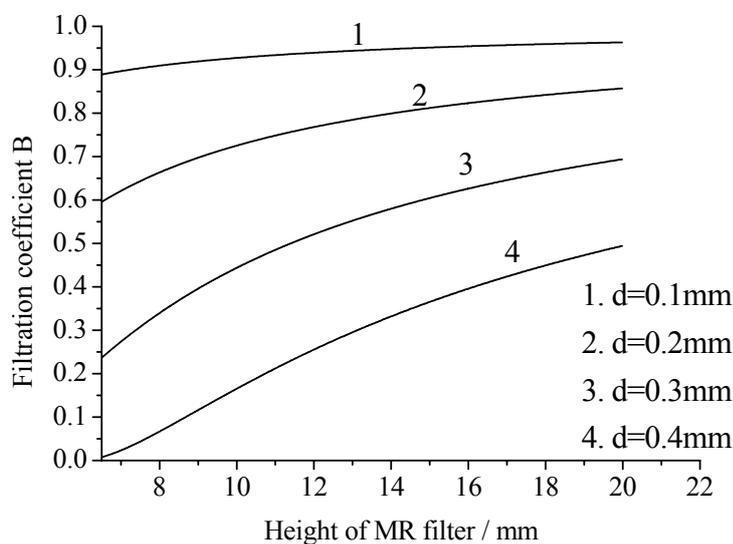


图 5.14 过滤系数  $B$  与 MR 过滤元件高度的关系

## 5.6 本章小结

本章在现有 A.И.Белюсов 模型、元件相互接触作用模型和能量耗散模型的工作思想的基础上，摒弃了以往将 MR 材料内部的金属线匝看作在三维空间均匀分布的做法，从所建立的参数化三维钢丝空间分布模型出发，量化了 MR 材料的结构特征参数与其制备工艺参数之间的关系，进一步明确了材料关键性能与其钢丝材料性能参数及钢丝结构特征参数的定量关系。得出以下重要结论：

(1) MR材料的固相体积分数 $k$ 与钢丝直径的平方 $d^2$ 成正比关系，与构件高度 $H_{MR}$ 成反比关系，在固相体积分数 $k=0.3$ 附近，构件高度 $H_{MR}$ 对应有较大的变化区间，即当多孔材料在此固相体积分数水平下，对于构件高度的变化处于不敏感阶段。这个模型分析结果很好地解释了目前多数文献所使用的MR材料的相对密度大多数均是介于 0.25~0.3 之间的实验事实。

(2) 以离散螺旋线，遍历每段离散段，若两小段螺旋弹簧最小距离小于阈值即判定为钢丝接触点的算法，本文统计了MR材料中钢丝接触点的个数 $N$ 。分析发现接触点的个数 $N$ 与钢丝直径 $d$ 、构件高度 $H_{MR}$ 的关系见图 5.6， $N$ 与固相体积分数 $k$ 近似成正比关系，见图 5.7。由于MR材料在承受循环脉动载荷时的载荷一位移滞环回线所包围的面积按照一定比例反映其通过干摩擦而耗散的能量，第 3 章关于钢丝微动摩擦的实验表明：每个接触节点在整个载荷周期内因干摩擦耗散的总能量可以以摩擦系数相对稳定的、历时占绝对优势的 4 个磨损阶段耗散的能量来估计，因此，可以推知MR材料的固相体积分数 $k$ 与其因干摩擦而耗散的能量成正比关系。

(3) 在所建立的钢丝空间分布模型中，将 MR 材料看作是由若干外形尺寸确定的弹簧串并联组成的集合体，根据弹簧串并联模型计算材料整体的刚度，再根据 MR 材料的应力—应变曲线符合线性、软特性和硬特性三段组合的特征，结合实验参数建立了该

材料的本构方程式 
$$P = A \frac{(\frac{L}{a} + 1)Gd^4}{8WD^2} \delta + B \frac{(\frac{L}{a} + 1)Gd^4}{8WD^2} \delta^2 + C \frac{(\frac{L}{a} + 1)Gd^4}{8WD^2} \delta^3$$
 (式 5.27)。此方程与文献[27]在线匝均匀分布假设条件下建立的本构方程相比，能够更加全面地反映钢丝结构特征对 MR 材料宏观力学性能的影响。

(4) MR多孔金属用作过滤材料时，有两大区别于传统过滤材料的显著特征：孔隙连通和孔隙度随过滤厚度可调。在模型中由MR材料的固相体积分数 $k$ 与钢丝直径 $d$ 、构件高度 $H_{MR}$ 的关系，可以推知其孔隙度 $\varepsilon$ 与 $d$ 、 $H_{MR}$ 的关系。因孔隙度 $\varepsilon$ 以指数关系影响过滤系数 $B$ ，通过模型建立了MR多孔材料过滤性能与过滤元件厚度的关系，为今后制备孔隙度随过滤厚度可调的MR过滤材料奠定了理论基础。

以上建模工作均建立在对 MR 材料中钢丝空间分布位置有准确的描述的基础上，而以往的建模研究均是建立在假设 MR 材料中钢丝螺旋线匝在三维空间均匀分布的基础上，本章工作建立 MR 结构特征参数与关键性能之间的关系，更加全面地反映钢丝结构特征对整体 MR 材料的影响；达到了由 MR 多孔金属材料制备参数预测预报关键性能的水平。

## 结 论

依托国家装备预先研究项目《宽温域高耗能金属橡胶阻尼材料研究》，本文以实验和建模方法相结合的技术手段，重点分析了制备金属橡胶阻尼材料的原材料即 Cr-Ni-Mn 系不锈钢丝的微观组织；MR 内部耗散能量的最小单元—两小段不锈钢细丝的微动磨损和微动疲劳行为；结合圆柱形 MR 材料的典型制备工艺，提取相关工艺参数，建立描述钢丝空间分布的数值化模型；依据模型分析制备工艺参数与材料相对密度、孔隙度、钢丝勾连程度的关系；联系单根钢丝的机械、物理性能参数预报整体材料的性能。通过项目研究得出以下结论：

(1) 由于制备不锈钢细丝的冷拉拔工艺产生大量变形，诱发 Cr-Ni-Mn 系不锈钢发生马氏体转变，钢丝轴向与径向截面的组织观察发现：奥氏体晶粒碎化后的晶界在光学显微镜、扫描电镜和透射电镜观察中均不可见，但是可以通过电子背散射衍射技术观测到；轴向截面有以硬质颗粒为核心、两端与基体脱开形成梭形孔洞的典型形貌；进一步的电镜分析发现马氏体亚结构既有层错又有位错；经分析认为，这种亚结构的形成与钢丝冷拉拔经历的强烈变形有重要关系。此部分工作为 MR 材料的科学选材提供了必要的依据。

(2) 由于 MR 隔振构件内部耗散能量的最小单元是两段不锈钢细丝组成的微动摩擦副，本文改进传统的摩擦实验方法，实现了两段不锈钢细丝的微动对磨，“微动单元”的磨损可以划分为：表面打磨、接触面粘着、第三体床形成和稳定磨损 4 个阶段，其中的稳定磨损阶段持续时间最长，摩擦系数也比较稳定。磨痕表面光滑程度高于基体的原始表面。微动疲劳引发的钢丝断裂属于脆性断口，断口附近没有宏观的塑性变形；不锈钢丝表面的每圈周长上平均存在 50 余个微米量级的凹凸体，其高度的算术平均偏差  $R_a$  为  $3.447\ \mu\text{m}$ ，在交变应力作用下，较大的凹凸体充当原始裂纹向心部逐渐扩展；疲劳裂纹起源于表面，并且呈现“多源”特征；进一步的分析说明，提高钢丝的表面光滑程度更有利于显著增加隔振构件的疲劳寿命。

(3) 结合 MR 材料的典型制备工艺，归纳了 5 种钢丝螺旋卷平面编织点阵类型（正方、长方、菱方、六方和斜方），提取钢丝直径  $d$ 、螺旋卷直径  $D$ 、螺旋卷螺距  $h_j$ 、编织二维毛坯的点阵边长  $a$ 、 $b$  及其夹角  $\alpha$ 、二维毛坯宽度  $W$ 、长度  $L$ 、构件外形尺寸高度  $H_{MR}$  和直径  $D_{MR}$ ，共计 10 个各自独立的制备工艺参数——对应地描述圆柱形 MR 材料中钢丝的空间分布结构，在均匀性假设和构件冲压过程钢丝径向拓扑关系不变的假设基础上，建立圆柱形 MR 材料内钢丝空间分布的参数化结构模型。利用钢丝固相体积分数与材料相对密度相等的物理原理，验证了模型的可靠性。该模型首次量化了 MR 材料制备工艺

参数对于钢丝空间结构的影响，改变了以往将MR材料内部钢丝分布看做是混沌的局面，上述 10 个制备参数可以MR材料内钢丝结构的唯一表征，为今后此类新型材料的标准化生产奠定基础。

(4) 在现有А.И.Белюсов模型、接触作用模型和能量耗散模型的工作思想的基础上，摒弃现有模型将MR材料中的钢丝螺旋线匝假设为在三维空间均匀分布的做法，从所建立的参数化三维钢丝空间分布模型出发，量化了MR材料内部固相体积分数（相对密度）、钢丝接触点数与材料制备参数的关系。计算获得MR材料内部固相体积分数 $k$ 、钢丝接触点数 $N$ 与钢丝直径的平方 $d^2$ 、与材料的压缩比 $\bar{H}$ 、构件高度 $H_{MR}$ 的关系曲线，固相体积分数 $k=0.3$ 左右时，对应着构件高度 $H_{MR}$ 的变化平台，此时固相体积分数对构件高度变化处于不敏感阶段；结果发现钢丝接触点数 $N$ 与MR材料的固相体积分数 $k$ 近似成正比关系。

(5) 由于 MR 材料在承受循环脉动载荷时的载荷一位移滞环回线所包围的面积按照一定比例反映其通过干摩擦而耗散的能量，第 3 章关于钢丝微动摩擦的实验表明：每个接触节点在整个载荷周期内因干摩擦耗散的总能量可以以摩擦系数相对稳定的、历时占绝对优势的 4 个磨损阶段耗散的能量来估计。因此，MR 隔振材料迟滞曲线包围面积，即因摩擦而耗散的能量，与其固相体积分数  $k$ （数值上等于 MR 材料的相对密度）近似成线性关系。

(6) 在本论文的钢丝空间分布模型中，将 MR 材料看作是由若干外形尺寸确定的弹簧串并联组成的集合体，根据弹簧串并联模型计算材料整体的刚度，再根据多数实验已经验证的结论：MR 材料的载荷一位移曲线符合线性、软特性和硬特性三段组合的特征，可以三次曲线关系拟合载荷一位移方程，结合实验参数建立了该材料的本构方程

$$P = A \frac{(\frac{L}{a} + 1)Gd^4}{8WD^2} \delta + B \frac{(\frac{L}{a} + 1)Gd^4}{8WD^2} \delta^2 + C \frac{(\frac{L}{a} + 1)Gd^4}{8WD^2} \delta^3 \quad (\text{式 5.27})$$

中假设 MR 材料中钢丝螺旋线匝在三维空间均匀分布条件下建立的本构方程相比，能够更加全面地反映钢丝结构特征对 MR 材料宏观力学性能的影响。

(7) MR多孔金属作为过滤材料的使用是继阻尼器之后的第二大应用，它有两大大区别于传统过滤材料的两大显著特征：孔隙连通和孔隙度随过滤厚度可调。从模型分析得出MR材料的固相体积分数 $k$ 与钢丝直径 $d$ 、构件高度 $H_{MR}$ 的关系，可以推知其孔隙度 $\varepsilon$ 与 $d$ 、 $H_{MR}$ 的关系。因孔隙度 $\varepsilon$ 以指数关系影响过滤系数 $B$ ，通过模型建立了MR多孔材料过滤性能与过滤元件厚度的关系，为今后制备孔隙度随过滤厚度可调的MR过滤材料奠定了理论基础。

MR 多孔材料的综合力学行为是深受制备选用  $\phi 0.1\sim 0.5$  mm 钢丝的微观组织结构、微动摩擦性能和钢丝复杂空间勾连结构所影响的。此类细钢丝的微观组织结构、微动摩擦性能的研究由于受到实验条件限制，难以深入展开，本文改进了传统实验手段和技术实现了此方面的探索研究。由于钢丝勾连结构的复杂性，目前可查阅到的文献资料对该类材料的建模分析均是建立在假设其内部螺旋钢丝线匝在三维空间均匀分布的基础上；本论文基于 MR 材料的典型制备工艺，建立了钢丝空间分布的数值化模型，并利用该多孔材料特有的固相体积分数与其相对密度相等的物理原理检验了模型的可靠性。以此模型预报预测 MR 材料的宏观力学行为能够更加全面地体现钢丝空间结构特征参数对于整体 MR 材料性能的影响，具有更高的可靠性。

本论文的建模研究主要围绕 MR 材料在循环载荷下的载荷一位移滞环回线、静态载荷一位移本构关系和过滤性能三个方面展开，利用本论文建立的 MR 材料内钢丝空间分布的参数化结构模型，再结合钢丝的电、热、声等其它方面的物理参数，今后也可以相应地开展 MR 材料其它物理性能的对应该建模研究。

## 参考文献

- [1] 杜金名, 耿峰. 金属橡胶材料在导弹武器系统中的应用研究. 飞航导弹, 2004, 8: 56~59
- [2] 李中郢, 卢正人. 航天器用新型金属橡胶减振器. 上海航天, 2005, 5: 58~61
- [3] 杨春香, 周易, 张虎. 金属橡胶动态隔振性能的实验研究. 宇航学报, 2006, 27(3): 536~539
- [4] 杨广双, 陈忠明. 金属橡胶减振器在发动机安装时的减振设计研究. 飞机设计, 2007, 27(3): 7~10
- [5] 赵程, 贺跃进, 张恒. 金属橡胶的应用研究. 噪声与振动控制, 2006, 5: 45~47
- [6] 武国启, 姜洪源, 闫辉, 等. 驻波管测试仪测量金属橡胶吸声性能误差分析. 噪声与振动控制, 2007, 4: 109~113
- [7] 姜洪源, 武国启, 闫辉, 等. 金属橡胶吸声降噪性能分析及试验研究. 机械科学与技术, 2007, 26(4): 403~407
- [8] 夏宇宏, 姜洪源, 李瑰贤, 等. 0Cr18Ni9Ti 金属橡胶多孔材料的气体渗透性. 功能材料, 2004, 35(2): 267~270
- [9] Jiang H Y, Xia Y H, Su D Z. Analysis on infiltrative characteristics of deformable porous metal rubber material and parameters identification. Chinese journal of mechanical engineering, 2005, 18(4): 562~565
- [10] 夏宇宏, 姜洪源, 孟庆鑫, 等. 环形多孔金属橡胶节流元件水力特性相似判据确定. 湖南科技大学学报, 2005, 20(2): 33~35
- [11] 候军芳, 白鸿柏, 刘英杰, 等. 新型金属橡胶孔隙材料过滤机制与性能研究. 润滑与密封, 2006, 4: 109~112
- [12] 夏宇宏, 姜洪源, 敖宏瑞, 等. 圆柱形金属橡胶多孔材料流体动压性能相似性判据的确定. 机械工程学报, 2005, 41(6): 50~54
- [13] 刘英杰, 杨建春, 白鸿柏, 等. 金属橡胶材料在某型自行火炮闩体挡杆缓冲装置中的应用. 军械工程学院学报, 2003, 15(3): 56~59
- [14] 王少纯, 邓宗全, 高海波, 等. 月球着陆器用金属橡胶高低温力学性能实验研究. 航空材料学报, 2004, 24(2): 27~31
- [15] 切戈达耶夫, 穆柳金, 科尔特平, 等. 金属橡胶构件的设计(俄). 李中郢译. 北京: 国防工业出版社, 2000: 7, 14, 28~30, 32,

- [16] Yang B D, Chu M L, Meng C H. Stick-slip-separation analysis and non-linear stiffness and damping characterization of friction contacts having variable normal load. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 210(4): 461~481
- [17] Ulanov A M, Lauzutkin G. Description of an arbitrary multi-axial loading process for non-linear vibration isolations. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 203(5): 903~907
- [18] 姜洪源, 董春芳, 敖宏瑞, 等. 航空发动机用金属橡胶隔振器动静态性能的研究. *航空学报*, 2004, 25(2): 140~142
- [19] 姜洪源, 敖宏瑞, 夏宇宏, 等. 金属橡胶成型工艺研究及其应用. *机械工艺师*, 2001, 35(2): 35~36
- [20] 李中郢, 齐乃明, 刘曦, 等. 金属橡胶弹性与多孔性相结合的应用实例. *哈尔滨工业大学学报*, 1999, 31(3): 100~102
- [21] Белоусов А И, Бузипкий В Н, Тройников А А. Прогнозирование упругофрикционных характеристик амортизаторов из материала МР// Конструкционная прочность двигателей, 1980, С: 14~15
- [22] Шайморданов Л Г. Моделирование демпфирования в материале МР// Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов, 1980, С: 151~155
- [23] Пичугин Д Ф, Борисов В А, Войтех Н Д. Исследование некоторых физических свойств материала МР// Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов : Межвуз. сб. Вып. 1(68). Куйбышев: КуАИ, 1975, С: 62~65
- [24] 敖宏瑞. 金属橡胶干摩擦阻尼机理及应用研究: 学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003: 3~7
- [25] 刘桥. 金属橡胶材料的非线性特性及其在航天减振器中的应用: 学位论文. 西安: 西安交通大学, 1997: 1~20
- [26] 白鸿柏, 黄协清. 三次非线性粘性阻尼双线性滞迟振动系统 ИВБ 分析方法. *西安交通大学学报*, 1998, 32(10): 35~37
- [27] 白鸿柏, 黄协清. 粘性阻尼双线性滞迟振子简谐激励相应的 Krylov-Bogoliubov 计算方法. *机械工程学报*, 2000, 10: 27~29
- [28] 白鸿柏, 黄协清. 2 自由度滞迟振动系统等效线性化计算方法研究. *机械工程学报*, 2000, 11: 90~93
- [29] 白鸿柏, 黄协清. 干摩擦振动系统响应计算方法研究. *振动工程学报*, 1998, 11(4): 473~475

- [30] 白鸿柏, 黄协清. 干摩擦非线性减振器构成的滞迟系统的响应计算. 机械工程学报, 1998, 34(5): 70~75
- [31] 白鸿柏, 黄协清. 基础柔性对于干摩擦隔振系统的影响作用. 机械强度, 1999, 21(1): 22~25
- [32] 张俊华. 金属橡胶材料物理机械性能及阻尼特性理论与应用研究: 学位论文. 西安: 西安交通大学, 1999: 22~55
- [33] 李宇燕, 黄协清, 毛文雄. 位移和速度三次非线性因素对金属橡胶干摩擦系统幅频特性的影响. 机械强度, 2005, 27(4): 436~439
- [34] 李宇燕, 黄协清, 毛文雄. 金属橡胶三次非线性干摩擦系统振动响应计算方法研究. 航空材料学报, 2004, 24(6): 56~60
- [35] 李宇燕, 黄协清, 毛文雄. 金属橡胶五次非线性干摩擦系统振动响应计算方法研究. 宇航学报, 2005, 26(5): 620~623
- [36] 刘桥, 贺科学, 黄协清. 含三次非线性位移的粘性阻尼干摩擦隔振系统振动特性的实验研究. 振动与冲击, 2007, 26(3): 135~138
- [37] 王佳民, 裴听国. 惯性平台新型金属橡胶减振器非线性特性分析. 宇航学报, 2004, 25(3): 256~261, 311.
- [38] 张玲凌, 杨智春, 孙浩. 一类金属橡胶阻尼器的建模与参数识别. 机械科学与技术, 2007, 26(5): 558~562
- [39] 陈艳秋, 朱梓根. 用于管路的薄金属橡胶减振器的性能研究. 航空动力学报, 2001, 16(2): 175~178
- [40] 马艳红, 洪杰, 赵福安. 自适应挤压油膜阻尼器减振机理研究. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 173~175
- [41] 王新, 朱梓根. 环形金属橡胶减振器. 航空动力学报, 1997, 12(2): 143~145
- [42] 陈艳秋, 郭宝亭, 朱梓根. 金属橡胶减振垫刚度特性及本构关系研究. 航空动力学报, 2002, 17(4): 416~420
- [43] 陈艳秋, 朱梓根. 用于管路的薄壁金属橡胶减振器的性能研究. 航空动力学报, 2001, 16(2): 175~178
- [44] 邓剑波, 朱梓根, 李其汉, 等. 悬臂梁根部金属橡胶减振器阻尼性能的实验研究. 航空动力学报, 1998, 13(4): 425~427
- [45] 马艳红, 郭宝亭, 朱梓根. 金属橡胶材料静态特性的研究. 航空动力学报, 2004, 19(3): 326~371

- [46] 许建东, 郭宝亭, 朱梓根, 等. 金属橡胶材料的振动特性. 航空动力学报, 2004, 19(5): 619~622
- [47] 陈艳秋, 朱梓根. 用于管路的薄金属橡胶减振器的性能研究. 航空动力学报, 2001, 16(2): 175~178
- [48] 马艳红, 洪杰, 赵福安. 自适应挤压油膜阻尼器减振机理研究. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 173~175
- [49] 闫辉, 姜洪源, 李瑰贤, 等. 空间载荷作用下金属橡胶材料静态实验研究. 润滑与密封, 2005, 36(6): 937~939
- [50] 姜洪源, 夏宇宏. 金属橡胶与弹簧组合型隔振器动静态性能分析. 中国机械工程, 2002, 13(21): 1801~1804
- [51] 敖宏瑞, 姜洪源, 夏宇宏, 等. 金属橡胶阻尼元件减振性能的实验研究. 机械工程师, 2001, (2): 41~42
- [52] 姜洪源, 夏宇宏, 敖宏瑞, 等. 金属橡胶与弹簧组合型隔振器建模及分析方法. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(5): 520~524
- [53] 姜洪源, 夏宇宏, 敖宏瑞. 金属橡胶构件的性能分析与实验研究. 中国机械工程, 2001, 12(11): 1294~1296
- [54] 夏宇宏, 姜洪源, 敖宏瑞, 等. 簧丝走向对金属橡胶构件性能的影响分析. 中国机械工程, 2002, 13(10): 880~884
- [55] 姜洪源, 敖宏瑞, 夏宇宏, 等. 实验建模方法在金属橡胶隔振系统分析中的应用. 实验力学, 2002, 17(3): 363~368
- [56] Zhang R H, Jiang H Y, Zhao K D. Damping characteristics analysis of squeeze film damper with metal rubber. Journal of Harbin institute of technology, 2006, 13(2): 146~150
- [57] Jiang H Y, Xia Y H, Ao H R. Lifetime of metal rubber isolator with different vibration amplitudes. Journal of Cent. South Univ. Technol., 2005, 12(2): 181~185
- [58] Jiang H Y, Xia Y H, Zhang R H. Stationary dynamic characteristics analysis of new squeezed film damper. Chinese journal of mechanical engineering, 2006, 19(3): 542~445
- [59] 敖宏瑞, 孟庆鑫, 姜洪源等. 安装预紧量对金属橡胶构件干摩擦阻尼的影响. 材料科学与工艺, 2006, 13(3): 225~227
- [60] 敖宏瑞, 姜洪源, 闫辉, 等. 基于复刚度模型的金属橡胶隔振系统的研究. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(12): 1615~1617
- [61] 敖宏瑞, 姜洪源, 夏宇宏, 等. 金属橡胶弹性迟滞回线的一种新的建模方法. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 453~456

- [62] 李中郢, 卢正人. 金属橡胶减振器组合刚度特性研究. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (10) : 1327~1329
- [63] 闫辉, 夏宇宏, 姜洪源, 等. 金属橡胶密封构件最小过盈量的研究. 润滑与密封, 2005 (5) : 14~20
- [64] 李中郢, . YJаHOB A. M. 金属橡胶三维隔振系统共振频率范围限定条件. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34 (1) : 110~112
- [65] 夏宇宏, 姜洪源, 张蕊华, 等. 毛坯尺寸对金属橡胶微观组织结构特性的影响. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38 (9) : 1461~1464
- [66] 夏宇宏, 姜洪源, 敖宏瑞, 等. 汽车用环形金属橡胶弹性元件的性能研究. 机械设计, 2002, 11: 8~11
- [67] 闫辉, 姜洪源, 李瑰贤, 等. 空间载荷作用下金属橡胶材料静态实验研究. 润滑与密封, 2005, 36 (6) : 937~939
- [68] 李冬伟, 毛志俊, 谭人仁. 一种金属橡胶元件建模方法研究. 军械工程学院学报, 2005, 17 (2) : 64~66
- [69] 李冬伟, 白鸿柏, 彭威, 等. 联轴器用金属橡胶元件阻尼耗能研究. 机械科学与技术, 2006, 25 (3) : 265~267
- [70] 候军芳, 白鸿柏, 李冬伟, 等. 金属橡胶用 0Cr18Ni9Ti 不锈钢丝疲劳断裂机理研究. 中国材料科技与设备, 2007, 2: 75~78
- [71] 候军芳, 白鸿柏, 李冬伟, 等. 高低温环境下金属橡胶材料疲劳特性试验研究. 宇航材料工艺, 2007, 2:77~80
- [72] 李宇明, 彭威, 白鸿柏, 等. 金属橡胶材料宏观和细观力学模型. 机械工程学报, 2005, 41(9): 38~40
- [73] 彭威, 白鸿柏, 郑坚, 等. 金属橡胶材料基于微弹簧组合变形的细观本构模型. 实验力学, 2005, 20(3): 455~461
- [74] 李冬伟, 白鸿柏, 杨建春, 等. 金属橡胶动力学建模及参数识别. 振动与冲击, 2005, 24 (6) : 57~60
- [75] 候军芳, 白鸿柏, 李冬伟, 等. 高低温环境金属橡胶减振器阻尼性能试验研究. 航空材料学报, 2006, 26(6):50~54
- [76] 候军芳, 刘振广, 白鸿柏, 等. 基于电脉冲放电烧结工艺的金属橡胶材料电阻特性试验研究. 机械科学与技术, 2006(6), 25 (6) : 753~756
- [77] 李宇明, 郑坚, 白鸿柏. 金属橡胶材料的动态力学模型. 材料研究学报, 2003, 15(5): 499~504

- [78] 李冬伟, 白鸿柏, 杨建春, 等. 金属橡胶弹性元件实验建模研究. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(3): 7~10
- [79] Masri S F, Caughey T K. A Random Vibration of Hysteretic System. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1976, 4, 249
- [80] Masri S F. Nonparameter Identification of Nearly Arbitrary Nonlinear System. Appli.Mech.,1982, 49(3), 619
- [81] 张英会. 弹簧. 北京: 机械工业出版社, 1982, 54
- [82] 王彬. 振动分析及应用. 北京: 海潮出版社, 1992, 58
- [83] 唐国翌, 郑明新, 朱永华, 等. 奥氏体不锈钢丝的电塑性拔制. 金属制品, 1997, 23(1): 6~9
- [84] 徐效谦, 明绍芬. 特殊钢钢丝. 北京: 冶金工业出版社, 2005, 74
- [85] 李寔, 方威, 郭思楷. 不锈钢异型丝冷拔生产工艺研究. 金属制品, 1998, 24(1): 13~16
- [86] 杨德崇. 不锈钢丝拉拔润滑剂. 合成润滑材料, 2007, 34(1): 33~36
- [87] 陆世英, 张廷凯, 康喜范, 等. 不锈钢 (特殊钢丛书). 北京: 原子能出版社, 1995: 185, 216, 163, 166, 232
- [88] 许珞萍, 史美堂, 邵光杰, 等. 热处理及冷形变对 18-8 奥氏体不锈钢组织和性能的影响. 上海金属, 1993, 15(5): 18~22
- [89] 毛萍莉, 苏国跃, 孔凡亚, 等. 1Cr18Ni9Ti 超高强度不锈钢丝的微观组织分析. 热加工工艺, 2004(2): 32~33
- [90] 许淳淳, 张新生, 胡钢, 等. 不锈钢冷加工形变诱发马氏体相变及其腐蚀行为. 材料保护, 2002, 35(3): 15~17
- [91] 王淑花, 杨德庄, 何世禹, 等. 低温与真空条件下 1Cr18Ni9Ti 钢的疲劳行为. 材料科学与工艺, 2004, 12(6): 625~629
- [92] 毛萍莉, 苏国跃, 孔凡亚, 等. 1Cr18Ni9Ti 超高强度不锈钢丝的微观组织分析. 热加工工艺, 2004(2): 32~33
- [93] 李刚, 朱蕊花. 形变诱发马氏体相变的位向分析. 稀有金属材料与工程, 1991, 20(5): 18~22
- [94] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题. 北京: 冶金工业出版社, 1983: 64, 284~285
- [95] 许淳淳, 何珂, 吴永炘, 等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢形变诱发马氏体相变规律及其对孔蚀敏感性的影响. 中国腐蚀与防护学报, 1996, 16(1): 47~52
- [96] Seetharaman V, Krisbnan R. Journal of Materials Science, 1981: 16, 523

- [97] 吴文晨. 不锈钢微丝及筛网的生产与发展. 金属制品, 2001, 27(4): 17~20
- [98] 吴涛, 余新泉, 周业展, 等. 热处理对 316L 不锈钢微丝组织和性能的影响. 金属热处理, 2004, 29(7): 53~56
- [99] 李善有, 崔兰. 复合形变处理对 18-8 型亚稳奥氏体不锈钢丝及弹簧性能的影响. 钢铁, 1992, 27(1): 39~43
- [100] 马中华, 韩福生, 魏建宁等. 宏观体缺陷对材料阻尼行为的影响. 中国科学 (A 辑), 2001, 31(3): 255~260
- [101] 温诗铸. 我国摩擦学研究的现状与发展. 机械工程学报, 2004, 40(11): 1~6
- [102] 陈国安, 葛世荣, 张晓云. 几何分形与摩擦学进展. 润滑与密封, 1999, 5: 69~71
- [103] 刘金龙, 葛世荣. 磨合磨损分形预测研究. 摩擦学学报, 2000, 20(4): 310~314
- [104] 张剑峰, 周志芳. 摩擦磨损与抗磨技术. 北京: 天津科技翻译出版出版, 1993: 58~64
- [105] 杨明忠. 摩擦学设计基础. 北京: 机械工业出版社, 1992: 13~16
- [106] 余俊, 徐真, 赵冬初, 等. 摩擦学. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1984: 22~35
- [107] 周仲荣, 钱林茂. 摩擦学尺寸效应及相关问题的思考. 机械科学与工程, 2003, 39(8):22~26
- [108] Holmberg K G. Tribology in Reliability Engineering. In: Franek F. Bartz W, J., Pauschitz A. ed. Proceeding of the Second World Tribology Congress, Scientific Achievements Industrial Applications Future Challenges, Vienna, 2001, Vienna: The Austrian Tribology Society, 2001: 13~20
- [109] Homola A M, Israelachvili J N, McGuiggan P M et al. . Proc. 5th International Congress on Tribology, Finland, 1989, Volume 1: 28~49
- [110] 束德林. 金属力学性能. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1994: 196
- [111] 周仲荣. 关于微动磨损与微动疲劳的研究. 中国机械工程, 2000, 11(10): 1146~1150
- [112] 陶峰, 张险峰, 尹明德, 等. 微动损伤的研究综述. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(5): 546~551
- [113] 周仲荣, Lèo Vincent. 微动磨损. 北京: 科学出版社, 2002: 1, 65
- [114] 张德坤, 葛世荣. 钢丝的微动磨损及其对疲劳断裂行为的影响研究. 摩擦学学报, 2004, 24(4): 355~359

- [115] 张德坤, 葛世荣. 钢丝微动磨损的评定参数及理论模型研究. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 50~54
- [116] 张德坤, 葛世荣, 朱真才. 评定钢丝的微动摩擦磨损参数研究. 中国矿业大学学报, 2004, 33(1): 33~37
- [117] 徐向阳, 徐滨士, 刘文今, 等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在滑移区的微动磨损行为. 摩擦学学报, 2002, 22(6): 444~448
- [118] 张德坤, 葛世荣, 朱真才. 提升钢丝绳的钢丝微动摩擦磨损特性研究. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 367~370
- [119] 张德坤, 葛世荣. 钢丝微动磨损过程中接触力学问题的研究. 机械强度, 2007, 29(1): 148~151
- [120] Waterhouse R B, Mc Coll I R, Harris S J. Fretting Wear of a high-strength heavily work hardened eutectoid steel. Wear, 1994, 175: 51~57
- [121] Mc Coll I R, Waterhouse R B, Harris S J. Lubricated fretting wear of a high-strength eutectoid steel rope wire. Wear, 1995, 185: 203~212.
- [122] Zhang D K, Ge S R, Xiong D S. Fretting wear of steel wires in hoisting ropes. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 9(2): 81~83
- [123] 张德坤, 葛世荣. 带有微动磨损缺口钢丝的疲劳特性. 机械工程学报, 2006, 42(1): 173~177
- [124] 张德坤, 葛世荣, 熊党生. 矿井提升机用钢丝绳的微动磨损行为研究. 摩擦学学报, 2001, 21(5): 362~366
- [125] 戴振东, 杨生荣, 王珉, 等. 微动磨损的热力学研究. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(2): 125~131
- [126] 赵华, 金雪岩, 朱旻昊. 微动接触应力的数值分析. 四川大学学报, 2003, 35(5): 32~36
- [127] 刘军, 刘道新, 刘元镛. 微动接触应力的有限元分析. 机械强度, 2005, 27(4): 504~509
- [128] Zhou Z R, Sauger E, Liu J J, et al. Vincent. Nucleation and early growth of tribologically transformed structure (TTS) induced by fretting. Wear, 212, 1997: 50~58
- [129] 朱旻昊, 周仲荣, 刘家浚. 摩擦学白层的研究. 摩擦学学报, 1999, 19(3): 281~287
- [130] 朱旻昊, 周仲荣. 微动白层形成的控制因素及其对磨损过程的影响. 摩擦学学报, 2004, 24(1): 51~55

- [131] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体 (第二版). 北京: 科学出版社, 1999: 64, 691~796
- [132] 寇宏宁, 刘国权, 杨建春, 等. 金属橡胶用 Cr-Ni-Mn 系不锈钢丝的微观组织及力学性能研究. 航空材料学报, 2006(8), 26 (4): 32~33
- [133] 董秀萍, 刘国权, 杨建春, 等. 金属橡胶用冷拉拔奥氏体不锈钢丝的微观组织. 航空材料学报, 2007, 27 (6): 35~39
- [134] 李剑容, 吴兴华, 孙黎, 等. 不锈钢丝网断裂原因分析. 理化检验—物理分册, 2006, 42 (11): 574~577
- [135] Metals Handbook, 9th ed., vol. 3, Properties and Selection Stainless Steels, Tools Materials and Special Purpose Metals, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1980.
- [136] Berthier Y, Vincent L, Godet M. Fretting fatigue and fretting wear. Tribology International, 22, 1989: 235~242.
- [137] 程靳, 赵树山. 断裂力学. 北京: 科学出版社, 2006: 145~173
- [138] 哈宽富. 断裂物理基础. 北京: 科学出版社, 2000: 302~359
- [139] 钟家湘, 郑秀华, 刘颖. 金属学教程. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 1~5
- [140] 孙家广. 计算机图形学. 北京: 清华大学出版社, 1998:
- [141] 宝鸡有色金属研究院编著. 粉末冶金多孔材料 (下册). 北京: 冶金工业出版社, 1978: 1~51
- [142] 刘培生, 杨全成, 周茂奇. 多孔材料透过性能的特征. 钛工业进展, 2006, 23 (4): 12~17
- [143] 刘培生. 关于多孔材料的新模型. 材料研究学报, 2006, 20 (1): 64~68
- [144] 刘培生. 泡沫金属双向承载的力学模型. 中国有色金属学报, 2006, 16 (4): 567~574
- [145] Liu P S, Sang H B, Mechanical Property of Foamed Meta. J. of Iron & Steel Res. Int., 2004, 11(3): 53~58
- [146] 奚正平, 汤慧萍, 朱纪磊, 等. 金属多孔材料在能源与环保中的应用. 稀有金属材料与工程, 2006, 35 (2): 413~417
- [147] 梁永仁, 杨志懋, 丁秉钧. 金属多孔材料应用及制备的研究进展. 稀有金属材料与工程, 2006, 35 (2): 31~34
- [148] 刘培生, 马晓明. 多孔材料检测方法. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 122~139
- [149] 刘培生. 多孔材料引论. 北京: 清华大学出版社, 2004: 299~322

## 在学研究成果

### 一、 在学期间发表的论文

- [1] 董秀萍, 刘国权, 杨建春, 等. 金属橡胶用冷拉拔奥氏体不锈钢丝微观组织的研究. 航空材料学报, 2007, 27 (6) : 35~39 (EI 收录号: 080111004908 )
- [2] 董秀萍, 刘国权, 牛犁, 等. 金属橡胶隔振构件中不锈钢丝“摩擦单元”的磨损分析. 摩擦学学报, 2008, 28 (3) : 248~253 (EI 刊源)
- [3] 董秀萍, 刘国权, 杨建春, 等. 金属橡胶隔振构件中不锈钢丝的疲劳断裂. 机械工程材料, 已录用
- [4] 董秀萍, 刘国权, 牛犁, 等. 金属橡胶材料制备过程的建模研究. 已投稿
- [5] 董秀萍, 刘国权, 杨建春, 等. 孔隙可调的金属橡胶过滤器建模研究. 已投稿
- [6] 牛犁, 董秀萍, 刘国权, 等. 金属橡胶用异型不锈钢微丝轧制成形对组织性能的影响规律研究. 已录用

## 致 谢

金属橡胶是一种新型的多孔阻尼材料，该方面的课题也是一个全新的研究领域。从材料学的研究角度，几乎没有现行国内外资料可以查阅，一些传统的实验方法又不太适用，基本靠自己不断尝试新的研究方法。在这种情况下能够基本独立完成课题的部分研究，除了我个人的努力之外，更多的是身边的人给予我的帮助和指导。在这里，我要向他们表示衷心的感谢！

本论文能得以顺利完成，首先要感谢我的导师刘国权教授，是他那严谨的治学态度、一丝不苟的科研精神、广博精深的学识，敏锐的学术思想深深的影响我，鼓励我不断前进。感谢先生为我提供的宽松的科研平台，感谢先生不厌其烦耐心地为解答科研中遇到的各种难题，感谢先生在生活中给予的无微不至的关怀。所有的一切都使我终身难忘，感谢师母李洪香老师在生活上的帮助，精神上的鼓励。在此我深深地向刘教授和李老师表示最真挚的谢意和最崇高的敬意！

本研究得到了装备预先研究项目（51312040405）的资助。军械工程学院白鸿柏课题组为本研究提供实验用材料和样品的帮助，白鸿柏教授还多次参加本课题的研究探讨，提出了重要指导和建议，在此一并表示衷心的感谢！

我要感谢本课题组的杨建春老师、寇宏宁、牛犁、李嘉同学。他们对本论文的完成给予了很大的帮助，帮我共同完成部分实验，尤其在我研究中遇到困难时，他们及时和我进行沟通和探讨，为我的课题研究赢得了宝贵的时间，并为本课题的研究提出了许多宝贵的意见，在此对他们表示由衷的谢意！

材料学院扫描电镜室的薛润冬老师、金相实验室的刘长胜老师、韩凌老师、国家重点实验室力学性能测试中心的各位老师、冶金学院化学分析中心的李景捷老师，清华大学摩擦学国家重点实验室的老师们都为我实验的顺利进行提供了大力帮助，在此表示深深的谢意！

感谢首钢冶金研究院的史世凤老师在拔丝工艺方面的指导，感谢北京元中北奥光学技术有限公司提供 OLYMPUS LEXT 激光扫描共焦显微镜，并协助完成钢丝表面及磨损痕迹的观察试验。

课题组的王浩、许磊、徐锬、吴凯、白宁等各位同学在我工作中遇到困难时都向我伸出温暖的双手，给我关心、爱护和帮助，使我有勇气克服重重困难，在此向他们表示衷心的感谢！当然，还有很多关心、支持、鼓励我的老师和同学，不能在此一一列举，在此一并表示感谢！

最后，提前感谢在百忙中抽出时间评审论文和参加答辩的各位专家、教授！