

前 言

本标准非等效采用国际标准 ISO 6976:1995《天然气—发热量、密度和相对密度的计算》。是对 GB 11062—89 的修订。

本标准与第一版相比,本次修订主要增加了摩尔发热量和质量发热量的计算方法,增加了沃泊指数的计算方法,为了适应国际贸易的发展需要,增加了术语——燃烧参比条件和计量参比条件。

本标准自实施之日起,同时代替 GB 11062—89。

本标准的附录 A 是标准的附录,附录 B、附录 C、附录 D 和附录 E 是提示的附录。

本标准由中国石油天然气总公司提出。

本标准由中国石油天然气总公司规划设计总院归口。

本标准起草单位:中国石油天然气总公司四川石油管理局天然气研究院。

本标准主要起草人:唐蒙、夏朝彬。

本标准于 1989 年 3 月 31 日首次发布。

中华人民共和国国家标准

天然气发热量、密度、 相对密度和沃泊指数的计算方法

GB/T 11062—1998
neq ISO 6976:1995

代替 GB 11062—89

Natural gas—Calculation of calorific values, density,
relative density and Wobbe index from composition

1 范围

本标准规定了已知用摩尔分数表示的气体组成时,计算干天然气、天然气代用品和其他气体燃料的高位发热量、低位发热量、密度、相对密度及沃泊指数的方法。

本方法同时给出了所计算各物性值的估计的精密度。

用于以摩尔或质量为基准的物性的计算方法适用于任何干天然气、天然气代用品以及通常是气体状态的其他燃料。对于以体积为基准的物性计算,本方法仅局限于组成中甲烷摩尔分数不小于 0.5 的气体。

本标准的表 1 至表 5 给出了计算时所需的基础物性值,附录 A 给出了计算中采用的辅助常数的量值。

注

- 1 如果气体组成是以体积分数给出,则应该将其换算成摩尔分数(见附录 B)。然而值得注意的是所换算出的摩尔分数的不确定度将大于原来体积分数的不确定度。
- 2 就本标准而言,用于加和的各组分摩尔分数应统一到小数点后第四位(0.0001),对于摩尔分数大于 0.00005 的所有组分均应考虑在内。
- 3 对于所计算的体积发热量,除甲烷外对其余可能出现的各组分的含量也有所限制。通常, N_2 的摩尔分数不应超过 0.3; CO_2 和 C_2H_6 的摩尔分数均不应超过 0.15; 其他组分的摩尔分数不应超过 0.05。
在这些限制条件下,计算值的不确定度应在 0.1% 之内。
- 4 水蒸气对发热量的影响,或者直接进行测量或者通过计算得到,将在附录 C 中进行讨论。
- 5 为使所描述的计算方法有效可行,气体在所描述的参比条件下必须处于其烃露点之上。

2 定义

本标准使用下列定义。

2.1 高位发热量 superior calorific value

规定量的气体在空气中完全燃烧时所释放出的热量。在燃烧反应发生时,压力 p_1 保持恒定,所有燃烧产物的温度降至与规定的反应物温度 t_1 相同的温度,除燃烧中生成的水在温度 t_1 下全部冷凝为液态外,其余所有燃烧产物均为气态。上述规定的气体由摩尔给出时,则发热量表示为 $\bar{H}_s(t_1, p_1)$ 。

当气体量由质量给出时,则发热量表示为 $\hat{H}_s(t_1, p_1)$ 。

当上述规定的气体由体积给出时,则发热量表示为 $\tilde{H}_s[(t_1, p_1), V(t_2, p_2)]$, 其中 t_2 和 p_2 为气体体积计量参比条件。

2.2 低位发热量 inferior calorific value

国家质量技术监督局 1998-06-17 批准

1998-12-01 实施

规定量的气体在空气中完全燃烧时所释放出的热量。在燃烧反应发生时,压力 p_1 保持恒定,所有燃烧产物的温度降至与指定的反应物温度 t_1 相同的温度,所有的燃烧产物均为气态。

当上述规定量的气体分别由摩尔、质量和体积给出时,则低位发热量分别表示为 $\bar{H}_i(t_1, p_1)$, $\hat{H}_i(t_1, p_1)$ 和 $\tilde{H}_i[(t_1, p_1), V(t_2, p_2)]$ 。

2.3 密度 density

在规定压力和温度条件下,气体的质量除以它的体积。

2.4 相对密度 relative density

在相同的规定压力和温度条件下,气体的密度除以具有标准组成的干空气的密度。

2.5 沃泊指数 Wobbe index

在规定参比条件下的体积高位发热量除以在相同的规定计量参比条件下的相对密度的平方根。

2.6 压缩因子 compression factor

在规定的压力和温度条件下,一给定质量气体的实际(真实)体积除以在相同条件下按理想气体定律计算出的该气体的体积。

2.7 燃烧参比条件 combustion reference conditions

指规定的燃料燃烧时的温度 t_1 和压力 p_1 。

2.8 计量参比条件 metering reference conditions

指规定的燃料燃烧时,计量的温度 t_2 和压力 p_2 。

注 6: 世界各国目前正在使用的参比条件的范围较广,各参比条件间近似的换算系数见附录 D。我国目前使用的计量参比条件与燃烧参比条件相同,均为 101.325 kPa, 20℃。

2.9 干天然气 dry natural gas

水气的摩尔分数不大于 0.000 05 的天然气。

3 方法提要

当已知气体组成时,可用本方法计算任何干天然气、天然气代用品以及其他气体燃料的发热量、密度、相对密度和沃泊指数。使用本方法时,先对气体混合物中所有组分的理想气体物性值,按各自相应的摩尔分数进行加权,然后将所有各项加和后便得到理想气体混合物的物性值。对于以体积为基准的物性值,通过使用压缩因子将其转化为真实气体的物性值。

附录 E 给出了计算示例。

4 理想气体和真实气体的特性

4.1 燃烧焓

发热量计算要求的最基础的物理量就是混合物中各气体组分的理想气体(标准)摩尔燃烧焓。所要求的量值主要取决于燃烧参比温度 t_1 。本标准以表格形式给出这些物理量在温度 t_1 为 25℃、20℃、15℃ 及 0℃ 时的量值。非常重要的一点是对于任何物质,所有这四种温度下的量值在热力学上的意义都是相互一致的。

对于发热量(摩尔、质量和体积发热量三者中的任何一种)来说,为了将气体混合物的理想气体燃烧焓换算为真实气体的量值,原则上还需要进行焓修正,然而,这种修正通常可以省略。

4.2 压缩因子的计算

考虑到气体的非理想性,在计算体积发热量、密度、相对密度以及沃泊指数时,需要对气体体积进行修正。

对体积非理想性的修正是通过使用压缩因子 Z_{mix} 来进行的。在计量参比条件下,在第 5 至 9 章中所描述的计算中要求的压缩因子 Z_{mix} 的计算公式如下:

$$Z_{\text{mix}}(t_2, p_2) = 1 - \left[\sum_{j=1}^N x_j \cdot \sqrt{b_j} \right]^2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中 $\sqrt{b_j}$ 为求和因子,表 2 给出了本标准考虑的天然气及天然气代用品的所有组分在通常感兴趣的三个计量参比条件下的求和因子的数值,表 2 同时给出了所有各纯组分的压缩因子 Z_j (假想压缩因子)。 b_j 是通过使用关系式 $b_j = 1 - Z_j$ 获得的。

5 摩尔发热量的计算

5.1 理想气体

已知组成的混合物在温度 t_1 下的理想摩尔发热量按式(2)计算:

$$\bar{H}^0(t_1) = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \bar{H}_j^0(t_1) \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中: $\bar{H}^0(t_1)$ ——混合物的理想摩尔发热量(高位或低位);

$\bar{H}_j^0(t_1)$ ——混合物中组分 j 的理想摩尔发热量(高位或低位);

x_j ——混合物中组分 j 的摩尔分数。

表 3 给出了在 t_1 为 25℃、20℃、15℃及 0℃时,组分 j 的理想摩尔发热量 \bar{H}_j^0 的数值。

注 7: \bar{H}_j^0 值不受压力的限制,因此,在理想气体情况下燃烧参比压力 p_1 与 \bar{H}_j^0 值无关,并在采用的理想气体摩尔发热量的命名中省略了燃烧参比压力 p_1 。

5.2 真实气体

对本标准而言,真实气体摩尔发热量与相应理想气体摩尔发热量在数值上被看作是相等的。

注 8: 由理想气体摩尔发热量精确地计算真实气体摩尔发热量时,要求对混合物进行焓修正计算(见 4.1)。对于典型的天然气来说,这个修正值是很小的,由此产生的误差不超过 $50 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ (0.005%),常将其忽略不计。

6 质量发热量的计算

6.1 理想气体

已知组成的混合物在温度 t_1 时的理想气体质量发热量按式(3)计算:

$$\hat{H}^0(t_1) = \frac{\bar{H}^0(t_1)}{M} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$M = \sum_{j=1}^N x_j M_j \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中: M ——混合物的摩尔质量;

M_j ——组分 j 的摩尔质量;

x_j ——组分 j 的摩尔分数;

$\hat{H}^0(t_1)$ ——混合物的理想质量发热量(高位或低位)。

表 1 给出了本标准涉及到的所有组分的摩尔质量。

式(3)和式(4)表述了计算 \hat{H}^0 的基本方法,此外,还有一个可供选择的方法,按式(5)计算:

$$\hat{H}^0(t_1) = \sum_{j=1}^N \left(x_j \times \frac{M_j}{M} \right) \hat{H}_j^0(t_1) \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中: \hat{H}_j^0 ——组分 j 的理想质量发热量(高位或低位)。

表 4 给出了 \hat{H}_j^0 在四种不同温度 t_1 (25℃, 20℃, 15℃和 0℃)下的量值。

由上述两种不同方法得到的 \hat{H}_j^0 值,相差不大于 $0.01 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

6.2 真实气体

对本标准而言,真实气体质量发热量与相应的理想气体质量发热量在数值上被看作是相等的。

7 体积发热量的计算

7.1 理想气体

已知组成的混合物,在燃烧温度 t_1 , 计量温度 t_2 和压力 p_2 时的理想气体体积发热量按式(6)计算:

$$\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \bar{H}^0(t_1) \times \frac{p_2}{R \cdot T_2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中: $\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)]$ ——混合物的理想气体体积发热量(高位或低位);

R ——摩尔气体常数($R=8.314\ 510\ \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

T_2 ——绝对温度($T_2=t_2+273.15$)。

式(6)表述了计算 \tilde{H}^0 的基本方法,此外,还有一个可供选择的方法,按式(7)计算:

$$\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \tilde{H}_j^0[t_1, V(t_2, p_2)] \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中: $\tilde{H}_j^0[t_1, V(t_2, p_2)]$ ——组分 j 的理想气体体积发热量(高位或低位)。

表 5 给出了在不同的燃烧和计量参比条件下的 \tilde{H}_j^0 值。

由上述两种不同方法计算出的 \tilde{H}^0 值,相差不大于 $0.01\ \text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

7.2 真实气体

气体混合物在燃烧温度 t_1 和压力 p_1 , 计量温度 t_2 和压力 p_2 时的真实气体体积发热量按式(8)计算:

$$\tilde{H}[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中: $\tilde{H}[t_1, V(t_2, p_2)]$ ——真实气体体积发热量(高位或低位);

$Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)$ ——在计量参比条件下的压缩因子。

压缩因子 $Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)$, 用表 2 中给出的各组分的求和因子 $\sqrt{b_j}$ 按式(1)计算。

8 相对密度、密度和沃泊指数的计算

8.1 理想气体

8.1.1 理想气体的相对密度按式(9)计算:

$$d^0 = \sum_{j=1}^N x_j \times \frac{M_j}{M_{\text{air}}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中: d^0 ——理想气体的相对密度;

M_j ——组分 j 的摩尔质量;

M_{air} ——标准组成的干空气的摩尔质量。

表 1 给出了各组分的摩尔质量的数值,表 A1 给出了干空气的摩尔组成,由此导出的标准组成的干空气的摩尔质量为 $28.962\ 6\ \text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ 。

8.1.2 理想气体的密度按式(10)计算:

$$\rho^0(t, p) = \left(\frac{p}{R \cdot T}\right) \sum_{j=1}^N x_j \cdot M_j \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中: $\rho^0(t, p)$ ——理想气体的密度;

R ——摩尔气体常数;

T ——绝对温度。

8.1.3 理想气体的沃泊指数按式(11)计算:

$$W^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}_s^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d^0}} \dots\dots\dots(11)$$

式中: W^0 ——理想气体的沃泊指数;

\tilde{H}_s^0 ——按 7.1 的公式计算。

8.2 真实气体

8.2.1 真实气体的相对密度按式(12)计算:

$$d(t, p) = \frac{d^0 \cdot Z_{\text{air}}(t, p)}{Z_{\text{mix}}(t, p)} \dots\dots\dots(12)$$

式中: $d(t, p)$ ——真实气体的相对密度;

$Z_{\text{mix}}(t, p)$ ——气体的压缩因子;

$Z_{\text{air}}(t, p)$ ——标准组成的干空气的压缩因子。

$Z_{\text{mix}}(t, p)$ 用表 2 给出的各组分的求和因子 $\sqrt{b_i}$ 按式(1)计算, $Z_{\text{air}}(t, p)$ 的数值如下:

$$Z_{\text{air}}(273.15 \text{ K}, 101.325 \text{ kPa}) = 0.99941$$

$$Z_{\text{air}}(288.15 \text{ K}, 101.325 \text{ kPa}) = 0.99958$$

$$Z_{\text{air}}(293.15 \text{ K}, 101.325 \text{ kPa}) = 0.99963$$

8.2.2 真实气体的密度按式(13)计算:

$$\rho(t, p) = \frac{\rho^0(t, p)}{Z_{\text{mix}}(t, p)} \dots\dots\dots(13)$$

式中: $\rho(t, p)$ ——真实气体的密度。

8.2.3 真实气体的沃泊指数按式(14)计算:

$$W[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}_s[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d(t_2, p_2)}} \dots\dots\dots(14)$$

式中: W ——真实气体的沃泊指数;

\tilde{H}_s ——按 7.2 的公式计算。

注 9: 在本条描述的各种计算中, 在单位的使用上应加以小心, 特别是密度的计算。摩尔气体常数 R 的单位以 $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 表示, 压力 p 以 kPa 表示, 摩尔质量 M 以 $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ 表示, 密度 ρ 通过计算自动导出 SI 单位, 以 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 表示。

9 精密度

计算获得的物性值的精密度完全由分析过程中的随机误差引起, 每个计算获得的物性值的精密度主要取决于分析数据的精密度, 可用重复性和再现性来表示。

9.1 重复性的估算

在置信水平为 95% 时, 物性值的重复性按式(15)计算:

$$\Delta Y = 2 \sqrt{2} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} \right]^{0.5} \dots\dots\dots(15)$$

式中: ΔY ——物性值 Y 的重复性;

Y_i ——由气体第 i 次分析所计算的物性值;

\bar{Y} —— n 个 Y_i 值的算术平均值。

当分别用 H, M, d, ρ 和 W 替换式(15)中的 Y , 可计算得到重复性 $\Delta H, \Delta M, \Delta d, \Delta \rho$ 和 ΔW 。

在置信水平为 95% 时, 物性值的重复性也可由分析数据直接计算得到。

a) 当除甲烷外的所有组分均被分析,甲烷($j=1$)的浓度由差减法计算得到时,则发热量的重复性 ΔH 按式(16)计算:

$$\Delta H_{\text{mix}}^0 = \left\{ \sum_{j=2}^N [\Delta x_j \cdot (H_j^0 - H_1^0)]^2 \right\}^{0.5} \dots\dots\dots(16)$$

式中: ΔH_{mix}^0 ——计算的混合理想气体发热量的重复性(摩尔或体积发热量);

Δx_j —— N 个组分的混合物中组分 j 摩尔分数的重复性;

H_j^0 ——组分 j 的理想气体发热量;

H_1^0 ——甲烷的理想气体发热量。

b) 当包括甲烷在内的所有组分都被分析时,则:

$$\Delta H_{\text{mix}}^0 = \left\{ \sum_{j=1}^N [\Delta x_j^* \cdot (H_j^0 - H_{\text{mix}}^0)]^2 \right\}^{0.5} \dots\dots\dots(17)$$

式中尽管 H_{mix}^0 是使用归一化之后的摩尔分数 x_j 计算得到的,而 Δx_j^* 则是组分 j 的摩尔分数在归一化之前的重复性。

相对密度的重复性 Δd 和密度的重复性 $\Delta \rho$ 可分别按式(18)和式(19)计算:

$$\Delta d = \frac{\Delta M}{M_{\text{air}}} \dots\dots\dots(18)$$

$$\Delta \rho = \frac{\Delta M \cdot p}{R \cdot T} \dots\dots\dots(19)$$

式中 ΔM 是天然气的平均摩尔质量 M 的重复性,计算如下:

对情况 a)

$$\Delta M = \left\{ \sum_{j=2}^N [\Delta x_j \cdot (M_j - M_1)]^2 \right\}^{0.5} \dots\dots\dots(20)$$

对情况 b)

$$\Delta M = \left\{ \sum_{j=2}^N [\Delta x_j^* \cdot (M_j - M)]^2 \right\}^{0.5} \dots\dots\dots(21)$$

式中: M_j ——组分 j 的摩尔质量;

M_1 ——甲烷的摩尔质量。

沃泊指数的重复性 ΔW 可按式(22)计算:

$$\Delta W = W \left[\left(\frac{\Delta \tilde{H}}{\tilde{H}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{2d} \right)^2 \right]^{0.5} \dots\dots\dots(22)$$

9.2 再现性的估算

在置信水平为95%时,发热量、相对密度、密度及沃泊指数的再现性 ΔH 、 Δd 、 $\Delta \rho$ 和 ΔW 可按式(15)计算,其中 ΔY 视为 Y 的再现性;也可按式(16)至式(22)来计算,式(16)、式(17)、式(20)和式(21)中的 Δx_j 和 Δx_j^* 视为摩尔分数 x_j 的再现性。

10 准确度

计算的物性值的绝对准确度,可通过三个独立来源的系统误差的合成来得到,即:

- a) 在表1至表5中给出的基础数据的不确定度;
- b) 使用上述数据的计算方法的偏差;
- c) 作为方法输入值的分析数据的不确定度。

经验表明,对在此考虑的物性值的相对不确定度的影响,主要来自分析数据的不确定度,而基础数据的不确定度和计算方法的偏差对相对不确定度的贡献值则非常小。来自基础数据不确定度的贡献值预期小于0.05%,而来自计算方法偏差的贡献值则小于0.015%。与一个含有12至20个组分的典型天

然气混合物的分析数据的不确定度相比,基础数据不确定度的贡献值及计算方法偏差的贡献值则可忽略不计。

11 结果的表示

对每一个物性值所给出的有效数字的位数应反映出该物性值预期的计算准确度。计算结果的报告不应优于下列有效位数的水平。

发热量

摩尔发热量: $0.01 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

质量发热量: $0.01 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

体积发热量: $0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$

相对密度: 0.000 1

密度: $0.000 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

沃泊指数: $0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$

应特别注意分析数据在事实上能否达到预期所给出的有效位数的水平,如果不能,则所给出的有效数字的位数也应相应地减少。

表1 天然气各组分的摩尔质量

组分	摩尔质量 kg · kmol ⁻¹	组分	摩尔质量 kg · kmol ⁻¹
1 甲烷	16.043	31 乙基环戊烷	98.188
2 乙烷	30.070	32 环己烷	84.161
3 丙烷	44.097	33 甲基环己烷	98.188
4 丁烷	58.123	34 乙基环己烷	112.215
5 2-甲基丙烷	58.123	35 苯	78.114
6 戊烷	72.150	36 甲苯	92.141
7 2-甲基丁烷	72.150	37 乙苯	106.167
8 2,2-二甲基丙烷	72.150	38 邻二甲苯	106.167
9 己烷	86.177	39 甲醇	32.042
10 2-甲基戊烷	86.177	40 甲硫醇	48.109
11 3-甲基戊烷	86.177	41 氢气	2.0159
12 2,2-二甲基丁烷	86.177	42 水	18.0153
13 2,3-二甲基丁烷	86.177	43 硫化氢	34.082
14 庚烷	100.204	44 氨	17.0306
15 辛烷	114.231	45 氰化氢	27.026
16 壬烷	128.258	46 一氧化碳	28.010
17 癸烷	142.285	47 硫氧化碳	60.076
18 乙烯	28.054	48 二硫化碳	76.143
19 丙烯	42.081	49 氦气	4.0026
20 1-丁烯	56.108	50 氟气	20.1797
21 顺-2-丁烯	56.108	51 氩气	39.948
22 反-2-丁烯	56.108	52 氮气	28.0135
23 2-甲基丙烯	56.108	53 氧气	31.9988
24 1-戊烯	70.134	54 二氧化碳	44.010
25 丙二烯	40.065	55 二氧化硫	64.065
26 1,2-丁二烯	54.092	56 一氧化二氮	44.0129
27 1,3-丁二烯	54.092	57 氖气	83.80
28 乙炔	26.038	58 氙气	131.29
29 环戊烷	70.134	空气	28.9626
30 甲基环戊烷	84.161		

注：由下列主要涉及元素的相对原子质量计算得到的相对分子质量在数值上与摩尔质量是相等的，其中，括号内的数字是所引用的相对原子质量在最后一位上的不确定度。

C 12.011(1); H 1.007 94(2); O 15.999 4(3);
N 14.006 74(7); S 32.066(6)

对于含有碳和/或硫元素的化合物，导出的摩尔质量已修约到小数点后第三位，而对于其他化合物则给到小数点后第四位，标准组成的干空气的摩尔质量同样给到小数点后第四位。

表 2 天然气各组分在不同计量参比条件下的压缩因子和求和因子

组分	0℃, 101.325 kPa		15℃, 101.325 kPa		20℃, 101.325 kPa	
	Z	\sqrt{b}	Z	\sqrt{b}	Z	\sqrt{b}
1 甲烷	0.997 6	0.049 0	0.998 0	0.044 7	0.998 1	0.043 6
2 乙烷	0.990 0	0.100 0	0.991 5	0.092 2	0.992 0	0.089 4
3 丙烷	0.978 9	0.145 3	0.982 1	0.133 8	0.983 4	0.128 8
4 丁烷	0.957 2	0.206 9	0.965 0	0.187 1	0.968 2	0.178 3
5 2-甲基丙烷	0.958	0.204 9	0.968	0.178 9	0.971	0.170 3
6 戊烷	0.918	0.286 4	0.937	0.251 0	0.945	0.234 5
7 2-甲基丁烷	0.937 7	0.251 0	0.948	0.228 0	0.953	0.216 8
8 2,2-二甲基丙烷	0.943	0.238 7	0.955	0.212 1	0.959	0.202 5
9 己烷	0.892	0.328 6	0.913	0.295 0	0.919	0.284 6
10 2-甲基戊烷	0.898	0.319 4	0.914	0.293 3	0.926	0.272 0
11 3-甲基戊烷	0.898	0.319 4	0.917	0.288 1	0.928	0.268 3
12 2,2-二甲基丁烷	0.916	0.289 8	0.931	0.262 7	0.935	0.255 0
13 2,3-二甲基丁烷	0.910	0.300 0	0.925	0.273 9	0.934	0.256 9
14 庚烷	0.830	0.412 3	0.866	0.366 1	0.876	0.352 1
15 辛烷	0.742	0.507 9	0.802	0.445 0	0.817	0.427 8
16 壬烷	0.613	0.622 1	0.710	0.538 5	0.735	0.514 8
17 癸烷	0.434	0.752 3	0.584	0.645 0	0.623	0.614 0
18 乙烯	0.992 5	0.086 6	0.993 6	0.080 0	0.994 0	0.077 5
19 丙烯	0.981	0.137 8	0.984	0.126 5	0.985	0.122 5
20 1-丁烯	0.965	0.187 4	0.970	0.173 2	0.972	0.167 3
21 顺-2-丁烯	0.961	0.197 5	0.967	0.121 7	0.969	0.176 1
22 反-2-丁烯	0.961	0.197 5	0.968	0.178 9	0.969	0.176 1
23 2-甲基丙烯	0.965	0.187 1	0.971	0.170 3	0.972	0.167 3
24 1-戊烯	0.938	0.249 0	0.949	0.225 8	0.952	0.219 1
25 丙二烯	0.980	0.141 4	0.983	0.130 4	0.984	0.126 5
26 1,2-丁二烯	0.955	0.212 1	0.963	0.192 4	0.965	0.187 1
27 1,3-丁二烯	0.966	0.184 4	0.971	0.170 3	0.973	0.164 3
28 乙炔	0.990	0.094 9	0.993	0.083 7	0.993	0.083 7
29 环戊烷	0.935	0.255 0	0.947	0.230 2	0.950	0.223 6
30 甲基环戊烷	0.902	0.313 0	0.921	0.281 1	0.927	0.270 2
31 乙基环戊烷	0.841	0.398 7	0.876	0.352 1	0.885	0.339 1
32 环己烷	0.897	0.320 9	0.918	0.286 4	0.924	0.275 7
33 甲基环己烷	0.855	0.380 8	0.886	0.337 6	0.894	0.325 6
34 乙基环己烷	0.770	0.479 6	0.824	0.419 5	0.838	0.402 5
35 苯	0.909	0.301 7	0.926	0.272 0	0.936	0.253 0
36 甲苯	0.849	0.388 6	0.883	0.342 1	0.892	0.328 6
37 乙苯	0.764	0.485 8	0.823	0.420 7	0.837	0.403 7
38 邻二甲苯	0.737	0.512 8	0.804	0.442 7	0.821	0.423 1
39 甲醇	0.773	0.476 4	0.872	0.357 8	0.892	0.328 6
40 甲硫醇	0.972	0.167 3	0.977	0.151 7	0.978	0.148 3
41 氢气	1.000 6	-0.004 0	1.000 6	-0.004 8	1.000 6	-0.005 1
42 水	0.930	0.264 6	0.945	0.234 5	0.952	0.219 1
43 硫化氢	0.990	0.100 0	0.990	0.100 0	0.990	0.100 0
44 氨	0.985	0.122 5	0.988	0.109 5	0.989	0.104 9
45 氰化氢	0.887	0.336 2	0.912	0.296 6	0.920	0.282 8

表 2 (完)

组分	0℃, 101.325 kPa		15℃, 101.325 kPa		20℃, 101.325 kPa	
	Z	\sqrt{b}	Z	\sqrt{b}	Z	\sqrt{b}
46 一氧化碳	0.999 3	0.026 5	0.999 5	0.022 4	0.999 6	0.020 0
47 硫氧化碳	0.985	0.122 5	0.987	0.004 0	0.988	0.109 5
48 二硫化碳	0.954	0.214 5	0.962	0.194 9	0.965	0.187 1
49 氮气	1.000 5	0.000 6	1.000 5	0.000 2	1.000 5	0.000 0
50 氦气	1.000 5	0.000 6	1.000 5	0.000 2	1.000 5	0.000 0
51 氩气	0.999 0	0.031 6	0.999 2	0.028 3	0.999 3	0.026 5
52 氖气	0.999 5	0.022 4	0.999 7	0.017 3	0.999 7	0.017 3
53 氧气	0.999 0	0.031 6	0.999 2	0.028 3	0.999 3	0.026 5
54 二氧化碳	0.993 3	0.081 9	0.994 4	0.074 8	0.994 4	0.072 8
55 二氧化硫	0.976	0.154 9	0.979	0.144 9	0.980	0.141 4
空气	0.999 41	—	0.999 58	—	0.999 63	—

注：氢气、氮气的加和因子值是重新计算值，氦气的加和因子是估算值。

表 3 天然气各组分在不同燃烧参比条件下的理想气体摩尔发热量

组分	理想摩尔发热量 $\bar{H}^0, \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$							
	25℃		20℃		15℃		0℃	
	高位	低位	高位	低位	高位	低位	高位	低位
1 甲烷	890.63	802.60	891.09	802.65	891.56	802.69	892.97	802.82
2 乙烷	1560.69	1428.64	1561.41	1428.74	1562.14	1428.84	1564.34	1429.12
3 丙烷	2219.17	2043.11	2220.13	2043.23	2221.10	2043.37	2224.01	2043.71
4 丁烷	2877.40	2657.32	2878.57	2657.45	2879.76	2657.60	2883.82	2658.45
5 2-甲基丙烷	2868.20	2648.12	2869.38	2648.26	2870.58	2648.42	2874.20	2648.83
6 戊烷	3535.77	3271.67	3537.17	3271.83	3538.60	3272.00	3542.89	3272.45
7 2-甲基丁烷	3528.83	3264.73	3530.24	3264.89	3531.68	3265.08	3535.98	3265.54
8 2,2-二甲基丙烷	3514.61	3250.51	3516.01	3250.67	3517.43	3250.83	521.72	3251.28
9 己烷	4194.95	3886.84	4196.58	3887.01	4198.24	3887.21	4203.23	3887.71
10 2-甲基戊烷	4187.32	3879.21	4188.95	3879.38	4190.62	3879.59	4195.61	3880.09
11 3-甲基戊烷	4189.90	3881.79	4191.54	3881.97	4193.22	3882.19	4198.24	3882.72
12 2,2-二甲基丁烷	4177.52	3869.41	4179.15	3869.59	4180.83	3869.80	4185.84	3870.32
13 2,3-二甲基丁烷	4185.28	3877.17	4186.93	3877.36	4188.60	3877.57	4193.63	3878.11
14 庚烷	4853.43	4501.30	4855.29	4501.49	4857.18	4501.72	4862.87	4502.28
15 辛烷	5511.80	5115.66	5513.88	5115.87	5516.01	5116.11	5522.40	5116.73
16 壬烷	6171.75	5730.99	6173.46	5731.22	6175.82	5731.49	6182.91	5732.17
17 癸烷	6829.77	6345.59	6832.31	6345.85	6834.90	6346.14	6842.69	6346.88
18 乙烯	1411.18	1323.15	1411.65	1323.20	1412.11	1323.24	1413.51	1323.36
19 丙烯	2058.02	1925.97	2058.72	1926.05	2059.43	1926.13	2061.57	1926.35
20 1-丁烯	2716.82	2540.76	2717.75	2540.86	2718.70	2540.97	2721.55	2541.25
21 顺-2-丁烯	2710.0	2533.9	2711.0	2534.1	2711.9	2534.2	2714.9	2534.6
22 反-2-丁烯	2706.4	2530.3	2707.4	2530.5	2708.3	2530.5	2711.1	2530.8
23 2-甲基丙烯	2700.2	2524.1	2701.1	2524.2	2702.0	2524.3	2704.8	2524.5
24 1-戊烯	3375.42	3155.34	3376.57	3155.45	3377.75	3155.59	3381.29	3155.92
25 丙二烯	1943.11	1855.08	1943.53	1855.08	1943.96	1855.09	1945.25	1855.10
26 1,2-丁二烯	2593.79	2461.74	2594.45	2461.78	2595.12	2461.82	2597.13	2461.91
27 1,3-丁二烯	2540.77	2408.72	2541.43	2408.76	2542.10	2408.80	2544.13	2408.91

表 3 (完)

组分	理想摩尔发热量 $\bar{H}^0, \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$							
	25℃		20℃		15℃		0℃	
	高位	低位	高位	低位	高位	低位	高位	低位
28 乙炔	1301.05	1257.03	1301.21	1256.98	1301.37	1256.94	1301.86	1256.79
29 环戊烷	3319.59	3099.51	3320.88	3099.76	3322.19	3100.03	3326.14	3100.77
30 甲基环戊烷	3969.44	3705.34	3970.93	3705.59	3972.46	3705.86	3977.04	3706.60
31 乙基环戊烷	4628.47	4320.36	4630.19	4320.63	4631.95	4320.92	4637.27	4321.75
32 环己烷	3952.96	3688.86	3954.47	3689.13	3956.02	3689.42	3960.67	3690.23
33 甲基环己烷	4600.64	4292.53	4602.35	4292.78	4604.09	4293.06	4609.34	4293.82
34 乙基环己烷	5263.05	4910.92	5264.98	4911.19	5266.95	4911.49	5272.88	4912.29
35 苯	3301.43	3169.38	3302.15	3169.48	3302.86	3169.56	3305.03	3169.81
36 甲苯	3947.89	3771.83	3948.84	3771.95	3949.81	3772.08	3952.72	3772.42
37 乙苯	4607.15	4387.07	4608.32	4387.20	4609.53	4387.37	4613.14	4387.77
38 邻二甲苯	4596.31	4376.23	4597.46	4376.34	4598.64	4376.48	4602.17	4376.80
39 甲醇	764.09	676.06	764.59	676.14	765.09	676.22	766.59	676.44
40 甲硫醇	1239.39	1151.36	1239.83	1151.39	1240.28	1151.41	1241.63	1151.48
41 氢气	285.83	241.81	285.99	241.76	286.15	241.72	286.63	241.56
42 水	44.016	0	44.224	0	44.433	0	45.074	0
43 硫化氢	562.01	517.99	562.19	517.97	562.38	517.95	562.94	517.87
44 氨	382.81	316.79	383.16	316.82	383.51	316.86	384.57	316.96
45 氰化氢	671.5	649.5	671.6	649.5	671.7	649.5	671.9	649.4
46 一氧化碳	282.98	282.98	282.95	282.95	282.91	282.91	282.80	282.80
47 硫氧化碳	548.23	548.23	548.19	548.19	548.15	548.15	548.01	548.01
48 二硫化碳	1104.49	1104.49	1104.41	1104.41	1104.32	1104.12	1104.06	1104.06

注：水蒸气的非零发热量是通过高位发热量的定义推导出来的，即要求燃烧产物中所有的水蒸气均冷凝为液态。因此换句话说，存在于干气中的任何水蒸气将为混合物的高位发热量贡献汽化潜热。

表 4 天然气各组分在不同燃烧参比条件下的理想气体质量发热量

组分	理想质量发热量 $\hat{H}^0, \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$							
	25℃		20℃		15℃		0℃	
	高位	低位	高位	低位	高位	低位	高位	低位
1 甲烷	55.516	50.029	55.545	50.032	55.574	50.035	55.662	50.043
2 乙烷	51.90	47.51	51.93	47.51	51.95	47.52	52.02	47.53
3 丙烷	50.33	46.33	50.35	46.34	50.37	46.34	50.44	46.35
4 丁烷	49.51	45.72	49.53	45.72	49.55	45.72	49.62	45.74
5 2-甲基丙烷	49.35	45.56	49.37	45.56	49.39	45.57	49.45	45.57
6 戊烷	49.01	45.35	49.03	45.35	49.04	45.35	49.10	45.36
7 2-甲基丁烷	48.91	45.25	48.93	45.25	48.95	45.25	49.01	45.26
8 2,2-二甲基丙烷	48.71	45.05	48.73	45.05	48.75	45.06	48.81	45.06
9 己烷	48.68	45.10	48.70	45.10	48.72	45.11	48.77	45.11
10 2-甲基戊烷	48.59	45.01	48.61	45.02	48.63	45.02	48.69	45.02
11 3-甲基戊烷	48.62	45.04	48.64	45.05	48.66	45.05	48.72	45.06
12 2,2-二甲基丁烷	48.48	44.90	48.49	44.90	48.51	44.91	48.57	44.91
13 2,3-二甲基丁烷	48.57	44.99	48.59	44.99	48.60	45.00	48.66	45.00

表 4 (完)

组分	理想质量发热量 $\hat{H}^0, \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$							
	25℃		20℃		15℃		0℃	
	高位	低位	高位	低位	高位	低位	高位	低位
14 庚烷	48.44	44.92	48.45	44.92	48.47	44.93	48.53	44.93
15 辛烷	48.25	44.78	48.27	44.79	48.29	44.79	48.34	44.79
16 壬烷	48.12	44.68	48.13	44.69	48.15	44.69	48.21	44.69
17 癸烷	48.00	44.60	48.02	44.60	48.04	44.60	48.09	44.61
18 乙烯	50.30	47.16	50.32	47.17	50.34	47.17	50.39	47.17
19 丙烯	48.91	45.77	48.92	45.77	48.94	45.77	48.99	45.78
20 1-丁烯	48.42	45.28	48.44	45.29	48.46	45.29	48.51	45.29
21 顺-2-丁烯	48.30	45.16	48.32	45.16	48.33	45.17	48.39	45.17
22 反-2-丁烯	48.24	45.10	48.25	45.10	48.27	45.10	48.32	45.11
23 2-甲基丙烯	48.13	44.99	48.14	44.99	48.16	44.99	48.21	44.99
24 1-戊烯	48.50	44.99	48.14	44.99	48.16	44.99	48.21	45.00
25 丙二烯	47.95	46.30	48.51	46.30	48.52	46.30	48.55	46.30
26 1,2-丁二烯	46.95	45.51	47.96	45.51	47.98	45.50	48.01	45.50
27 1,3-丁二烯	49.97	44.53	46.98	44.53	47.00	44.53	47.03	44.53
28 乙炔	47.33	48.28	49.97	48.28	49.98	48.27	50.00	48.27
29 环戊烷	47.16	44.19	47.35	44.20	47.37	44.20	47.43	44.21
30 甲基环戊烷	47.14	44.03	47.18	44.03	47.20	44.03	47.25	44.04
31 乙基环戊烷	46.97	44.00	47.16	44.00	47.17	44.01	47.23	44.01
32 环己烷	46.86	43.83	46.99	43.83	47.01	43.84	47.06	43.85
33 甲基环己烷	46.86	43.72	46.87	43.72	46.89	43.72	46.94	43.73
34 乙基环己烷	46.90	43.76	46.92	43.77	46.94	43.77	46.99	43.78
35 苯	42.26	40.57	42.27	40.58	42.28	40.57	42.31	40.58
36 甲苯	42.85	40.94	42.86	40.94	42.87	40.94	42.90	40.94
37 乙苯	43.40	41.32	43.41	41.32	43.42	41.33	43.45	41.33
38 邻二甲苯	43.29	41.22	43.30	41.22	43.31	41.22	43.35	41.23
39 甲醇	23.85	21.10	23.86	21.10	23.88	21.10	23.90	21.11
40 甲硫醇	25.76	23.93	25.77	23.93	25.78	23.93	25.81	23.93
41 氢气	141.79	119.95	141.87	119.93	141.95	119.91	142.19	119.83
42 水	2.44	0	2.45	0	2.47	0	2.50	0
43 硫化氢	16.49	15.20	16.50	15.20	16.50	15.20	16.52	15.19
44 氨	22.48	18.60	22.50	18.60	22.52	18.61	22.58	18.61
45 氰化氢	24.85	24.03	24.85	24.03	24.85	24.03	24.86	24.03
46 一氧化碳	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10	10.10
47 硫氧化碳	9.13	9.13	9.12	9.12	9.12	9.12	9.12	9.12
48 二硫化碳	14.51	14.51	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50

注：水蒸气的非零发热量是通过高位发热量的定义推导出来的，即要求燃烧产物中所有的水蒸气均冷凝为液态。因此换句话说，存在于干气中的任何水蒸气将为混合物的高位发热量贡献汽化潜热。

表5 天然气各组分在不同的燃烧和计量参考条件下的理想气体体积发热量

组分	理想气体体积发热量 $\tilde{H}^0, \text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$											
	15/15℃		0/0℃		15/0℃		25/0℃		20/20℃		25/20℃	
	高位	低位	高位	低位	高位	低位	高位	低位	高位	低位	高位	低位
1 甲烷	37.706	33.948	39.840	35.818	39.777	35.812	39.735	35.808	37.044	33.367	37.024	33.365
2 乙烷	66.07	60.43	69.79	63.76	69.69	63.75	69.63	63.74	64.91	59.39	64.88	59.39
3 丙烷	93.94	86.42	99.22	91.18	99.09	91.16	99.01	91.15	92.29	84.94	95.25	84.93
4 丁烷	121.79	112.40	128.66	118.61	128.48	118.57	128.73	118.56	119.66	110.47	119.62	110.47
5 2-甲基丙烷	121.40	112.01	128.23	118.18	128.07	118.16	127.96	118.15	119.28	110.09	119.23	110.08
6 戊烷	149.66	138.38	158.07	146.00	157.87	145.98	157.75	145.96	147.04	136.01	146.99	136.01
7 2-甲基丁烷	149.36	138.09	157.76	145.69	157.57	145.67	157.44	145.66	146.76	135.72	146.70	135.72
8 2,2-二甲基丙烷	148.76	137.49	157.12	145.06	156.93	145.04	156.80	145.02	146.16	135.13	146.11	135.13
9 己烷	177.55	164.40	187.53	173.45	187.30	173.43	187.16	173.41	174.46	161.59	174.39	161.58
10 2-甲基戊烷	177.23	164.08	187.19	173.11	187.96	173.09	186.82	173.07	174.14	161.27	174.07	161.26
11 3-甲基戊烷	177.34	164.19	187.30	173.23	187.08	173.20	186.93	173.19	174.25	161.38	174.18	161.37
12 2,2-二甲基丁烷	176.82	163.66	186.75	172.67	186.53	172.65	186.38	172.63	173.73	160.86	173.66	160.86
13 2,3-二甲基丁烷	177.15	163.99	187.10	173.02	186.87	173.00	186.73	172.98	174.05	161.19	173.99	161.18
14 庚烷	205.42	190.39	216.96	200.87	216.70	200.84	216.53	200.82	201.84	187.13	201.76	187.12
15 辛烷	233.28	216.37	246.38	228.28	246.10	228.25	245.91	228.23	229.22	212.67	229.13	212.66
16 壬烷	261.19	242.40	275.85	255.74	275.53	255.71	275.32	255.69	256.64	238.25	256.54	238.24
17 癸烷	289.06	268.39	305.29	283.16	304.94	283.13	304.71	283.11	284.03	263.80	283.92	263.79
18 乙烯	59.72	55.96	63.06	59.04	63.00	59.04	62.96	59.03	58.68	55.01	58.66	55.00
19 丙烯	87.10	81.46	91.98	85.94	91.88	85.93	91.82	85.93	85.58	80.07	85.55	80.06
20 1-丁烯	114.98	107.46	121.42	113.38	121.29	113.36	121.21	113.36	112.98	105.63	112.94	105.62
21 顺-2-丁烯	114.69	107.18	121.12	113.08	120.99	113.06	120.91	113.05	112.70	105.34	112.66	105.34
22 反-2-丁烯	114.54	107.02	120.96	112.91	120.83	112.90	120.75	112.89	112.55	105.19	112.51	105.19
23 2-甲基丙烯	114.27	106.76	120.67	112.63	120.55	112.62	120.47	112.61	112.29	104.93	112.25	104.93
24 1-戊烯	142.85	133.46	150.86	140.80	150.70	140.79	150.59	140.77	140.37	131.18	140.32	131.17
25 丙二烯	82.21	78.46	86.79	82.76	86.73	82.76	86.69	82.76	80.79	77.12	80.78	77.12
26 1,2-丁二烯	109.75	104.12	115.87	109.84	115.78	109.83	115.72	109.83	107.85	102.34	107.83	102.34
27 1,3-丁二烯	107.51	101.87	113.51	107.47	113.42	107.47	113.36	107.46	105.65	100.13	105.62	100.13
28 乙炔	55.04	53.16	58.08	56.07	58.06	56.08	58.05	56.08	54.09	52.25	54.09	52.26
29 环戊烷	140.50	131.11	148.40	138.34	148.22	138.31	148.10	138.28	138.05	128.86	138.00	128.85
30 甲基环戊烷	168.00	156.73	177.43	165.37	177.23	165.34	177.10	165.31	165.08	154.04	165.01	154.03
31 乙基环戊烷	195.90	182.74	206.89	192.81	206.65	192.78	206.50	192.75	192.48	179.61	192.41	179.60
32 环己烷	167.31	156.03	176.70	164.64	176.50	164.60	176.36	164.58	164.39	153.36	164.33	153.35
33 甲基环己烷	194.72	181.56	205.64	191.57	205.41	191.53	205.26	191.51	191.32	178.45	191.25	178.44
34 乙基环己烷	222.75	207.72	235.25	219.16	234.98	219.13	234.81	219.10	218.87	204.16	218.79	204.15
35 苯	139.69	134.05	147.45	141.42	147.36	141.41	147.29	141.40	137.27	131.76	137.24	131.75
36 甲苯	167.05	159.53	176.35	168.31	176.22	168.29	176.13	168.28	164.16	156.80	164.12	156.80
37 乙苯	194.95	185.55	205.81	195.76	205.65	195.74	205.55	195.73	191.57	182.38	191.52	182.37
38 邻二甲苯	194.49	185.09	205.32	195.27	205.17	195.26	205.06	195.24	191.12	181.93	191.07	181.92
39 甲醇	32.36	28.60	34.20	30.18	34.13	30.17	34.09	30.16	31.78	28.11	31.76	28.10
40 甲硫醇	52.45	48.70	55.40	51.37	55.33	51.37	55.30	51.37	51.54	47.86	51.52	47.86
41 氢气	12.102	10.223	12.788	10.777	12.767	10.784	12.725	10.788	11.889	10.050	11.882	10.052
42 水	1.88	0	2.01	0	1.98	0	1.96	0	1.84	0	1.83	0
43 硫化氢	23.78	21.91	25.12	23.10	25.09	23.11	25.07	23.11	23.37	21.53	23.36	21.53
44 氨	16.22	13.40	17.16	14.14	17.11	14.14	17.08	14.13	15.93	13.17	15.91	13.17

表 5 (完)

组分	理想体积发热量 $\bar{H}^0, \text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$											
	15/15℃		0/0℃		15/0℃		25/0℃		20/20℃		25/20℃	
	高位	低位	高位	低位	高位	低位	高位	低位	高位	低位	高位	低位
45 氟化氢	28.41	27.47	29.98	28.97	29.97	28.98	29.96	28.98	27.92	27.00	27.91	27.00
46 一氧化碳	11.96	11.96	12.62	12.62	12.62	12.62	12.63	12.63	11.76	11.76	11.76	11.76
47 硫氧化碳	23.18	23.18	24.45	24.45	24.46	24.46	24.46	24.46	22.79	22.79	22.79	22.79
48 二硫化碳	46.70	46.70	49.26	49.26	49.27	49.27	49.28	49.28	45.71	45.91	45.91	45.91

注

- 1 水蒸气的非零发热量是通过高位发热量的定义推导出来的,即要求燃烧产物中所有的水蒸气均冷凝为液相。因此换句话说,存在于干气中的任何水蒸气将为混合物的高位发热量贡献其汽化潜热。
- 2 在任何情况下,燃烧和计量的参比压力均为 101.325 kPa。
- 3 表头“ t_1/t_2 ℃”分别指燃烧和计量参比温度。

附录 A
(标准的附录)
辅助常数的量值

A1 摩尔气体常数

目前推荐的摩尔气体常数 R 的量值是:

$$R = (8.314\ 510 \pm 0.000\ 070)\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

A2 干空气的性质

表 A1 给出了所推荐的干空气的摩尔组成。干空气的摩尔质量为:

$$M_{\text{air}} = 28.962\ 6\ \text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

标准组成的干空气在三个常用的计量参比条件下的压缩因子取值为:

$$Z_{\text{air}}(273.15\ \text{K}, 101.325\ \text{kPa}) = 0.999\ 41$$

$$Z_{\text{air}}(288.15\ \text{K}, 101.325\ \text{kPa}) = 0.999\ 58$$

$$Z_{\text{air}}(293.15\ \text{K}, 101.325\ \text{kPa}) = 0.999\ 63$$

由此得出的标准组成的干空气的真实气体密度分别是:

$$\rho_{\text{air}}(273.15\ \text{K}, 101.325\ \text{kPa}) = 1.292\ 923\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho_{\text{air}}(288.15\ \text{K}, 101.325\ \text{kPa}) = 1.225\ 410\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho_{\text{air}}(293.15\ \text{K}, 101.325\ \text{kPa}) = 1.204\ 449\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

表 A1 干空气的摩尔组成

组 成	摩尔分数	组 成	摩尔分数
氮气	0.781 02	甲烷	0.000 001 5
氧气	0.209 46	氦气	0.000 001 1
氩气	0.009 16	氢气	0.000 000 5
二氧化碳	0.000 33	一氧化二氮	0.000 000 3
氖气	0.000 018 2	一氧化碳	0.000 000 2
氫气	0.000 005 2	氙气	0.000 000 1

附录 B

(提示的附录)

体积分数到摩尔分数的换算

在计量参比条件 (t_2, p_2) 下, 如果气体组成是以体积分数给出, 可按式(B1)将体积分数换算到摩尔分数。

对所有的组分 j 而言:

$$x_j = \frac{\frac{\varphi_j}{Z_j(t_2, p_2)}}{\sum_{j=1}^N \left[\frac{\varphi_j}{Z_j(t_2, p_2)} \right]} \dots\dots\dots (B1)$$

式中: x_j ——组分 j 的摩尔分数;

φ_j ——组分 j 体积分数；

$Z_j(t_2, p_2)$ ——组分 j 在计量参比条件 (t_2, p_2) 下的压缩因子。

附录 C

(提示的附录)

水蒸气对发热量的影响

C1 概述

某些发热量仪可通过燃烧直接测量燃料气的单位体积发热量,此时在燃烧前(计量时)燃烧气被水蒸气饱和,并(假定)以饱和发热量形式报告结果(但不一定)。简单地说,对于饱和燃料气,由于在计量系统中燃料气被水蒸气替代,因此,其发热量比未饱和(干燥或部分饱和)气体的发热量要低。

其他用于直接或间接测量发热量的仪器都不是以类似的方法来操作的。例如:

——某些直接燃烧的发热量仪是在一个“公认的”标准上,将气体(即该气体具有显著的水蒸气含量)燃烧,但(假定)是在干气的基础上,报告实际的发热量。

——某些仪器在进行发热量测量之前,首先将气体干燥,因此测量及报告的是一个干基发热量,即使气体最初可能含有水蒸气。

——气体组分分析仪器(特别是气相色谱仪)常常分析气体中除水之外的所有重要组分,因此,所报告的常常是一个计算的干气发热量,即使气体中实际可能含有水蒸气。

因此,为了对由不同测试技术测定的气体发热量进行有效的比对,则有必要考虑以下几点:

——在其最初的状态时,气体被水蒸气饱和的程度;

——在测量过程中(计量后),气体被水蒸气饱和的程度;

——测量仪器或程序的操作特征;以及

——在报告的发热量中所指气体被水蒸气饱和的程度。

当所有这些因素已知时,才有可能将所有的发热量测定归结到一个统一和一致的基础上。

尽管本标准的主要内容是关于干气的计算,但同时也建议了通常最合理的基础是一个“公认的”标准,在这个“公认的”标准上进行发热量的测定和引用,把水蒸气的存在仅考虑作为混合物中的另一个组分,并有一个明确的摩尔分数。如果采用了这种方法,特别是如果对水蒸气的分析并不是构成最初分析程序的一部分的话(也就是说如果水蒸气的量不得通过二次方法推断获得,例如湿度计法或者露点测量法),则在进行计算时必需充分考虑到以下三点。

C2 排除体积效应

在气体计量系统的参比条件下,水可能在分压 p_w 直至其饱和蒸气压 p_s 下存在于天然气中。对这部分水蒸气传统的做法是从干燥燃料气实际的计量体积中,按 p_w/p_2 的比例来排除一部分,即从测定的发热量中减去这部分。

$$\tilde{H}(\text{measured}) = \tilde{H}(\text{dry gas}) \times \frac{p_2 - p_w}{p_2} \dots\dots\dots (C1)$$

式中 \tilde{H} 是体积发热量(高位或低位)。

这是排除体积效应完全等效的一种作法(就计算而非测量来说),而其更为可取之处显然是因为发热量 H 可用摩尔、质量或体积发热量的形式来表示;并根据摩尔分数来进行计算。除水蒸气外,假设气体中各组分的摩尔分数由气体分析中已知(本标准的主要内容均以此假设为前提),若样品中水蒸气的分压可测得,则其摩尔分数可看作为 p_w/p_2 。为使整个混合物的摩尔分数的加和保持为 1,每个组分的摩尔分数则必须乘以一个因子 $(p_2 - p_w)/p_2$ 进行归一化处理。这样,由于所计算的发热量是各组分摩尔分

数的一次项的加和,如上述所看到的观点一样,将计算的发热量简单地减去水蒸气所占的那部分比例即可。(C3和C4中所指的二次效应除外)。

如下例所示,这个一次效应是相当重要的。假设我们希望通过干气组成分析来计算饱和气体发热量,也许是为了在由干气组成分析计算得到的发热量与由发热量仪测量得到的发热量之间进行一个有意义的比对。假设在15℃,101.325 kPa的燃烧和计量参比条件下,干气的体积发热量为38.00 MJ·m⁻³在15℃时,饱和蒸气压是1.705 kPa,则在此参考比条件下,被水饱和的天然气中水的摩尔分数是:

$$x_w = \frac{1.705}{101.325} = 0.01683 \quad \dots\dots\dots(C2)$$

因此,饱和气体的发热量(忽略附录E中E3和E4中所讨论的二次效应)比干气的发热量要小,其值为干气发热量的(1-0.01683=0.98317)倍,即:

$$\tilde{H}_s = 38.00 \times 0.98317 = 37.36 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \quad \dots\dots\dots(C3)$$

两个发热量间的差值达到了1.68%,其差值大小主要取决于水蒸气在天然气中存在量的多少。显而易见,考虑水蒸气对发热量的影响是非常重要的,无论水蒸气是通过测量或者分析技术获得的。对于一个含有水蒸气的气体,水蒸气作为已知组分并低于其饱和蒸气压时情况较为特殊和复杂。在这种情况下,干气发热量,和作为公认的饱和气体发热量都是可以计算的,其值各不相同但相互间却易于混淆。

C3 潜热(焓)效应

在C2中忽略了样品气中水蒸气存在的二次效应。由于烃在燃烧中所产生水的汽化潜热在这些烃的发热量测定中是一个重要的因素,所以,在2.1和2.2中明确地规定了所产生水的状态。

对于高位发热量,要求燃烧反应所产生的所有水在燃烧参比温度 t_1 下都要冷凝为液态。这种要求可能是不现实的,但它却为计算干天然气的高位发热量提供了一个理论基础。然而,如果燃烧前气体中有水蒸气存在,那么燃烧后就存在一个如何处理这部分水的状态的问题。

a) 假定,尽管是不现实的,燃烧后这部分水仍保持为气体状态,因此,它的存在对燃烧热没有任何影响;或者

b) 假定在燃烧参比温度 t_1 下,这部分水同样冷凝为液态,那么由于这部分水所释放出的汽化潜热,将增加燃烧热的值。

建议对高位发热量来说,最合理和一致的处理是假定所有的水,包括燃烧前气体中所包含的水和燃烧中所产生的水,在燃烧参比温度 t_1 下均冷凝为液态,因此,气体中含有的水蒸气作为天然气中的一个组分,以一个特定的摩尔分数来表示,并有一个由水的汽化潜热所获得的发热量。换句话说,也就是在发热量的加和中多了一项水的发热量 $x_j \cdot H_j$ 。这就是为什么在表3、表4和表5中给出的水蒸气的高位发热量不为零的原因。由这种处理所导致的发热量增量是很小的,假定气体被水蒸气所饱和,则发热量的增加值与气体组成无关,而仅取决于气体的计量温度。对于一个饱和的气体,其体积发热量的增量为:

- 在计量温度为0℃时,增量为0.01 MJ·m⁻³;
- 在计量温度为15℃时,增量为0.03 MJ·m⁻³;
- 在计量温度为20℃时,增量为0.045 MJ·m⁻³。

对于低位发热量来说,所有的水蒸气均保持为气态,不必考虑这类焓效应的存在。

C4 压缩因子效应

压缩因子效应是第三种效应,即使其对发热量的影响较前两种更小,但在发热量的计算中也应将其考虑在内。由于气体中水蒸气的存在影响了气体混合物的压缩因子,从而改变了真实气体的体积发热量,这种改变的量是可计算出的。在15℃时,对一个典型的天然气来说,由干气到饱和气体Z的变化约为万分之四(从0.9981变到0.9977)。

本标准的主要内容指的是对干气的处理,这种情况是推荐采用和愿意接受的情形。然而,当需要对

含有水蒸气的天然气进行计算时,在选定一个合适的计算方法时应将上述提到的各点都考虑在内。

附录 D

(提示的附录)

参比条件间近似的换算系数

将表 D1, D2 和 D3 中 a) 行给出的参比条件下的已知物性值, 分别乘以表中给出的换算系数, 就可相应地得到 b) 行中所给出的各参比条件下的具有相同单位的物性值。如果要进行相反的换算, 则除以各换算系数即可。对所有的有效组成来说, 理想气体性质的换算预期可准确到 ±0.01% 以内。对于真实气体的体积性质(压缩因子、密度、相对密度)来说, 预期的准确度为 ±0.02%, 而对真实气体的燃烧性质(发热量、沃泊指数)来说, 预期的准确度为 ±0.1%。

表 D1 发热量的换算系数

a)	燃烧温度, °C		
	25 换算到	25 换算到	15 换算到
b)	15	0	0
摩尔高位发热量	1.001 0	1.002 6	1.001 6
摩尔低位发热量	1.000 1	1.000 3	1.000 2
质量高位发热量	1.001 0	1.002 6	1.001 6
质量低位发热量	1.000 1	1.000 3	1.000 2

表 D2 密度、相对密度及压缩因子的换算系数

a)	计量温度, °C		
	20 换算到	20 换算到	15 换算到
b)	15	0	0
理想密度	1.017 4	1.073 2	1.054 9
理想相对密度	1.000 0	1.000 0	1.000 0
压缩因子	0.999 9	0.999 5	0.999 6
真实密度	1.017 5	1.073 8	1.055 3
真实相对密度	1.000 1	1.000 3	1.000 2

表 D3 发热量和沃泊指数的换算系数

a)	(燃烧温度+计量温度), °C									
	25+20 换算到	25+20 换算到	25+20 换算到	25+20 换算到	25+0 换算到	25+0 换算到	25+0 换算到	15+15 换算到	15+15 换算到	
b)	25+0	15+15	15+0	0+0	15+15	15+0	0+0	15+0	0+0	
理想体积高位发热量	1.073 2	1.018 4	1.074 3	1.076 0	0.948 9	1.00 10	1.002 6	1.054 9	1.056 6	
理想体积低位发热量	1.073 2	1.017 5	1.073 3	1.073 5	0.948 1	1.00 01	1.000 3	1.054 9	1.055 1	
理想沃泊指数	1.073 2	1.018 4	1.074 3	1.076 0	0.948 9	1.00 10	1.002 6	1.054 9	1.056 6	
真实体积高位发热量	1.073 8	1.018 5	1.074 9	1.076 6	0.948 6	1.00 10	1.002 6	1.055 3	1.057 0	
真实体积低位发热量	1.073 8	1.017 6	1.073 9	1.074 1	0.947 7	1.00 01	1.000 3	1.055 3	1.055 5	
真实沃泊指数	1.073 6	1.018 5	1.074 7	1.076 4	0.948 7	1.00 10	1.002 6	1.055 2	1.056 9	

附录 E
(提示的附录)
计算示例

对已给定组成的天然气,表 E1 以一个简单表格的方式给出了在“15℃/15℃”的参比条件下(ISO 标准参比条件),由基础物性参数计算摩尔质量,高位理想摩尔发热量及压缩因子的示例。就这些计算示例而言,对计算中涉及使用到的任何量的数值均已修约到五位有效数字,并用于随后的任何计算中。实际上,在计算器或计算机上计算时,计算应使用所有可能获得的位数,只是在计算的终点,才将最终计算数据修约到所要报告的位数。

注:本附录中给出的整个发热量的计算过程只是用于高位发热量的。

低位发热量的计算则完全与此类似。

E1 摩尔发热量(第 5 章)

由表 E1 可知,在 15℃ 时理想气体的摩尔高位发热量 \bar{H}_s^0 , 经修约后,其量值为 919.09 kJ·mol⁻¹。

由于从理想气体到真实气体状态的焓修正小至可忽略不计(见 5.2 注),因此,该值同时也被认为是真实气体的摩尔高位发热量 \tilde{H}_s^0 。

E2 质量发热量(第 6 章)

根据第 6 章,理想气体的质量高位发热量 \hat{H}_s^0 , 可按式(3)计算如下:

$$\hat{H}_s^0(t_1) = \frac{\bar{H}_s^0(t_1)}{M} \quad \dots\dots\dots (E1)$$

由表 E1 可得:

$\bar{H}_s^0(15^\circ\text{C})$ 为 919.09 kJ·mol⁻¹;

M 为 17.478 kg·kmol⁻¹。

因此:

$$\hat{H}_s^0(15^\circ\text{C}) = \frac{919.09}{17.478} = 52.586 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

报告数据取为 52.59 MJ·kg⁻¹。

作为可供选择的方法, \hat{H}_s^0 值也可按式(5)计算得到:

$$\hat{H}_s^0(t_1) = \sum_{j=1}^N (x_j \times \frac{M_j}{M}) (\hat{H}_{s,j}^0)_s(t_1) \quad \dots\dots\dots (E2)$$

由此式计算得到的发热量仍为 52.59 MJ·kg⁻¹。

E3 体积发热量(第 7 章)

根据 7.1,理想气体的体积高位发热量 \hat{H}_s^0 可按式(6)计算如下:

$$\hat{H}_s^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \bar{H}_s^0(t_1) \times \frac{p_2}{R \cdot T_2} \quad \dots\dots\dots (E3)$$

由表 E1 可得:

$\bar{H}_s^0(15^\circ\text{C})$ 为 919.09 KJ·mol⁻¹;

p_2 为 101.325 kPa;

T_2 为 288.15 K;

摩尔气体常数 R 的值为 $8.314\ 510\ \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

所以：

$$\begin{aligned} \tilde{H}_s^0[15^\circ\text{C}, V(15^\circ\text{C}, 101.325\ \text{kPa})] &= \frac{919.09 \times 101.325}{8.314\ 510 \times 288.15} \\ &= 38.870\ \text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}. \end{aligned}$$

报告数据取为 $38.87\ \text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

作为可供选择的方法, \tilde{H}_s^0 的值也可按式(7)计算得到：

$$\tilde{H}_s^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \tilde{H}_j^0[t_1, V(t_2, p_2)] \quad \dots\dots\dots (\text{E4})$$

由此式计算得到的发热量仍为 $38.87\ \text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

根据 7.2, 将理想气体体积发热量转换到真实气体体积发热量的计算如下：

$$\tilde{H}_s[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}_s^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)} \quad \dots\dots\dots (\text{E5})$$

式中的 Z_{mix} 是混合气体的压缩因子, 按式(1)计算：

$$Z_{\text{mix}} = 1 - \left[\sum_{j=1}^N x_j \cdot \sqrt{b_j} \right]^2 \quad \dots\dots\dots (\text{E6})$$

由表 E1 可知, 各组分的摩尔分数乘以求和因子的总和为 0.047 85; 所以,

$$Z_{\text{mix}}(15^\circ\text{C}, 101.325\ \text{kPa}) = 1 - (0.04785)^2 = 0.997\ 71$$

报告数据取为 0.997 7。

真实气体的体积高位发热量为：

$$\tilde{H}_s[15^\circ\text{C}, V(15^\circ\text{C}, 101.325\ \text{kPa})] = \frac{38.87}{0.997\ 71} = 38.959\ \text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

报告数据的为 $38.96\ \text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

E4 相对密度, 密度和沃泊指数(第 8 章)

E4.1 相对密度

根据 8.1.1, 理想气体的相对密度按式(9)计算如下：

$$d^0 = \sum_{j=1}^N x_j \times \frac{M_j}{M_{\text{air}}} \quad \dots\dots\dots (\text{E7})$$

使用表 E1 的数据及干空气 $28.962\ 6\ \text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ 的摩尔质量 M_{air} , 可得到：

$$d^0 = \frac{17.47}{28.962\ 6} = 0.603\ 47$$

报告数据取为 0.603 5。

根据 8.2.1, 真实气体的相对密度按式(12)计算如下：

$$d(t_2, p_2) = \frac{d^0 \cdot Z_{\text{air}}(t_2, p_2)}{Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)} \quad \dots\dots\dots (\text{E8})$$

式中：

$Z_{\text{air}}(15^\circ\text{C}, 101.325\ \text{kPa})$ 为 0.999 58(见表 2);

Z_{mix} 为 0.997 71(见本附录 E3)

所以：

$$d(15^\circ\text{C}, 101.325\ \text{kPa}) = \frac{0.603\ 47 \times 0.999\ 58}{0.997\ 71} = 0.604\ 60$$

报告数据取为 0.604 6。

E4.2 密度

根据 8.1.2,理想气体的密度按式(10)计算如下:

$$\rho^0(t_2, p_2) = \frac{p_2}{R \cdot T_2} \times \sum_{j=1}^N x_j \cdot M_j \quad \dots\dots\dots (E9)$$

所以:

$$\rho^0(15^\circ\text{C}, 101.325 \text{ kPa}) = \frac{17.478 \times 101.325}{8.314 510 \times 288.15} = 0.739 18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

报告数据取为 $0.739 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

根据 8.2.2,真实气体的密度按式(13)计算如下:

$$\rho(t_2, p_2) = \frac{\rho^0(t_2, p_2)}{Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)}$$

所以:

$$\rho(15^\circ\text{C}, 101.325 \text{ kPa}) = \frac{0.739 18}{0.997 71} = 0.740 88 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

报告数据取为 $0.740 9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

E4.3 沃泊指数

根据 8.1.3,理想气体的沃泊指数按式(11)计算如下:

$$W^0[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}_s^0[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d^0}} \quad \dots\dots\dots (E10)$$

所以:

$$W^0[15^\circ\text{C}, V(15^\circ\text{C}, 101.325 \text{ kPa})] = \frac{38.870}{\sqrt{0.603 47}} = 50.036 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

报告数据取为 $50.04 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

根据 8.2.3,真实气体的沃泊指数按式(14)计算如下:

$$W[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}_s[t_1, V(t_2, p_2)]}{\sqrt{d(t_2, p_2)}} \quad \dots\dots\dots (E11)$$

所以:

$$W[15^\circ\text{C}, V(15^\circ\text{C}, 101.325 \text{ kPa})] = \frac{38.959}{\sqrt{0.604 6}} = 50.104 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

报告数据应取为 $50.10 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

E5 精密度(第9章)

表 E2 以类似于表 E1 的格式,给出了对相同气体混合物重复性的计算示例。这里仅仅考虑了甲烷由分析得到的情况(而不是通过差减法得到的)。为了进行这些计算,需要知道并使用各个组分未归一的摩尔分数相应的重复性数据。表 E2 中的第 5 列给出这些数值。

E5.1 摩尔发热量的重复性

由表 E2,理想气体摩尔高位发热量 $919.09 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的重复性 $\Delta \bar{H}_{\text{mix}}^0$ 为 $\pm 0.11 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ [见式(17)]。

E5.2 质量发热量的重复性

将理想气体摩尔发热量的重复性除以气体的摩尔质量 $17.478 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$,即可得到理想气体质量发热量的重复性:

$$\Delta \hat{H}_{\text{mix}}^0 = \frac{0.11}{17.478} = 0.006 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

报告数据取为 $\pm 0.01 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

理想气体质量高位发热量 $52.59 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的重复性为 $\pm 0.01 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

E5.3 体积发热量的重复性

将理想气体摩尔发热量的重复性乘以 p_2/RT_2 , 即可得到理想气体体积发热量的重复性:

$$\Delta \tilde{H}_{\text{mix}}^0 = \frac{0.11 \times 101.325}{8.314 510 \times 288.15} = 0.005 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

报告数据取为 $\pm 0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

理想气体体积高位发热量 $38.87 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 的重复性为 $\pm 0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

E5.4 相对密度、密度和沃泊指数的重复性

E5.4.1 相对密度

相对密度(理想气体或真实气体)的重复性按式(18)计算如下:

$$\Delta d = \frac{\Delta M}{M_{\text{air}}}$$

式中: ΔM 数据取自表 E2, 见式(21), 其值为 $\pm 0.003 1 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$;

M_{air} 为 $28.962 6 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ 。

所以:

$$\Delta d = \frac{0.003 1}{28.962 6} = 0.000 11$$

报告数据取为 $\pm 0.000 1$ 。

理想相对密度 $0.603 5$ 和真实相对密度 $0.604 6$ 的重复性均为 $\pm 0.000 1$ 。

E5.4.2 密度

密度(理想气体或真实气体)的重复性用计算如下:

$$\Delta \rho = \frac{\Delta M \cdot p}{R \cdot T} = \frac{0.003 1 \times 101.325}{8.314 510 \times 288.15} = 0.000 13$$

报告数据取为 $\pm 0.000 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

理想密度值 $0.739 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和真实密度值 $0.740 9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的重复性均为 $\pm 0.000 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

E5.4.3 沃泊指数

理想沃泊指数的重复性按式(22)计算如下:

$$\begin{aligned} \Delta W^0 &= W^0 \left[\left(\frac{\Delta \tilde{H}^0}{\tilde{H}^0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d^0}{2d^0} \right)^2 \right]^{0.5} \\ &= 50.04 \left[\left(\frac{0.01}{38.87} \right)^2 + \left(\frac{0.000 1}{2 \times 0.603 5} \right)^2 \right]^{0.5} = 0.013 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

报告数据取为 $\pm 0.0 1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

理想沃泊指数 $50.04 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 的重复性为 $\pm 0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

表 E1 物性计算示例

组分	摩尔质量 M_j $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	高位发热量 (\bar{H}_j^0) , (15°C) $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	求和因子 $\sqrt{b_j}$ (15°C, 101.325 kPa)	摩尔分数 x_j	摩尔分数 × 摩尔质量 $x_j M_j$ $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$	摩尔分数 × 发热量 $x_j \cdot (\bar{H}_j^0)$, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	摩尔分数 × 求和因子 $x_j \sqrt{b_j}$
甲烷	16.043	891.56	0.044 7	0.924 7	14.835 0	824.43	0.041 33
乙烷	30.070	156 2.14	0.092 2	0.035 0	1.052 5	54.67	0.003 23
丙烷	44.097	222 1.10	0.133 8	0.009 8	0.432 2	21.77	0.001 31
丁烷	58.123	287 9.76	0.187 1	0.002 2	0.127 9	6.34	0.000 41
2-甲基丙烷	58.123	287 0.58	0.178 9	0.003 4	0.197 6	9.76	0.000 61
正戊烷	72.150	353 8.60	0.251 0	0.000 6	0.043 3	2.12	0.000 15
氮气	28.013 5	0	0.017 3	0.017 5	0.490 2	0	0.000 30
二氧化碳	44.010	0	0.074 8	0.006 8	0.299 3	0	0.000 51
总和				1.000 0	17.478	919.09	0.047 85

表 E2 精密度计算示例

组分	摩尔质量 M_j $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$	高位发热量 (\bar{H}_j^0) , (15°C) $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	摩尔分数 x_j	摩尔分数的 重复性 Δx_j^*	$\{\Delta x_j^* \cdot [(\bar{H}_j^0)_j - (\bar{H}_j^0)_{\text{mix}}]\}^2$	$[\Delta x_j^* (M_j - M)]^2$
甲烷	16.043	891.56	0.924 7	0.001 532	0.001 779	0.000 004 83
乙烷	30.070	156 2.14	0.035 0	0.000 086	0.003 058	0.000 001 17
丙烷	44.097	222 1.10	0.009 8	0.000 032	0.001 736	0.000 000 73
丁烷	58.123	287 9.76	0.002 2	0.000 010	0.000 384	0.000 000 17
2-甲基丙烷	58.123	287 0.58	0.003 4	0.000 006	0.000 137	0.000 000 06
正戊烷	72.150	353 8.60	0.000 6	0.000 004	0.000 110	0.000 000 05
氮气	28.013 5	0	0.017 5	0.000 064	0.003 460	0.000 000 45
二氧化碳	44.010	0	0.006 8	0.000 052	0.002 284	0.000 001 90
总和			1.000 0		0.012 948	0.000 009 36
总和的平方根					0.113 8	0.003 06