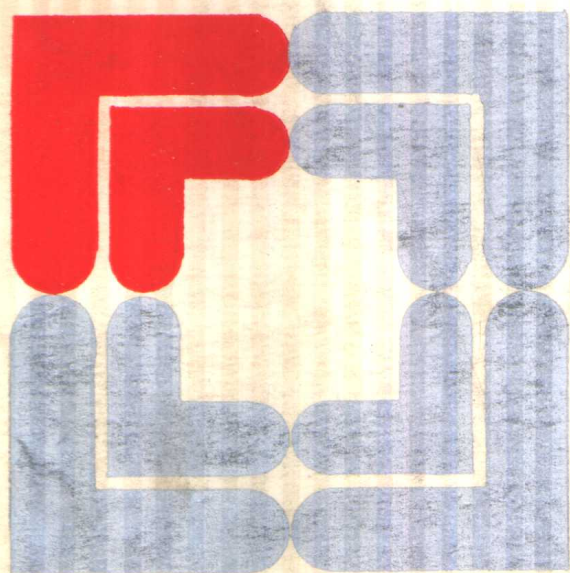


煤气 燃烧 装置

(设计参考手册)



● [苏] П.Б. 马伊西斯 著
Д.Я. 维格多罗契克
● 唐曾乐 译

天津科学技术出版社

煤 气 燃 烧 装 置

(参 考 手 册)

[苏] П. Б. 马 伊 西 斯 著
Д. Я. 维 格 多 罗 契 克
唐 曾 乐 译

江苏工业学院图书馆
藏书章

天 津 科 学 技 术 出 版 社

责任编辑: 吴孝钧

煤气燃烧装置

(参 考 手 册)

(苏) П.Б.马伊西斯 著
Д.Я.维格多罗契克

唐 曾 乐 译

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道130号

天津市武清县永兴印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本787×1092毫米 1/16 印张12.75 字数305000

1990年2月第1版

1990年2月第1次印刷

印数: 1—1850

ISBN 7-5308-0454-5/TK·2 定价: 7.30元

译者的话

煤气设施是城市现代化的主要标志,也是改变燃料结构的重要基础。国务院已明确指出要积极发展城市煤气,有条件的大中城市均要实现煤气化,在七五计划期间城市民用气化率要达到40%。可以想象将有为数不少的民用和工业福利用户将可使用上又干净又方便的城市煤气,这当然需要通过各类燃烧装置来实现。正确选择燃烧装置对保证燃气合理、安全和节约能源有着重要的作用。为此,要正确的设计计算燃烧装置,但这种计算目前尚不完善。要想得到混合—燃烧—放热的最佳效果,往往还得依赖于经验数据,使经过计算而制造出的燃烧装置在实践中经受考验,不断加以完善。

本书虽系1964年出版,但至今仍有参考价值,因本书系属设计和使用的手册型工具书,其内容除了各类燃烧装置的计算外,还收集了许多在实践中使用的燃烧装置,并列出了它们的几何尺寸、结构型式及燃烧特性参数。它特别适用于科研、设计和使用部门参考,这对当前大力发展城市煤气可起到积极的指导作用。

本书在“文革”初的翻译过程中,曾请李猷嘉同志翻译了第五章第八节,还请徐谋海和金志刚同志校对,在此一并表示感谢。

考虑到本书翻译较早,事隔多年,译者最近又全文进行了一次校对和修正,最后经天津市煤气公司和天津市科学技术出版社的共同努力,促成本书的出版,在此表示衷心谢意。

由于水平所限,缺点和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

1988年5月

1987/10/2

原 序

当前我国已研究出大量不同结构、不同热负荷的煤气燃烧装置。

如果在同一设备内采用不同型式的煤气燃烧装置，将会给设计工作和实际操作带来困难。

除此以外，由于在同一设备内采用了不同型式的煤气燃烧装置还会产生煤气不完全燃烧。所以，为了提高效率和简化燃烧装置的结构型式，就有必要进行气体燃料燃烧的总结和燃烧器的规格化工作。

燃烧器的规格化工作仅在部分公共福利事业和工业部门中开展。同时，本书列出了它们的技术参数和一些试制样品，以供参考。

本书还介绍了一些莫斯科煤气设计院、国立列宁格勒工业设计院、国立乌克兰城市工业设计院、国立煤气科学研究所、国立黑色冶金铸铁与钢轨设备设计院、热工设计院、国立有色金属工业设计院、苏联乌克兰煤气设计院、古比雪夫工业设计院、吉耳工厂等设计院和研究所的试验研究成果。

内 容 提 要

本书译自苏联建筑书籍出版社 (ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ) 1964 年出版的马伊西斯 (П. Б. МАЙЗЕЛЬС) 和维格多罗契克 (Д. Я. ВИГДОРЧИК) 合著的《煤气燃烧装置 (参考手册)》(ГАЗОГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА (СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ))。书中给出了各类燃烧装置的计算, 收集了许多实际使用的燃烧装置, 列出了它们的几何尺寸、结构型式及燃烧特性参数。

本书是一本实用的手册或工具书, 可供有关的科研、设计和使用部门的技术人员参考。

目 录

第一章 可燃气体的物理化学性质	(1)
第二章 煤气燃烧装置的选择和对它的技术要求	(15)
第三章 煤气燃烧器的分类及其各部件的用途	(19)
第一节 燃烧器各部件	(19)
第二节 燃烧器元件的用途	(19)
第四章 煤气燃烧器的计算	(21)
第一节 低压燃烧器的计算	(21)
第二节 火道式中压燃烧器的计算	(32)
第三节 带有片式稳焰器的中压燃烧器的计算	(41)
第四节 火焰稳定器	(43)
第五节 预热煤气和空气的中压引射式燃烧器的计算	(45)
第六节 双管中压引射式燃烧器的计算	(46)
第七节 炉床式燃烧器的计算	(48)
第八节 强制送风双管燃烧器的计算	(52)
第五章 各类煤气燃烧装置	(56)
第一节 燃烧各类燃气的换算方法	(56)
第二节 扩散式燃烧器	(59)
第三节 引射式燃烧器	(62)
第四节 低压引射式燃烧器	(64)
第五节 中压引射式燃烧器	(100)
第六节 炉床式燃烧器	(126)
第七节 双管强制鼓风燃烧器	(133)
第八节 组合式燃烧器	(175)
参考文献	(194)

第一章 可燃气体的物理化学性质

为了了解可燃气体的物理化学性质和燃烧特性,首先就必须了解单一气体和蒸汽的性质。

重度 在 0°C 及 760 毫米汞柱时混合气体的重度可按式确定:

$$\gamma_{c.m.0} = \frac{\gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2 + \dots + \gamma_n V_n}{100} \text{ 公斤/米}^3, \quad (1)$$

式中 γ_1, γ_2 ——单一气体的重度,公斤/米³(表 6);

V_1, V_2 ——各单一气体在混合气体中的体积浓度, %。

不同温度和压力下混合气体的重度按下式确定:

$$\gamma_{c.m.t,p} = \frac{273(760+p)}{(273+t)760} \gamma_{c.m.0} \text{ 公斤/米}^3, \quad (2)$$

式中 t ——燃气温度, $^{\circ}\text{C}$;

p ——燃气压力,毫米汞柱。

标准状况下的比重确定:

$$d_{c.m.} = \frac{\gamma_{c.m.0}}{1.293}, \quad (3)$$

式中 1.293—— 0°C 及 760 毫米汞柱时的空气重度,公斤/米³。

【例题】 在 0°C 及 760 毫米汞柱时确定出下列组分的混合气体重度。

$\text{CH}_4 = 97.24\%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 0.6\%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 0.17\%$;

$\text{C}_4\text{H}_{10} = 0.18\%$; $\text{CO}_2 = 0.1\%$; $\text{N}_2 = 1.71\%$ 。

$$\begin{aligned} \gamma_{c.m.} &= (0.717 \times 97.24 + 1.357 \times 0.6 + 2.604 \times 0.17 + \\ &\quad + 2.703 \times 0.18 + 1.977 \times 0.1 + 1.251 \times 1.76) \times \frac{1}{100} \\ &\approx 0.74 \text{ 公斤/米}^3. \end{aligned}$$

当温度为 20°C 和压力为 760 毫米汞柱时,相应的重度为:

$$\gamma_{c.m.t,p} = 0.74 \frac{273}{273+20} = 0.69 \text{ 公斤/米}^3.$$

对空气的比重为:

$$d_{c.m.0} = \frac{0.74}{1.293} \approx 0.57.$$

分子量 混合气体的分子量按下式确定:

$$M_{c.m.} = 22.4 \times \gamma_{c.m.0} \quad (4)$$

【例题】 确定前述组分混合气体分子量:

$$M_{c.m.} = 22.4 \times 0.74 \approx 16.5.$$

气体常数 按下式确定:

$$R_{c.m.} = \frac{848}{M_{c.m.}}, \quad (5)$$

式中 848——摩尔气体常数。

将式中的 $M_{c,n}$ 替换一下,可得到:

$$R_{c,n} = \frac{848}{22.4 \times \gamma_{c,n}} = \frac{37.86}{\gamma_{c,n}} \quad (6)$$

【例题】 确定出前述混合气体的气体常数。

$$R_{c,n} = \frac{37.86}{0.74} \approx 51.3。$$

粘度 不论液体或气体的粘度都分为动力粘度和运动粘度。含炔量较多的混合气体是不符合简单的气体混合法则的。一般按经验公式确定出气体粘度已有足够的精确性了。

温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的混合气体的动力粘度近似地可按式确定:

$$\mu_{c,n_0} = \frac{g_1 \sqrt{M_1 T_{\kappa_1}} \mu_1 + g_2 \sqrt{M_2 T_{\kappa_2}} \mu_2 + \dots + g_n \sqrt{M_n T_{\kappa_n}} \mu_n}{g_1 \sqrt{M_1 T_{\kappa_1}} + g_2 \sqrt{M_2 T_{\kappa_2}} + \dots + g_n \sqrt{M_n T_{\kappa_n}}} \quad (7)$$

式中 g_1, g_2 ——单一气体的体积浓度;

M_1, M_2 ——单一气体的分子量(表 6);

$T_{\kappa_1}, T_{\kappa_2}$ ——单一气体的临界温度, K(表 6);

μ_1, μ_2 ——单一气体的动力粘度, 公斤·秒/米²(表 6)。

混合气体的运动粘度按下式确定:

$$\frac{1}{\nu_{c,n_0}} = \frac{g_1}{\nu_1} + \frac{g_2}{\nu_2} + \dots + \frac{g_n}{\nu_n} \quad (8)$$

式中 ν_1, ν_2 ——单一气体的运动粘度。

含有氧、氢、氮、二氧化碳、甲烷和碳氢化合物的混合气体的运动粘度, 可按苏联部长会议计量仪器标准化委员会编制的规范 27~54 公式确定:

$$\nu_{20} = \frac{15.4 \times 10^{-4}}{100(\text{CO}_2 + \text{C}_m \text{H}_n) - 0.857 \text{H}_2} \text{米}^2/\text{秒} \quad (9)$$

式中 ν_{20} ——20 $^{\circ}\text{C}$ 及 760 毫米汞柱时的混合气体粘度;

$\text{CO}_2 + \text{C}_m \text{H}_n$ ——二氧化碳和重碳氢化合物(甲烷除外)的总体积含量%;

H_2 ——混合气体内氢的体积含量%。

当温度在 -10~40 $^{\circ}\text{C}$ 时的运动粘度:

$$\nu_t = \nu_{20} [1 + 0.006(t - 20)] \quad (10)$$

粘度与温度的关系:

$$\mu_t = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (11)$$

$$\nu_t = \nu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{5/2} \quad (12)$$

式中 T ——绝对温度, K;

C ——无因次实验系数。

当温度在 -10~10 $^{\circ}\text{C}$ 范围时的气体粘度可按式确定:

$$\mu_t = \mu_{c,n_0} (1 + \beta t) \quad (13)$$

$$\nu_t = \nu_{c,n_0} (1 + \theta t) \quad (14)$$

β, θ 和 C 值列于表 1 内。

各种气体的 β, θ 和 C 值

表 1

气体名称	常数 C	$\beta \cdot 10^5 1/^\circ\text{C}$	$\theta \cdot 10^5 1/^\circ\text{C}$	气体名称	常数 C	$\beta \cdot 10^5 1/^\circ\text{C}$	$\theta \cdot 10^5 1/^\circ\text{C}$
氮	104	282	679	二氧化碳	273	359	765
乙 炔	215	—	—	氧	125	295	693
苯	448	447	862	甲 烷	164	318	719
丁 烷	358	—	—	一氧化碳	100	277	673
异 丁 烷	330	—	—	丙 烷	278	—	—
丁 烯	322	—	—	丙 烯	362	—	—
氢	71.7	260	655	硫化氢	331	—	—
水 蒸 汽	673	—	—	乙 烷	252	—	—
空 气	116	285	682	乙 烯	225	356	761
二氧化硫	306	—	—				

【例题】 确定前述混合气体的动力粘度。

$$\mu_{c.m.} = \frac{0.9724 \sqrt{16.042 \times 190.5 \times 11.02 \times 10^7 + 0.006 \sqrt{30.062 \times 305.3 \times 9.38 \times 10^7 + 0.0017 \sqrt{44.094 \times 369.81 \times 8.15 \times 10^7 + 0.0018 \sqrt{58.12 \times 425 \times 0.0017 \sqrt{44.094 \times 369.81 \times 0.0018 \sqrt{58 \times 12 \times 425 + 7.54 \times 10^7 + 0.001 \sqrt{44.01 \times 304.1 \times 14.98 \times 10^7 + 0.0171 \times \sqrt{28.016 \times 125.9 + 17.05 \times 10^7} + 0.001 \sqrt{44.01 \times 304.1 + 0.0171 \sqrt{28.016 \times 125.9}}}}}}}}}} = 1.109 \times 10^7 \text{ 公斤} \cdot \text{秒} / \text{米}^2.$$

【例题】 确定混合气体的运动粘度。

$$\nu_{c.m.} = \frac{15.4 \times 10^{-4}}{100 + (0.1 + 0.95)} = 15.23 \times 10^{-6} \text{ 米}^2 / \text{秒}.$$

气体温度 可燃气体内总含有一定量的水蒸气，单位体积或单位重量的气体内含有水蒸气的重量称为绝对湿度或湿度，一般以克水蒸气/米³ 气体或克水蒸气/公斤气体表示。

相对湿度或气体为水蒸气所饱和的饱和度，是在所给定条件下气体实际上所含的水蒸气量与最大可能含量之比，或气体在该状态下的绝对湿度与被水蒸气所饱和时的绝对湿度之比。

相对湿度亦可作为气体中水蒸气的分压 p' 与同一条件下饱和水蒸气压力 p_s 之比而求出：

$$\varphi = \frac{p'}{p_s},$$

式中 p' 和 p_s ——压力，毫米汞柱。

假如气体中的水蒸气分压等于在该温度条件下的饱和水蒸气压力，则气体可认为被水蒸气所饱和，也就是饱和度 $\varphi = 1$ 。

在一定温度下的饱和蒸汽压与气体体积无关，因为体积缩小时，部分蒸汽就转变为液态了。

水蒸气在不同温度下的饱和蒸汽压力和含湿量列于表 2 内。

湿气体应认为是符合理想气体定律的，当压力变化时，含湿量的计算按下式确定：

$$w = \frac{R_s}{R_a} \times \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s}, \quad (15)$$

不同温度下的饱和蒸汽压和含湿量

表 2

温度 °C	饱和蒸汽压 毫米汞柱	水蒸气含量 克/米 ³	温度 °C	饱和蒸汽压 毫米汞柱	水蒸气含量 克/米 ³	温度 °C	饱和蒸汽压 毫米汞柱	水蒸气含量 克/米 ³
-30	0.286	0.33	-2	3.880	4.13	26	25.209	24.4
-29	0.317	0.37	-1	4.217	4.47	27	26.729	25.8
-28	0.351	0.41	0	4.579	4.84	28	28.349	27.2
-27	0.389	0.46	1	4.926	5.22	29	30.043	28.7
-26	0.430	0.51	2	5.294	5.60	30	31.824	30.3
-25	0.476	0.55	3	5.685	5.98	31	33.695	32.1
-24	0.526	0.60	4	6.101	6.40	32	35.663	33.9
-23	0.580	0.66	5	6.543	6.84	33	37.729	35.7
-22	0.640	0.73	6	7.013	7.3	34	39.898	37.6
-21	0.705	0.80	7	7.513	7.8	35	42.175	39.6
-20	0.776	0.88	8	8.045	8.3	36	44.563	41.8
-19	0.854	0.96	9	8.609	8.8	37	47.067	44.0
-18	0.939	1.05	10	9.209	9.4	38	49.692	46.3
-17	1.031	1.15	11	9.844	10.0	39	52.442	48.7
-16	1.132	1.27	12	10.518	10.7	40	55.324	51.2
-15	1.241	1.38	13	11.231	11.4	45	71.88	65.4
-14	1.361	1.51	14	11.987	12.1	50	92.51	83.0
-13	1.490	1.65	15	12.788	12.8	55	118.04	104.3
-12	1.632	1.80	16	13.634	13.6	60	149.38	130
-11	1.785	1.96	17	14.530	14.5	65	187.54	161
-10	1.950	2.14	18	15.477	15.4	70	233.70	198
-9	2.131	2.33	19	16.477	16.3	75	289.10	242
-8	2.326	2.54	20	17.535	17.3	80	355.10	293
-7	2.537	2.76	21	18.650	18.3	85	433.60	354
-6	2.765	2.99	22	19.827	19.4	90	525.76	424
-5	3.013	3.24	23	21.068	20.6	95	633.90	505
-4	3.280	3.51	24	22.377	21.8	100	760.00	598
-3	3.568	3.81	25	23.756	23.0	—	—	—

式中 R_s 和 R_n ——干气体和水蒸气的比气体常数, 大气压·米³/公斤·度①;

φ ——气体相对湿度;

p_s ——饱和蒸汽压, 毫米汞柱;

p ——湿气体的总压力, 毫米汞柱;

w ——1 公斤干气体内含有的水分量, 公斤。

当压力 p 高于蒸汽分压力 p' 时:

$$w = \frac{R_s}{R_n} \cdot \frac{p_s}{p} \varphi. \tag{16}$$

当给定了在压力 p_1 条件下的饱和气体水含量, 那末将它等温压缩到压力 p_2 时, 其水含量减小为 w_{p_2} :

$$w_{p_2} = w_{p_1} \frac{p_1}{p_2}. \tag{17}$$

按下式可将湿气体的体积换算为标准状态下干气体的体积:

译注: ① 原书为公斤·米/公斤 °K。

$$V_c = V_{sA} \frac{273.15}{273.15 + t} \cdot \frac{p - p'}{760}, \quad (18)$$

式中 V_c ——0℃和 760 毫米汞柱时的干气体体积, 米³;
 V_{sA} ——0℃和 760 毫米汞柱时的湿气体体积, 米³;
 p' ——水蒸气分压, 毫米汞柱。

必须注意, 表 2 所列关于含水量的数据, 只有在大气压条件下才正确, 并且没有考虑到气体组成。如果计算符合理想气体定律的湿气内的水含量时, 则饱和的压缩可燃气体中水蒸气的含量大于计算所得的数字。可燃气体的真实含水量与按表格所确定含水量的偏差, 随压力的升高, 温度降低以及气体分子量的增加而加大。

考虑到实验资料的缺乏和计算高压下烃类气体真实含水量的复杂性, 故在实际工程计算中往往利用已发表的属于个别已研究过的气体实际数据, 或利用图 1 所示的天然气绝对含水量线性图。

应该注意, 图 1 系用于一般成分天然气。

【例题】确定 0℃ 及 760 毫米汞柱下的干气体容积。

给定条件为相对湿度 $\varphi = 0.3$, 容积为 400 米³, 表压 3 公斤/厘米² 和温度为 25℃。

由表 2 可知 25℃ 时的饱和蒸汽压力 $p_s = 23.756$ 毫米汞柱, 因之它在气体中的分压 $p' = 0.3 \times 23.756 = 7.1268$ 毫米汞柱。

$p = 4 \times 735.56 = 2942.24$ 毫米汞柱;

$$V_c = 400 \times \frac{273.15}{273.15 + 25} \times \frac{2942.24 - 7.1268}{760} \approx 1418 \text{ 米}^3.$$

【例题】确定在 $\varphi = 1$, $t = 20^\circ\text{C}$ 和 $p = 5$ 绝对大气压条件下天然气的水含量。

由图 1 可知, 1000 米³ 气体中的水含量为 4 公斤。但根据表 2 可知, 当在 20℃ 及大气压条件下, 每 1000 米³ 的气体应含 17.3 公斤的水分, 按此推算可知, 当在 5 个大气压下, 每 1000 米³ 的气体水含量减少 5 倍, 即应含 3.46 公斤。但实际却含 4 公斤水分, 多了 13.5% 的水分。

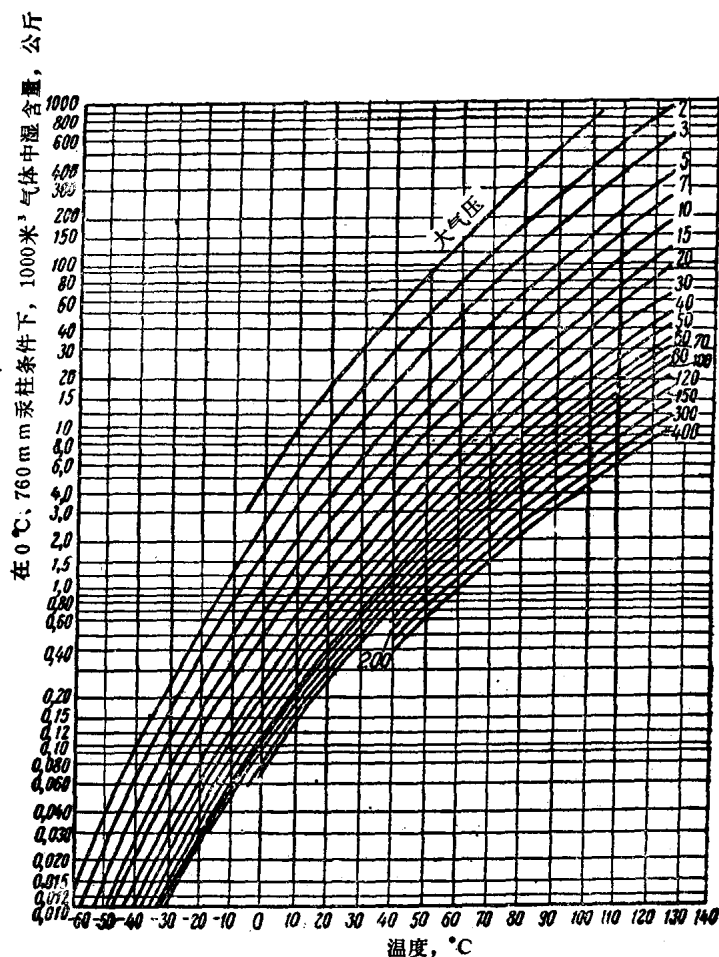


图 1 天然气的含水量

气体导热系数 按下式确定:

$$\lambda_{c,m} = \frac{\lambda_1 V_1 + \lambda_2 V_2 + \dots + \lambda_n V_n}{100} \text{大卡/米} \cdot \text{时} \cdot \text{度}, \quad (19)$$

式中 λ_1, λ_2 ——各单一气体的导热系数, 大卡/米·时·度(表6);

V_1, V_2 ——各单一气体的容积%。

【例题】 确定前述气体混合物的导热系数。

$$\lambda_{c,m} = \frac{0.026 \times 97.24 + 0.016 \times 0.6 + 0.013 \times 0.17}{100} \\ + \frac{0.012 \times 0.18 + 0.012 \times 0.1 + 0.0214 \times 1.71}{100}$$

≈ 0.0258 大卡/米·时·度。

燃烧热 干气体的低燃烧热可由下式计算:

$$Q_{H_0, 760}^p = 135.9C_2H_2 + 344.0C_6H_6 + 283.38C_4H_{10} + 271.11C_4H_8 + \\ + 25.69H_2 + 391.8C_6H_{14} + 295.6C_4H_{10} + 85.55CH_4 + 30.18CO + \\ + 349.5C_3H_{12} + 217.95C_3H_8 + 205.41C_3H_6 + 56.10H_2S + \\ + 152.26C_2H_6 + 141.07C_2H_4 \text{大卡/米}^3 \quad (20)$$

式中 $C_2H_2, C_6H_6 \dots$ 等——单一气体体积浓度。

当压力为 p 毫米水银柱, 温度为 $t^\circ C$ 和相对湿度为 φ 时, 湿气体的低燃烧热按下式确定:

$$Q_{H, p}^{p_{0, \varphi}} = Q_{H_0, 760}^p \frac{p T_0}{760 T} \left[1 - \frac{\varphi p_c}{p} \left(1 + \frac{18.600}{22.4 Q_{H_0, 760}^p} \right) \right] \text{大卡/米}^3, \quad (21)$$

式中 p_c ——水蒸气的饱和压力, 毫米汞柱;

$T_0 = 273^\circ C; T = 273 + t^\circ$ 。

【例题】 求得前述气体的低燃烧热。

$$Q_H^p = 283.38 \times 0.18 + 85.55 \times 97.24 + 217.95 \times 0.172 + 152.26 \times 0.6 \approx 8500 \text{大卡/米}^3。$$

理论空气量, 燃烧所需空气量 可按氧气的需求量计算所得:

$$L_T = \frac{1}{21} (2.5C_2H_2 + 7.5C_6H_6 + 6.5C_4H_{10} + 6.0C_4H_8 + 0.5H_2 + 9.51C_6H_{14} + \\ + 11.03C_7H_{16} + 2.0CH_4 + 0.5CO + 12.51C_3H_{18} + 8.0C_5H_{12} + 5.0C_3H_8 + \\ + 4.5C_3H_6 + 1.63H_2S + 3.5C_2H_6 + 3.0C_2H_4 - O_2) \text{米}^3/\text{米}^3, \quad (22)$$

式中 $C_2H_2, C_6H_6 \dots$ 等——单一气体体积浓度%。

当给定了燃烧热后, 也可按下述经验公式求得理论空气量:

a) 当燃烧热小于 2500 大卡/米³:

$$L_T = \frac{0.875}{1000} Q_H^p \text{米}^3/\text{米}^3; \quad (23)$$

b) 当燃烧热大于 2500 大卡/米³:

$$L_T = \frac{1.09}{1000} Q_H^p - 0.25 \text{米}^3/\text{米}^3. \quad (24)$$

实际空气耗量按下式求得:

$$L_0 = \alpha L_T \text{米}^3/\text{米}^3, \quad (25)$$

式中 α ——过剩空气系数。

系数 α 取决于气体的混合状况, 一般工业燃具 α 取 1.05~1.20, 它系一般民用生活燃具

的 1.5~2.0 倍。

由此可知,除了一些要求燃烧过程在还原介质内进行的以外,一般的燃烧条件,为了达到完全燃烧目的,都要求空气过剩系数大一些。

【例题】求得前述气体的燃烧所需理论空气量。

$$L_T = \frac{1}{21}(6.5 \times 0.18 + 2.0 \times 97.24 + 5.0 \times 0.17 + 3.5 \times 0.6) \approx 9.457 \text{ 米}^3/\text{米}^3。$$

【例题】求得前述气体的燃烧所需理论空气量,气体燃烧热 $Q_H = 8500$ 大卡/米³。

$$L_T = \frac{1.09}{1000} 8500 - 0.25 = 9.015 \text{ 米}^3/\text{米}^3。 \quad (25)$$

由上述例题所得结果可看出两种理论空气量的计算误差仅为 $\pm 5\%$, 因之, 采用经验公式是可行的。

燃烧产物体积 混合气体的燃烧产物体积与气体组份有关, 可按下列式求得。

三原子气体体积:

$$V_{RO_2} = 0.01(CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_4 + mC_mH_n) \text{ 米}^3/\text{米}^3, \quad (26)$$

式中 $CO_2, CO \dots$ 等——单一气体体积浓度 %。

水蒸气体积:

$$V_{H_2O} = 0.01 \left[(H_2 + 2CH_4 + 2C_2H_4 + \frac{n}{2}C_mH_n + 0.214(d_2 + L_T d_s)) \right] \text{ 米}^3/\text{米}^3, \quad (27)$$

式中 d_2 和 d_s ——1 米³ 燃气和空气中的湿含量克/米³。

双原子气体体积:

$$V_{R_2} = 0.79L_T + 0.01N_2 \text{ 米}^3/\text{米}^3。 \quad (28)$$

当空气过剩系数 $\alpha = 1$ 时, 总燃烧产物的体积:

$$V = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{R_2} \text{ 米}^3/\text{米}^3。 \quad (29)$$

当空气过剩时, 因含有多余的氮气和氧气, 而使燃烧产物的体积有所增加:

$$V'_{R_2} = 0.79\alpha L_T + 0.01N_2 \text{ 米}^3/\text{米}^3; \quad (30)$$

$$V'_{O_2} = 0.21(\alpha - 1)L_T \text{ 米}^3/\text{米}^3。 \quad (31)$$

【例题】求得前述气体在 $\alpha = 1$ 时的燃烧产物体积(按干气体进行计算)。

三原子气体体积为:

$$V_{RO_2} = 0.01(0.1 + 97.24 + 2 \times 0.6 + 3 \times 0.17 + 4 \times 0.18) = 0.9977 \text{ 米}^3/\text{米}^3。$$

水蒸气体积:

$$V_{H_2O} = 0.01(2 \times 97.24 + 3 \times 0.6 + 4 \times 0.17 + 5 \times 0.18) = 1.9786 \text{ 米}^3/\text{米}^3。$$

双原子气体体积:

$$V_{R_2} = 0.79 \times 9.015 + 0.01 \times 1.71 = 7.139 \text{ 米}^3/\text{米}^3。$$

总燃烧产物体积:

$$V = 0.9977 + 1.9786 + 7.139 = 10.115 \text{ 米}^3/\text{米}^3。$$

当 $\alpha = 1.2$ 时的燃烧产物体积为:

$$V'_{R_2} = 0.79 \times 1.2 \times 9.015 + 0.01 \times 1.71 = 8.5633 \text{ 米}^3/\text{米}^3;$$

$$V'_{O_2} = 0.21(1.2 - 1)9.015 = 0.3786 \text{ 米}^3/\text{米}^3;$$

$$V' = 0.9977 + 1.9786 + 8.5633 + 0.3786 = 11.918 \text{ 米}^3/\text{米}^3。$$

图 2 表示了理论空气量和燃烧产物与系数 α 间的关系。燃气组成为: $CH_4 = 97.24\%$; C_2H_6

$=0.60\%$; $C_3H_8=0.17\%$; $C_4H_{10}=0.18\%$; $CO_2=0.10\%$;
 $N_2=1.71\%$ 。

燃烧产物重度 在 $0^\circ C$ 和 760 毫米汞柱条件下的燃烧产物重度计算按下式确定:

$$\gamma_{np.czo} = \frac{\gamma_{cm} + 1.293\alpha L_T + 0.001(d_2 + L_T d_s)}{V} \quad (32)$$

公斤/米³,

式中 γ_{cm} ——燃气重度, 公斤/米³;

α ——过剩空气系数;

L_T ——理论空气量, 米³/米³;

d_2, d_s ——1 米³ 的干燃气、干空气中的湿度;

V ——燃烧产物总容积, 米³/米³。

【例题】求得前述气体在 $0^\circ C$ 和 760 毫米汞柱条件下的燃烧产物重度, $\alpha=1.2$ (按干燃气和空气进行计算):

$$\gamma_{np.czo} = \frac{0.74 + 1.293 \times 1.2 \times 9.015}{11.918} \approx 1.235 \text{ 公斤/米}^3。$$

比热 按下式求得:

$$C_{cm} = \frac{V_1 C_1 + V_2 C_2 + \dots + V_n C_n}{100} \text{ 大卡/米}^3 \cdot \text{度}, \quad (33)$$

式中 $V_1, V_2 \dots V_n$ ——单一气体在混合气体中的体积浓度;

$C_1, C_2 \dots C_n$ ——单一气体的比热大卡/米³·度 (表 3)。

【例题】求得前述混合气体的比热。

$$C_{cm} = (97.24 \times 0.374 + 0.6 \times 0.525 + 0.733 \times 0.17 + 0.18 \times 1.005 + 0.1 \times 0.3805 + 1.71 \times 0.3088) \times \frac{1}{100} \\ \approx 0.376 \text{ 大卡/米}^3 \cdot \text{度}。$$

燃烧温度 可通过在绝热条件下, 空气系数 $\alpha=1.0$ 及燃气和空气温度 $t=0$ 时, 燃气完全燃烧产物的温度而得, 按下式计算:

$$t_{oc} = \frac{Q_H^p}{V_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + V_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + V_{N_2} \cdot C_{N_2}}, \quad (34)$$

式中 Q_H^p ——低燃烧热, 大卡/米³;

$V_{H_2O}, V_{CO_2} \dots$ 等——燃烧产物内各气体的体积浓度, %;

$C_{H_2O}, C_{CO_2} \dots$ 等—— $0^\circ C$ 时燃烧产物内各气体的比热, 大卡/米³·度。

理论燃烧温度 t_p 与 t_{oc} 是有区别的, 在求得 t_p 时, 其燃气和空气温度及过剩空气系数 α 皆取实际数值, 按下式确定:

$$t_p = \frac{Q_H^p + V_a \cdot C_a \cdot t_a + C_s t_s}{V_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + V_{RO_2} \cdot C_{RO_2} + V_{R_1} \cdot C_{R_1} + V_{O_2} \cdot C_{O_2}} \text{ 度}, \quad (35)$$

式中 Q_H^p ——低燃烧热, 大卡/米³;

V_a ——燃烧所需要空气量, 米³;

C_a ——空气比热, 大卡/米³·度;

t_a ——空气温度, 度;

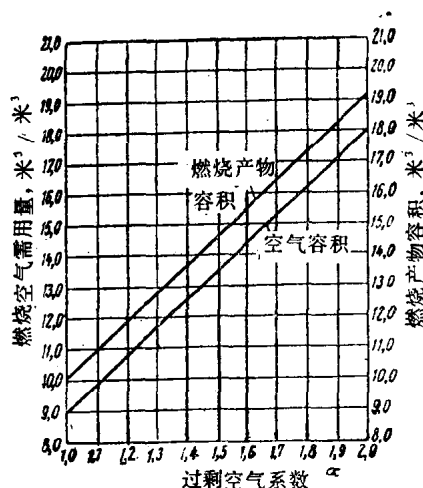


图 2 燃烧所需空气量和燃烧产物体积与过剩空气系数的关系

表 3 热 比 均 的 体 气

温度	热 容, 大卡/米 ³ ·度												
	CO ₂	N ₂	O ₂	CO	CH ₄	H ₂	水蒸气 H ₂ O	空 气		C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
								干空气	湿空气				
0	0.3805	0.3088	0.3116	0.311	0.374	0.306	0.3569	0.3093	0.3150	0.447	0.445	0.525	0.733
100	0.4092	0.3093	0.3145	0.311	0.395	0.309	0.3596	0.3106	0.3163	0.489	0.496	0.598	0.844
200	0.4250	0.3106	0.3190	0.313	0.422	0.310	0.3635	0.3129	0.3181	0.522	0.547	0.668	0.950
300	0.4469	0.3122	0.3240	0.315	0.452	0.311	0.3684	0.3147	0.3206	0.547	0.593	0.735	1.051
400	0.4728	0.3146	0.3291	0.318	0.483	0.312	0.3739	0.3175	0.3235	0.566	0.636	0.797	1.146
500	0.4769	0.3173	0.3339	0.321	0.512	0.312	0.3796	0.3207	0.3235	0.566	0.636	0.797	1.1176
600	0.4895	0.3203	0.3385	0.325	0.542	0.313	0.3856	0.3241	0.3303	0.599	0.718	0.909	1.303
700	0.5008	0.3235	0.3226	0.328	0.569	0.314	0.3920	0.3275	0.3338	0.615	0.756	0.959	1.378
800	0.5110	0.3266	0.3464	0.332	0.596	0.315	0.3985	0.3307	0.3371	0.628	0.788	1.005	1.443
900	0.5204	0.3297	0.3498	0.335	0.620	0.317	0.4050	0.3338	0.3403	0.641	0.819	1.046	1.506
1000	0.5288	0.3325	0.3529	0.338	0.644	0.318	0.4115	0.3367	0.3433	0.653	0.858	1.085	1.558
1100	0.5363	0.3354	0.3548	0.341	0.665	0.319	0.4180	0.3396	0.3463	—	—	—	—
1200	0.5433	0.3380	0.3584	0.344	0.686	0.321	0.4244	0.3422	0.3490	—	—	—	—
1300	0.5495	0.3406	0.3608	0.346	—	0.323	0.4306	0.3448	0.3517	—	—	—	—
1400	0.5553	0.3430	0.3631	0.349	—	0.325	0.4367	0.3472	0.3542	—	—	—	—
1500	0.5606	0.3453	0.3653	0.351	—	0.329	0.4425	0.3494	0.3565	—	—	—	—
1600	0.5655	0.3473	0.3673	—	—	—	0.4482	0.3515	0.3587	—	—	—	—
1700	0.5701	0.3493	0.3693	—	—	—	0.4537	0.3534	0.3607	—	—	—	—
1800	0.5744	0.3511	0.3712	—	—	—	0.4590	0.3552	0.3625	—	—	—	—
1900	0.5783	0.3529	0.3730	—	—	—	0.4690	0.3570	0.3644	—	—	—	—
2000	0.5820	0.3545	0.3747	0.359	—	0.326	0.4689	0.3661	0.3661	—	—	—	—
2100	0.5855	0.3560	0.3764	—	—	—	0.4726	—	—	—	—	—	—
2200	0.5887	0.3574	0.3781	—	—	—	0.4780	—	—	—	—	—	—
2300	0.5919	0.3588	0.3796	—	—	—	0.4822	—	—	—	—	—	—
2400	0.5947	0.3611	0.3810	—	—	—	0.4854	—	—	—	—	—	—
2500	0.5974	0.3613	0.3825	—	—	—	0.4903	—	—	—	—	—	—

C_g ——燃气比热,大卡/米³·度;

t_g ——燃气温度,度;

V_{H_2O}, V_{RO_2} ——燃烧产物内各组分的体积含量%;

C_{H_2O}, C_{RO_2} ——燃烧产物内各组分的比热,大卡/米³·度。

由于过剩空气系数 α 大小,燃烧时间长短,辐射强度及热损失等原因造成了实际燃烧温度总是低于理论计算温度。一般实际燃烧温度是不再计算的,而仅仅近似地通过热平衡来求得。

可按下述经验公式求得实际燃烧温度:

$$t_o = \frac{t_g \eta_{nup}}{100}, \quad (36)$$

式中 η_{nup} ——高温计的经验系数,%(表4所示)。

高温计的经验系数值%

表 4

炉 名	η_{nup}	炉 名	η_{nup}
锻造缝隙炉	66~70	空气预热炉	77~80
水泥焙烧竖窑	75~80	马丁炉	71~74
封闭式炉窑	75~80	没有水冷壁锅炉的燃烧室	70~75
装料炉	80~85	设有水冷壁锅炉的燃烧室	65~70
连续式玻璃熔炉	62~68	连续加热炉	72~76
用于加热长条状材料的窑炉	75~80	装料炉	70~75
隧道窑	75~82	烧水泥转炉	65~85

【例题】求得前述组分燃气的燃烧放出热。

由前计算可知: $Q_H^0 = 8500$ 大卡/米³; $V_{H_2O} = 1.9786$ 米³/米³; $V_{RO_2} = 0.9977$ 米³/米³; $V_{R_2} = 7.139$ 米³/米³。

假设,允许燃烧放热的温度为 2100°C,则在此温度下的比热为:

$C_{H_2O} = 0.4736$; $C_{RO_2} = 0.5855$; $C_{R_2} = 0.358$, 因此

$$t_{20} = \frac{8500}{1.9786 \times 0.4736 + 0.9977 \times 0.5855 + 7.139 \times 0.356} = 2092^\circ\text{C} \approx 2100^\circ\text{C}.$$

【例题】求得前述组分燃气在 $\alpha = 1.2$ 条件下的可燃气体理论燃烧温度。

由前面计算可知: $Q_H^0 = 8500$ 大卡/米³; $V_g = 9.015$ 米³/米³; $C_g = 0.3093$ 大卡/米³·度;

$t_g = 20^\circ$; $\alpha = 1.2$; $C_2 = 0.376$ 大卡/米³·度; $t_2 = 10^\circ\text{C}$; $V_{H_2O} = 1.9786$ 米³/米³; $V_{RO_2} = 0.9977$ 米³/米³; $V_{R_2} = 8.5633$ 米³/米³; $V'_{O_2} = 0.3786$ 米³/米。

假设理论燃烧温度取 1850°C。在此温度下可近似取得比热:

$C_{H_2O} = 0.464$; $C_{RO_2} = 0.5783$; $C_{R_2} = 0.3529$; $C_{O_2} = 0.373$ 。

将它们分别代入公式,就可求得:

$$t_2 = \frac{8500 + 9.015 \times 1.2 \times 0.3093 \times 20 + 0.376 \times 10}{1.9786 \times 0.464 + 0.9977 \times 0.5783 + 8.5633 \times 0.3529 + 0.3786 \times 0.373} = 1840^\circ\text{C}.$$

从计算结果来看,精确度达 $\pm 2\%$, 所以不必重新计算。

火焰传播速度 火焰传播速度是一个很重要的数据,在制作燃烧设备或燃烧时都需要考虑它。