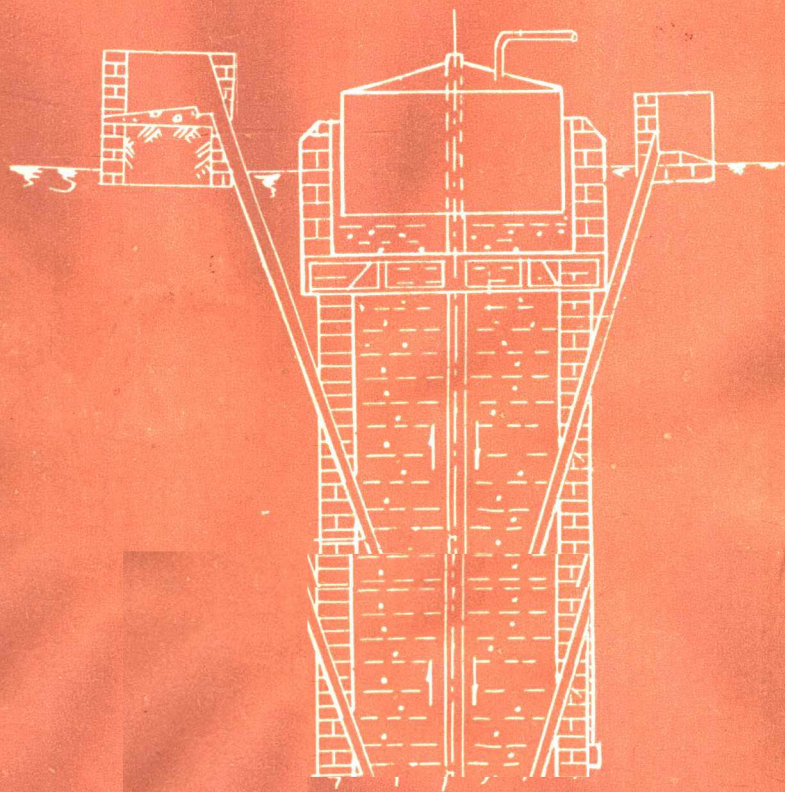


沼气技术员培训教材之 三

沼 气 燃 料

张 榕 林 编 著



北京师范学院出版社

沼 气 燃 料

张 榕 林

北 京 师 范 学 院 出 版 社

1986年·北 京

沼 气 燃 料
Zhaoqi ranliao

张 榕 林

※

北京师范学院出版社出版
(北京阜成门外花园村)

北京市新华书店发行 北京昌平兴华印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16印张: 6 字数: 150千

1986年5月第一版 1986年5月第一次印刷

印数: 1 — 6000册

统一书号: 17427·005 定价: 1.40元

序 言

西汉时期,在我国四川盆地发现了天然气。宋朝时,四川劳动人民就掌握了用天然气熬盐的技术。天然气是原始的有机物遗体,在一定的地下温度、压力条件下,经过复杂的生物化学反应形成的。有时它与固体燃料矿床共存,如煤矿的瓦斯;有时与液体燃料共存,即石油伴生气;也有时天然气单独存在,这就是气田气。

人们仿照自然环境修建沼气池,利用植物茎叶,人畜粪便等各种有机物或工业的废液、废渣,在一定温度、湿度、酸度和厌氧条件下,经嫌气性微生物发酵作用也可以制取与天然气成份类似的气体——沼气。

我国从三十年代开始,人工沼气得到推广应用。当时沼气除主要用来点灯外,还用于室内养蚕保温,烘烤茶叶,制作饼干,蒸煮医疗器械,烧制灯泡,照相照明,以至用沼气为100多人食堂烧煮饭菜。此外,用沼气发电,也在罗国瑞瓦斯总行和诸暨县试验成功。

沼气的主要成分是甲烷。甲烷的热值较高,是一种优质的可燃体气。使用性能好的沼气灶具时,其热效率可以达到60%以上,比农村烧柴灶的热效率高4~5倍。用沼气灶代替柴灶可以节省大量秸秆,可以大大减轻妇女的家务劳动强度。用沼气照明可以节省煤油。用沼气加热烘干谷物、茶叶等,可以提高产品的质量。沼气完全燃烧后没有灰渣和烟尘,废气中的有害物质含量比烧柴、烧煤要少,有利于保护环境。因此,它是我国农村中一种较为理想的生活能源。

沼气的应用范围较广。一般农村家用沼气主要满足日常生活用能。在农村的集体养猪厂、食品加工厂、酒厂可利用粪便及有机废水、废渣发酵制取沼气,由于产气量较大,也可作为动力燃料。

沼气可以代替汽油开车。根据四川荣县酒厂80—81年试验结果说明,每立方米沼气开动解放牌汽车行程2.37~2.83公里。按每立方米沼气0.1375元,而每公斤汽油按0.7元计,则每公里沼气成本为0.055元,汽油成本为0.168元,可见用沼气开汽车具有显著经济效益。

沼气用于发电,每立方米沼气可发1.25~1.45度电。采用油气混合燃料发电可以节省80~90%的燃料油。在没有国家电网的农村或虽有国家电网供电,但在用电高峰季节,特别是农忙季节,大电网供电不足或不定时的条件下,小沼电做为补充电源将具有其特殊意义。

沼气中的甲烷还是制取多种化工产品的优质原料。如河南南阳酒精厂就利用沼气生产二氯甲烷、三氯甲烷和四氯化碳等。

沼气还可以满足某些生产工艺上的要求,如用沼气加热温室,用沼气炒茶、烘干粮食种子,有的地方还用沼气进行无土培育水稻秧苗等等。

本篇重点介绍沼气的基本特性,沼气管路、燃烧器具及其科学使用等方面的基本知识。对沼气及燃具的有关特性的测定的方法也做了简单介绍。

目 录

序 言

第一章 沼气的特性.....	(2)
一、气体的状态参数.....	(2)
二、理想气体状态方程式.....	(3)
三、标准状态气体的体积.....	(3)
四、气体的混合.....	(4)
五、临界温度、临界压力.....	(7)
六、沼气燃烧反应式.....	(7)
七、发热量(或热值).....	(8)
八、理论空气需要量及过剩空气系数.....	(8)
九、沼气的燃烧产物——烟气.....	(9)
十、热平衡方程式与燃烧温度.....	(9)
十一、着火温度.....	(10)
十二、燃烧范围.....	(10)
十三、沼气的燃烧速度.....	(11)
第二章 沼气的输送系统.....	(14)
一、对沼气管道的要求.....	(14)
二、采用的管材及配件.....	(14)
三、管道的设计.....	(21)
四、输气管道中的凝结水.....	(29)
五、沼气管道的安装.....	(31)
六、管道安装质量检验.....	(33)
七、管道日常维护和修理.....	(34)
第三章 沼气的燃烧及燃烧器.....	(35)
一、沼气的燃烧方法.....	(35)
二、沼气燃烧器及其设计计算.....	(39)
第四章 民用燃具的检验及科学使用.....	(58)
一、几种沼气燃具.....	(58)

二、沼气燃具的检验.....	(62)
三、影响燃具性能中CO指标的因素.....	(65)
四、燃具的科学使用及故障排除.....	(67)
第五章 沼气设备的测定及仪器的使用方法.....	(74)
一、温度的测量.....	(74)
二、压力的测量.....	(75)
三、流量的测量.....	(76)
四、发热量的测量.....	(78)
五、比重的测量.....	(81)
六、灶具热负荷的测定.....	(84)
七、灶具热效率的测定.....	(84)
八、灶具燃烧产物中 CO 含量的测定.....	(85)
九、沼气灯照度的测定.....	(88)
主要参考文献.....	(88)

第一章 沼气的特性

一、气体的状态参数

表示气体状态的主要参数是：压力、温度和比容。这三个参数彼此有一定关系，掌握了这个关系也就抓住了气体状态的关键。

1. **压力** 气体的压力是由大量运动着的分子互相碰撞并垂直作用在容器壁面上的力，以下式表示：

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中P——气体压力（公斤/厘米²或公斤/米²）

F——总作用力（公斤）

A——总面积（厘米²或米²）

在沼气应用中经常用不同的单位来衡量压力的大小。常用的单位有大气压、公斤/厘米²，毫米水柱，毫米汞柱等。工程上规定1公斤/厘米²为一工程气压，国际上把760毫米汞柱规定为标准大气压（或称物理大气压）。国际上还采用巴或毫巴作为压力单位，（1巴等于1000毫巴）。它们之间的单位换算关系见表1—1。

压 力 单 位 换 算 表

表1—1

毫米水柱 (或公斤/米 ²)	工程大气压	物理大气压	毫米汞柱	米 水 柱	毫 巴
10000.0	1.0	0.9678	735.58	10.00	981.00
10332.0	1.0332	1.0	760.00	10.332	1013.25
13.6	0.00136	0.00131	1.0	0.0136	1.3332
1000.0	0.1	0.0968	73.556	1.0	98.1
10.2	0.00102	0.000981	0.749	0.0102	1.0

绝对大气压与表压

绝对大气压力用水银气压表来测量。所有其它压力表如U形管等所指示出的都是相对于大气压的正压力或负压力。地球周围空气的压力称为大气压，严格地说地球上各地的大气压力不同，甚至每天大气压都有变化。但是，在工程上不做精确的计算时，可以认为大气压等于1。绝对压力=表压+大气压。

2. **温度** 工程上常用的单位是摄氏温标，以（°C）计，符号为t。0°C表示在一个大气压下，水结冰的温度；100°C表示在一个大气压下水的沸腾温度。温度的国际单位是热力学温度单位（开尔文），其代号为“K”，符号为T。

绝对温度 气体的温度实际上是气体分子的直线运动平均动能的量度，在热力学中，温度也与压力的绝对值一样，需要从绝对零值算起。其关系式为 $T(^{\circ}\text{K}) = 273 + t$ 。这样称以 -273°C 为零点的温度为绝对温度，用符号 T 代表，单位 $(^{\circ}\text{K})$ 计。绝对温度 T 与摄氏温度 t 的不同点只是起点不一样，但在这两个温度标准中，度的大小是一样的。

3. 比容

比容 气体的体积随其容器而变化，单位重量的气体所占体积，称为比容，用符号 v 表示，单位为 $\text{米}^3/\text{公斤}$ 。

容重 1 米^3 气体的重量（公斤）即为容重，其单位 $(\text{公斤}/\text{米}^3)$ ，用符号 r 表示。

比容与容重的关系为 $vr = 1$ 。

二、理想气体状态方程式

上述气体的状态参数即压力、温度与比容之间具有一定的关系。描写这种关系的方程式称为气体状态方程式，如下表示

$$v = R \frac{T}{P} \quad (2)$$

式中 P ——气体压力（绝对压力）或 $(\text{公斤}/\text{米}^2)$

v ——气体比容 $(\text{米}^3/\text{公斤})$

T ——气体的绝对温度 $(^{\circ}\text{K})$

R ——气体常数 $(\text{公斤} \cdot \text{米}/\text{公斤} \cdot ^{\circ}\text{K})$

上式表明，在一定温度下，气体的体积 V 与压力 P 成反比，在一定压力下，与绝对温度 T 成正比。

这个方程式只适用于理想气体（即气体分子的吸引力可以不考虑，分子本身不占体积），实际上理想气体状态方程式并不存在，但它又具有现实意义，因为在工程上，当气体压力不高时，都可以粗略地认为是理想气体。

R 为气体常数，对于不同的气体， R 值不同。根据实验，得到这样一个规律，即当压力 $P = 10332 \text{ 公斤}/\text{米}^2$ ，温度 $T = 273^{\circ}\text{K}$ 时，气体的分子量 μ 与比容 v 的乘积等于一个常数 22.4 。

$$\begin{aligned} \text{如将此式 } \mu v = 22.4 \text{ 代入上式 } R &= \frac{vP}{T} = \frac{\mu v P}{\mu T} = \frac{22.4 \times 10332}{\mu \cdot 273} \\ &= \frac{848}{\mu} \text{ (公斤} \cdot \text{米}/\text{公斤} \cdot ^{\circ}\text{K}) \end{aligned} \quad (3)$$

同样在 P 为 $10332 \text{ 公斤}/\text{米}^2$ ， $T = 273^{\circ}\text{K}$ 时的比容 $v = \frac{22.4}{\mu}$ 。 R 值既然是个常数，如果知道某种气体其三个状态参数中的两个，就可以根据 $Pv = RT$ 式求得另一参数。

三、标准状态气体的体积

沼气和它的气体一样，其体积是随温度、压力和湿度的变化而变化的。如在同样大小的沼气池内，其气室的大小也相同，但由于温度、压力不同，池内实际的沼气体量是不相等的。因此，在测定沼气体积或流量时，如果没有一定的状态作基准，则所测的数值也无对比性。为此，就产生了气体的标准状态这一概念。在工程上规定标准状态下的压力 $P = 760 \text{ 毫米汞}$

柱, 或10332毫米水柱, $T=273^{\circ}\text{K}$ 即 0°C 。但是实际上在工作状态下的沼气的压力与温度并不一定为标准值, 为此需要进行换算。

$$V_0 = V \frac{273}{273+t} \cdot \frac{B+P-\varphi P_B}{10332} \quad (4)$$

式中 V_0 ——标准状态下沼气的体积 (标米³)

V ——工作状态下沼气的体积 (米³)

B ——工作状态下的大气压力 (毫米汞柱)

P ——通过流量计的沼气压力 (毫米汞柱)

φ ——沼气相对湿度 (采用湿式流量计时 $\varphi \approx 1$)

P_B ——沼气温度为 t 时的饱和水蒸气分压 (毫米汞柱) 查表 1—2

t ——通过流量计的沼气温度 ($^{\circ}\text{C}$)

四、气体的混合

1. 沼气是一种混合气体, 其性质由组成它的气体的性质及相对含量而决定, 其中以甲烷和二氧化碳对沼气的性质影响最大。表 1—3 为沼气中单一气体的物理常数。

沼气组成的百分比可用体积百分数 v_i 或重量百分数 g_i 表示

$$v_i = \frac{V_i}{V} \times 100 (\%) \quad (5)$$

$$g_i = \frac{G_i}{G} \times 100 (\%) \quad (6)$$

式中 V_i, G_i ——分别为在沼气中某单一气体所占体积或重量

V, G ——分别为沼气的体积或重量

v_i 与 g_i 的关系为

$$v_i = \frac{g_i / \mu_i}{\sum_i g_i / \mu_i} \quad (7)$$

$$g_i = \frac{\mu_i V_i}{\sum_i \mu_i V_i} \quad (8)$$

式中 μ_i ——沼气中某单一气体的分子量

n ——沼气中某单一气体的数目

2. 混合气体的参数

(1) 沼气的分子量

$$\mu = \frac{1}{100} \sum_i v_i \mu_i \quad (9)$$

式中 v_i ——沼气中某单一气体的体积百分数

μ_i ——沼气中某单一气体的分子量

(2) 沼气的容重

$$r = \frac{1}{100} \sum_i v_i r_i \quad (10)$$

式中 r_i ——沼气中各单一气体的容重

压力为760毫米汞柱时
气体的饱和水蒸气分压力与含湿量

表1—2

温 度 (°C)	饱和水蒸气 分压 P_B (毫米汞柱)	饱和含湿量db (克/标米 ³ 干气)	温 度 (°C)	饱和水蒸气 分压 P_B (毫米汞柱)	饱和含湿量db (克/标米 ³ 干气)
-10	2.093	2.22	14	11.908	12.90
-9	2.267	2.45	15	12.699	13.70
-8	2.455	2.58	16	13.536	14.60
-7	2.658	2.84	17	14.421	15.80
-6	2.876	3.10	18	15.357	16.70
-5	3.113	3.36	19	16.364	17.80
-4	3.368	3.62	20	17.391	18.90
-3	3.644	3.87	21	18.495	20.10
-2	3.941	4.13	22	19.659	21.40
-1	4.263	4.51	23	20.888	22.80
0	4.600	4.92	24	22.184	24.30
1	4.940	5.30	25	23.550	25.70
2	5.302	5.56	26	24.988	27.40
3	5.687	6.06	27	26.505	29.10
4	6.097	6.45	28	28.101	31.00
5	6.534	6.99	29	29.782	33.00
6	6.998	7.52	30	31.548	35.00
7	7.492	7.96	35	41.827	47.00
8	8.017	8.63	40	54.905	62.60
9	8.574	9.21	45	71.391	83.80
10	9.165	9.85	50	91.982	111.20
11	9.762	10.04	60	148.791	197.00
12	10.457	11.20	80	354.643	703.00
13	11.162	12.00	100	760.000	

(3) 沼气对空气的相对比重

$$S_o = \frac{r_o}{r'_o} = \frac{r_o}{1.293} \quad (11)$$

式中 r_o 与 r'_o 分别表示在标准状态下沼气与空气的容重

(4) 沼气的气体常数

$$R = \frac{1}{100} \sum_i g_i R_i \quad (12)$$

式中 g_i —— 沼气中某单一气体的重量百分数

R_i —— 沼气中某单一气体的气体常数

3. 举例

例1。沼气池中的甲烷体积占60%，二氧化碳体积占40%，求①重量百分比②沼气的容重及比重。

解①甲烷重量百分比

$$g_{CH_4} = \frac{\mu_i v_i}{\sum \mu_i v_i} = \frac{16.04 \times 60}{16.04 \times 60 + 44 \times 40} = \frac{962.4}{962.4 + 1760} = \frac{962.4}{2722.4} = 35.35\%$$

沼气中各单一气体的物理参数

表1—3

名 称 分 子 式 参 数	甲 烷	氢 气	氮 气	氧 气	硫化氢	二氧化碳	一氧化碳	空 气	水蒸气
	CH ₄	H ₂	N ₂	O ₂	H ₂ S	CO ₂	CO		H ₂ O
1. 分子量M	16.0430	2.0160	28.0134	31.9988	34.076	44.0098	28.0104	28.966	18.0154
2. 容重r(公斤/米 ³)	0.7174	0.0899	1.2504	1.4291	1.5363	1.9771	1.2506	1.2931	0.833
3. 比重S对空气的 相对比重	0.5548	0.0695	0.9670	1.1052	1.188	1.5289	0.9671	1.0000	0.644
4. 气体常数R(公 斤·米/公斤·°C)	52.87	420.63	30.26	26.50	34.90	19.27	30.27	29.27	47.1
5. 绝热指数K	1.309	1.407	1.404	1.401	1.32	1.304	1.403	1.40	1.335
6. 导热系数λ (千卡/米·时·°C)	0.0258	0.150	0.0214	0.0215	0.0132	0.0118	0.0194	0.021	0.139
7. 临界温度t _k (°C)	-82.5	-239.9	-147.13	-118.82	100.4	31.1	-140.2	-140.75	374
8. 临界压力 P _k (公斤/厘米 ²)	45.8	2.8	33.49	47.713	88.9	72.9	34.53	37.25	225.0
9. 临界容重r _k (公斤/米 ³)	162	31	311	430		468	301	310	
10. 动力粘度μ×10 ⁷ (公斤·秒/米 ²)	10.5	8.6	16.98	19.6	11.9	14.0	16.8	17.5	9.22
11. 运动粘度ν×10 ⁶ (米 ² /秒)	14.49	94.27	13.33	13.49	7.63	7.10	13.26	13.3	11.24
12. 定压比热C _p (卡/克·°C)	0.517	3.394	0.2489	0.2191	0.237	0.198	0.249	0.2403	0.443

二氧化碳重量百分比

$$g_{CO_2} = \frac{44 \times 40}{16.04 \times 60 + 44 \times 40} = \frac{1760}{2722.4} = 64.65\%$$

②沼气的容重

$$r = \frac{1}{100} \sum \mu_i v_i r_i = (60 \times 0.7174 + 40 \times 1.9771) \times \frac{1}{100} = 0.43 + 0.79 = 1.22 \text{ 公斤/米}^3$$

沼气的比重

$$S_0 = \frac{1.22}{1.293} = 0.944$$

例2, 当甲烷在沼气中占55%, 其气体常数R=52.9米/°C, 二氧化碳占45%, 气体常数R=30.27米/°C求P=1公斤/米², T=273°K时的容重

解:

$$r = \frac{1}{v} = \frac{P}{RT} = \frac{1 \times 10000}{(52.9 \times 0.55 + 30.27 \times 0.45) \times 273} = \frac{10000}{42.72 \times 273} = 0.857 \text{ 公斤/米}^3$$

当压力 P 不变, 沼气温度的升到 100°C 时, 其容重为 $r = \frac{1 \times 10000}{42.72 \times (273 + 100)}$
 $= 0.628 \text{ 公斤/米}^3$

例3. 已知测量时的大气压 $B=765$ 毫米汞柱, 沼气压力 $P=300$ 毫米水柱, 沼气温度 $=20^{\circ}\text{C}$, 用湿式流量计测得的沼气流量为 $0.5 \text{ 米}^3/\text{时}$, 试换算为标准状态下体积流量。

$$\begin{aligned} V_0 &= V \frac{273}{273+t} \times \frac{B+P-\phi P_B}{760} \\ &= 0.5 \times \frac{273}{273+20} \times \frac{765 + \frac{300}{13.6} - 17.391}{760} \\ &= 0.5 \times 0.932 \times \frac{765 + 22.06 - 17.39}{760} \\ &= 0.5 \times 0.932 \times 1.0127 \\ &= 0.472 \text{ 标米}^3/\text{时} \end{aligned}$$

五 临界温度、临界压力

图1-1表示在不同温度下压缩 CO_2 时其压力和体积的变化情况。当自 A 点开始压缩时,

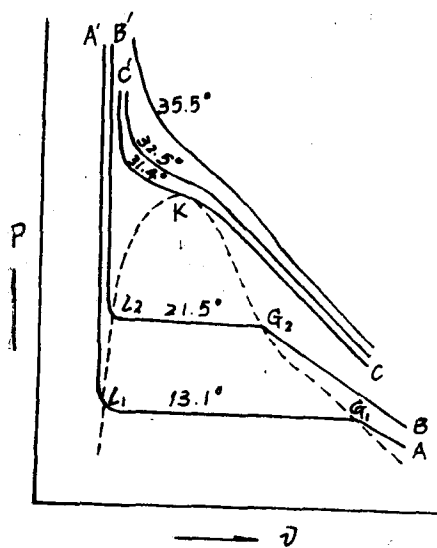


图1-1 CO_2 的等温压缩曲线

到 G_1 点液化开始, 到 L_1 点液化完成。 G_1L_1 之间为气体与液体共存的期间。如果最初的气体温度高, 则变成一条与 AG_1L_1A' 线大致平行的线 BG_2L_2B' , 只是 G_2L_2 之间变得短些。温度继续上升, 当自 C 点开始压缩时, 到 K 点液化开始, 但此时没有相当于 GL 的直线部分。一般称这一点为物质的临界点。 K 点的压力叫做临界压力。等温线的温度(31.4°C)叫做临界温度。在临界温度以上, 无论怎样进行压缩, 都不能使气体液化。在图1-1中, KL_2L_1 线叫做饱和液线, 由此而左只包括液体部分; KG_2G_1 线叫做饱和蒸气线, 由此而右只包括饱和蒸气的部分; L_1KG_1 曲线内为气液两态共存的部分。

六、沼气燃烧反应式

燃烧是可燃物与氧激烈化合, 并产生热和光(此光最后也变为热)的物理化学反应过程。燃烧反应式可表示燃烧反应前后物质变化的比例关系。如 $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$, 它表示1(标米³)的甲烷和2(标米³)的氧完全燃烧后能产生1(标米³)的二氧化碳与2(标米³)的水蒸气。

七、发热量 (或热值)

1 标米³的沼气完全燃烧时, 1 标米³沼气放出来的热量即为该沼气的发热量, 其值大小与沼气中甲烷组分的多少有关, 单位为 (千卡/标米³)。在工程单位制中, 热量的单位采用“千卡”, 即 1 公斤水温升 1°C 时所吸收的热量。在国际单位制中, 热量的单位采用“焦耳”, 其代号“J” 1 千卡 (Kcal) = 4186.8 焦耳 (J)

1. 高位发热量与低位发热量

由燃烧反应式中可以看到, 燃烧的产物中有水蒸气, 当它凝结为水时, 燃烧产生的热量就包含了水凝结时所散发出来的汽化潜热, 即被称为高位发热量, 以 Q_B 表示。当燃烧产物中的水呈气态时, 其汽化潜热未散发出来, 则燃烧产生的热量中不包括这部分潜热, 此时称它为低位发热量, 用 Q_D 表示。

对于高位发热量, 如考虑冷凝水温由 100°C 降到某个标准温度所放出的热量时, 尚应附加水温下降所放出的热量。由于各个国家规定的标准温度不一样, 因此, 各国提出的高位发热量的数据也不相同。在工程燃烧中, 烟气 (燃烧产物) 温度比较高, 故不考虑水的凝结, 而多采用低位发热量。

2. 沼气的发热量按混合法则计算

即沼气中可燃成分的体积百分数乘其相应的单一气体发热量。

$$Q = \frac{1}{100} \sum v_i Q_i \quad (13)$$

式中 v_i —— 沼气中某种可燃成分的体积百分数

Q_i —— 沼气中某种可燃成分的发热量千卡/标米³

3. 沼气含有水分时的低位发热量

沼气含有水分时的低位发热量可用下式计算

$$Q_D^I = Q_F^I \frac{0.804}{d + 0.804} \quad (14)$$

式中 Q_D^I —— 工作状态下沼气 (含水分) 的低位发热量 (千卡/标米³)

Q_F^I —— 干沼气的低位发热量千卡/标米³

d —— 工作状态下沼气中的含湿量 (公斤/标米³干沼气)

八、理论空气需要量及过剩空气系数

沼气燃烧所需要的氧气一般是从空气中直接获得。1 标米³的沼气完全燃烧所需要的最少空气量称为沼气的理论空气量, 以 V_0 表示, 单位为标米³/标米³。

表 1—5 中给出沼气中各可燃气体的理论空气需要量, 它是由燃烧反应方程式确定的。1 标米³的甲烷需要 2 标米³的氧气, 而 1 标米³空气中含 0.21 标米³的氧气, 所以燃烧 1 标米³甲烷需要 $\frac{2}{0.21} = 9.523$ 标米³的空气。

沼气的理论空气需要量可按下式计算

$$V_0 = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n v_i V_{0,i} \quad (\text{标米}^3/\text{标米}^3) \quad (15)$$

式中 V_0 —沼气的理论空气需要量 (标米³/标米³)

v_i —沼气中某单一气体的体积百分数 (%)

$V_{0,i}$ —沼气中某单一气体的理论空气需要量 (标米³/标米³)

沼气的热值越高, 需要的理论空气量也越大。因此, 可用沼气的低热值按下式近似地计算

$$V_0 = \frac{1.09}{1000} Q_D - 0.25 \quad (\text{标米}^3/\text{标米}^3) \quad (16)$$

沼气与空气混合的不均匀易造成不完全燃烧, 因此, 实际供给的空气量应大于理论空气需要量。过剩空气的存在增加了沼气分子与空气分子相撞的可能性, 增加了其相互作用的机会, 从而促使燃烧完全。

实际供给的空气量 V 与理论空气量 V_0 之比称为过剩空气系数 α , 即 $\alpha = \frac{V}{V_0}$ 。显然, 由于实际供给的空气量大于理论空气量 ($V > V_0$), 所以 α 总是大于 1。过剩空气系数的大小决定于燃烧过程。一般对民用燃烧设备取 $\alpha = 1.05 \sim 1.1$ 。在保证燃烧完全的情况下, 尽量使 α 趋近于 1。如果 α 过大, 会降低燃烧温度, 增加排烟热损失, 使热效率降低。

九、沼气的燃烧产物——烟气

通常把烟气分为四部分

1. 三原子气体 V_{RO_2} (CO_2, SO_2)

2. 水蒸汽 V_{H_2O}

3. 氮 V_{N_2}

4. 过剩空气造成的氧 VO_2

当燃烧不完全时, 烟气成分中还可能含有可燃气体 CO 和 CH_4 。当烟气中出现多量碳氢可燃物时, 表示燃烧极不完全, 是不允许的。另外在燃烧产物中还含有一些 NO_x 它象 H_2S 一样对人体有害并污染空气。沼气中的 H_2S 燃烧后变成 SO_2 再遇水蒸汽, 造成对铸铁燃烧器的严重腐蚀。

十、热平衡方程式与燃烧温度

1. 气体的热焓

焓是一个代表能量的状态参数。它与压力、比容及气体的内能有关。在一般工程中, 都规定在标准状态下热焓为 0。这样对于定压加热的过程, 气体的热焓 I 可由下式计算

$$I = VCt$$

式中 V —气体体积 (米³)

C —气体的比热 (热容量) (千卡/米³·°C)

t —气体的温度 (°C)

I—气体热焓量(千卡)

上述的比热是在压力不变条件下的热容量。在沼气工程中多数为定压加热,所以采用定压比热。

2. 热平衡方程式

沼气燃烧产生热量,从而使燃烧产物温度升高。下面列出燃烧1标米³沼气的热平衡方程式。

$$Q_D + I + I_a = I_g + q' + q'' \quad (22)$$

式中 Q_D ——沼气低位发热量(千卡/标米³)

I ——沼气本身热焓(千卡/标米³)

I_a ——燃烧所需空气热焓(千卡/标米³)

I_g ——燃烧产物的热焓(千卡/标米³)

q' ——消耗于燃烧产物局部分解的热量(千卡/标米³) (此值很小,工程上不予考虑)

q'' ——向周围介质的散热量(与燃烧设备、工艺有关)(千卡/标米³)

3. 燃烧温度

燃烧产物的热焓

$$I_g = V_g C_g t_g \quad (23)$$

式中 V_g ——燃烧产物的体积(标米³)

C_g ——燃烧产物的比热(千卡/标米³°C)

t_g ——一般指燃烧产物的温度

$$t_g = \frac{Q_D + I + I_a - q' - q''}{V_g C_g}$$

如 $q' = q'' = 0$ 则 t_g 为理论燃烧温度

在实际工程燃烧中,有不同的 q'' 散热量,所以燃烧温度也不一样,一般达不到理论燃烧温度。从上式可知,如要提高燃烧温度,则需减少 q'' ,加大 I 及 I_a 值,即对沼气或空气进行预热,因空气比沼气体量大,所以预热空气会取得较好的效果。

十一、着火温度

所谓着火就是可燃气体与空气中的氧由稳定缓慢的氧化反应加速到发热发光的燃烧反应的突变点,其反应产生的热量比散发的热量略高,从而使可燃气体混合物温度升高,突变点的最低温度称为着火温度。

实际上,着火温度不只与可燃气体的化学成分,物理性质有关,同时还与沼气、氧气的浓度,沼气与空气混合程度,燃烧室的尺寸和形状,混合物燃烧方式和速度,空气与沼气的压力有关。

十二、燃烧范围

根据热力着火的条件可以推论,可燃气体在可燃混合物中过多或过少,都不能达到着火

条件。当混合物中可燃气体过多时，由于助燃气体很少，只能使一小部分可燃气体燃烧产生热，并且产生的热量大都消耗在加热过剩可燃气体上，不可能使混合物温度升到着火温度，因此，不可能产生燃烧。这时可燃气体在混合物中占的百分数称为着火浓度上限。当混合物中可燃气体过少时，同样只能产生少数热量，并且大部分消耗于加热助燃气体上，因此，不能使混合物温度升至着火温度，从而不会发生燃烧。这时可燃气体在混合物中占的百分数称为着火浓度下限。

沼气是由数种单一可燃和不可燃气体组成的混合气体，如果沼气中没有惰性气体时，可采用下式计算

$$L = \frac{100 \sum v_i}{\sum \frac{v_i}{L_i}} (\%) \quad (24)$$

式中 L ——不含惰性气体的沼气的着火浓度上限或下限%

L_i ——各单一可燃气体的着火浓度上限或下限%。

v_i ——各单一可燃气体在不含惰性气体的沼气中的体积百分数

当沼气中含有惰性气体时，则应用下式计算

$$L\sigma = L \frac{(1 + \frac{\sigma}{100 - \sigma}) 100}{100 + L (\frac{\sigma}{100 - \sigma})} (\%) \quad (25)$$

式中 $L\sigma$ ——含有惰性气体的沼气着火浓度上限或下限%。

沼气的燃烧范围 表1-4

燃烧范围%	CH ₄ 50% + CO ₂ 50%	CH ₄ 60% + CO ₂ 40%	CH ₄ 70% + CO ₂ 30%
上 限	26.1	24.44	20.13
下 限	9.52	8.8	7.0

σ ——惰性气体在沼气中占有的体积百分数
最后还应指出，气体温度越高，燃烧范围越广，气体压力越高，则燃烧上限越高，但燃烧下限几乎不变。相反，气体压力在一个气压以下时，燃烧范围就更窄了。

当甲烷在沼气中的浓度不同时，沼气的燃烧上限及下限均有变化。

从表1-4中可以看出，当沼气中甲烷含量增加时，燃烧范围减小，上限下限均相应降低，当甲烷浓度减小时，其燃烧范围增大，而且上限下限也相应提高。

十三、沼气的燃烧速度

燃烧速度也称火焰传播速度，它是衡量沼气燃烧快慢的参数。它不仅对沼气火焰的稳定燃烧起着重要作用，而且对燃烧方法的选择，燃具的设计和沼气的安全使用有很大的影响。

为了观察火焰的传播过程，可以在一支玻璃管内充满沼气与空气的混合气体。当用火花使某一部分着火，在着火处就形成了燃烧焰面。焰面之后是高温的燃烧产物，之前是尚未燃烧的可燃混合物。由于可燃混合物的热传导和所产生的温度差，热量便开始向前传播，邻近未燃气层的温度便升高，达到着火温度后就形成了新的燃烧焰面。这种焰面不断向未燃气体方向传播的现象叫做火焰的传播过程；垂直于燃烧焰面的传播速度在一定条件下可用实验的

方法测得。这个速度一般称为法向火焰传播速度或火焰传播的基本速度。

影响沼气火焰传播速度的因素主要是

1. 与可燃气体的物理化学性质有关。因沼气中的可燃气体主要是甲烷，而甲烷的火焰传播速度在单一可燃气体中是最低的。

2. 与混合气中惰性气体含量有关。惰性气体含量越多，火焰传播速度越小。

当甲烷气中混入惰性气体如二氧化碳及氮气后，其燃烧速度比单一的甲烷燃烧速度还要低，其值按下式进行计算：

$$u' = u (1 - 0.01v_{N_2} - 0.012v_{CO_2}) \quad (26)$$

式中 u' ——甲烷混入惰性气体后的燃烧速度 (米/秒)

u ——甲烷的燃烧速度 (米/秒)

v_{N_2}, v_{CO_2} ——分别为混合气体中氮，二氧化碳的体积百分数

3. 与混合气体中一次空气系数，即燃烧前供给的空气量大小有关。不同可燃气体在最大燃烧速度时，有相应的一次空气系数。

4. 与可燃气体和空气的温度有关。预热温度越高。 u_H 值越大。这就是有些燃烧器在点燃一段时间后易产生回火的原因。

5. 与火孔直径有关。火孔越大，火焰传播速度也越大。由单一气体组成的可燃气体，最大火焰传播速度可按下式计算

$$u_H = L \frac{\sum \frac{v_i u_i}{L_i}}{\sum v_i} \quad (27)$$

式中 u_H ——单一气体混合物的最大火焰传播速度 (米/秒)

L ——火焰传播速度最大时可燃成分在混合物中的含量 (%)

v_i ——各单一气体在可燃气体中的含量 (%)

u_i ——各单一气体的最大火焰传播速度 (米/秒)

L_i ——火焰传播速度最大时，各单一气体在混合物中的含量 (%)

下面列出沼气中各单一可燃气体的燃烧性能 (表 1—5)

各单一可燃气体的燃烧特性

表 1—5

气 体 名 称	氢 气	一 氧 化 碳	甲 烷	硫 化 氢
燃烧反应方程式	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	$H_2S + 1.5O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$
着火温度 °C	530—590	630—650	680—750	300—400
理论空气需要量标米 ³ /标米 ³	摩尔氧/摩尔气体 0.5 标米 ³ 氧/标米 ³ 气体 0.499 标米 ³ 空气/标米 ³ 气体 2.383	0.5 0.5 2.386	2 2.003 9.523	1.5 1.514 7.228