

陈树义 章丽玲 编译

# 燃料燃烧及燃烧装置

冶金工业出版社

## 内 容 简 介

本书系根据日本工学博士辻正一著，日刊工业新闻社1975年出版的《燃烧机器工学》以及中村清彦著，日本热能技术协会1973年出版的《实用煤气燃烧》两书编译而成。

该书阐述了各种燃料特性、燃烧状态和燃烧计算，其特点是应用流体力学定律和射流理论，比较系统地论述了燃烧的基本原理、各种射流的流动特性和燃烧火焰特性，从而建立了燃烧装置设计的基础理论。同时也阐明了各种燃烧装置的特点、构造和设计方法；燃烧控制以及燃烧装置的管理和维护。可以说这是一本有关燃烧装置方面的专著。

本书可供燃烧理论工作者，钢铁、石化、矿冶和机械等工业用窑炉的热工技术人员和生产操作人员，工业炉和锅炉的设计和科研人员以及高等和中等工业院校有关专业师生参考和阅读。

## 燃 料 燃 烧 及 燃 烧 装 置

陈树义 章丽玲 编译

\*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

\*

850×1168 1/32 印张 13 字数 344千字

1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷

印数00,001~5,000册

统一书号：15062·4138 定价3.50元

## 编译者的话

随着钢铁、石化和机械工业的发展，关于燃烧理论和燃烧装置方面的研究有了很大进展。

实践证明，锅炉和工业炉等热工设备所用的燃烧装置燃烧特性的好坏，直接关系到产品的产量、质量及能源消耗，对国民经济的发展具有重要意义。

为了适应技术发展的需要，我们以日本辻正一著《燃烧机器工学》一书为主，同时参考中村清彦著《实用煤气燃烧》一书的有关章节以及最近国外关于燃烧技术方面的文献资料编译成本书。

本书自始至终贯穿着燃烧特点及设计的基础理论和方法。因此也可以说，本书大体上分为燃烧的基础、燃烧装置的设计以及燃烧装置的实用三个部分。

本书共分八章，第二、四、五章基本是取材于上述两书的内容，其余各章均进行了增删修改，并在第六章增写了“低 $\text{NO}_x$ 烧嘴”和“煤气辐射管”两节。

对于东北工学院冶金炉教研室郭伯伟、武钢硅钢片厂唐明民、夏振亚、庞长礼以及钢铁研究所王幼亭等同志在本书编译过程中所给予的支持和帮助，表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，书中错误在所难免，恳望广大读者批评指正。

# 目 录

<b>第一章 燃料及其燃烧</b> .....	1
<b>第一节 燃料</b> .....	1
一、气体燃料 .....	1
二、液体燃料 .....	6
三、固体燃料 .....	6
<b>第二节 燃料燃烧</b> .....	11
一、氧气源 .....	12
二、着火和火焰稳定化 .....	13
三、火焰传播和可燃极限 .....	23
四、燃烧时的化学反应 .....	37
五、燃烧方法 .....	39
<b>第三节 燃烧计算</b> .....	41
一、燃料的发热量 .....	41
二、空气量和燃烧产物量 .....	43
三、燃烧温度 .....	47
<b>参考文献</b> .....	49
<b>第二章 燃烧室内气体的流动</b> .....	50
<b>第一节 燃烧气体的流动</b> .....	50
一、流动路径 .....	50
二、流动阻力 .....	54
<b>第二节 燃料和空气喷口附近的流动</b> .....	63
一、直线环状射流 .....	64
二、旋转环状射流 .....	67
三、同轴射流 .....	72
<b>第三节 燃烧室内的流动模型</b> .....	77
一、单烧嘴时 .....	78
二、多烧嘴时 .....	85
<b>参考文献</b> .....	87

<b>第三章 火焰的形成及其特性</b> .....	89
<b>第一节 燃烧过程</b> .....	89
一、喷雾燃烧和气体燃烧 .....	89
二、液体燃料的雾化 .....	90
三、燃料和空气的混合 .....	96
四、油滴的蒸发和燃烧 .....	102
五、火焰的形成 .....	107
<b>第二节 火焰长度</b> .....	112
一、煤气烧嘴的火焰长度 .....	112
二、油喷嘴的火焰长度 .....	121
<b>第三节 炭黑以及氮氧化合物的生成</b> .....	131
一、炭黑 .....	131
二、氮氧化物 .....	139
<b>第四节 火焰的辐射</b> .....	145
一、气体辐射 .....	145
二、辉焰辐射 .....	150
<b>参考文献</b> .....	158
<b>第四章 燃料喷射装置的设计</b> .....	160
<b>第一节 煤气喷头</b> .....	160
一、预混合燃烧型喷头 .....	160
二、扩散燃烧型喷头 .....	166
<b>第二节 液体燃料用的喷雾器</b> .....	167
一、油压喷射阀 .....	167
二、二流体喷射阀 .....	185
三、旋转型喷雾器 .....	195
<b>参考文献</b> .....	200
<b>第五章 调风器的设计</b> .....	201
<b>第一节 调风器的功能和型式</b> .....	201
一、风箱 .....	201
二、稳焰器及调风器叶片 .....	206
三、调风器的实例 .....	208
<b>第二节 空气流和燃烧性能</b> .....	210

一、空气流速·····	210
二、一次和二次空气量的分配·····	213
三、旋转度·····	216
<b>第三节 设计理论及设计方法</b> ·····	220
一、流动特性·····	220
二、主要部分的设计·····	228
<b>参考文献</b> ·····	234
<b>第六章 燃烧装置的种类、构造及其设计</b> ·····	235
<b>第一节 煤气烧嘴</b> ·····	235
一、烧嘴选择的重要性·····	235
二、确定烧嘴和燃烧设备的条件·····	236
三、煤气烧嘴的特征和种类·····	238
四、煤气烧嘴的设计·····	253
<b>第二节 低NO<sub>x</sub>烧嘴</b> ·····	285
一、混合促进方式·····	286
二、分割火焰方式·····	286
三、自己再循环方式·····	286
四、分段燃烧组合方式·····	289
五、乳化燃料·····	292
六、平火焰烧嘴·····	292
七、高速烧嘴·····	293
八、辐射型烧嘴·····	296
<b>第三节 煤气辐射管</b> ·····	297
一、煤气辐射管的特征、种类和用途·····	298
二、辐射管的设计·····	309
三、辐射管的材料及破坏机理·····	314
四、辐射管烧嘴·····	318
五、辐射管换热器·····	321
六、辐射管的燃烧控制·····	327
<b>第四节 油喷嘴</b> ·····	329
一、喷雾燃烧方式·····	329
二、蒸发燃烧方式·····	342

第五节	油气混烧烧嘴 .....	344
第六节	粉煤烧嘴 .....	346
第七节	特殊燃烧装置 .....	347
	参考文献 .....	348
<b>第七章</b>	<b>燃烧装置的附属设备 .....</b>	<b>350</b>
第一节	空气和燃料供给装置 .....	350
一、	空气供给装置 .....	350
二、	燃料供给装置 .....	352
三、	煤气和空气混合装置 .....	365
第二节	点火装置 .....	367
一、	点火方法 .....	367
二、	点火器和点火烧嘴 .....	368
第三节	自动控制装置 .....	370
一、	燃烧自动控制的原理 .....	370
二、	自动点火、熄火以及安全装置 .....	371
三、	运转中的自动控制装置 .....	376
	参考文献 .....	394
<b>第八章</b>	<b>燃烧装置的管理和维护 .....</b>	<b>395</b>
第一节	安全管理 .....	395
一、	防止中毒 .....	395
二、	防止火灾和爆炸 .....	396
三、	气体置换 .....	400
四、	火源 .....	400
第二节	燃烧管理 .....	403
一、	产生异常燃烧的原因和采取的措施 .....	403
二、	燃烧管理用的仪表 .....	404
第三节	维护 .....	408
一、	燃烧装置本体 .....	408
二、	附属装置 .....	408

# 第一章 燃料及其燃烧

## 第一节 燃 料

所谓燃料，就是在空气中容易燃烧，并能够比较经济地利用其燃烧热的物质的总称。燃料的供给应该比较容易，价格低廉，贮藏、运输和使用等既便利又安全。按其状态大体可以分为气体燃料、液体燃料和固体燃料三种。

### 一、气体燃料

#### 1. 气体燃料的种类

主要由可燃性气体组成的燃料是气体燃料。气体燃料因组成成分不同，性质也多种多样。正如过去大家所熟知的那样，气体燃料大体分为人工煤气和天然气两种，人工煤气包括以一氧化碳(CO)、氢(H<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)为主体的煤气系统以及以饱和烃(C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>)和不饱和烃(C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>等)为主体的石油气系统，而天然气则是从自然界产出的气体燃料。

#### (1) 人工煤气

从前，用得最广泛的气体燃料是人工制取的煤气。主要是由液体燃料或固体燃料经过某种加工而得到的主产物或副产物。因为由固体燃料特地制成气体燃料来使用，一般来说是不经济的，所以除特殊场合外，通常不大使用这种方法。但作为其他副产物而得到的气体燃料，应用在工业上，则是颇为有利的。这种人工煤气按产生的途径和方法，大体有下列几种。

#### 1) 高炉煤气(B煤气)

高炉煤气是炼铁厂的高炉产生的煤气。它的发热量比较低，一般为700~900千卡/标米<sup>3</sup>，但是，因其产量大，故可用来发电或供给本厂作为燃料。高炉煤气的主要成分是一氧化碳(CO)，它是一种容易引起中毒的气体，使用时必须注意。



## 2) 焦炉煤气 (C 煤气)

焦炉煤气是焦炉炼焦时的副产物，是煤气的一种。发热量约为4000~4200千卡/标米<sup>3</sup>。通常按一定比例与高炉煤气混合，用在加热炉和均热炉上，但有特殊工艺要求的热处理等工业炉，则通常单独使用焦炉煤气。

## 3) 裂化石油气

裂化石油气是用水蒸气、空气或氧等气体作为气化剂，将石油等油类裂化而得到的可燃性气体。制取方法有直接裂化法、部分燃烧法和接触裂化法等。因制取方法不同，其性质有很大区别。这种石油气通常作为城市民用或与城市煤气混合起来使用。

## 4) 液化石油气 (LPG)

液化石油气是将炼油厂在常压蒸馏、裂化和改质等过程中发生的气体进行分离之后，在常温下加以10公斤/厘米<sup>2</sup>左右的压力，使其成为液体的碳氢化合物。它的特点是以液体状态输送和贮藏，而在燃烧时又可以以气体状态使用。发热量高达20000~30000千卡/标米<sup>3</sup>，而且含硫量非常低。最近，液化石油气在各个方面都得到广泛地应用。

## 5) 富气 (林德气)

富气是石油精制过程中产生的气体，经石化等工业使用了必要成分之后，将其残余气体经过还原而得到的燃气。它与液化石油气大体相同。

## 6) 城市煤气

城市煤气过去主要是民用，最近在工业以及城市的区域性采暖设备上，也开始使用。它可由裂化石油气、天然气等气体与煤气相混合来制取。

除此以外，还有发生炉煤气、水煤气以及转炉排出的煤气等气体燃料，但是现在大部分不怎么使用，在此从略。

## (2) 天然气

天然气是在自然界作为气体燃料存在的唯一的化石燃料。它的组成随着产地和时期而有所不同，但其主要成分是甲烷(CH<sub>4</sub>)，

发热量比较高。最近随着输送和贮藏技术的发展，天然气的使用越来越广泛。

此外，还有液化天然气（LNG）。它是采用特殊设备将天然气加以46.2公斤/厘米<sup>2</sup>的压力进行压缩，同时冷却，使其降低到临界温度（-82.5℃）以下，液化成液体而制成的。通常作为城市民用或发电用，并且可以用船舶进行远距离输送，作为气体燃料使用。

一般在工业上使用的人工煤气和天然气等气体燃料的组成，列于表1-1中。

## 2. 气体燃料的特性

过去，人们一般认为气体燃料的特点是使用方便和容易进行燃烧调节。当然一般可以这样认为，但是总的来说，从煤系气体燃料到液化石油气，以至新型气体燃料，都具有下述的类似特点。

### （1）具有无公害燃料的特性

无论是液化石油气，还是煤系气体燃料，由于最近煤气脱硫技术的进步和成本的降低，因此，在煤气燃烧时几乎可以忽视SO<sub>x</sub>的发生。

而气体燃料中所含的氮，与其他燃料相比，燃烧时转化成的NO<sub>x</sub>（Fuel NO<sub>x</sub>）少，并且对于高温生成的NO<sub>x</sub>（Thermal NO<sub>x</sub>）量的抑制，也比其他燃料容易实现。

图1-1是在某实验炉上，保持同样空气过剩系数和火焰温度的条件下，单独燃烧重油、焦炉煤气、甲烷时，NO<sub>x</sub>发生量的比较。实际上，煤气多数是在空气过剩系数接近于1.0的情况下进行燃烧，因此可以认为在抑制NO<sub>x</sub>的发生方面也是非常有利的。

经验证明，在燃烧气体燃料时几乎不用特殊担心炭黑的产生。因此可以说，只有在燃烧精制的气体燃料时，才有可能为防止公害提供非常有利的条件。

### （2）容易进行燃烧调节

众所周知，燃烧气体燃料时，只要烧嘴的选择合适，便可以

表 1-1 工业用各种气体燃料的组成 (例)

种类	密度 (公斤/标米 <sup>3</sup> )	高发热量 (千卡/标米 <sup>3</sup> )	组成 (%)										
			CO <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>	
高炉煤气	1.34	750~900	11.2~18.8	—	—	23.2~27.0	2.0~2.4	0~0.1	—	—	—	—	55.5~59.8
焦炉煤气	0.45~0.50	4500~5000	2.5~2.8	3.0~3.8	0.2~0.7	6.0~9.7	52.1~52.7	27.0~32.1	—	—	—	—	2.4~4.5
裂化石油气	1.20	12500	6.3	16.4	—	4.0	31.0	33.5	(C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub> ) 8.8				—
裂化石油气	2.35	29690	—	—	—	—	—	(C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub> ) 10.0		21.5	68.5	—	—
液化石油气	1.9	23300	—	—	—	—	—	—	—	60~80	40~20	—	—
富气 (空气稀释)	1.71	10000	—	—	13.7	—	—	(C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> ) 25.0		0.7	9.1	51.5	—
液化天然气	0.71	9600	—	—	—	—	—	97.6	1.4	0.78	0.26	—	—
城市煤气	0.71	5000	10.1	n ≥ 4 0.5	2.1	4.6	37.2	26.7	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> } 4.8		C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> } 1.3		12.7

在较宽范围内进行燃烧调节，而且还可以实现燃烧的微调，使其处于最佳状态。

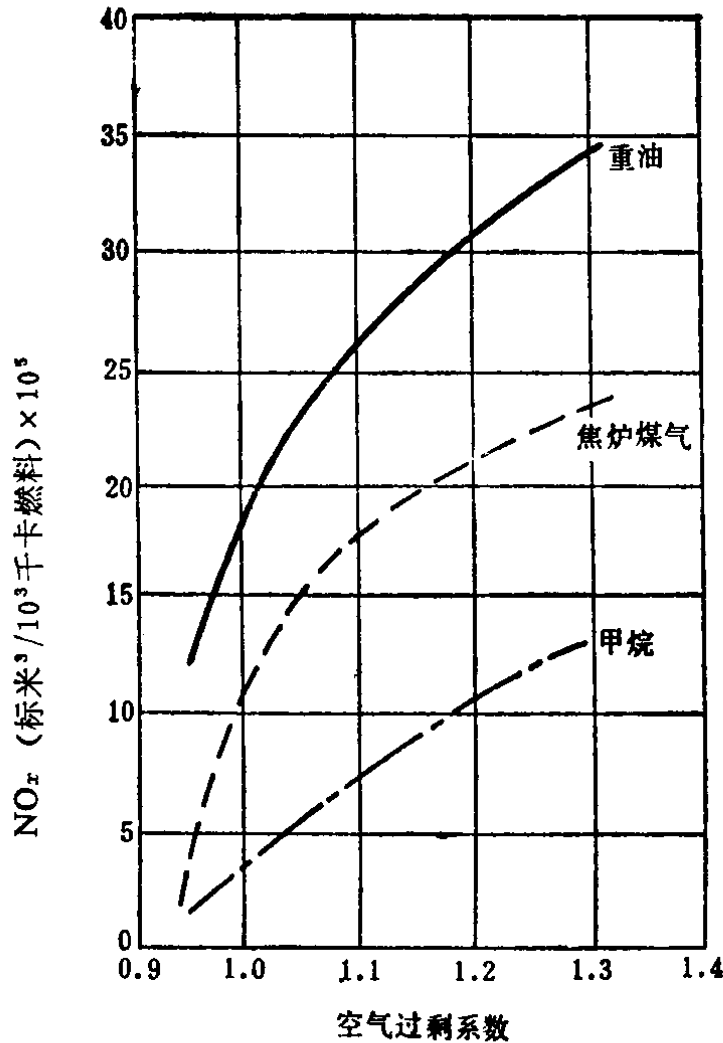


图 1-1 不同燃料 NO<sub>x</sub> 排出量比较

燃烧气体燃料不仅可以适应低过剩氧燃烧，而且具有能够迅速适应负荷变动的特性，从而也为降低能耗、提高燃烧效率提供了有利条件。

### (3) 作业性好

燃烧气体燃料不存在残渣的问题，虽然烧嘴头也有污染等现象，但与其他燃料相比，非常容易处理。然而，即使都是气体燃料，含有不饱和烃的，由于热分解，炭会固结在烧嘴头上，这一点告诉我们，使用气体燃料也不是没有什么问题的。

而且对于液化石油气等燃烧范围窄的气体燃料，为了防止断火，需要装设经常燃烧的点火烧嘴。这一点对于燃烧作业性好的气体燃料，容易被忽视，应该加以注意。

#### (4) 容易调整发热量

特别是在燃烧液化石油气等气体燃料时，在避开爆炸范围的部分加入空气，可以任意调整发热量。表 1-1 中富气的例子，实际上就是调整发热量的一个例子。它是在利用原有燃烧设备的条件下，为了确保所需要的 10000 千卡/标米<sup>3</sup>发热量而混入约两倍于煤气的空气量。

气体燃料的性质列于表 1-2 和表 1-3 中。

## 二、液体燃料

近年来，液体燃料在工业上的应用有了显著地增加，成为内燃机、锅炉以及工业炉等热工设备的极为重要的燃料。自然界产出的液体燃料是石油，把从油井开采出来的保持原来状态的石油称为原油。原油通常呈绿色、褐色或黑色，带有荧光。比重为 0.78~0.95，主要成分和各种碳氢化合物，此外也含有少量的氧、硫以及氮化物。

最近，也有将原油直接作为燃料使用的，但是通常经过蒸馏分离出汽油、煤油、轻油、重油以及沥青，它们有各种不同的用途。除了上述以外，液体燃料还有焦油和酒精等。表 1-4 示出主要液体燃料的性质。

## 三、固体燃料

从自然界开采出来的固体燃料有煤、泥煤和木材等，将它们加工可以制成焦炭、煤球、粉煤以及木炭等。

煤是植物被埋在地下，长年累月受到高温、高压以及微生物的作用，即炭化作用而生成的可燃性物质。煤炭大体可以分为无烟煤、烟煤以及褐煤三种。这些煤的主要成分是碳，还有氢、氧、硫和氮，此外还含有灰分和水分。所含各种元素的比例，不仅随煤的种类不同而不同，即使属于同一种煤，也因其产地不同而元素组成不同。表 1-5 示出主要固体燃料的性质。

表 1-2 主要人工煤气的性质

煤气种类	气化用原料		煤气组成 (容积%) (例)							高发热量 (千卡/标 米 <sup>3</sup> )	产气量 (标米 <sup>3</sup> /吨)	用途
	名称	高发热量 (千卡/公斤)	CO <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>			
发生炉煤气	发生炉用煤	6390	4.2	—	0.4	27.0	12.5	4.0	51.9	1470	3650	工业用燃料
发生炉煤气	焦炭	6910	5.3	—	0.2	26.3	10.0	0.9	57.3	1190	4630	同上
水煤气	焦炭	6600	10.5	—	—	30.5	52.5	1.0	5.5	2617	1440	合成原料
水煤气	焦炭	6600	2.8	—	—	72.4	22.6	0.4	1.6	2915	1960	同上
水煤气	粉煤	6300	17.8	—	—	29.3	33.3	2.6	16.9	2149	1670	同上
水煤气	微粉煤	4530	13.8	—	—	54.4	28.0	0.1	3.6	2508	1510	合成原料
增热发生炉煤气	发生炉用煤 + 重油	—	8.9	5.2	0.6	26.3	34.8	13.0	11.2	4350	1638 (每吨纯煤)	城市煤气
增热水煤气	焦炭 + 重油	5650	6.2	8.3	—	27.8	38.3	7.6	1.4	4550	1785	同上

续表 1-2

煤气种类	气化用原料		煤气组成 (容积%) (例)								高发热量 (千卡/标 米 <sup>3</sup> )	产气量 (标米 <sup>3</sup> /吨)	用途
	名称	高热热量 (千卡/公斤)	CO <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>				
加压气化气	小块煤	4680	2.0	0.8	0.2	20.3	53.8	20.0	3.0	4220	878	城市煤气 合成原料	
石油气	原油	—	11.8	9.0	0.6	11.8	45.9	15.5	3.7	5100	1590	城市煤气	
石油气	原油	—	10.0	7.0	1.0	14.0	48.0	15.0	4.0	4988	1460	同上	
石油气	原油 孚 华	—	3.9	26.9	1.0	4.3	19.7	40.3	2.6	9414	592	同上	
石油气	重油	9819	13.5	—	0.1	36.5	45.6	0.3	3.5	2523	3110	合成原料	
石油气	原油	—	11.7	—	—	39.6	46.7	0.5	1.5	—	2780	同上	
石油气	重油	10230	3.7	—	—	48.0	47.5	0.3	2.0	2931	2980	同上	
石油气	原油	—	4.4	—	—	46.4	47.1	0.2	1.3	—	3180	同上	

表 1-3 煤气成分的性质

煤气成分	分子量	比重 (空气 = 1)	水中的溶解度 0℃ 760毫米汞柱	重量 (克/米 <sup>3</sup> ) 0℃ 760毫米汞柱	高发热量(千卡/ 米 <sup>3</sup> ) 0℃ 760毫米汞柱	最高火焰温度 (℃)	氧气需要量 (米 <sup>3</sup> /米 <sup>3</sup> )	
							氧	气
一氧化碳	28.0	0.9663	0.0354	1250	3036	2182	0.5	2.38
氢	2.016	0.0696	0.0215	89.9	3055	2182	0.5	2.38
甲烷	16.03	0.5533	0.0556	716.8	9498	2005	2.0	9.52
乙烷	30.05	1.0371	0.0987	1341	16515	2043	3.5	16.66
乙烯	28.03	0.9675	0.226	1251	14892	2155	3.0	14.28
丙烷	44.06	1.5210	—	1966	23560	2120	5.0	23.80
丙烯	42.05	1.4512	0.446	1876	21956	2110	4.5	21.42
丁烷	58.12	2.0047	—	2591	30620	2130	6.5	30.95
丁烯	56.10	1.9350	—	2501	29020	2099	6.0	28.56
苯	78.05	2.6938	—	3482	35702	2127	7.5	35.70
乙炔	26.02	0.8981	1.73	1161	13930	2630	2.5	11.90



续表 1-3

煤气成分	燃烧产物 (米 <sup>3</sup> /米 <sup>3</sup> )						燃 点 (°C)			可燃极限 (%) 常温	
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	总 量		氧 气	空 气	下 限	上 限		
				干	湿						
一氧化碳	1.0	—	1.88	2.83	2.88	637~658	674~658	12.5	74.2		
氢	—	1.0	1.88	2.88	2.88	580~590	580~590	4.0	74.2		
甲烷	1.0	2.0	7.52	8.52	10.53	556~700	650~750	5.0	15.0		
乙烷	2.0	3.0	13.16	15.16	18.16	520~630	520~630	3.0	12.5		
乙烯	2.0	2.0	11.28	13.28	15.28	500~519	542~547	2.8	28.6		
丙烷	3.0	4.0	18.8	21.8	25.8	490~572	525~588	2.1	9.35		
丙烯	3.0	3.0	16.92	19.92	22.92	—	—	2.0	11.1		
丁烷	4.0	5.0	24.45	28.45	29.45	—	489~569	1.8	8.4		
丁烯	4.0	4.0	22.56	26.65	30.56	—	—	1.6	9.9		
苯	6.0	3.0	28.20	34.20	37.20	662	740	1.4	7.1		
乙炔	2.0	1.0	9.40	11.40	12.40	416~440	406~440	2.5	80.0		