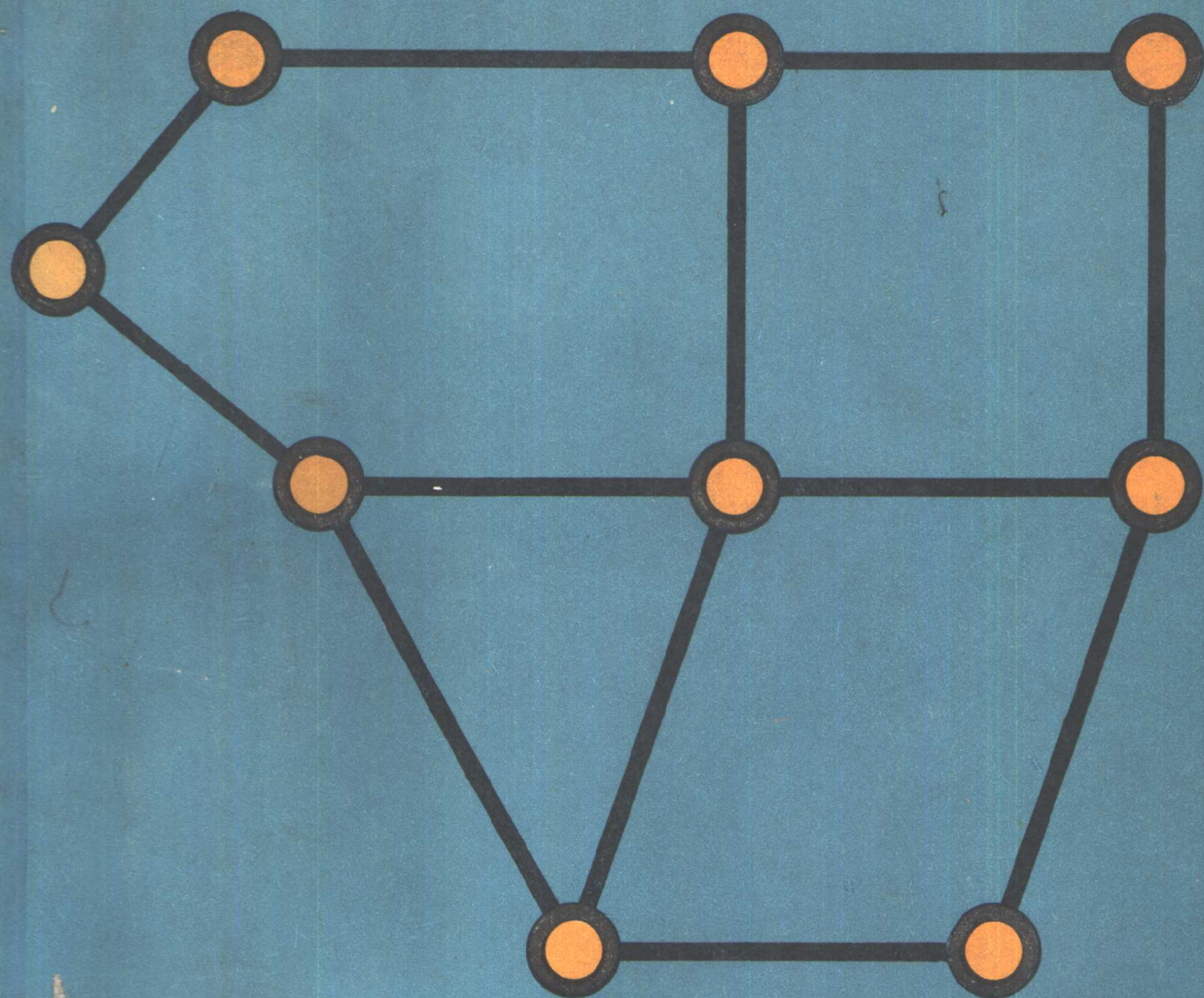


席德粹 刘松林 王可仁 郑安涛 编著



城市 煤气管网 设计与施工

上海科学技术出版社

城市煤气管网设计与施工

席德粹 刘松林 编著
王可仁 郑安涛

上海科学技术出版社

内 容 提 要

城市煤气在发展生产、方便人民生活、合理利用煤炭资源、降低能耗、减少污染、改善环境卫生等方面起着重要的作用。实现城市煤气化,是建设社会主义现代化城市的一个重要方面。

本书系统总结了上海市煤气公司在城市煤气管网规划、设计、施工、维修等方面的实际经验,同时也介绍近年来在这方面开发的新技术、新工艺和科研成果。

本书内容丰富、叙述简明、资料可靠。许多公式、数据、图表都是多年来实际经验的总结,对新建城市煤气管网有很大参考价值。施工工艺、操作规程、运行管理、维修技术对已有城市煤气的地区有很大帮助。

本书可供城市煤气设计、施工和管理人员阅读。也可作为大、中专院校有关专业教学参考用书。

城市煤气管网设计与施工

席德粹 刘松林 编著
王可仁 郑安涛

上海科学技术出版社出版
(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷三厂印刷

开本 787×1002 1/16 印张 32 字数 768,000

1989 年 2 月第 1 版 1988 年 2 月第 1 次印刷

印数 1—9,600

ISBN 7-5323-0642-9 TU·33

统一书号: 15119·2566 定价: 7.60 元

前 言

燃料作为能源是保证国民经济向前发展的重要因素。城市煤气属于气体燃料,它同固体、液体燃料相比,有许多优点:城市煤气使用方便;煤气燃具燃烧完全,热效率高,易调节、控制;煤气燃烧后有害气体少,无残渣;城市煤气通过管道直接送至用户,减轻城市交通运输量,既方便又可靠;城市煤气用于工业上加热,可以改革工艺,提高产品的产量和质量。城市煤气作为民用燃料时,因能改善家庭环境卫生、节约时间,使人们能从繁杂的家务劳动中解放出来,更显示其优越性。总之,城市煤气在发展生产、方便人民生活、合理利用煤炭资源、节约能耗、减少污染、改善环境卫生等方面起着重要作用。实现城市煤气化,是建设社会主义现代化城市的一个重要方面。

我国的城市煤气事业,近年来发展很快。特别是随着石油工业的高速度发展,许多城市新建了液化石油气和天然气的供应设施。已建立煤气供应设施的城市,亦由过去的以人工煤气为主要气源的状况逐步改变为以人工煤气、液化石油气和天然气等多种气源供应的城市供气系统。不少中小城市和县城,利用焦炉余气、化肥厂的弛放气、沼气等各种气源,积极发展民用煤气。北京、天津、上海、沈阳等大城市正在新建、扩建焦炉及其他制气设备,引进与开发新的制气技术,气源规模将明显扩大,为城市煤气化奠定了基础。

为了适应城市煤气发展的需要,根据上海市煤气公司在城市煤气管网规划、设计、施工、运行、管理、维修等方面的实践经验,以及近年来在这方面开发的新技术、新工艺和科研成果,进行收集,汇总编写了本书。书中的有些公式、数据、图表、规定、施工工艺、操作规程等均为我们多年来所积累、并在实际工作中使用至今的经验总结。某些地方可能只适合上海地区,但大部分都能为全国各地同行们使用与参考。

本书着重介绍城市煤气管网的规划、设计与施工。

本书由席德粹、刘松林、王可仁、郑安涛等同志编写,席德粹同志主编。同济大学姜正侯、任炽明同志对本书进行审阅。陈文桂、蔡尔海、朱元庆、朱功泽、张立恍以及朱韵维、方云隆、贺言通等同志为本书编写提供了很多帮助。

由于编写经验不足,缺点、错误难免,恳请读者批评、指正。

编 者 1984.12.

目 录

第一章 概 述

第一节 煤气的燃烧特性	1	第三节 城市煤气的组分和质量要求	15
一、热值	2	一、城市煤气的组分	15
二、燃烧所需空气量	3	二、城市煤气的质量要求	17
三、烟气量	4	第四节 城市煤气的输配系统	18
四、燃气的互换性	4	一、城市煤气输配系统的压力级制	18
五、着火、着火温度	5	二、城市煤气输配系统的主要设备	18
六、爆炸极限	5	第五节 城市煤气常用仪表	22
七、燃烧温度	6	一、常用的煤气计量表	22
八、火焰传布及火焰传布速度	7	二、其他的煤气计量仪表	25
九、燃烧方法及燃烧稳定性	8	三、常用的压力仪表	25
第二节 煤气的分类	10	第六节 燃烧器具	27
一、人工煤气	10	一、燃烧器	27
二、液化石油气	13	二、民用煤气用具	27
三、天然气	14	三、工业燃烧器	30
四、沼气	15		

第二章 城市煤气管网规划

第一节 城市煤气管网规划的基本要求	33	第五节 煤气储存	58
一、编制城市煤气管网规划的原则和任务	33	一、煤气生产与消费的平衡方法	58
二、编制城市煤气管网规划的基础资料	33	二、煤气储存的作用	59
三、城市煤气管网规划的文件	34	三、煤气储存方式	59
第二节 城市煤气供应原则	36	四、煤气储存设备	59
一、煤气与其他燃料使用效果比较	36	五、储气容积的计算	63
二、供气的一般原则	37	六、压送机的选择	66
三、工业和民用供气的比例	37	七、储配站的工艺流程和管道布置	68
第三节 城市煤气需用量计算	37	八、储配站的要求	68
一、城市煤气年用量的计算	38	九、储配站址选择原则	69
二、城市煤气的用气工况	47	第六节 调压器	69
三、煤气计算用量的确定	50	一、调压器的分类	69
第四节 城市煤气管网系统及选择	55	二、调压器通过能力的计算	69
一、城市煤气管道的分类	55	三、调压器通过能力的换算公式	70
二、煤气用户连接各级管网的条件	56	四、调压器旁通管及管径的决定	72
三、城市煤气管网系统	56	五、调压器室	72
四、城市煤气的压力级制	57	六、调压器作用半径的确定	75
五、煤气管网系统的选择	58	第七节 城市煤气管网的水力计算	75

一、水力计算基本公式	75	十、管道计算	95
二、摩阻系数 λ	76	第八节 电子计算机在管网水力计算上 的应用	127
三、实用的水力计算公式	80	一、ALGOL-60 电算程序	127
四、煤气管道水力计算图	82	二、ALGOL-60 计算程序的改进	149
五、压力修正系数	84	三、BASIC 电算程序	154
六、局部阻力	88	四、FORTRAN-IV 电算程序	155
七、附加压头	90	第九节 城市煤气管网扩大初步设计 实例	156
八、管道的当量管径和当量长度	90		
九、煤气管道总压力降和压力降分配	92		

第三章 城市煤气管道施工图设计

第一节 地下煤气干管施工图设计	177	第三节 地下煤气管道施工图设计的一 般规定	226
一、干管施工图设计的步骤	177	第四节 地上煤气管道施工图设计原则	233
二、穿越障碍物的设计	182	一、地上煤气管道设计布置原则	233
三、钢管的防腐设计	199	二、煤气表装置的设计原则	237
四、防止浮管的设计	221	三、家庭用煤气燃具装置部位设计原则	242
五、钢管管壁厚度的设计	224	四、公共建筑用气管道与设备设计原则	243
第二节 编制设计预算	225	五、工业企业用气管道的设计原则	246
一、设计预算编制的要求	225		
二、设计预算编制的内容和方法	225		

第四章 管材及主要施工机具

第一节 管材及其附件	249	第四节 下管和接管设备	266
一、管道	249	一、下管机具	266
二、管路附件	253	二、割管工具	267
三、管道设备	258	三、打眼机具	268
第二节 破路工程主要设备	261	四、铰制螺纹机具	268
一、路面破碎机	261	五、弯管机	269
二、柴油空气压缩机	262	六、手动牵引机	269
三、凿岩机	263	七、测坡工具	270
四、其他破路机械	263	八、接口制作工具	271
第三节 土方工程主要设备	263	第五节 其他工具设备	273
一、土方开挖机具	263	一、阻气袋	273
二、填土机具	264	二、隔离面罩和空气呼吸器	274
三、抽水机具	265	三、卤素检漏仪	275
四、支撑工具	265		

第五章 地上管施工与表具安装

第一节 地上管的管材与接口	278	一、施工卡与施工图	279
一、管材	278	二、设计交底与现场踏勘	284
二、接口	278	三、制订工艺和准备材料、机具设备	284
第二节 施工前的准备	279	第三节 地上管施工的基本操作	285

一、铰制螺纹与切割	285	安装	298
二、调直与弯曲	286	一、大锅灶的安装	298
三、装接	287	二、大锅灶的校验	299
四、嵌装三通与镶接	289	三、大锅灶的安全操作规程	299
五、管卡与管架设置	291	四、其他灶具的安装要求	300
第四节 民用煤气表具的安装	292	第六节 工业用户设备的安装	301
一、民用煤气表具安装	292	第七节 地上管与用气设备的质量检验	
二、其他燃具的安装	294	与试运转	302
三、外墙明管与室内立管的安装	294	一、地上管的质量检验	302
四、工厂化施工	295	二、地上管验漏	303
五、老用户的移装、改装	296	三、地上管及用气设备的通气试运转	304
第五节 营业、事业、团体用户的表具			

第六章 地下管施工与附属设备的安装

第一节 地下管施工的一般要求	305	三、焊接接口	365
一、常用管材及管件	305	四、机械接口	369
二、管位	308	五、滑入式接口	370
三、定线放样	308	六、其他接口	372
四、各种地下管线的识别和保护	310	第六节 地下煤气管钻孔、攻螺纹和割	
五、管沟土方工程	313	管	373
六、管道敷设	322	一、钻孔、攻螺纹	373
第二节 管道的吊装	326	二、割管操作	377
一、铸铁管吊装下沟	326	第七节 地下煤气管道的防腐蚀施工	379
二、钢管吊装下沟	329	一、绝缘防腐层施工	380
第三节 钢管施工与管件制作	331	二、钢管采用牺牲阳极保护的施工	383
一、钢板管件设计和放样	331	第八节 聚乙烯管施工	385
二、钢板管件的现场测绘和拼装	335	第九节 地下煤气管道施工质量检验	389
三、特殊位置的钢管连接	339	一、地下煤气管道施工质量检验指标	389
四、钢管的拼装焊接要求	341	二、地下煤气管道气密性检验和合格标	
第四节 煤气管道附属设备的安装	346	准的计算	391
一、聚水井的安装	346	三、地下钢管焊接质量的检验	395
二、阀门的安装	349	四、地下钢管绝缘层质量的检验	398
三、调压器的安装	351	五、地下煤气管道附属设备安装质量的	
四、温度补偿器的安装	354	检验	399
第五节 煤气管道接口的施工	357	六、调压器室和调压器安装质量的检验	399
一、承插式接口	357	七、铸铁管材料检验及测试设备的应用	400
二、法兰接口	363		

第七章 地下煤气管道特殊施工

第一节 地下煤气管嵌接三通管及镶		二、地下钢管嵌接三通管及镶接操作	409
接	403	第二节 顶管施工方法	411
一、地下铸铁管嵌接三通管及镶接操作	403	一、顶力计算和设备选择	411

二、管内出土方法	412	一、漏气点的检测	431
三、管道顶进的导向、测量和纠偏	417	二、寻找运行管道的漏气点	433
四、顶管工作坑设置	418	三、管道漏气的修理	433
五、减少顶进摩阻力的方法	419	第五节 管道大修更新施工	438
六、顶管施工主要操作顺序	421	一、管道大修更新项目的确定	438
第三节 煤气管道穿越河流施工	422	二、施工前准备	438
一、架空跨越法	422	三、原管位拆排施工	439
二、水下敷设法	426	四、整理坡度施工	439
第四节 地下煤气管漏气的检测和修理	431	五、地下管道漏水的防范	440
		六、对已废除管段的防漏措施	442
第八章 煤气管道施工安全技术			
第一节 施工中防止煤气燃烧、爆炸、中毒的技术措施	443	第三节 管道施工安全操作要点	454
一、防止煤气燃烧、爆炸的措施	443	一、土方工程安全操作要点	454
二、施工现场紧急灭火的方法	446	二、吊装及管件就位安全操作要点	455
三、防止施工人员煤气中毒的措施	447	三、接管安全操作要点	455
四、煤气中毒后的急救和护理	448	四、带气施工安全操作要点	457
第二节 煤气管道的停气降压与换气投产	448	五、气密性试验安全操作要点	458
一、煤气管道的停气降压施工	448	六、高空作业安全操作要点	459
二、煤气管道的换气投产	450	七、市区施工安全操作要点	460
		八、停气降压施工安全操作要点	460
		九、钢管绝缘层施工安全操作要点	462
第九章 施工组织设计及验收拨交			
第一节 施工组织设计	463	三、物资工具管理	472
一、施工组织设计编制的主要依据	463	四、质量管理	472
二、施工组织设计编制的主要原则	463	五、安全管理	472
三、施工组织设计的主要内容	463	六、设备管理	473
第二节 施工现场管理	470	七、成本管理	473
一、施工进度管理	471	第三节 竣工图的测绘	474
二、劳动力管理	471	第四节 地下管道工程验收和拨交	478
附录一 低压煤气管水力计算单位长度压力降便查表	485		
附录二 图例	490		
附录三 常用管材规格	492		

第一章 概 述

城市煤气是指可以供城市居民、企业事业单位使用的各种气体燃料的总称。随着资源的开发和综合利用,用作城市煤气的气体燃料无论在数量上、品种上都在不断增长与扩大。

人们最早发现的气体燃料是天然气。我国是世界上最早发现和使用天然气的国家。早在公元前十一世纪初的《周易》上便有“泽中有火”的记载。公元前一世纪,西汉杨雄的《蜀都赋》和班固的《汉书》中亦有“火井”,“火从地出”的记载。四川成都和邛县出土的东汉画像砖上的煮盐图表明,我国在公元一、二世纪已利用天然气煮盐。公元 900 年有我们祖先利用竹管输送天然气用于照明的文字记载。

1670 年英国的约翰·克莱顿(John Clayton)教士首先发现煤经干馏后可以得到一种气体燃料。1792 年苏格兰人威廉·默多克(W. Murdoch)第一个用煤制造出煤气,并将它用作照明。1808 年伦敦出现了世界上第一个煤气公司,当时煤气用于街道的煤气灯照明。以后欧洲各国相继发展人工制气,并迅速传布到世界各地。1864 年英国资本家在上海建立了第一个人工制气厂。廿世纪初电力照明崛起,煤气开始转向家庭炊事、采暖及工业上加热。此后,煤炭的气化技术发展很快,各种炉型的制气炉相继研制成功,使煤气工业进入一个新的发展时期。

二次世界大战后,随着石油工业的发展,炼油厂副产品液化石油气、油制气和天然气资源的开发,使城市煤气的气源大大增加。尤其是天然气的液化技术的进展,长距离输气管的敷设成功,使一些资源缺少的国家可以通过进口天然气而加快本国城市煤气化的速度。煤气供应已从城市普及到农村,形成全国以至跨国的煤气供气系统,各种口径的煤气输送管线长达几十万公里。煤气管道的最大口径已达 2500 毫米。随着天然气远距离输气技术的开发,管网级制向高压、超高压方向发展。最高压力已超过 50×10^5 帕。贮气方式亦向高压、地下贮气方向发展,最大的地下贮气库可贮藏天然气 80~90 亿立方米。电脑在煤气生产、输送、调度上的广泛使用,大大提高了城市煤气供应的可靠性和经济性。

我国的城市煤气还处在发展时期。解放初仅有上海和东北的九个城市具有煤气设施,而且设备陈旧,供气量少。上海是全国最早建有城市煤气设施的城市,已有 120 多年的历史。但在解放前的 80 多年中煤气用户只有一万八千多户,管道总长度仅四百多公里,日供气量不到 9 万立方米。而解放后的卅多年,煤气用户增加了四十多倍,供气量增长了三十多倍,管网长度增加近五倍,储气能力增长了七倍。

我国城市煤气发展的潜力很大,资源丰富。目前,全国已有一百多个城市先后建立了煤气供应设施。随着气体燃料在能源结构中所占的比重增加,城市煤气事业必将得到更为迅速的发展。

第一节 煤气的燃烧特性

煤气是以可燃气体为主要组分的混合气体燃料。五十年代以前煤气主要采用煤加工生

产,因此习惯地把这类混合气体燃料称为“煤气”。

随着社会生产的发展,煤气的生产方式、气源及组分都有了很大变化。天然气、液化石油气逐渐成为城市煤气的重要气源。因此近年来也有将“煤气”改称为“燃气”,使其有更广泛的涵义。

城市煤气是指可以作为供给城市居民、工业使用的煤气。并不是所有煤气均可作为城市煤气使用,对供城市使用的煤气——城市煤气,是有一定的质量标准的。在我国作为城市煤气的主要气源有:人工煤气、天然气及液化石油气三大类。

人工煤气的种类较多,有以固体燃料——煤为原料的煤制煤气,也有以液体燃料——重油、石脑油等为原料的油制气化煤气。天然气包括气井天然气、石油伴生气和矿井气等。液化石油气一部分来自油气田,一部分来自炼油厂。随着我国石油工业的发展,液化石油气将得到更为广泛的应用。

城市煤气又可根据热值不同分为两类,一类是低热值煤气,它的热值为 16000~38000 千焦/米³(标准)。另一类是高热值煤气,它的热值为 38000 千焦/米³(标准)以上。城市煤气中的煤制煤气一般是低热值煤气。油制气化煤气、天然气、液化石油气等一般是高热值煤气。

煤气的燃烧特性有下列几项。

一、热值

城市煤气中的可燃成分(H_2 、 CO 、 C_mH_n 和 H_2S 等)在一定条件下与氧发生激烈的氧化作用,并产生大量的热和光的物理化学反应过程称为燃烧。而 1 米³(标准)城市煤气完全燃烧时所放出的热量称该城市煤气的热值,单位为千焦/米³(标准)。

热值可分为高热值和低热值。高热值是指 1 米³(标准)城市煤气完全燃烧后其烟气被冷却到原始温度,包括其中的水蒸气以凝结水状态排出时所放出的全部热量。低热值是指 1 米³(标准)城市煤气完全燃烧后其烟气被冷却到原始温度,而其中的水蒸气仍为气态时所放出的热量。

显然,城市煤气的高热值在数值上大于其低热值,两者之差为水蒸气的气化潜热。

在工程上由于烟气中的水汽一般不会冷凝,通常仍以气体状态随烟气排出,所以常用低热值进行计算。一般焦炉煤气低热值大约 16000~17000 千焦/米³(标准),天然气约 36000~46000 千焦/米³(标准),液化石油气约 88000~120000 千焦/米³(标准)。

单一可燃气体热值见表 1-1。

混合气体的热值可按下式计算:

$$Q_{ym} = (y_1 Q_{y1} + y_2 Q_{y2} + \cdots + y_n Q_{yn}) / 100 = \sum_{i=1}^n y_i Q_{yi} / 100 \quad (1-1)$$

$$Q_{gm} = (g_1 Q_{g1} + g_2 Q_{g2} + \cdots + g_n Q_{gn}) / 100 = \sum_{i=1}^n g_i Q_{gi} / 100 \quad (1-2)$$

式中 Q_{ym} 、 Q_{gm} ——混合气体单位容积和单位质量的热值[千焦/米³(标准)和千焦/公斤];

Q_{yi} 、 Q_{gi} ——混合气体中各组分的单位容积和单位质量的热值[千焦/米³(标准)和千焦/公斤]。

干煤气和湿煤气的低热值可按下式进行换算:

$$Q^d = Q \frac{0.833}{0.833 + d} \quad (1-3)$$

表 1-1 单一可燃气体的燃烧特性^[1]

序号	气 体 名 称	分子式	爆炸极限 L20°C(上/下) 空气中体积 (%)	着火 温度 <i>t</i> (°C)	燃 烧 反 应 式	理论空气量 和耗氧量 [米 ³ (标准)/ 米 ³ (标准)]		理论烟气体量 <i>V_f</i> [米 ³ (标准)/米 ³ (标准)]				热 值 <i>Q</i> [千焦/米 ³ (标准)]	
						空气	氧	CO ₂	H ₂ O	N ₂	<i>V_f</i>	高	低
1	氢	H ₂	75.9/4.0	400	H ₂ +0.5O ₂ =H ₂ O	2.38	0.5	—	1.0	1.88	2.88	12724	10768
2	一氧化碳	CO	74.2/12.5	605	CO+0.5O ₂ =CO ₂	2.38	0.5	1.0	—	1.88	2.88	12615	12615
3	甲 烷	CH ₄	15.0/5.0	540	CH ₄ +2.0O ₂ =CO ₂ +2H ₂ O	9.52	2.0	1.0	2.0	7.52	10.52	39752	35822
4	乙 炔	C ₂ H ₂	80.0/2.5	335	C ₂ H ₂ +2.5O ₂ =2CO ₂ +H ₂ O	11.90	2.5	2.0	1.0	9.40	12.40	58370	56359
5	乙 烯	C ₂ H ₄	34.0/2.7	425	C ₂ H ₄ +3.0O ₂ =2CO ₂ +2H ₂ O	14.28	3.0	2.0	2.0	11.28	15.28	63294	59343
6	乙 烷	C ₂ H ₆	13.0/2.9	515	C ₂ H ₆ +3.5O ₂ =2CO ₂ +3H ₂ O	16.66	3.5	2.0	3.0	13.16	18.16	70190	64251
7	丙 烯	C ₃ H ₆	11.7/2.0	460	C ₃ H ₆ +4.5O ₂ =3CO ₂ +3H ₂ O	21.42	4.5	3.0	3.0	16.92	22.92	93456	87466
8	丙 烷	C ₃ H ₈	9.5/2.1	450	C ₃ H ₈ +5O ₂ =3CO ₂ +4H ₂ O	23.80	5.0	3.0	4.0	18.80	25.80	101039	93030
9	丁 烯	C ₄ H ₈	10.0/1.6	385	C ₄ H ₈ +6.0O ₂ =4CO ₂ +4H ₂ O	28.56	6.0	4.0	4.0	22.56	30.56	125559	117425
10	丁 烷	n-C ₄ H ₁₀	8.5/1.5	365	C ₄ H ₁₀ +6.5O ₂ =4CO ₂ +5H ₂ O	30.94	6.5	4.0	5.0	24.44	33.44	133580	123364
11	戊 烯	C ₅ H ₁₀	8.7/1.4	290	C ₅ H ₁₀ +7.5O ₂ =5CO ₂ +5H ₂ O	35.70	7.5	5.0	5.0	28.20	38.20	158848	148494
12	戊 烷	C ₅ H ₁₂	8.3/1.4	260	C ₅ H ₁₂ +8.0O ₂ =5CO ₂ +6H ₂ O	38.08	8.0	5.0	6.0	30.08	41.08	168237	156374
13	苯	C ₆ H ₆	8.0/1.2	560	C ₆ H ₆ +7.5O ₂ =6CO ₂ +3H ₂ O	35.70	7.5	6.0	3.0	28.20	37.20	161887	155412
14	硫化氢	H ₂ S	45.5/4.3	270	H ₂ S+1.5O ₂ =SO ₂ +H ₂ O	7.14	1.5	1.0	1.0	5.64	7.64	25306	23329

$$Q^d = Q \left(1 - \frac{\varphi P_{sb}}{P} \right)$$

式中 Q^d ——湿煤气的低热值[千焦/米³(标准)湿煤气];

Q ——干煤气的低热值[千焦/米³(标准)干煤气];

d ——煤气的含湿量[公斤/米³(标准)干煤气];

φ ——湿煤气的相对湿度;

P ——煤气的绝对压力(帕);

P_{sb} ——在与煤气相同温度下水蒸气的饱和分压力(帕)。

二、燃烧所需空气量

由燃烧的条件可知,煤气燃烧需要供给适量的氧气。氧气过多或过少都对燃烧不利。燃烧所需要的氧气一般是从空气中直接获得,空气中氧气约占容积的 21%,氮气约占 79%,氮与氧的容积比为

$$\frac{N_2}{O_2} = \frac{79}{21} = 3.76$$

理论空气需要量是指每米³(标准)或每公斤燃气按燃烧反应计算完全燃烧时所需的空气量,单位为米³(标准)/米³(标准)或米³(标准)/公斤。理论空气量也是燃气完全燃烧所需的最小空气量。燃气的热值越高,燃烧所需理论空气量也越多,工程上可按以下公式进行近似计算:

当低热值小于或等于 12000 千焦/米³(标准)时:

$$V_0 = \frac{0.219}{1000} Q \quad (1-4)$$

当低热值大于 12000 千焦/米³(标准)时:

$$V_0 = \frac{0.272}{1000} Q - 0.25 \quad (1-5)$$

对烷烃类燃气(天然气、石油伴生气、液化石油气)可采用:

$$V_0 = \frac{0.28}{1000} Q \quad (1-6)$$

式中 V_0 ——理论空气量[米³(标准)/米³(标准)];

Q ——煤气的低热值[千焦/米³(标准)]。

实际上由于燃气与空气存在混合不均匀性,供给燃烧用的空气量应大于理论空气需要量,就是要供给过量空气以促使完全燃烧。实际供给的空气量 V 与理论空气需要量 V_0 之比称为过剩空气系数 α , 即

$$\alpha = \frac{V}{V_0} \quad \text{或} \quad V = \alpha V_0$$

α 值的大小决定于燃烧公式和燃烧设备的运行工况。在工业设备中, α 一般控制在 1.05~1.20; 在民用燃具中 α 一般控制在 1.3~1.8。燃烧同样体积的液化石油气、天然气和焦炉气所需的空气量是不同的,液化石油气所需的空气量约为天然气的 3 倍,为焦炉气的 6 倍。

三、烟气体

燃气燃烧后的产物就是烟气。当只供给理论空气量时,燃气完全燃烧后产生的烟气体称为理论烟气体。理论烟气的组分是 CO_2 、 SO_2 、 N_2 和 H_2O 。不完全燃烧时烟气中还会有一氧化碳。1 米³(标准)煤气完全燃烧所产生的理论烟气体可按热值近似计算:

低热值小于或等于 12000 千焦/米³(标准)的煤气:

$$V_f^0 = 0.181 \frac{Q}{1000} + 1 \quad (1-7)$$

炼焦煤气:

$$V_f^0 = \frac{0.285Q}{1000} + 0.25 \quad (1-8)$$

烃类气体:

$$V_f^0 = \frac{0.25Q}{1000} + \alpha \quad (1-9)$$

式中 V_f^0 ——理论烟气体[米³(标准)/米³(标准)];

Q ——煤气的低热值[千焦/米³(标准)];

α ——系数,对天然气 $\alpha=2.0$, 对石油伴生气 $\alpha=2.2$, 对液化石油气 $\alpha=4.5$ 。

实际烟气体 V_f 可按下列式计算:

$$V_f = V_f^0 + (\alpha - 1)V_0 \quad (1-10)$$

四、燃气的互换性

随着我国城市煤气事业的发展,供气规模、气源类型、用具类型都在不断增加。很多城市从单一的气源发展为多种气源。例如,上海就有炼焦煤气、立式碳化炉煤气、水煤气、发生炉煤气、热裂解重油制气、催化裂解重油制气、液化石油气等各种气源。它们的成分、热值、密度和燃烧特性等都很不相同。但是,任何燃具都是按一定的燃气成分设计的。当煤气的成分发生变化时,燃具的燃烧工况就会发生变化。假如,按一定燃气成分设计的燃具,在燃气成分有某些变化时,燃烧工况虽有改变,但尚能达到燃具原有设计要求,则表示后一种燃气与前一种煤气具有互换性。当后一种燃气置换另一种燃气时,首先应保证燃具热负荷(即燃具在单位时间内所产生的热量)在互换前后不发生大的改变。以民用燃具为例,如果热负

荷减少太多,烧煮时间也要加长;如果热负荷增加太多,燃气就会浪费。当燃具喷嘴前压力不变,燃具热负荷与燃气热值成正比,与燃气对空气的相对密度的平方根成反比,即

$$W = \frac{Q}{\sqrt{S}} \quad (1-11)$$

式中 W ——华白数,或称热负荷指数;

Q ——燃气热值[千焦/米³(标准)];按照各国习惯,有的取高热值,有的取低热值;

S ——燃气对空气的相对密度。

华白数是早期使用的一个互换性判定指标,一般规定在两种燃气互换时华白数 W 的变化不大于 $\pm 5 \sim 10\%$ 。但随着气源种类的不断增多,两种互换燃气的化学、物理及燃烧特性差别较大,这时单靠华白数就不足以判断两种燃气是否可以互换,还需考虑火焰特性这样一个较为复杂的因素。它与燃气的化学、物理性质直接有关,到目前为止还无法用一个单一指标来表示。了解燃气的互换性原理后,也就可以理解燃烧焦炉气的燃具与燃烧液化石油气的燃具不可互换的道理。

五、着火、着火温度

任何可燃气体在一定条件下与氧接触,都要发生氧化反应。如果氧化反应过程发生的热量大于散失的热量,或者活化中心浓度增加的数量大于减少的数量,即由稳定的氧化反应转变为不稳定的氧化反应而引起燃烧的一瞬间,称为着火。

一般工程上遇到的着火是由于系统中热量的积聚,使温度急剧上升引起着火,称为热力着火。当点火棒或电火花等微小热源放入煤气中,则贴近热源周围的一层煤气被迅速加热,并开始燃烧产生火焰,然后向系统其余部分传播,使煤气逐步着火燃烧即为热力着火。这种现象称为强制点火,或简称点火。

在一定条件下,由于活化中心浓度迅速增加而引起反应转变为不稳定的氧化反应的过程,称为支链着火。例如,磷在空气中会发生闪光,但温度并不高;许多液态可燃物(醚、汽油、煤油等)在低压和温度只有 $200 \sim 280^\circ\text{C}$ 时发生微弱的火光(又称冷焰)等。

单一可燃气体的着火温度见表 1-1。在纯氧中的着火温度要比在空气中低 $50 \sim 100^\circ\text{C}$ 。

实际上,着火温度不是固定数值,它取决于可燃气体在空气中的浓度及其混合程度、压力、燃烧室的形状与大小和有无催化作用等因素。工程上实用的煤气着火温度应由实验确定。上海城市煤气的着火温度约为 $550 \sim 600^\circ\text{C}$ 。

六、爆炸极限

当可燃气体与空气混合到一定浓度时,遇到明火而引起爆炸,这种能爆炸的混合气体中所含燃气的浓度范围叫做爆炸极限,用百分数表示。在混合物中当可燃气体的含量减少到不能形成爆炸混合物时的浓度,称为爆炸下限,而当可燃气体增加到能形成爆炸混合物时的浓度,称为爆炸上限。单一可燃气体的在常压、 20°C 时的爆炸极限列于表 1-1。

(1) 可燃气体的爆炸极限 不含有氧或惰性气体的可燃气体的爆炸极限可按下列式计算:

$$L = \frac{100}{\frac{y_1}{L_1} + \frac{y_2}{L_2} + \dots + \frac{y_n}{L_n}} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{L_i}} \quad (1-12)$$

式中 L ——可燃气体的爆炸上(下)限(体积 %);

L_i ——可燃气体各组分的爆炸上(下)限(体积 %);

y_i ——可燃气体各组分的容积百分数(%)。

(2) 含有惰性气体的可燃气体的爆炸极限 可燃气体含有惰性气体时, 可将某一惰性气体组分与某一可燃气体组分合起来视为可燃气体中的一种组分, 其容积组分为两者之和, 然后由图 1-1、1-2 查得爆炸极限, 再用上述公式计算混合气体的爆炸极限。

(3) 含有氧气的可燃气体的爆炸极限 可燃气体中混入氧时, 则可认为混入了空气。因此应先扣除氧含量以及按空气的氧、氮比例求得氮含量, 重新调整可燃气体的容积组分, 再按上述公式计算混合气体的爆炸极限。

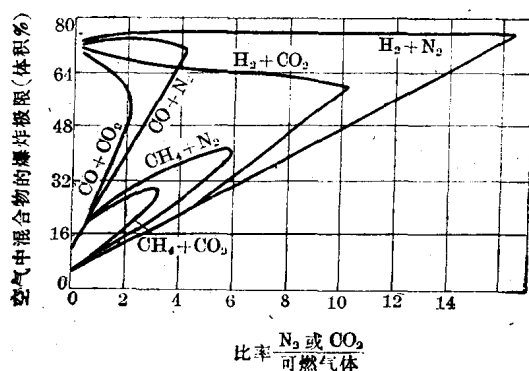


图 1-1 用氮或二氧化碳和氢、一氧化碳、甲烷混合时的爆炸极限

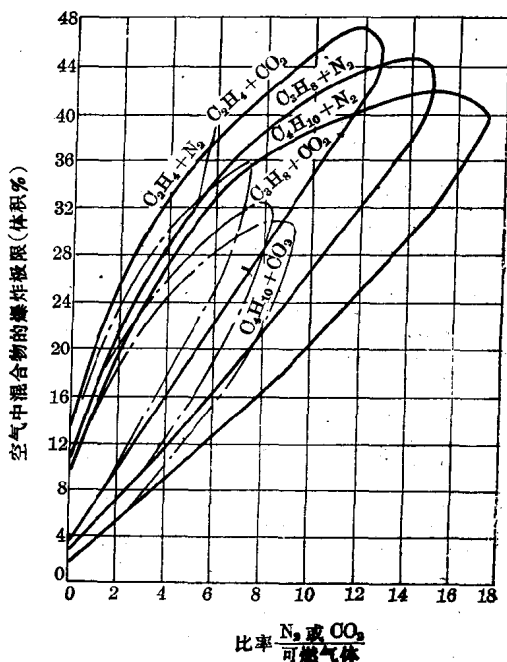


图 1-2 用氮或二氧化碳和乙烯、丙烷、丁烷混合时的爆炸极限

七、燃烧温度

一定比例的煤气和空气完全燃烧时放出的热量, 使燃烧产物(烟气)所具有的温度称为燃烧温度。燃烧温度可由煤气完全燃烧前后的热平衡方程求得。在工程中, 一般工业炉和锅炉烟气温度低于 1500°C , 此时烟气中 CO_2 与 H_2O 分解量很小, 若忽略参加燃烧反应的燃气与空气的物理热, 可得理论燃烧温度为

$$t_{th} = \frac{Q}{V_{\text{RO}_2} C_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} C_{\text{N}_2}} \quad (1-13)$$

式中

t_{th} ——理论燃烧温度($^{\circ}\text{C}$);

Q ——燃气低热值[千焦/米³(标准)干燃气];

C_{RO_2} 、 $C_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 C_{N_2} ——三原子气体、水蒸气、氮平均定压容积比热{千焦/[米³(标准)· $^{\circ}\text{C}$]};

V_{RO_2} 、 $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 V_{N_2} ——每米³(标准)干燃气完全燃烧后所产生的三原子气体、水蒸气、氮的体积[米³(标准)/米³(标准)干燃气]。

表 1-2 指出某些气体的理论燃烧温度。

表 1-2 某些气体理论燃烧温度($^{\circ}\text{C}$)

H_2	CO	CH_4	C_3H_8	C_4H_{10}
2210	2468	2065	2155	2130

实际燃烧温度和理论燃烧温度随空气过剩系数 α 、燃烧室通过炉墙向周围散热及工艺过程、炉子结构的不同而不同, 很难精确计算出来。人们根据多年的实践, 对于理论燃烧温度可以根据下列经验公式计算:

$$t_{act} = \mu t_{th} \quad (1-14)$$

式中 t_{act} ——实际燃烧温度($^{\circ}\text{C}$);

μ ——高温系数。对于无焰燃烧器, 可取 $\mu=0.9$; 对于其他热工设备, μ 值见表 1-3。

表 1-3 常用热工设备的高温系数

窑 炉 名 称	μ	窑 炉 名 称	μ
锻造炉	0.66~0.70	隧道窑	0.75~0.82
无水冷锅炉的炉膛	0.70~0.75	竖井式水泥窑	0.75~0.80
有水冷锅炉的炉膛	0.65~0.70	平炉	0.71~0.74
有关闭炉门的室炉	0.75~0.80	回转式水泥窑	0.65~0.85
连续式玻璃池炉	0.62~0.68	高炉空气预热器	0.77~0.80

八、火焰传布及火焰传布速度

在工程中, 一般都用点火方法使可燃气体混合物着火。当一部分可燃气体混合物点燃后, 形成高温燃烧焰面加热了相邻的可燃气体混合物, 使其温度升高, 当达到着火温度时, 就形成新的燃烧。这样不断移动, 使每层气体都相继经历加热、着火和燃烧过程。这个现象就称火焰的传布。

当火焰传布仅是由于传热作用, 炽热的焰面将热量传给未燃气体, 使其着火燃烧, 依次传布到整个体积。这种火焰传布过程称为正常火焰传布。煤气在工业与民用燃烧设备中的燃烧过程都属于正常燃烧。

影响火焰传布速度的因素很多, 实际应用时一般采用实验方法测定或用经验公式计算。

当燃气中 $\text{CO} < 20\%$ (可燃气体的组分) 和 $\text{N}_2 + \text{CO}_2 < 50\%$ (扣除可燃气体中空气的组分) 时, 其计算公式为

$$u = \frac{\sum u_i \alpha_i V_{oi} y_i}{\sum \alpha_i V_{oi} y_i} [1 - f_i (\text{N}_2 + \text{N}_2^2 + 2.5 \text{CO}_2)] \quad (1-15)$$

$$\text{N}_2 = \frac{y_{\text{N}_2} - 3.76 y_{\text{O}_2}}{100 - 4.76 y_{\text{O}_2}}$$

$$\text{CO}_2 = \frac{y_{\text{CO}_2}}{100 - 4.76 y_{\text{O}_2}}$$

$$f_i = \frac{\sum y_i}{\sum \frac{y_i}{\delta_i}}$$

式中 u ——混合气体最大燃烧速度(米/秒);

u_i ——混合气体各组分的最大燃烧速度(米/秒);

α_i ——混合气体各组分最大燃烧速度时的一次空气系数;

V_{oi} ——混合气体各组分的理论空气量 [$\text{米}^3(\text{标准})/\text{米}^3(\text{标准})$];

y_i ——混合气体各容积组分(%);

- y_{N_2} ——混合气体中氮的容积组分(%)；
- y_{O_2} ——混合气体中氧的容积组分(%)；
- y_{CO_2} ——混合气体中二氧化碳的容积组分(%)；
- f_i ——各组分考虑惰性组分影响的系数。

表 1-4 指出计算燃气最大燃烧速度的资料。

表 1-4 计算燃气最大燃烧速度的资料

化学式	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₈	C ₄ H ₁₀
u	2.80	1.00	0.38	0.67	0.43	0.50	0.42	0.46	0.38
α	0.50	0.40	1.10	0.85	1.15	1.10	1.125	1.13	1.15
V_0	2.38	2.38	9.52	14.28	16.66	21.42	23.80	28.56	30.94
δ	0.75	1.00	0.50	0.25	0.22	0.22	0.22	0.20	0.18

对于不同种类的燃料，气体燃料的燃烧比液体和固体燃料容易发生，燃烧速度也更快。因为液体和固体燃料燃烧时要先经过熔化、蒸发等准备过程，气体燃料就不需经过这些过程。不同种类的可燃气体的燃烧过程和燃烧速度也不相同，分子结构简单的燃气如氢气在燃烧时，只经过受热、氧化过程；而较复杂的可燃气体如天然气(主要为甲烷)、焦炉气(主要为氢气、甲烷和一氧化碳等)和液化石油气就要经过受热、分解、氧化等过程才能开始燃烧。因此，简单燃气比复杂燃气的燃烧速度快。经测试，燃气最大燃烧速度：氢气为 2.80 米/秒，甲烷为 0.38 米/秒，液化石油气为 0.38~0.5 米/秒。因为燃气的燃烧速度都很快，所以一旦漏气飘逸到有明火处即引起燃烧，即使距离上百米，也能在极短时间内迅速燃烧到发生漏气的地方，而引起火灾。

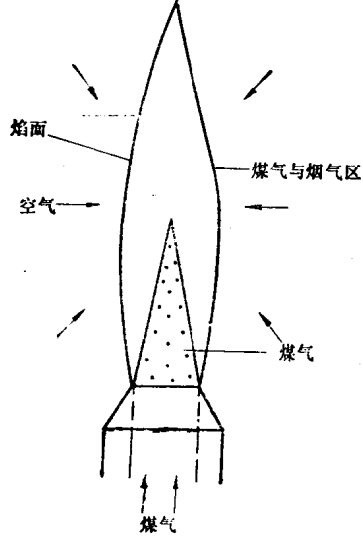


图 1-3 扩散式燃烧火焰

九、燃烧方法及燃烧稳定性

煤气的燃烧方法，可根据煤气和空气混合方式不同分为扩散式燃烧、大气式燃烧和无焰燃烧三种。

1. 扩散式燃烧

扩散式燃烧是在燃烧前不预先和空气混合(即 $\alpha' = 0$)，然后点火燃烧。燃烧所需的氧气将依靠扩散作用从周围空气获得。这种燃烧方式称为扩散燃烧。

图 1-3 为扩散式火焰的结构。煤气从火孔管口喷出，着火后形成一个圆锥形焰面。在焰面以内为煤气，焰面以外是空气。氧气从外部向焰面扩散，煤气从内部扩散到焰面，而燃烧产物不断从焰面向内、外两侧扩散。

扩散火焰的形状为圆锥形。这是因为煤气中一部分开始燃烧，未燃部分继续向前，在流动过程中不断燃烧，剩下煤气的体积越来越小，最后在中心线全部燃尽，所以火焰末端变尖而整个焰面成圆锥形。扩散式燃烧气流速度越大，火焰越长；扩散系数越大，火焰就越短。

扩散式燃烧的优点是燃烧稳定，燃具结构简单，煤气压力要求不高(压力最小为 200~300 帕)。但由于燃烧所需氧气由四周大气供给，要求燃烧室容积大，过剩空气系数较大

($\alpha' = 1.2 \sim 1.6$)；火焰较长，易产生不完全燃烧和受热面积炭，且燃烧温度与热效率较低。

扩散式燃烧一般适用于温度不高、但要求加热均匀和稳定的场合，例如，沸水器、烘箱、加热炉及燃具的点火、引火装置。

2. 大气式燃烧

煤气在燃烧前，预先混入一部分燃烧所需空气 ($0 < \alpha' < 1$) 而进行的燃烧称为大气式燃烧。此时，火焰变得清晰，燃烧得到强化，火焰温度也提高了。因此，大气式燃烧得到广泛应用。大气式燃烧器见图 1-4。

大气式燃烧火焰由内锥和外锥体组成。在内锥表面，火焰向内传布，而未燃的混合气体不断向外溢出，形成一个圆锥形焰面。焰面内侧有一层浅蓝色燃烧层，因此内锥又称蓝色锥体。

由于一次空气量小于燃烧所需的空气量，因此在内锥上仅进行一部分燃烧过程。所得的中间产物穿过内锥焰面，在其外部按扩散方式与空气混合燃烧。一次空气系数越小，外锥就越大。当一次空气量较少时，扩散火焰为发光火焰。当一次空气量较多时 ($\alpha' > 0.4$)，扩散火焰透明而不发光。

大气式燃烧的优点是燃烧的过剩空气系数较小 ($\alpha' = 1.15 \sim 1.14$)，因此燃烧热效率高，燃烧室容积也可比扩散式小，并可在较低压力下，不需特殊装置即能进行燃烧。缺点是对一次空气量的控制及燃气组分要求较高，对燃具的设计和制造要求也较高。

大气式燃烧方式在城市煤气中应用最为广泛。如家用燃具、热水器、大锅灶、炒菜灶、饭灶等都采用大气式燃烧方式。

3. 无焰式燃烧

煤气燃烧所需要的全部空气，在燃烧前已完全均匀混合，在燃烧过程中不再需要从周围空气中取得氧气，且设置专门的火道(或网格等)，使燃烧区内保持稳定的高温。所以煤气-空气混合物到达燃烧区后能在瞬间燃烧完毕。燃烧温度高，火焰短甚至看不见，并且能在很小的过剩空气系数下(通常 $\alpha = 1.05 \sim 1.10$) 达到完全燃烧，故称为无焰燃烧。

无焰式燃烧是在大气式燃烧的基础上发展起来的，虽然出现较晚，但因为在技术上比较合理，故很快得到广泛应用。

无焰式燃烧的优点是燃烧完全、燃烧温度高，适用于高温工艺，且由于过剩空气少，加热工件不易氧化；产生的红外线穿透能力强，烘烤的物品内部易干燥。缺点是燃烧稳定性差，对煤气的热值和密度的要求高；对热负荷要求大时，结构笨重，并有噪音。

4. 燃烧的稳定性的

燃烧稳定性是指燃烧工况在允许变动的范围内，保持火焰的稳定，即不发生回火、离焰、脱火。

如果燃烧强度不断加大，火焰脱离燃具出口，在一定距离以外燃烧，称为离焰。若气流速度再增大，火焰就被吹熄，称为脱火。

如果进入燃具的燃气流量不断减小，即气流速度不断减小到小于火焰传播速度，火焰将

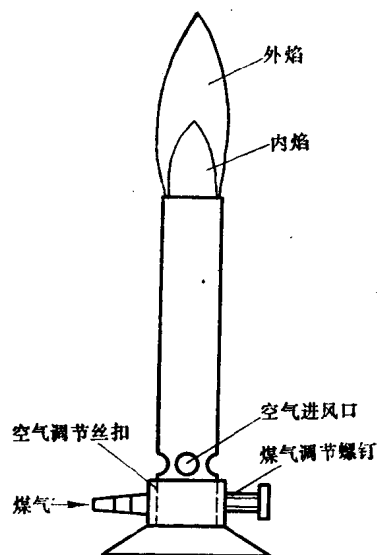


图 1-4 大气式燃烧器