

天然气燃烧及应用技术

李方运 编著



石油工业出版社

天然气燃烧及应用技术

李方运 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书收集了国内外天然气燃烧及应用技术领域的最新科技资料,包括天然气的物化性质和燃烧特性,与燃烧过程相关的理论,扩散式燃烧器、引射式燃烧器、鼓风式燃烧器的设计,燃烧系统及控制原理,熄火保护系统,工业与商业中天然气燃烧应用技术,可燃气体爆炸及预防,天然气与环境等。全书内容丰富,特别突出了天然气燃烧技术在环保领域的新成就。

本书可供从事燃气和动力管理、经营、规划、制造、运行工作的人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然气燃烧及应用技术/李方运编著.
北京:石油工业出版社,2002.12

ISBN 7-5021-4055-7

I. 天…

II. 李…

III. 天然气-燃烧理论

IV. TE64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 095779 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
北京正阳久久公司排版
石油工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 434 千字 印 1—2000
2002 年 12 月北京第 1 版 2002 年 12 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-4055-7/TE·2896
定价:35.00 元



煤氣

香港中華煤氣有限公司

序 言

天然气将是二十一世纪全国重点发展的能源。

我国随着“西气东输”、“海气登陆”、“液化天然气上岸”及“俄罗斯天然气南输”等工程项目的开发实施,能源结构优化的步伐正在加快,各个城市都将逐渐以清洁环保的天然气,取代对环境造成严重污染的煤炭、石油等其他燃料,昂然迈进“天然气时代”。

由李方运先生所撰写的《天然气燃烧及应用技术》一书内容详实、涵盖全面,对天然气的燃烧及应用收集了丰富的资料,尤其在工商业用气方面,既编入了一定的理论基础,又提供了大量的最新燃烧方式和应用实例。此书经专家审阅并由本公司赞助出版,相信此书必将对天然气的广泛合理利用、减少大气污染、提高环境质量起着积极的推动作用。

香港中华煤气有限公司已经有 140 年的创业历史,是香港特区唯一经营城市管道燃气的上市公司,现有用户 140 多万。自 1994 年开始拓展国内燃气业务以来,公司已先后在广东、江苏、山东等省市成立了多家城市燃气合资公司,并参与投资“西气东输”主干线及广东液化天然气站线等国家能源重点建设项目,旨在引进先进的管理技术,加速国内城市燃气事业的发展。近年来,国家对外商投资政策的进一步开放,让天然气这一洁净能源在祖国的领域上得以蓬勃、迅速和普及地发展起来。

天然气市场发展的成功须有赖政府的支持和业界的努力,善用丰富的知识经验和技能,提高可靠程度和安全指标,加强发展潜力和竞争实力,以超越国际级的水平。

本人在此祝愿祖国的天然气事业发展成功,为人民带来优质的生活,带动社会兴旺繁荣!

行政总裁

二〇〇二年十月

前 言

经济发展与环境保护是当前世界各国关注的首要问题。在中国,经济持续稳定的发展同样促进着国人环境意识的不断高涨,在承受了以牺牲环境而带来经济增长的困惑以后,人们意识到,开发利用优质能源,是获取城市环境与经济协调发展的重要措施和明智的选择。

天然气是一种高效、清洁的优质能源,是城市燃气的理想气源,然而,当前在我国的一次能源消费结构中,煤炭占 62%,天然气仅占 2.96%,远低于 23.5%的世界水平。预计未来十年我国经济仍将有 7%的增长速度。为确保经济持续健康、稳定地发展,开发利用国内外丰富的天然气资源,已是我国能源工业面临的新的战略任务。

我国政府在世纪之交作出了“开发西部”的重大战略部署,以“西气东输”、“海气登陆”、“液化天然气上岸”等为代表的重大开发项目正加紧实施,这些工程掀开了我国天然气工业发展历史新的一页。相信随着这些项目的建成,必将优化我国能源结构,改善城市基础设施水平,提高生活质量,对我国经济与社会效益将产生深远影响。

我们即将面临天然气时代的到来。然而,我国天然气燃烧及应用技术还十分落后,仍然停留在低效率、高污染的水平上,尤其在燃烧技术产业化以及燃烧过程的污染控制方面,还存在较大的差距,因此,迫切 need 加强和提高天然气燃烧应用技术的研究和推广。当前,提高天然气燃烧及应用技术水平势在必行,这对合理利用能源、改善城市环境质量、提高人民生活素质具有重要意义。这正是本书编写的宗旨所在。

本书收集了国内外天然气燃烧及应用技术领域的最新科技资料,包括全新的热值理论计算,以及具有实用价值的以天然气替代其他能源的直燃加热技术等,内容丰富。全书特别突出了天然气燃烧技术在环保领域的新成就,相信这些资料对促进我国天然气应用有积极作用。

本书共分十三章。第一章至第三章为天然气的物化性质与燃烧特性,除常用资料外,特别收入了近年我国建成的陆上海上输气管线的商品天然气组分,以及国内外商品天然气标准;另收入了我国即将引进的中亚及俄罗斯等国天然气组分;国际最新天然气热值计算标准方法等。第四章为与燃烧过程有关的一些理论。第五章为扩散式燃烧器的设计,收入了在国外应用十分广泛的风道直燃技术及燃烧器设计方法。第六章为引射式燃烧器的设计。在第七章、第八章详细介绍了鼓风式燃烧器设计,这部分是目前世界各国燃烧技术产业化发展最完善且最具代表的领域,应用十分广泛,是我国需要赶超的目标。除了介绍一般旋流式燃烧器资料外,特别收入了国外广泛应用的直流式燃烧器计算方法。第九章为适用于不同功率及用途的各种燃烧系统及控制原理。第十章介绍了熄火保护系统。第十一章为最新国内外天然气燃烧应用技术在工业和商业中的应用。第十二章为有关燃气爆炸的实质以及爆炸预防方法。第十三章为开发利用天然气与全球环境的密切关系。

本书编写过程中,承蒙香港中华煤气有限公司和四川石油设计院众多专家人士大力支持,提供了不少资料和宝贵意见,特此致谢。同时,对本书所引用过的文献作者谨致崇高敬意。香港中华煤气有限公司并为本书的出版提供了大力支持,在此一并表示感谢。

编者水平有限,书中谬误和不妥之处敬请专家及读者批评指正。

编 者
2002.5

目 录

第一章 绪论

第一节 我国天然气工业的现状与前景	(1)
第二节 天然气的分类	(3)
第三节 商品天然气质量标准	(3)
第四节 城市燃气的分类	(5)

第二章 天然气的物理化学性质

第一节 天然气的组分	(8)
第二节 天然气的临界参数、状态方程式、气体常数和压缩系数	(13)
第三节 天然气的相对分子质量、密度和相对密度	(17)
第四节 天然气的饱和含水量和水露点	(18)
第五节 天然气的粘度	(21)
第六节 天然气的热容和绝热指数	(25)
第七节 天然气的导热系数	(30)
第八节 天然气物理化学性质计算实例	(33)

第三章 天然气的燃烧特性

第一节 天然气的热值和华白指数	(35)
第二节 天然气的燃烧反应式和理论空气需要量	(38)
第三节 天然气燃烧与过剩空气系数	(41)
第四节 天然气燃烧产物的体积计算	(44)
第五节 天然气燃烧产物的温度与热焓	(47)
第六节 天然气的着火温度和爆炸极限	(55)
第七节 天然气的不完全燃烧计算	(56)
第八节 天然气燃烧特性计算实例	(60)

第四章 气体的燃烧方式与燃气混合过程

第一节 预混气体火焰传播理论	(64)
第二节 扩散燃烧火焰	(67)
第三节 火焰的稳定性	(69)
第四节 常压下天然气的流动规律及计算原理	(73)
第五节 横向空气流中天然气射流运动规律	(78)
第六节 燃烧方式的选择及燃气量确定	(80)

第五章 扩散式燃烧器的设计

第一节 扩散燃烧的火焰特性	(83)
第二节 管式扩散燃烧器设计	(84)
第三节 带锥形罩的风道直燃式燃烧器设计	(86)

第四节	炉底缝隙式燃烧器设计	(91)
第五节	撞击式燃烧器	(94)
第六章	引射式预混燃烧器的设计	
第一节	概述	(97)
第二节	引射器工作原理及质量引射系数	(98)
第三节	引射器的基本方程式	(99)
第四节	引射器的计算程序	(104)
第五节	大气式燃烧器的设计	(112)
第六节	大气式燃烧器的应用	(119)
第七节	全预混引射式燃烧器设计	(122)
第八节	全预混引射式燃烧器的应用	(125)
第九节	红外线辐射式燃烧器	(131)
第十节	不同工况下引射式燃烧器的运行	(133)
第七章	鼓风式燃烧器	
第一节	鼓风式燃烧器工作原理与分类	(139)
第二节	旋流式燃烧器的空气动力特性	(142)
第三节	蜗壳切向旋流式燃烧器	(147)
第四节	切向叶片旋流式燃烧器	(152)
第五节	轴向叶片旋流式燃烧器	(155)
第六节	平流式燃烧器的空气动力学特性	(160)
第七节	平流式燃烧器	(163)
第八章	鼓风式燃烧器的设计	
第一节	鼓风式燃烧器型式的确定	(170)
第二节	旋流式燃烧器计算方法	(171)
第三节	平流式燃烧器计算方法	(175)
第四节	旋流燃烧的规律性及火焰长度	(178)
第五节	燃烧器低 NO _x 排放应用技术	(180)
第六节	旋流式燃烧器计算实例	(183)
第九章	燃气燃烧系统及控制原理	
第一节	概述	(187)
第二节	引射式预混燃烧器燃烧系统	(187)
第三节	鼓风式燃烧器燃烧系统	(189)
第四节	鼓风式燃烧机组燃烧系统	(191)
第五节	大流量与双燃料燃烧器燃烧系统	(193)
第六节	国外实用天然气燃烧系统及控制设备	(197)
第十章	熄火保护系统	
第一节	熄火保护系统基本技术要求	(205)
第二节	点火装置	(205)
第三节	熄火保护装置型式	(207)
第四节	熄火保护控制系统与设备	(213)

第十一章	工业与商业中天然气燃烧应用技术	
第一节	燃气直燃高架辐射式供暖	(218)
第二节	辐射管加热器	(222)
第三节	高架对流式加热供暖设备	(225)
第四节	燃气直燃式空调机	(229)
第五节	燃气干燥除湿	(236)
第六节	冷凝式锅炉技术	(238)
第十二章	可燃气体爆炸及预防	
第一节	燃气爆炸的实质	(241)
第二节	受限燃气爆炸压力的形成	(242)
第三节	可泄放式受限燃气爆炸压力预测	(246)
第四节	防爆板设计及选用	(249)
第十三章	天然气与环境	
第一节	全球环境的迫切问题	(256)
第二节	天然气对环境保护的贡献	(258)
附录 A	天然气各组分的摩尔质量	(261)
附录 B	天然气各组分在不同的计量参比条件下的压缩因子和求和因子	(262)
附录 C	天然气各组分在不同的燃烧和计量参比条件下的理想气体摩尔发热量	(264)
附录 D	天然气各组分在不同的燃烧和计量参比条件下的理想气体质量发热量	(266)
附录 E	天然气各组分在不同的燃烧和计量参比条件下的理想气体体积发热量	(268)
附录 F	单一可燃气体的爆炸极限与最低着火温度	(270)
主要参考文献		(271)

第一章 绪 论

第一节 我国天然气工业的现状与前景

天然气是指在不同的地质年代下生成、运移、聚集,并以一定压力埋藏于不同地层中的气体。天然气是一种可燃气体,燃烧时能释放出大量热能,是一种优质的能源,也是重要的化工原料。随着我国经济的高速发展,天然气将成为我国经济建设的重要能源和城市燃气的主要气源。

一、我国天然气工业历史与现状

我国是世界上最早开采利用天然气的国家,公元前西周时期就发现了天然气。《天工开物》中记载了我国四川开采利用天然气的历史。据史书记载,最早的天然气井被称为火井,最早利用天然气的输气管线工程是竹管输气熬盐,这已作为人类文明的历史载入了世界史册。图 1-1-1 为古代我国劳动人民开采利用天然气熬盐的情景。

虽然我国应用天然气的历史悠久,但是,由于长期经济落后等原因,发展十分缓慢。1949 年全国天然气产量仅 $700 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。改革开放以来,天然气工业有了较大发展,1991 年达到 $160 \times 10^8 \text{ m}^3$,并且每年以 9.5% 的增长率在递增。然而,到目前为止,在我国一次能源消费比例中天然气仅占 2.96%,远低于 23.5% 的世界平均水平和 8.8% 的亚洲水平。因此,发展我国天然气工业任重而道远,但前景光明。



图 1-1-1 井火煮盐图

一个国家天然气工业发展的进程,除了取决于资源外,始终同国家综合国力水平相关,也与城市现代化建设紧密相连。由于我国是世界产煤大国,在 20 世纪 80 年代以前,我国的能源产业政策建立在单一的以煤的开发利用为主的基础之上,一次能源消费结构中煤炭占了 72%,因而,天然气工业的发展未提上日程。

进入 20 世纪 90 年代以来,随着我国经济的高速发展,国家在能源结构的调整上注入了很大力量,由依赖煤的单一型结构逐步形成以煤为主,多种能源互补的体系。然而,经济的发展带动了能源工业的发展,能源工业的发展势必带来一系列社会环境问题。城市环境与经济的协调发展,成为当今国际社会予以关注的首要问题。我国在这方面从国情出发,已将能源与经济及环境的协调发展作为基本国策,因此,当前积极开发与利用优质、清洁能源便成为当务之急。

我国蕴藏有丰富的天然气资源,通过几十年的勘探开发,不仅探明陕甘宁、新疆、四川、东北、华北等广大陆地,而且在南海、东海、渤海找到大量天然气资源。据勘探资料评估,我国天然气资源量为 $43 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中陆地 $30 \times 10^{12} \text{ m}^3$,海洋 $13.83 \times 10^{12} \text{ m}^3$,另外还有煤层气资源 32

$\times 10^{12} \text{ m}^3$ 。近年探明储量有较大增长,2000 年累计探明储量 $3.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$,预测 2010 年累计探明储量可达 $(4.4 \sim 4.9) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

随着能源结构的调整改变,我国天然气产量不断增加,1998 年我国天然气产量达到 $223 \times 10^8 \text{ m}^3$,到 2001 年已增加到 $303 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。然而,我国经济的高速发展对天然气的需求量更大,由中国科学院以及中国石油天然气股份有限公司发布的资料整理显示(表 1-1-1),未来 20 年我国天然气产量远不能满足自身经济发展的需要。为了确保经济高速稳定发展,必须寻求国际天然气资源。国家能源部门已开始策划引进国外天然气,这为我国能源深化改革,发展外向型能源战略提出了新的任务。

表 1-1-1 我国天然气需求量与产量预测 10^8 m^3

年 份	需 求 量	产 量	差 额	进口天然气	
				管输	船运
2000	280	285	-5	0	0
2005	640	528	112	0	40
2010	1130	800	330	200	93
2015	1730	1100	630	250	133
2020	2000	1200	800	—	—

天然气是城市燃气的理想气源,世界各国城市燃气发展史以及我国的长期实践都表明,我国城市燃气气源即将从煤制气为主向天然气为主、液化气为辅过渡。与此同时,为加快发展天然气工业,我们不仅要加快开发本国资源,还应当充分利用国际资源。

目前,国家能源部门已开始策划从我国的周边国家引进天然气,预计 2010 年前每年从俄罗斯、土库曼斯坦、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦引进 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。与此同时,规划华东、华南地区每年将进口液化天然气 $(600 \sim 1200) \times 10^4 \text{ t}$,以确保我国经济持续稳定地发展。

我国政府在世纪之交作出了开发西部的重大战略部署,“西气东输”工程是西部大开发的重要基础建设项目,它掀开了我国天然气工业发展历史新的一页。相信随着这一工程的建成,必将优化我国能源结构,改善城市基础设施水平,提高人民生活质量,对沿线地区的经济和社会将产生深远影响。

21 世纪将是天然气的世纪,大力开发和利用天然气,优化我国能源结构,提高人民的生活水平是我们共同面临的选择。

二、天然气在城市燃气中的地位

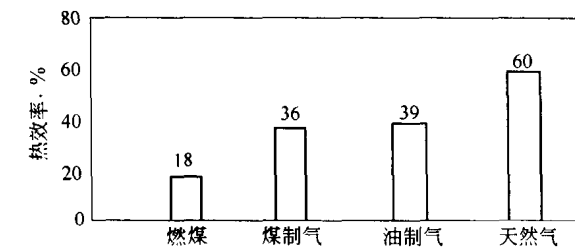


图 1-1-2 不同燃料的热利用率

我国城市的现代化正在加速进行,城市基础设施现代化是其重要的标志,城市燃气与城市自来水等设施一样,成为基础设施不可缺少的组成部分。世界各国都以城市燃气气化率作为衡量一个国家城市现代化以及经济发展水平的重要标志。发展城市燃气,尤其是以天然气作为城市燃气主要气源,能够取得显著地节能环保效果,获得良好的社会效益。以民用燃料的实际使用状况进行分析,不同燃料的热能利用率相差很大。图 1-1-2 为不同燃料的热利用率比较。天然气的利用率最高,因而是在提供相同供热量的条件下,CO₂、SO₂、NO、粉尘等排放最小的燃料。因此,天然气又被称为绿色燃料。

工业上使用天然气同样具有明显的经济效果。天然气不仅是优质的能源,而且是重要的化工原料。天然气是合成氨的理想原料,在农业上广泛应用的氮肥就是其主要产品。氮肥对发展我国农业,提高粮食产量起到重要作用。

天然气干净清洁、火焰稳定、燃烧完全、易于控制,除了广泛用于冶金、发电而外,特别适用于纺织、玻璃、锻造加工,比其他种类能源(如电能或煤制气等)更优越。

第二节 天然气的分类

天然气的组成随产地、地层以及生产条件不同而不一样。天然气一般分为以下几类:

一、按天然气生成条件分类

(1)气田天然气:主要成分为甲烷,其含量约占 85% ~ 95%,乙烷(C_2H_6)、丙烷(C_3H_8)含量不大,丁烷(C_4H_{10})及以上组分甚微。在气田天然气中,可以分为凝析油气田天然气和纯气田天然气,前者在地层中为均质的气相,但当气体通过井口后,压力降低,温度低于该状态的露点后,气体中的丙烷、丁烷会形成凝析液,伴有部分水化物。纯气田天然气则几乎不含重烃,主要可燃组分为甲烷。

(2)油田伴生气:这种天然气是与石油共生的气体,它或聚集于油层顶部被称为气顶气,或溶于石油之中被称为溶解气。其组成以甲烷为主,还含有较多的乙烷和乙烷以上的烃类,热值比气田气高。

(3)煤层气:是与煤层共同生成并聚集于地质构造中的可燃气,主要成分为甲烷,伴有一些二氧化碳等气体。

(4)矿井气:在采掘煤炭的过程中,由煤层中释放出的伴生气,由于与矿井中的空气混合故名矿井气,热值较低。

二、按天然气烃组分含量分类

(1)干气:指在压力为 0.1MPa, 20℃ 条件下, $1m^3$ 井口天然气中,戊烷重烃液体含量低于 $13.5cm^3$ 的天然气。

(2)湿气:指在压力为 0.1MPa, 20℃ 条件下, $1m^3$ 井口天然气中,戊烷重烃液体含量高于 $13.5cm^3$ 的天然气。对于湿气必须经过分离处理后方能输送。

按天然气重烃组分含量分类是最基本的方法,与我们了解和利用天然气关系较密切。此外,从资源评估需要,还有其他一些分类法,例如分为富气与贫气等,本书不作介绍。

以上所叙述的各类气体均指从地下开采出来的原料气。由于组分和杂质差异很大,即便个别种类天然气可以直接燃用,但是均未达到商品天然气的标准,不能直接作为城市燃气。原料气必须经过气田集输、脱水、分离,然后再经加工净化,在达到商品天然气的标准以后,由长输管线送往城市。

第三节 商品天然气质量标准

天然气从地层深处开采出来,含有许多杂质(水、凝析油、粉尘)以及部分有害气体(硫化氢等),这些物质影响天然气的应用,在输送到城市之前必须予以清除。各国从安全和环境保护出发,规定了天然气作为民用燃料时,其中有害组分的最高允许含量。达到标准要求的才允许作为商品天然气送入城市。但是,由于各国天然气资源差异,组分各不相同,因此,对商品天然气质量规定也不完全相同。本节介绍世界各国的商品天然气管输质量要求和商品天然气质量标准。

一、我国天然气气质标准

根据 GB 17820—1999《天然气》,我国天然气气质技术指标如表 1-3-1 所示。

表 1-3-1 我国天然气的技术指标

项 目	一类	二类	三类
高位发热量, MJ/m ³	> 31.4		
总硫(以硫计), mg/m ³	≤100	≤200	≤460
硫化氢, mg/m ³	≤6	≤20	≤460
二氧化碳, %(体积分数)	≤3.0		—
水露点, °C	在天然气交接点的压力和温度条件下, 天然气的水露点应比最低环境温度低 5°C		

注: 计量参比条件为 101.325kPa, 20°C。

由表 1-3-1 可见,我国商品天然气气质标准基本按照如下一些原则制定:

(1)按用途分为四类:

I、II 类主要用作民用燃料,经过净化工艺处理后的净化气应符合此类要求。该要求是参照各国对民用天然气中硫化氢含量范围,同时考虑用户的安全以及设备管线的防腐而作出的。

III、IV 类主要用作工业燃料;当 III 类硫化氢含量不大于 20mg/m³ 时,可用于民用燃料。IV 类为总硫含量大于 480mg/m³ 的井口气,只能供有净化处理能力的工业或公共用户使用。

(2)不同用途的天然气其总硫含量要求不同。主要依据燃烧生成二氧化硫对环境以及人体危害程度而确定。

(3)规定了天然气中硫化氢含量,目的是控制天然气在输配系统内产生的腐蚀和符合有害气体最低浓度要求。

(4)无游离水是指天然气经机械分离设备分不出游离水,以控制输配系统内产生的腐蚀和计量需要。

二、国外天然气气质标准

1. 欧美等国天然气气质标准

欧美等国天然气气质标准列于表 1-3-2 中。

表 1-3-2 国外天然气气质标准

国别	英国	荷兰	法国	美国
企业	British Gas	Gas Unie	Gas de France	AGA
H ₂ S, mg/m ³	5	5	7	5.7
硫醇硫, mg/m ³	6/16 ^①	15	16.9	11.5
总硫, mg/m ³	120/150 ^①	150	150	22.9
CO ₂ , %(摩尔分数)	2	1.5	3	—
O ₂ , %(摩尔分数)	0.5/3 ^②	0.5	0.5	—
水露点, °C	地面温度 ^③	- 10		
含量, mg/m ³			55	110
烃露点, °C	地面温度	- 5	—	—

①“/”线以下为短期允许值。但实际上该公司硫醇硫均未达到 ≤6mg/m³ 的水平。

②“/”线上为湿分配管,线下为干分配管允许值。

③为管线压力下的地面温度。

在管输天然气方面,各国对天然气的 H₂S 或总硫含量控制标准有所不一:加拿大管输标准 H₂S 含量为 ≤23mg/m³;前苏联由伊朗进口的天然气规定 H₂S 含量为 ≤10mg/m³;美国由加拿大进口的天然气总硫含量规定为 ≤23mg/m³。

2. 俄罗斯等国天然气气质标准

俄罗斯等国天然气气质标准大多来自前苏联标准,分为供给公共生活用户标准(表 1-3-3)以及干线输送天然气气质标准(表 1-3-4)。

表 1-3-3 天然气气质标准(前苏联标准 ГОСТ 5542)

H ₂ S, mg/m ³	硫醇, mg/m ³	CO ₂ , % (体积分数)	O ₂ , % (体积分数)	水露点, °C
20	36	2	1	冬季: -35; 夏季: -20

表 1-3-4 干线输送天然气气质标准

指标	气候地区的标准(按以下日期执行)			
	温暖地区		寒冷地区	
	5月1日~9月30日	10月1日~4月30日	5月1日~9月30日	10月1日~4月30日
水露点, °C	0	-5	-10	-20
烃露点, °C	0	0	-5	-10
机械杂质, mg/m ³	≤3	≤3	≤3	≤3
H ₂ S, mg/m ³	≤20	≤20	≤20	≤20
硫醇, mg/m ³	≤36	≤36	≤36	≤36
氧, % (体积分数)	≤1	≤1	≤1	≤1

第四节 城市燃气的分类

我国城市燃气事业已有 100 多年的发展史,经历了从煤制气到油制气漫长的发展历程。直到 20 世纪 90 年代,迎来了天然气作为城市燃气气源的时代。当前,我国城市燃气特点仍将是煤制气为主,油制气、液化石油气、天然气为辅,多种气源并举。我国能源结构正进行重大调整,已开始由依赖煤的单一型结构逐步形成以煤为主,多种能源互补的体系。随着我国经济高速发展,城市燃气气源将发生重大转变,将由依赖煤制气的结构逐步形成以天然气为主气源的结构。因此,按照燃气的燃烧特性参数,将城市燃气进行分类,有利于城市燃气事业的发展。了解和熟悉我国城市燃气的分类特点,对作好向天然气的过渡十分必要。

一、城市燃气的分类原理

我国城市燃气发展的趋势是多气源化。由于不同种类燃气性质的较大差异,其燃烧特性存在很大变化,这给燃气炉具对不同种类燃气的兼容性提出了一系列问题。因此,城市燃气必须按照燃气互换性的理论进行分类,才能科学地、有效地解决这一矛盾。

1. 城市燃气的互换性

随着城市燃气工业的迅速发展,新气源、新的燃气炉具不断出现,多气源共存的局面将在比较长的时期维持下去。不同气源的组分、热值、燃烧性能各不相同,同种燃气的组分、特性在供气过程的不同时间也是变化的。因此,为了保证燃气炉具在燃气特性允许变化范围内正常运行,必须对不同燃气的燃烧特性予以分类和限制,以保证城市燃气炉具及设备具有较好的通用性,同时,更加方便城市燃气管理。

城市民用燃气炉具型式众多,但是,对于某一特定种类炉具,它仅能适应一定范围燃气燃烧特性的变化。当燃气种类改变时,炉具能否正常燃烧,这就是燃气能否互换使用的问题。如果两种不同的燃气都可以在同一炉具上正常燃烧,我们认为对这台炉具而言,这两种燃气对于炉具的基准燃气具有“互换性”;反之,不能正常燃烧,则对基准燃气不具有“互换性”。同样,为了保证燃气炉具产品性能稳定,任何燃气炉具都必须按照一定的基准燃气组分进行设计。基

准燃气参数是城市燃气的重要气源数据,与基准燃气参数相近的燃气称为界限燃气。显然,基准燃气与界限燃气具有“互换性”,它们应属同一类燃气。

燃气互换性取决于燃气的燃烧特性指标,即燃气华白指数和燃烧势。这两个参数是燃气的重要指数,与燃气组分、特性有关。

2. 华白指数

燃气华白指数按下式计算:

$$W = \frac{Q_h}{\sqrt{d}} \tag{1-4-1}$$

式中 Q_h ——燃气高热值, MJ/m³;

d ——燃气相对密度(空气 = 1)。

国际上通用燃气高热值来计算华白指数,这与国内习惯采用低热值不一样,比较华白指数时应注意区分。燃气华白指数是一个互换判定参数,它的重要意义在于较直观地反应了燃气的燃烧特性同燃气的物理特性的关系。不同燃气只要其华白指数相等或接近,则它们彼此就可以互换。按规定华白指数变化应不大于 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 。

3. 燃烧势

在某些情况下,例如当燃气组分变化较大时,仅依靠华白指数还不能够完全判定互换问题,因为燃气的燃烧速度同样影响互换性。为此,一些学者提出了燃烧势概念。当以氢的燃烧速度为基准时,燃烧势的计算公式为:

$$CP = \frac{H_2 + 0.3CH_4 + 0.7CO + VC_nH_m}{\sqrt{d}} \times U \tag{1-4-2}$$

式中 H_2, CH_4, CO, C_nH_m ——各组分的体积分数;

V, U ——与氢和氧含量有关的修正系数。

二、城市燃气的分类

为了便于燃气的应用和互换,使城市燃气管理更加科学化,同时也为了规范所有燃气设备的生产制造,我国参照国际分类办法制定了中国城市燃气分类标准。

城市燃气按照种类和热值标准分为三类,这三类是:人工燃气、天然气、液化石油气,同一类中燃气可以互换,见表 1-4-1。

表 1-4-1 中国城市燃气分类标准

类 别	类别号	华白指数		燃烧势	
		标准值	范围	标准值	范围
人工燃气	5R	22.7	21.1 ~ 24.3	94	55 ~ 96
	6R	27.1	25.2 ~ 29.0	108	63 ~ 110
	7R	32.7	30.4 ~ 34.9	121	72 ~ 128
天然气	4T	18.0	16.7 ~ 19.3	25	22 ~ 57
	6T	26.4	24.5 ~ 28.2	29	25 ~ 65
	10T	43.8	41.2 ~ 47.3	33	31 ~ 34
	12T	53.5	48.1 ~ 57.8	40	36 ~ 88
	13T	56.5	54.3 ~ 58.8	41	40 ~ 94
液化气	19Y	81.2	76.9 ~ 92.7	48	42 ~ 49
	22Y	92.7	76.9 ~ 92.7	42	42 ~ 49
	20Y	84.2	76.9 ~ 92.7	46	42 ~ 49

每种燃气的基准燃气和界限燃气都是针对某一城市或地区的燃气选定的,具有较广泛的

代表性。表 1-4-2 列出天然气的基准燃气及界限燃气燃烧特性。

表 1-4-2 天然气的基准燃气及界限燃气燃烧特性

天然气 类 别	基准燃气		界限燃气		波动范围		典型地区	
	<i>W</i>	<i>CP</i>	<i>W</i>	<i>CP</i>	<i>W</i>	<i>CP</i>	基准燃气	界限燃气
4T	18.0	25	16.7 ~ 19.3	22 ~ 57	- 7 ~ 7	- 12 ~ 128	抚顺	阳泉
6T	26.4	29	24.5 ~ 28.2	25 ~ 65	- 7 ~ 7	- 14 ~ 124	锦州	—
10T	43.8	33	41.2 ~ 47.3	31 ~ 34	- 6 ~ 8	- 6 ~ 3	广东	—
12T	53.5	40	48.1 ~ 57.8	36 ~ 88	- 10 ~ 8	- 10 ~ 8	四川	南阳, 华北
13T	56.5	41	54.3 ~ 58.8	40 ~ 94	- 4 ~ 4	- 3 ~ 129	天津	山东, 大庆

第二章 天然气的物理化学性质

第一节 天然气的组分

一、气体的标准状态

气体的标准状态也称气体的标准条件,国内外广泛采用的气体标准状态有以下几种:

(1)以温度为 273.15K(0℃),压力 101.325kPa(1 标准大气压)为气体的标准状态,体积计量单位称为标准立方米(简称“标方”),简写为 Nm^3 。俄罗斯等国采用这一标准状态,我国的城市燃气行业采用这一标准状态。

(2)我国《流量计量名称术语及定义》(JJG 1004—86)规定:以温度 20℃,压力 101.325kPa 作气体体积流量计量标准状态。体积计量单位称基准立方米(简称“基方”),简写 Sm^3 。同时,在我国国家标准《石油液体和气体计量的标准参比条件》(GB/T 17291—1998)中,也采用此定义作为计量石油及天然气的标准状态。

(3)英美西方各国统一按国际标准化组织推荐实行两种气体的标准状态:

①以温度 60°F,压力为 30 英寸汞柱(饱和气)状态作为“国家法定标准条件”(缩写 ISC)。这一体积计量单位称为标准立方米,工程界简称“英基方”。

②以温度 15℃,压力为 101.325kPa(干气)状态为国家“公制标准条件”(缩写 MSC)。国际标准化组织颁布的 ISO 13443:1996《天然气标准参比条件》中,规定以 MSC 为天然气标准状态。ISC 和 MSC 已成为国际上广泛通行的气体标准状态。我国台湾和香港特别行政区,实行这两种标准状态。

由于历史原因,目前我国现行的气体体积计量标准状态,按行业不同实际存在有两种:在城市燃气行业,采用 0℃,101.325kPa 为体积计量标准,而石油化工和天然气开采输送行业,则采用 20℃,101.325kPa 为体积计量标准。这样,由于计量标准的不同,输送和销售同样体积天然气,在由气田或产地到达城市计量时,两个行业按两种计量标准状态,得出两个不同的数值,经营管理十分不便。同时,我国改革开放以来,在大量对外交流和引进技术中,都涉及到国际通用的 ISC 和 MSC 标准状态,向我们提出了规范和统一我国标准状态的要求。由于各种状态的参比条件不同,因而求得的各项气体参数值是不同的。因此,我们应当全面了解熟悉不同的标准状态,正确应用和换算,避免误差。本书除特别说明而外,仍以燃气行业的第 1 种条件为标准状态。各种标准状态的参比条件的近似换算,将在本书第三章第一节详述。

二、天然气的组分

天然气是一种多组分的混合气体,它主要由烷烃类气体、硫化氢、二氧化碳、氮、水汽以及部分稀有气体组成。天然气的组分可用摩尔分数、质量分数、体积分分数来表示^①。

1. 摩尔分数

摩尔分数也称分子分数,等于各组分物质的量与混合气体的物质的量之比,即

$$m_1 = \frac{n_1}{n}; m_2 = \frac{n_2}{n}; m_n = \frac{n_n}{n} \quad (2-1-1)$$

① 工程上还通用百分数组分,即摩尔百分数、质量百分数、体积分百分数,在采用时通常要加%符号,以示数量级区分。

因为混合气体总物质的量等于各组分物质的量之和,故总摩尔分数:

$$m_1 + m_2 + \cdots + m_n = \sum_{j=1}^n m_j = 1 \quad (2-1-2)$$

式中 $m_1, m_2, \cdots, m_n$ ——混合气体各组分的摩尔分数;

$n_1, n_2, \cdots, n_n$ ——混合气体各组分的物质的量。

2. 质量分数

质量分数等于各组分质量 G_n 与混合气体的总质量 G 之比,即

$$g_1 = \frac{G_1}{G}; g_2 = \frac{G_2}{G}; g_n = \frac{G_n}{G} \quad (2-1-3)$$

因为混合气体总质量为各组分质量和,即有总质量分数:

$$g_1 + g_2 + \cdots + g_n = \sum_{j=1}^n g_j = 1 \quad (2-1-4)$$

式中 $G_1, G_2, \cdots, G_n$ ——各组分的质量, kg;

$g_1, g_2, \cdots, g_n$ ——各组分的质量分数。

3. 体积分数

体积分数等于各组分的体积 V_j 与混合气体的总体积 V 之比,即

$$v_1 = \frac{V_1}{V}; v_2 = \frac{V_2}{V}; v_n = \frac{V_n}{V} \quad (2-1-5)$$

因为混合气体总体积为各组分体积之和,即总体积分数等于:

$$v_1 + v_2 + \cdots + v_n = \sum_{j=1}^n v_j = 1 \quad (2-1-6)$$

式中 $V_1, V_2, \cdots, V_n$ ——各组分的体积, Nm^3 ;

$v_1, v_2, \cdots, v_n$ ——各组分的体积分数。

三、天然气的组分换算

天然气中常见单一组分气体特性见表 2-1-1。

1. 天然气的相对分子质量计算

(1) 由各组分的相对分子质量计算天然气的平均相对分子质量:

$$M = \sum_{j=1}^n m_j \cdot M_j \quad (2-1-7)$$

式中 m_j ——混合气体各组分的摩尔分数;

M_j ——混合气体各组分的相对分子质量。

(2) 由碳原子数计算天然气平均相对分子质量:

$$M = (14n + 2) \cdot \delta + 28N_2 + 44CO_2 \quad (2-1-8)$$

$$n = \frac{CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + \cdots}{\delta} \quad (2-1-9)$$

$$\delta = CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} + \cdots \quad (2-1-10)$$

式中 n ——天然气中碳原子数;

δ ——天然气中烃类体积分数;

N_2 ——天然气中氮的体积分数;

CO_2 ——天然气中二氧化碳的体积分数;

$CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}$ ——天然气中甲烷、乙烷、丙烷、丁烷的体积分数。