

城市 燃气管网 设计与施工

席德粹 刘松林 王可仁 编著

上海科学技术出版社



城市燃气管网设计与施工

本书共分10章，主要介绍城市燃气管网规划、设计、施工、运行、维护、检修、改造、更新、拆除、报废、回收、再利用等各个环节的技术要求和施工方法。本书可作为从事城市燃气工程设计的工程技术人员、施工技术人员、运行维护人员、检修人员、改造更新人员、拆除报废人员、回收再利用人员的参考书，也可作为高等院校相关专业师生的教材。

席德粹
刘松林 编著
王可仁



上海科学技术出版社

1888.88
30K

城市燃气管网设计与施工 内 容 提 要

城市燃气在发展生产、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。实现城市燃气化,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燃气管网规划、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,对新建城市燃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燃气的地区有很大帮助。

本书可供城市燃气设计、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。

城市燃气管网设计与施工

席德粹

刘松林 编著

王可仁

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所经销 常熟市印刷八厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 38.75 插页 2 字数 926,000

1999 年 3 月第 1 版 1999 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—6,000

ISBN 7-5323-4575-0/TU·133

定价:64.00 元

本书如有缺页、错装和坏损等严重质量问题,

请向承印厂联系调换

前 言

燃料作为能源是保证国民经济向前发展的重要因素。城市燃气属于气体燃料,它同固体、液体燃料相比,有许多优点:城市燃气使用方便;燃气燃具燃烧完全,热效率高,易调节、控制;燃气燃烧后有害气体少,无残渣;城市燃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;城市燃气用于工业上加热,可以改革工艺,提高产品的产量和质量。城市燃气作为民用燃料时,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,城市燃气在发展生产、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。实现城市燃气化,是建设社会主义现代化城市的一个重要方面。

我国的城市燃气事业,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。已建立燃气供应设施的城市,亦由过去的以人工燃气为主要气源的状况逐步改变为以人工燃气、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,积极发展民用燃气。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,为城市燃气化奠定了基础。

为了适应城市燃气发展的需要,根据上海市煤气公司在城市燃气管网规划、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。

本书是在1988年2月由席德粹、刘松林、王可仁、郑安涛编著出版的《城市煤气管网设计与施工》的基础上,根据科学技术飞速的发展,进行了重大修改而成。修改的内容除吸收了国内有关新技术,新工艺,新设备,摒弃了过时的技术、工艺和设备外,还增加了引进和使用国外的技术和设备工艺,以及最新的电脑技术,使本书的内容更充实和更贴近现代化。

本书由席德粹、刘松林、王可仁等同志编写,席德粹、刘松林、王可仁主编,汤文志、贺言通参加编写。同济大学姜正侯同志对本书进行审阅。陈文桂、蔡尔海、朱元庆、张立佻以及朱韵维、方云隆、樊志棠、唐光基、刘峰、郑克敏、储伟平、蒋克武、李翼家、朱金荣、王道文、李玉华、贝钊正、吴光辉、李德松、吴志清、宋伟章、朱青松、周志剑、费德林、仇育忠、张文伯、陈自钊、黄良、郑明雄等同志协助编写了部分内容。

由于编写经验不足,缺点、错误难免,恳请读者批评、指正。

编 者

1997年5月

目 录

第一章 概 述

| | |
|---------------------|----|
| 第一节 燃气的燃烧特性 | 2 |
| 一、热值 | 2 |
| 二、燃烧所需空气量 | 3 |
| 三、烟气量 | 4 |
| 四、燃气的互换性 | 4 |
| 五、着火、着火温度 | 5 |
| 六、爆炸极限 | 5 |
| 七、燃烧温度 | 6 |
| 八、火焰传布及火焰传布速度 | 7 |
| 九、燃烧方法及燃烧稳定性 | 8 |
| 第二节 燃气的分类 | 11 |
| 一、人工煤气 | 11 |
| 二、液化石油气 | 14 |
| 三、天然气 | 14 |
| 四、沼气 | 15 |

| | |
|------------------------|----|
| 第三节 城市燃气的组分和质量要求 | 16 |
| 一、城市燃气的组分 | 16 |
| 二、城市燃气的质量要求 | 18 |
| 第四节 城市燃气的输配系统 | 18 |
| 一、城市燃气输配系统的压力级制 | 18 |
| 二、城市燃气输配系统的主要设备 | 19 |
| 第五节 城市燃气常用仪表 | 23 |
| 一、常用的燃气计量表 | 23 |
| 二、其他的燃气计量仪表 | 26 |
| 三、常用的压力仪表 | 29 |
| 第六节 燃烧器具 | 29 |
| 一、燃烧器 | 29 |
| 二、民用燃气用具 | 30 |
| 三、工业燃烧器 | 33 |

第二章 城市燃气管网规划

| | |
|------------------------------|----|
| 第一节 城市燃气管网规划的基本 要求 | 36 |
| 一、编制城市燃气管网规划的原则和 任务 | 36 |
| 二、编制城市燃气管网规划的基础资料 | 36 |
| 三、城市燃气管网规划的文件 | 37 |
| 第二节 城市燃气供应原则 | 39 |
| 一、燃气与其他燃料使用效果比较 | 39 |
| 二、供气的一般原则 | 40 |
| 三、工业和民用供气的比例 | 40 |
| 第三节 城市燃气需用量计算 | 40 |
| 一、城市燃气年用量的计算 | 41 |
| 二、城市燃气的用气工况 | 51 |
| 三、燃气计算用量的确定 | 54 |
| 第四节 城市燃气管网系统及选择 | 61 |

| | |
|-----------------------|----|
| 一、城市燃气管道的分类 | 61 |
| 二、燃气用户连接各级管网的条件 | 62 |
| 三、城市燃气管网系统 | 62 |
| 四、城市燃气的压力级制 | 64 |
| 五、燃气管网系统的选择 | 64 |
| 第五节 燃气储存 | 65 |
| 一、燃气生产与消费的平衡方法 | 65 |
| 二、燃气储存的作用 | 65 |
| 三、燃气储存方式 | 66 |
| 四、燃气储存设备 | 66 |
| 五、储气容积的计算 | 70 |
| 六、压送机的选择 | 73 |
| 七、储配站的工艺流程和管道布置 | 75 |
| 八、储配站的要求 | 76 |
| 九、储配站址选择原则 | 76 |

| | |
|-------------------------|------------|
| 七、测坡工具 | 343 |
| 八、接口制作工具 | 344 |
| 第五节 其他工具设备 | 346 |

| | |
|--------------------|-----|
| 一、阻气袋 | 346 |
| 二、隔离面罩和空气呼吸器 | 349 |
| 三、卤素检漏仪 | 349 |

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 | 352 |
| 一、管材 | 352 |
| 二、接口 | 352 |
| 第二节 施工前的准备 | 353 |
| 一、施工卡与施工图 | 353 |
| 二、设计交底与现场踏勘 | 358 |
| 三、制订工艺和准备材料、机具设备 | 358 |
| 第三节 地上管施工的基本操作 | 359 |
| 一、绞制螺纹与切割 | 359 |
| 二、调直与弯曲 | 360 |
| 三、装接 | 361 |
| 四、管道安装 | 363 |
| 五、嵌装三通与镶接 | 366 |
| 六、工厂化施工 | 367 |
| 七、老用户的移装、改装 | 369 |
| 第四节 民用燃气表具的安装 | 370 |

| | |
|--------------------|-----|
| 一、民用燃气表具安装 | 370 |
| 二、燃气热水器安装 | 372 |
| 三、燃气红外线取暖器安装 | 377 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 第五节 营业、事业、团体用户的灶具安装 | 379 |
| 一、大锅灶的安装 | 379 |
| 二、其他灶具的安装要求 | 382 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 第六节 工业用户设备的安装 | 383 |
|----------------------------|------------|

| | |
|----------------------------|------------|
| 第七节 工业用户燃气表安装 | 384 |
|----------------------------|------------|

| | |
|------------------------------------|------------|
| 第八节 地上管与用气设备的质量检验与试运转 | 388 |
| 一、地上管的质量检验 | 388 |
| 二、地上管验漏 | 389 |
| 三、地上管及用气设备的通气试运转 | 390 |

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 | 391 |
| 一、常用管材及管件 | 391 |
| 二、管位 | 394 |
| 三、定线放样 | 395 |
| 四、各种地下管线的识别和保护 | 396 |
| 五、管沟土方工程 | 399 |
| 六、管道敷设 | 409 |
| 第二节 管道的吊装 | 413 |
| 一、铸铁管吊装下沟 | 413 |
| 二、钢管吊装下沟 | 416 |
| 第三节 钢管施工与管件制作 | 419 |
| 一、钢板管件设计和放样 | 419 |
| 二、钢板管件的现场测绘和拼装 | 423 |
| 三、特殊位置的钢管连接 | 427 |
| 四、钢管的拼装焊接要求 | 430 |
| 第四节 燃气管道附属设备的安装 | 435 |

| | |
|------------------|-----|
| 一、聚水井的安装 | 435 |
| 二、阀门的安装 | 437 |
| 三、调压器的安装 | 439 |
| 四、温度补偿器的安装 | 442 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 第五节 燃气管道接口的施工 | 445 |
| 一、承插式接口 | 445 |
| 二、法兰接口 | 451 |
| 三、焊接接口 | 454 |
| 四、机械接口 | 457 |
| 五、滑入式接口 | 459 |
| 六、其他接口 | 461 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 第六节 地下燃气管钻孔、攻螺纹和割管 | 461 |
| 一、钻孔、攻螺纹 | 462 |
| 二、割管操作 | 466 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| 第七节 地下燃气管道的防腐蚀 | 466 |
|-----------------------------|------------|

| | | | |
|----------------------------|------------|----------------------|-----|
| 施工 | 468 | 二、地下燃气管道气密性检验和合格 | |
| 一、绝缘防腐层施工 | 468 | 标准的计算 | 483 |
| 二、钢管采用牺牲阳极保护的施工 | 472 | 三、地下钢管焊接质量的检验 | 487 |
| 第八节 聚乙烯管施工 | 474 | 四、地下钢管绝缘层质量的检验 | 490 |
| 第九节 地下燃气引入管施工 | 477 | 五、地下燃气管道附属设备安装质量的 | |
| 一、基本结构 | 477 | 检验 | 491 |
| 二、主要配件结构和性能 | 479 | 六、调压器室和调压器安装质量的 | |
| 三、安装工艺要求 | 480 | 检验 | 491 |
| 第十节 地下燃气管道施工质量 | | 七、铸铁管材料检验及测试设备的 | |
| 检验 | 480 | 应用 | 492 |
| 一、地下燃气管道施工质量检验指标 | 480 | | |

第七章 地下燃气管道特殊施工

| | | | |
|-----------------------------|------------|----------------------------|------------|
| 第一节 地下燃气管嵌接三通管及 | | 第四节 地下燃气管漏气的检测和 | |
| 镶接 | 495 | 修理 | 529 |
| 一、地下铸铁管嵌接三通管及镶接 | | 一、漏气点的检测 | 529 |
| 操作 | 495 | 二、寻找运行管道的漏气点 | 531 |
| 二、地下钢管嵌接三通管及镶接操作 | 501 | 三、管道漏气的修理 | 532 |
| 第二节 顶管施工方法 | 506 | 第五节 管道大修更新施工 | 536 |
| 一、顶力计算和设备选择 | 506 | 一、管道大修更新项目的确定 | 536 |
| 二、管内出土方法 | 507 | 二、施工前准备 | 536 |
| 三、管道顶进的导向、测量和纠偏 | 512 | 三、原管位拆排施工 | 537 |
| 四、顶管工作坑设置 | 513 | 四、整理坡度施工 | 537 |
| 五、减少顶进摩阻力的方法 | 514 | 五、地下管道漏水的防范 | 538 |
| 六、顶管施工主要操作顺序 | 516 | 六、对已废除管段的防漏措施 | 540 |
| 第三节 燃气管道穿越河流施工 | 517 | 第六节 城市天然气管道施工 | 541 |
| 一、架空跨越法 | 517 | 一、城市天然气管道施工的基本要求 | 541 |
| 二、水下敷设法 | 521 | 二、天然气管道的验泵和清通 | 547 |

第八章 燃气管道施工安全技术

| | | | |
|---------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| 第一节 施工中防止燃气燃烧、爆炸、中 | | 二、燃气管道的换气投产 | 558 |
| 毒的技术措施 | 551 | 第三节 管道施工安全操作要点 | 562 |
| 一、防止燃气燃烧、爆炸的措施 | 551 | 一、土方工程安全操作要点 | 562 |
| 二、施工现场紧急灭火的方法 | 554 | 二、吊装及管件就位安全操作要点 | 563 |
| 三、防止施工人员燃气中毒的措施 | 556 | 三、接管安全操作要点 | 564 |
| 四、燃气中毒后的急救和护理 | 556 | 四、带气施工安全操作要点 | 565 |
| 第二节 燃气管道的停气降压与换气 | | 五、气密性试验安全操作要点 | 566 |
| 投产 | 556 | 六、高空作业安全操作要点 | 567 |
| 一、燃气管道的停气降压施工 | 556 | 七、市区施工安全操作要点 | 567 |

八、停气降压施工安全操作要点 569

九、钢管绝缘层施工安全操作要点 570

第九章 施工组织设计及验收拨交

| | | | |
|--------------------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 第一节 施工组织设计 | 571 | 三、物资工具管理 | 580 |
| 一、施工组织设计编制的主要依据 | 571 | 四、质量管理 | 580 |
| 二、施工组织设计编制的主要原则 | 571 | 五、安全管理 | 581 |
| 三、施工组织设计的主要内容 | 571 | 六、设备管理 | 581 |
| 第二节 施工现场管理 | 579 | 七、成本管理 | 581 |
| 一、施工进度管理 | 579 | 第三节 竣工图的测绘 | 582 |
| 二、劳动力管理 | 579 | 第四节 地下管道工程验收和拨交 | 586 |
| 附录一 低压燃气管水力计算单位长度压力降便查表 | 593 | | |
| 附录二 图例 | 598 | | |
| 附录三 常用管材规格 | 601 | | |

第一章 概 述

城市燃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,用作城市燃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 Clyton)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。20 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,使燃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,使城市燃气的气源大大增加。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燃气化的速度。燃气供应已从城市普及到农村,形成全国以至跨国的燃气供气系统,各种口径的燃气输送管线长达几十万公里。燃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。电脑在燃气生产、输送、调度上的广泛使用,大大提高了城市燃气供应的可靠性和经济性。

我国的城市燃气还处在发展时期。解放初仅有上海和东北的九个城市具有燃气设施,而且设备陈旧,供气量少。上海是全国最早建有城市燃气设施的城市,已有 130 多年的历史。但在解放前的 80 多年中燃气用户只有 18000 多户,管道总长度仅 400 多公里,日供气量不到 9 万立方米。而解放后的 40 多年,燃气用户增加了 160 多倍,供气量增长了 90 多倍,管网长度增加近 8 倍,储气能力增长了 20 多倍。

我国城市燃气发展的潜力很大,资源丰富。目前,全国已有 100 多个城市先后建立了燃气供应设施。随着气体燃料在能源结构中所占的比重增加,城市燃气事业必将得到更为迅速的发展。

第一节 燃气的燃烧特性

燃气是以可燃气体为主要组分的混合气体燃料。50年代以前燃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“燃气”。

随着社会生产的发展,燃气的生产方式、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燃气的重要气源。

城市燃气是指可以作为供给城市居民、工业使用的燃气。并不是所有燃气均可作为城市燃气使用,对供城市使用的燃气——城市燃气,是有一定的质量标准的。在我国作为城市燃气的主要气源有: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。

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

燃气的燃烧特性有下列几项。

一、热值

城市燃气中的可燃成分(H₂、CO、C_mH_n和H₂S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)城市燃气完全燃烧时所放出的热量称该城市燃气的热值,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)城市燃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)城市燃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,城市燃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:

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

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

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]。

干燃气和湿燃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℃(上/下)空气中 中体积 (%) | 着火 温度 t (℃) | 燃 烧 反 应 式 | 理论空气量 和耗氧量 [米 ³ (标准)/ 米 ³ (标准)] | | 理论烟气量 V _f [米 ³ (标准)/米 ³ (标准)] | | | | 热 值 Q [千焦/米 ³ (标准)] | |
|----|------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------|---|--|-----|--|------------------|----------------|----------------|---|--------|
| | | | | | | 空气 | 氧 | CO ₂ | H ₂ O | N ₂ | V _f | 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——湿燃气的低热值[千焦/米³(标准)湿燃气]；

Q——干燃气的低热值[千焦/米³(标准)干燃气]；

d——燃气的含湿量[公斤/米³(标准)干燃气]；

φ——湿燃气的相对湿度；

p——燃气的绝对压力(帕)；

p_{sb}——在与燃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,燃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 ——燃气的低热值[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、烟气量

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量称为理论烟气量。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)燃气完全燃烧所产生的理论烟气量可按热值近似计算:

低热值小于或等于 12000 千焦/米³(标准)的燃气:

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

炼焦燃气:

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

烃类气体:

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

式中 V_f^0 ——理论烟气量[米³(标准)/米³(标准)];

Q ——燃气的低热值[千焦/米³(标准)];

a ——系数,对天然气 $a = 2.0$, 对石油伴生气 $a = 2.2$, 对液化石油气 $a = 4.5$ 。实际烟气量 V_f 可按下式计算:

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

四、燃气的互换性

随着我国城市燃气事业的发展,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。当燃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燃气具有互换性。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燃气中,则贴近热源周围的一层燃气被迅速加热,并开始燃烧产生火焰,然后向系统其余部分传播,使燃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。工程上实用的燃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。单一可燃气体在常压、20℃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。

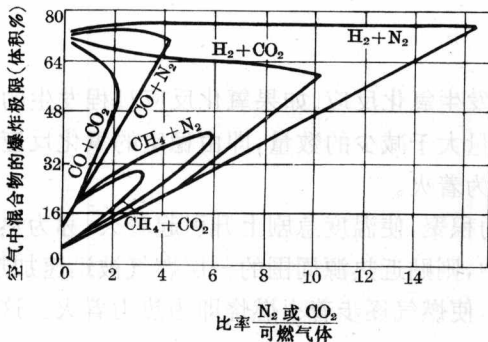


图 1-1 用氮或二氧化碳和氢、一氧化碳、甲烷混合时的爆炸极限

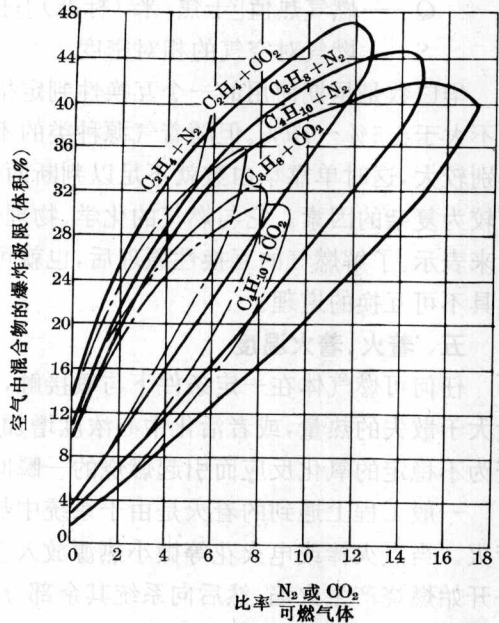


图 1-2 用氮或二氧化碳和乙烯、丙烷、丁烷混合时的爆炸极限

七、燃烧温度

一定比例的燃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。燃烧温度可由燃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℃,此时烟气中 CO₂ 与 H₂O 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

$$t_{th} = \frac{Q}{V_{RO_2}C_{RO_2} + V_{H_2O}C_{H_2O} + V_{N_2}C_{N_2}} \quad (1-13)$$

式中 t_{th} ——理论燃烧温度(°C);
 Q ——燃气低热值[千焦/米³(标准)干燃气];
 C_{RO_2} 、 C_{H_2O} 、 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)·°C]};
 V_{RO_2} 、 V_{H_2O} 、 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(°C)

| | | | | |
|----------------|------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|
| H ₂ | CO | CH ₄ | C ₃ H ₈ | C ₄ H 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(°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。燃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 $CO < 20\%$ (可燃气体的组分)和 $N_2 + CO_2 < 50\%$ (扣除可燃气体中空气的组分)时,其计算公式为

$$u = \frac{\sum u_i \alpha_i V_{oi} y_i}{\sum \alpha_i V_{oi} y_i} [1 - f_i (N_2 + N_2^2 + 2.5CO_2)] \quad (1-15)$$

$$N_2 = \frac{y_{N_2} - 3.76y_{O_2}}{100 - 4.76y_{O_2}}$$

$$CO_2 = \frac{y_{CO_2}}{100 - 4.76y_{O_2}}$$

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

- 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_{O_i} ——混合气体各组分的理论空气量[米³(标准)/米³(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。

九、燃烧方法及燃烧稳定性

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

1. 扩散式燃烧