



普通高等教育环境科学与工程类“十三五”规划教材

管延文 蔡 磊 李 帆 等◎编著

# 城市天然气工程

(第二版)

CHENGSHI TIANRANQI GONGCHENG



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

# 城市天然气工程

## (第二版)

管延文 蔡 磊 李 帆 等 编著

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书共十二章,对国内外天然气发展情况、天然气的净化、天然气门站与储配站、天然气计量技术、调压站等站场工程及其工艺流程、天然气储气调峰技术、液化天然气(LNG)供应、压缩天然气(CNG)供应、分布式能源供应、天然气在工业中的应用、天然气供应安全评价、天然气供应节能技术、天然气供应数据采集及控制等内容进行了阐述。

本书可作为高校建筑环境与能源应用工程、油气储运工程、热能与动力工程等专业的教学用书,也可作为从事燃气工程技术及管理工作的专业人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

城市天然气工程/管延文等编著. —2版. —武汉:华中科技大学出版社,2018.12

普通高等教育环境科学与工程类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5680-4348-9

I. ①城… II. ①管… III. ①城市-天然气工程-高等学校-教材 IV. ①TE64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 279870 号

### 城市天然气工程(第二版)

Chengshi Tianranqi Gongcheng(Di-er Ban)

管延文 蔡 磊 李 帆 等编著

策划编辑:余伯仲

责任编辑:罗 雪

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:武汉市籍缘印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:15.5

字 数:392千字

版 次:2018年12月第2版第1次印刷

定 价:44.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前 言

近十几年来,我国的城市燃气事业得到了快速发展,天然气作为清洁能源及城市主要能源之一,对大气环境改善、能源效率提高、社会生活进步有着重要的促进作用。随着科学技术水平的提高,天然气领域各种新技术、新工艺、新材料、新设备等不断涌现,同时,“西气东输”、“川气东送”、LNG(液化天然气)接收站等大型重点工程相继上马,极大地促进了城市燃气工业的发展。

在此背景下,我们对第一版教材进行了修订,吸收了近年来出现的新技术、新材料、新工艺,补充了国家关于天然气发展的新政策、新要求。

本书系统阐述了城市天然气供应工程的基本原理、工艺流程、技术要求,更新了天然气计量、储气调峰、LNG供应、天然气数据采集与智慧燃气、分布式能源、天然气工业应用、天然气供应节能、天然气安全评价等内容,希望读者既能掌握城市天然气工程中的基本知识,又能了解行业发展动态及技术前沿。本书可作为高校建筑环境与能源应用工程专业的专业方向课教材,也可供燃气行业专业技术人员及管理人员参考。

本书在编写过程中,得到了华中科技大学环境学院领导、教务科老师、燃气课题组师生和华中科技大学出版社编辑的支持与帮助,并得到华中科技大学教材出版专项基金的支持,在此一并表示感谢!本书由管延文、蔡磊、李帆等编著,课题组成员参与编写,编写分工如下:第1章由管延文、高奕编写,第2章由李帆、郑莉编写,第3章由李帆、曹艳光、孙彬编写,第4、5章由蔡磊、李伟杰编写,第6、7章由蔡磊、张晓华编写,第8、9章由管延文、韩逸骁编写,第10、11章由管延文、林奇编写,第12章由管延文、梁莹编写,余露、李娟、刘泽曦、程泽扬、贺天智参与资料收集与修订。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

2018年5月

# 目 录

|                   |      |
|-------------------|------|
| 第 1 章 天然气概论       | (1)  |
| 1.1 天然气资源概况       | (1)  |
| 1.2 我国城市天然气状况     | (8)  |
| 1.3 天然气的基本性质      | (16) |
| 思考题               | (25) |
| 本章参考文献            | (25) |
| 第 2 章 天然气的净化      | (26) |
| 2.1 城市天然气质量要求     | (26) |
| 2.2 天然气除尘净化       | (27) |
| 2.3 天然气脱水         | (30) |
| 2.4 天然气脱硫         | (38) |
| 思考题               | (44) |
| 本章参考文献            | (45) |
| 第 3 章 城市天然气门站与储配站 | (46) |
| 3.1 天然气门站         | (46) |
| 3.2 天然气储配站        | (50) |
| 3.3 清管设备          | (53) |
| 3.4 调压站、阴极保护及阀室   | (58) |
| 思考题               | (71) |
| 本章参考文献            | (71) |
| 第 4 章 天然气计量技术     | (72) |
| 4.1 天然气流量计的种类     | (72) |
| 4.2 天然气体积流量修正     | (82) |
| 4.3 天然气的质量计量      | (86) |
| 4.4 天然气能量计量       | (88) |
| 4.5 天然气流量计算机      | (91) |
| 思考题               | (93) |
| 本章参考文献            | (93) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 第5章 天然气储存及调峰 .....           | (94)  |
| 5.1 储气分类 .....               | (94)  |
| 5.2 地下储气库 .....              | (96)  |
| 5.3 管道及储气罐储气 .....           | (100) |
| 5.4 液化天然气储存 .....            | (104) |
| 5.5 我国储气设施与调峰机制建设现状与要求 ..... | (106) |
| 思考题 .....                    | (108) |
| 本章参考文献 .....                 | (108) |
| 第6章 液化天然气供应 .....            | (109) |
| 6.1 液化天然气的特性 .....           | (109) |
| 6.2 天然气液化工艺 .....            | (112) |
| 6.3 液化天然气气化站 .....           | (122) |
| 6.4 液化天然气汽车加气站 .....         | (129) |
| 6.5 调峰型城市液化天然气储配站 .....      | (131) |
| 思考题 .....                    | (133) |
| 本章参考文献 .....                 | (133) |
| 第7章 压缩天然气供应 .....            | (135) |
| 7.1 压缩天然气加气站 .....           | (136) |
| 7.2 压缩天然气供气站 .....           | (145) |
| 思考题 .....                    | (152) |
| 本章参考文献 .....                 | (152) |
| 第8章 天然气分布式能源供应 .....         | (153) |
| 8.1 天然气冷、热、电三联供系统 .....      | (153) |
| 8.2 常规天然气冷、热、电三联供系统 .....    | (155) |
| 8.3 天然气燃料电池供电系统 .....        | (160) |
| 8.4 天然气微型燃气轮机供电系统 .....      | (163) |
| 思考题 .....                    | (164) |
| 本章参考文献 .....                 | (164) |
| 第9章 天然气的工业应用 .....           | (165) |
| 9.1 天然气锅炉供气系统 .....          | (165) |
| 9.2 天然气工业炉供气系统 .....         | (168) |
| 9.3 天然气发电系统 .....            | (170) |
| 9.4 天然气化工工业 .....            | (172) |
| 9.5 天然气用于交通运输 .....          | (174) |
| 思考题 .....                    | (176) |
| 本章参考文献 .....                 | (176) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 第 10 章 天然气供应安全评价 .....    | (177) |
| 10.1 天然气泄漏与扩散 .....       | (178) |
| 10.2 天然气供应事故原因分析 .....    | (178) |
| 10.3 天然气供应系统安全评价 .....    | (183) |
| 10.4 天然气站场安全评价 .....      | (191) |
| 思考题 .....                 | (193) |
| 本章参考文献 .....              | (194) |
| 第 11 章 天然气供应节能技术 .....    | (195) |
| 11.1 天然气压力能回收利用 .....     | (195) |
| 11.2 天然气冷能回收利用 .....      | (201) |
| 11.3 天然气放散及控制 .....       | (206) |
| 思考题 .....                 | (208) |
| 本章参考文献 .....              | (209) |
| 第 12 章 天然气供应数据采集及控制 ..... | (210) |
| 12.1 天然气供应数据采集系统 .....    | (210) |
| 12.2 天然气输配系统调度 .....      | (221) |
| 12.3 智慧燃气 .....           | (227) |
| 思考题 .....                 | (238) |
| 本章参考文献 .....              | (238) |

# 第 1 章 天然气概论

## 1.1 天然气资源概况

### 1.1.1 国内外天然气资源

能源是支撑现代人类社会生存和发展的柱石,是制约国家经济发展的瓶颈。100 多年来,人们大规模地开采地下的煤炭和石油,为人类社会的经济发展带来了繁荣,人类在现代化过程中也迅速地发展了石油工业。各国对能源需求越来越大,以石油、煤炭为源动力的能源结构已经不能够满足清洁能源的要求,利用天然气等清洁能源代替燃煤,实现替代性的增长,是能源转换的着力点。如今的天然气正是适应时代需求,在动力时代向低碳未来转型过程中的中坚力量。随着天然气勘探、开发、储运和利用技术的进步和人们对环境问题的日益关注,人们普遍认为“21 世纪是天然气时代”。

天然气一般指以烃类为主的存在于岩石圈、水圈以及地幔和地核中的气体,依其成因和储存状态又可分为常规天然气和非常规天然气。常规天然气包括单一相态气藏气、气顶气、油藏溶解气,非常规天然气包括致密岩石中的天然气、煤层气、深层气和可燃冰等。地球上蕴藏着极其丰富的天然气资源,非常规天然气资源潜力更加巨大,仅其中的甲烷水合物资源就是全球已知所有常规矿物燃料(煤、石油和常规天然气)总和的两倍。但是,非常规天然气目前还处于早期勘探开发和前期研究阶段,其中煤层气勘探、开发、利用技术较为完善,而对可燃冰,目前只有俄罗斯和美国等少数国家进行了开发利用,主要还处于前期研究与试验阶段。

根据《2017 年天然气行业分析报告》可知,全球天然气储量相对集中,如表 1-1 所示,2015 年年底全球天然气大部分集中于中东和欧洲地区,分别占 42.8%和 30.4%。

表 1-1 世界主要地区天然气可采资源比例统计表

| 地区   | 比例/% |
|------|------|
| 中东   | 42.8 |
| 欧洲   | 30.4 |
| 亚太地区 | 8.4  |
| 非洲   | 7.5  |
| 北美   | 6.8  |
| 中南美  | 4.1  |
| 世界总计 | 100  |

从国家来看,伊朗、俄罗斯、卡塔尔、土库曼斯坦、美国储量最多,合计占 63.5%;从历史数据来看,中东地区天然气储备相对稳定,美国受益于页岩气革命,储量增长明显。随着勘探技术的不断提高和对地质认识的逐步深化,世界天然气可采资源量还会有所增加。

### 1.1.2 国内天然气利用情况

#### 1. 中国天然气勘探开发简况

中国是世界上最早发现并利用天然气的国家之一,在相当长的时期内我国油气开采和利用技术上都处于遥遥领先的地位。早在公元前 3 世纪的秦汉时期,劳动人民在挖水井和盐井时就发现了天然气的可燃现象。

我国周代著作《周易》中就有“泽中有火”“火在水上”等记载。在公元前约 250 年,秦孝文王以李冰为蜀守,于广都(今四川成都)一带开凿盐井,随后就在盐井中发现了天然气。西汉宣帝神爵元年(公元前 61 年),在陕西省鸿门(今神木县和榆林县一带)也发现了天然气井。《汉书·地理志》载有“西河郡鸿门县有天封苑火井祠,火从地出”。这很可能是指当时人们在钻凿水井过程中发现了天然气,并看到了燃烧现象,于是将此奉为神明,立祠来表示虔敬。“火井”这个名词,是中国古代人民给天然气井取的非常形象化的名字。在生产实践中,劳动人民对天然气的性质逐步加深认识,开始有目的地钻凿、开采和利用。1950 年从四川成都出土的东汉画像砖中,有一幅“煮盐图”,画有从井下取卤水,用竹管送到盐锅中,灶上共有五口大锅,灶火门处排列有几根管线通到锅底。英国著名科学家李约瑟所著《中国科学技术史》中指出:这些并排的管子是输送天然气供在盐锅下燃烧用以煮盐的。这一画像砖是中国古代人民开采和利用天然气的历史见证,也是研究我国天然气生产技术发展史的珍贵文物。东汉顺帝在位期间(公元 2 世纪),在四川陵州(今仁寿县一带)凿盐井时发现了天然气(据《太平广记》一书所载)。三国时蜀国丞相诸葛亮还曾亲自到四川临邛观看过天然气井,那时用天然气煮卤熬盐,燃烧时的熊熊火焰,蔚为奇观。南朝宋人刘敬叔所著《苑苑》中载有“蜀郡临邛县有火井,汉室之隆则炎赫弥炽,暨桓、灵之际,火势渐微,诸葛亮一蹴而更盛,至景曜元年,人以烛投即灭。其年蜀并于魏”。这一段文字有些迷信色彩,认为天然气的火势是随封建王朝的衰盛而消长。这显然是由当时科学技术水平较低而对火井出气的道理不明所造成的。从西汉开始到蜀亡于魏为止,那天然气井至少也连续烧了 200 年。3~4 世纪时,西晋著名文学家左思所著《蜀都赋》,郭璞所著《盐池赋》,都对四川地区的“火井”有所描叙。4 世纪东晋常璩所著《华阳国志》中描写临邛县的火井天然气火焰时说:“夜时光映上昭,通耀数十里。”公元 557 年,南北朝北周时期,临邛县还被命名为“火井镇”;公元 606 年,临邛又由“火井镇”改名为“火井县”。唐宋时期临邛都一直以“火井”而闻名。传到明朝,临邛还设有火井巡检司。明崇祯十年(公元 1637 年),宋应星写的《天工开物》一书,对四川的天然气开采和用于制盐等技术都有较详细的记载,并绘制有钻井图和火井煮盐图。他发出“西川有火井……未见火形而用火神,此世间大奇事也”的感叹,也就是说天然气看不见火的形象而起火了的作用。他对天然气的燃烧现象的描述是真实的,以当时的科学水平来说,他认为火有精神,看不见像烧柴、烧煤那样含有大量固体微粒的红黄色火焰,燃烧后又看不见灰渣,因此称之为奇事。到了清康熙三十二年(公元 1676 年),据《台湾府志》记载:“从山口隙缝中如泉涌出,点之即燃,火出水中,火水同源,蔚为奇观。”这证明当时已在台湾省发现油气苗。18 世纪,清高宗乾隆写有一首火井诗,其中有“火井欲具示”的诗句。到了公元 1765 年,在四川自流井构造钻老双盛井,钻深 530 m,遇天然气,日产气量约 160 m<sup>3</sup>。公元

1815年,在上述构造钻井的钻深有的达800 m左右。公元1835年,又在上述构造的兴海井钻深达1001.4 m,当时钻这样深的一口井,需费时3年。公元1840年前后,有一口井钻到1200 m以下,钻穿了石灰岩的主气层,气势凶猛,引起大火。从井口喷出几十丈(1丈约为3.33 m,1丈=100寸,全书同)高的火舌,历史上称此井为“自贡古今第一大火井——火井王”。据考证当时在自流井气田上日产上万立方米的气井约有10口。

自流井气田位于四川省自贡市富顺县和荣县境内,历史上称为自流井场和贡井场,面积约有50 km<sup>2</sup>,是中国最早投入开发和利用的天然气田,也是世界上最早开发的天然气田。气田的开发大致可分为三个阶段:13世纪以前以采盐为主;13~19世纪大规模开采和利用浅气层所产天然气;19世纪30~40年代钻到气层构造深部的主要产气层,产气量迅速增长。自流井气田是开采井盐时发现的,钻井汲取卤水,煎熬制盐,开始时曾发现有的井自流盐水,因而称其为自流井。13世纪后大规模开发浅气层,如《富顺县志》中载有“井火,在县西90里(1里=500 m),井深四五丈,大径五六寸,中无盐水”,那时已打出天然气井,天然气主要用作制盐的燃料。自流井地区长期以来成为四川省主要产盐地,就是因为自流井能自流卤水,而且有丰富的天然气资源。天然气的开发利用,直接影响盐业的发展,在开发盐和天然气时,用竹子或木料制成管线输送天然气,是中国古代人民在天然气工业发展史中的一项伟大成就。当时这种管线叫作“笕”或“枧”。置笕,就是建设地面输气管线。竹管或木管外缠竹篾条,用桐油和石灰把缝隙处涂上以防漏。据《川盐纪要》记载,当时自流井气田已有竹木制的集输管线总长达100 km以上,专门从事管线建设的工人有10000多人。与当时的欧美几个国家仅开始用空心木管短距离输送人工煤气或天然气相比,中国处在遥遥领先的地位。在没有钢管和铁管的条件下,充分利用四川盛产的竹子和桐油来完成输气管线的伟大工程,不能不说是一项伟大的创造。也可看到,即使在封建社会束缚生产力发展的不利条件下,我国人民也显示了惊人的才智。

1840年至1949年,中国天然气工业发展非常缓慢。到1949年中华人民共和国成立时,仅发现石油沟、自流井、圣灯山等7个气田,年产气7000万m<sup>3</sup>,探明储量3.85亿m<sup>3</sup>。

中华人民共和国成立后,天然气工业获得迅速发展。首先,人们发现了一大批含油气盆地,气田数量、储量和产量大增;其次,从事天然气地质研究的队伍发展壮大,1949年之前仅有48人从事石油地质调查研究,没有专业的天然气研究人员,而目前,仅从事油气地质勘探的人员就达10万人之多;再次,天然气地质理论取得了飞跃性发展,尤其是经过“六五”至“八五”的国家科技攻关,形成了一系列适合中国地质特征的天然气地质理论,勘探效益和成果日益显著;最后,天然气勘探开发技术,如复杂构造气藏识别技术、气藏精细描述技术、致密砂岩气藏开发技术等取得重大进步,极大地扩大了储量发现和开发利用的范围。到目前为止,我国已在30多个沉积盆地发现了天然气,其中四川、鄂尔多斯、塔里木、吐哈、柴达木、准噶尔、渤海湾、松辽、琼东南、莺歌海、渤海湾海域和东海等12个盆地为主的含气盆地。近20年来,中国经济进入高速发展期,天然气工业也突飞猛进,形成了东部、中部、西部和海上4大天然气勘探开发区。2016年,中国天然气新增探明地质储量7846亿m<sup>3</sup>,比上年下降30%;天然气产量为1370亿m<sup>3</sup>,比上年增长1.5%。

经过实践与探索,我国的页岩气技术积累了一定的经验,也有了一定的发展。近年来,一批又一批页岩气气钻和压裂施工顺利完成。在页岩气资源开发领域,我国在学习国外先进的开采技术和经验的基础上,结合水库的实际情况,积极探索更多的土地、水,降低成本,更有效地在保护环境的同时寻求发展。在技术、条件成熟时,广泛运用国外页岩气开采的井

工厂开发模式,减少表面积和天然气生产设备,降低开发成本,探索出合适中国国情的发展路径。

除此之外,我国还致力于非常规天然气的勘探、开发和利用。20世纪80年代初我国开始勘探煤层气,90年代又加大了勘探试验力度。通过不断学习国外先进经验和引进国外技术设备,煤层气勘探取得了一定进展。20世纪90年代以来开展的可燃冰研究在我国南海和东海海域取得了进展,工作人员在海洋高分辨率地震勘探中发现了可燃冰存在的拟海底反射层特征,并在南海深海钻探中取得了可燃冰芯样。可燃冰是天然气和水结合在一起的固体化合物,外形与冰相似,由于含有大量甲烷等可燃气体,因此极易燃烧。同等条件下,可燃冰燃烧产生的能量比煤、石油、天然气的要多出数十倍,而且燃烧后不产生任何残渣和废气。科学家们将可燃冰称作“属于未来的能源”。而关于我国可燃冰的储量,据报道,其资源十分丰富,主要分布在南海、东海海域,以及青藏高原、东北的冻土区。据粗略估计,仅南海北部陆坡的可燃冰资源就达到186亿吨油当量,相当于南海深水勘探已探明油气储量的6倍,达到我国陆上石油资源总量的50%。2007年5月1日,我国地质调查局在中国南海北部成功钻获可燃冰实物样品。发现可燃冰的神狐海域,成为世界上第24个采到可燃冰实物样品的地区,是第22个在海底采到可燃冰实物样品的地区,是第12个通过钻探工程在海底采到可燃冰实物样品的地区,我国因此成为继美国、日本、印度之后第4个通过国家级研发计划采到可燃冰实物样品的国家,是在南海海域首次获取可燃冰实物样品的国家。随后,2017年5月18日,我国在南海北部神狐海域进行的可燃冰试采获得成功,这也标志着我国成为全球第一个实现了在海域可燃冰试开采中获得连续稳定产气的国家。中国海域辽阔,可燃冰资源潜力巨大,开展可燃冰研究,可以为我国天然气工业提供后备资源。

## 2. 中国常规天然气资源及其分布情况

我国幅员辽阔,拥有373个沉积盆地,总面积达670万 $\text{km}^2$ (陆上有354个盆地,面积为480 $\text{km}^2$ ;海域有19个盆地,面积为190 $\text{km}^2$ ),这为形成丰富的天然气资源奠定了良好的地质基础。根据全国油气资源动态评价(2015年),天然气地质资源量为90.3万亿 $\text{m}^3$ ,可采资源量为50.1万亿 $\text{m}^3$ ,与2007年的评价结果相比,分别增加了158%和127%。根据国土资源部报告,2015年我国天然气新增探明地质储量6772.20亿 $\text{m}^3$ ,新增探明技术可采储量3754.35亿 $\text{m}^3$ ,2个气田新增探明地质储量超过1000亿 $\text{m}^3$ 。我国天然气探明储量集中在10个大型盆地,依次为:鄂尔多斯、四川、塔里木、渤海湾、松辽、柴达木、准格尔、莺歌海、渤海海域和珠江口。天然气资源总量中,西部地区占据80%,东部占8%,海域占12%。

截至2016年年底,全国累计探明常规天然气(含致密气)储量11.7万亿 $\text{m}^3$ ,累计产量为1.4万亿 $\text{m}^3$ ,资源探明率为13%,探明储量采出程度为12.4%,剩余可采储量为5.2万亿 $\text{m}^3$ 。

## 3. 中国非常规天然气资源及其分布情况

非常规天然气是指在成藏机理、赋存状态、分布规律或勘探开发方式等方面有别于常规天然气的烃类(或非烃类)资源,主要指致密砂岩气、煤层气、页岩气、可燃冰等。中国非常规天然气资源丰富,合理有效地对其进行开发,可为中国经济的可持续发展提供能源保障。

粗略统计,中国非常规天然气资源量为 $200 \times 10^{12} \sim 380 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,远远超过了现今常规天然气的资源量,具有巨大的开发潜力和经济效益。其中:可燃冰的资源量最大,超过

$100 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ;煤层气资源量为  $36 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ;页岩气资源量大致与现今常规天然气相当或稍低;致密砂岩气资源量为  $50 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,水溶气资源量为  $11.8 \times 10^{12} \sim 65.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。非常规天然气变成常规天然气是完全可行和现实的。

截至2016年年底,全国累计探明煤层气地质储量6928.3亿 $\text{m}^3$ ,累计产量为241.1亿 $\text{m}^3$ ,资源探明率为2.3%,探明储量采出程度为3.5%,剩余可采储量为3344.0亿 $\text{m}^3$ ;累计探明页岩气地质储量5441.3亿 $\text{m}^3$ ,累计产量为136.2亿 $\text{m}^3$ ,资源探明率为0.4%,探明储量采出程度为2.5%,剩余可采储量为1224.1亿 $\text{m}^3$ 。中国天然气资源探明率和探明储量采出程度均较低,通过科技创新、技术进步可释放较大的资源潜力。中国在近海海域可燃冰勘探上取得了重大成果,于2017年试采成功。可燃冰的资源潜力巨大,这对中国能源安全具有重要意义,这表明中国可以大幅度提高能源安全性,不至于在能源方面受制于人。可燃冰试采成功,其意义相当于获得了1000亿t石油。

#### 4. 中国天然气消费状况

伴随经济的快速发展,我国能源需求快速增加。近年我国城市雾霾严重,极端天气频发。天然气由于具有清洁、优质、高效的特点,可以优化我国能源消费结构,有效缓解我国能源供应安全和生态环境保护问题。因此,2000年以后,我国出台了鼓励清洁能源利用的政策,带动了天然气消费快速增加,年增速几乎都超过10%;到2017年为止,中国天然气表观消费量(不含向港澳台供气)已达到2373亿 $\text{m}^3$ 。虽然近年来我国天然气消费量增长很快,但这并没有导致一次能源消费结构根本性变化,我国能源消费仍然以煤炭、石油为主,二者在一次能源消费结构中所占的比例在85%以上,天然气在一次能源消费结构中的占比仍较低。“十三五”规划预计,到2020年,天然气在一次能源消费结构中的占比将达到10%,但仍远低于目前世界能源消费中天然气占比平均水平24.1%。为了有效缓解这一问题,还有许多迫切的问题需要解决。首先,尽可能增加我国天然气生产量以及进口量,增加我国天然气消费的绝对值。其次,调整我国天然气消费结构,充分发挥天然气资源的优势。具体可以通过实施城镇燃气工程,推进北方地区冬季清洁取暖;实施天然气发电工程,大力发展天然气分布式能源;实施工业燃料升级工程;实施交通燃料升级工程,加快天然气车船发展等手段促进天然气的消费。同时还需加强政策保障和资源供应保障,各环节均要努力降低成本,确保终端用户获得实惠,增强天然气的竞争力。

我国在天然气消费结构方面也有变化。天然气消费结构是指不同领域消费的天然气占天然气消费总量的比例。习惯上将天然气消费领域归纳为城市燃气、发电、工业燃料和化工这四大领域,其具体细分见表1-2。综合考虑天然气消费的社会效益、环境效益和经济效益,以及不同用户的用气特点等各方面因素,参见国家发展与改革委员会公布的《天然气利用政策》,天然气用户被划分为优先类、允许类、限制类和禁止类。城镇居民炊事、生活热水等用气,公共服务设施,天然气汽车,天然气分布式能源项目等被列为优先用气类;耗费大量天然气的天然气化工项目和部分发电项目则被列为禁止类,例如,以天然气为原料生产甲醇、化肥等项目,陕、蒙、晋、皖等13个大型煤炭基地所在地区建设基荷燃气发电项目等。表1-3为中国天然气消费结构变化的部分数据,从表1-3中可以看出,随着城市化水平和环保要求的提高,特别是长输管线等大型基础设施的建设和完善,天然气消费结构得到了不断优化。

表 1-2 天然气消费领域

| 消费领域 | 具体细分                                      |
|------|-------------------------------------------|
| 城市燃气 | 民用生活、公福商业、CNG 汽车、集中供热、冷热电分布式能源、小工业企业燃料用气等 |
| 发电   | 调峰电厂和热电联产                                 |
| 工业燃料 | 冶金、特钢、陶瓷、玻璃、建材等                           |
| 化工   | 甲醇、化肥以及制氨等                                |

表 1-3 中国天然气消费结构变化

| 年份/年 | 城市燃气/% | 发电/% | 工业燃料/% | 化工/% |
|------|--------|------|--------|------|
| 2000 | 12.0   | 14.0 | 36.0   | 38.0 |
| 2006 | 32.4   | 12.1 | 25.5   | 30.0 |
| 2008 | 33.2   | 18.3 | 26.4   | 22.1 |
| 2010 | 35.0   | 21.0 | 26.0   | 18.0 |
| 2014 | 38.8   | 14.8 | 30.6   | 15.8 |
| 2017 | 33.3   | 18.2 | 36.3   | 12.2 |

1.1.3 国外天然气利用情况

1. 国外天然气消费利用趋势

低碳经济、绿色发展、节能减排、低成本、高效率已成为世界各国的基本发展战略,天然气资源的清洁高效利用是实现这个战略的最佳能源选择。尽管 2008 年后世界经济连续遭受金融风暴、地缘政治动荡、经济发展疲软和原油及煤炭价格暴跌的冲击,但全球天然气消费仍然保持增长。2015 年,全球天然气消费量达到了  $3.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,比 2010 年增加了  $1.06 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

天然气消费量持续增长有效提升了天然气在世界能源消费结构中的地位。2016 年,全球天然气产量达 3.66 万亿  $\text{m}^3$ ,同比增长 2.1%,天然气消费量达 35429 亿  $\text{m}^3$ ,占全球一次能源消费总量的 24%。除了中南美洲外,各地区天然气产量均有不同程度的增长。但是,在世界各地之间,天然气在能源消费结构中的占比极不均衡。北美的天然气消费占比高达 27.3%,欧洲及欧亚大陆的高达 29.1%,而非洲和中南美洲的分别仅有 3.9%和 4.9%,亚洲和中东地区的分别为 20.4 %和 14.5%。凭借燃烧热值高、大气排放物少、能源利用效率高、价格有竞争力等优势,天然气广泛应用于各个工业部门,包括电力生产、居民生活、商业、交通运输等行业,并作为优质的化工原料,发展形成了天然气化工业。随着科学技术的进步,天然气利用在不断向清洁高效利用领域发展,消费结构在不断优化。表 1-4 为目前世界天然气消费结构。

表 1-4 世界天然气消费结构

| 天然气消费   | 比例/%  |
|---------|-------|
| 发电      | 40.65 |
| 工业燃料    | 14.64 |
| 居民燃料    | 14.37 |
| 运输      | 3.35  |
| 化工      | 4.15  |
| 能源部门    | 9.99  |
| 商业及其他   | 6.62  |
| 非能源用及损耗 | 6.23  |

2. 部分国家天然气利用特点与动向

目前,全世界消费利用天然气的国家有 128 个。实际上,各个国家基于资源和国情,在天然气利用领域和发展方向上有所差别。通常,经济发达国家的天然气利用以城市燃气、天然气发电、工业燃料和天然气汽车为主,化工利用只占极少比例;发展中国家的天然气利用则主要集中在工业燃料、城市燃气、天然气发电和天然气化工等领域。

1) 美国

1990 年以前,美国天然气利用还是以城市燃气为主导,发电居第二位。但 1990 年之后,美国的天然气发电业快速发展,新建燃气电厂和装机容量持续增加,发电用气及其在天然气消费中的占比迅速提高。到 2015 年,美国天然气发电用气量高达  $3.02 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,用气占比达 39%,气电发电量也在 2015 年超过煤电。相比之下,居民、商业用气和工业用气因趋于饱和,用气量与往年持平或略有减少,占比有不同程度的下降。天然气化工则因气价上涨导致天然气化工装置关停或外迁,用气量减少三成,用气比例减少三分之一。在当今世界天然气市场,美国有得天独厚的资源、基础设施和价格优势,在西方国家普遍因金融危机和经济衰退致使天然气利用下降的情况下,美国天然气市场却由于页岩气的经济高效开发和价格竞争力的提高,仍在蓬勃发展。目前,发电依然是美国天然气利用的首要方向,其次是天然气分布式能源和天然气汽车,同时天然气化工也会因气价下降迎来新的发展机遇。

2) 英国

1990 年以前,英国的天然气利用方向主要是民用和商业,二者的占比合计达到了约 63%。但随后天然气发电业突飞猛进,发电用气量在 2000 年剧增至  $3.16 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,占比由 2.36% 跃升至 31.08%,仅略低于民用的 32.86%。到 2010 年,天然气发电超过民用,成为占比最大的天然气利用领域。天然气化工利用则因气价上涨而逐渐萎缩。全球金融危机后,英国天然气利用开始衰退,消费量逐年下降。与此同时,天然气发电受到低价煤的冲击,2014 年的用量降至  $2.24 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。相比之下,民用和商业利用较为稳定。尽管面对煤炭的有力竞争,但政府政策和环境保护大趋势仍然支持天然气发电的长期发展,天然气发电还将是英国未来天然气利用的主要方向。

3) 德国

德国各个领域天然气利用发展比较均衡。金融危机之后,德国的天然气工业用气量依

然十分稳定,占比一直保持在 19% 上下。民用领域的变化也很小,但由于天然气发电与煤电相比竞争力下降,因此其用气量略有下降。相比之下,德国的天然气商业利用领域自 1990 年以来发展很快,目前占比已达 15.27%。天然气汽车也是德国天然气利用的重要领域,德国天然气汽车虽然不多,约 10 万辆,但其加气站在欧洲最多,达到 860 座。

4) 日本

日本天然气利用的一大特色是天然气主要用于发电。目前天然气发电在日本天然气利用结构中的占比高达 69.42%,是全球天然气发电占比最大的国家,其气电在电力结构中的占比(41%)仅低于俄罗斯(49.1%)。与大多数经济发达国家不同,日本民用气的消费占比较低,现仅有 7.94%,主要原因之一是日本天然气管道建设基础设施和城市燃气配送管网建设不足,天然气居民利用主要集中在沿海建有 LNG 接收站的城市,或其邻近城市。天然气发电依然是今后日本天然气利用的主要方向。同时,虽然天然气资源主要依靠进口,但日本政府特别重视促进天然气这种低碳能源在各个领域的广泛利用,天然气利用几乎包含了所有传统领域和新领域,包括汽车、分布式能源系统、燃料电池、天然气空调和天然气化工等,并且技术也十分先进,能源利用效率很高。天然气利用技术的不断进步有力推动了日本商业用气的发展,也使之成为未来日本天然气利用发展的另一主要方向。

5) 意大利

意大利天然气利用最突出的特点是天然气汽车的普及。早在 20 世纪 30 年代,意大利就开始了用天然气替代传统汽车燃料的应用。在政府政策、天然气与石油相比的价格优势,以及天然气汽车设备制造和销售厂商在车辆和压缩机供应方面给予长期支持的推动下,意大利天然气汽车市场持续发展。目前,意大利天然气汽车保有量约为 80 万辆,占欧洲天然气汽车保有总量的 61%。目前,天然气汽车仍是意大利天然气利用的发展方向,不但用气还在不断增加,而且其发展天然气汽车的政策、措施和经验正在成为欧洲发展天然气汽车利用的样板和示范。

1.2 我国城市天然气状况

1.2.1 城市天然气利用工程

1963 年四川巴渝输气管道的建成,拉开了中国天然气管道工程发展的序幕。截至 2016 年年底,全国已建成投产天然气管道 6.8 万 km,干线管网总输气能力超过 2800 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ;累计建成地下储气库 18 座,总工作气量达 64 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ;已投产 LNG 接收站 13 座,总接收能力达 5130 万  $\text{t}/\text{a}$ 。近十年,中国天然气管道长度年均增长约 0.5 万 km,管道业仍保持快速发展势头,全国主要燃气管道及 LNG 气源分布如图 1-1 所示。

1. 西气东输工程

西气东输一线工程于 2002 年 7 月正式开工,2004 年 10 月 1 日全线建成投产。西气东输工程是“十五”期间国家安排建设特大型基础设施的工程,其主要任务是将新疆塔里木盆地的天然气送往豫皖江浙沪地区,沿线经过新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南、安徽、江苏、上海、浙江等 10 个省市。线路全长约为 4200 km,投资规模为 1400 多亿元,该管道直径为 1016 mm,设计压力为 10 MPa,年设计输气量为 120 亿  $\text{m}^3$ ,最终输气能力为 200 亿  $\text{m}^3$ 。



图 1-1 全国主要燃气管道和 LNG 气源分布示意图

西气东输二线工程西起新疆霍尔果斯口岸,南至广州,东达上海,途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、河南、安徽、湖北、湖南、江西、广西、广东、浙江、江苏和上海等 14 个省市区,干线全长 4859 km,加上若干条支线,管道总长度(主干线和 8 条支干线)超过 9102 km。西气东输二线配套建设 3 座地下储气库,其中一座为湖北云应地区盐穴储气库,另两座分别为河南平顶山储气库、南昌麻丘水层储气库。该工程的设计年输气能力为 300 亿  $\text{m}^3$ ,总投资约为 1420 亿元,西段于 2009 年 12 月 31 日 16 时建成投产。

西气东输三线工程于2012年10月开工,2014年8月在瓜州站完成了最后一道焊口,西气东输三线西段全线贯通;2016年12月,来自中亚和塔里木气区的天然气到达福建省福州市,西气东输三线东段工程建成通气。与西气东输二线一样,西气东输三线的气源来自中亚。西气东输三线管道西起新疆霍尔果斯,途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、河南、湖北、湖南、广东等8个省区,东达末站福建省福州市。该工程的设计年输气能力为300亿 $\text{m}^3$ 。西气东输三线工程全线包括1干8支,干线、支线总长度为7378 km。

## 2. 川气东送工程

2007年4月9日,国务院正式核准川气东送工程。根据核准方案,建设四川普光到上海的川气东送管道,管道全长为1702 km,总投资约为627亿元。川气东送包括1条主干线、1条支干线和3条支线。其中,主干线从四川普光至上海,全长1647 km,途径重庆市、湖北省、安徽省、浙江省、江苏省;支干线起于湖北省宜昌市,止于河南省濮阳市。此外,3条支线中一条起于四川省天生分输站,止于达州末站;一条起于重庆市梁平县,止于重庆市长寿区;一条起于安徽省宣城市,止于江苏省南京市。

### 3. 陕京线工程

陕京一线工程于 1996 年 5 月开始建设,全长 910 km,横跨陕西、山西、河北及京津地

区,是中国当时路上输送距离最长、途径地区地理条件最复杂、自动化程度最高的天然气输送管道,被称为陕京一线。陕京一线输气管道途径榆林、石家庄、安平、济南、淄博、北京、唐山、秦皇岛、沧州,起点为陕西靖边,终点为北京石景山衙门口。2005年,全长935 km的陕京管道第二条大动脉——陕京二线也正式投产。陕京二线输气管道西起陕西省靖边县,途经陕西省、内蒙古自治区、山西省、河北省,东达北京市大兴区采育镇。管道经过毛乌素沙漠东南边缘、晋陕黄土高原、吕梁山、太行山脉和华北平原,全线总长935.4 km,设计年输气量为120亿 $\text{m}^3$ 。陕京三线工程西起陕西省榆林市,东至北京良乡分输站,全长约896 km,管径为1016 mm,设计压力为10 MPa,设计年输气量为150亿 $\text{m}^3$ 。2010年12月31日,陕京三线天然气管道全线贯通。

#### 4. 涩宁兰输气管线工程

从青海省柴达木盆地的涩北气田到西宁、兰州的天然气长输管线工程,是国家实施西部大开发的重点工程。涩宁兰输气管道西起青海柴达木盆地涩北1号气田,经青海省西宁到达兰州,全长953 km,设计年输气量为20亿 $\text{m}^3$ 。沿线经过青海、甘肃两省14个县市,在青海省内有868 km,管径为660 mm。全程共建设9座厂站,中间建设清管站4座、分输站3座、线路截断阀36座。这些建筑工程大部分都在青海省内。

#### 5. 忠武输气管线工程

忠武天然气长输管线工程,是中国石油开发西部、占领长江中游能源市场的重点工程。忠武输气管线工程包括重庆忠县至湖北武汉1条干线,以及荆州至襄阳、潜江至湘潭、武汉至黄石3条支线,管道总长1347 km,是湖北、湖南两省境内唯一一条输送天然气的管道。忠武线工程从2004年11月16日开始投产试运行,2008年实现输气量19.9亿 $\text{m}^3$ ,达到设计年输气量;2011年、2012年和2013年输气量分别达到41.95亿 $\text{m}^3$ 、51.3亿 $\text{m}^3$ 与43.2亿 $\text{m}^3$ 。

#### 6. 淮武输气管线工程

淮武线是西气东输管线与忠武线的联络线,也是“两湖”地区的保供线,北起西气东输淮阳分输站,途径河南省、湖北省,南至忠武线武汉西计量站,并通过忠武线为湖南省供气。管道全长475 km,管径为610 mm,设计压力为6.3 MPa,设计年输气量为15亿 $\text{m}^3$ ,总投资为15.66亿元。

#### 7. 冀宁联络线工程

冀宁线是连接西气东输主干线与陕京二线的联络线,全长1494 km。工程南起西气东输干线青山分输站,途经江苏、山东、河北三省的12个市县,最后到达河北省安平县,肩负着向河北、山东、江苏等地区的供气任务,年输气量为90亿 $\text{m}^3$ 。作为连接全国天然气管网的西气东输冀宁联络线是一条纵贯华北、华东,连通环渤海和长江三角洲两大经济圈的能源大动脉,是国家干线输气管道。工程的建成投产使我国两条重要的输气管道——西气东输管道和陕京输气管道连接在一起,确保了两条管道的用气互补和安全。

#### 8. 中国-中亚天然气管道工程

中国-中亚天然气管道建设过程历时一年半。该管道分A、B双线敷设,单线长1833 km,A线于2009年12月初试投产;2010年已实现双线建成通气。中国-中亚天然气管道与西气东输二线相连,构成一条横贯东西的中国天然气“主动脉”。按照规划,每年来自土库曼斯坦等国的天然气将有300亿 $\text{m}^3$ ,途中惠及中西部、长三角、珠三角共14个省市,南端最终送