



国家重点出版物出版规划项目

面向21世纪课程教材

天然气工程

(第三版 · 富媒体)

地面集输工程分册

马国光 主编 © 李士伦 主审



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

“十二五”国家重点出版物出版规划项目
面向 21 世纪课程教材

天然气工程

(第三版·富媒体)

地面集输工程分册

马国光 主编

李士伦 主审

石油工业出版社

内 容 提 要

《天然气工程(第三版·富媒体)》为“十二五”国家重点出版物出版规划项目,分为气藏工程、采气工程、地面集输工程三个分册,本书是第三分册。

本书是在长期教学和科研实践的基础上,根据地面集输的特点,对天然气的地面集输工程作了系统全面的阐述。本书主要内容有:天然气的物理化学性质、天然气水合物、天然气矿场集输、主要集输设备、天然气酸性组分的脱除、天然气脱水、天然气凝液回收、集输自动控制、天然气集输与处理 HSE 管理。本书在传统出版的基础上,以二维码为纽带,加入了富媒体教学资源,为读者提供更为丰富和便利的学习环境。

本书可作为石油工程本科专业教材,也可作为研究生、成人教育及相近专业的参考教材,还可供气田工程技术人员和生产管理人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然气工程:富媒体.地面集输工程分册/马国光主编.—3版—北京:石油工业出版社,2017.12

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5183-2132-2

I. ①天… II. ①马… III. ①天然气工程—油气集输工程
IV. ①TE64 ②TE86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 233253 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523579

图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京密东文创科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 12 月第 3 版 2017 年 12 月第 11 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:14.25

字数:342 千字

定价:36.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《天然气工程(第三版·富媒体)》

编 委 会

主 任：李士伦

副主任：郭 平 刘建仪

委 员：(按姓氏笔画排序)

刘启国 孙良田 李 闽 李颖川 何更生

杨继盛 张茂林 张思永 施太和 郭建春

康毅力 梁光川 熊 钰 潘 毅

《地面集输工程分册》编写组

主 编：马国光

主 审：李士伦

成 员：(按姓氏笔画排序)

陈利琼 蒋 洪

第三版前言

西南石油大学,地处川渝老天然气工业基地,一直以服务于天然气开发、开采和地面集输工程作为办学特色。

“天然气工程”课程诞生于石油高等教育经历重大变革和天然气工业快速发展的背景下。2000年,根据教育部颁布的专业目录,钻井、采油和油藏工程三个专业按照“拓宽专业、加强基础、提高能力、办出特色”的教学改革方针合并成了一个专业,按照新的教学计划,“天然气工程”成为该专业一门重要而新兴的主干课程。同时,该课程的设立也适应了天然气工业快速发展的需要。从1983年的油印本,到1996年李士伦与张茂林主编的《气田及凝析气田开发》,再到2000年石油工业出版社出版的面向21世纪课程教材《天然气工程》,以及2006年转变为普通高等教育“十一五”国家级规划教材的《天然气工程(第二版)》,本书已经有30多年的历史了。中国石油大学(北京)、东北石油大学、西安石油大学、重庆科技学院等多所高校也都选用此书为其专业课或研究生课程的教材。随着历史的推移、科学技术的发展和校内外同行老师的教学实践,我们积累了许多宝贵的经验。趁本教材被国家新闻出版广电总局评为“十二五”国家重点出版物出版规划项目之际,同时也为适应高等教育课程改革的要求,对《天然气工程(第二版)》作了重大调整,将其拆分成为气藏工程、采气工程和地面集输工程三个分册,以满足课程模块化教学和深度教学的需要。

地面集输工程是气田开发的重要组成部分之一,是庞大的天然气工程系统中的重要环节,点多面广,系统分散,投资比重较大。它包含了地面气田内部集输系统和天然气净化处理系统,从而实现把原料天然气开采到地面后处理成为商品天然气的可能。不同气田通过科技攻关与技术创新,集输与处理工艺模式逐渐成熟,已形成标准化的建设模式。本书系统总结了气田集输工程的成熟经验、技术进展,对天然气工程系统的学习有重要意义。

本书是《天然气工程(第三版·富媒体)》的第三分册,在教材编写过程中,努力贯彻加强基础、拓宽专业和理论联系实际的思想,使本书能反映新理论、新技术和新方法;尽可能给读者建立一个地面集输、净化处理的一体化的地面集输工程设计理念;给出最基本、较成熟、技术先进适用、反映现代科学技术成果的知识、理论、方法和技术;能从实际出发,符合认识规律和教学规律,每章有提示、小结、习

题,以帮助理解、启发思考和便于自学。

全书共分九章,第一章天然气的物理化学性质,介绍了天然气的基本特性、物性计算方法与天然气产品标准要求;第二章天然气水合物,对天然气地面集输与处理工程中水合物的形成机理和条件进行了分析,同时讲解了如何防止在集输与处理过程中形成水合物;第三章天然气矿场集输,对集输工程中各种类型站场的功能特点、工艺流程等内容进行了介绍,对集输管网的计算和防腐以及管材的选择进行了介绍;第四章主要集输设备,介绍了气田集输站场常用工艺设备的功能、结构特点、选型等方面的要求;第五章天然气酸性组分的脱除,介绍了天然气中酸性组分的危害,以及目前国内外天然气脱硫的主要方法特点和工艺,并对硫磺的回收与生产进行了介绍和分析;第六章天然气脱水,介绍了甘醇溶剂法脱水工艺、固体吸附法脱水工艺,并对这两种方法进行了对比与分析;第七章天然气凝液回收,介绍了凝液回收的基础理论,重点分析了低温分离工艺、天然气凝液的稳定与分馏;第八章集输自动控制,主要描述了集输工程的自动控制系统组成、各站场主要控制方案及重要仪表设备的技术要求;第九章天然气集输与处理 HSE 管理,介绍了危险源识别、健康安全环保工程措施、评价方法与应急预案要求等方面的内容。

本书由马国光担任主编,李士伦担任主审。具体编写分工为:第一章至第五章、第八章由马国光负责编写;第六章、第七章由蒋洪负责编写,第九章由陈利琼负责编写,富媒体动画由研究生尹晨阳制作全书由马国光统稿,由李士伦审核。

特别要感谢李士伦教授,他对本教材建设倾注了大量心血,他严谨、认真、博学、宽容的人格魅力一直感染着每一位编者,其高尚的情操、高风亮节的情怀和天然气人执着的追求深深地激励着我们:齐心协力,谨遵校训,为祖国加油,为民族争气。

由于编者水平有限,书中难免有错漏之处,恳请读者批评指正。

马国光

2017.7

第二版前言

西南石油大学,地处川渝老天然气工业基地,一直以服务于天然气开发作为办学特色。

“天然气工程”课程诞生于石油高等教育经历重大变革和天然气工业快速发展的背景下。2000年,钻井、采油和油藏工程三个专业按照“拓宽专业、加强基础、提高能力、办出特色”的教学改革方针合并成了一个专业,按学校新的教学计划,“天然气工程”成为该专业一门重要而新兴的主干课程。同时,该课程的设立也适应了天然气工业快速发展的需要,为天然气专业技术人员、博士生、硕士生提供一本他们急需的参考书。若仅追溯到1983年的油印本,1996年和张茂林主编的“气田及凝析气田开发”这个合并专业试点的教材,到2000年石油工业出版社出版的面向21世纪教材《天然气工程》,也已有25年历史了。中国石油大学(北京)、西安石油大学、重庆科技学院等也都选用此教材为其专业课教材。随着历史的推移、科学技术的发展和校内外同行老师的教学实践,我们累积了许多宝贵的经验,借此教材转为普通高等教育“十一五”国家级规划教材之际,对第一版作一次较大的修改,以履行2000年初版时的诺言。

修改时有这样几点想法:按气田开发大系统工程的概念,给读者建立一个从开发、开采到地面工程的完整概念;给出最基本、较成熟而又先进的、反映现代科学技术成果的知识、理论、思路、方法和技术;从实际出发,符合认识规律和教学规律,便于自学,“教人以渔”;注意理论联系实际,学以致用;文风好,学风好,把错误降到最低限度;尊重知识产权,集众人智慧,引用他人成果时详细注明了出处。按照上述思想,这次修改中做到了以下几点:删繁就简,削枝保干,突出重点,减轻负担;顺应需要,增加内容,高含硫气田开发日益重要,防腐、环保和安全是头等大事,特请这方面专家施太和、何更生两位老教授和张智博士专门撰写“气井的防腐与安全”一章;每章有提示、小结、实例、习题,以帮助理解,启发思考;尽可能多列参考文献,尤其是中文的相关文献,便于查找;继续、适度反映我们的科研成果,如凝析油气烃类体系相态和状态方程,提高天然气采收率,气井试井和动态监测、分析管理,气井生产节点分析,排水采气和气井防腐及安全等相关研究内容;改变了版面。

本书在内容上作了较大的修改,新增了“气井的腐蚀与安全”一章。绪论、第二章、第八章、第十章改动较大,对其他各章也都有不同程度的修改和调整。本版新增内容主要有:我国天然气开采简史;天然气工业在国民经济中的地位(化工利

用);世界与中国油气资源和科学技术发展趋势;天然气偏差系数、黏度、压缩系数的计算公式(便于计算机编程计算);天然气中水蒸气含量图版;天然气热值和爆炸性; C_n^+ 重馏分特征化处理 and 相态数值模拟计算方法;气井完井的3种方式及其产能方程;气井井筒温度分布计算;气藏采收率;气藏动态分析信息管理系统;天然气水合物防治;节流和透平膨胀制冷低温回收轻烃。

全书共分十二章,主要内容有:绪论,天然气的物理化学性质,烃类流体相态,气井产能分析及设计,气井管流及节流动态,气井生产系统节点分析,气藏物质平衡、储量计算及采收率,气藏开发动态监测、分析和管管理,排水采气,矿场天然气集输系统,天然气预处理及轻烃回收,气井的腐蚀与安全。

参加本书编写的有杨继盛、施太和、何更生、李颖川等老教授,还有郭平、孙雷、刘建仪、张茂林、李闽、刘启国、熊钰、杜建芬等一批年轻有为的教授和专家,还有在美国工作的张思永校友,一批博士生、硕士生也参与了此项工作。

本书编写分工为:前言、绪论、第八章由李士伦、张茂林、刘廷元编写;第二章由张思永、杜建芬、李士伦编写;第三章由孙雷、杜建芬、李士伦编写;第四章由杨继盛、李闽、刘启国编写;第五章由李颖川编写;第六章、第九章由刘建仪编写;第七章由郭平编写;第十章由张思永、杜建芬、李士伦编写;第十一章由熊钰编写;第十二章由何更生、施太和、张智编写。全书由李士伦教授主编,刘建仪、孙雷、郭平等教授为副主编,由赵必荣教授、王鸣华教授级高级工程师审核,还请郭尚平、韩大匡、罗平亚三位院士和中国石油天然气集团公司咨询委员会开发部主任李海平博士对此书进行了审核和评价。在这里向他们表达深切的谢意。

衷心感谢杜志敏校长的关心和大力支持,感谢校教务处、校印刷厂和赵晓锋同志的大力支持和热情帮助。

由于编者水平有限,书中难免仍有不足,恳请读者随时批评指正。

李士伦

2008.4.12

第一版重印前言

自2000年8月本书出版以来,已在西南石油学院石油工程本科专业中使用两届,“天然气工程”定为该校石油工程专业的主修课程,同时,它也作为油气田开发工程和油气井工程学科博士、硕士研究生的重要参考书。石油大学(北京)也把它选为石油工程本科专业的教材,西安石油学院也选为硕士研究生的主要参考教材。此外,许多油气区从事天然气开发开采专业的工程技术人员,也把它作为重要的技术参考书。

在此期间,在教学实践中,广大任课老师和学生反馈了不少好意见,我们也听到了来自生产一线的声音,如东海石油公司李欣高工,通篇阅读本书,提出了不少宝贵意见。中国石油天然气股份有限公司刘宝和副总裁、西南石油学院院长罗平亚院士、石油大学(北京)党委书记李秀生教授、中国石油勘探与生产分公司副总经理冉新权、长庆油气田分公司金忠臣副总经理、石油工业出版社张卫国副社长和本专业领域里的著名教授、专家李相方、赵碧华、孙良田、赵必荣、薄春生、方义生、王鸣华和江同文等都提出了许多宝贵的建议和意见。在这里向他们和所有关心本书的读者表示深切的谢意,并希望继续能得到你们的关心和帮助。

这里请允许我们把杨继盛教授撰写的“气井产能试井”内容再现在第五章中,他毕生从事天然气事业和人民教育事业,他写的《采气工艺原理》教材曾于1997年获得国家优秀教材奖。李颖川教授也专为本书写稿,而且再版时又认真修改。限于篇幅和避免与其他教材重复,张茂林和刘启国两位博士分别编的数值模拟和不稳定试井两章未能收集,钦佩他们顾全大局的精神。

在重版前,我们再请任课老师、参与编写本书的老师查找问题改正错误,在此基础上,我们寻根查源,静下心来反复多次查错修改,这样做的目的只有一个,就是怀有对读者的高度责任感,望能让他们“用得放心,看得顺心”,望能增强读者对我们的信任感,确保内容,尤其是公式的正确无误,以此也表示我们弘扬严谨治学精神和实事求是科学态度的决心。对在第一版时所出现的错误,我们深表歉意,这次重印时我们力争把错误降低到最低限度。限于时间和精力,本次只是重印,待三年之后,随着更多的教学实践,我们再好好作大的修改。

由于编者水平所限,书中难免还有缺点和不足之处,再次恳请读者批评指正。

李士伦

2003年7月1日

目 录

| | |
|-------------------|-----|
| 第一章 天然气的物理化学性质 | 1 |
| 第一节 天然气的化学组成与分类 | 1 |
| 第二节 天然气的物理性质 | 6 |
| 第三节 天然气的热力性质 | 10 |
| 第四节 天然气的 PVT 关系 | 17 |
| 小 结 | 25 |
| 参考文献 | 25 |
| 习 题 | 25 |
| 第二章 天然气水合物 | 26 |
| 第一节 天然气水合物的形成条件预测 | 26 |
| 第二节 天然气水合物的防止 | 32 |
| 小 结 | 38 |
| 参考文献 | 39 |
| 习 题 | 39 |
| 第三章 天然气矿场集输 | 40 |
| 第一节 矿场集输管网 | 40 |
| 第二节 集输管道计算 | 49 |
| 第三节 气田集输工艺流程 | 56 |
| 小 结 | 70 |
| 参考文献 | 70 |
| 习 题 | 71 |
| 第四章 主要集输设备 | 72 |
| 第一节 分离设备 | 72 |
| 第二节 换热设备 | 82 |
| 第三节 流量计 | 88 |
| 第四节 常用阀门 | 94 |
| 小 结 | 98 |
| 参考文献 | 98 |
| 习 题 | 98 |
| 第五章 天然气中酸性组分的脱除 | 100 |
| 第一节 天然气脱除酸性组分的方法 | 100 |
| 第二节 硫磺的回收 | 111 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 第三节 尾气处理 | 120 |
| 小 结 | 124 |
| 参考文献 | 125 |
| 习 题 | 125 |
| 第六章 天然气脱水 | 126 |
| 第一节 概述 | 126 |
| 第二节 溶剂吸收法脱水 | 127 |
| 第三节 固体吸附法脱水 | 138 |
| 第四节 低温分离法脱水 | 148 |
| 小 结 | 153 |
| 参考文献 | 154 |
| 习 题 | 155 |
| 第七章 天然气凝液回收 | 156 |
| 第一节 概 述 | 156 |
| 第二节 制冷工艺 | 164 |
| 第三节 凝液分馏 | 169 |
| 第四节 凝液回收工艺的应用 | 173 |
| 第五节 关键设备选型 | 184 |
| 小 结 | 186 |
| 参考文献 | 186 |
| 习 题 | 187 |
| 第八章 集输自动控制 | 188 |
| 第一节 SCADA 系统 | 188 |
| 第二节 安全仪表系统 | 193 |
| 第三节 站场的主要检测和控制方案 | 195 |
| 小 结 | 198 |
| 参考文献 | 198 |
| 习 题 | 198 |
| 第九章 天然气集输与处理 HSE 管理 | 199 |
| 第一节 健康、安全与环境管理概述 | 199 |
| 第二节 常用 HSE 管理工具 | 203 |
| 第三节 天然气集输与处理中的职业健康管理 | 205 |
| 第四节 天然气集输与处理安全管理 | 208 |
| 第五节 天然气集输与处理环境保护管理 | 212 |
| 参考文献 | 213 |
| 习 题 | 213 |

富媒体资源目录

| 序号 | 名 称 | 页码 |
|----|----------------------|-----|
| 1 | 动态图 4-1 立式两相重力式分离器原理 | 72 |
| 2 | 动态图 4-2 卧式两相重力式分离器原理 | 73 |
| 3 | 动态图 4-3 三相重力式分离器原理 | 73 |
| 4 | 动态图 4-4 旋风分离器原理 | 74 |
| 5 | 动态图 4-5 三相分离器原理 | 78 |
| 6 | 动态图 4-6 壳管式换热器原理 | 83 |
| 7 | 动态图 4-7 U形管式换热器原理 | 84 |
| 8 | 动态图 4-8 套管式换热器原理 | 84 |
| 9 | 动态图 4-9 孔板差压流量计原理 | 89 |
| 10 | 动态图 4-10 气体腰轮流量计原理 | 91 |
| 11 | 动态图 4-11 气体涡轮流量计原理 | 92 |
| 12 | 动态图 5-1 板式吸收塔原理 | 104 |
| 13 | 动态图 5-2 填料吸收塔原理 | 104 |
| 14 | 动态图 5-3 再生塔原理 | 104 |
| 15 | 彩图 5-1 塔板结构 | 105 |
| 16 | 彩图 5-2 塔板类型 | 105 |
| 17 | 彩图 5-3 填料类型 | 105 |
| 18 | 动态图 6-1 分子筛吸附塔原理 | 139 |
| 19 | 动态图 7-1 脱乙烷塔原理 | 171 |
| 20 | 动态图 7-2 脱丙烷、丁烷塔原理 | 172 |

本教材富媒体资源由作者马国光提供,尹晨阳制作。若有教学需要,可向责任编辑索取,联系邮箱: fzq1981@163.com。

第一章

天然气的物理化学性质

本章是学习天然气集输与处理的基础,天然气的物理化学性质是地面集输、净化加工及综合利用的设计依据。在没有实验和现场试验数据时,采用一些经验公式计算和查图求取是可行的,而且有利于计算机编程。

第一节 天然气的化学组成与分类

天然气是以烷烃(C_nH_{2n+2})为主的各种烃类和少量非烃类气体所组成的气体混合物。按其化学组成绝大部分是甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、丙烷(C_3H_8)、丁烷(C_4H_{10})和戊烷(C_5H_{12})含量不多。天然气中也含有其他一些气体,如硫化氢(H_2S)、二氧化碳(CO_2)、氮(N_2)及水汽(H_2O);有时还含有微量的稀有气体,如氦(He)和氩(Ar)等。

标准状态(101.325kPa,0℃)下,在天然气中,从甲烷到丁烷以气态存在;戊烷以上的烃类是液态,即天然气油。

一、天然气的分类

1. 按矿藏来源分类

天然气按矿藏来源可分为气田气、油田气、凝析气田气、页岩气、煤层气等五种。

气田气在开采过程的任何阶段,储集层流体均呈气态,但随组分不同,采到地面后在分离器或管线中可能有少量液烃析出。主要含甲烷,含量约为80%~98%;乙烷至丁烷烃类的含量一般不大;戊烷和戊烷以上重烃以及非烃类气体或不含或含量甚微。

油田气包括溶解气和气顶气,在储集层中与原油共存,采油过程中与原油同时被采出,经油气分离后所得。它的特征是乙烷和乙烷以上的烃类含量一般较高,其组成与分去凝析油以后的凝析气田气相类似。

凝析气田气的特点是储集层流体在原始状态下呈气态,但开采到一定阶段,随储集层压力下降,流体状态进入露点线内的反凝析区,部分烃类在储集层及井筒中呈液态(凝析油)析出。从凝析气田采出的天然气,除含有大量的甲烷、乙烷外,还含有一定数量的丙烷、丁烷;戊烷及戊烷以上烃类含量较高,含有汽油和煤油的组分。

页岩气是赋存于富有机质泥页岩及其夹层中,以吸附和游离状态为主要存在方式的非常规天然气,成分95%以上为甲烷。页岩气的形成和富集有着自身独特的特点,往往分布在盆地内厚度较大、分布广的页岩烃源岩地层中。与常规天然气相比,页岩气开发具有开采寿命长

和生产周期长的优点,大部分产气页岩分布范围广、厚度大,且普遍含气,这使得页岩气并能够长期以稳定的速率产气。

煤层气俗称“瓦斯”,是煤矿的伴生气体,也称为煤层甲烷气或非常规天然气。准确地讲,煤层气是指储存在煤层中、以吸附在煤基质颗粒表面为主、部分游离于煤孔隙中或溶解于煤层水中的以甲烷为主的烃类气体总称。

2. 按组分分类

天然气按析出后气流量的不同可以分为干气(或贫气)和湿气(或富气)两类。

干气是在储层中呈气态,采出后在地面设备和管线的温度、压力下不析出液烃(凝析油)的天然气。按 C_{5+} 界定法是指每 1m^3 (20°C , 101.325kPa) 气中 C_{5+} 液烃含量按液态计小于 13.5cm^3 的天然气。

湿气是在储层中呈气态,采出后在地面设备和管线的温度、压力下有液烃(凝析油)析出的天然气。按 C_{5+} 界定法是指每 m^3 (20°C , 101.325kPa) 气中 C_{5+} 液烃含量按液态计大于 13.5cm^3 的天然气。

但是,世界上并没有一个统一的划分干气和湿气的标准,苏联根据天然气中的汽油含量来划分;在有的文献中,以天然气中甲烷含量来划分;在美国,一般是根据气油比和天然气的相对密度来划分。

另外,若按天然气中含硫量的多少来划分,每标准立方米天然气中含硫量小于 1g 的称为净气,每标准立方米天然气中含硫量大于 1g 的气称为酸气。

天然气的化学组成是天然气工程中的重要原始数据。各组分的含量和性质决定了天然气的性质,它是气田开发、气井分析、地面集输、净化加工及综合利用的设计依据。天然气主要组分的基本性质见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 天然气常见烃类的基本性质(在 101.325kPa , 0°C 条件下)

| 项 目 | 甲烷 | 乙烷 | 丙烷 | 异丁烷 | 正丁烷 | 异戊烷 | 正戊烷 |
|---|---------------|------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 分子式 | CH_4 | C_2H_6 | C_3H_8 | $i\text{C}_4\text{H}_{10}$ | $n\text{C}_4\text{H}_{10}$ | $i\text{C}_5\text{H}_{12}$ | $n\text{C}_5\text{H}_{12}$ |
| 分子量 M | 16.043 | 30.070 | 44.097 | 58.124 | 58.124 | 72.151 | 72.151 |
| 千摩尔体积 $V_m, \text{m}^3/\text{kmol}$ | 22.362 | 22.1872 | 21.9362 | 21.5977 | 21.5036 | 20.983 | 20.891 |
| 密度 $\rho, \text{kg}/\text{m}^3$ | 0.7174 | 0.353 | 2.0102 | 2.6912 | 2.7030 | 3.4386 | 3.4537 |
| 相对密度 γ_g | 0.5548 | 1.046 | 1.555 | 2.081 | 2.090 | 2.659 | 2.671 |
| 临界温度 T_c, K | 191.05 | 305.45 | 368.85 | 407.15 | 425.15 | 460.85 | 470.35 |
| 临界压力 p_c, MPa | 4.491 | 4.727 | 4.256 | 3.540 | 3.501 | 3.226 | 3.236 |
| 临界摩尔体积 $V_c, \text{m}^3/\text{kmol}$ | 0.099 | 0.143 | 0.195 | 0.263 | 0.258 | 0.316 | 0.311 |
| 高热值 $H_h, \text{MJ}/\text{m}^3$ | 39.84 | 67.34 | 101.26 | 133.05 | 133.89 | 168.32 | 169.37 |
| 低发热值 $H_l, \text{MJ}/\text{m}^3$ | 35.90 | 64.40 | 93.24 | 122.85 | 123.65 | 155.72 | 156.73 |
| 爆炸下限 L_l (体积分数),% | 5.0 | 2.9 | 2.1 | 1.8 | 1.5 | 1.6 | 1.4 |
| 爆炸上限 L_h (体积分数),% | 15.0 | 13.0 | 9.5 | 8.5 | 8.5 | 8.3 | 8.3 |
| 比定压热容 $c_p, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ | 2.223 | 1.729 | 1.863 | 1.658 | 1.658 | 1.654 | 1.654 |
| 比定容热容 $c_v, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ | 1.670 | 1.444 | 1.649 | 1.49 | 1.49 | — | — |
| 动力黏度 $\mu, 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ | 1.027 | 0.843 | 0.735 | 0.676 | 0.669 | 0.616 | 0.635 |

续表

| 项 目 | 甲烷 | 乙烷 | 丙烷 | 异丁烷 | 正丁烷 | 异戊烷 | 正戊烷 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 运动黏度 $\eta, 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ | 1.416 | 0.611 | 0.358 | 0.246 | 0.243 | 0.176 | 0.180 |
| 气体常数 $R, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ | 0.5171 | 0.2759 | 0.1846 | 0.1378 | 0.1373 | 0.1078 | 0.1074 |
| 偏心因子 ω | 0.0104 | 0.0986 | 0.1524 | 0.1848 | 0.2010 | 0.2223 | 0.2559 |

表 1-2 天然气常见非烃类气体的基本性质(在 101.325kPa,0℃条件下)

| 项 目 | 氢 | 氮 | 氦 | 一氧化碳 | 二氧化碳 | 硫化氢 | 空气 |
|---|----------------|----------------|--------|---------|-----------------|------------------|---------|
| 分子式 | H ₂ | N ₂ | He | CO | CO ₂ | H ₂ S | — |
| 分子量 M | 2.0160 | 28.0134 | 4.003 | 28.0104 | 44.0098 | 34.076 | 28.966 |
| 千摩尔体积 $V_m, \text{m}^3/\text{kmol}$ | 22.427 | 22.403 | 22.363 | 22.3984 | 22.2601 | 22.1802 | 22.4003 |
| 密度 $\rho, \text{kg}/\text{m}^3$ | 0.0899 | 1.2504 | 0.179 | 1.2506 | 1.9771 | 1.5363 | 1.2931 |
| 相对密度 γ_g | 0.0695 | 0.967 | 0.138 | 0.967 | 1.529 | 1.188 | 1.00 |
| 临界温度 T_c, K | 33.32 | 126.2 | 5.25 | 133.0 | 304.20 | 373.54 | 132.50 |
| 临界压力 p_c, MPa | 1.255 | 3.285 | 0.222 | 3.383 | 7.149 | 8.715 | 3.645 |
| 临界摩尔体积 $V_c, \text{m}^3/\text{kmol}$ | 0.065 | 0.090 | 0.058 | 0.093 | 0.094 | 0.098 | 0.090 |
| 高热值 $H_h, \text{MJ}/\text{m}^3$ | 12.74 | — | — | 12.64 | — | 25.34 | — |
| 低发热值 $H_l, \text{MJ}/\text{m}^3$ | 10.78 | — | — | 12.64 | — | 23.36 | — |
| 爆炸下限 L_l (体积分数), % | 4.0 | — | — | 12.5 | — | 4.3 | — |
| 爆炸上限 L_u (体积分数), % | 75.9 | — | — | 74.2 | — | 45.5 | — |
| 比定压热容 $c_p, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ | 12.76 | 1.047 | 5.234 | 1.034 | 0.845 | 1.063 | 1.009 |
| 比定容热容 $c_v, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ | 10.13 | 0.745 | 3.140 | 0.737 | 0.653 | 0.804 | 0.720 |
| 动力黏度 $\mu, 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ | 0.836 | 1.667 | 1.718 | 1.657 | 1.402 | 1.167 | 1.716 |
| 运动黏度 $\eta, 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ | 9.30 | 1.33 | 9.598 | 1.33 | 0.709 | 0.763 | 1.34 |
| 气体常数 $R, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ | 4.126 | 0.2967 | 2.077 | 0.2967 | 0.1876 | 0.2415 | 0.2868 |
| 偏心因子 ω | 0.000 | 0.040 | — | 0.041 | 0.225 | 0.100 | — |

二、商品天然气的质量指标

商品天然气的质量指标可以参考 GB 17820—2012《天然气》，此标准适用于气田、油田采出经预处理(净化)后经管道输送的天然气，其质量指标，见表 1-3。

表 1-3 商品天然气的质量指标

| 项 目 | 一 类 | 二 类 | 三 类 |
|--|---|------|------|
| 高位发热量 ^① , MJ/m^3 \geq | 36.0 | 31.4 | 31.4 |
| 总硫(以硫计)含量 ^① , mg/m^3 \leq | 60 | 200 | 350 |
| 硫化氢含量 ^① , mg/m^3 \leq | 6 | 20 | 350 |
| 二氧化碳含量, % \leq | 2.0 | 3.0 | — |
| 水露点 ^{②③} , $^{\circ}\text{C}$ | 在交接点的压力下,水露点应比输送条件下最低环境温度低 5 $^{\circ}\text{C}$ | | |

①本标准中气体体积的标准参比条件是 101.325 kPa, 20 $^{\circ}\text{C}$ 。

②在输送条件下,当管道管顶埋地温度为 0 $^{\circ}\text{C}$ 时,水露点应不高于 -5 $^{\circ}\text{C}$ 。

③进入输气管道的天然气,水露点的压力应是最高输送压力。

商品天然气的质量指标不是按其组成,而是根据经济效益、安全卫生 and 环境保护三方面的因素综合考虑制定的。不同国家,甚至同一国家不同地区、不同用途的商品天然气质量指标,均不相同,因此,不可能以一个标准来统一。此外,由于商品天然气多通过管道输往用户,又因用户不同,对气体的质量要求也不同。通常,商品天然气的质量指标主要有以下四项。

1. 热值(发热量)

目前,天然气的主要用途是作为工业和民用燃料。因此,热值是对包括天然气在内的燃气(气体燃料)的一项重要质量指标,可分为高热值(高位发热量)与低热值(低位发热量),单位为 kJ/m^3 或 kJ/kg ,也可为 MJ/m^3 或 MJ/kg 。

不同种类的燃料气热值差别很大,常用气体燃料的低热值见表 1-4。燃气热值也是用户正确选用燃烧设备或燃具时所必须考虑的一项重要质量指标。

表 1-4 常用气体燃料的低热值(概略值)

| 燃气 | 液化石油气 | 天然气 | 裂化油制气 | 炼焦煤气 | 混合人工气 | 矿井气 |
|-----------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 低热值, MJ/m^3 | 141.9 | 35.6 | 18.9 | 17.6 | 14.7 | 13.4 |

2. 硫含量

此项指标主要是用来控制天然气中硫化物的腐蚀性和对大气的污染,常用硫化氢含量和总硫含量表示。

天然气中硫化物分为无机硫和有机硫,无机硫指硫化氢,有机硫指二硫化硫、羰基硫、硫醇(CH_3SH 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$)、噻吩($\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$)、硫醚(CH_3SCH_3)等。天然气中的大部分硫化物为无机硫。

硫化氢及其燃烧产物二氧化硫,都具有强烈的刺鼻气味,对眼黏膜和呼吸道有损伤作用。硫化氢的阈限值为 $15\text{mg}/\text{m}^3$,安全临界浓度为 $30\text{mg}/\text{m}^3$,危险临界浓度为 $150\text{mg}/\text{m}^3$;二氧化硫的阈限值为 $5.4\text{mg}/\text{m}^3$ 。

硫化氢又是一种活性腐蚀剂,在高压、高温以及有液态水存在时,腐蚀作用会更加剧烈。硫化氢燃烧后生成二氧化硫和水,也会造成对燃具或燃烧设备的腐蚀。因此,一般要求天然气中的硫化氢含量不高于 $6 \sim 20\text{mg}/\text{m}^3$ 。除此之外,对天然气中的总硫含量也有一定要求,一般要求小于 $460\text{mg}/\text{m}^3$ 或更低。

3. 二氧化碳含量

二氧化碳也是天然气中的酸性组分,在有液态水存在时,所生成的碳酸对管道和设备也有腐蚀性。尤其当硫化氢、二氧化碳与水同时存在时,对钢材的腐蚀更加严重。此外,二氧化碳还是天然气中的不可燃组分。因此,一些国家规定了天然气中二氧化碳的含量不高于 $2\% \sim 3\%$ (体积分数)。

4. 机械杂质(固体颗粒)

在我国国家标准 GB 17820—2012《天然气》中虽未规定商品天然气中机械杂质的具体指标,但明确指出“天然气中固体颗粒含量应不影响天然气的输送和利用”,这与国际标准化组织天然气技术委员会(ISO/TC 193)1998年发布的 ISO 13686—1998《天然气质量指标》是一致的。应该说明的是,固体颗粒指标不仅应规定其含量,也应说明其粒径。因此,中国石油天然气集团公司的企业标准 Q/SY 30—2002《天然气长输管道气质要求》明确规定固体颗粒的粒径应小于 $5\mu\text{m}$,俄罗斯国家标准则规定固体颗粒不大于 $1\text{mg}/\text{m}^3$,国外商品天然气的部分质量指标见表 1-5。

表 1-5 国外商品天然气的部分质量指标

| 国家 | H ₂ S mg/m ³ | 总硫 mg/m ³ | CO ₂ % | 水露点 ℃/MPa | 高热值 MJ/m ³ |
|-----|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 英国 | 5 | 50 | 2.0 | 夏 4.4/6.9, 冬 -9.4/6.9 | 38.84 ~ 42.85 |
| 荷兰 | 5 | 120 | 1.5 ~ 2.0 | - 8/7.0 | 35.17 |
| 法国 | 7 | 150 | — | - 5/操作压力 | 37.67 ~ 46.04 |
| 德国 | 5 | 120 | — | 地温/操作压力 | 30.2 ~ 47.2 |
| 美国 | 5.7 | 22.9 | 3.0 | 110mg/m ³ | 43.6 ~ 44.3 |
| 俄罗斯 | 7.0 | 16.0 | — | 冬 -3(-10) 夏 -5(-20) | 32.5 ~ 36.1 |

在国外,随着天然气在能源结构中比重的上升以及输气压力和输送距离的增加,对天然气的质量要求也更加严格。

实际上,商品天然气的质量指标应从提高经济效益出发,在满足国家关于安全卫生和环境保护等标准的前提下,由供需双方按照需要和可能,在签订供气合同或协议时具体协商确定。

三、天然气组成的表示方法

天然气组成有三种表示方法:质量组成、体积组成和摩尔组成,每种组成均可用百分数或小数表示。

1. 质量组成

$$g_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \times 100 \quad (1-1)$$

$$g_1 + g_2 + \dots + g_n = 100 \quad (1-2)$$

式中 g_i ——组分 i 的质量组成;
 m_i ——组分 i 的质量。

2. 体积组成

$$V_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \times 100 \quad (1-3)$$

$$V_1 + V_2 + \dots + V_n = 100 \quad (1-4)$$

式中 V_i ——组分 i 的体积组成;
 v_i ——组分 i 的体积。

3. 摩尔组成

$$y_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \times 100 \quad (1-5)$$