

高等学校教材

输气管道

设计与管埋

王树立 赵会军 主编



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

输气管道设计与管埋

王树立 赵会军 主编



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

输气管道设计与管理/王树立, 赵会军主编. —北京:
化学工业出版社, 2005. 8
高等学校教材
ISBN 7-5025-7553-7

I. 输… II. ①王…②赵… III. ①天然气输送-长
输管道-设计-高等学校-教材②天然气输送-长输管道-
技术管理-高等学校-教材 IV. TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 097211 号

高等学校教材

输气管道设计与管理

王树立 赵会军 主编

责任编辑: 程树珍

文字编辑: 项 激

责任校对: 周梦华

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18½ 字数 487 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7553-7

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

人类已进入 21 世纪,经济全球化的进程明显加快,随着中国加入 WTO,中国经济正在逐步加入世界经济的大潮之中。在世界经济迅猛发展的同时,全球面临着日益严重的环境问题,保持人和自然的和谐,实现可持续发展成为一项十分重要的任务。在几种燃料中,天然气是清洁能源,与煤、石油相比,天然气使用时不仅排放出的 SO_x 、 NO_x 及 CO 量最少,而且获得等量能量时排放的 CO_2 量也是最低的。天然气用作工业、民用及车用燃料将显著改善城市的大气质量,增加天然气在能源消费结构中的比例是缓解环境恶化的重要措施,加速开发和利用天然气在世界各国得到广泛的共识。

中国是世界上最早开发利用天然气的国家之一,天然气资源比较丰富,据最新的油气资源评价结果,中国的天然气资源总量达到 $38.4 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。至 2004 年底,中国天然气探明储量为 $2.5 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。2004 年,中国天然气产量为 $277 \times 10^8 \text{m}^3$,占总能源消耗的 3.0%。进入 21 世纪以后,全国上下形成了“天然气热”现象。根据国家有关部门的规划和预测,在 21 世纪的前 10 年,随着西部大开发的标志性工程——“西气东输”工程的实施,中国天然气工业将会呈现一个快速发展的态势。从探明储量增长情况来看,到 2006 年,全国天然气储量规模将达到 $(4 \sim 5) \times 10^{12} \text{m}^3$ 。预计 2006 年,中国天然气产量可达到 $500 \times 10^8 \text{m}^3$,到 2010 年,中国天然气产量可达到 $(700 \sim 800) \times 10^8 \text{m}^3$ 。天然气在中国一次能源中所占的比例可从目前的 3.0% 上升到 8.0% 左右。大约在 2015~2020 年,中国天然气产量有望达到或超过 $1000 \times 10^8 \text{m}^3$,天然气在中国一次能源中所占的比例将超过 10.0%。天然气作为一种快速增长的新兴能源,将在中国的经济、环境和社会发展中发挥重要作用。

天然气资源的大规模开发利用无疑需要健全的储备设施及输送管网的有利支持。随着中国及周边国家的飞速发展,中国天然气进出口及转口也将非常活跃,以满足中国及周边国家工业迅猛发展的需要。天然气不论是从陆地或是海上最终都必须通过输气管道送到用户,所以天然气管道将是未来几年中管道行业发展最快的排头兵。2010 年左右,中国的输气管网将逐步建立和完善。

随着天然气资源的开发利用,管输产业也得到了突飞猛进的发展。天然气管道的投资越来越大,输送距离越来越长,输气管道设计与管理理论在天然气工业中至关重要。本书是在多年的教学实践基础上编写而成的,由王树立、赵会军主编,周诗崇、李恩田、赵书华、高玉明参加了编写工作。本书在编写过程中参阅了大量的参考文献,从中得到不少启发和帮助;在此向有关作者表示衷心的感谢。李工教授认真审阅了全书并提出了许多宝贵意见,研究生刘强、李辉、张青松等同学为本书的打字、绘图付出了辛勤劳动,编者在此表示由衷的感谢。

本书可作为大专院校油气储运工程专业的教科书,也可供相关专业师生、工程技术人员参考。

限于编者水平,书中难免有谬误之处,欢迎读者指正。

编者

2005 年 3 月

内 容 提 要

本书介绍了输气管道概况和勘查设计、天然气性质、天然气矿场集输、天然气净化、气体管流基本方程、输气管道水力计算、干线输气管道内涂层减阻技术、输气管道热力计算、不稳定工况计算、压气站与输气管道联合系统、输气站、干线输气管道运行管理、城市储配气、小区液化石油气管道供应等内容。

本书可作高等学校石油工程专业、油气储运专业以及相关专业的本科生的教材，亦可作为相关专业工程技术人员参考用书。

目 录

第一章 输气管道概况和勘察设计	1
第一节 天然气的来源及用途.....	1
第二节 输气管道概况.....	3
第三节 输气管道勘察设计概述.....	11
第四节 线路和站址的勘察.....	14
第五节 设计阶段的主要内容.....	17
思考题与习题.....	19
第二章 天然气的性质	20
第一节 天然气的组成与分类.....	20
第二节 天然气的平均参数.....	22
第三节 气体状态方程.....	24
第四节 天然气的物理性质.....	32
第五节 天然气的热力性质.....	40
第六节 天然气的燃烧性质.....	54
思考题与习题.....	56
第三章 天然气矿场集输	58
第一节 中国天然气矿场集输工程发展概况及展望.....	58
第二节 天然气集输工艺.....	64
思考题与习题.....	69
第四章 天然气净化	70
第一节 净化目的及意义.....	70
第二节 天然气气质标准及质量控制.....	70
第三节 分离和除尘.....	72
第四节 天然气脱水.....	75
第五节 天然气脱硫和脱二氧化碳.....	81
思考题与习题.....	85
第五章 气体管流基本方程	86
第一节 连续性方程.....	86
第二节 运动方程.....	87
第三节 能量方程.....	88
思考题与习题.....	90
第六章 输气管道水力计算	91
第一节 输气管道流量的基本公式.....	91
第二节 摩阻系数与常用输气管道流量.....	96
第三节 复杂干线输气管道水力计算.....	103
第四节 集气管网水力计算.....	109
思考题与习题.....	111

第七章 干线输气管道内涂层减阻技术	112
第一节 管道内涂层的意义及发展概况.....	112
第二节 内涂层减阻原理.....	113
第三节 管壁粗糙度.....	113
第四节 内涂层管道水力计算.....	114
第五节 内涂层涂料及施工.....	117
思考题与习题.....	134
第八章 输气管道热力计算	135
第一节 输气管道的温度变化规律.....	135
第二节 输气管道的平均温度.....	137
第三节 总传热系数.....	137
第四节 天然气水合物及生成条件预测.....	141
第五节 天然气水合物的防止措施.....	147
思考题与习题.....	149
第九章 不稳定工况计算	151
第一节 稳定工况水力、热力计算数值解.....	151
第二节 慢瞬变流的隐式中心有限差分法.....	154
第三节 快瞬变流特征线解法.....	158
思考题与习题.....	163
第十章 压气站与干线输气管道联合系统	164
第一节 压气站的工作特性.....	164
第二节 压气站与管路的联合工作.....	172
第三节 输气管道运行工况分析与调节.....	175
第四节 末段储气.....	184
第五节 干线输气管道压气站布置.....	187
第六节 输气管道设计方案的经济比较.....	190
思考题与习题.....	192
第十一章 输气站	193
第一节 概述.....	193
第二节 输气站平立面布置.....	193
第三节 输气站工艺流程.....	195
第四节 主要工艺设备简介.....	199
第五节 天然气流量计量.....	213
思考题与习题.....	219
第十二章 干线输气管道的运行管理	220
第一节 干线输气管道的日常运行管理.....	220
第二节 干线输气管道的自动调节系统.....	224
第三节 干线输气管道工艺运行参数的自动监测及自动计量.....	226
第四节 干线输气管道输气设备的自动监控.....	227
第五节 输气管线工况的计算机仿真.....	230
第六节 陕京输气管道 SCADA/POAS 系统.....	234
思考题与习题.....	238

第十三章 城市配气与储气	239
第一节 用气量与设计流量.....	239
第二节 门站.....	241
第三节 调压站.....	243
第四节 配气管网.....	248
第五节 管网水力计算.....	250
第六节 气体的储存.....	262
思考题与习题.....	267
第十四章 小区液化气管道供应	268
第一节 概述.....	268
第二节 液化石油气管道供气系统组成.....	273
第三节 液化石油气汽化及掺混空气.....	273
第四节 管供液化石油气计算.....	278
第五节 管供液化石油气汽化工艺设计.....	280
第六节 站区安全.....	284
思考题及习题.....	286
参考文献	287

第一章 输气管道概况和勘察设计

第一节 天然气的来源及用途

天然气是指自然生成、在一定压力下蕴藏于地下岩层孔隙或裂缝中的多组分、以烷烃为主的混合气体，可以说天然气是气态的石油。

一、天然气的来源

天然气可以从油田气和气田气获得。

油田气又称为油田伴生气，它是与石油伴生的天然气，伴随着石油的开采而采出。其中含有 60%~90% 的甲烷和乙烷，10%~40% 的丙烷、丁烷、戊烷和重烃。当天然气组分中戊烷及以上组分含量低于 $10\text{mL}/\text{m}^3$ 时称为“干气”，超过时称为“湿气”。一般利用井上的油气分离器将石油与油田伴生气分离，然后采用吸收法或其他方法将气体中的碳氢化合物进一步分离，提取的 C_3 、 C_4 成分作为液化石油气销售， C_1 、 C_2 成分作为天然气使用或管道外输。国内目前的大庆、吉林、辽河、华北、胜利、大港、中原等油田的外输输气管道，如大庆阿拉新至齐齐哈尔管线、吉林双阳油田至长春市气站管线、辽河盘锦压气站至辽化管线、中原至沧州等管道输送的都是油田伴生气生产的天然气。

气田气是采自气田气井的天然气，通常这种气体的甲烷含量较高，可以达到 85%~97%， C_3 ~ C_5 只有 2%~5%，可以采用压缩法、吸收法、吸附法或低温分离法将 C_3 、 C_4 等重烃分离出来，制取液化石油气，其余纯净的天然气通过管道外输销售。

从天然气的主要成分甲烷来看，其来源还有炼油厂的炼厂气，如蒸馏气中 0.5% 为甲烷，催化裂化气中 5.9%，热裂化气中 35%，铂重整气中 10.7% 为甲烷。当然这些气体不能划在天然气的范围，量也不大，但其用途是一样的。

二、天然气资源情况

世界天然气的探明储量，在近几年中增长迅速。1970 年初为 42×10^4 亿立方米，1983 年初增加到 85.8×10^4 亿立方米以上，增长了 1 倍多。1989 年为 116×10^4 亿立方米，1995 年已达到 140×10^4 亿立方米。若以 1000 立方米天然气折合 1t 原油计算，则 1995 年天然气探明储量相当于 1140 亿吨原油，已大于世界石油探明储量。这些天然气探明储量主要集中在俄罗斯、伊朗、卡塔尔、阿拉伯联合酋长国和沙特阿拉伯。

到目前为止，中国已找到气田近 100 个，但均以小型为主，大中型气田为数不多。到 1983 年已探明的天然气储量不足 1×10^4 亿立方米，居世界第 15 位。1987 年完成的全国油气资源评价估计全国天然气资源量为 33.3×10^4 亿立方米。1991 年，中国天然气勘探取得重大突破，除在川东、柴达木盆地发现新的天然气田外，在陕甘宁盆地的靖边—横山地区找到了中国陆地上最大的世界级巨型整装气田，含气面积达 3200 平方公里，当时探明储量 1000 多亿立方米。截至 2002 年 7 月，“西气东输”的起点——塔里木盆地探明储量 5267 亿立方米，可采储量 3725 亿立方米，能够保证年供气 120 亿立方米稳产 20 年。作为补充气源的长庆气田，累计探明储量已达 7504 亿立方米，可采储量 5081 亿立方米。

三、天然气的用途

天然气是一种洁净、方便、高效的优质燃料。天然气的热值较高，每立方米平均为

33MJ, 介于人工煤气与液化石油气之间, 且不含灰分, 容易完全燃烧, 不污染环境, 运输方便。

在工业应用方面, 可用于发电, 建设同样规模的火力发电站比燃煤减少投资 20% 左右, 且管理方便, 易于实现自动化, 发电成本大大下降; 用在炼铁上, 使焦比减少 15% 以上, 可获得更好的经济效益。

在民用方面, 可提高灶炉热效率。

天然气还是重要的化工原料。天然气的主要成分甲烷、乙烷、丙烷、丁烷, 可用于生产塑料、纤维、橡胶等; 含有的硫及硫化物、二氧化碳、氮、氦等, 用于生产硫磺、硫酸、硫铵等。

另外, 氦 (He) 气是重要的战略物质, 在不同时期 He 的用途分配不一, 但是有一点却是相同的, 几乎绝大部分用于军事或尖端科技领域。中国预期计划 He 将用于火箭及航天卫星发射、光纤通信、分析色谱、飞艇提升、低温超导等。氦是如此重要, 而世界上消耗的氦气主要就来自于含 He 的天然气, 即使目前认为无经济价值的贫 He 天然气, 其 He 含量也要比大气中的 He 含量高出两个数量级, 因此, 迄今含 He 天然气几乎是惟一的经济的提氦来源。

无论是作为燃料, 还是作为化工原料, 天然气都具有明显的社会效益、环境效益和经济效益。1993 年统计全世界天然气总产量为 26633.8 亿立方米, 销售量为 21582.7 亿立方米。从世界范围来看, 天然气在一次能源消费构成中占的比例见表 1-1。

表 1-1 天然气在一次能源消费构成中占的比例

%

年份	1920	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000
占的比例	1.5	1.9	4.6	10.0	14.6	19.9	21.3	24.2

1990 年世界天然气总产量已达 21397 亿立方米, 占世界能源总量的 30%。马凯帝 (Marchetti) 预测继煤、石油之后, 天然气将在一次能源消费中占主要地位 (见图 1-1)。

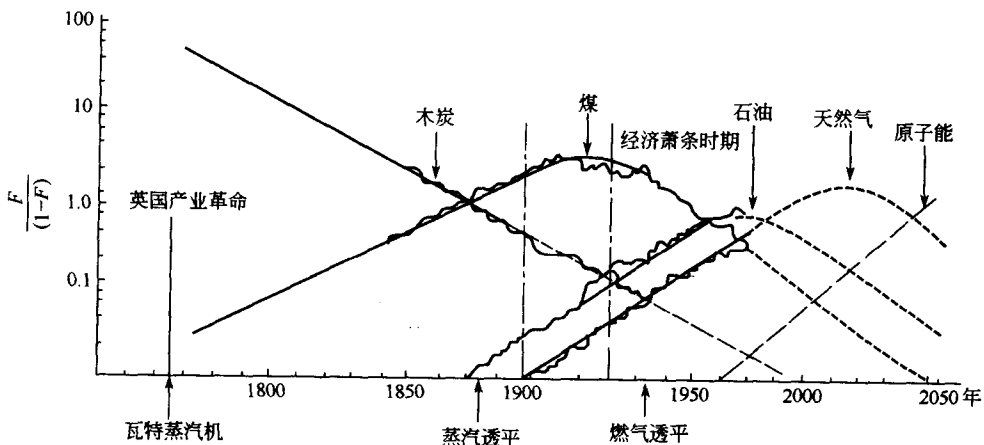


图 1-1 各种能源市场占有率 (F) 的历年变化预测

中国的天然气工业起步较晚, 天然气在一次能源消费中占的比例仅为 2.7%, 相当于世界平均比例 20 世纪 40 年代的水平。近十年来, 中国的天然气工业有了突飞猛进的发展, 特别是以“西气东输”为龙头的几大输气管道的建设, 大大推进长江三角洲乃至全国的能源结构和产业结构的调整, 除作为民用燃料外, 就中国石化将在替代石脑油制氢、替代锅炉燃料

油、充当化肥（化工）原料、发电和加气站等五个方面利用天然气。根据国家公布的2001~2020年天然气发展长远规划，到2010年和2020年，中国的天然气需求量将分别达到1120亿立方米和2520亿立方米；同时2005年内有148个城市、7000多万人口使用天然气，用气量为200亿立方米/年，到2010年将有270个城市使用天然气。

第二节 输气管道概况

一、输气管道的分类、组成及特点

管道输送是天然气的主要输送方式之一，从油气田井口到最终用户，历经矿场集气、净化、管道、压气站、配气站以及调压计量等，形成了一个统一密闭的输气系统。输气管道一般按其输送距离和经营方式及输送目的分为三类：一是属于油气田内部管理的矿场输气管道，通常称为矿场集气管线；二是隶属某管道输送公司的干线输气管道，通常称为长距离输气管道；三是由原城市煤气公司或其他燃气公司投资建设并经营管理的城市输气管道，通常称为城市输配管网。

1. 矿场输气管道

矿场输气管道由采气管线和集气管线组成。根据气田构造、规模及气井分布等可布置成直线或树枝状、环状和放射状管网，其特点如下。

① 输送介质大多为未经净化或净化程度低的原料气。原料气中含硫、水、二氧化碳等杂质较高，腐蚀性大。

② 输送距离短。一般只有几千米至几十千米，也有一些由油气田企业内部管理的输气管道直接输送到附近城市或化工厂等，如辽宁盘锦—沈阳新民输气管道，距离稍长一些，但一般中间没有增压站，也有一百多千米。

③ 管径小。一般在 $DN100\text{mm}\sim DN300\text{mm}$ ，由油气田企业内部管理的直接输送到附近城市或化工厂的输气管道，管径一般多用377mm、426mm或529mm。

④ 压力变化大。开采初期井口压力可能高达10MPa或者更高，随着地层压力的降低，到开采后期可能降到1.0MPa，甚至0.1~0.2MPa。

⑤ 集输系统流程复杂。包括矿场集输管网流程和矿场集输站场工艺流程。

2. 干线输气管道

干线输气管道主要由线路和输气站组成，线路包括沿线截断阀、阴极保护站，输气站包括清管站（《天然气输气管道工程设计规范》GB 50251—94规定清管站应建在输气站内），其他还包括通信、自动监控、道路、水电供应、线路巡检维修和其他一些辅助设施和建筑，对于采用低温输送工艺的管道，还应有中间冷却站。

干线输气管道是连接矿场集气系统和城市门站（或配气站）的纽带，将经过矿场处理后的洁净的天然气送往城市。与矿场输气管道和城市配气管网相比，其具有输送距离长（从几百千米至几千千米）、管径大（一般在400mm以上，最大可达1420mm）、压力高（操作压力在4.0~10.0MPa）的特点，而且与其他输送方式或其他如油品等长距离输送管道相比，长距离输送天然气管道还具有如下特点。

① 这是一个复杂的动力系统，运送量大，管道绝大部分埋设于地下，占地少，受地形地物及恶劣气候影响小，能够连续运行，再加上运送介质本身就是很好的动力源，可以靠消耗自身克服摩擦阻力将天然气运达目的地，所以是目前最有效、最大规模的运输系统，甚至是大量输送天然气的惟一有效办法。

② 从采气、净化、长输到城市供气各个环节，形成了一个密闭系统，上下游之间紧密

相连而又互相制约，一方面便于管理和易于实现远程集中监控，另一方面又存在着矿场天然气生产的相对稳定与城市用户用气的不均衡性之间的矛盾，作为中间环节的长输管道，要解决好这一矛盾，其设计和运行管理要比矿场和城市输气管道以及原油管道更复杂。

③ 市场经济决定了要建设一条长输天然气管道，要考虑一条管道为几家油气田服务，天然气的用户也要照顾沿线途经的城市、城镇或地区，以图取得最大的经济效益和良好的社会效益。由于中间有数个进气点和分气点的存在，再考虑中间进气量、分气量的波动性和不均衡性，对确定线路走向、管道设计和运行管理工作要求更高。

④ 同油田类似，气田的开发与开采也存在近期和远期的问题，近期产气量少而地层压力高，远期产气量多而地层压力低。与输油管道不同的是，在输气管道投产初期，可以在首站不设压缩机车间，而充分利用地层压力进行输送，对于远期提高输送量而地层压力低，是增设压气站还是建设复线或采用其他方案，在管道设计时要进行严格的技术经济论证，确定最优建设方案。

⑤ 不同于油品或普通工业用品，天然气输送管道虽然输送的也是燃料、能量或化工原料，但它最主要的是担负着向某一城市或某些城市和地区的居民供气，涉及国计民生和千家万户，甚至社会稳定的问题，一旦中断，将影响所涉及的这些城市或地区的人民的正常生活秩序和工业生产，因此必须保证安全、连续、可靠地供气。这要在设计和管理上采取特别有效的措施予以保证。

⑥ 天然气长输管道输送压力高，介质易燃易爆，与输油管道的安全性质完全不同，输气管道的损伤有可能引发爆裂或撕裂，这种事故会给周围居民和环境造成巨大影响，而且难以短期修复。因此要求在管材的选用上要更慎重，管子质量把关更严格，尤其在管道施工全过程中，注意防止管子装卸碰伤和损坏绝缘层等，在焊接过程中防止产生裂纹，要更加细致地施工。从冶金、制管、勘察设计、施工和运行管理全过程中，建立完善的输气管道质量保证(QA)体系。

⑦ 长输管道要求有与之配套的通信、道路交通、水电供给等附属设施，在以电动机为原动机的压气站，电力供应必须保证万无一失，有线和无线通信系统也是不可缺少的设施之一，是全线生产调度指挥的重要工具。随着天然气工业的迅猛发展，跨国、跨省、跨地区的天然气输送管道正在建设或即将建设，这就要求如通信卫星、微波技术以及局域网和广域网等这些更先进更完善的技术，应用到天然气长输管道的通信调度指挥系统和生产自动化的信息传输系统中来，确保管道连续、可靠和高效运行。

3. 城市输气管道

城市配气系统主要包括配气站、配气管网及支管、储气库和各类调压站所。它的任务就是从配气站(或称城市门站)开始，通过各级配气管网和气体调压所保质保量地直接向用户供气。

城市输气管道从城市门站开始，遍布整个城市和近郊，通常有树枝状和环状两种布置方式，以环状居多。其主要特点如下。

① 管径变化范围宽。小到居民进户的户内管(为20mm)，大到兼有储气功能的高压干环的1m以上。

② 压力等级多。对于规模较大的城市，尤其是人口多、密度大的特大城市，配气管网多采用多级系统，这些管道按照《城镇燃气设计规范》(GB 50028—93)根据压力高低分为五个等级：

高压	A级	$0.8\text{MPa} < p \leq 1.6\text{MPa}$
	B级	$0.4\text{MPa} < p \leq 0.8\text{MPa}$

中压	A 级	$0.2\text{MPa} < p \leq 0.4\text{MPa}$
	B 级	$0.005\text{MPa} < p \leq 0.2\text{MPa}$
低压	A 级	$p \leq 0.005\text{MPa}$

③ 气体从高压等级管网输入低压力等级管网必须经过调压，绝不允许不同压力等级的管道直接连通。

④ 城市配气管网的设计应遵照《城镇燃气设计规范》(GB 50028—93) 执行。

⑤ 如果城市或城镇敷设压力高于 1.6MPa 的燃气管道，称为超高压燃气管道，其设计应按照《输气管道工程设计规范》(GB 50251—94) 进行。

二、输气管道发展概况

从世界范围看，18 世纪以前天然气是依靠气井压力利用木竹管道短距离输送，18 世纪后期开始使用铸铁管，1880 年首次采用蒸汽机驱动的压气机，19 世纪 90 年代钢管出现之后，管道建设进入了工业化发展阶段。随着现代科学技术的发展，以及世界对天然气需求的增长，输气管道有了很大发展。到 20 世纪 70 年代末 80 年代初，已经出现了一些规模巨大的输气管网和跨国输气管道。

1. 世界著名大型输气管道

(1) 前苏联乌连戈依—中央输气管道系统 这是前苏联的两大天然气管道系统之一，堪称世界最大的天然气管道系统。全系统由 6 条输气干线组成，总长 2 万千米，管子直径为 1020mm、1220mm 和 1420mm。1981 年开工建设，1985 年投产，当年全系统输气量达到 1800 亿立方米。其中最著名的干线之一当属亚马尔输气管道，是由前苏联出口到欧洲的德国、法国和意大利，全长 9000km，当时被称为“超大型”、“横贯大陆”的输气管道，直径 1420mm，工作压力 7.5MPa，1982 年 10 月动工，1984 年 4 月投产，共用 18 个月完成，且当年达到满负荷运行，输气量 320 亿立方米/年。该管线在前苏联境内 4451km，建设了 41 座压缩机站和 2 座冷却站，经西西伯利亚地区穿越水域 945km，穿越河流 700 余处，森林区以及永冻土区等，不论从施工难度、管口径之大、里程之长、压气站之多还是输气量，至今仍为输气管道之最。

(2) 阿—意输气管道 这是一条跨国管道工程，又是一条跨洲的管道，途径阿尔及利亚、突尼斯到达意大利。该管道是将位于阿尔及利亚萨哈拉大沙漠中的哈西迈勒 (Hassi R' Mel) 大气田的天然气管输至意大利北部的博洛尼亚 (Bologna)。全长 2506km，管子直径分别采用 500mm、1060mm 和 1220mm，操作压力 7.5MPa，全线设有压缩机站 12 座，其中阿尔及利亚境内 4 座，突尼斯境内 3 座，西西里岛 2 座，意大利半岛上 3 座。1976 年开始动工建设，1983 年初投产，年输气量 125 亿立方米。该管道有两大突出特点：其一，这是第一条连接非洲与欧洲的洲际输气管道；第二，管道穿越地中海，创建了水深 600m 的海底管道，是当时世界上海下最深的输气管道，因此通常更多地被称为“穿越地中海输气管道 (Trans-Mediterranean Gas Pipeline)”，开创了超常规深海管道敷设的先例，为深海管道敷设和向更深海域的管道敷设提供了宝贵的经验。

(3) 横贯加拿大输气管道 总长 8500km，经过加拿大 4 个省，另又敷设一条复线，经北美大湖区向美国出口天然气。管线直径 916mm，操作压力 6.9MPa，沿线设有 46 座压气站和 2 座移动式压缩机组。该管线美国境内段 1977 年投产。整个系统实现了全自动化。

(4) 美国东线输气管道 管径 1022mm，全长 1337km，操作压力 9.88MPa。1973 年申请建设，直到 1985 年才建成投产，历时 12 年。

(5) 加拿大阿恩莱斯输气管道 这也是世界著名的天然气管道之一，管径 914mm，全长 3000km，操作压力 9.88MPa。2000 年 10 月建成投产。

(6) 美、加合作阿拉斯加段输气管道 这条管道是一条对风险估计不足而未能建成的管道, 作为反面教材具有代表性。原名阿拉斯加公路管道, 建设的目的是将阿拉斯加普鲁德霍湾的油气田, 可采储量 7360 亿立方米的天然气, 经 7728km 多条输气管道组合的管网输送到美国的中部和西部。原设计数据为管径 1220mm, 输送压力 8.66MPa, 阿拉斯加段长度 1176km。1970 年开始起步, 经过 5 年的时间, 研究将天然气的温度降至 $-1.1 \sim -17^{\circ}\text{C}$ 就可以用埋地管道, 安全地通过永冻土和半永冻土地带输送。研究取得成功以后, 1977 年申请联邦政府获得批准, 但最终并未建成。究其原因, 除涉及美国能源政策、美国当时的经济状况、投资风险以及到美国本土的气价等问题外, 也存在对于输送工艺不成熟的问题。该管道的建设流产, 为以后其他管道的建设提供了经验教训。

2. 中国输气管道发展简介

中国是最早使用管道输送天然气的国家之一。1600 年左右, 竹管输气已有很大发展, 从“长竹剖开, 去节、合缝、漆布, 一头插入井底, 其上曲接, 以口紧对釜脐”的一井一管一锅的就地使用, 到“一井口接数十竹者, 并每竹中间复横嵌竹以接之”的分输, 距离也从“周围砌灶”发展到“以竹筒引之百步千步”的长度, 显示了中国古代劳动人民的智慧和管道建设水平。但是真正意义上的天然气长输管道在 20 世纪 50 年代以前还是空白。随着四川天然气的相继开采, 输气管道建设也蓬勃兴起。自 1963 年在四川省建成了中国第一条大口径输气管道巴渝线(管径 426mm, 全长 55km) 之后又陆续建成了付纳线($\phi 720\text{mm} \times 8\text{mm}$)、威成线($\phi 630\text{mm} \times 7\text{mm}$)、泸威线($\phi 630\text{mm} \times 8\text{mm}$)、卧渝线($\phi 426\text{mm} \times 6\text{mm}$) 等输气管道。1984 年底建成四川南半环输气管网, 干线总长 3400km。1987 年底四川北半环东起渠县西至成都的输气管道投产, 北干线全长 330km、管径 720mm, 途经 11 个县市, 全线设计量站、清管站、阴极保护站和截断阀室共 18 座, 采用密闭正反输清管流程, 计算机程控计算, 大型电动球阀或气液联动操作, 不停输程控清管, 并具备事故自动截断功能, 配套的通信工程为数字微波通信。至此, 四川环状天然气输送管网初步形成。环状的输气干线和枝状集输管线组成的输送系统, 将四川气田开发区域与各大城市连在一起, 形成了一个四通八达、输配自如的输气管网系统。

到目前, 全国的近 2 万千米输气管道中, 1/3 左右集中在四川省。此外, 在各油气田也相继修建了一批输气管道。分布在大庆、辽河、吉林、华北、胜利、大港、中原、长庆、新疆等油气田的天然气和油田气输送管道, 总长度超过 5000km, 这些管线的技术水平与四川省内管线水平相近。其中, 中沧线是中国第一次采用燃气轮机驱动离心压缩机输送油田伴生气的输气管道, 全长 362km, 管径 426mm, 输送压力 2.5MPa, 横跨河南、山东、河北 3 省 12 个县市, 全线设压气首站、末站和调压计量站各 1 座, 中间清管站 3 座。濮阳—开封输气管道, 在穿越黄河施工中, 首次使用引进的水平定向钻, 在黄河河底 27m 处回拖一次成功, 穿越长度 1380m。

进入 20 世纪 90 年代以后, 尤其是西部大开发战略的实施, 随着长庆油气田和新疆天然气的开发, 中国的天然气长输管道建设进入了快速发展时期。海洋长输管道建设掀开了新篇章。1992 年中国建成了全长 48.5km 的锦州 20-2 气田至兴城的海底输气管道是中国第一条海底登陆管道。随后在南中国海莺歌海水域敷设了两条海底输气管道: 一条是崖城 13-1 气田至香港; 一条是崖城 13-1 气田至海南岛, 其中至香港的管道全长 778km, 管径 711.2mm (28in[●]), 壁厚 17.12mm, 设计压力 8.0MPa, 材质 X-65, 由美国阿科公司负责设计和建造, 1996 年已投产。该管道所经水域平均水深 100m, 深水段 707m, 是中国目前最长的海

● 1in=0.0254m, 下同。

底输气管道，在世界居第二位。1993年7月建成了中国最长的（247.45km）、亚洲口径最大（ $\phi 630\text{mm} \times 7\text{mm} \sim \phi 720\text{mm} \times 7\text{mm}$ ）的黑龙江伊兰至哈尔滨人工煤气长输管道，最大工作压力 2.16MPa。管道施工首次采用纤维素焊条打底，低氢型焊条填充盖帽的焊接新工艺，同时首次大规模使用了性能良好的环氧煤沥青进行防腐。1997年相继建设了陕京线（靖边至北京， $\phi 660\text{mm}$ ，920km）、靖边至西安（ $\phi 406\text{mm}$ ，486km）、靖边至银川（ $\phi 406\text{mm}$ ，303km）和轮南至库尔勒（ $\phi 660\text{mm}$ ，223km）等天然气管道，这些管道的设计都采用了最新的制管技术、管道防腐技术以及国外 20 世纪 80 年代的新技术、新设备和 SCADA 监控系统，使中国的天然气管输技术水平大大向前推进了一步。

3. “西气东输”工程

“西气东输”是中国西部大开发战略的标志性工程之一。广义上的“西气东输”工程有三条输气管道备受瞩目，建成后将使亿万民众受惠。

① 青海涩北至甘肃兰州（涩—宁—兰线）。全长 953km，管径 660mm，输气能力 20 亿立方米/年，总投资约 25 亿元，2000 年开工建设，2002 年竣工投产，向西宁、兰州地区供气。

② 重庆忠县至武汉的输气管道（忠—武线）。全长 738km，管径 711mm，输气能力 30 亿立方米/年，总投资约 30 亿元，2000 年开工建设。除忠—武线外，还规划了武昌—黄石、枝江—荆门—襄樊和潜江—长沙三条支线，向湖北、湖南地区供气。

③ 于 2002 年 7 月 4 日正式全面开工的举世瞩目的新疆塔里木至上海的输气管道（通常所说的“西气东输”）。该管道是中国目前距离最长、管径最大、压力最高、投资最大的输气管道，也是中国改革开放以来规模最大的中外合作项目（中方包括中国石油天然气集团和中国石油化工集团占 55%、外方包括壳牌中国勘探与生产有限公司、俄罗斯天然气工业股份公司和埃克森—美孚中国天然气管道有限公司占 45%），从世界范围来看，堪当世界著名管道之一。全长 4000 多千米，管径 1016mm，操作压力 10MPa，输气能力 120 亿立方米/年，全线设输气站 31 座，包括首、末站、中间压气站、分输站、清管站，干线用钢 160 万吨（螺旋管约 2750km、直缝管约 1250km），材质选用 X70，总投资约 460 亿元。途径新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南、安徽、江苏、浙江、上海等 10 个省市自治区。除干线外，还规划了包括安徽定远—合肥、江苏常州—浙江杭州、江苏南京—安徽芜湖和浙江杭州—上海等支线，工程覆盖东部地区 8500 万户居民生活用气。

另外“西气东输”的建设，对中国的输气管道整体设计和建设水平既是考验又是锻炼，其工程建设的难点包括“三山一塬、五越一网”，三山：吕梁山、太岳山、太行山；一塬：黄土塬；五越：三次穿越黄河、一次穿越淮河、一次穿越长江；一网：江南水网。“西气东输”工程完工投产，使中国的输气管道设计、建设和管理水平取得了很大的进步。

4. 中国未来 10 年内管网的总体布局

目前，中国天然气管道以及原有城市燃气管网存在的问题是：分布不均、不成系统；管线老化、技术水平落后；不能联网、供气可靠性差和管道输气能力利用低等。为了克服这些问题，必须对新建管道干线及下游管网总体布局、总体规划。

中国未来 10 年内管网的总体布局可以用一句话概括：“两纵、两横、四枢纽、五气库”。按照这个总体规划，将共建管道 1 万千米，管网总供气能力达 1200 亿立方米/年，建设地下储气库 130 亿~150 亿立方米。其中“两纵”是指两条南北向输气干线，即萨哈林—大庆—沈阳干线和伊尔库茨克—北京—日照—上海干线；“两横”是两条东西向输气干线，即新西伯利亚—乌鲁木齐—西安—上海干线和万县—枝江干线；“四枢纽”是指北京、上海、信阳和武汉等地设立调度中心或分调度中心；“五气库”是在大庆、北京、山东、上海和南阳等地区建设地下储气库。这样由新老干线、支线和储气库组成遍布全国的天然气管网，由调度

中心和分调度中心统一调度管理，组成一个可靠的供气系统。

三、中国输气管道工程技术的现状

经过四十年来的努力，尤其是经过近二十年来较大规模输气管道建设的锻炼，中国的天然气管道输送技术水平有了很大提高。主要表现在以下几个方面。

1. 制定了输气管道设计规范

在长输管道建设初期没有自己的规范可循，基本沿用前苏联的做法。通过对多年输气管道建设工作的总结和大量的专题研究，参考了国际上先进国家的规范，1994年颁布了《输气管道工程设计规范》(GB 50251—94)。规范在输气工艺、线路、管道和管道附件的结构设计、输气站、监控与系统调度、辅助生产设施、焊接与检验、清管与试压等方面都做出了详细的规定，使中国的输气管道设计有了统一的技术要求和标准。

(1) 突出了以人为本的理念 主要表现在两个方面。一是对管输天然气的气质有严格控制，其中对硫化氢含量的条文说明叙述如下：“一般说，当脱除管输天然气中的游离水后，就没有腐蚀发生。但考虑到中国输气管道不是单纯把气体从起点输送到终点，沿线有大量居民用户与工业用户。因此为确保用户的安全和环境卫生，对……硫化氢含量小于 $20\text{mg}/\text{m}^3$ ……”。另一方面表现在从距离安全到强度安全的转变，前苏联的做法是要求管道与周围建(构)筑物保持一定距离即距离安全法，但是，一旦天然气管线发生事故，这一距离是不能保证周围建(构)筑物以及人员的安全的，在该规范中沿用了美国等西方国家的做法，即以管道本身的强度保证来保证周围建(构)筑物与管道的相互安全，即强度安全法。而在强度安全法里的设计系数是以按沿线居民户数和建(构)筑物密集程度划分的地区等级来选取的。

(2) 输气管道工艺计算公式 完成输送任务是输气管道的根本，这就涉及到管径的确定，完成任务输气量需要多大的输送压力？或者反之在选定的管径和输送压力等操作参数下其输送能力是多少？这就是输气管道的工艺计算，在这里一个很重要的参数摩阻系数 λ ，它与管道内壁的粗糙度和管内流体的流态有关，是各国研究人员根据当时的本国钢管生产水平、钢管质量、介质性质等进行的大量实验的基础上总结出来的经验公式，因此这些公式都有其适用范围，采用不同的 λ 计算公式，工艺计算结果就会不同，有时差别还会很大。由于中国现代管道输送起步晚，在这方面的研究较少，因此无论是输油还是输气管道的计算都是采用国外的公式，在20世纪80年代以前，中国一直在采用威莫斯(Weymouth)公式，这还是符合当时中国的制管水平和管输规模的，但是随着中国制管技术的提高、管道直径的加大和气体净化技术的提高，威莫斯公式明显偏于保守，因此在规范中采用了目前美国通用的潘汉德尔(Panhandle)修正公式B。

2. 逐步选用新材料、新设备、新技术

20世纪90年代开始，中国才建设真正意义上的天然气长输管道，在这之前还没有在大型长输管线上建立过压气站，因此站场工艺流程都比较简单，一般都是清管、除尘分离、调压、计量几个功能，变化不大。但是所采用的设备材料和技术还是有很大进步的，一些管线的建设还采用了国外近十年或二十年来的新技术。

(1) 管线选用方面的进步 输气管道用管包括无缝管(SML)、高频直缝管(ERW)、双面埋弧直缝焊管(LSAW)和螺旋焊缝管(SSAW)以及城市燃气管网用的铸铁管和PE管。由于生产技术和成本的限制，一般无缝钢管只用于DN200mm以下的小口径管线；对于DN400mm以上的大口径管线一般均采用有缝管，而螺旋焊缝管(SSAW)只能用于一类地区(荒漠、山区等人烟稀少地区)，不能用于二类、三类、四类地区；直缝钢管(包括ERW和LSAW)用于天然气管道优越性明显，应力状态好、几何尺寸精度高、外防腐效果好以及适合于作内涂层减阻。这些结论都是针对“西气东输”工程大量研究论证得出的。在

“西气东输”管线上大量采用了中国生产的 1016mm 管材 X-70 制成的螺纹管，这对中国的管材制造技术水平是一个很好的验证。

(2) 除尘分离设备 管线建设初期选用的是马鬃过滤器，效果差、维护工作量大，非常落后；后来采用了重力式分离器和离心式旋风分离器，两者各有优缺点，应用时间较长；后来在旋风分离器的基础上又进行了改进，产生了多管旋风分离器和循环式旋风分离器。

近年来开始使用过滤分离器，分离效果好但阻力降较大。20 世纪末，由中科院大连物化所试验成功了天然气膜分离净化技术及设备，并进行了中试。

(3) 在新技术方面 如前所述，由于中国以前建设的输气管线，距离短，没有中间压气站，因此在首站一般压缩机均采用电动机驱动，20 世纪 80 年代建设的中原至沧州线上采用了燃气轮机驱动离心压缩机，近年又在该管线上试验并应用了管道内涂层减阻技术；1997 年相继建设的靖边至北京、靖边至西安、靖边至银川和轮南至库尔勒等天然气管道，设计上都采用了 SCADA 监控系统；“西气东输”管线设计全部采用了内涂层减阻技术。

3. 管道施工技术

(1) 大口径管线的建设 20 世纪 80 年代中国施工了 720mm 口径的“东八三”输油管道工程，90 年代又施工了 660mm 口径的两条输气管线。21 世纪新开工的“西气东输”管线为口径 1016mm，管径的加大，一方面单节或双节管子质量比原来施工过的 720mm 管增大数倍，装卸运输更困难，另一方面管子容积增大，对穿越水域的稳管更困难；管壁厚增加，管子刚性加大，采用弹性敷设可能性减少，必然带来管子冷弯技术的提高。总之，通过“西气东输”管线的建设，促进了中国在大口径管线的建设包括对口机、吊管机、穿孔机、坡口机等施工机具和施工技术的提高。

(2) 河流穿跨越技术 1984 年中国引进了水平定向钻穿越技术和设备，先后在黄河、黄浦江、松花江、辽河等 10 余条大型河流施工中采用并获得成功，其中，濮阳—开封输气管道在黄河河底 27m 处回拖一次成功，穿越长度 1380m。目前中国已经能够自行设计制造水平定向钻穿管机，“西气东输”管线进行了大口径（1016mm）、大壁厚（26.2mm）、长距离（1085m）的淮河穿越。在跨越技术方面能够进行单管拱结构、多跨连续梁结构、桁架式结构、悬缆式结构和斜拉索管桥结构等各种结构形式的跨越工程建设，跨度由几十米、几百米到几千米。

4. 管道防腐技术

中国输气管道的防腐蚀技术是从简单的人工除锈刷漆发展到外壁涂层与阴极保护或牺牲阳极相结合的联合保护，并通过各种敷设条件下不同土壤性质对管道腐蚀的调查研究，做出合理的防腐设计。

20 世纪 60 年代，外壁涂层采用石油沥青加玻璃布作防腐绝缘层，70 年代开始少量采用聚乙烯胶黏带和环氧煤沥青等新的防腐材料，1993 年 7 月建成的黑龙江伊兰至哈尔滨人工煤气长输管道上首次大规模使用了性能良好的环氧煤沥青进行防腐。

自 1964 年开始使用阴极保护到今天，所有的输气管道上都建有阴极保护站，单站保护长度可达 50~80km。在无法实施强制电流保护的地区建有牺牲阳极保护站。1985 年研制成功的由微电脑控制的恒电位仪，使管道阴极保护效果达到最佳化。

四、国际天然气输送管道技术水平

20 世纪 70 年代和 80 年代是世界输气管道发展的高峰期，与之相适应，管道输送技术的发展也是最快的，从管道的勘察、选线、设计、施工、验收直至运行管理，从布管、弯管、挖沟、管子除锈防腐绝缘、管子对口、焊接、焊缝检测、回填、试压到压气站、配气站安装建设等工序均全部或大部分实现机械化、自动化、信息化、网络化，施工机具标准化、