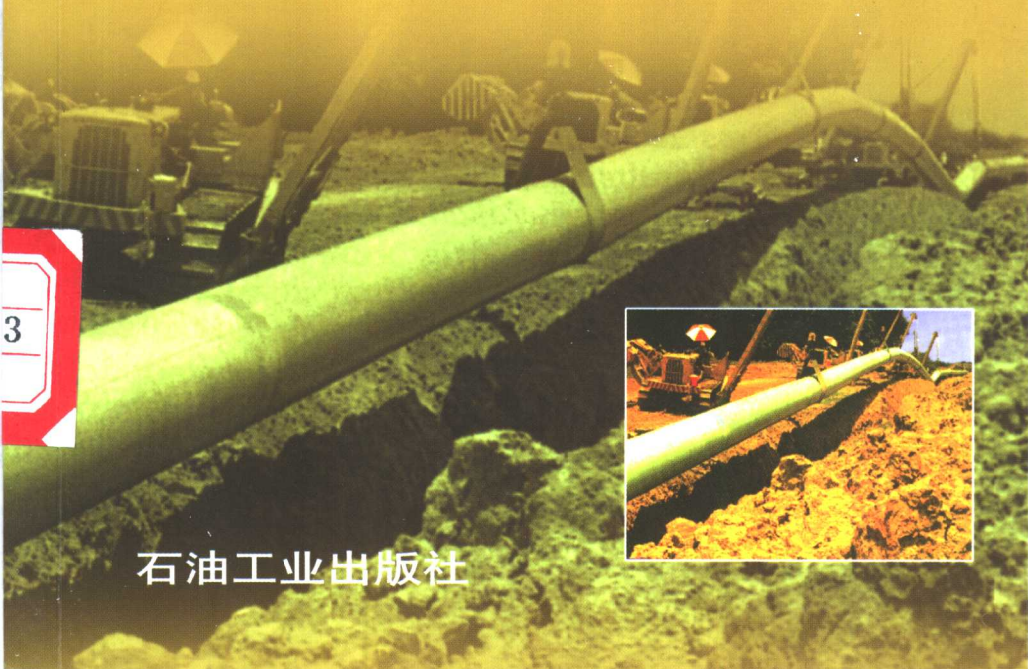


QIANGHUA TIANRANQI GUANDAO SHUSONG GONGYI

# 强化天然气管道 输送工艺

苗承武 陈祖泽 编译



3

石油工业出版社

# 强化天然气管道输送工艺

苗承武 陈祖泽 编译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书内容包括输气管道的优化设计、输气管道的操作管理(输气管道在非计算工况下的计算方法,对运行中输气管道工艺参数的鉴定,输气管道生产能力利用率和能耗的分析)和对现有输气管道的改造。详细介绍了这三方面的强化工艺。

本书可供从事天然气管道设计、施工、管理等工作的工程技术人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

强化天然气管道输送工艺/苗承武等编译.

北京:石油工业出版社,2001.11

ISBN 7-5021-3424-7

I. 强…

II. 苗…

III. 天然气输送-管道运输-工艺

IV. TE 832.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第036038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)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

850×1168毫米 32开本 9.625印张 260千字 印1—1500

2001年11月北京第1版 2001年11月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-3424-7/TE·2550

定价:20.00元

## 序 言

前苏联于 20 世纪 50 年代末~60 年代初开始大规模建设输气管道。从 1960 年到 1990 年商品气输量从  $260 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$  增加到  $7200 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$  (增加了约 27 倍), 干线输气管道的长度从  $21 \times 10^3 \text{km}$  增加到  $220 \times 10^3 \text{km}$  (增加了约 9 倍)。根据推算, 如果当时在规划设计输气管道时仅立足于 50 年代末~60 年代初的工艺和技术, 那就需要建设不少于  $600 \times 10^3 \text{km}$  的输气管道, 而投资和金属用量必须增加约 29 倍。问题之所以得到了顺利的解决是因为从 70 年代中期开始深入地研究、制定和推行了强化输气工艺。

强化任何一种工艺过程的实质就是不增加用于生产中的资源消耗而获得附加的产量, 这相当于降低用于单位产量上的单位资源耗量。就输气管道而言, 强化输气工艺过程的具体目的是: 在设计方面——降低单位输量或商品气运输量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{km}$ ) 的单位设计指标 (其中包括金属耗量、输气机组总装机功率、自用气耗量, 投资、输气成本) 以及提高资金产值率; 在操作管理方面——提高运行中输气管道的输气能力利用率、降低输气能耗和输气成本, 增加资金产值率和利润; 在对原有输气管道进行改造方面——增加或保持运行中输气管道的流量、降低输气能耗和经营费用, 提高现有设备的利用率和改善输气管道技术-经济指标。

强化输气工艺的基础是技术进步, 书中回顾和总结了下面 11 个方面的技术进步措施, 并对其进行了展望:

(1) 加大直径, 提高管道的通过能力, 降低单位金属耗量。目前, 直径为 1020~1420mm 的干线输气管道的长度已占俄罗斯全部输气管道长度的 57%。但是, 把管道直径进一步从 1420mm 增加到 1620mm, 作者认为是不合理的;

(2) 提高工作压力: 在 70 年代中期, 为加速天然气管道输

送的发展速度，采取了如下强化措施：把管径从 1220mm 增大到 1420mm，把工作压力从 5.5MPa 提高到 7.5MPa，这样使管道的通过能力增加一倍以上，单位金属耗量减少 25%，单位能耗下降 3%。1420mm、7.5MPa 的输气工艺被称为传统输气工艺（即金属节约型输气工艺），其所固有的其它工艺参数是：压缩比 1.45~1.5，站间距 110~120km，输量  $310 \times 10^8 \sim 320 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。在相同的 1420mm 直径下把压力从 7.5MPa 提高到更高的水平（9.8MPa），作者认为其合理性并不明显，只有当管子金属强度达到 700MPa 以上时，把工作压力提高到 9.8MPa 才可被看成是技术进步的一种合理方向；

(3) 降低水力摩阻：这可通过以下三种途径：内壁涂层，在理论上将使通过能力增加 7%~12%；完善钢管的制造工艺，减少其内壁粗糙度；在管道上必须设立清管器收发装置，最优清管周期应保证管道水力效率不低于  $E=0.95$ ；

(4) 冷却管输天然气：不仅可提高输气管道的可靠性，降低单位能耗，而且可增加通过能力（2%~5%）。天然气最优年平均冷却温度（即天然气经空冷器冷却后的出站温度）应比室外年平均计算气温高 10~15℃；

(5) 提高燃气轮机单机功率和效率：在全俄 386 个压气站中由燃气轮机驱动的占 83%。已开发了三代燃气轮机，最大单机功率达 25000kW；已开始研制旨在进一步提高效率的新一代燃气轮机，其方向是研制效率达 35% 的简单循环高温装置、效率达 37% 的再生装置、效率达 45% 的蒸汽燃气联合装置；

(6) 采用全压式离心压气机：从 70 年代中期开始，在压气站上转为采用以全压式离心压气机并联连接为基础的工艺流程，与非全压式离心压气机并-串联连接的工艺流程相比，其优点是：流程简化、闸阀数量减少、基建费用降低，所需机组功率减小、可靠性提高；

(7) 采用低压头输气工艺：低压头输气工艺的实质是降低管道中的压头损失。有两种低压头输气工艺方案：一是缩短站间

距,降低压缩比 $\epsilon$ ,因为压气站有效压头利用效率 $\eta_\epsilon$ 随压缩比的降低而增加,对于传统输气工艺压缩比 $\epsilon=1.45\sim 1.5$ ,其有效压头利用效率 $\eta_\epsilon=0.68\sim 0.7$ ,当 $\epsilon=1.2$ 时, $\eta_\epsilon=0.835$ 。如把压缩比从1.45降到1.35,在站间距缩短14%的情况下,可使单位能耗减少7%,而输量保持不变;另一个方案就是增设副管而不缩短站间距的低压头输气工艺,如压缩比降到1.35,必须铺设的副管长度为站间管段的14%,在这种情况下,单位能耗将减少20%。当前由于技术—经济市场行情的重大变化,首先是由于能源价格的上涨,这种新输气工艺(节能型输气工艺)的前景极为看好;

(8) 在离心式压气机上采用可更换的流通部分:采用可更换的流通部分可使压气站上的工作机组满负荷工作,从而提高燃气轮机的有效效率,降低单位能耗(可达13%)。采用可更换的流通部分并不仅仅局限于弥补站间管段设计值的差异和因管道沿途的分气和进气而造成各压气站压缩比的不同,而且是消除压气站和站间管段特性曲线不协调的有效手段;

(9) 在电动机驱动的离心式压气机上采用入口导向装置,来调节由不可调速电动机驱动的压气站的流量,以节约能耗;

(10) 输气管道的主要工艺参数(包括输量)应在优化计算的基础上进行选择,用系统法处理方案的选择是现代输气管道优化设计的一个重要方向;

(11) 寻找一种相对于传统上采用的各种输气工艺方案而言是全新的输气工艺,这是指在深度冷却(冷却到207K)状态、液化状态和硬化(水化物)状态下的输气方法,以及用化学的方法把天然气转化成液体甲醇的输气方法,但根据作者的意见,这些方法没有竞争力。

本书是根据加里乌林 з.Т(俄罗斯天然气科学研究院输气分院院长、博士、教授、国际能源技术研究院院士、俄罗斯功勋科学家)和列昂季耶夫 E.В(俄罗斯天然气科学研究院输气分院管道改造,扩建实验研究室主任,副博士)所著的“强化天然气管道

输送工艺”一书，并参考“干线输气管道工艺设计标准”及其它文献编译而成。全书共九章，所涉及的内容可归结为三个方面：输气管道的优化设计、输气管道的操作管理和改造现有输气管道。

60年代以前在输气管道参数的优化计算中广泛采用图解分析法。从70年代初开始，图解分析法逐渐被以采用电子计算机为基础的方法所代替。然而，有许多设计问题，例如在没有足够的技术经济信息的条件下进行输气管道工艺方案的计算、对比、评估，在编制天然气管道输送远景发展纲要时确定输气管道的参数等，采用图解分析法来解，甚至优于计算机法，当然采用的已不是原先的图解分析法，而是第二章中所介绍的两种新的优化输气管道参数的图解分析法——“基准点”法和“计算段”法。新方法原先的图解分析法有原则上的区别，新方法先进的地方是采用通用的图解优化关系曲线。这两种新的图解分析法均用于一个目的——确定输气管道在设计前的评估阶段的最优参数，并对各种不同的输气工艺方案进行对比，但是这两种方法各有自己的特点。

在设计前阶段最好采用新图解分析法，以缩小寻找最优方案的范围；在具体设计阶段最好采用计算机法，考虑线路的详细特点。

由于能源价格不断上涨的趋势，在输气管道的优化设计中，作者特别重视输气管道工艺参数对输气单位能耗的影响；在输气工艺方案的技术—经济对比中，作者提出应把节能型低压头输气工艺放在优先地位，即使在压气站工艺流程的设计中，能耗指标也是一个极其重要的依据。

本书用了最多的篇幅（第三、四、五、六、七、九章）来论述输气管道操作管理方面的问题，其中包括：提高输气管道在非计算工况下的输量、提高输气管道夏季输量的途径、降低运行中输气管道燃料—动力资源的消耗、不稳定输气工况的分析、鉴定运行中输气管道的工艺参数和输气管道输气能力利用率和能耗的分析。要特别提请读者注意的是第三章和第六章关于输气管道非计算工况和不稳定输气工况的论述。所有输气管道实际上均在某种程度上在不稳定工况下运行（由于各种不同的扰动作用），但

是，输气管道的设计和操作实践表明，在大多数情况下，只需考虑输气是在稳定流态下进行的，这就足够了，只是在特殊情况下（比如在设计通向用气不稳定的用气大户或地下储气库的输气支线时，在设计输气管道的末段时）才不得不考虑不稳定流态。尽管输气管道经常会受到各种干扰，但通常都把输气过程看作是准稳过程。作者于 70 年代首次提出了输气管道在稳定流态下的非计算工况这一概念。在输气管道设计阶段中规定的工况属于计算工况，在输气管道运行过程中，通常会出现这种或那种偏离设计的情况，相应于这种情况的工况称为非计算工况。强化输气管道运作的目的是提高其输量和降低输气单位能耗，而这一强化问题本身主要就是在非计算工况条件下产生的，因此研究非计算工况的必要性是不言而喻的。书中详细介绍了非计算工况产生的原因、非计算工况的分析方法、对压气站在非计算工况下的功率和流量的评估、非计算工况的优化等。

关于输气管道不稳定工况的计算虽然已有了解析计算法和数值计算法，但都比较复杂。作者提出了一种简易的方法。书中介绍了作者提出的用于计算输气管道站间管段工况的数学模型，以及在不稳定工况下压气站工艺参数的计算方法。

输气管道改造也是本书的一个重要内容（第八章）。俄罗斯输气管道系统的发展和经营已超过 40 年，到 1990 年 1/3 以上的输气管道（按长度）已运行 20 多年了，其中 15% 以上的输气管道已超过了计算寿命（33 年），输气设备产生了无形和有形的老化，从而引起输气工艺指标变差（输量减少，能耗增加，供气可靠性降低），最终使输气管道主要的技术 - 经济指标变差（成本提高、利润下降），以及其它诸如调整结构、流向、生态要求等原因，故必须对输气管道进行改造。干线输气管道的改造是强化天然气管路输送的一种重要手段，因此，改造输气管道已成了研究和设计部门的专项任务。

编译者



# 目 录

<b>第一章 技术进步——强化天然气管道输送工艺的基础</b> .....	(1)
第一节 天然气管道输送技术进步的主要成就.....	(1)
第二节 60~80年代的技术进步措施对强化输气工艺影响的分析 .....	(21)
<b>第二章 输气管道设计参数的优化和降低能耗及金属耗量的途径</b> .....	(29)
第一节 以原始指标综合参数为基础优化输气管道设计参数 .....	(29)
第二节 设计输气管道参数对输气单位能耗的影响 ..	(50)
第三节 输气工艺方案的技术-经济对比和节能工艺优先顺序的论证 .....	(60)
第四节 对采用不同经济效率输气机组的技术-经济分析 .....	(74)
第五节 采用高强度钢管、减少输气管道的金属耗量 .....	(80)
第六节 装备离心式压气机的压气站最优工艺流程的论证 .....	(86)
<b>第三章 提高输气管道在非计算工况下的输量</b> .....	(105)
第一节 输气管道的非计算工况.....	(105)
第二节 非计算工况的分析方法和工作区.....	(108)
第三节 分析压气站在非计算工况下的功率和流量 .....	(113)
第四节 适用于非计算工况的离心式压气机改型结构(可更换的流通部分改型结构) .....	(124)
第五节 以最大流量为准则优化非计算工况.....	(127)

第六节	分阶段投入压气站设备、提高建设中的输气管道的输量·····	(131)
第七节	增设输气机组、提高输气管道输量·····	(135)
<b>第四章</b>	<b>提高输气管道夏季输量的途径·····</b>	<b>(141)</b>
第一节	评估输气管道夏季输量下降的因素·····	(142)
第二节	投入增设的输气机组、提高输气管道的输量·····	(149)
第三节	评估输气机组预防性维修决策和可靠性因素对提高输气管道输量的影响·····	(154)
第四节	采用计算大气温度偏高(298K)的燃气轮机以提高输气管道的输量·····	(156)
第五节	对采用提高输气管道夏季输量不同技术方案合理性的技术-经济评估·····	(157)
<b>第五章</b>	<b>降低运行中输气管道燃料-动力资源的消耗·····</b>	<b>(160)</b>
第一节	以最小能耗为准则的输气工况优化原则·····	(160)
第二节	操作因素和工况对燃料-动力资源消耗的影响·····	(170)
第三节	输气管道和压气站不同工况能耗指标的优化和评估方法·····	(181)
<b>第六章</b>	<b>不稳定输气工况分析·····</b>	<b>(194)</b>
第一节	数学模型·····	(195)
第二节	输气管道站间管段和压气站在不稳定输气工况下联合工作的分析·····	(200)
第三节	在不稳定工况下压气站工作参数的计算方法·····	(207)
第四节	不稳定工况对压气站工作参数和工艺流程的影响·····	(211)
<b>第七章</b>	<b>鉴定运行中输气管道的工艺参数·····</b>	<b>(214)</b>
第一节	根据气体动力特性曲线确定离心式压气机的流量·····	(216)

第二节	确定多管平行输气管道中各平行管道的流量	(225)
第三节	在操作现场测量的基础上鉴定离心式压气机的特性曲线	(231)
第四节	燃气轮机技术状态参数的计算	(236)
<b>第八章</b>	<b>改造输气管道是强化输气工艺的一种手段</b>	<b>(240)</b>
第一节	改造输气管道的目的和概念	(240)
第二节	优化要改造的输气管道的参数	(247)
第三节	改造输气管道的主要技术方案	(252)
<b>第九章</b>	<b>输气管道生产(输气)能力利用率和能耗分析</b>	<b>(262)</b>
第一节	输气管道生产能力利用率分析	(262)
第二节	完善制定输气能耗定额方法和完善能耗分析方法的主要方向	(273)
第三节	在编制输气工况计划时制定能耗定额的方法	(280)
第四节	输气管道能耗分析法	(288)

# 第一章 技术进步——强化天然气管道 输送工艺的基础

## 第一节 天然气管道输送技术 进步的主要成就

前苏联的输气管道大规模建设始于 20 世纪 50 年代末到 60 年代初。在表 1.1 中列出了天然气输送主要指标的动态。从 1960 年到 1990 年商品气的输量增加了将近 27 倍、干线输气管道的长度增加约 9 倍，平均的输气里程增加 3.3 倍、商品气运输量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{km}$ ) 实际增长了 119 倍。在这一时期中建成的输气管道约  $20 \times 10^4 \text{km}$ 。计算表明，如果当时在规划设计输气系统时仅立足于 50 年代末到 60 年代初的工艺和技术，那就需要建设不少于  $60 \times 10^4 \text{km}$  的输气管道，而投资和金属用量必须增加约 29 倍，而且，在受到当时施工技术制约的实际建设速度条件下，上述输气管道建设规划是根本无法完成的。问题之所以得到了顺利的解决是因为深入地研究、制定和推行了强化天然气管道输送的先进的工艺过程、先进的技术和组织措施，这就是：

- (1) 增加输气管道的直径；
- (2) 提高工作压力；
- (3) 提高钢管的强度特性；
- (4) 减少输气管道的水力摩阻；
- (5) 冷却管输天然气；
- (6) 提高输气机组的单机功率、效率和可靠性；
- (7) 保障设备的成组配套；
- (8) 统一压气站工艺流程；
- (9) 在压气站上采用离心式压气机为并联连接的全压式输气

机组、在离心式压气机上采用可更换的流通部分和进口导向装置；

(10) 用系统法处理多管平行输气管道系统的设计和经营(首先是多车间压气站上各压气机车间的联合工况)；

(11) 优化要设计的输气管道的参数和运行中的输气管道系统的操作工况。

由于采取了以上所列举的先进技术措施和方法，从而顺利地解决了这一时期为满足国民经济发展需要的天然气输送任务。

表 1.1 天然气管道输送的主要指标 (前苏联)

(1960~1990 年)

指 标		1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990
1. 商品气输送量, $10^9 \text{m}^3/\text{a}$		26	112.1	181.5	279.4	401.1	579.2	720
2. 干线输气管道的长度, $10^3 \text{km}$		21	42.3	67.5	98.7	131.6	179.9	220
3. 输气机组装机功率, $10^6 \text{kW}$		0.27	2.1	3.9	9	17.6	38.5	45.4
4. 平均输气里程, km		589	656	917	1237	1851	2470	2540
5. 不同管径 (mm) 在输气管道中的比例 (%)	1020、1220、1420	3.2	17.9	21.2	39.9	46.6	51.9	57
	1220、1420				19.3	27.7	36.7	43
	1420				3.7	10.9	19	26.1
6. 商品气运输量, $10^{12} \text{m}^3 \cdot \text{km}$		15.8	70.3	164.2	337.3	746.1	1413.3	1920.5

根据已知的下列方程，可对强化输气方法进行综合分析，对输气管道的通过能力和输量的预期增加，以及单位能耗和单位金属耗量的预期下降作出评估：

输气管道通过能力方程：

$$q = a \frac{d_B^{2.6} p_1}{\sqrt{Z_{cp}}} \sqrt{1 - \frac{1}{\epsilon^2}} \quad (1.1)$$

$$a = \alpha / E \sqrt{\Delta T_{cp} L};$$

用于压缩天然气的功率方程：

$$N = bqZ_H T_H \left( \varepsilon^{\frac{k-1}{k\eta_{\text{mon}}}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

$$b = \beta k / (k - 1)$$

钢管壁厚方程：

$$\delta = \frac{np_1 d_H}{2 \left( \frac{R_{1H} m}{k_1 k_H} + np_1 \right)} \quad (1.3)$$

- 式中  $\alpha$ ——与采用的量纲有关的系数；  
 $E$ ——输气管道水力效率系数；  
 $\Delta$ ——天然气对空气的相对密度；  
 $T_{\text{cp}}, T_H$ ——分别为站间管段中的天然气平均温度和压气站进口的天然气温度；  
 $L$ ——压气站站间距；  
 $d_B, d_H$ ——分别为管道的内径和外径；  
 $p_1, p_2$ ——分别为压气站之间站间管段的起点压力和终点压力；  
 $Z_{\text{cp}}, Z_H$ ——分别为站间管段的天然气平均压缩性系数和压气站进口的天然气压缩性系数；  
 $\varepsilon$ ——压缩比 ( $\varepsilon = p_1/p_2$ )；  
 $\beta$ ——与采用的量纲有关的系数；  
 $k$ ——绝热指数；  
 $\eta_{\text{mon}}$ ——离心式压气机的多变效率；  
 $n$ ——工作压力负荷系数；  
 $R_{1H}$ ——管子金属的标准计算强度；  
 $m$ ——输气管道工作条件系数；  
 $k_1$ ——管子金属的安全系数；  
 $k_H$ ——输气管道可靠性系数。

在计算管子壁厚时，必须遵循建筑标准和规则中的建议。

作者对技术进步各种措施的效果作了如下综合评估。

### 一、增加干线输气管道的直径

根据方程 (1.1), 在其他参数不变的情况下, 当输气管道的内径从  $d_{B1}$  增加到  $d_{B2}$  时, 输气管道的通过能力将从  $q_1$  增加到  $q_2$ :

$$q_2 = q_1 \left( \frac{d_{B2}}{d_{B1}} \right)^{2.6} = q_1 \left( \frac{d_{H2} - 2\delta_2}{d_{H1} - 2\delta_1} \right)^{2.6}$$

近似关系式为:

$$q_2 \approx q_1 \left( \frac{d_{H2}}{d_{H1}} \right)^{2.6}$$

当采用较大一档直径时 (按管子规格) 通过能力的预期增加值如下:

- 当管径从 820mm 转到 1022mm 时, 通过能力增加 24.4%;
  - 当管径从 1020mm 转到 1220mm 时, 通过能力增加 19.6%;
  - 当管径从 1020mm 转到 1420mm 时, 通过能力增加 16.3%;
  - 当管径从 1420mm 转到 1620mm 时, 通过能力增加 14.1%。
- 输气管道每单位通过能力的单位金属耗量将从  $M_{y1}$  降到

$M_{y2}$ :

$$M_{y2} \approx M_{y1} \left( \frac{d_{H1}}{d_{H2}} \right)^{0.6}$$

利用这一关系式, 可求得当采用较大一档直径时 (按管子规格) 单位金属耗量的预期下降值:

当管径从 820mm 转到 1022mm 时, 单位金属耗量下降 12.3%;

当管径从 1020mm 转到 1220mm 时, 单位金属耗量下降 10.2%;

当管径从 1220mm 转到 1420mm 时, 单位金属耗量下降 8.8%;

当管径从 1420mm 转到 1620mm 时, 单位金属耗量下降 7.6%。

由方程 (1.2) 可知, 单位输气能耗  $\vartheta_y = N/q$ , 与输气管道的直径无关。因此, 增加输气管道的直径是降低单位金属耗量的有效方法, 而单位能耗却保持不变。技术进步的这一方向始终贯穿在前苏联输气管网的整个发展历史中。干线输气管道的最大直径从 50 年代末的 720~820mm 增加到 1420mm。前苏联首先在世界上相继建成了直径为 1020 和 1420mm 的干线输气管道, 目前, 这种直径的输气管道长度的比重已占全部输气管道长度的 57% (到 1990 年)。

把输气管道的最大直径进一步从 1420mm 提高到 1620mm 的这一建议作者认为是不合理的, 其理由是:

(1) 管径为 1620mm 的输气管道通过含水土壤时, 由于浮力偏高, 使其可靠性下降 (管子的浮力将增加 30%);

(2) 为实现直径 1620mm 输气管道的流水作业施工工艺, 并保持已掌握的施工建设速度和施工质量, 必须研制一整套专门的施工机器和施工机械。

事实上, 如要建造直径为 1620mm 的输气管道, 就必须重新考虑全部施工工艺, 而且并不能确保这种输气管道具有令人信服的技术—经济上的优势。

鉴于上述这些理由, 使直径为 1620mm 输气管道的竞争能力大为降低, 特别是在西西伯利亚的输气管道主要建设区。考虑到 2000~2005 年大输量输气管道的大规模建设将大大压缩, 因此, 开发直径为 1620mm 的输气管道并无良好的前景。

## 二、提高输气管道的工作压力

提高输气管道的工作压力对管输天然气的参数有极其重要的影响, 首先是对压缩性系数、焦—汤系数, 以及在某种程度上对温度状况的影响。在表 1.2 中列出了在不同工作压力下输气管道站间管段中天然气某些参数的变化。站间管段中天然气的膨胀率为 1.5, 接近于传统的膨胀率。

在表 1.3 中所示的是管径为 1420mm 输气管道在不同工作压力下的基本特性的计算结果。表中的数据以相对的形式表示, 即



以工作压力为 7.5MPa 的输气管道的相应参数作为基数 1。能耗和通过能力的相对指标随压力升高的这种变化反映了压缩性系数和焦一汤系数的影响。

表 1.2 在不同工作压力下输气管道中管输天然气参数的变化

参 数		工作压力, MPa			
		5.5	7.5	9.8	11.8
1. 站间管段中天然气的压力, MPa	终点压力	3.6	4.9	6.5	7.9
	平均压力	4.5	6.2	8.3	9.9
2. 天然气在站间管段的终点温度, K (起点温度为 328K)		302	307.5	307	308.5
3. 站间管段中天然气的平均压缩性系数		0.896	0.864	0.828	0.802
4. 天然气的比热容 $C_p$ , kJ/(kg·K)		2.55	2.72	2.95	3.12
5. 焦一汤系数, K/MPa		0.47	0.44	0.4	0.38

表 1.3 在不同工作压力下直径为 1420mm 输气管道的基本特性  
(钢管的强度极限  $\sigma_{BP} = 620\text{MPa}$ )

工作压力 MPa	压力变化系数	管子壁厚 mm	1km 管子的重量, t	管子重量变化系数	通过能力变化系数	单位能耗变化系数
5.5	0.73	11	382	0.707	0.73	1.03
7.5	1	15.6	540	1	1	1
9.8	1.33	21.6	744	1.377	1.33	0.96
11.8	1.58	26.3	920	1.703	1.58	0.94

下面研究单位金属耗量  $\bar{M}$  与输气管道直径  $d_H$  和工作压力  $p_1$  的关系, 以及与管子金属强度特性的关系。从图 1.1 可看出, 不同直径输气管道的工作压力所表现出来的影响是不一样的: 对于直径相对较小 (1020mm 以下) 的输气管道, 随着压力的升高, 单位金属耗量具有明显下降的趋势; 对于直径为 1220mm 的输气管道, 这种趋势的程度相对减小; 而对于 1420mm 的输气管道, 这种趋势基本消失。从图 1.1 同时还可看出, 不论输气管道