

天然气管道 内涂层减阻技术

刘广文 钱成文 于树清 权忠舆 编译

TIANRANQI
GUANDAO
NEITUCENG
JIANZU
JISHU



石油工业出版社

天然气管道 内涂层减阻技术

刘广文 钱成文 于树清 权忠興 编译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是在翻阅大量资料的基础上进行翻译、加工、分析计算。编写而成。全书共分8章,第一章和第二章主要介绍了天然气管道内涂层减阻技术的现状、发展趋势以及内涂层减阻的机理;第三章主要探讨了内涂层减阻技术的工艺计算,同时对影响内涂层经济计算的因素,如管道绝对当量粗糙度的取值,进行了详细的分析;第四、五章重点介绍了有关内涂层涂料的选择和施工技术;第六章介绍了内涂层经济性的评价方法;第八章根据我们的分析提出了今后具体的研究建议。本书还对内涂层的施工和验收标准进行了介绍,对国际上通用的内涂层标准的重要条款进行了编译,以便广大的工程技术人员参考。

本书的出版对领导和广大的管道科技人员全面了解有关内涂层减阻技术有着特别重要的意义。特别适用于科研、工程技术人员以及院校师生等人员。

图书在版编目(CIP)数据

天然气管道内涂层减阻技术/刘广文等编译.

北京:石油工业出版社,2001.10

ISBN 7-5021-3560-X

I. 天…

II. 刘…

III. 天然气输送—集输管道—涂层—减阻—技术

IV. TE973

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第071490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)

北京乘设伟业科技排版中心排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米 32开本 6.375印张 172千字 印1—1000

2001年10月北京第1版 2001年10月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-3560-X/TE·2628

定价:15.00元

编译者的话

随着新世纪的到来,世界经济越来越突出“可持续发展”的理念。地球上所有的人们都更深切地希望在与大自然的和谐之中求得生存环境的不断改善。在新理念中,经济的最主要支架——能源结构必然有相应的变化。可再生能源的比重当会渐渐增长,而目前占主要地位的不可再生能源应力求减小其对环境的负面影响;“洁净能源”的概念应运而生。在这样的大背景下,我国的能源结构已经开始了大幅度的调整。据专家估计,未来 20 年内我国“洁净能源”——天然气的需求将迅速增加,其所占比例将成倍上升。这一趋势必定带动天然气管道的高速发展。引进、学习和应用国外先进技术是当前发展我国天然气管道的捷径,在此基础上的创新将会更快地把我国带入天然气大国的行列。

此时此刻,对天然气管道范畴内的诸多先进技术进行广泛了解和深入领悟显现出空前的重要与紧迫。鉴此,我们努力搜集了干线输气管道技术的一个方面——内涂层技术的文献资料,又经过一年时间分工合作编译成文。原始资料的时间纵贯 50 年,地域横跨几大洲;既有公开的文献报道,也有内部的交流通信。我们在编译时本着广泛、详细、系统、客观的宗旨,争取使读者能准确了解国外干线输气管道内涂层技术综合全貌与各个细节,进而可以理解这项技术的本质,便于消化吸收。据我们所知,近年来虽然国内不少业内人士对此项技术表现出越来越浓厚的兴趣,但却还没有一本读物可以较全面集中地反映国外情况。在我国天然气管道建设的大高潮到来之际,我们呈献这本小册子,希望能给业内同行的工作带来一点方便。这也算是对我国天然气管道发展的微薄贡献罢!

编译本书的动机来源于中国石油天然气“西气东输”工程项目的鼓动。编译本书的行动得益于中国石油天然气管道分公司的

支持。编译本书的过程直接受到中国石油天然气管道科技研究中心的领导,特别应当提到的是该中心主任杨祖佩在编译本书的许多关键时刻亲自给予了激励、关心和帮助。此外,在资料的收集和整理时,管道科技研究中心以及管道科学研究院许多同志提供了无私而有益的支援。在本书问世之时,编译者对此一并表示由衷的谢意。

限于编译者的水平和时间之短暂,本书所涵盖的内容难免不够完整,恳切希望读者不吝批评指正。

2001年7月10日

第一章 绪 言

近 20 年来,由于全球对经济可持续发展的要求和对“洁净能源”的呼唤,天然气工业的迅速发展,使得在世界范围管道建设中长距离、大口径的干线输气管道发展极快。在西欧、北非、北美地区、俄罗斯(前苏联)等地已建成数条跨国乃至洲际输气管道,部分已建成网络系统。总体来说,国外输气管道技术已发展得相当成熟。

天然气从气田生产后,一般皆经过脱水、脱硫处理,成为干气。再经干线管道输送时并不会造成管道内部的腐蚀问题。因此,管道内部一般不需要做防腐涂层。然而,国外干线输气管道采用内壁涂层却相当广泛。其原因是内涂层能有效提高管道输送能力。与此同时,内涂层还具有利于检测、防腐蚀、保证输气的纯净、节约动力、节省维修费用等效能。对于建设一条干线输气管道如只考虑投产初期市场需求量不高时,减阻内涂层的必要性似乎不大;但是,稍有长远打算的运输商都会预计到市场需求量的不断增长,从而在建设之初即考虑管道的增输问题。而管道内涂层就是一种便捷、经济、有效的技术手段。

干线输气管道内涂层最直接的作用是降低管壁粗糙度,从而减少流动的摩擦阻力。由此带来的结果是在设计输量一定时可以降低输送压力、扩大增压站间距、减少增压站数量、降低输气动力消耗、节约钢材和施工费用。而管道建成之后可以更方便地实现增输,对此国外有的厂商把这种减阻内涂层命名为“Flow Coating”。尽管与管道内涂层相关的流动特性的改善通常并不足以保证减小管子直径的一个等级,但是显著的节约将产生于压缩设备投资费用的减少和运行(燃料)费用的减少,这些节约可以直接归因于与管线内涂层有关的流动效率的提高。

能提高流动效率的管道内涂层可追溯到自来水工业。20 世纪早期,人们已经认识到水管道内流体的流动性能要受到管子内表面状况的影响。为了改善流体的流动性能,在水管道中上应用了内涂层。在 20 世纪中期,内涂层开始应用在原油管道上,其目的是为了通过防止蜡沉积而改善原油流动性能。然而,直到 50 年代中期,天然气管道公司才开始认识到与管道内涂层相关的优越性。有几家主要的管道公司开始在输气干线上应用内涂层。在 20 世纪 50 年代末和 60 年代初这段时间,很多天然气管道公司试图将与管道内涂层有关的气体流动性能的改善进行量化,典型的是,这些公司利用氨气示踪剂进行了流动试验。试验中,把实际天然气的流动速度与预计流动速度相比,其结果作为流动效率。因此,100%效率即表示实际流动速度等于预计流动速度。试验结果表明:做过内涂层的管道效率大体在 95%~103% 范围内,而相应裸管的效率只在 81%~85% 范围内。当然,提高的程度会与管道内试验的流体流速有关,也与裸(钢)管的洁净度(氧化程度)和粗糙度有关。有文献报导:已观察到流速的增加可达 18%。

与此同时,美国天然气协会(AGA)管道研究委员会着手它的 NB14 项目,即“天然气行业的管道内表面涂层研究”。研究人员研究了和这个项目相关的,如氯丁橡胶、环氧煤焦油、聚乙烯、醇酸树脂、聚氨酯、环氧树脂等 38 种不同类型的可用于天然气管道内涂层的材料。两年后,这些研究人员得出结论,环氧树脂涂料最适合于天然气管道。自从 1957 年最初的研究完成以来,辅助试验及实践经验也进一步证实了双组分环氧树脂材料是最适合用于管道内涂层的,因为它们具有很多我们所需要的特性。这些特性包括:

- (1)优异的粘结性;
- (2)足够的硬度;
- (3)耐水性;
- (4)柔韧性;
- (5)耐化学性;
- (6)抗气泡性;

(7)最低限度的焊接烧损。

还有,环氧型涂料非常易于施工。今天,这种加合固化体系由于它们对施工环境的较大的承受度而成为被最广泛使用的类型。

为使管内涂层表面光滑,利于流体顺利流动,环氧树脂型涂层的干膜厚度为 1.5~3mil(37~76 μ m),一般涂敷厂商都是在工厂内,经喷(抛)射表面清理后采用喷涂方法施工。近三四十年内涂层的涂料和涂敷施工技术都已经发展得相当成熟。

迄今为止,运行试验和经验表明,内涂层可为输气管道运行带来诸多好处。有的文献报导其主要的益处可以归纳为:

(1)增加输量,并可保持数年。

(2)管道敷设之前内壁就已得到了保护,并杜绝了腐蚀隐患。

(3)有助于管道检测——内涂层的光反射可更明显地揭示出管子缺陷。

(4)管道光滑度得到增强。输气管道敷设后的清扫更容易,而且水压试验后的干燥速度也更快。

(5)减少阻碍气体流动的物质沉积,也不会产生产品被污染的现象。

(6)降低输送费用。

(7)减少维护次数。清管频率明显下降。

使用内涂层输气管道的例子绝大多数管径在 16in(406mm)以上。其原因是:采用内涂层最主要是为了在不增加其他设备的情况下,提高干线或长输系统的输量;而大多数干线管道均是 NPS16 或更大的,许多输气公司认为对它们进行内涂是顺理成章的事。喷涂每平方米面积 NPS16 或更大管径的干线的费用比喷涂支线(通常为 NPS12 或更小管径)的费用要低。到 20 世纪 80 年代初期,内涂费用明显降低,事实证明了进行 NPS16 或更大管径的管线内涂是经济的。

油气管道成功使用内涂层的最早报道是 1940 年美国西德克萨斯州使用酚醛树脂对酸性原油油井套管进行内涂作业。直到 1949 年合适的有机缓蚀剂得到发展之前,这种内涂层被广泛用来

对酸性原油管线进行腐蚀防护。1953年3月,内涂层首次在美国一条直径为20in(508mm)的天然气管道上投入使用。1954年匹兹堡的Manufacturers Light and Heat公司对Tennessee天然气管道公司所属长约70km的NPS16(406mm)和20(508mm)管线进行了内涂作业。然而,第一次对长距离输气管道进行内涂层作业的是休斯敦的TransContinental管道公司,在1955年他们完成了325km的NPS30(762mm)和NPS36(914mm)管道的内涂层,用的是一种胺固化环氧树脂涂层材料。对于这些早期用户,内涂层主要用于防止在存放及静水测试过程中管线的内壁腐蚀,同时可减少压降,从而提高管道的效率。1959年首次发表了通过现场试验,分析内涂层对大口径输气管道改善流动增加输量的理论和效果的报告。此后,加拿大于1962年,意大利于1965年,英国于1966年,前苏联于1967年相继应用了大口径输气管道的内涂层技术。在过去40多年中内涂层已迅速在世界范围内推广应用。

目前世界范围内应用内涂层的著名的干线输气管道的典型例子不胜枚举。例如1973~1983年间修建的阿尔及利亚—意大利穿越地中海输气管道(Trans-Mediterranean Gas Pipeline),其陆上管道口径1220mm,穿越西西里海峡(160km)和墨西拿海峡(15km)选用三条509mm管径,壁厚20mm的X65钢管并行,所有管子都用环氧树脂进行了内涂敷。在1984~1990年间,英国British Gas公司所辖北海天然气管道采用内涂层的长达1746km。1990年美国《管道工业》杂志报道:挪威到比利时的著名Zeepipe天然气管道,全长810km,管径996mm,输气压力高达16MPa,为了减低摩阻采取内涂敷40~60 μ m厚的环氧树脂层。据报道,由于减阻作用影响可忽略不计,内焊口处裸露总计13km(仅占全长的1.6%)未做处理。从非洲马格利布经直布罗陀到欧洲的一条输气管道,全长1352km,管径1219mm,穿越海峡48km的双线管径为529mm,也采用内涂敷厚度达50 μ m环氧树脂层。加拿大最大的天然气公司——NOVA公司,到1995年止,其所辖气管道的76%(全长约7200km)都采用了内涂层。同样是1995年发表

在天然气管道腐蚀防护国际会议上的一篇文献总结说:“回顾高固体分环氧树脂作为管道内涂层已有近 40 年的历史,这些年来在大约 70000km 已涂敷的管道实践经验基础上,逐渐认可了它的效益。”据意大利 Socotherm 管道涂敷公司介绍:仅其一家在最近 5 年中已经涂敷了超过 1000 万平方米(折合 1m 直径管道约 3000 多公里)内涂层。美国 CRC 公司则在过去 25 年间共完成世界范围内超过 35 项输气管道的内涂层工程。英国 Bredero Price 公司 40 年间具有超过 50000 km 的全球钢管内涂层的实际施工业绩。据最近报导:2000 年 10 月竣工的从加拿大到美国的著名 Alliance 天然气管道系统,干线全长 2988km,管径 914/1067mm,采用高压输送富气。其内壁喷涂了 50 μ m 厚的由 International Interpon 提供的 PC220 牌号的双组分液体环氧树脂,固化成膜后作为减阻内涂层。由此可见干线输气管道应用内涂层在国际上已经十分普遍,据有人统计,目前在海外管径 20in(508mm)及以上的输气管道基本上均应用了内涂层。“他山之石,可以攻玉”,学习借鉴引进应用这项技术 为我国即将开始的大规模输气管道建设服务会是非常有益的。

干线输气管道内涂层技术的内涵比较丰富。归纳起来大体包括:

- (1)减阻原理;
- (2)管道工艺计算;
- (3)涂料体系;
- (4)涂敷施工方法、装备与工艺;
- (5)内涂层管道的经济性;
- (6)相关的技术标准与规范。

从 1999 年开始,我们对干线输气管道的内涂层技术进行了全面广泛的调研。检索了 20 世纪 50 年代以来美国、加拿大、英国、日本等国的有关期刊资料,以及国际会议文集。2000 年 6 月以后又与英国 E. Wood—COPON、荷兰 SIGMA、丹麦 HEMPEL、台湾松辉等涂料公司,美国 CRC、新加坡 Bredero Price、意大利 So-

cotherm 等涂敷厂商进行了技术交流。目前占有公开的和内部的文献资料、技术性通信共 50 余篇。在阅读研究这些资料的基础上,对干线输气管道的内涂层技术与应用有了较清楚的概念,现就其全面内容撰成本篇编译文章供有兴趣的读者参阅。

第二章 内涂层减阻基本原理

流体力学基本概念告诉我们:流体管道流动阻力在不同流态下,有不同的规律,而区分不同流态的判据是雷诺数 Re 。雷诺数是表示管内介质“无序”的一个指标;流体在管道中流动时一般存在着贴近管壁的层流底层,依据该底层厚度也即是相应的雷诺数,流动状态分为层流、部分紊流和完全紊流;而这一底层厚度与雷诺数成反比。由此可以简单地看出:当雷诺数足够大时,层流底层厚度将相当小,流体流动状态就有可能达到完全的紊流。

2.1 流体管流流态基本判据

雷诺数的计算公式为:

$$Re = \frac{4 Q \rho}{\pi D \mu} \quad (2-1)$$

而层流底层厚度的计算公式为:

$$\delta = \frac{D}{Re \sqrt{\lambda}} \quad (2-2)$$

式中 Q ——流量;

ρ ——流体密度;

D ——管道内径;

μ ——流体动力粘度;

λ ——水力摩阻系数。

2.2 第二临界雷诺数和完全紊流

根据流体力学,第一临界雷诺数是水力光滑区和混合摩擦区的分界点,而此后还有一个标志进入完全紊流的第二临界雷诺数

存在。前人研究了大量实验并取得经验数据后,得到了判别进入完全紊流流态的第二临界雷诺数表达式,并推出许多公式表明此时管道流动的水力摩阻系数几乎与雷诺数无关,仅成为管壁绝对粗糙度的函数。

根据前人的推导,第二临界雷诺数是管壁相对粗糙度的函数:

$$Re > \frac{665 - 765 \lg \epsilon}{\epsilon} \quad (2-3)$$

$$Re > 11(\epsilon)^{-1.5} \quad (2-4)$$

式中 ϵ ——管壁相对粗糙度, $\epsilon = 2k / D$;

k ——管壁绝对粗糙度。

此时,即超过第二临界雷诺数,层流底层厚度 $\delta < k$ (管壁绝对粗糙度),进入完全紊流流动区;其后的水力摩阻系数经典的计算方法是用 Nikuradse 公式(1933)计算:

$$\lambda = \frac{1}{(1.74 - 2 \lg \epsilon)^2} \quad (2-5)$$

由上述方程可以看出 λ 仅仅决定于 ϵ 而与 Re 无关。同时可以导出:

$$\Delta p \propto Q^2 \quad (2-6)$$

即流动进入所谓“阻力平方区”。从下面分析可以看出,在这个流动状态下内涂层将有着重要的作用。

2.3 流量、摩阻与管壁粗糙度

根据许多专业机构和科学家对流体流动阻力平方区提出的流量关系式,我们可以得出(当管径、压降相同时),有无内涂层时管道流量之比为(这里和后面公式中各个参数的下标 1 表示有内涂层,下标 0 则表示无内涂层):

$$Q_1 / Q_0 \approx (\lambda_0 / \lambda_1)^{0.5} \quad (2-7)$$

在天然气管道计算中常用的摩阻计算公式很多,美国最广泛应用的 Colebrook - White 显式方程:

$$1/\sqrt{\lambda} = -2\lg(k/3.7D + 5.74/Re^{0.9}) \quad (2-8)$$

根据上式可以看出当 Re 足够大时, λ 即近似为 ϵ 的单一函数;换句话说,它完全符合阻力平方区的规律——仅仅由 ϵ 的大小决定水力摩阻系数。

若根据另一个更简单的“全苏天然气研究所(ВНИИГАЗ)近期公式”:

$$\lambda = 0.067(\epsilon)^{0.2} \quad (2-9)$$

则很容易导出:

$$Q_1/Q_0 = (\epsilon_0/\epsilon_1)^{0.1} = (k_0/k_1)^{0.1} \quad (2-10)$$

方程左侧表示直径相同的管子加内涂层与未加内涂层的输量之比。方程右侧突出了对于内涂层管道和未涂管道的输送效率来说,粗糙度取值的重要性。

事实上如果根据天然气管道其他形式的摩阻计算式,例如美国天然气协会(AGA)公式:

$$1/\sqrt{\lambda} = 2\lg(3.7D/k) \quad (2-11)$$

以及前述 Colebrook-White 公式等等,亦可导出类似关系。

内涂层能够改进内壁粗糙度是不争的事实。根据国外一篇文献介绍,管道在各种情况下的内壁粗糙度相差甚大,而有内涂层者仅为新管道的 $1/5 \sim 1/10$ 。另外在美国管道设计工程实践工作委员会 1975 年发表的报告中给出的管道内壁绝对粗糙度的数据见表 2-1。

表 2-1 管道内壁绝对粗糙度 k 值(mil)

管道条件	k
新的干净裸管	0.5~0.75
在大气中暴露了 6 个月以后	1.0~1.25
在大气中暴露了 12 个月以后	1.5
在大气中暴露了 24 个月以后	1.75~2.0
经喷砂或喷(抛)丸过的钢管	0.2~0.3

续表

管道条件	k
用清管器擦光的钢管	0.3~0.6
环氧或丙烯酸树脂内涂层钢管	0.2~0.3
铜管	0.1~0.2
玻璃管	0.035~0.050

注:1mil = 25.4 μ m。

从表 2-1 数据可以清楚地看到,有内涂层管道的内壁粗糙度大大减小,即 $k_1 < k_0$ 。再回顾一下公式(2-9),水力摩擦系数 λ 下降是很显然的。

为保证获取一个有代表性的数值,粗糙度的实际测量需要许多独特的技术。但由于需要开挖和切割,这样做并不可行。但是,众所周知,有些环氧树脂的表面平滑如镜,这样的光洁程度,靠经验估计当在 10 μ m 以下。

举例来说,如果未涂的管道内壁粗糙度取 19 μ m,涂敷后的管道内壁粗糙度取为 6.4 μ m(这是加拿大 NOVA 公司及许多国外文献的推荐值),那么在完全紊流状态下,当其他条件不变时,若根据上面公式(2-10)计算可以提高流量 11.5%。如果未涂的管道内壁粗糙度取为 40 μ m(这在实际管道中也是常见的),流量的提高将能达到 20.1%,相当可观。

显而易见,在输量一定时,当采用内涂层之后,则可以降低管道的压降,相应的结果当然是节约了动力消耗并延长了压气站的间距。

2.4 天然气输送管道的流态

天然气输送管道一般出现两种流态:部分紊流和完全紊流。在部分紊流流态下运行的管线不需要内涂层来提高管输效益。在该流态下,一种与管壁相邻的层流底层将流体紊流核心裹在中间。这个层流底层起着天然涂层的作用,使气体同管子不光滑内壁相

隔开。这样,管子内壁粗糙度对流动性的影响是微不足道的。只有像环状焊缝、弯头、接头及所携带的特殊物质等拖拽阻力诱发因素可以影响部分紊流流态的流动性。所以对于在部分紊流流态下运行的管道,内涂层并不是经济有效的选择。

与部分紊流流态不同,完全紊流的流动同时被内壁粗糙度和上面提及的拖拽阻力形式所影响。在该流态下,气体流速通常高到足以导致整个管子横断面的完全扰动,因而层流底层(在部分紊流情况下出现的)将不再存在了。这样,流体的紊流核心迅速扩展,这就使气体承受了由于管壁表面状况而引起的附加拖拽阻力。因此,在完全紊流流态下的管输的低效性可用一个运行粗糙度(或称有效粗糙度)表示。它反映了管壁摩阻和由于其他阻力因素,如环状焊缝、弯头、接头、携带物所引起的摩阻的综合。在完全紊流状态下运行的管道是内涂层最合适的应用对象。

大家知道,干线输气管道因其管径大,流速也较高,基本上都是处于完全紊流的“阻力平方区”运行。显然施加内涂层将是提高干线输气管道输送效率的极其有效的手段。就此,不少研究者通过实验或现场实际数据做了大量深入的研究,很多成果已经公开发表。简要归纳起来,对完全紊流区而言大体有几点结论:

(1)内涂层导致的摩阻系数缩减率随雷诺数的增大而增大,随管径的减小而增大;

(2)雷诺数越大,管径的影响越小;

(3)摩阻系数在雷诺数 $10^5 \sim 10^7$ 之间变化最大;

(4)内涂层若能使表面粗糙度减小 90 % 时,可使输气管道摩阻系数减小多达 33 %,使输送量提高 24 %。

以上是干线输气管道内涂层减少流动摩擦阻力、提高流动效率最简单的基本原理。这里关键的前提条件一是要处于完全紊流区,二是管壁表面粗糙度要有显著的减小。有关详细的工艺计算在下面的章节中再进一步讨论。

第三章 内涂层工艺计算

很长时间以来,人们都认识到管道内涂层具有良好的经济性,涂层能抵抗磨损、机械破坏,降低了擦洗、过滤、清管的成本及其他清管设备的费用,确保了产品的纯度,阻止了污染的生成,极大地降低了维护和劳动投入成本,使管内壁不会造成沉淀物的聚积(如垢或石蜡),最主要的还是能增加输量,节约动力消耗。

当然加内涂层的所有优点并不是在一条输气管道上完全显现出来,特别是对输量增加或节约压缩机的安装功率和动力消耗来讲,只要显示出其中的一个优点就可证明加内涂层是经济的。按国外经验对于大口径输气管道,即使输量增加 $1\% \sim 2\%$, $3 \sim 5$ 年也就可以抵消内涂层成本。如果不考虑增输,而考虑节约压缩机的站数和动力消耗,同样会有巨大效益,包括有形效益和无形效益。

管道内涂层可以显著增加管道的输量、节约压缩机的安装功率和动力消耗等等一些优点是与管道的各种参数、涂层的种类和管道的流动特性有很大的关系。特别是管道裸管和加内涂层后绝对当量粗糙度取值对输气管道的工艺计算和加内涂层与否的经济分析是至关重要的。到目前为止都是一些经验值,不同国家、不同类型的管子取值有很大差别。干线输气管道其流动特性一般处于紊流区,所以施加内涂层后,由于粗糙度大大降低,在相同的条件下,可以显著地增加输量,降低压缩机的动力消耗。内涂层经过几十年的发展,其应用十分普遍,也已经被人们所认识并经过了实践的检验,但对管道系统由于施加内涂层使输量增加的理论方面的分析尚不够充分。为此,本章主要对干线输气管道的流态和摩阻系数的确定进行简单的分析,对不同管道粗糙度取值进行详细的介绍,简单说明内涂层管道工艺计算的步骤,并列举了不同管道的