

天然气管道 减阻内涂技术

胡士信 陈向新 主编



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

天然气管道减阻内涂技术

胡士信 陈向新 主编

化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

天然气管道减阻内涂技术/胡士信,陈向新主编.北京:化学工业出版社,2003.1

ISBN 7-5025-3261-7

I.天… II.①胡…②陈… III.天然气输送-管道-涂层-减阻-技术 IV.TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 016040 号

天然气管道减阻内涂技术

胡士信 陈向新 主编

责任编辑:顾南君

文字编辑:颜克俭

责任校对:蒋 宇

封面设计:潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京市管庄永胜印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 10½ 插页 4 字数 272 千字

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3261-7/TQ·1693

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

序 言

20 世纪与 21 世纪之交，是中国经济发展尽显大手笔的时代。三峡工程、南水北调、青藏铁路、西电东送和西气东输，没有哪一个时期经济发展有如此大的气魄，没有哪个时期产业发展如此迅疾地实现大跨越。作为我国西部大开发的一项规模宏大、标志性的中外合资工程项目——西气东输工程，更加受到世人的瞩目。西气东输工程的启动，标志着我国将大规模发展天然气，改善能源结构。如何确保在西气东输工程中建成高水平、高技术、高质量和高效益的一流输气管道，成为国内外各界关注的焦点。

西气东输管道横贯我国东西，起点是新疆塔里木的轮南，终点是上海青浦区的白鹤镇，管道自西向东途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南、安徽、江苏、上海和浙江等 10 个省市自治区。管道全长 3900km，管径为 1016mm，全线采用减阻内涂覆盖层的 X70 管道。管道途经沙漠、高山峻岭、湿陷性黄土、大江大河和江南水网等复杂的地貌。其中，穿越太行、太岳、吕梁三座山脉；三次穿越黄河、一次穿越淮河，一次穿越长江。管线之长、管径之大、压力之高、地形之复杂均堪称全国之最，施工之难度可想而知。可以说，在群雄逐鹿中，谁掌握了科技这把金钥匙，谁就会在西气东输这个战场上领先一步。

2000 年初，西气东输工程正式确定建设后，西气东输项目部围绕这一工程组织了有关研究和设计部门先后完成了一大批科研项目，取得了丰硕的成果，管道减阻内涂技术就是其中之一。作为西气东输的主设计单位——中国石油天然气管道工程有限公司（原管道设计院），早在 1996 年就已对国外大口径输气管道广泛采用内涂技术加以关注。在西气东输的可行性研究阶段，胡士信先生向西气东输项目经理部提出了在天然气管道中采用减阻内涂技术的建议。

鉴于减阻内涂经济效益显著，在西气东输工程中应就其技术的必要性、可行性和可操作性进行立项研究，以推动国内天然气管道技术的进步。本书就是本项研究成果的具体写照和西气东输工程实践的初步总结。

天然气管道减阻内涂技术是一项经济效益显著的高新技术，主要体现在：管径不变的前提下，可提高输量；输量一定的前提下，可缩小管径，节约钢材；在管径、输量、压力不变的前提下，可减少压缩机站的站数；由于磨阻减小，压缩机的动力消耗减小；延长清管周期，减少清管次数；减轻管内壁腐蚀，保证介质纯度。美国 API RP 5L2 标准将减阻内涂的作用概述为以下四点：改善流动特性；在建造前期提供腐蚀防护；有助于管子内表面的目视检查；改进管道清管效率。

西气东输工程采用内涂后，可减少 3 座压气站，每年减少燃气消耗约 1.6 亿立方米，增加输量 12.3 亿立方米，全线减少功率 19.2%。根据以上计算，可以看出，采用内涂后固定资产投资可减少 11.1 亿元（3 座压气站）；增加的管输费约 7 亿元；每年节约下的燃气费用约 1.6 亿元，这样算出的经济效益有近 20 亿元。根据西气东输工程实际费用，减阻内涂的造价在 30 元/米以内，全线总投资应在 4 亿元左右，仅从燃料气消耗的节约上 3 年便可收回成本。

在 2001 年 4 月 3 日的技术评审会上，以中国科学院肖纪美院士为主任的专家组对课题组的工作给予了充分肯定，认为西气东输采用减阻内涂技术可望减少 3 座压气站，每年可减少燃气消耗 1.6 亿立方米等，其经济效益十分显著；课题组提出的用于天然气管道减阻内涂技术方案，技术合理，可操作性强，采取等同采用方式制订国内标准，是合理、可行、符合国情的，填补了国内减阻内涂标准的空白。

为改变我国的能源结构，在今后的几十年中，天然气长输管道建设将达到一个新高潮，如从俄罗斯、哈萨克斯坦修建天然气管道，随着西部气田的开发，还会有大量的输气管道即将投入建设，它们都将是 大管径、长距离的输气管道，采用内涂技术增加输量、

提高效益是首选新技术，所产生的效益均以亿计。西气东输等同采用的内涂技术标准，对于其它输气管道也适用，通过西气东输的实践，其技术被应用起来可能更加自如。

西气东输近 4000km 干线管道已采用了减阻内涂技术，使我国的天然气管道技术达到国外的先进水平，其经济效益和社会效益均十分显著。

创世纪伟业，树时代丰碑。

陈吉友

2002 年 12 月 31 日

前 言

跨入 21 世纪后,中国迎来了天然气管道建设的新高潮。西气东输的启动为我国天然气输送技术带来了质的变化,中国加入世界贸易组织为我们的技术进步创造了条件,少投入多产出是我们天然气管道建设者永恒的目标。通过技术论证,天然气管道的减阻内涂是世人公认的好技术,施加减阻内涂后可以改善流动特性、有助于在建设期间提供防腐保护、有利于管子内表面缺陷的目视检查和改进管道的清管效率。在西气东输可行性研究中,减阻内涂方案在投资上就占有优势,加上运行中的效益更显其优越。

减阻内涂技术是国人尚未涉足的高新技术,在中国石油天然气股份有限公司和集团公司的支持及西气东输项目部的直接领导下,我们成立了科研课题组,从设计参数、内涂条件、表面准备和喷涂工艺等诸多方面进行研究,最终确定了这一技术,并编制出操作性极强的两部减阻内涂技术标准,为西气东输建设及天然气输送技术的进步做出了贡献。本书就是对减阻内涂技术的综合介绍。

本书共分两部分,第一部分是减阻内涂技术的总体论述,共分 9 章,征得英国 E. WOOD 公司北京办事处的同意,我们将世界著名内涂专家 Dr. S. Kut 先生的两篇论文改编成第 1 章绪论;第二部分是减阻内涂技术操作时必不可少的标准。参加本书编写的人员有陈向新、曲慎扬、权忠舆、胡士信、王冰怀、陈韶华,书中有些内容使用了科研成果资料。在本书成稿过程中,权忠舆先生对第二部分中的国外标准重新进行了审校,最终由胡士信同志对全书统稿。全书成稿后廖宇平先生对书稿进行了审阅,在此谨向廖宇平先生致以谢意。

本书编写及出版过程中,中国石油天然气管道工程有限公司、中国腐蚀与防护学会和化学工业出版社给予了大力的支持,我们在

此向上述单位致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，加上时间仓促，书中难免有错误和不当之处，敬请各界读者批评指正。

编 者

2002 年 12 月 31 日于廊坊

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 综述	1
1.2 内覆盖层产生的效益	1
1.2.1 增加天然气的输量	2
1.2.2 减少维护量	3
1.2.3 良好的经济性	3
1.3 天然气管道的内覆盖层	4
1.3.1 基本要求	4
1.3.2 防蚀用内覆盖层	5
1.3.3 减阻用内覆盖层	5
1.3.4 内喷涂装置	6
1.3.5 焊缝的处理	6
1.3.6 非焊接头	7
1.4 现场施工涂料	7
1.4.1 施工程序	7
1.4.2 现场施工表面准备	8
1.4.3 现场施工内涂	8
1.4.4 现场涂覆施工管线的设计	8
1.4.5 现场施工涂覆的检测	9
1.4.6 现场施工的覆盖层	9
1.5 内覆盖层使用报告	10
1.5.1 改善流动性	10
1.5.2 提高流量	11
1.5.3 减少摩擦	11
1.5.4 水管线	12
1.5.5 降低泵输成本	13
1.5.6 饮用水管道内衬	14

1.5.7 水管线摩擦系数	14
1.6 典型应用实例	14
1.6.1 原油管线	15
1.6.2 盐水管线	15
1.6.3 盐水管线漏洞的修复	15
1.6.4 石化和炼制产品管线	16
1.6.5 内涂覆管道的其它例子	16
1.6.6 石蜡沉积	16
1.6.7 沥青内涂的沉渣影响	16
1.6.8 耐浆体磨损	17
1.6.9 煤浆管线	17
1.6.10 固体的运输	18
1.6.11 密封舱运输	18
1.6.12 薄膜涂料	19
1.6.13 耐磨性的海水清淤 (sea dredging) 测试	19
1.7 新的发展	19
1.7.1 热喷环氧覆盖层	20
1.7.2 热喷覆盖层	20
1.7.3 热喷覆盖层性能	20
1.7.4 高固体分涂料	21
1.7.5 微生物腐蚀	21
1.7.6 环氧涂料的发展	21
1.7.7 环氧粉末涂料的优点	22
1.7.8 环氧粉末涂料的应用	22
1.8 结论	23

第2章 减阻原理及计算	24
2.1 输气量与输送压力的计算公式	24
2.1.1 平原地带	25
2.1.2 地形起伏较大地带	26
2.2 磨阻系数 λ 的确定	26
2.2.1 流态的划分	26
2.2.2 磨阻系数 λ 的计算	28

2.3 管内壁粗糙度的取值	29
2.4 输气功率	31
2.5 减阻内覆盖层的经济效果	32
2.5.1 内覆盖层与输送量、输送距离的关系	32
2.5.2 内覆盖层与压气机功率的关系	33
2.6 减阻内覆盖层的适用范围	35
2.7 减阻内覆盖层的方案比较	37
参考文献	38
 第3章 减阻内涂涂料	 39
3.1 涂料组成及分类	39
3.1.1 涂料的基本组成	39
3.1.2 涂料的分类	40
3.1.3 涂料的干燥机理	43
3.2 减阻内涂涂料性能的基本要求	45
3.2.1 黏结力	45
3.2.2 渗透性	45
3.2.3 耐磨性	45
3.2.4 耐压力变化	45
3.2.5 耐热性	45
3.2.6 化学稳定性和耐蚀性	46
3.2.7 覆盖层的光泽度	46
3.3 减阻内涂的寿命要求	46
3.3.1 覆盖层使用寿命的定义	46
3.3.2 影响寿命的涂料及施工因素	46
3.3.3 影响寿命的条件因素	47
3.3.4 影响寿命的运行因素	47
3.3.5 环氧树脂的热降解	47
3.3.6 涂料的耐久性改善	50
3.4 减阻内涂涂料的技术要求	51
3.4.1 涂料的组成、混合和稀释	51
3.4.2 物理性能	51
3.4.3 包装、搬运、装卸和储存	54

3.4.4 技术服务	54
3.4.5 材料的确认	54
3.4.6 涂料验收	54
3.4.7 保证	54
3.4.8 装卸	55
3.5 内涂涂料的选择	55
3.5.1 选择的原则	55
3.5.2 涂料品种的确定	55
3.5.3 涂料选择实例	56
3.6 当前世界知名的内涂涂料	57
3.6.1 英国 COPON EP 2306 HF 涂料	57
3.6.2 荷兰式玛 FLOWCOAT 03 涂料	59
3.7 国产减阻内涂涂料	62
参考文献	64

第 4 章 内涂覆工艺的生产设备	65
4.1 前言	65
4.2 上管平台	66
4.3 预热设备	66
4.4 内表面抛丸清理设备	66
4.5 内喷涂设备	70
4.6 固化炉	71
4.7 检测仪器	72
4.7.1 环境条件监测仪器	72
4.7.2 表面清理检测仪器	73
4.7.3 涂覆层厚度检测仪器	75
4.7.4 覆盖层附着力检测仪器	77
4.7.5 针孔检测仪	79
参考文献	79

第 5 章 钢管内表面预处理	80
5.1 表面预处理的重要性	80
5.2 影响覆盖层质量的主要因素	82

5.2.1 氧化皮的影响	82
5.2.2 表面污物的影响	82
5.2.3 可溶性盐的影响	83
5.2.4 粗糙度的影响	83
5.3 表面处理的基本要求	84
5.3.1 GB 8923《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》	85
5.3.2 SY/T 0407《涂装前钢材表面预处理规范》	87
5.3.3 GB/T 13288《涂装前钢材表面粗糙度等级的评定》	88
5.3.4 可溶性氯化物的检测标准	89
5.4 钢管内表面预处理	89
5.4.1 抛丸处理	90
5.4.2 喷砂(丸)处理	91
5.4.3 清理作业	92
5.5 质量控制	92
5.5.1 清洁度	93
5.5.2 粗糙度	95
5.5.3 新动态	96
参考文献	97

第6章 内涂涂覆工艺

6.1 总则	98
6.2 基本技术要求	98
6.2.1 对涂覆商的要求	98
6.2.2 内涂覆施工的基本程序	102
6.3 工艺要求	102
6.3.1 进管检查	102
6.3.2 管子预热	102
6.3.3 表面准备	103
6.3.4 内喷涂	106
6.3.5 覆盖层的修补	111
6.3.6 涂覆工艺的注意点	111
6.3.7 管道标记	111
6.4 质量控制	112

6.4.1	质量控制的主要项目	113
6.4.2	质量控制的重要性	113
6.4.3	质量控制措施	113
6.4.4	业主的责任	113
6.4.5	检验和测试	114
6.4.6	质量控制的主要项目检测要求	114
参考文献		115

第 7 章 涂料与覆盖层的性能指标和检验方法 116

7.1	涂料的性能	116
7.2	内覆盖层涂料的试验室质量检验	118
7.2.1	表面光泽	120
7.2.2	耐热性	120
7.2.3	油浸泡试验	120
7.3	覆盖层的生产检测	122
7.3.1	针孔检测	122
7.3.2	涂膜厚度检测	122
7.3.3	弯曲测试	123
7.3.4	黏结（附着力）检测	123
7.3.5	固化检测	123
7.3.6	水浸泡测试	123
7.3.7	剥离检测	123
7.4	各项性能的检测方法	124
7.4.1	涂料固体体积百分含量的测定	124
7.4.2	试验室气压起泡试验	126
7.4.3	试验室水压起泡试验	126
7.4.4	试验室针孔检测	126
7.4.5	涂料密度的测定	127
7.4.6	涂料沸程的测定	128
7.4.7	涂料沉淀性能测定	128
7.4.8	涂料细度的测定	129
7.4.9	涂料中粗颗粒的测定	130
7.4.10	涂料黏度的测定	131

7.4.11 涂料试片的盐雾试验	131
7.4.12 涂料试片的弯曲试验	132
7.4.13 覆盖层硬度的测试	133
7.4.14 覆盖层耐磨损性能的测试	134
7.4.15 覆盖层表面光泽的检验	135
7.4.16 覆盖层湿膜厚度的测定	135
参考文献	136

第8章 减阻内涂的经济性 138

8.1 费用现值 (CPVCOS) 法	139
8.1.1 定义及计算公式	139
8.1.2 判别方法	140
8.1.3 简单示例	140
8.1.4 费用现值法的特点	140
8.2 差额投资净现值 (ΔNPV) 法	141
8.2.1 定义及计算公式	141
8.2.2 判别方法	141
8.2.3 方案优选的步骤	142
8.2.4 差额投资净现值法的特点	142
8.3 干线输气管道采用内覆盖层的经济判据	142
8.3.1 管内壁粗糙度的确定	143
8.3.2 压缩机站功率的确定	143
8.3.3 干线输气管道增量投资的确定	143
8.3.4 运营成本费用的确定	144
8.3.5 采用内覆盖层管道运行费用的判定	147
8.3.6 内涂覆管道经济性分析判定的程序	147
8.3.7 NOVA 输气公司对内覆盖层经济性分析判定方法应用示例	149
8.3.8 我国西气东输管道采用内覆盖层的经济性分析	151
参考文献	153

第9章 内涂技术在西气东输工程中的应用 154

9.1 西气东输工程的意义	154
---------------------	-----

9.1.1	西气东输管道工程概况	155
9.1.2	站场	155
9.1.3	防腐	155
9.1.4	工程建设总体安排	156
9.2	减阻内涂技术的应用	156
9.3	西气东输工程内覆盖层工艺参数及技术要求	158
9.3.1	西气东输干线管道内涂覆工艺基本参数	159
9.3.2	技术要求	160
9.3.3	内覆盖层涂料的选择	160
9.3.4	内涂覆作业的基本程序	161
9.4	西气东输工程采用减阻内涂技术的经济效益	162
附录一	Q/CNPC 37 (API RP 5L2) 非腐蚀性天然气输送管内壁覆盖层推荐做法	165
附录二	GBE/CM1 钢质干线用管和管件的內覆盖层施工规范	183
附录三	GBE/CM2 钢质干线用管和管件的內覆盖层材料技术规范	191
附录四	Q/SY XQ 11—2002 西气东输管道内壁(减阻)覆盖层补充技术条件	203
附录五	ISO 2815—1973 (E) (GB 9275—88) 色漆和清漆——巴克霍尔兹压痕试验	209
附录六	ISO 8502—2—1992 (E) 已处理表面上氯化物的试验室测定	215
附录七	ASTM D 117—97 盐雾试验方法	220
附录八	ASTM D 185—84 (1999) 颜料、色浆和色漆中粗颗粒的标准试验方法	232
附录九	ASTM D 522—93a 附着有机覆盖层心轴弯曲试验用标准试验方法	237
附录十	ASTM D 523—89 (1994) 关于镜面光泽的标准试验方法	245
附录十一	ASTM D 869—85 (1998) 色漆沉淀度评定的标准试验方法	254
附录十二	ASTM D 968—93 用磨料下落测定覆盖层耐磨性	257
附录十三	ASTM D 1078—99 挥发性有机液体馏程测试方法	265
附录十四	ASTM D 1200—94 用福特黏度杯测定黏度的标准试验方法	281

附录十五	ASTM D 1210—96 颜料-漆料体系分散细度测定的标准试验方法	287
附录十六	ASTM D 1309—93 (1998) 路标漆在贮存时沉降性能的标准试验方法	297
附录十七	ASTM D 1475—98 测定液体涂料、油墨和相关产品密度的标准试验方法	299
附录十八	ASTM D 1644—88 (1993) 测定清漆不挥发物含量的标准试验方法	306
附录十九	ASTM D 2697—86 (1991) 色漆和清漆中不挥发物体积的测定	309