

油气管道输送技术

黄维和 著



石油工业出版社

油气管道输送技术

王 强 主编



石油工业出版社

油气管道输送技术

黄维和 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从油气管道输送的各项技术入手,着重介绍了原油管道输送技术、成品油管道(网)的调控与优化、天然气管网优化运行以及油气管道输送目前急需研究的难题及新技术。全书融入了作者多年来从事油气输送技术与管理工作的心得和体会,提出了新形势下油气管道技术体系。

本书可供从事油气储运研究和应用的人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

油气管道输送技术/黄维和著.

北京:石油工业出版社,2012.12

ISBN 978-7-5021-9434-5

I. 油…

II. 黄…

III. 油气输送—管道输送

IV. TE832

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第314587号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010) 64523612 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012年12月第1版 2012年12月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:17.25

字数:345千字

定价:120.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

如果说石油天然气是国民经济的血液，管道则是国民经济的大动脉。管道已经成为世界五大运输方式之一。管道运输充分利用地下资源，具有独特的安全、环保、经济优势。中国目前70%的石油、99%的天然气通过管道运输，长输干线管道已达8万公里，海上油气管道近4000公里。预计2020年我国将拥有油气管网近20万公里。油气管道为构建国家能源战略通道，保障国家能源安全发挥了不可替代的作用。应该看到，我国管道工业方兴未艾，与欧美等发达国家相比，不论在输送介质，还是发展规模上，都仍处于大有可为的战略机遇期。

我国油气管道发展史，既是一部艰苦创业史，更是一部技术创新史。半个多世纪以来，管道工业经历了自力更生、艰苦创业，引进消化、提升水平，自主创新、跨越发展的多个阶段。近十年来，以西气东输管道工程，西部原油、成品油管道工程为代表一系列管道工程建设投产，成功解决了大口径、高压输气管道断裂控制、易凝高黏原油常温输送、成品油和天然气管网优化运行等技术难题，依靠自主创新，以原创与勇于实践的精神在最短的时间内将实验产品和工艺实现了工业化应用，并且跻身世界先进水平。

世界地缘政治格局演变，无不深深地打上能源的烙印。能源安全已成为中国经济安全的关键因素之一，直接关系到国家经济安全和人民生活。随着世界范围内油气合作扩大，管道已经成为油气合作共促发展的纽带。中国石油工业在“走出去”的进程中，管道建设与输油气工艺的先进性有力推动了油气合作规模快速发展的局面。油气管道建设与运营已经成为左右地缘政治格局的重要因素。

该书凝聚了作者从业30多年理论研究、工程实践与运营管理经验，系统提出了我国油气管道技术体系，包括油气输送技术、油气储存技术、工程建设技术、运行维护技术、科技装备国产化技术；在此基础上，分析和阐述了

油气输送技术中包括油气管道断裂控制、原油管道输送、成品油管道调控和优化、天然气管网优化运行等方面最新研究和应用成果，以及新技术应用发展前景、长距离油气管道输送典型案例等。该书图文并茂，资料数据丰富，是我国管道输送行业一本重要著作，可为从事管道业务的领导、技术专家、工作人员和关心能源事业的学者、高等学校师生提供极其有意义的参考。在此，我谨对该书作者所作出的贡献表示祝贺！

谢克昌

2012年11月于北京

目 录

第 1 章 概述

1.1 我国油气管道工业发展	1
1.1.1 自力更生, 艰苦创业	1
1.1.2 引进消化, 提升水平	2
1.1.3 自主创新, 跨越发展	2
1.2 科技创新引领管道行业技术进步	3
1.2.1 工程建设关键技术	4
1.2.2 油气输送关键技术	5
1.2.3 油气储存关键技术	7
1.2.4 运行维护关键技术	8
1.2.5 材料装备国产化关键技术	9
1.3 管道行业面临的挑战与展望	9
1.3.1 应用系统工程理论提升管网运行水平	10
1.3.2 应用新材料新技术加大节能减排力度	10
1.3.3 集成信息与控制技术推进管控一体化建设	10
1.3.4 全力推动国产化进程	11
1.3.5 小结	11
参考文献	11

第 2 章 油气输送管道的断裂控制

2.1 常见的延性断裂控制模型	13
2.1.1 Battelle 双曲线模型及相关简化公式的局限性	13
2.1.2 几个止裂韧性预测修正模型和方法	15
2.2 气体组分对减压波曲线以及输气管道止裂的影响	18
2.2.1 单相流到两相流的减压波曲线特征	18

2.2.2	不同组分天然气的减压波曲线特性分析	20
2.2.3	天然气不同组分对管道止裂韧性影响	22
2.2.4	管材性能水平对气体组分的要求	24
2.3	DecomWave 软件在天然气减压波特性分析中的应用	25
2.3.1	组分对于减压波特性的影响	26
2.3.2	初始压力影响	26
2.3.3	初始温度影响	27
2.4	西气东输二线管道的断裂控制	31
2.4.1	焊接区域防止起裂韧性要求	33
2.4.2	钢管管体韧性要求	33
	参考文献	41

第3章 原油管道输送技术及创新

3.1	原油流变性测试方法	44
3.1.1	基于流变仪的原油流变性测试	44
3.1.2	管流模拟测量方法	48
3.2	原油管道输送水力、热力模拟技术	56
3.2.1	原油管道输送中非稳态水力、热力耦合计算	56
3.2.2	原油管道预热投产工艺计算	61
3.2.3	原油管道停输再启动工艺计算	65
3.3	原油管道改性输送技术	71
3.3.1	降凝剂作用机理	72
3.3.2	影响降凝剂改性效果的主要因素	73
3.3.3	降凝剂定制技术	81
3.3.4	降凝剂改性效果的评价及工业化应用	85
3.4	原油管道减阻增输技术	89
3.4.1	原油管道减阻剂的减阻机理	89
3.4.2	油品减阻剂的研制	92
3.4.3	减阻剂效果评价和影响因素	98
3.4.4	减阻剂现场试验和应用	103
3.5	原油管道优化运行方法	105
3.5.1	研究概述	105

3.5.2 原油管道优化的特点	106
3.5.3 原油管道优化运行数学模型求解方法	108
3.5.4 原油管道优化应用案例	110
参考文献	112

第4章 成品油管道（网）的调控与优化

4.1 成品油管道顺序输送的工艺及控制	116
4.1.1 顺序输送的水力特性及控制	116
4.1.2 顺序输送管道的混油及控制	120
4.1.3 混油界面检测、混油切割与混油处理	124
4.2 成品油管道（网）的调度运行管理	127
4.2.1 成品油管道调度计划编制	128
4.2.2 成品油管网调度计划编制	131
4.2.3 成品油管道的运行优化	134
4.2.4 顺序输送管道（网）调度运行管理软件	137
4.3 成品油管网集中调控与优化运行方法	142
4.3.1 成品油管网调控的特点分析	142
4.3.2 成品油管网调控的决策支持技术	143
4.3.3 成品油管网的优化运行方法	146
参考文献	155

第5章 天然气管网优化运行

5.1 天然气管道运行模拟仿真	156
5.1.1 输气管道的水力、热力计算	157
5.1.2 天然气管网仿真软件国产化	164
5.1.3 天然气管网仿真技术发展趋势	168
5.2 天然气管道减阻增输新技术	171
5.2.1 天然气管道减阻剂的作用机理	172
5.2.2 天然气减阻剂减阻效果评价装置	174
5.2.3 天然气减阻剂的研制	177
5.2.4 BIB天然气减阻剂现场试验	179

5.3 天然气管网及压缩机组运行优化	181
5.3.1 天然气管网运行优化	182
5.3.2 压缩机组运行优化	185
5.4 天然气管网储气及调峰技术	192
5.4.1 长输管道的末段储气调峰	193
5.4.2 液化天然气调峰	197
参考文献	201

第6章 油气管道输送技术发展展望

6.1 多相混输技术	204
6.1.1 多相混输工艺技术难点	204
6.1.2 国内外研究现状	205
6.1.3 多相混输技术应用现状及前景	212
6.2 基于可靠性的油气管道介质流动安全	213
6.2.1 含蜡原油管道流动安全保障	213
6.2.2 天然气管道流动安全保障技术	218
6.3 现代物流管理方法在油气输送领域的应用	222
6.3.1 基于供应链的现代物流管理	222
6.3.2 现代物流管理方法应用	224
6.3.3 石油应急物流配送	226
6.4 管控一体化简介	226
6.5 油气管道节能环保新技术	229
6.5.1 天然气站场降噪技术	229
6.5.2 高凝原油储存技术	233
6.5.3 热管技术在冻土区域管道上的应用	236
参考文献	240

第7章 长距离油气管道输送案例

7.1 马惠宁原油管道	242
7.1.1 管道概况	242

7.1.2 输送工艺	243
7.2 西部原油管道	245
7.2.1 管道概况	245
7.2.2 相关技术	245
7.3 库鄯原油管道	249
7.3.1 管道概况	249
7.3.2 相关技术	249
7.4 漠大线原油管道	252
7.4.1 管道概况	252
7.4.2 冻土区域管道工程技术与措施	252
7.4.3 运行管理技术	254
7.5 兰成渝成品油管道	256
7.5.1 管道概况	256
7.5.2 相关技术	256
7.6 陕京输气管道	257
7.6.1 管道概况	257
7.6.2 管道输送特点	258
7.6.3 管道的社会效益	260
7.7 西气东输输气管道	260
7.7.1 管道概况	260
7.7.2 相关技术	261
7.7.3 管道的社会效益	264
参考文献	265

第 1 章 概 述

油气储运系统是连接油气生产、加工、分配、销售等环节的纽带，在国家经济建设中占有极其重要的地位。随着我国经济的快速发展，油气对外依存度不断提高，2011 年我国油气对外依存度超过 55%。为保证油气能源供应安全，油气储运设施建设进入新的大发展时期，使油气储运技术面临前所未有的机遇和挑战。本章概要介绍了我国油气管道工业的发展历程，概述了近年来我国油气管道行业取得的创新成果，分析了我国油气管道关键技术体系发展趋势与前景。

1.1 我国油气管道工业发展

1859 年，艾德温·德雷克 (Edwin Drake) 在美国宾夕法尼亚州西北部打成了世界上第一口油井，开启了近代石油工业的大门^[1]。作为动力资源，石油受到了各国的普遍重视。1878 年，台湾苗栗出磺坑打成亚洲第一口油井，开创了我国近代石油工业的历史。1942 年，新疆独山子油矿敷设了长 2.5km 输送管道，这是我国第一条原油管道。1945 年，因太平洋战争需要，美国人建成中印输油管道，全长约 3218km，这是我国境内第一条成品油管道，同时也是当时世界上最长的油品输送管道。新中国成立前，我国仅四川地区修建了少量钢质输气管道，全长约 27.7km。

新中国成立后，我国油气储运工业蹒跚起步。经过 60 年的发展，目前已在世界管道行业中占有一席之地，期间大致经历了自力更生（20 世纪 50 年代至 80 年代初期）、引进消化（20 世纪 80 年代中期至 90 年代末）、自主创新（21 世纪初至今）三个发展阶段。

1.1.1 自力更生，艰苦创业

新中国成立之初，百业待兴，西方对我国实施技术封锁。自力更生、艰苦创业成为当时我国社会与经济发展的唯一选择。东北、华北、西北、华东地区相继发现和开发了大型陆上油气田，石油工业迅速崛起，油气产量的大幅提升带动了管道行业的发展。

1958 年，建成克拉玛依—独山子原油管道，全长 147.2km，这是新中国第一条长距

离原油管道，由此开创了新中国长输管道建设的历史。随着大庆油田的开发，1970年，为解决大庆原油外输问题，开始建设东北“八三”管道。虽然当时面临着缺乏管道施工经验、缺乏技术人员、缺乏材料及施工设备等诸多不利因素，仍然于5年内完成8条高含蜡原油管道的建设和投产，形成了国内第一个原油管网，连接抚顺、锦州、大连各炼油厂以及秦皇岛油港、大连新港。这是中国管道行业发展史上的重要里程碑。截至1980年，我国累计建设原油管道6557km。

1958年，首都机场敷设储油库至用油库管道，此后又在上海和广州机场敷设成品油管道。1976年，建成投产格尔木—拉萨成品油管道，全长1080km，这是新中国第一条长距离成品油管道。截至1980年，我国累计建设成品油管道1114km。

1963年，开始修建巴渝输气管道，由此拉开新中国天然气管道建设的序幕。至1979年，形成南半环天然气管网。截至1980年，我国累计建设天然气管道2792km。

1975年，在上海陈山码头建成第一座 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 浮顶油罐。随后，在石化企业、油田、港口又相继建造数十座相同规格的浮顶油罐。

1.1.2 引进消化，提升水平

党的十一届三中全会以来，我国石油工业书写了改革发展的辉煌篇章。在改革开放方针的指引下，通过引进和吸收国外先进科学技术和理念，加强国内外技术人员的互访、交流与合作，我国油气管道建设和管理水平进入快速提升阶段。

1986年建成投产的东黄复线原油管道是我国第一条中外联合设计的管道工程，也是我国首次实现密闭输送和自动化管理的长输管道。1996年，库鄯原油管道投产，这是当时国内自动化程度最高的原油管道，也是我国首次选用高强度X65钢管，采用高压力、大站间距、常温输送的长输原油管道。截至2000年，我国累计建设原油管道7697km。

1995年，抚顺—鲅鱼圈成品油管道投产，全长246km。此后，又建成克拉玛依—乌鲁木齐成品油管道，全长291km。截至2000年，我国累计建设成品油管道2143km。

1987年，四川建成北半环管道，并与川渝地区原有的南半环管道相接，形成我国第一个区域性天然气管网。1997年，陕京输气管道投产，成为我国天然气管道追赶世界先进水平的起点。截至2000年，我国累计建设天然气管道8764km。

1986年，通过引进国外整套技术，在秦皇岛首次建造2座 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 浮顶油罐。

1.1.3 自主创新，跨越发展

进入21世纪以来，我国油气储运工业积极贯彻自主创新的发展战略，在管道设计、建设、运行、管理等领域取得了多项具有自主知识产权的核心成果，为推进我国管道事

业跨越式发展提供了技术保障。同时,随着自身技术水平的不断提高,我国管道工业立足国内,开拓海外,大力推进能源战略通道建设,大大提高了我国油气管道工业的国际影响力。

“十一五”期间,我国主要围绕进口哈萨克斯坦原油、俄罗斯原油、海上进口油和国内原油上产新建了大批管道。2005年,中哈原油管道建成投产,这是我国参与投资的首条跨国输油管道。2007年,西部原油管道建成投产,这是当时我国距离最长、压力最高、输量最大、自动化程度最高的原油管道之一。2010年,中俄原油管道建成投产,标志着中俄能源合作进入新阶段。截至“十一五”末,我国原油管道总里程已达 2.2×10^4 km。

2002年,兰成渝成品油管道建成投产,全长1250 km,这是我国第一条长距离、大口径、高压力、大落差、全线自动化管理的密闭顺序输送成品油管道。“十一五”期间,我国成品油管道得到了飞速发展。华北、长三角、东南沿海、沿江地区形成区域性成品油管网。兰成渝、兰郑长和西部管道共同组成我国“西油东送”的战略通道,实现西部资源与东部市场连接。截至“十一五”末,我国成品油管道总里程已达到 1.8×10^4 km,初步形成了区域性成品油管网。

2004年,建成投产西气东输管道,干线全长3900 km,管径1016 mm,采用X70钢,设计压力10 MPa,设计输量 170×10^8 m³/a,是当时我国距离最长、管径最大、管材等级最高、设计压力最高、输气能力最大、自动化程度最高的管道。该管道也是国内自行设计、建设的第一个世界级天然气输运系统工程,标志着我国油气管道工程建设水平跨入世界先进行列。2011年,西气东输二线干线建成投产,全长4800 km,全部采用X80钢,管径1219 mm,设计输量 300×10^8 m³/a,西段设计压力12 MPa。如此大规模采用X80钢,在世界管道行业尚属首次。截至“十一五”末,我国天然气管道总里程已达 4.5×10^4 km,初步形成横跨东西、纵贯南北、覆盖全国的天然气骨干管网。

在大型储罐建设方面,依靠自主研发,储罐板材、设备、施工工艺已经完全取代国外进口。2003年,我国开始在镇海、岙山、黄岛、大连4个沿海地区建设第一批战略石油储备基地,标志着我国大型储罐建设迎来了重要发展期。2004年,又在仪征油库建成2座 15×10^4 m³双浮盘储罐,这是国内首次建造 15×10^4 m³超大型外浮顶储罐,标志着我国在大型储罐建设方面已跻身国际先进行列。

1.2 科技创新引领管道行业技术进步

在经济全球化的今天,面对以科技创新能力决定成败的国际竞争格局,我国油气储运工业紧紧把握新技术革命的良好机遇,依靠几十年来培养的人才与形成的工业基础,通过引进消化吸收再创新、集成创新及原始创新,在工程建设、输送与储存、运行维

护、材料装备国产化等关键领域取得了重大技术突破，形成了多项具有自主知识产权的核心技术，加速推进了我国油气储运工业的现代化进程。

油气管道是一个技术密集型的行业，本书提出的油气管道技术体系包括工程建设、油气输送、油气储存、运行维护及材料装备国产化五大关键技术，如图 1.2.1 所示。

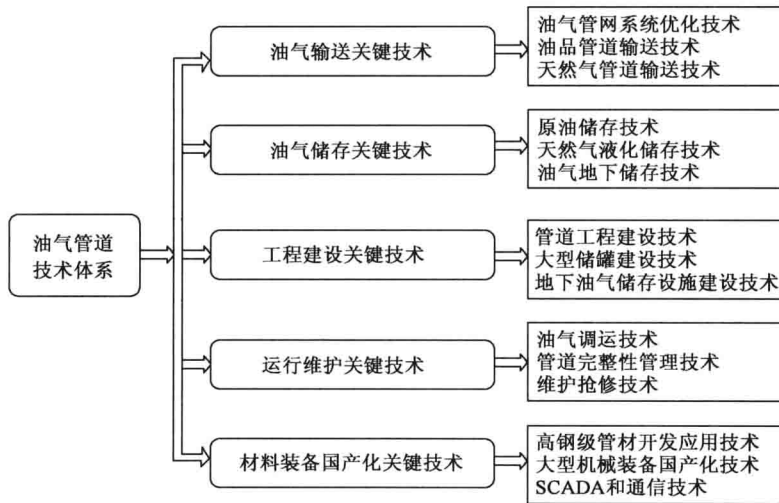


图 1.2.1 油气管道技术体系

油气输送关键技术保证油气介质的高效率输送，工程建设关键技术保证管道工程的高质量建设，运行维护关键技术保证油气管网的高水平运行，油气储存关键技术保证石油天然气储存能力，材料装备国产化关键技术保障材料装备的国产化水平。

1.2.1 工程建设关键技术

1.2.1.1 工程设计方面

在工程设计方面，建立了“标准化、模块化、信息化”管道综合设计平台，完成了从传统设计到数字化设计的转变。通过数字化设计管理平台的创新，实现了长输管道设计项目的全过程信息化管理，实现了设计和管理方式的变革。

卫星遥感技术已广泛应用于我国油气管道工程的勘察设计，取代基于地形图和人工踏勘作业的传统选线方法，提高选线、定线的工作质量与效率；基于应变管道设计方法应用于滑坡、矿山沉陷、冻土等其他不良地质条件地区的管道工程设计，建立基于应变的设计准则，编制基于应变的设计导则，能够解决管道通过强震区和活动断裂带可能产生大应变的技术难题；通过对比分析国内外储罐设计规范，提出选用“变设计点法”罐壁强度计算方法取代之前国际通用的“一英尺法”，提高材料利用率。

1.2.1.2 工程施工方面

在工程施工方面,自主研发 X80 管线钢焊接工艺及配套施工技术,首次应用低氢型根焊工艺,突破了 X80 钢管采用纤维素焊条根焊易诱发延迟裂纹的技术瓶颈,保障了管道的安全性和可靠性;自主研发了管道全位置自动焊技术及外焊机、内焊机、坡口机、对口机等大型施工机具,管道现场环焊缝焊接实现从手工焊、半自动焊到全位置自动焊技术的跨越式发展,以自动焊接技术为核心的管道机械化施工技术的广泛应用全面提升了施工效率与工程质量;掌握了 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 低温 LNG 储罐的设计技术,打破了国外少数几家公司垄断的局面;以顶管法、盾构法、定向钻法为代表的管道非开挖穿越技术,克服了传统大开挖穿越施工妨碍交通、破坏环境、安全性差等缺点,成为复杂地形地质条件下管道穿越工程的主要技术手段。目前,我国管道非开挖穿越技术处于国际领先水平。钱塘江管道穿越工程穿越长度 2308m,创造了当时定向钻穿越长度的世界纪录;西气东输黄河顶管工程创造了 1259m 单次顶管世界纪录;西气东输南京三江口盾构穿越破解了软硬交错地质穿越的世界性难题。针对山区、湿陷性黄土、沼泽、滩涂、水网等复杂地段的管道施工特点,创新性地提出了炮车运管、钢管轻轨牵引上山、沟下组焊等山地施工方法,以及浮筒运管、轻轨运管、桥上桥技术等水网施工方法,研制出配套施工机具,有效解决复杂地形地质条件下管道施工难题,为西气东输、涩宁兰、兰成渝、忠武等管道工程建设提供了技术保障。

1.2.2 油气输送关键技术

运用管网系统优化方法,对管网系统进行模拟和优化,确保了管网正确布置和站场合理设置;揭示了易凝高黏原油复杂组成与其流变性的内在联系及规律,形成了新一代易凝高黏原油输送技术体系;掌握了高压输气管道断裂控制技术,保证了管输介质安全高效输送。

1.2.2.1 管道密闭顺序输送技术

20 世纪 90 年代以后,我国长距离输油管道全部采用“泵到泵”密闭输送技术,解决了传统“罐到罐”或“旁接油罐”开式流程油气损耗大、上游剩余压能无法利用等问题,提高输油效率。随着成品油管网规模不断扩大,针对管网系统多油源、多分支、大分输、大注入的特点,开发了仿真模拟、运行优化、调度计划编制等应用软件和决策支持系统。综合应用密度测量法、超声波检测法等先进技术手段,实现混油界面跟踪与自动切割。针对我国地形复杂的特点,通过设置减压站、采用变径处理等方法,应用等强度设计与水击控制理论,有效解决大落差地段输油管道的建设与运行难题,成功保障了最大落差 2253m 的兰成渝成品油管道的安全平稳运行。

1.2.2.2 含蜡原油管道输送技术

我国所产原油大多为易凝高黏原油。此类原油含蜡量高，管道输送极为困难。经过近 20 年持续攻关，我国含蜡原油输送技术取得显著进步。系统认识易凝高黏原油宏观流变性与原油主要组分及微观结构的关系；创建原油宏观与微观结合的流变性综合表征体系；通过建立以黏性流动熵产为核心的管流模拟放大准则，解决了易凝高黏原油实验模拟结果无法直接应用于生产管道的世界性难题；研发出一整套降凝剂定制技术，可针对不同原油有效地改善其流动性，提高了管道运行的安全性与经济性；提出了基于可靠性的管道流动安全性评价方法。这些核心技术创新，促使原油管道加剂改性顺序输送、冷热油交替输送等多项关键技术取得重大突破，形成新一代易凝高黏原油管道输送技术体系，为西部管道、东北管网等原油管道的安全经济运行提供了科学指导，确立了我国含蜡原油管输技术的国际领先地位。

1.2.2.3 油品管道减阻增输技术

随着世界上能源需求的增长，原油及成品油管道输送量日益增加，利用化学减阻剂降低管道系统输送阻力、增大管道输量，可有效提高管道输送能力与效益。由于减阻剂生产工艺复杂，国际上只有少数公司掌握这项技术。2000 年，中国石油成功开发出 EP 系列油品减阻剂，填补了国内空白，并成功应用于国内外多条原油及成品油管道，取得了良好的经济和社会效益。

1.2.2.4 天然气输送技术

研究确立我国大口径长距离输气管道采用高压输送、选用高钢级管材的技术路线，形成了高压输气管道断裂控制技术。首创可靠性评价直缝和螺旋缝管联合使用，在攻克了弹性单分子成膜、自循环分散催化以及在线雾化注入技术的基础上，天然气减阻剂在室内合成与评价、中试放大和现场应用方面取得了重大突破。天然气减阻技术已在长庆油田、兰银线、沧淄线等输气管道上开展现场应用试验，使管道在运行压力不变的情况下输送能力提升 5%~10%。目前，我国高压输气管道断裂控制和管道天然气减阻剂研制技术处于世界领先水平。

1.2.2.5 工艺仿真优化技术

随着油气资源多元化以及储运系统规模不断扩大，利用计算机模拟技术开发配套工艺仿真平台，有助于作出及时、优化的油气调运决策。2010 年，中国石油自主研发的大型天然气管网仿真软件 RealPipe-Gas 正式发布，标志我国大型天然气管网仿真软件产品实现国产化，实现了对天然气管网系统调运方案的决策支持与优化，通过对下游用户用量逐年预测和用气波动分析，成功解决了单气源、多用户输气管道调峰技术难题。