

中国石油天然气集团公司管材研究所建所 20 周年学术报告会
全国第一届石油管力学和环境行为学术研讨会

石油管工程应用基础研究论文集

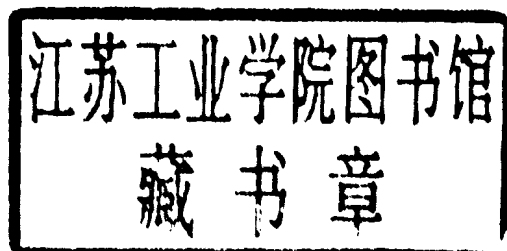
中国 石 油 天 然 气 集 团 公 司 管 材 研 究 所 编
中国 石 油 天 然 气 集 团 公 司 石 油 管 力 学 和 环 境 行 为 重 点 实 验 室

石 油 工 业 出 版 社

中国石油天然气集团公司管材研究所建所 20 周年学术报告会
全国第一届石油管力学和环境行为学术研讨会

石油管工程应用基础研究论文集

中国 石 油 天 然 气 集 团 公 司 管 材 研 究 所
中国 石 油 天 然 气 集 团 公 司 石 油 管 力 学 和 环 境 行 为 重 点 实 验 室 编



石 油 工 业 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

石油管工程应用基础研究论文集/中国石油天然气集团公司管材研究所, 中国石油天然气集团公司石油管力学和环境行为重点实验室编.

北京: 石油工业出版社, 2001.9

ISBN 7 - 5021 - 3474 - 3

I. 石…

II. 中…

III. 石油管道-材料科学-文集

IV. TE973 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 051270 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)
北京密云红光印刷厂排版
石油工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 32.5 印张 832 千字 印 1—2000
2001 年 9 月北京第 1 版 2001 年 9 月北京第 1 次印刷
ISBN 7 - 5021 - 3474 - 3/TE·2576
定价: 88.00 元

The 1st National Symposium of Tubular Goods Mechanical
and Environmental Behavior Research
The Technical Seminar on the 20 Years Anniversary of
Tubular Goods Research Center of CNPC

Tubular Goods Engineering Application Research Symposium

The Key Laboratory for Mechanical and Environmental Behavior of
Tubular Goods, CNPC
Tubular Goods Research Center

Petroleum Industry Press

序

石油工业是大量使用石油管的工业。石油管在石油工业中的重要地位表现在：用量大、花钱多，节约开支、降低成本的潜力巨大；石油管的力学和环境行为对石油工业采用先进工艺和增产增收有重要影响；石油管的安全可靠性和使用寿命对石油工业关系重大。

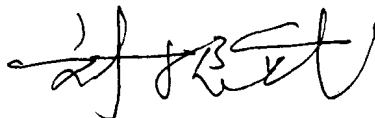
中国石油天然气集团公司管材研究所建所以来，一直坚持研究解决石油管应用方面的一些深层次问题，包括石油管的服役行为及失效机理。经过 20 年的实践，逐步形成了石油管的力学行为、石油管的环境行为、石油管的失效诊断及预测预防三个石油管应用基础研究领域，并形成了有机整体，概括为“石油管工程”。

“石油管工程”致力于研究不同服役条件下石油管的失效规律、机理及克服失效的途径。它把相应学科的理论成果和最新技术运用于石油管的服役过程（即石油工业的钻井工程、采油工程和储运工程），最大限度地保障石油管使用中的安全性和寿命，并尽可能降低成本。

设立在管材研究所的集团公司石油管力学和环境行为重点实验室研究的三个方向与“石油管工程”的技术领域是完全相同的。在石油管力学行为方面，着重研究钻柱振动和疲劳，管柱稳定性，套管挤毁，管柱的结构完整性和密封完整性，油气输送管的断裂、疲劳与止裂；在石油管环境行为方面，着重研究井下高温、高压环境中的 CO_2 腐蚀机理和规律， H_2S 应力腐蚀和氢致开裂，炼化工艺流程中的腐蚀行为等；在石油管的失效诊断、监测及预测预防方面，着重研究失效诊断与监测技术，适用性评价（安全评价、寿命预测）和风险分析、评估与风险管理技术等。

本文集收集了石油管力学和环境行为重点实验室部分未发表的研究论文，包括输送管与管线力学、油井管与管柱力学、腐蚀与防护、失效分析预测及预防等方面。这些论文是作者们围绕我国石油工业的一些重大工程（如西气东输工程）所遇到的关键和难点问题开展研究的结果，从一个侧面反映了实验室近期所取得的成果，内容相当丰富。它适用于从事石油工程，如储运工程、钻井工程、炼化工程、材料工程等方面的工程技术人员、研究人员和管理人员参考。希望各方面的读者都继续关心和支持实验室的工作。祝愿石油管力学和环境行为重点实验室取得更大的进步，为石油石化工业做出更大的贡献。

中油集团公司科技发展部主任



2001 年 8 月 6 日

前 言

中国石油天然气集团公司石油管力学和环境行为重点实验室成立于 1999 年 12 月 6 日，是集团公司所属 10 个重点实验室之一，是集团公司石油管工程的科技创新基地。主实验室依托石油管材研究所，下设三个研究室；另有三个重点研究室分别挂靠在石油大学（北京）、西南石油学院及四川石油管理局。

实验室按照“开放、流动、联合、竞争”的运行管理机制，围绕石油管的力学行为、石油管的环境行为和石油管失效诊断及预测预防等几个方面开展研究工作。近期研究重点包括：（1）我国西部油田深井、超深井开发过程中的钻柱和油、套管柱的力学行为研究，油田套管损坏机理及预防措施研究；（2）我国西气东输工程大口径、高性能输气钢管国产化技术及高压输气管线的断裂控制技术；（3）油井管和油气输送管的腐蚀与防护技术；（4）在役管线、储油罐、压力容器的安全和风险评估方法。

石油管力学和环境行为重点实验室自正式挂牌成立以来，在石油管的力学行为、石油管的环境行为和石油管失效诊断及预测预防三个方面均取得了较大的进展。除了主实验室的三个研究室外，挂靠在石油大学（北京）、西南石油学院和四川石油管理局的三个重点研究室也逐渐迈入正常运行阶段并取得了较好的阶段成果。

实验室在研项目包括国家“863”和“973”项目、国家自然科学基金项目、国家经贸委项目、集团公司各种项目等十余项。2000 年验收或鉴定项目 5 项，申报专利 4 项，研制软件 6 套，发表论文 60 余篇。今年以来，实验室各项工作又取得了较大进展。实验室正逐步成为石油管力学和环境行为的技术创新基地、人才培养基地和该领域学术交流基地，并力争在提高石油管服役的安全可靠性，延长使用寿命，最大限度地避免或减少失效事故，提高中国石油天然气集团公司的整体效益方面取得更大的成就。

本论文集收集了实验室近期末发表的相关研究论文，包括输送管与管线力学、油井管与管柱力学、腐蚀与防护、失效分析预测及预防等方面，反映了实验室的最新研究成果，希望对从事相关工作的工程技术人员、研究人员和管理人员有所帮助。在集团公司管材研究所成立 20 周年之际，我们召开全国第一届石油管力学和环境行为学术研讨会并出版本论文集，以表祝贺，愿集团公司管材研究所和石油管力学和环境行为重点实验室得到更大的发展，取得更大更多的成果，为石油石化工业做出更大的贡献。

由于我们水平有限，经验不足，加之时间仓促，错误和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2001 年 8 月

编辑委员会

名誉主任：师昌绪

主任：李鹤林

副主任：柯伟 钟群鹏 高金吉 黄志潜 潘家华

委员：(以姓氏笔划为序)

王伟平	王茂堂	邓金根	冯耀荣	孙振纯	吴奇
杜建荣	李平全	李海元	沈宗约	陈琳	林远华
金忠臣	赵国珍	施太和	徐可为	郭兴蓬	高惠临
高德利	曾时田	董培基	路民旭		

编辑组

组长：冯耀荣

副组长：张平生 秦长毅

成员：高蓉 王瑞俊 王新虎 张国正 林凯
李鹏亮

责任编辑：李武斌 申若霞 蔡运权 郎杰 刘乃林

特约编辑：孔秀兰 张玉琪

目 录

输送管与管线力学

天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题	李鹤林 (3)
国外油气输送管道用螺旋缝埋弧焊管制造技术的发展	黄志潜 (20)
油气输送管线钢管的选材问题	李平全 (28)
天然气输送管线钢管性能要求与质量控制及管材选用 探讨	冯耀荣 霍春勇 李鹤林 (38)
高压天然气管线和高钢级管线钢	霍春勇 马秋荣 冯耀荣等 (53)
输气管线延性断裂与止裂的研究进展	霍春勇 马秋荣 庄传晶等 (67)
低碳、超低碳微合金化管线钢的显微组织	柴惠芬 李鹤林 冯耀荣等 (77)
关于管线钢中的针状铁素体	高惠临 冯耀荣 霍春勇等 (86)
关于西气东输管线钢管技术条件的几个问题	霍春勇 马秋荣 冯耀荣等 (96)
螺旋缝埋弧焊管与直缝埋弧焊管对比评价	吉玲康 冯耀荣 李鹤林 (107)
X65 管线钢的动态断裂研究	冯耀荣 柳永宁 宋小龙等 (129)
高压输气管道止裂韧性与止裂判据研究	庄传晶 霍春勇 冯耀荣等 (136)
输气管线裂纹扩展试验研究	马秋荣 霍春勇 冯耀荣 (143)
螺旋缝埋弧焊管残余应力的测试与控制	熊庆人 冯耀荣 霍春勇 (153)
金属材料的均匀变形容量与变形硬化指数和屈强比 的关系	朱维斗 李 年 冯耀荣等 (161)
屈强比对管线钢裂纹起始扩展阻力 J_I 的影响	杜百平 马宝钊 冯耀荣等 (167)
X60 螺旋缝埋弧焊管全尺寸疲劳试验研究	庄传晶 霍春勇 冯耀荣等 (174)
感应加热弯管的生产技术现状与发展	刘迎来 李平全 (181)

油井管与管柱力学

一口超深井 177.8mm HC140 钢级生产套管的选择 与设计	韩 勇 林 凯 史交齐等 (189)
套管缺陷对抗挤强度的影响及高抗挤套管抗挤强度的计算 方法	韩建增 施太和 (200)
不均匀载荷对套管抗挤毁性能影响的有限元研究	高智海 (209)
套管荷载分析与强度设计研究	高德利 覃成锦 徐秉业 (215)
油、套管柱密封可靠性分析	林 凯 史交齐 韩 勇等 (224)
稠油热采井套管热应力场分析	练章华 施太和 王兆会等 (229)
稠油热采井套管温度场模拟	练章华 施太和 王兆会等 (236)

漂浮下套管技术在渤海大位移井钻井中的应用

研究	付建红	贺志刚	施太和等	(243)
钻柱旋转台肩接头的理论强度	王新虎			(250)
一种新型钻具连接螺纹减应力区的研究	石晓兵	施太和		(256)
钻柱螺纹接头力学性能研究	林元华	施太和		(264)
高效防斜钻具组合的力学分析	高德利	刘福江		(271)
油气井管柱屈曲行为的研究进展	高德利	刘凤梧	徐秉业	(277)
直井管柱后屈曲轴向力分析	高宝奎	高德利		(287)
油气井管柱变形模拟实验与分析	高德利	高宝奎		(292)

腐蚀与防护

油气采集储运过程中腐蚀现状及典型案例	路民旭	白真权	赵新伟等	(299)
X52 钢的 CO ₂ 腐蚀行为	赵国仙	陈长风	严密林等	(312)
N80 钢 CO ₂ 腐蚀产物膜研究	陈长风	赵国仙	严密林等	(316)
CO ₂ 腐蚀产物膜及膜中宏观微观通道的形成	赵国仙	陈长风	路民旭等	(323)
含 Cr N80 油套管钢 CO ₂ 腐蚀产物膜特征	陈长风	赵国仙	严密林等	(329)
深井油管 CO ₂ 腐蚀规律及其应用研究	白真权	路民旭	赵国仙等	(335)
N80 油管钢 CO ₂ 腐蚀点蚀研究	陈长风	路民旭	赵国仙等	(341)
硫醇基硫代磷酸辛酯的合成及其缓蚀性能研究	张玉芳	路民旭	白真权等	(348)
大庆油田龙 112-06 井 J55 油管外壁腐蚀机理研究	严密林	赵国仙	白真权	(353)
一种新型抗环烷酸腐蚀缓蚀剂的缓蚀成膜行为研究	张玉芳	路民旭	朱雅红等	(362)
某井 N80 偏梯形螺纹油管腐蚀原因分析	吕拴录	张国正	赵国仙等	(367)
16Mn 管线钢在含 H ₂ S 环境中的氢致开裂和应力腐蚀试验研究	李鹏亮	白真权	路民旭	(374)
TG100 油井缓蚀剂的合成及其缓蚀行为评价研究	张玉芳	路民旭	李爱兰	(383)

失效分析预测及预防

加强应用基础研究, 提高石油管材及装备失效分析预测

预防水平	李鹤林	张平生	冯耀荣	(397)
压力容器与管道主要失效模式和典型失效案例	张平生			(403)
某天然气管线输气站爆炸事故分析	解仲英	张平生	李鹤林等	(414)
某输气管线用 UOE 管破裂失效分析	帅亚民	韩晓毅	张平生	(424)
某天然气管线弯管开裂原因分析及对策	刘迎来	李金凤	张平生	(432)
V150 套管破裂原因及超深井套管选材探讨	张国正	张平生	冯耀荣	(440)
某热电厂 3 号机组低压缸止逆阀铰制孔螺栓断裂失效分析	张国正	张平生	冯耀荣	(449)

摩擦热效应引起的钻井装备失效	韩晓毅 张平生 李金凤 (459)
钻杆适用性评价及其软件	张平生 韩晓毅 罗卫国等 (463)
管道适用性评价及软件研究进展	罗金恒 赵新伟 路民旭 (475)
输气管道失效案例数据库	黄义荣 陈秀梅 (483)
损伤管道剩余寿命的强度储备比模型研究	张 鹏 (486)
某输气管线剩余寿命预测	陈宏达 朱春鸣 赵新伟等 (491)
西气东输管线的风险预评价	庄传晶 霍春勇 冯耀荣等 (498)

Contents

Hot Topics in Study and Application of Steel Line Pipe for Natural Gas Transportation	Li Helin (3)
Development of Manufacturing Technology for Spiral Submerged Arc Welded Line Pipes in Foreign Countries	Huang Zhiqian (20)
On Steel Pipe Selection for Oil and Gas Pipelines	Li Pingquan (28)
Technical Requirements and Quality Control of Gas Transmitting Pipeline & Pipe and Material Selection	Feng Yaorong, Huo Chungyong <i>et al.</i> (38)
High-pressure Gas Pipeline and Pipeline Steel	Huo Chunyong, Ma Qiurong <i>et al.</i> (53)
Review of Research on Ductile Fracture and Arrest of Pipeline	Huo Chunyong, Ma Qiurong <i>et al.</i> (67)
On the Microstructure of Low-carbon and Ultralow-carbon Miroalloyed Pipeline Steels	Chai Huifen, Li Helin <i>et al.</i> (77)
On Acicular Ferrite of Pipeline Steels	Gao Huilin, Feng Yaorong <i>et al.</i> (86)
Some Aspects on Technical Requirements of West-east Gas Transmission Pipeline	Huo Chunyong, Ma Qiurong <i>et al.</i> (96)
Comparison and Assessment on SSAW and LSAW Linepipe	Ji Linggang, Feng Yaorong <i>et al.</i> (107)
Study on Dynamic Fracture of X65 Pipeline Steel	Feng Yaorong, Liu Yongning <i>et al.</i> (129)
Crack Arrest Toughness and Arrest Criterion of Gas Pipeline	Zhuang Chuanjing, Huo Chunyong <i>et al.</i> (136)
Test and Research on Fracture Propagation in Gas Pipeline	Ma Qiurong, Huo Chunyong <i>et al.</i> (143)
Measurement and Control of Residual Stress in Spiral Sub-merged Arc Welding Pipe	Xiong Qingren, Feng Yaorong <i>et al.</i> (153)
Relationship Between Homogeneous Plastic Deformation Capacity, Strain Hardening Coefficient and Ratio of Yield to Ultimate Strength of Metallic Materials	Zhu Weidou, Li Nian <i>et al.</i> (161)
Influence of the Ratio of Yield Stress to Ultimate Strength on Crack Initiation Resistance J_1 for Pipeline Steels	Du Baiping, Ma Baodian <i>et al.</i> (167)
Full Scale Fatigue Test on Grade X60 SSAW Linepipe	Zhuang Chuanjing, Huo Chunyong <i>et al.</i> (174)
State and Development of Induction Bends Manufacturing Technology	Liu Yinglai and Li Pingquan (181)
177.8mm HC140 Grade Productive Casing Selection and Casing String Design of One	

Ultra-deep Well	Han Yong, Lin Kai <i>et al.</i>	(189)
Influence of Casing Imperfections on Collapse Pressure and Calculation for High Collapse Casing	Han Jianzeng and Shi Taihe	(200)
FEM Research on Effect of Nonuniform Loading on Casing Collapse Strength	Gao Zhihai	(209)
Load Analysis and Strength Design of Casing String ...	Gao Deli, Tan Chengjin <i>et al.</i>	(215)
Analysis of Tubing and Casing String Seal Reliability	Lin Kai, Shi Jiaoqi <i>et al.</i>	(224)
Analysis of Thermal Stress Field on Heavy-oil Recovery Well	Lian Zhanghua, Shi Taihe <i>et al.</i>	(229)
Temperature-field Simulation of Casing in Heavy-oil Recovery	Lian Zhanghua, Shi Taihe <i>et al.</i>	(236)
Applications of Buoyancy-assisted Casing Running into Hole in Extend-reach Well	Fu Jianhong, He Zhigang <i>et al.</i>	(243)
Theoretic Strength of Rotary-shouldered Connection of Drill String	Wang Xinhui	(250)
Research on a New Stress Relief Groove of Drilling Tool Threaded Connection	Shi Xiaobing and Shi Taihe	(256)
Research on the Mechanical Property of the Drill String Connection	Lin Yuanhua and Shi Taihe	(264)
BHA Analysis for Hole Deviation Control under Higher Rate of Penetration	Gao Deli and Liu Fujiang	(271)
Progress in Research on Buckling Behavior of Pipes in Oil and Gas Wells	Gao Deli, Liu Fengwu <i>et al.</i>	(277)
Post Buckling Analysis of Strings in Vertical Wells	Gao Baokui and Gao Deli	(287)
Experimental Analysis of Post Buckling Behavior of Pipes in Vertical Wells	Gao Deli and Gao Baokui	(292)
Actuality and Typical Cases for Corrosion in the Process of Extraction, Gathering, Storage and Transmission for Oil and Gas	Lu Minxu, Bai Zhenquan <i>et al.</i>	(299)
CO ₂ Corrosion Behavior of X52	Zhao Guoxian, Chen Changfeng <i>et al.</i>	(312)
Study of CO ₂ Corrosion Scale of N80 Steel	Chen Changfeng, Zhao Guoxian <i>et al.</i>	(316)
Forming of CO ₂ Corrosion Product Scale and Channels inside the Scale	Zhao Guoxian, Chen Changfeng <i>et al.</i>	(323)
Characteristics of CO ₂ Corrosion Scales on Cr-contained N80 Steel	Chen Changfeng, Zhao Guoxian <i>et al.</i>	(329)
Study of CO ₂ Corrosion Characteristics and Its Application of Tubing in Deep and Ultra-deep Wells	Bai zhenquan, Lu Minxu <i>et al.</i>	(335)
Study of CO ₂ Pitting Corrosion of N80 Steel	Chen Changfeng, Lu Minxu <i>et al.</i>	(341)
Synthesis and Inhibitory Property of Thio-Phosphate	Zhang Yufang, Lu Minxu <i>et al.</i>	(348)
Outside Corrosion Mechanism of a J55 Well Casing in Daqing Oilfield		

.....	Yan Milin, Zhao Guoxian <i>et al.</i>	(353)
Study on the Inhibition Behavior of a New Naphthenic Acid Corrosion Inhibitor on Metal Surface	Zhang Yufang, Lu Minxu <i>et al.</i>	(362)
Analysis on Causes of N80 BTC Tubing Corrosion in a Well	Lü Shuanlu, Zhang Guozheng <i>et al.</i>	(367)
Study on Hydrogen Induced Cracking and Sulfide Stress Corrosion Cracking for 16Mn Pipeline Steel	Li Pengliang, Bai Zhenquan <i>et al.</i>	(374)
Research of Synthesize and Inhibiting Performance about TG100 Corrosion Inhibitor	Zhang Yufang, Lu Minxu <i>et al.</i>	(383)
Strengthening the Basic Research of Application, Enhance the Level of Failure Analysis & Prediction and Prevention	Li Helin, Zhang Pingsheng <i>et al.</i>	(397)
Main Failure Modes of Pressure Vessel and Pipeline with Brief Introduction of Typical Failure Cases	Zhang Pingsheng	(403)
Investigation of an Explosion Accident in a Gas Infusion Station	Xie Zhongying, Zhang Pingsheng <i>et al.</i>	(414)
Failure Analysis of UOE Pipe of Gas Pipeline	Shuai Yamin, Han Xiaoyi <i>et al.</i>	(424)
Study on Cracking and Its Prevention of Bend Pipe for a Certain Natural Gas Pipeline	Liu Yinglai, Li Jinfeng <i>et al.</i>	(432)
Breaking Reasons of V150 Grade Casing and Discuss on Material Selection of Superdeep Well	Zhang Guozheng, Zhang Pingsheng <i>et al.</i>	(440)
Failure Analysis of a Reamer Bolt Used on a Steamer Electrical Equipment	Zhang Guozheng, Zhang Pingsheng <i>et al.</i>	(449)
Failure of the Drilling Equipment Induced by Friction Thermal Affection	Han Xiaoyi, Zhang Pingsheng <i>et al.</i>	(459)
Fitness-for-service Assessment & Software for Drill Pipe	Zhang Pingsheng, Han Xiaoyi <i>et al.</i>	(463)
Fitness-for-service Assessment of Pipeline and Research Development of Assessment Software	Luo Jinheng, Zhao Xinwei <i>et al.</i>	(475)
Failure Cases Database of Natural Gas Pipelines	Huang Yirong and Chen Xiumei	(483)
Study on Strength Reserve Ratio Model for Remaining Life of Damage Line Pipe	Zhang Peng	(486)
Remaining Life Prediction of a Gas Pipeline	Chen Hongda, Zhu Chunming <i>et al.</i>	(491)
Risk Pre-assessment of West-east Gas Pipeline	Zhuang Chuanjing, Huo Chunyong <i>et al.</i>	(498)

输送管与管线力学

天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题

李鹤林

中国石油天然气集团公司管材研究所

中国石油天然气集团公司石油管力学和环境行为重点实验室

摘 要 全面阐述了天然气输送钢管研究与应用中的热点问题, 包括: 高压输送与高钢级管线钢的研究开发; 抗 HIC 管线管及其技术条件; 富气输送及其对钢管的性能要求; 直缝埋弧焊管和螺旋缝埋弧焊管的比较与选择; 输气钢管延性断裂的止裂; 管线在近中性 pH 土壤环境中的应力腐蚀开裂; 管线管的残余应力及控制; 高强度管线钢的屈强比问题; 在役管道的适用性评价及风险管理等。针对我国“西气东输”和跨国天然气管道建设, 提出了我国干线输气管道应逐步采用高压输送和富气输送, 继续坚持油气输送干线用钢管以国产螺旋焊管为主的技术路线(一、二类地区采用国产螺旋焊管, 三、四类地区采用直缝埋弧焊管), 对螺旋焊管生产线进行技术改造, 有限度配套发展用于油气输送的直缝埋弧焊管, 积极开展高钢级和抗 HIC 管线管的研究开发, 积极研究和制订“西气东输”螺旋缝埋弧焊管和直缝埋弧焊管技术条件, 加强管线的断裂、疲劳和止裂研究, 组织开展近中性 pH 土壤环境中的应力腐蚀开裂研究, 加强在役管道的适用性评价及风险管理等建议。

关键词 高压输送 管线 管线管 富气输送 延性断裂与止裂 应力腐蚀 残余应力 屈强比 适用性评价 风险管理

近年来, 作者及其同事先后赴日本、德国、美国、俄罗斯、加拿大、阿根廷考察了天然气输送钢管的科研、生产和使用情况。同时, 石油管材研究所在管线管方面的一批科研项目(包括国家 973 项目及中国石油天然气集团公司“九五”应用基础研究项目、99'滚动项目和中青年创新基金项目等)都有了不同程度的进展, 有的已经完成。本文综合了对国外情况的考察和石油管材研究所近期科研成果, 讨论了当前天然气输送管研究与应用中的几个热点问题。

1 高压输送与高钢级管线钢的研究开发

目前, 国外天然气高压输送采用高钢级钢管呈强劲的发展趋势。图 1 所示为 1870—1998 年国外天然气输送压力变化情况。国外新建天然气管道的设计工作压力都在 10 MPa 以上。表 1 所示为国外建成的部分高压输送管道。

随着输气管道输送压力的不断提高, 输送钢管也相应地迅速向高钢级发展。20 世纪 60 年代一般采用 X52 钢级, 20 世纪 70 年代普遍采用 X60~X65 钢级, 近年来以 X70 为主,

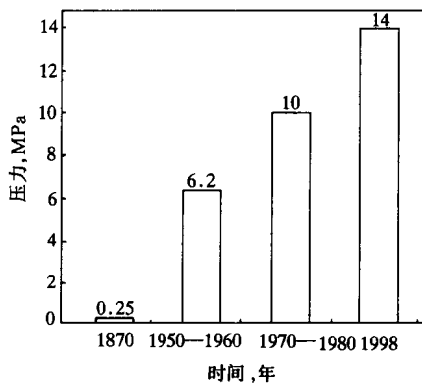


图 1 天然气输送压力的变化情况

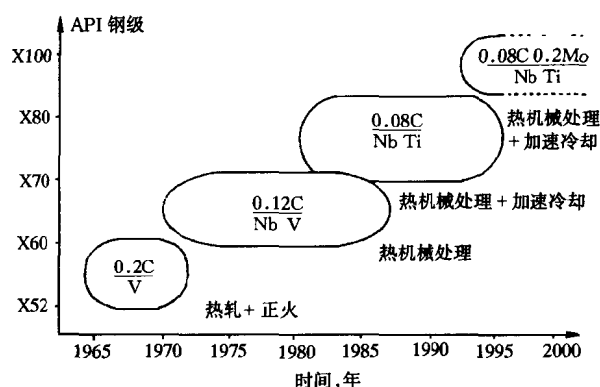


图2 管线钢的发展过程

也相继研制成功了 X80 和 X100 UOE 钢管，正在研制 X120 钢管。图 2 所示为欧洲钢管公司管线钢的发展过程。表 2 为全球已建成的几条 X80 输气管道。

表 1 国外部分高压输送管道

管道名称	位 置	运行压力, MPa	输送介质
Zeepipe	挪威—比利时	15.70	天然气
Sable Island	加拿大	15.30	天然气
Souris Valley	美国—加拿大	15.00	CO ₂
FLAGS	苏格兰	14.01	天然气
Ruhr gas	德国	10.34	天然气
Iroquois	加拿大—美国	9.92	天然气
Alliance	加拿大—美国	12.00	天然气

表 2 全球已建成的 X80 输气管道

年份	位置	名称	长度 km	管厂	直径 mm	壁厚 mm	返修率
1985	德国	Megal II	3.2	Mnsmn	1118	13.6	—
1986	斯洛伐克	第 4 输气管道	1.5	Mnsmn	1422	15.6	—
1990	加拿大	Nova Express East	2.6	NKK	1219	10.6	—
1992	德国	Ruhr Gas Project	250	Europipe	1219	18.4	3%
1994	加拿大	Nova Matzhiwian	54	IPSCO	1219	12.0	6%
1995	加拿大	East Alberta System	33	IPSCO	1219	12.0	—
1997	加拿大	Central Alberta System	91	IPSCO	1219	12.0	—
1997	加拿大	East Alberta System	27	IPSCO	1219	12.0	—

高压输送和采用高钢级钢管使管道建设的成本大大降低。管道建成后，管道运营的经济效益更加良好。加拿大的统计分析表明，每提高一个钢级可减少建设成本 7%。图 3 所示为管线建设采用不同钢级钢管的成本变化率。

为保障管线的安全可靠性，在提高强度的同时，必须相应地提高韧性。特别是高压输气用钢管，必须有很高的夏比冲击韧性（CVN）。高性能管线钢的设计思想如图 4 所示。可以看出，随着钢级的提高，管线钢的组织也呈现不同形态。在成分设计上，大体上都是低碳（超低碳）的 Mn—Nb—Ti 系或 Mn—Nb—V（Ti）系，有的还加入 Mo、Ni、Cu 等元素。

X80 也已开始使用。欧洲钢管公司 1997—1999 年 7 月的供货记录表明，用于天然气（甜气）输送的焊管，85% 是 X70 钢级。NKK 1997 年的供货记录表明，用于天然气（甜气）输送的 UOE 焊管，80% 为 X70 钢级。加拿大 IPSCO 钢铁公司在 1998 年年报中明确指出，该公司已成功地进行了 X90 和 X100 螺旋焊管钢管试生产，目标是生产各种规格的 X100 钢管。日本 NKK、住友金属、新日铁、川崎制铁及欧洲钢管公司