

董绍华
◎ 著

管道完整性评估理论与应用

Pipeline
Integrity
Assessment
Theory and
Application

石油工业出版社

管道完整性评估理论与应用

董绍华 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从分析国内外近年典型事故案例出发,在简述管道完整性评估技术重要性的基础上,阐述了管道完整性评估理论体系,集成了国内外先进的管道完整性评估技术、方法,梳理了管道完整性检测技术、方法和标准。重点介绍了管道完整性评估技术、检测技术、腐蚀评估技术及安全评估技术。本书还针对管道完整性评价的前沿技术,提出了基于物联网的完整性评价技术和管道四维管理技术,阐述了基于地理信息系统的开发平台技术、高钢级大口径管道气体爆破试验评估技术及城市燃气管道的完整性评价方法。

本书可作为油气管道设计与管理人员研究和学习用书,也可作为油气管道运行、维护管理人员的培训教材,同时也是石油高校油气储运专业本科生、研究生教学用书和广大石油科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

管道完整性评估理论与应用 / 董绍华 著.
北京:石油工业出版社,2014.5

ISBN 978-7-5021-9984-5

I. 管…
II. 董…
III. 油气运输—管道工程—完整性
IV. TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 018498 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:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523538 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

2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:35.25

字数:898 千字

定价:175.00 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

我国石油天然气管道总数量达到 $10.6 \times 10^4 \text{ km}$, 到 2020 年全国油气管网里程将达到 $20 \times 10^4 \text{ km}$, 基本实现全国骨干线联网。管道运输对国民经济发展起着非常重要的作用, 被誉为国民经济的动脉, 油气管道的安全问题已成为社会公众、政府和企业关注的焦点, 因此对管道的运营者来说, 管道运行管理的核心是“安全和经济”。

据不完全统计分析表明, 1987—2006 年, 美国天然气管道共发生 1137 起事故, 平均年事故率为 0.12×10^{-3} 次 /km。全球管道管理者于 1988 年开始建立和使用 HSE 管理体系, 并不断地深化安全管理模式, 到 20 世纪 90 年代末, 管道完整性管理技术得到进一步发展, 国际上一些大的管道公司提出制定和实施管道完整性管理的要求, 发达国家的政府和议会也制定和出台了一系列的标准规范和法律法规, 如美国国会于 2002 年 11 月通过了 H.R.3609 号《关于增进管道安全性的法案》, 逐渐形成了一套较为系统的管道完整性管理技术, 并使管道安全管理提高到基于可靠性、预测性为中心的完整性管理模式, 涵盖管道数据技术、检测技术、评价技术、信息技术、维护维修技术为一体的预防性管理模式。

该书作者深入剖析了油气管道途经区域的地质、环境、应力因素, 有针对性地建立了管道完整性评估理论, 并将理论应用到实践中, 解决了生产实践中多项技术难题。

该书研究内容具有较强的创新性和实用性, 特别是注重管道完整性技术的应用, 如在役管道内涂层的评估, 天然气粉尘腐蚀机理和抑制技术, 含硫化氢管道完整性评价及应力腐蚀开裂 (SCC) 敏感性评估等均在国内外首次开展, 针对管道完整性评价技术平台的应用, 开发了四维 (4D) 地理信息系统, 将在役管道完整性评价技术前移到管道建设期实施, 具有一定的前瞻性和开拓性。

该书系统地阐述了管道完整性评估技术在管道工业中的应用, 旨在解决管道完整性评估理论与生产实践脱节的问题, 重点开展了管道内涂层评估、管道直接评估、氢致开裂评估、管道适用性评估、腐蚀评估等多方面的研究工作, 已建立了管道氢致开裂、焊缝、平面型缺陷、体积型缺陷、管道不同损伤状况的评估理论方法, 以及多种在线、离线管道检测技术和方法, 并能够将其迅速应用到现场, 形成生产力。

该书作者董绍华博士热爱石油管道事业, 学风严谨。他具有近 20 年石油管道企业的实

践经验，长期致力于中国管道技术与管理的国际化。我相信，该书的出版将对国内管道行业完整性管理深化、完整性评估技术的推广应用发挥重要作用。

中国工程院院士



2013 年 12 月

前言

伴随着中国经济的快速腾飞和石油工业的蓬勃发展,截至2012年12月,中国油气骨干管道里程已突破 $10.6 \times 10^4 \text{ km}$,管道运输已成为继公路、铁路、水运和航空之后第五大交通运输方式,承担着我国70%的原油和99%的天然气运输。

管道途经地域广阔,地质条件多样,人文地理环境复杂,管理的难度加大,当前世界管道各大公司主要采取管道完整性管理的管控模式,这是一项基于风险管理的科学管控模式,管道完整性管理是指通过对管道运营管理中存在的风险因素进行识别和评价,制定相应的风险控制对策,不断改善识别到的不利影响因素,从而将管道运营的风险水平控制在合理的、可接受的范围内,达到减少管道事故发生,经济合理地保证管道安全运行的目的。内容涉及管道设计、施工、运行、监控、维修、更换、质量控制和通信系统等全过程,并贯穿管道整个运行期,基本思路是利用全部有利因素来改进管道安全性,并通过信息技术支持,不断完善管道数据。

2001年管道完整性自美国引进到中国油气管道行业,标志着中国管道的管理水平与国际先进管道技术开始接轨,经过十多年的发展,管道运营商对管道风险的掌控能力已大幅提高,管道内检测已超过 $3 \times 10^4 \text{ km}$,有些管道已进入第二次内检测评估,管道完整性管理的理念、方法和技术得到大范围推广和应用,管道事故率逐年下降。尽管如此,与发达国家相比,我国油气管道安全性依然有一定的差距,有数据显示,我国油气管道平均年事故率为 2.5×10^{-3} 次/km,远高于美国的 0.5×10^{-3} 次/km和欧洲的 0.25×10^{-3} 次/km。

管道完整性管理技术涉及PDCA六步循环,包括数据收集、高后果区识别、风险评价、完整性评价、修复与处理、效能评价技术,其中完整性评价是管道完整性管理技术的核心,当前存在的主要问题是通过完整性评价技术量化管道的安全性,如何有效地发现管道不可接受的缺陷,同时对这些缺陷进行适用性评价,包括定量评价管道中所检测到的几何、金属损失缺陷,依据严格的理论分析判定缺陷对安全可靠性的影响,提前对管道的强度进行监测、评估、剩余寿命预测,对缺陷的形成、扩展后果、未来趋势及管道的失效过程做出科学合理的判断,指导维修,节约不必要的维修费用,并对需要及时修复的缺陷点进行及时处理,预防事故的发生。因此,如何采取有效的完整性评估手段,保证管道在现有条件或升级情况下的安全、平稳、经济地运行,这是管道管理者面临的重要问题,完整性评估技术的应用至关重要。

断裂力学和材料科学、力学、金属化学、电子工程学、计算机科学等学科的发展为管道完整性评估技术的推进奠定了基础,管道完整性评估需要考虑环境、结构、介质、外力等多种因素,辅以现代信息技术分析手段,采用有限元理论、边界元理论进行力学仿真分析,定量提出管道的安全性。

本书从国内外近年来典型的事故分析出发,分析了事故发生的原因,阐述了管道完整性评估的重要性、管道完整性及评估技术的进展,重点对管道内涂层评估、缺陷评估、氢

致开裂评估、管道适用性评估开展研究，建立了管道氢致开裂、焊缝、平面型缺陷、体积型缺陷的评估理论方法，研究了多种在线、离线管道检测技术和方法，并进行了现场应用。研究了腐蚀评估技术，包括天然气管道粉尘腐蚀机理与监测抑制技术、管道 ICDA 直接评估技术、管道 ECDA 直接评估技术、应力腐蚀开裂 SCCDA 直接评估方法、工艺管道阀门磨损冲蚀技术、管道内涂层评估试验技术等。充分利用研究成果，开展了管道完整性评估技术的应用、管道沿线近距离爆炸冲击波影响分析评价、管道应力腐蚀可能性评价、管道外力屈曲变形评价、管道站场安全评价、地区等级升级管道风险评价、管道采空区评价、并行埋地敷设管道安全性评估、场站设备设施等多项完整性评估内容。本书内容涉及管道完整性评估的前沿技术，提出了基于物联网的完整性评价和管道四维管理技术，阐述了基于地理信息系统 4D-GIS 的开发平台技术，其伴随着建设期完整性管理的大面积推广，管道完整性评估也要关口前移，从设计开始进行管道高后果区、管道高风险评估，使风险处于可接受的范围内，提出了高钢级大口径管道气体爆破试验评估技术的应用与发展。本书还进一步提出了城市燃气管道的完整性评价方法。

本书内容紧密结合生产实际，案例分析全部引自油气管道生产一线，针对生产中经常性出现的问题，如内外检测缺陷、几何变形、重车碾压、洪水冲击、矿场堆料、管道悬空、阀室沉降、管道屈曲、山体滑坡监测、并行埋地管道敷设、管道落差坑沟填埋等情况进行科学分析和评价，提出了风险控制措施，具有很强的实用性。

本书的大部分内容是作者多年来致力于管道完整性评价技术研究的最新成果，同时也集成了国内外先进的管道完整性评估技术、方法，结合我国油气管道的特点，建立了系统的油气管道完整性评估技术方法，并在国内管道得到成功应用。

由于作者水平有限，错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

1 概述	1
1.1 管道安全面临挑战	1
1.2 中国油气管道事故案例	5
2 管道完整性评估技术进展	7
2.1 全球油气管道完整性管理及评估技术进展	7
2.2 油气管道氢致开裂失效行为研究进展	23
2.3 氢致裂纹扩展的分形研究进展	30
2.4 管道内涂层评估研究进展	34
2.5 管道缺陷适用性评价技术进展	37
3 管道完整性评估技术标准	44
3.1 完整性管理评估标准的研究与分析	44
3.2 管道检测与评估技术标准体系建设与应用	54
4 管道完整性评估理论	64
4.1 管道裂纹尖端过程区的应力应变场研究	64
4.2 管道氢致裂纹扩展的断裂模型	85
4.3 管道氢环境下含裂纹管道的完整性评价	107
4.4 管道韧性硬化材料裂纹扩展分形研究	129
4.5 管道氢致裂纹扩展的分形断裂评估模型	134
4.6 管道氢致裂纹扩展的分形仿真模拟	139
4.7 管道氢致裂纹扩展的分形速率	152
4.8 管道氢致开裂的分形试验研究	163
4.9 输气管道 X52 管材焊缝氢致裂纹扩展分形模型	174
4.10 螺旋焊管 R 阻力曲线的确定	180
4.11 螺旋焊管与直缝焊管 I、II 型裂纹断裂分析	186
4.12 管道非稳定扩展速率的研究	191
4.13 天然气管道抗震可靠性研究	196
4.14 管道焊缝缺陷评估理论	202
5 检测与测试技术	206
5.1 输气管道在线内检测技术	206
5.2 管道外检测技术	224
5.3 站场超声导波技术	228
5.4 站场分离器冻堵 C 扫描检测技术	238
5.5 压缩机组的应变与振动测试	245

5.6 重载碾压管道的安全性测试与分析	255
6 腐蚀评估技术	266
6.1 天然气管道粉尘腐蚀机理与监测抑制技术	266
6.2 输气管道 ICDA 直接评估技术	316
6.3 管道外腐蚀直接评价技术	330
6.4 工艺管道阀门磨损冲蚀评估技术	342
6.5 在役管道内涂层评估技术	349
6.6 应力腐蚀开裂直接评估技术	359
7 安全评估技术	373
7.1 爆炸冲击波对跨越段管道的影响分析评价	373
7.2 管道应力腐蚀可能性评估	378
7.3 管道外力屈曲变形分析	392
7.4 管道弯曲管道安全评价	400
7.5 石油、天然气管道完整性(安全)评价与寿命预测	405
7.6 基于 API 581 标准的输气管道站场安全评价	417
7.7 西气东输长铝支线(风险)评价报告	424
7.8 管道应急抢险 ABAQUS 安全评价仿真分析	436
7.9 冲沟填平对管道安全性影响的完整性评价	453
7.10 阀室管道沉降的完整性评价	462
7.11 站场完整性管理与评价技术	469
7.12 管道内检测缺陷评估技术	484
7.13 并行埋地敷设管道安全性评估技术	490
8 管道完整性新技术	504
8.1 管道四维管理技术	504
8.2 物联网时代的完整性管理	511
8.3 四维地理信息系统 4D - GIS 的开发研究	516
8.4 高钢级大口径管道气体爆破试验评估技术	526
8.5 城市燃气管道完整性管理评估技术	533
8.6 完整性评估技术发展与应用对策	543
参考文献	547

1 概 述

1.1 管道安全面临挑战

自 20 世纪初至今,全世界的石油工业取得了引人瞩目的进展。石油工业的发展给管道工业注入了活力,使管道运输成为包括铁路、公路、水运、航空运输在内的五大运输体系之一。使用管道不仅可以完成石油、天然气、成品油、化工产品和水等液态物质的运输,还可以运送如煤浆、面粉、水泥等固体物质。

目前全世界在用管道总长达 $350 \times 10^4 \text{km}$,其中旧管道数量占一半以上,如何评价这些管道的状况,保证既安全又经济地运行,是管道完整性评价技术解决的主要问题。

世界各国都在探索管道安全管理的模式,最终得出一致结论:管道完整性管理是最好的方式。近几年,管道完整性评价与完整性管理逐渐成为世界各大管道公司普遍采取的一项重要管理内容。管道的完整性评价与完整性管理是指管道公司通过对天然气管道运营中面临的安全因素的识别和评价,制定相应的安全风险控制对策,不断改善识别到的不利影响因素,从而将管道运营的安全风险水平控制在合理的、可接受的范围内,达到减少管道事故发生、经济合理地保证管道安全运行的目的。完整性评价与完整性管理的实质是,评价不断变化的管道系统的安全风险因素,并对相应的安全维护活动做出调整。

近年来管道事故频发,且造成的危害逐渐增大,下面以近年来北美地区油气管道事故情况为例,进一步说明管道完整性评估的迫切性。

1.1.1 近年来北美油气管道事故案例

美国联邦管道与危险物质安全管理局统计,1990—2010 年,共发生 2840 起重大燃气管道、天然气管道事故,包括 992 起致死或致伤事故,共致 323 人死亡,1372 人受伤。天然气管道老化问题已经招致了十分严重的后果。

根据联邦统计数据进行分析,自 1990 年以来,有超过 5600 起上报的泄漏事件涉及陆基危险液体管道,泄漏总量超过 $1.1 \times 10^8 \text{gal}$ ^①,其中主要是原油和石油制品。美国管道和危险材料安全管理局认为有超过一半(每年至少发生 100 起以上)的泄漏事件属于重大级别。这个级别意味着除其他因素外,还发生了火灾、严重的伤害或者恶性死亡事故,或者至少产生了 2100gal 的泄漏量。

与其他运输方式相比,管道运输泄漏造成的年事故率较少,但管道事故却可能是灾难性的。管道泄漏是由多种原因导致的,如第三方破坏、腐蚀、机械故障、控制系统故障、

① 1gal (美) = 3.785412dm³。

操作失误及自然灾害等。

自 2002 年以来,美国、加拿大的所有泄漏事件中,有 50% 是由于设备故障、建设缺陷和其他与管道有关的技术问题引起的,腐蚀问题在美国运输部所属的管道和危险物质安全管理局看来是与设备故障不同的,腐蚀是导致泄漏的第二大主导因素,在统计的时间段内所占比例接近 1/4。

2000 年 8 月,美国新墨西哥州 Carlsbad 附近的天然气管道爆炸造成 12 名露营者死亡,该管道属于 El Paso 天然气公司 (El Paso Natural Gas Company, EPNG),内腐蚀引起的管壁严重减薄是造成这次管道事故的直接原因。1999 年 8 月,华盛顿州的成品油管道事故,造成 3 人死亡, $25 \times 10^4 \text{gal}$ 汽油泄漏着火,风景区受到严重污染。这两起管道事故的发生是管道完整性管理在美国立法的直接原因,美国国会于 2002 年通过了《管道安全改进法案》,这是美国管道完整性管理方面最重要的立法,首次以法律的形式明确要求执行管道完整性管理程序,即要求管道运营商定期采取内检测、压力试验和直接评估方法评价管道系统的完整性,并要求建立一套程序化的管理体制,最大限度地确保管道安全。

1.1.1.1 腐蚀因素和机械损伤因素导致泄漏

(1) 2010 年 7 月 27 日,加拿大 Enbridge 公司从美国印第安纳州向加拿大安大略省输送石油的管道发生故障,导致 $80 \times 10^4 \text{gal}$ (约 30280m^3) 石油泄漏进入一条河流,而这条河流是密歇根州卡拉马祖河的支流。漏油已经开始杀死河流中的鱼类,包括一些濒危的野生动物。

这条石油管道的所有者加拿大 Enbridge 公司,管道穿孔导致漏油事故。该公司管理人员发现漏油现象后立刻关闭了石油管道的阀门。这条直径 76cm 的石油管道,每天可以将 $800 \times 10^4 \text{gal}$ 石油从印第安纳州格里菲斯输送到加拿大安大略省萨尼亚。这条管线名为“湖首系统”,是世界上最大的输油管道之一。

(2) 2010 年 9 月 10 日,Enbridge 公司的湖首系统的 6A 管线发生漏油,此前在伊利诺伊州位于芝加哥郊区的 Romeoville 市周围发现原油泄漏,漏油的规模不清楚,管线在当日即关闭,漏油状况得以控制。

Enbridge 公司的湖首管线系统的经营时间已近 60 年,负责将加拿大约 70% 的原油输入美国,加拿大是对美国最大的石油出口国,在输往美国的原油中,经由 Enbridge 公司管线输出的比重最大。其中,湖首管线系统的 6A 管线是该公司在该地区主要的 1900mile^① 管线之一,是由加拿大西部运输原油至美国的主要运输管道之一,6A 管线的输油量占美国原油总进口量的 7% ~ 8%。6A 管线管径约 36in^②,每日运输量为 $67 \times 10^4 \text{bbl}$ ^③ 轻质合成、中重级原油。管线泄漏后,Enbridge 公司按照国家相关规范和公司安全和环境相关标准,随即进行了油品的清理工作,泄漏量约 970m^3 ,回收了 960m^3 。

(3) 2011 年 5 月 7 号,在美国内华达州萨金特县,TransCanada 公司的 Keystone 管道沿线的一座泵站泄漏了将近 $1.7 \times 10^4 \text{gal}$ 的油砂类型的原油,这条管线与公司建设中的 XL 线相连。当地居民报警 TransCanada 公司发生了泄漏的情况,并迫使该公司关闭这条输油管道。

① 1mile=1609.344m。

② 1in=25.4mm。

③ 1bbl=158.9873dm³。

(4) 加拿大 Enbridge 公司 Norman Wells 原油管道等 3 起泄漏事故。2011 年 5 月 11 日, 加拿大 Enbridge 公司宣布由于 Norman Wells 原油管道发生泄漏, 停止该管道的原油输送, 管道泄漏位置位于加拿大西北地区里格利南 50km 处, 2011 年 6 月 10 日, 确认其泄漏量为 $111 \sim 238\text{m}^3$, 查明原因是在环焊缝上一条横向穿透性裂纹发生泄漏。Norman Wells 原油管道用于加拿大 Northwest Territories 的 Norman Wells 与艾伯塔的 Zama 间的原油输送, 日输送量可达 6265m^3 。

同期与 Norman Wells 相连的美国平原管道公司 Rainbow 管道发生破裂, 导致 4532m^3 原油泄漏, Rainbow 管道的泄漏事故也是导致 Enbridge 公司暂停 Norman Wells 管道的直接原因之一。

同期还有其他北美管道泄漏事故, Kinder Morgan Energy Partners Trans 公司位于艾伯塔埃德蒙顿西部的 Mountain 管线发生原油泄漏, 对附近农场造成污染, 导致管线停输。

(5) 2012 年 6 月 7 日晚, 加拿大西部艾伯塔省发生一起石油管道泄漏事故, 漏油数量大约为 $1000 \sim 3000\text{bbl}$ 。报道说, 事发地点位于艾伯塔省中西部的森德镇, 距离拥有 9.2 万人口的红鹿市约 100km。泄漏的原油流入当地红鹿河的支流, 加拿大平原中流公司在美国 40 多个州和加拿大 5 个省份经营业务, 涵盖原油运输、销售、存储, 以及液化石油气的销售和储存等业务。

(6) 2012 年 7 月 27 日, 加拿大 Enbridge 公司的 Line 14 管道在美国威斯康辛州靠近大沼泽地段发生石油泄漏事故。Enbridge 公司控制中心检测到 14 号线压力下降, 操作员立即关闭管线, 应急人员也立即被派往事故现场。泄漏油品在 G 县道西侧进行收集, 大部分位于管道右侧, 原油泄漏量约为 1200bbl 。Enbridge 公司在威斯康辛州的石油管道, 是芝加哥地区的炼油厂为加拿大提供约 $1200 \times 10^4\text{bbl}$ (190000L) 原油的主要输送管道。14 号线管道管径 24in, 1998 年安装, 日输量 317600bbl , 主要向芝加哥地区的炼油厂输送轻质原油。该线为湖首合伙系统的一部分, 为 Enbridge 公司拥有。Enbridge 公司对此事故负有全责, 并需对发生事故的管段进行换管。

1.1.1.2 检维修期间引起的事故

2007 年 11 月 28 日下午 3 点 45 分左右, 加拿大 Enbridge 公司输往美国的石油管道在美国明尼苏达州的端口发生大火并爆炸, 导致 3 名员工死亡。Enbridge 公司关闭了大部分干线输油管道, 导致加拿大向美国中西部炼油厂的原油供应中断, 致使美国原油库存量下降到 $15.23 \times 10^8\text{bbl}$, 是 2005 年 10 月以来的最低纪录, 这令油价当天飙升超过 3 美元。查明原因为石油公司员工曾更换过一个管道的部分零件, 而管道重新启动时, 某个连接处松开, 导致油喷进而着火。

2009 年 6 月 9 日, 在北卡罗来纳州加纳市康尼格拉食品公司 Slim Jim™ 肉类加工厂发生的一起天然气爆炸事故中有 6 名工人死亡, 67 人受伤。

2010 年 2 月 7 日, 在康涅狄格州米德尔顿 Kleen Energy 公司的一座建电厂发生的一起天然气爆炸事故中死亡 6 人, 受伤 50 人, 系吹管清扫过程中发生爆炸。

这 3 起事故都存在可能造成更为严重的财产和生命损失的隐患。美国化学安全与危害调查委员会 (CSB) 对前两起事故进行了调查, 并研究了近年来在美国发生的其他严重燃气事故。结果表明, 这两起爆炸事故均是在有工人在场并存在 (点) 火源的情况下, 因计划内作业活动导致天然气大量泄漏而造成的。

1.1.1.3 第三方施工引起的管道事故

2010年6月8日下午,得克萨斯州北部靠近俄克拉何马州边界的利普斯科姆县的一个小镇发生一起天然气管道爆炸事故,导致2人死亡,3人受伤。这是得克萨斯州过去两天内发生的第三起天然气管道爆炸事故。这是由于一家污垢处理公司的工人在用推土机从一个土坑挖土时,意外挖到天然气管道,引起爆炸。

2010年6月7日,得克萨斯州中北部的约翰逊县发生一起类似的爆炸事故,造成3人死亡,至少10人失踪。当时工人正用挖掘机挖洞,准备安装一根电线杆。爆炸是由挖掘机挖到天然气管道引起的。

2010年9月9日,加利福尼亚州(以下简称加州)旧金山国际机场圣布鲁诺镇附近发生天然气管道爆炸事件,并引发大火。此事故致7人丧生,当地近40栋房屋被烧毁。这是由于一辆正在施工的挖掘机挖断这条天然气管道,引发爆炸,大火旋即蔓延至一旁的居民区。爆炸引发的大火持续燃烧超过12h,直到10日晚消防人员才将其扑灭。

美国所有地下天然气管道全长将近 $48 \times 10^8 \text{ km}$,其中超过60%管道埋设于20世纪50—60年代,而且大多数没有包上如今常用的防腐蚀“外套”。而此次发生爆炸的天然气管道埋设于1956年,就属于40年以上的“高龄”管道。2010年9月11日,加州副州长马尔多纳多要求加州管道与危险物质安全委员会对圣布鲁诺地区所有地下管道实施“完整性评估”。他还下令进一步检查和调查其他位于“高风险区域”的地下管道,包括穿过圣马特奥县的3条输气管道。

美国目前正有数以千计的天然气管道面临因老化引起的爆炸或泄漏危险。由于政府将检查和维修的责任下派给公司,公司又不愿支出过多费用,因此导致很多管道年久失修。迫于公众压力,太平洋煤电公司(PG & E)于2010年9月20日公布了公司方圆6700mile辖区内100条最危险的天然气管道段名单以及位置,圣布鲁诺大爆炸中的管线则未在名单之列。最危险管线名单包括湾区中半岛、佛里蒙特、圣荷西、苗比达等多个地段。2010年9月9日,圣布鲁诺市发生天然气管道大爆炸,引发大范围火灾,导致4人死亡,3人失踪,至少52人受伤。加州公共事业委员会此前已经要求太平洋煤电公司彻查其在北加州和中谷地区的所有管线。

1.1.1.4 地质灾害环境冻土引起的管道事故

Alyeska管道公司在2011年1月8日早晨发现其运营的阿拉斯加一输油管道泄漏后,被迫将其关闭。这一输油管道负责将石油从普拉德霍湾运输至阿拉斯加南部瓦尔迪兹港,全长1280km,运油量占全美石油总产量的12%。Alyeska管道于1975年开始施工,1977年6月20日投产。

管道泄漏处位于邻近1号泵站的一段包裹混凝土的管道上,1号站是这条管道的首个泵站。由于在输油管外包裹了一层混凝土,未发现有石油渗透,泄漏不会对环境造成影响。事故发生后石油开采商将日平均开采量减产至原来的5%,但阿拉斯加南部瓦尔迪兹港口尚未受到影响,油轮仍按照预期装载石油正常进出港。

Alyeska管道是一个成功设计和运行的针对各种复杂冻土环境的管道工程项目,涵盖了极地环境、三大山系、诸多河流和重大活动断裂区。然而,每次Alyeska管道或相关的油气设施有一点点问题,都会成为媒体关注的焦点,例如1989年瓦尔迪兹港油轮泄漏、2001年的枪击事件和2006年的普拉德霍湾油田地区因多年电化腐蚀而导致的油田集输管道泄漏

和长时间关停。但环境问题需要周密考虑，制定具有前瞻性和针对性的突发性事件应急对策、方案及进行技术研发、积累。由于冻土地带的管道与常温下的管道所处环境有很大差异，具有较强的特殊性，更应考虑低温、冻土冻胀融沉等多种因素的影响。

1.1.2 事故分析

总结 2009—2012 年发生在美国和加拿大的 15 起管道泄漏、污染、爆炸事故。其中 3 起是由于管道第三方施工引起（20%），3 起是由于检维修作业过程中误操作引起（20%），1 起是由于管道地质冻土环境位移引起（6.7%），8 起是由于管道腐蚀因素和机械损伤引起（53.3%）。

这说明北美管道腐蚀（主要是老管道多）、第三方施工、不正确的操作是引起管道事故的主要原因。

1.2 中国油气管道事故案例

我国石油天然气的管道当前总数量达到 $9.3 \times 10^4 \text{km}$ ，管道运输已是我国五大运输产业之一，对国民经济起着非常重要的作用，被誉为国民经济的动脉，随着国民经济的发展，国家对长输管道的依赖性逐渐提高，而管道对经济、环境和社会稳定的敏感度也越来越高，油气管道的安全问题已经成为社会公众、政府和企业关注的焦点，政府对管道的监管力度也逐渐加大，因此对管道的运营者来说，管道运行管理的核心是“安全和经济”。

当前中国管道的现状不容乐观，中国油气管道多为 20 世纪 70 年代所建设和近年来新建的管道，老管道随着运行时间延长，管道事故时有发生。其中最突出的是东北输油管网和西南油气田天然气管网，四川地区 12 条输气管每 1000km 的管道年事故发生率平均为 4.3 次，表 1.1 为四川输气管道在 1969—2003 年的事故统计。由于四川地区大部分输气管道已接近或超出服役期，加之早年管道制管、施工焊接技术水平及管材等问题，管道的腐蚀问题日益凸显。

表 1.1 1969—2003 年四川输气管道事故统计

事故原因		所占比例（%）
腐蚀	内腐蚀（H ₂ S 影响）	39.5
	外腐蚀	
施工缺陷		22.7
材料缺陷		10.9
山体滑坡、崩塌、洪水等		5.6
人为破坏		15.8
其他原因		5.5
合计		100

东北和华北、华东地区输油管道泄漏事故总和每年都在 20 次左右，2010 年 5 月 2 日

18 时 12 分，山东东营至黄岛原油管道复线胶州市九龙镇 223 号桩处的管线破裂，随即喷出 50 余米高的油柱，1h 后才停止下来，现场附近的水沟、马路和农田被覆盖了厚厚的原油，东黄复线紧急停输。在随后的调查中发现，此系地方违章施工所致，事故共造成 240t 原油外泄。2012 年 4 月，中国石化秦京输油管道在北京通州地区发生原油管道泄漏，此系管道遭受腐蚀，管壁减薄穿孔所致。2013 年 11 月，山东青岛黄岛经济开发区中国石化黄潍输油管线泄漏引发重大爆燃事故。事故的基本原因是输油管线漏油进入市政管网导致起火，造成人民群众生命财产重大损失。

如何解决油气管道运行安全问题是当前解决老油气管道运行的首要问题，新建管道输送压力高，事故后果影响严重，如何保证管道在投入运行前期（事故多发期）的运行安全以及降低成本是当前新建管道所面临的主要问题。缺乏有效的管道完整性评价，特别是老管道能否继续运行，需要进行系统的评估。

综上所述，管道完整性管理已经成为全球管道技术发展的重要内容。我国在这方面起步较晚，虽然目前已经全面推广，但只是从日常业务管理的角度，还未真正深入地开展管道完整性评估，如内检测还是以 5 ~ 8 年为一个检测周期。另外，我国管道企业还没有形成一套完整的完全适用于油气管道的完整性评价的技术体系，缺乏系统开展管道完整性评估的经验。而且，我国管道企业自主创新的力度还不够，虽然目前管道的适用性评价已形成了一些标准、规范以及推荐做法，但需要结合管道运行的实际情况进一步修改和完善。

2 管道完整性评估技术进展

2.1 全球油气管道完整性管理及评估技术进展

2.1.1 全球管道完整性管理应用进展

2.1.1.1 国外进展

管道完整性管理 (Pipeline Integrity Management) 一般可理解为对可能使管道失效的主要威胁因素进行检测, 据此对管道的适应性进行评估的过程。

国外油气管道安全评价与完整性管理始于 20 世纪 70 年代的美国, 至 90 年代初期, 美国的许多油气管道应用了安全评价与完整性管理技术来指导管道的维护工作。加拿大、墨西哥等国家也先后于 90 年代加入了管道风险管理技术的开发和应用行列, 至今均取得了丰硕的成果。

欧洲管道工业发达国家和管道公司从 20 世纪 80 年代开始制定和完善了管道风险评价的标准, 建立了油气管道风险评价的信息数据库, 深入研究各种故障因素的全概率模型, 研制开发实用的评价软件程序, 使管道的风险评价技术向着定量化、精确化和智能化的方向发展。英国油气管网公司 90 年代初就对油气管道进行了完整性管理, 建立了一整套的管理办法和工程框架文件, 使管道维护人员了解风险的属性, 及时处理突发事件。

管道安全评价与完整性管理技术起源于 20 世纪 70 年代, 当时欧美等工业发达国家在第二次世界大战以后兴建的大量油气长输管道已进入老龄期, 各种事故频繁发生, 造成了巨大的经济损失和人员伤亡, 大大降低了各管道公司的盈利水平, 同时也严重影响和制约了上游油 (气) 田的正常生产。为此, 美国开始借鉴经济学和其他工业领域中的风险分析技术来评价油气管道的风险性, 以期最大限度地减少油气管道的事故发生率, 以及尽可能地延长重要干线管道的使用寿命, 合理分配有限的管道维护费用。经过几十年的发展和应用, 目前许多国家已经逐步建立起管道安全评价与完整性管理体系和各种有效的评价方法。

美国油气研究所 (GRI) 决定今后将工作的重点放在管道检测的进一步研究和开发上。利用高分辨率的先进检测装置及先进的断裂力学和概率计算方法, 可获得更精确的管道剩余强度和剩余使用寿命的预测和评估结果。

美国 Amoco 管道公司 (APL) 从 1987 年开始采用专家评分法风险评价技术管理所属的油气管道和储罐, 到 1994 年为止, 已使年泄漏量由原来的工业平均数的 2.5 倍降到 1.5 倍, 同时使公司每次发生泄漏的支出降低 50%。

美国交通部安全办公室 (OPS) 针对管道经营者, 2002 年初确定了管道经营商的完整性管理的职责, 明确提出, 管道完整性管理运营商的责任在于对管道和设备进行完整性评

价，避免或减轻周围环境对管道的威胁，对管道外部和内部进行检测，提出准确的检测报告，采取更快、更好的修复方法及时进行泄漏监测。美国交通部安全办公室对运营商的完整性管理计划进行检查，检查影响输气管道高风险地区的管段是否都已确定和落实，检查管段的基准数据检测计划及完整性管理的综合计划，检查计划的执行情况等。

加拿大最大的管道公司努发（NOVA）公司，拥有管道 15600km，多数已运营近 40 年。该公司非常重视管道风险评价技术的研究，已开发出第一代管道风险评价软件。该公司将所属管道分成 800 段，根据各段的尺寸、管材、设计施工资料、油（气）的物理化学特性、运行历史记录以及沿线的地形、地貌、环境等参数进行评估，对超出公司规定的风险允许值的管道加以整治，最终使之进入允许的风险值范围内，以保证管道系统的安全、经济运行。20 世纪 90 年代中期，该公司对其油气管道干线进行扩建，需要穿越爱得森地区 5 条大型河流，在选择最佳施工技术时遇到了困难。由于环境管理比过去更严格，传统的选用最低费用的方法已经不再适用，需要一个权衡费用、风险和环境影响的决策方法，在收集了线路、环境、施工单位等的最新资料和对不同河流穿越方法的局限性进行鉴别后，结合每一个穿越方案的不确定性和风险进行了决策和风险分析，最终对各穿越方案 35 年净现值有影响的所有因素以及极端状态进行量化评估后，作出了正确的选择。

美国科洛尼尔（Colonial）管道公司把管理的重点放在管道的安全和可靠性上，管理计划包括管道内部的检测，油罐内部的检测、修理和罐底的更换，阴极保护的加强，线路修复等内容。利用在线检测装置和弹性波检测器，实施以风险为基础的管理方法，并每年进行一次阴极保护系统的调查和利用飞机实施沿线巡逻。该管道公司采用风险指标评价模型（即专家打分法）对其所运营管理的成品油管道系统进行风险分析，有效地提高了系统的完整性。该公司开发的 RAM 风险评价模型将评价指标分为腐蚀、第三方破坏、操作不当和设计因素 4 个方面，该模型可以帮助操作人员确认管道的高风险区和管道事故对环境及公众安全造成的风险，明确降低风险的工作重点，根据降低风险的程度与成本效益对比，制定经济有效的管道系统维护方案，使系统的安全性不断得到改善。

以壳牌公司为代表的国外大型石油公司，对于石油企业的完整性管理统称为资产完整性管理（Asset Integrity Management），其中又分为管道完整性管理、设施完整性管理、结构完整性管理和井场完整性管理 4 部分。

澳大利亚 GasNet 公司实施完整性管理重点在第三方破坏方面，外界干扰和第三方破坏对管道来说是最大的威胁。由于电站设施的增加、定向钻的大量使用、通信光缆的铺设，以及承包商建设公路、铁路的增加，都使得威胁增大。使用的工具设施包括挖掘机、钻机、钻孔器和定向钻，威胁同时也来自于其他主体授权资产机构的建设和维护，以及在管线维护工作中发生的问题。主要通过应用 AS 2885.1《气体和液体石油用管道 第 1 部分：设计和建造》标准减轻风险，每年都要对每一条管线进行风险评估，自然保护措施难以适应现存管线，GasNet 公司要求最小埋深 1200mm，对临时管道埋深要求最小 900mm。管道与道路交叉口要浇灌混凝土、增加壁厚以及在道路最低处理深 1.2m，此外还要挖建排水沟槽。

管道巡检的目的是要发现那些不明身份的或者已经存在的外界干扰操作，泄漏，违章建筑，标记缺乏，建筑物上的植被、腐蚀、塌方、下沉以及地面管线的安全问题和周