



管道完整性管理 技术与实践

董绍华 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

TE973

管道完整性管理技术与实践

董绍华 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书基于 ASME B31.8S 和 API 1160 国际标准,从世界管道事故统计分析出发,提出了当前管道安全面临的难题,总结了国内外管道完整性管理的最新进展,建立了系统的完整性管理体系和实施指南,阐述了管道完整性管理的原理、技术、方法,紧紧围绕完整性管理的核心要素,研究了管道失效机理、数据采集与管理、高后果区识别、风险评价、完整性监测、检测与评估、修复与风险减缓、管道企业完整性信息平台、完整性效能与审核等技术,提出了管道全生命周期风险管控、站场完整性管理、地区等级升级管理等重点内容,以陕京天然气管道等国内外先进管道企业为例,给出了完整性管理的最佳实践。

本书可作为管道技术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,还可作为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

管道完整性管理技术与实践 / 董绍华编著.
—北京:中国石化出版社,2015.9
ISBN 978-7-5114-3573-6

I. ①管… II. ①董… III. ①天然气管道-安全管理
IV. ①TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 198923 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 32.25 印张 816 千字

2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定价:108.00 元

前 言

油气具有易燃、易爆的特性，随着管线埋地时间的增长，由于管道材质问题或施工期间造成的损伤，以及管道运行期间第三方破坏、腐蚀损伤或穿孔、自然灾害、误操作等因素造成的管道泄漏、穿孔、爆炸等事故时有发生，直接威胁人身安全，破坏生态环境，并给管道工业造成巨大的经济损失。对于管道管理者而言，最困难的问题不在于事故后如何采取补救措施，而是不知道下一次事故发生的时间、地点以及严重程度，这就要求管道管理者提前掌控可能存在的风险点，并对未来发展趋势作出研判，依据风险大小提前预控，将事故隐患消除在萌芽中。

管道安全已经成为社会公共安全问题，特别是发生在海峡两岸的管道安全事故，为管道安全敲响了警钟。2013年11月22日，位于山东省青岛经济技术开发区的中国石化东黄输油管道泄漏，原油进入市政排水暗渠，在形成密闭空间的暗渠内油气积聚遇火花发生爆炸，造成62人死亡、136人受伤，直接原因是未大修管道腐蚀减薄破裂，原油泄漏流入排水暗渠，液压破碎锤产生火花引发油气爆炸。2014年7月31日，台湾高雄市前镇区多条街道陆续发生可燃气体外泄，并引发多次大爆炸，造成多人伤亡，高雄环保部门确定为丙烯泄漏导致，爆炸产生的气浪呈放射状扩散，泄漏的丙烯聚集在地下管道中，并沿着管道扩散，气体爆炸共造成32人死亡、321人受伤，城市公共设施、财产损失难以估计。

管道的安全管理问题，这个话题已是由来已久，从管道管理的发展来看，经历了四个阶段，第一阶段是基于管道事件的管理模式，如管道的事故、发生后的抢修、处理等应急模式；第二阶段是随着管理的深入，逐渐过渡到基于时间的管理模式，即预防性的维护管理模式，如SCADA系统实时对设备的运行参数监控；第三阶段是基于可预测的管理模式，即对系统的历史数据进行分析、预测未来的变化；第四阶段是随着IT信息技术的发展，逐渐统一到基于可靠性为中心的完整性管理模式，这是目前集管道数据集成技术、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。

多年来国内外管道管理的实践表明，管道完整性管理已经成为预防管道事故发生、实现事前预控的重要手段。管道完整性管理也是当前世界各大管道公司采取的一项重要管理内容，它是一个以管道安全为目标并持续改进的系统管

理体系，其内容涉及管道设计、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。

本书基于国内外管道失效原因和频率统计分析，找出了管道管理中存在的主要矛盾和发展对策，介绍了完整性管理的最新进展情况，阐述了管道完整性管理的理念、管道完整性失效理论、管道数据采集与管理技术、管道风险评价技术、管道完整性检测及监测技术、完整性评价技术、维护维修技术、数字化管道平台技术、场站完整性管理技术以及建设期管道完整性管理等，全面阐述了油气管道完整性管理体系建设内容，为管道企业提供了实施指南，包括实施程序、方法、步骤、文件、持续改进和审核等。本书还针对管道路由区域经济发展人口密集的特点，管道地区等级升级的现实情况，提出了风险评价与管控措施。另外，本书还介绍了管道完整性管理在国外著名管道公司的 Enbridge 公司、TransCanada 公司、Williams Gas 公司的最佳实践做法，分析了各自在完整性技术管理领域的特点，有助于深刻理解国内外企业之间的差距。本书也重点介绍了国内陕京管道的实施做法，其在引进、消化、吸收国内外管理技术的同时，结合自身管道特点，按专业领域管理，划分为管道本体的完整性管理、地质灾害与周边环境完整性管理，腐蚀防护完整性管理、站场及设施完整性管理、储气库井场及设施管理五个管理内容，充分考虑了完整性评价技术、IT 技术及管道新技术的应用。本书涉及的标准法规较多，读者在使用过程中应采用最新的版本。

本书部分内容曾在亚太地区“全球油气管道完整性管理”专题研讨会、加拿大和巴西 IPC 国际管道会议、国家石油公司(NOC)管道合作会议作了专题讲座，并与多个国家和地区的知名管道专家交流中国管道完整性管理的进展，各国学者均十分重视中国在管道完整性管理方面的进步，一致认为全生命周期的完整性管理是未来企业发展的主要趋势。

本书的大部分内容是作者多年来致力于管道完整性管理研究的最新成果，同时本书集成了国内外已有的先进管道完整性管理技术、方法和管理体系，并结合我国油气管道的特点，建立了系统的油气管道完整性管理技术方法，并在陕京管道得到成功应用和实施。本书可作为管道技术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，还可作为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。

由于作者水平有限，错误和不足之处在所难免，诚恳广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 概述	(1)
第 2 章 管道完整性管理的基本理论	(7)
2.1 管道完整性管理的概念	(7)
2.2 完整性管理的依据和标准	(8)
2.3 完整性管理程序	(10)
2.4 完整性管理与传统安全管理	(18)
第 3 章 国内外完整性管理进展	(19)
3.1 国外完整性管理法规和标准情况进展	(19)
3.2 国外管道企业完整性管理实施情况	(21)
3.3 国外管道完整性管理机构设置情况	(24)
3.4 国外管道完整性管理(PIM)与健康安全环境(HSE)管理的关系	(28)
3.5 国内完整性管理的进展	(29)
3.6 管道完整性管理体系的进展	(31)
第 4 章 管道失效机理分析	(33)
4.1 管道应力腐蚀问题	(33)
4.2 管道氢致开裂(HIC)问题	(36)
4.3 管道黑粉成因与内外部腐蚀分析	(44)
第 5 章 管道完整性管理数据采集与管理	(50)
5.1 完整性管理数据管理的目的	(50)
5.2 完整性管理的参照标准	(50)
5.3 管道完整性数据管理流程	(51)
5.4 管道完整性数据管理	(52)
5.5 管道完整性数据内容	(56)
5.6 管道完整性数据采集技术要求	(58)
5.7 管道完整性数据维护规定	(78)
5.8 管道完整性数据库设计	(80)
5.9 管道完整性数据安全	(84)
第 6 章 管道风险评价技术	(90)
6.1 风险评价现状	(90)
6.2 管道危害因素识别	(91)
6.3 管道高后果区识别技术	(92)
6.4 风险评价方法及流程	(95)
6.5 KENT 打分法简介	(97)
6.6 改进的输气管道风险评价法	(99)

6.7	管道定量风险评价	(130)
6.8	管道定量风险评价案例	(133)
第7章	管道完整性检测与监测技术	(139)
7.1	管道内检测技术及检测器	(139)
7.2	管道外防腐层质量检测技术	(152)
7.3	超声导波检测技术	(161)
7.4	管道无损检测技术	(168)
7.5	内检测技术在陕京管道中的应用	(173)
7.6	管体应变监测技术	(184)
7.7	管道内部内腐蚀监测技术	(190)
7.8	管道泄漏监测及安全预警技术	(198)
第8章	管道完整性评估技术	(207)
8.1	管道系统完整性评估技术进展及应用对策	(207)
8.2	直接评估技术与应用	(216)
8.3	管道适用性评估模型	(252)
8.4	管道内检测缺陷完整性评价	(275)
8.5	管道地质灾害评价	(309)
8.6	试压评估	(328)
第9章	管道修复技术与风险减缓措施	(332)
9.1	管道维抢修参照的国际标准	(332)
9.2	国内外管道修复响应原则和时间	(333)
9.3	管道修复技术	(341)
9.4	管道维修过程中的技术要点	(355)
9.5	管道复合材料维修技术	(357)
9.6	阀门维护技术	(367)
9.7	管道风险减缓措施	(371)
第10章	站场完整性管理与关键技术	(375)
10.1	站场完整性管理体系建设	(376)
10.2	站场风险管理与定量风险评估	(377)
10.3	场站完整性保障关键技术与应用	(379)
10.4	某压缩机站场的定量风险评价	(383)
10.5	基于风险的检验(RBI)	(390)
10.6	以可靠性为中心的维护(RCM)	(394)
10.7	安全完整性等级(SIL)	(397)
10.8	某储气库集注站 RBI 案例分析	(403)
10.9	站场完整性管理注意的问题	(410)
第11章	油气管道完整性管理体系的建设与实施	(411)
11.1	管道完整性管理体系的发展	(411)
11.2	管道完整性管理标准体系建立	(412)
11.3	管道完整性管理的管理体系	(414)

11.4	管道完整性管理的技术体系	(416)
11.5	管道完整性管理质量控制、审核与培训要求	(421)
11.6	管道完整性管理平台	(422)
11.7	管道设计阶段、建设期的完整性管理	(423)
11.8	管道完整性管理体系的实施	(426)
第 12 章	管道企业完整性管理信息技术平台	(432)
12.1	管道企业信息技术架构	(432)
12.2	基于管道完整性管理的 GIS 系统	(432)
12.3	企业资产完整性管理平台	(443)
第 13 章	管道全生命周期风险管理	(453)
13.1	管道设计与完整性管理实践	(453)
13.2	管道地区等级升级与公共安全风险管控研究	(461)
13.3	管道完整性管理审核技术	(469)
13.4	管道完整性管理效能评价技术	(476)
13.5	管道企业资产完整性管理发展对策	(480)
第 14 章	国内外管道公司完整性管理案例	(483)
14.1	Enbridge 公司管道完整性实施案例	(483)
14.2	Williams Gas 公司管道完整性实施案例	(487)
14.3	TransCanada 公司管道完整性实施案例	(492)
14.4	陕京管道完整性管理实践	(494)
参考文献		(505)

第 1 章 概 述

21 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，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。

2013 年全球运行的油气管道总长有 $355.9186 \times 10^4 \text{ km}$ ，如表 1-1 所示，其中北美洲管线密度最高，为 $236.204 \times 10^4 \text{ km}$ ，占世界管线总长度的 66.4%；全世界管道中天然气输送管线占世界管道总量的 80.5%，而原油输送管线只占 8.4%，成品油输送管线为 $36.5686 \times 10^4 \text{ km}$ 。

表 1-1 世界各国管道分布* 10⁴km

地区类别	北美洲	中南美洲	欧洲和欧亚	中东	非洲	亚太地区
油气管道总数	236.204	12.7127	64.438	8.9936	9.9552	23.6151
液体管道	25.9645	5.6295	18.2776	4.611	5.3822	8.532
天然气管道	210.2395	7.0832	46.1604	4.3826	4.573	15.0831

* 根据美国中央情报局 2013《世界各国纪实年鉴》统计，中国管道的数量按 2013 年 86912km 统计，而实际达到 $10.6 \times 10^4 \text{ km}$ ，2014 年达到 $12.5 \times 10^4 \text{ km}$ 。

通过统计，美国拥有管线数量最多，为 $222.5032 \times 10^4 \text{ km}$ ，占世界管线总量的 62.5%；美国天然气管线有 $198.4321 \times 10^4 \text{ km}$ ，占世界天然气管线总量的 69.3%；液化石油气(LPG)管线最长的国家是阿尔及利亚，有 3447km，其次是墨西哥，为 2102km；2013 年中国管线长度为 106000km，占世界天然气管线总量的 3.0%；2013 年中国天然气管线长度为 60502km；2013 年俄罗斯天然气管线为 163872km，占世界天然气总量的 5.7%。

当前全世界在用管道总长达 $356 \times 10^4 \text{ km}$ ，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，是管道完整性管理评价解决的主要问题。

当前世界在用管道中普遍存在的问题为：

- (1) 使用的材料一般强度低、韧性差、缺陷多；
- (2) 老旧管道当年施工技术水平较低；
- (3) 防腐涂层因为时间长而老化；
- (4) 管道质量波动较大，有些缺陷会导致腐蚀；
- (5) 质量文件不全或遗失，事故发生后无法追溯；
- (6) 缺少维护检修记录。
- (7) 城市地下公共设施与管道交叉情况不明。

世界各国油气管道发生事故的原因，如表 1-2、表 1-3、表 1-4 及图 1-1 所示，第三方损伤、材料和施工缺陷、误操作、腐蚀是管道事故的主要原因，腐蚀控制需要进一步强化，材料和施工缺陷有所上升，第三方的管控管理要求对管道沿线公众持续不断地开展宣传教育、开挖管理亟待规范。

表 1-2 各国 1984 至 1992 输气管道事故率及其原因比较

事故原因所占比例	美国输气管道	欧洲输气管道	加拿大输气管道
第三方造成损伤/%	40.4	52	12.6
腐蚀/%	20.4	13.91	11.60
材料和施工缺陷/%	12.7	19.13	34.3
地基移动\误操作\其他原因/%	26.5	14.86	41.5
事故率/(次/10 ³ km·a)	0.162	1.156	1.83

注：本表引自美国天然气学会(AGA)统计(1984~1992)。

表 1-3 美国 1993~2013 年油气管道事故率及其原因比较

事故原因所占比例		美国输气管道		美国液体管道	
第三方造成损伤/%		20.0		16.5	
腐蚀/%		18.0		24.2	
材料\焊缝\设备失效/%		28.5		27.3	
地基移动\误操作\其他原因	自然力破坏/%	8.0	33.5	4.7	32
	其他外力破坏/%	5.4		1.9	
	误操作/%	3.4		8.5	
	其他原因/%	16.7		16.9	

注：本表引自美国天然气学会(AGA)统计(1993~2013)。

表 1-4 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		
材料与施工缺陷	施工缺陷	22.7	33.6
	材料缺陷	10.9	
第三方损伤		15.8	
地基移动\ 误操作\ 其他原因	山体滑坡、崩塌、洪水等	5.6	11.1
	其他原因	5.5	
合计		100	

从图 1-1 可以得出，比较美国管道 1984~1992 年和 1993~2013 年的情况：第三方损伤逐渐降低，由 40.4%降低到 20.0%，这与美国实施 one call 系统有直接关系，近 20 年重点开展地下管网交叉设施管理，规范开挖，防止第三方损伤；腐蚀损伤所占比重基本持平，在美国管道设备设施大幅增加的基础上，基本稳中有降，趋势良好；材料与施工缺陷失效事故逐年增加，这与目前大口径高压高钢级管材的应用有很多不确定性的危害有关，另外工程建设规模逐渐加大，材料制造和安装问题突出。地质位移、误操作、其他原因等失效事件有上升趋势，这可能与灾害性天气增加等有关。中国四川管道 1969~2003 年，主要是腐蚀和材料施工缺陷占比较大，反应了当时管材应用和 H₂S 高含硫气田的开发而引起的应力腐蚀、管内电化学腐蚀增加，管材施工技术在当时的环境下低水平的状况。

世界管道近年来失效频率的统计见表 1-5、表 1-6、表 1-7，其中美国近 20 年来的事故

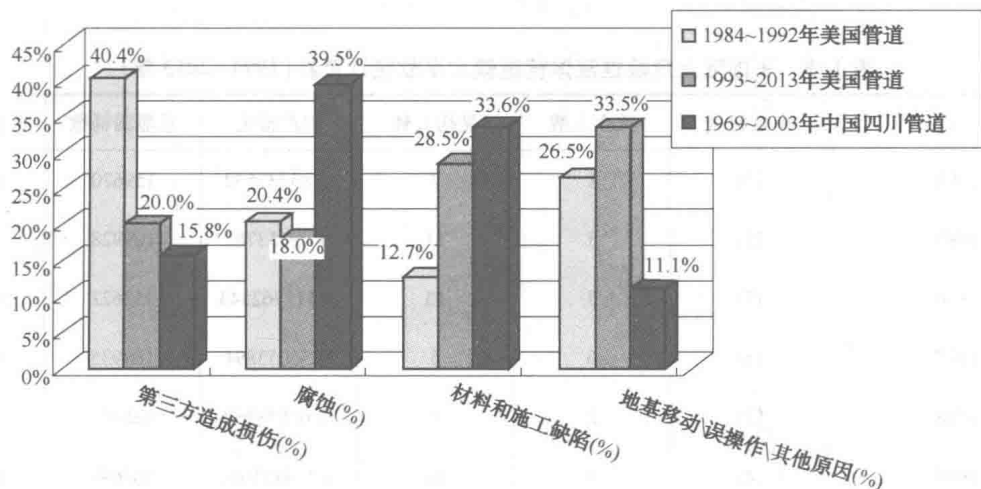


图 1-1 美国管道及中国管道事故主要原因比较

损失和死亡统计见表 1-8 和表 1-9。从表中可以看出，液体管道的失效频率较气体管道要大得多，同时事故后果和损失较大。从表中可得出，近几年各国管道失效频率依然波动较大，完整性管理形势依然严峻，仍然处于管道管理的严格监管阶段。

表 1-5 各国天然气管道近年失效频率统计 次/10³km

年份	2010	2011	2012	2013
国家				
欧洲	0.16	—	—	—
英国	—	—	—	—
美国	0.12	0.15	0.10	0.12
加拿大	0.8	0.9	0.9	—
中国	0.22	0.13	0.12	0.31

表 1-6 各国液体管道近年失效频率统计 次/10³km

年份	2010	2011	2012	2013
国家				
欧洲	—	—	—	—
英国	—	—	—	—
美国	0.43	0.52	0.54	0.55
加拿大	1.0	1.2	1.0	—
中国	0.31	1.13	1.41	1.02

表 1-7 各国油气管道近年失效频率统计 次/10³km

年份	2010	2011	2012	2013
国家				
欧洲	—	—	—	—
英国	0.15	—	—	—
美国	0.21	0.25	0.22	0.24
加拿大	—	—	—	—
中国	0.26	0.53	0.62	0.58

表 1-8 美国陆上危险性液体管道较大事故统计资料(1994~2013 年)

年份	事故数量	死亡人数	受伤人数	财产损失	总泄漏桶数	总损失桶数
1994	176	1	7	\$ 85737532	159670	109535
1995	154	3	11	\$ 42753785	109928	52960
1996	171	5	13	\$ 113762543	153622	94288
1997	153	0	5	\$ 56053894	188935	99256
1998	131	2	6	\$ 68598269	138078	51190
1999	142	4	20	\$ 108805004	163689	101106
2000	128	1	4	\$ 167435219	106318	54655
2001	107	0	10	\$ 30011062	98045	77328
2002	130	1	0	\$ 56964615	95663	77268
2003	123	0	5	\$ 77132688	80032	50413
2004	125	5	16	\$ 99374884	76295	58111
2005	121	2	2	\$ 321009792	136008	44774
2006	104	0	2	\$ 62613599	135930	52859
2007	107	4	10	\$ 61790006	94071	68655
2008	119	2	2	\$ 127927943	101055	69388
2009	107	4	4	\$ 59691445	52329	30583
2010	118	1	4	\$ 933768833	174094	123137
2011	137	1	2	\$ 234988338	138136	107906
2012	125	3	4	\$ 134122392	45045	29178
2013	155	1	5	\$ 209741788	119688	90331
总数	2633	40	132	\$ 3399072452	2243097	1318072
3 年平均(2011~2013 年)	139	2	4	\$ 198907337	84339	58926
5 年平均(2009~2013 年)	128	2	4	\$ 376725331	81027	51318
10 年平均(2004~2013 年)	122	2	5	\$ 257837733	94912	55007
20 年平均(1994~2013 年)	132	2	7	\$ 169953623	112155	65904

注：本表引自美国管道与危险材料安全管理局(PHMSA)网站。

表 1-9 美国陆上输气管道较大事故统计资料(1994-2013 年)

年 份	事故数量	死亡人数	受伤人数	财产损失
1994	34	0	15	\$ 57831243
1995	22	0	7	\$ 8978919
1996	34	1	5	\$ 13669335
1997	26	1	5	\$ 12018165
1998	40	1	11	\$ 43595350
1999	34	2	8	\$ 21032227
2000	45	15	16	\$ 18347359
2001	45	2	5	\$ 14090991
2002	40	1	4	\$ 19235403
2003	62	1	8	\$ 50652686
2004	44	0	2	\$ 9125933
2005	64	0	5	\$ 215143945
2006	59	3	3	\$ 28712064
2007	55	2	7	\$ 37881184
2008	47	0	5	\$ 111770201
2009	60	0	11	\$ 42889571
2010	57	10	61	\$ 396440658
2011	67	0	1	\$ 88443227
2012	47	0	7	\$ 43044768
2013	59	0	2	\$ 34480972
总数	941	39	188	\$ 1294889962
3 年平均(2011~2013 年)	58	0	3	\$ 54847725
5 年平均(2009~2013 年)	58	2	16	\$ 124456603
10 年平均(2004~2013 年)	56	2	10	\$ 103137574
20 年平均(1994~2013 年)	47	2	9	\$ 64744498

注：本表引自美国管道与危险材料安全管理局(PHMSA)网站。

截止 2014 年 12 月，中国目前有油气管道 12.5×10^4 km 左右，其中中石油运行的长输管道接近 7.5×10^4 km，中石化拥有长输管道 2.5×10^4 km，中海油拥有长输管道 1.0×10^4 km 左右，地方管网管道约 1.5×10^4 km。管道用钢已经从原来的 X52 一直发展到 X60、X70、X80、X90，技术不断进步，管道建设水平和技术已处于世界前列。特别是四大能源通道的建设，引进俄罗斯远东石油管道-漠河-大庆管道、中亚哈萨克斯坦-阿拉山口到独山子原油管道两条跨国大口径管道，中亚天然气土库曼斯坦、哈萨克斯坦 A/B/C 线输气管道、中缅油气管道、海上 LNG 通道等四大国家能源安全工程。国内建设完成了西气东输塔里木-上海一线、二线，正在建设西三线；完成了陕京一线、二线、三线，正在建设陕京四线；完成了陕京系统与西气东输系统的联络线三条，完成了兰成渝、西部管道新疆-兰州双线输油管道，完成了北京-沈阳-大连的管道、泰青威管道、兰成原油管道、中贵天然气管道等多条油气支干

线管道；“十三五”期间中国油气企业拟新建管道 $10 \times 10^4 \text{ km}$ ，包括中俄天然气管道国内段，西气东输四线等多条管道，中石化建设新疆-广东-浙江煤制气管道，同时中海油、中石化还要建成大量的海底管线和 LNG 接收站和油气管线，管道的数量在不断地增加，其管理的难度也在不断地增加。

从中国管道的结构来看，东北管网、川渝管网已运行 40 年左右，事故频率大幅增加，管道沿线工业发达、人口密集，管理难度增加。近年来，全国新建管道比例也逐年增加，按照浴盆曲线，在建设投产期和设计寿命期均是事故高发阶段，需要运用非常手段、非常措施进行管理。2014 年 6 月 30 日发生在大连市的新大线输油管道发生由于第三方施工引起的管道泄漏事故，暴露了管道安全管理中的薄弱环节。2014 年 7 月 31 日发生在台湾高雄的气爆事故，也是在特定的人口稠密区，管道管理不善，泄漏穿孔导致油气积聚，在密闭空间发生爆炸，引起多人伤亡。2013 年 11 月 22 日发生在青岛的输油管道泄漏爆炸事故，同样是处于经济技术开发区，同样是长期缺乏有效的管道完整性管理的措施和方法，事故教训深刻，后果严重。

我国的海底管线现有 3000 多公里，油气介质通过海底管道输送，很多是未经处理的湿气，腐蚀性较强，油气水多相流并存，其安全可靠性和重要性，直接威胁海洋生态安全，如平湖管线投产后因材质问题发生了泄漏事故，也需要采取科学有效的技术方法进行管控。

就目前来看，油气管道承担的各项任务是艰巨的，其重要性在于：其一，油气管道需要安全高效地为京津地区、长江三角洲、珠江三角洲等全国大中城市能源供应服务，提供优质的清洁能源社会责任十分突出，须最大限度保障上述地区的经济和社会稳定；其二，用户的用气量以及其他清洁能源的使用量大幅增加，管道及设施满负荷运行，增加了技术与管理的难度；其三，全球技术竞争日益激烈，必须不断创新，以保持我国管道先进的管理水平。

油气管道在国民经济中占有十分重要的地位，在役管线的安全管理与经济发展的矛盾十分突出，随着科技的不断发展，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，与西方国家的差距还很大，如何建立自身的管道完整性管理体系，确保管道运营安全是面临的一项艰巨任务。

在当前经济高速发展、前期管道路由规划不尽合理、工程建设缺乏统一管控的前提下，社会上普遍存在对地下基础设施重视度不够，存在各种地下设施与管道交叉并行间距不够及占压严重等问题，这给管道管理带来了新的课题，管道安全问题也已成为社会公共安全问题，特别是目前大口径、高压、高钢级管线钢的应用，如果管道一旦发生爆炸事故，将给人民的生命和财产安全造成严重后果，我们必须寻求于国际管道管理的先进经验，结合中国的国情，消化吸收国外先进的技术与管理手段。本书的目的在于阐述国际管道完整性技术理论和方法，重点在于如何应用技术，同时介绍国外先进管道企业最佳实践，以及陕京管道实施完整性管理的经验，为中国管道管理起到抛砖引玉的作用。

第2章 管道完整性管理的基本理论

2.1 管道完整性管理的概念

管道完整性(Pipeline Integrity)是指:

- (1) 管道始终处于安全可靠的工作状态;
- (2) 管道在结构上和功能上是完整的;
- (3) 管道处于受控状态。

管道完整性与管道的设计、施工、运行、维护、检修和管理的各个过程是密切相关的,管道运营商应不断采取行动防止管道事故的发生;

管道的完整性管理(PIM, Pipeline Integrity Management)定义为:管道企业根据不断变化的管道因素,对管道运营中面临的风险因素进行识别和技术评价,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。

管道完整性管理应建立完整性管理体系,具体通过监测、检测、检验等各种方式,获取与专业管理相结合的管道完整性的信息,对可能使管道失效的主要威胁因素进行检测、检验,据此对管道的适应性进行评估,最终达到持续改进、减少和预防管道事故发生、经济合理地保证管道安全运行的目的。

管道完整性管理,也是对所有影响管道完整性的因素进行综合的、一体化的管理,包括:

- (1) 拟定工作计划、工作流程和工作程序文件;
- (2) 进行风险分析和安全评价,了解事故发生的可能性和将导致的后果,指定预防和应急措施;
- (3) 定期进行管道完整性检测与评价,了解管道可能发生事故的原因和部位;
- (4) 采取修复或减轻失效威胁的措施;
- (5) 培训人员,不断提高人员素质。

管道完整性管理的过程是持续不断的改进过程,如图2-1所示。

管道完整性管理的原则为:

- (1) 在设计、建设和运行新管道系统时,应融入管道完整性管理的理念和做法;
- (2) 结合管道的特点,进行动态的完整性管理;
- (3) 要建立负责进行管道完整性管理的机构、管理流程、配备必要的手段;
- (4) 要对所有与管道完整性管理相关的信息进行分析、整合;
- (5) 必须持续不断地对管道进行完整性管理;
- (6) 应当不断在管道完整性管理过程中采用各种新技术。

管道完整性管理是一个与时俱进的连续过程,管道的失效模式是一种依赖环境、材质、

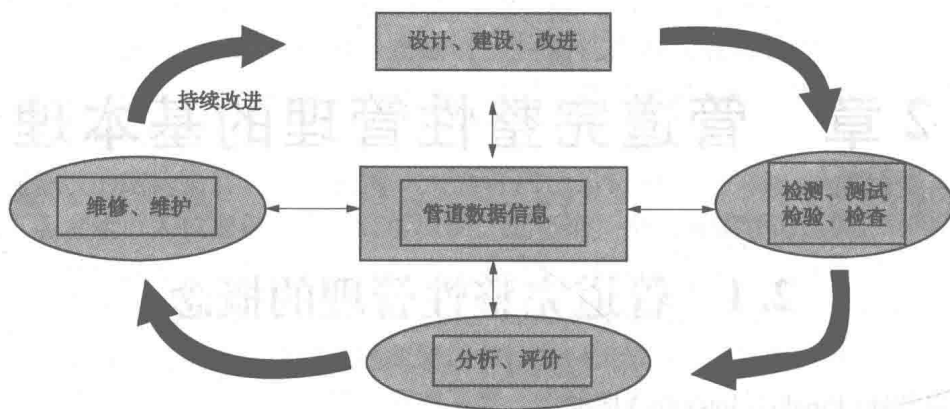


图 2-1 管道完整性管理要素循环

应力、外力等多因素的复杂模式。腐蚀、老化、疲劳、自然灾害、机械损伤等能够引起管道失效的多种过程，必须持续不断地随管道进行风险分析、检测、完整性评价、维修、人员培训等完整性管理。

完整性管理是一个持续改进的过程，完整性管理是以管道安全为目标的系统管理体系，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。其基本思路是调动全部因素来改进管道安全性，并通过信息反馈，不断完善。

完整性管理包括过程完整性、信息完整性和时间完整性等，是当前管道安全管理的重要模式。ASME B31.8S 是输气管道完整性管理体系的结构和基本组成部分。管道可靠性、风险性评价成为其基本组成，而完整性检测、评价、运行状态指标、再评价周期等则是完整性管理的新内容，反映出管道安全管理从单一安全目标发展到优化、增效、提高综合经济效益的多目标趋向。管道完整性管理计划不存在“最优”或“唯一”方案，需要结合实际不断完善。

2.2 完整性管理的依据和标准

在完整性管理的国家法律、法规方面标准依据方面，美国首先以立法的形式提出，美国政府基于国内拥有约 $198 \times 10^4 \text{ km}$ 输气管道， $24.0 \times 10^4 \text{ km}$ 液体燃料管道，且相当一部分使用年限很长，为了增进管道的安全性，美国国会于 2002 年 11 月通过了专门的 H. R. 3609 号法案，该法案于 2002 年 12 月 27 日经布什总统签署后生效。

H. R. 3609 The Pipeline Safety Improvement Act of 2002 (PSIA)——关于增进管道安全性的法案，法案中第 14 章中要求管道运行商在后果严重地区（高后果地区）实施管道完整性管理计划，PSIA 也写入了 ANSI（美国标准学会）相关标准部分内容。基于 PSIA 法律，美国运输部 DOT 发布了输气管道和液体危险品管道安全性管理的建议规则，联邦政府关于在天然气管道高后果地区的完整性建议规则 49 CFR Part 192，关于在危险液体管道高后果地区的完整性管理建议 49 CFR part 195，推进并加速管道 HCA 区域的完整性评价，促进管道公司建立和完善完整性管理系统，促进政府发挥审核管道完整性管理计划方面的作用，增强

公众对管道安全的信心。

完整性管理实施方面有许多标准,其中包括 ASME B31.8S(输气管道完整性管理的标准)、ASME B31Q(输气管道管道操作人员的资质标准)、NACE RP0102(管道内检测推荐作法)、NACE RP0502(管道外检测评价标准)等标准规范对完整性管理作出了具体的规定和建议,具体分类如下(包括但不限于)内容:

1. 管道完整性管理的管理标准和法规

- (1) ASME B31.8S 输气管道系统完整性管理
- (2) 关于增进管道安全性的法案(美国 HR. 3609)
- (3) ASME B31Q 输气管道操作人员的资质
- (4) API 1160 危险液体输送的完整性管理
- (5) CFR 49 Part 192 关于在天然气管道高后果地区的完整性管理规则
- (6) 49 CFR part 195 关于在危险液体管道高后果地区的完整性管理规则
- (7) API 1120 液体管道维护人员资质

2. 管道本体的完整性管理标准

- (8) ASME B31G 确定腐蚀管线剩余强度手册
- (9) SHELL V3.2 管道智能内检测器技术要求与规范
- (10) DNV-RP-F101 腐蚀管道缺陷评价标准
- (11) API 579-1/ASME FFS-1 适用性评价
- (12) NACE RP0102 管道内检测操作推荐标准
- (13) API 1163 管道内检测系统
- (14) API 1104 管道焊接与装备
- (15) BS 7910 金属结构缺陷可接受性评价指南

3. 地质灾害及周边环境完整性管理标准

- (16) DNV-RP-F105 自由管道悬跨推荐标准
- (17) API 1162 管道公众警示程序

4. 防腐有效性完整性管理标准

- (18) NACE RP0502 管道外腐蚀检测与直接评价标准
- (19) NACE RP0204 管道应力腐蚀直接评估技术标准
- (20) NACE SP0206 输送干天然气管道内腐蚀直接评估标准
- (21) NACE RP0169 地下或水下金属管线系统外腐蚀控制的推荐作法
- (22) NACE RP0285 地下储罐系统采用阴极保护腐蚀控制的推荐作法

5. 站场及设施专业完整性管理

- (23) ASME B31.8 输气和配气管道系统
- (24) CSA Z662 加拿大管道系统
- (25) API RP-11PGT 撬装式燃气轮机的推荐作法
- (26) API 570 管道系统维护与维修规程
- (27) 管道临时性/永久性维修手册(AEA)
- (28) PR-218-9307(AGA L51716) PRCI 管道维修手册
- (29) ASME B31.4 液烃和其他液体用管道输送系统
- (30) ASME B31.3 工艺管道