

YOUQI GUANDAO SHIGU QISHILU

油气管道 事故启示录

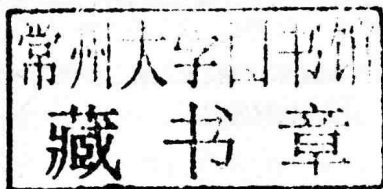
冯庆善 戴联双 编著



中国建材工业出版社

油气管道事故启示录

冯庆善 戴联双 编著



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

油气管道事故启示录/冯庆善, 戴联双编著. —北京: 中国建材工业出版社, 2016. 1
ISBN 978-7-5160-1304-5

I. ①油… II. ①冯… ②戴… III. ①石油管道—事故分析②天然气管道—事故分析 IV. ①TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 256586 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了近年来国内外的油气管道事故概况、历史事故的价值、国内外管道安全法规标准、以及国内外油气管道事故调查组织情况, 探讨了事故原因及预防措施, 并结合作者多年来从事管道完整性管理、油气管道事故调查的经验, 提出了“树生”事故致因理论。

本书共分为 10 章, 第 1 章主要介绍国内外油气管道事故概况、相关安全法规标准和事故调查组织; 第 2~8 章分别为腐蚀、第三方、地质灾害、焊缝失效、误操作、水体污染处置和其他类型典型事故案例, 主要介绍相应类型油气管道事故案例, 挖掘出这些事故中蕴藏的对管道全生命周期管理有益的启示; 第 9 章为事故调查的探索, 主要介绍如何开展事故调查、挖掘什么信息及国内事故分析等内容; 第 10 章为“树生”管道事故致因理论, 主要介绍如何全面地分析事故, 并从中挖掘有价值的信息。

本书是管道设计、施工和运营工程技术人员、各级管理人员和基层员工等必备的参考书籍, 也可作为企业培训教材使用。

油气管道事故启示录

冯庆善 戴联双 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 16.75

字 数: 408 千字

版 次: 2016 年 1 月第 1 版

印 次: 2016 年 1 月第 1 次

定 价: 68.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn 微信公众号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社网络直销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

序

在人类的历史上，事故往往会导致重大的财产损失、人员伤亡等一系列惨痛的教训，在接受教训的同时，也要对事故有正确的认知，与此同时，改进或促进技术的发展、管理的变革等。油气管道事故亦是如此，较大的事故暴露的问题促进了技术的进步和立法的完善，如1999年华盛顿州 Bellingham 汽油管道爆炸事故和2000年新墨西哥州 Carlsbad 天然气管道爆炸事故促使2002年管道安全改进法案，首次以法律的形式明确各管道运营公司执行管道完整性管理程序，且将预防第三方挖掘损坏管道的程序提升到联邦法规要求的水平。但更多的是业内人员通过对事故的认识，提高了技术认知能力，改进了管理做法，规避了大量未遂事故，或者将事故彻底消灭在萌芽状态。

为了更好地利用事故调查分析报告，使更多的人能够了解事故的原因、过程和如何规避、改进管道安全管理，提升相关人员的管道管理认知能力和技能水平。因此，本书编者详细地筛选、整理了国内外较典型的事故分析报告，从大量的油气管道事故中抽丝剥茧，选取了典型的案例进行分析，提取了事故报告中有价值的信息作为启示，用于分享、学习，并且详细地阐述了国外的油气管道事故发生后，如何组织调查，以及国内外事故调查组织之间的差异，并且强针对性地提出了许多这方面的改进建议。本书对于我们通过事故，提升管理者的管道管理认知能力和管理水平应该是非常有益的。

当然，在看国外事故发生的处理过程中，虽然有不尽人意的方面，但这不应作为我们自我解脱或满足的理由，反而，我们应当通过这些案例学会如何避免事故再次发生。除此之外，我们还应更多关注国外在事故分析调查、管理、技术及法规等方面改进措施。本书中对事故致因理论的探讨，是今后如何全面、系统地阐述挖掘事故的价值，也是深层次研究事故致因，改进管理方法的关键，值得探讨。

姚伟

2015年10月15日

自序

本书系统地阐述了近年来国内外的油气管道事故概况，国内外管道安全法规和标准，以及国内外油气管道事故调查组织情况，还筛选和分析了由美国国家运输安全委员会（NTSB）和加拿大安全运输委员会（TSB）负责调查、分析的比较典型的调查报告。这些事故调查报告详细描述了事故发生的经过，对失效管道相关的信息进行了充分的调查和分析，剖析了造成管道失效的各种因素，开展了失效管道目视检查、无损检测（NDT），以及材料性能测试等，审查了国家法规、行业标准和企业相关程序文件的合理性和执行情况，分析了管道内检测、阴极保护效果、数据监控与采集系统（SCADA），以及管道风险评价等方面存在的不足，并对管道监管者、社团协会和运营商等所有相关方分别提出了有针对性的改进建议和措施。

这些事故报告中明确规定，事故调查报告只是从技术和管理层面调查和分析事故发生的根本原因，不作为任何责任追究和民事/刑事处罚的依据。这也为事故调查报告的全面性和真实性创造了空间，某些事故调查报告通过全面的访谈，获取了足够多的真实信息来支撑分析结果，从而使得原因分析和建议措施更准确和有针对性。一般美国和加拿大的油气管道事故调查周期都比较大，基本都在2年以上，对所有事故调查分析没有设置最终的期限，事故报告都会在处理完事故造成的所有相关影响或者评估后才会发布，如 Enbridge 管道公司在 2010 年 7 月 25 日 6B 原油管线上发生的泄漏事故，调查报告在 2012 年 10 月份完成所有对环境影响的评估后发布，并在 2013 年发布了事故造成影响的后续监测评估报告。

这些事故报告中也包含了大量管道运营的最佳实践，包括了管理方面和技术发展方面的信息。其中管理方面：如自 1991 年 3 月 Enbridge 管道公司 3 号管线在明尼苏达州发生破裂并泄漏了 6435m^3 原油后，调控中心的管理中就增加了“10 分钟关闭”的规定；TransCanada 管道公司（TCPL）也是在天然气管道多次发生泄漏而空中巡护和外雇巡护人员往往无法查知的情况下，增加了“TCPL 职员每年都必须徒步沿着管道系统的管廊带用便携式的可燃气体探测器开展天然气泄漏调查”的规定；美国也曾经在多次管道事故发生后无法获取有价值的信息的情况下，在其联邦法规 CFR49 195.50 中增加了“发生危险液体泄漏 5 加仑（ 0.019m^3 ）或更大并导致 5 万美元损失、爆炸或者火灾事故时，管道和危险材料安全管理局（PHMSA）要求管道运营商提供一份分析报告，而不是维修作业报告”的规定。技术发展方面：如 TransCanada 管道公司运营的输气管道长期受到裂纹诱发管道失效的事故困扰，从而促进了电磁超声技术（EMAT）的发展和完善；Enbridge 管道公司运营的输油管道也受到过裂纹诱发管道失效的事故的困扰，从而促进了超声裂纹检测技术（USCD）的发展和完善；同时这些还促进了工程适用性评价、各类缺陷的开挖准则，以及静水压力测试等方面技术的发展。

本书作者结合多年来从事管道完整性管理、油气管道事故调查的经验，提出了事故调查及致因理论的探索，并提出了“树生”事故致因理论。基于该理论所提出的原则和流程，利用模拟逻辑关系，可以清晰的认识事故发生的原因，避免将间接原因当做根本原因，并可以充分识别出事故发生的风险大小和控制风险的方法，从而进行有效预防。该理论的运用将会更高层次的提高事故致因分析、风险分析和应对水平，是油气管道及建筑结构完整性管理水平和技术进步的关键，也是实现“预防”的理论基础。

本书对于这些事故的分析 and 事故启示的探讨，期望能成为现役管道管理者提升对管道认知的一本参考手册，能够起到对照事故发生存在的问题，从而提升自身管理水平的作用。尽管作者力求使本书突出实用性和科学性，但受对事故认知水平等所限，书中谬误难免，望读者谅解并提出宝贵的意见。在本书的编写过程中，得到了冯文兴、于智博、王婷、燕冰川、赵晓明等众多同仁的帮助，在此也表示感谢。

编 者
2015 年 10 月

前 言

为大力开展全员职业化培训，提高员工职业化素养，公司组织编写了《中国石油管道公司员工职业化培训教材》。本套教材分综合管理、政工管理、专业技术和操作技能四个序列。综合管理序列教材主要用于管理人员综合行政管理素质提升培训；政工管理序列教材主要用于员工思想政治素质提升培训；专业技术序列教材主要用于管理人员及专业技术人员专业能力提升培训；操作技能序列教材主要用于操作岗位员工的操作技能提升培训。教材力求做到理论和实际相结合，把公司几十年历程和财富提炼出来、沉淀下去。它是我们各级管理人员、专业技术人员和操作人员的技术、技能、经验和心血的结晶。

本册为综合管理序列之《油气管道事故启示录》，通过本书，希望能够使读者了解管道完整性管理研究方法和成果，对其他具有类似情况的管道管理者有所帮助，也对如何开展管道缺陷检测和评估技术研究及管理者有所启发。

因时间有限，仓促成书，内容难免存疏漏，恳请广大读者批评指正，以便修订完善。

编 者

2015 年 10 月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 油气管道事故概述	(1)
1.1.1 标准法规革新的推手	(2)
1.1.2 技术进步与认知的提升	(2)
1.2 国内外管道安全法规标准	(5)
1.2.1 国外管道安全管理情况	(5)
1.2.2 国内油气管道安全管理现状	(11)
1.2.3 提升管道安全管理的认知与探索	(14)
1.3 国内外事故调查组织	(15)
1.3.1 国内事故调查组织	(16)
1.3.2 美国国家运输安全委员会 (NTSB)	(17)
1.3.3 欧洲输气管道事故数据库 (EGIG)	(19)
1.3.4 欧洲空气与水保护组织 (CONCAWE)	(20)
1.3.5 加拿大运输安全委员会 (TSB)	(20)
第二章 国外腐蚀失效典型案例分析	(23)
2.1 概述	(23)
2.2 典型案例分析	(23)
2.2.1 2007 年 4 月 15 日 Enbridge 公司 3 号管道破裂事故	(23)
2.2.2 1999 年 2 月 9 日 Colonial 管道公司管道破裂事故	(26)
2.2.3 2002 年 4 月 14 日 TransCanada 管道公司 100-3 号管道开裂事故	(33)
2.3 事故启示	(42)
第三章 国外第三方损坏典型案例分析	(44)
3.1 概述	(44)
3.2 典型事故案例分析	(46)
3.2.1 1994 年 6 月 9 日美国宾夕法尼亚州艾伦镇的管道爆炸事故	(46)
3.2.2 2007 年 7 月 24 日 TransMountain 管道公司原油管道破裂	(53)
3.2.3 1999 年 6 月 10 日 Olympic 管道公司输油管道破裂事故	(59)
3.3 事故启示	(76)

第四章 国外地质灾害失效典型案例分析	(79)
4.1 概述	(79)
4.2 典型案例分析	(81)
4.2.1 1997 年 4 月 30 日 WestCoast 能源公司天然气管道破裂	(81)
4.2.2 1994 年 10 月 17 日沃特卢爱荷华州地表沉降致使管道破裂事故	(83)
4.2.3 冻土区管道失效案例	(86)
4.3 事故启示	(91)
4.4 国内外地质灾害标准差异	(93)
4.4.1 建设阶段	(93)
4.4.2 运营期管道	(94)
4.4.3 冻土区管道运行标准	(95)
4.5 国内地质灾害治理存在的问题与建议	(96)
4.5.1 存在的问题	(96)
4.5.2 建议措施	(98)
第五章 国外焊缝失效典型案例分析	(99)
5.1 油气管道焊缝概况	(99)
5.2 典型事故案例分析	(100)
5.2.1 2012 年 6 月 28 日 WestCoast 能源公司 Nig Creek 管道破裂事故	(100)
5.2.2 2010 年 9 月 9 日 PG&E 公司 132 号天然气管道破裂事故	(112)
5.2.3 2001 年 1 月 17 日 Enbridge 公司 3/4 管道破裂事故	(126)
5.3 事故启示	(131)
第六章 国外误操作失效典型案例分析	(133)
6.1 概述	(133)
6.2 典型事故案例分析	(135)
6.2.1 2000 年 12 月 28 日 Gazoduc TQM 公司天然气压缩机站爆炸事故	(135)
6.2.2 2002 年 12 月 7 日 Trans-Northern 管道公司管道破裂事故	(151)
6.2.3 1994 年 10 月 3 日 Interprovincial 管道公司 2B 管道破裂事故	(159)
6.3 事故启示	(161)
第七章 输油管道泄漏污染水体处置典型案例分析	(163)
7.1 概述	(163)
7.2 典型事故案例分析	(164)
7.2.1 2000 年 4 月 7 日 Piney Point 输油管道泄漏事故	(164)
7.2.2 2002 年 7 月 4 日 Enbridge 管道公司 4 号管线破裂事故	(177)
7.2.3 2010 年 7 月 25 日 Enbridge 管道公司 6B 管道泄漏事故	(191)

7.3 事故启示	(209)
7.4 泄漏油品进入河流应急处置要点	(210)
第八章 国内其他类型失效典型案例分析	(215)
8.1 概述	(215)
8.2 典型事故案例分析	(215)
8.2.1 2013 年 11 月 22 日青岛“11·22”东黄输油管道爆炸事故	(215)
8.2.2 2010 年 7 月 16 日大连“7·16”输油管道爆炸事故	(222)
8.3 事故启示	(224)
第九章 事故调查的探索	(228)
9.1 如何开展事故调查	(228)
9.2 从事故中挖掘什么信息	(230)
9.3 事故预防的发展之路	(231)
9.4 国内事故分析	(234)
第十章 “树生”管道事故致因理论	(236)
10.1 事故致因理论概述	(236)
10.2 事故致因理论的发展	(236)
10.3 基本定义与探讨	(243)
10.4 “树生”事故致因理论模型及分析方法	(244)
10.5 案例分析	(247)
主要参考文献	(251)

第一章 绪 论

1.1 油气管道事故概述

20 世纪 50 年代以来,随着油气管道的大量铺设,管道事故屡有发生,伴随着城市向农村蔓延,管道建设时期的荒郊野地现在有些都变成了城市中心,位于高后果区的管道也越来越多,从而加剧了很多事故造成更加严重的灾难性后果。迄今为止,破裂裂缝最长的管道失效事故是 1960 年美国的 Trans-Western 公司的一起输气管道脆性破裂事故,这条管道管径 762mm,钢材等级 X56,裂缝长度达 13km;损失最惨重的是 1989 年前苏联乌拉尔山隧道附近的输气管道爆炸事故,烧毁两列列车,伤亡 1024 人(其中约 800 人死亡)。根据美国 OP-SO (Office of Pipeline Safety by the Operators) 的统计结果,从 1995 年至 2014 年,美国共发生油气输送管道失效事故 10844 起,平均每年 542 起,伤亡人数达 1766 人,直接经济损失超过 63.6 亿美元。

在我国,油气输送管线失效事故也屡有发生,1971 年至 1976 年间,东北曾发生过 3 次输油管道破裂事故。1992 年,轮库输油管道在试压时发生爆裂事故 14 次。1999 年,采石输油管道在试压时发生爆裂事故 12 次。四川输气管网南干线 1971 年至 1990 年的 20 年内,发生失效事故 108 起,每次事故停输处理时间超过 24h。威成线 1971 年先后发生 2 次爆管事故(局部减薄);佛纳线 1979 年 8 月至 1987 年 3 月共发生 12 次爆管事故;佛两线 1979 年 1 月至 1989 年 1 月共发生 18 次爆管事故;沪威线 1970 年 12 月至 1995 年 1 月共发生 14 次爆管事故;达卧线 1986 年 10 月至 1996 年 12 月共发生 30 次爆管事故(其中 27 次发生于环焊缝)。根据统计资料,1976—1986 年欧洲的荷、比、法、意、英等国陆上输气管道事故率为 0.06~1.44 次/千公里·年;加拿大 1975—1982 年长输管道事故率为 1.2 次/千公里·年;美国 1930 年至 1939 年所建输气管道 1970 年至 1984 年事故率为 2 次/千公里·年,1950 年至 1975 年所建输气管道同期事故率为 0.6 次/千公里·年,1982 年至 1991 年成品油输送管道事故率为 0.56 次/千公里·年。我国四川输气管网 13 条管线,从 1967 年至 1994 年近 25 年中发生事故造成停输 61 次,平均事故率为 2.608 次/千公里·年,阿赛线腐蚀穿孔事故率为 7.53 次/千公里·年,油气管道的失效会造成重大经济损失、人员伤亡和环境污染。

近几十年来,世界各国为了应对管道失效带来的灾难性影响,对管道事故管理和安全运行的要求也越来越高,许多国家和组织建立了管道事故管理机制。在这些基础上,各国对油气管道事故的风险要素进行了统计分析,采取了大量针对性的事故预防措施,使得事故率也发生了明显的降低,如美国管道与危险物质安全管理局(PHMSA)官方网站发布 2012 年危险液体管道失效频率为 1.14/千公里·年,长输和集输燃气管道失效频率为 0.21/千公里·年;欧洲燃气管道事件数据组织(EGIG)在 2011 年发布的官方报告中:2010 年的欧洲天

然气管道失效频率为 0.35/千公里·年；加拿大 Alberta 能源与公共设施局（EUB）在 2007 年发布的官方报告中：2005 年加拿大 Alberta 省原油管道失效频率为 1.3/千公里·年；天然气管道失效频率为 1.5/千公里·年；英国陆上管道运营商协会（UKOPA）在 2012 年发布的官方报告中：2007—2011 年连续 5 年平均的失效频率为 0.11/千公里·年。从上述这些组织发布的年度报告来看，油气管道事故率在全世界范围内也是呈下降的趋势。

我国油气管道正处于高速发展阶段，国家和社会对管道安全的要求也日益严格，为了更好地提高我国管道管理水平和事故防范水平，分享国内外典型的事故案例，吸取其中蕴藏的经验教训，更好地做好事故的调查与分析，对于管道的安全管理具有重要意义。事故调查和分析的价值也正如国际民航调查组织认为的那样：“我们调查事故的唯一目的就是为了找出事故发生的可能原因，以防止类似事故的再次发生，而不是为了认定或归咎责任。”美国运输安全委员会（NTSB）的授权法规也规定：“调查是为了确定与每一起事故有关事实、过程和细节及可能的原因，从而定出最有助于将来防止类似事故再次发生的措施。……进行这些调查的目的不是为了确定任何人的权利或责任。”这些都是国外一些比较普适性事故调查的理念，由于这种理念的促动，无论从管理方面，还是技术方面都在事故中吸取了丰富的经验。

从历史的故事和事件调查分析来看，每一起事故事件都或多或少地暴露出运营管理、生产技术等的薄弱环节，在行业内都具有一定的代表性，也能释放警示意义。无论是国内或是国外的这些事故在历史的长河中至少发挥了以下的作用：

1.1.1 标准法规革新的推手

我们开展油气管道的事故调查和分析，是想通过调查分析，发现导致事故发生的原因，进而采取针对性的措施预防类似事故重复发生，这种调查分析是为整个行业积累财富，国内外新技术、新材料、新理念的产生和发展都与事故息息相关。它就像一把强有力的推手一样，推动着管理理念的更新和技术变革。如美国非常重视管道安全立法，1968 年首次出台了与管道安全有关的法案，1999 年华盛顿州 Bellingham 汽油管道爆炸事故和 2000 年新墨西哥州 Carlsbad 天然气管道爆炸事故促成了 2002 年管道安全改进法案，其首次以法律的形式明确各管道运营公司执行管道完整性管理程序，且将防止第三方挖掘损坏管道的程序提升到联邦一级水平；2006 年阿拉斯加 Prudhoe Bay 油田原油管道泄漏事故促使美国将环境敏感地区的低应力危险液体管道纳入了联邦规章的监管范围。这些都是在事故的启示下发展的新的管理理念。

1.1.2 技术进步与认知的提升

近年来，随着政府对人民生命财产的重视程度越来越高，形形色色被曝光的油气管道事故案件也逐年增多。但在事故调查过程中，调查组遇到的阻力却是极大的，很多时候，不仅发生事故的直接责任单位想方设法阻挠调查的进行，就连当地政府机构也是千方百计地企图掩盖真相。那么究竟要如何开展事故调查分析呢？又该调查哪些内容呢？这是各类事故调查工作在开展之前就要考虑和规划的事情。我国近期发生的“11·22”青岛爆燃事故引发了国内管道行业的大量反思和启示，也是油气管道事故调查的一个转折点。但是，与美国和加

拿大的油气管道事故调查分析来说,就从调查分析内容上还存在很大的差距。“11·22”青岛爆燃事故局限于政府部门提出的“15问”:

“为什么会发生泄漏?泄漏的原因是什么?直接原因是什么?管理上的原因又是什么?为什么泄漏的原油会进入市政排水涵道?是规划的问题还是设计的问题?是技术上的问题还是管理上的问题?是企业的问题还是政府的问题?都必须查清楚。为什么泄漏以后没有采取安全防范措施?为什么不警戒?为什么不封路?为什么不疏散群众?为什么不通知群众?为什么引起爆炸?爆炸的直接原因是什么?”

但事实上,这“15问”对油气管道的事故调查来说,还远远不够,还有大量的事故信息需要挖掘。简单来说,在这次事故调查内容中至少还有以下几个方面需要深入分析:

“当时建设期的社会环境是什么样的?建设时期的标准规范有什么要求?存在哪些技术问题?管道周边环境都有哪些变迁?管道生命周期的情况如何?国内外发生了哪些同类型的事故,都是如何处置的?哪些法规、标准等需要完善?哪些管理需要提升?哪些技术需要改进?……”

在油气管道事故促进技术进步和认知提升方面,比较经典的案例应当属于东部管网螺旋焊缝失效分析。在21世纪初,随着我国东部管网老管道运行时间的增长,发生了多次螺旋焊缝开裂等具有国内老管道特点的泄漏事故,后果非常严重,但当时的检测与评价技术难以检测出螺旋焊缝等缺陷,缺陷的严重程度也无法分级排序,难以开展有针对性地修复,风险不能得到有效地预控和消除,完整性管理实施困难。因此,如何解决老管道螺旋焊缝缺陷的检测与判定、管道风险段的识别与排序、大量缺陷的评价与修复排序、带缺陷管道的安全运行压力判定与较大螺旋缺陷的修复等难题,是保证管道安全运行亟待解决的关键问题。

这些技术需求是国内老管道建设时技术条件所决定的,中国石油管道公司通过广泛的调研并与国际交流,发现当时国内外都不具备解决这些难题的成熟技术。螺旋焊缝缺陷检测、评价与维修方面:传统的超声、漏磁检测器难以检测出螺旋焊缝未熔合、未焊透等缺陷,且现有的评价技术也不能评价其完整性状态,无法进行有针对性的检测、修复以保证管体完整性。在缺陷修复方面:由于东部管道的缺陷较长,外形不规则,无法按照常规方法修复,现有的修复技术和标准难以满足长尺寸的螺旋焊缝缺陷修复需求,迫切需要开展焊缝缺陷的修复方法研究。在管道风险评价方面:由于国外的管道风险评价方法是针对无重大设计和施工缺陷的管道,一般对管体先天缺陷和地质灾害的风险考虑较少,难以适应国内管道风险识别的需求,识别结果无法较好的应用于风险预控和维修决策,需要根据国内风险因素特点研究解决,此外管道通过人口密集区的风险也缺乏一些量化衡量的手段。基于上述国内管道安全运行的特殊需求,中国石油天然气股份有限公司2007年4月立项“管道检测与缺陷评价技术”,中国石油管道公司立项“油气管道螺旋焊缝缺陷检测与评价技术研究”、“基于kent法的管道风险评价技术研究”、“站场量化风险评价技术研究”共同系统开展了螺旋焊缝缺陷的检测、评价、修复和风险评价等系列技术研究。

通过对东部管网泄漏失效的历史统计数据进行分析,认识到了东部管网螺旋焊缝缺陷的检测、评价与维修难题,选用三轴高清漏磁检测技术,基于理论和试验,用有限元分析和人工制造缺陷牵拉检测试验等模拟分析了缺陷尺寸对漏磁信号的影响,解决了检出的信号识别、分析等技术难题,提出了螺旋焊缝缺陷信号识别方法及信号类型及特征,得出了该技术的检

出率和识别率等关键指标,建立了根据信号进行尺寸评定的分析建模,得出了已知偏差范围的缺陷尺寸分析结果;研究了螺旋焊缝缺陷适用性评价方法,并通过静水压力实验对方法可行性进行了验证,得出了适用于东部管网螺旋焊缝缺陷的适用性评价方法,开发了新型凸式B型套筒焊缝修复技术,明确了碳纤维复合修复技术对长尺寸螺旋焊缝缺陷的修复适用性,为东部管网的修复提供了指导。针对国内管道风险特征需求,研究完善了使用国内管道风险特征的风险评价方法,给出了高后果区和站场QRA实施方法。通过对东部管网失效事故的分析和采取的针对性措施,使得管道完整性管理技术在以下几个方面得到了提高。

在检测技术研究方面:基于三轴高清漏磁检测器基本工作原理,通过对含缺陷管道的三轴漏磁牵拉试验数据的分析总结,确定了三轴高清漏磁检测技术可用于未熔合、未焊透等螺旋焊缝缺陷的检测,填补了该技术在螺旋焊缝缺陷检测方面的空白,为螺旋焊缝缺陷检测提供了一种可行的技术选择。本研究提出了螺旋焊缝缺陷三轴高清漏磁检测信号特征的识别方法、尺寸评定模型,解决了根据三轴高清漏磁检测发现的螺旋焊缝信号异常评定缺陷类型和尺寸的问题,将螺旋焊缝缺陷信号类型分为4种类型,得出了该技术的螺旋焊缝缺陷检出率超过90%,尺寸评定精度可以达到 $\pm 15\%$,现场取板验证符合率达到100%。

在评价技术研究方面:针对不同特征的螺旋焊缝缺陷,提出了四个力学计算模型。模型采用应力分解的方法,消除了原有投影法只近似适用于裂纹面法向与主应力方向比较接近情况的限制,丰富、修正和改进了对螺旋焊缝适用性评价的方法,提高了评价精度,为经济合理的修复提供了理论基础。基于失效分析方法,对螺旋焊缝类裂纹缺陷进行了深入分析。在对类裂纹缺陷进行宏观形貌、微观形貌、理论计算和历史资料等分析基础上,认为缺陷的主要来自焊接残余应力或压力过载撕裂。开挖扰动对缺陷的失效影响较大,在运行压力提高、大量缺陷和防腐层修复等过程中,应采取适当的措施,控制开挖对缺陷的影响。利用IMU测绘数据,识别出了由地面沉降等环境因素所诱发的管道变形和管道移动区域,评估了曲率变化相关的管道弯曲应变。在项目研究成果的基础上,开发了管道完整性评价软件、管道开挖验证管理软件、管道内检测数据维护系统软件和管道完整性工程图纸生成系统评价软件,完成了复合加载的管道缺陷试验验证系统的设计。

在修复技术研究方面:根据实践经验、数值模拟、力学分析和管体应力应变分析结果,开发出了新型凸式B型套筒修复技术,通过静水压爆破试验和现场应用,验证了该技术的可靠性和实用性。编制了B型套筒管道缺陷修复作业指导书,完成了现场开挖验证程序研究,规范了施工技术要求,提高了管道缺陷修复技术水平。根据长尺寸的焊缝缺陷修复需求,验证了碳纤维复合材料的修复适用性,设计和实施了在弯曲载荷条件下的爆破试验,给出了碳纤维复合材料对一定尺寸螺旋焊缝缺陷的适用条件,为决策修复提供了技术依据。

在失效分析和失效库方面:完成了国外失效数据库的分析研究工作,为中国石油管道失效数据库的建立提供了参考和借鉴。开发了中国石油管道失效数据库软件,其数据内容涵盖了管道干线和站场的基本信息和失效信息,可以实现事件的查询和统计功能,具备网络化运行的条件,为管理层和工程技术人员决策和分析提供了一套实用的工具,也有助于具体的管道运营单位提高安全认识和管理水平。编制了“中国石油管道失效事件管理规程”,提出了失效事件处理、记录、调查、上报以及失效数据和调查报告的审核和管理流程,有助于在中国石油首次建立失效事件的管理机制。完成了中国石油管道基本信息的录入以及国内外典型

历史失效信息的录入工作,具备了一定的数据基础,预计再经过几年的数据积累,特别是中国石油管道失效信息的持续录入和管理,将为管道的风险管理提供依据。

在管道风险评价方面:全面分析了《管道风险管理手册》中的管道风险评价模型,邀请该书作者国际知名的管道风险评价专家 W. Kent. Muhlbauer 先生两次来华进行技术交流研讨。结合管道公司以往失效历史记录及多次专家研讨会的成果,提出了 RiskScore 管道风险评价模型,并编制了管道风险评价专业软件 RiskScore。RiskScore 模型涵盖了管道运营过程中的 5 大风险:腐蚀、制造与施工缺陷、地质灾害、第三方损坏和误操作,并实现了风险的数值化,可进行横向和纵向对比。最后采用此方法,对东北管网所有在役管道进行了风险评价,得到管道全线的风险分布,找出了管道高风险段和高风险因素,编制了管道风险评价报告,指导了管道的风险控制和投资计划项目的实施,与管道日常的维修维护工作进行了紧密结合。

在量化风险评价(QRA)方面:在国内外量化风险评价技术研究、应用的基础上,根据国内管道公司输油气站场生产的实际和特点,研究了站场及高后果区量化风险计算方法,并对站场设备失效场景、失效概率、失效后果、灾害损伤等进行了研究,建立了适合国内管道输油气站场及高后果区的量化风险评价技术,提出了实施量化风险评价的实施流程和操作方法,便于站场量化风险评价技术的推广应用。使用量化风险评价技术,完成了 12 个输油气站场及高后果区段的评价,提出了有针对性的防控措施。评价结果已经成为管道公司输油气站场安全管理的重要决策支持。通过研究、培训和试点应用,管道公司形成了一支理论基础强、技术熟练、具备现场实际操作能力的量化风险评价技术团队。

针对东部管网的这些成果已经成功应用于国内 20 世纪 70 年代建设的管道螺旋焊缝的检测、评价与修复,为该类管道螺旋焊缝缺陷的检测、评价与维修提供了一种全新的解决方案,提高了对该类型管道螺旋焊缝缺陷的认知和管理能力,为保障管道的运行安全奠定了基础,也为今后对螺旋焊缝缺陷的认知提供了一种可行的选择和借鉴。风险评价和 QRA 评价等技术不仅应用于 20 世纪建设的老管道,而且也应用于不同时期建设、不同区域的新管道等,合计评价历程达到 3 万余公里。

1.2 国内外管道安全法规标准

1.2.1 国外管道安全管理情况

1. 美国油气管道安全管理现状

1) 管理体制

美国管道管理由联邦和各州合作监管,是部门分工明确、权责明晰、政企沟通协调的管理体制和机制。美国是世界上拥有管道最多的国家,长度约为 81 万千米,美国将油气管道上升到国家经济和能源战略高度进行管理。美国在油气管道的“全生命周期”中,从石油、成品油和天然气管道(以下简称油气管道)的规划、项目选址、路由许可、安全监管、日常运行维护、事故调查、应急处置、废弃等各方面,均有明确的部门负责。

管道管理体制如图 1-2-1 所示,美国国土安全部(DHS)是管道安全管理的领导机构,DHS 下设的运输安全管理局(TSA)管道保护处(PSD)负责全国危险液体和天然气管道的

保护工作。交通运输部（DOT）下设管道和危险物品管理局（PHMSA）管道安全办公室（OPS），专门负责管道安全监管，是管道运输管理的执行机构。能源部（DOC）能源监管委员会（FERC）负责跨国和跨州石油天然气运输管道的管理工作。国家运输安全委员会（NTSB）、土地管理局（BLM）、环境保护署（EPA）分别承担油气管道的事故调查、管道通行权的许可和补助、环境污染事故处理等职能。此外，美国建立了国家管道地图系统（NPMS），设立了国家管道直呼（One Call）中心（811 电话），由交通部管道安全办公室（OPS）管理。各州代表 OPS 承担州内管道安全管理，OPS 还可授权一州代理检查州际管道，但保留法规的执行责任。

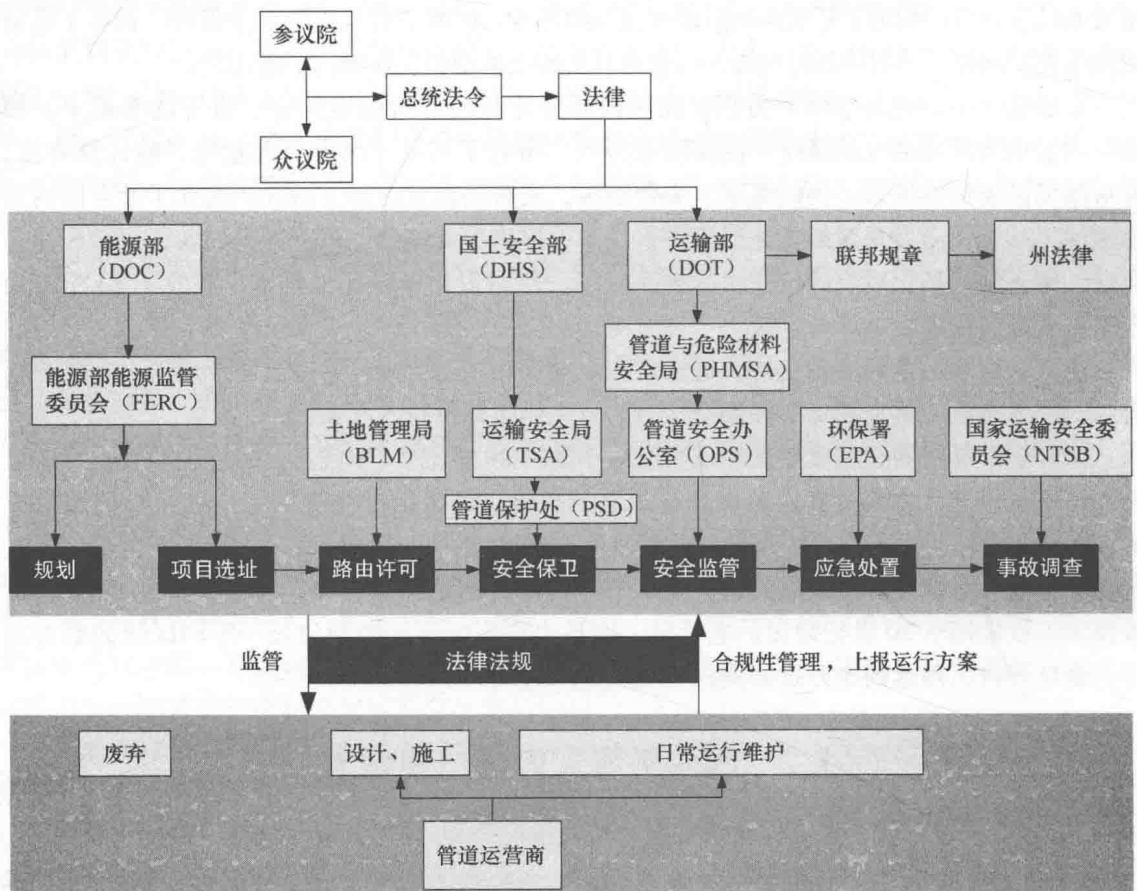


图 1-2-1 美国油气管道“全生命周期”管理体制

2) 法规标准

美国管道管理法规是在多次油气管道重大事故促成下不断健全的，是以联邦法律为主、州法律为辅，并引用大量协会技术自愿性标准的多层次法律法规体系。1968 年 P. L. 902481 《天然气管道安全法案》和 1979 年 P. L. 962129 《危险液体管道安全法案》是美国最早制定的专门管理管道安全的联邦法律，授权交通部负责管理油气管道的设计、建设、运营、维护保养以及对油气溢漏事故的应急救援培训。1988 年 P. L. 1072355 《管道安全再授权法案》规定建立突发事件和溢漏事故的应急协作机制。1992 年 P. L. 902481 《管道安全法案》提出

扩大交通部对油气管道的监察职权，要求对高密度人口居住区域的高敏感环境进行识别，对查找定位危险油气管道破裂技术的评估和使用进行了规定。1996《管道安全和合作法案》规定建立风险管理示范项目，建立最低安全标准和操作人员资格认证。2002年 P. L. 1072355《管道安全改进法案》是美国管道“完整性管理”理念建立的最重要的立法，2002年《国土安全法案及国家保安总统令》授权国土安全部调动整个国家力量保护重要基础设施和关键资源，能源部确保国家能源安全，交通部和国土安全部在所有运输保安和基础设施保护问题上分工协作。2006年 P. L. 1092468《管道检测、保护、实施及安全法案》授权交通部处理防止挖掘损坏管道问题，将防止第三方挖掘损坏管道的程序提升到联邦一级水平。2011年《管道安全、监管和就业法案》要求提高管道安全标准，增加管道检查人员数量，加强监管力度，强化培训教育工作，并规定通过国家管道信息交流为公众教育提供了更多及时的信息（图 1-2-2）。此外，联邦规章（49CFR）管道安全规章也包含管道保护问题。美国通过详细的法规，严格要求的管道的设计、施工、运行等全生命周期的关键技术要求，给出了在高后果区必须开展完整性管理的要求条文，确保了本质安全。美国管道法律法规中许多条款引用了美国机械工程师学会（ASME）、美国石油学会（API）和美国腐蚀工程师学会（NACE）等组织颁布的标准。

1968年	1979年	1988年	1992年	1996年	2002年	2006年	2011年
P. L. 902481 《天然气管道安全法案》	P. L. 962129 《危险液体管道安全法案》	P. L. 1072355 《管道安全再授权法案》	P. L. 902481 《管道安全法案》	《管道安全和合作法案》	P. L. 1072355 《管道安全改进法案》、《国土安全法案及国家保安总统令》	P. L. 1092468 《管道检测、保护、实施及安全法案》	《管道安全、监管和就业法案》

图 1-2-2 美国管道管理联邦法规立法历程

3) 管道应急管理体系相对成熟

美国的应急救援法律法规及标准等体系比较成熟，从应急救援文件的制定到应急设备和能力的准备，以及应急救援的实际操作都制定了相应的法规和标准。例如，美国国土安全部（DHS）于2004年3月制定《国家事故管理系统》（NIMS），明确美国各级部门应急职责和响应框架（图 1-2-3 和图 1-2-4），为美国联邦、州和地方各级政府部门有效管理事故工作提供了一个模板，建立了统一制定和更新国家应急救援国家标准、导则和协议等制度。联邦应急管理局制定了包括应急预案，应急能力建设与评估，应急设备设施的设计、建造、维护、检测和使用等应急管理标准。

4) 完整性管理全面实施，效果显著

美国通过立法的形式对完整性管理进行了规定。完整性管理相关的法规基本上都是在技术研究和事故的启示下逐步建立和完善起来的。各管道公司基本都在2000年后根据政府要求成立了完整性管理部门。随着完整性管理发挥的作用日益显现，提前发现和治理各类事故隐患，规避了大量事故，效果显著，使得各管道公司已经从被动成立完整性管理部门以满足法规的要求，转变为主动发展完整性管理业务，完整性管理部门的人力资源得到不断补充和发展，成为各管道公司的重要部门，形成了一套专业、成熟的技术体系，并依靠专家和技术结论决策的管理模式。