

# 长输油气管道安全与完整性管理技术发展策略研究

董绍华<sup>1,2</sup>, 袁士义<sup>3</sup>, 张来斌<sup>1,2</sup>, 胡瑾秋<sup>1,2\*</sup>, 陈怡玥<sup>1,2</sup>

1 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249

2 油气生产安全与应急技术应急管理部重点实验室, 北京 102249

3 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院, 北京 100081

\* 通信作者, hujq@cup.edu.cn.

收稿日期: 2021-03-16

国家自然科学基金(52074323) 信息安全威胁下油气智慧管道系统失效新型致灾机理与早期预警资助

**摘要** 长输油气管道作为我国油气战略通道的关键组成部分, 保障其高效平稳运行对能源安全意义重大。为积极应对长输管道完整性发展需求, 本文围绕发展进程、研究热点、我国发展现状与存在的瓶颈进行分析, 从关键技术与科研支撑条件两个层面提出发展规划。在技术层面上实现管道全生命周期覆盖, 高精度缺陷检测、风险管控、应急智慧决策以及智慧管道信息安全保障等核心技术全面应用; 提高核心装备国产化, 在我国及海外油气管道全面应用自主研发系统及关键设备。在管道完整性管理体系、体制机制建设与安全立法等政策方面给予支持, 同时持续人才培养与实验室建设的稳定科研投入、加强成果推广应用、加强科技交流合作, 更好地保障管道完整性技术发展完善。

**关键词** 管道完整性; 检测技术; 在线监测; 智慧管道; 应急决策

## Research on integrity development strategy for long-distance oil and gas pipeline

DONG Shaohua<sup>1,2</sup>, YUAN Shiyi<sup>3</sup>, ZHANG Laibin<sup>1,2</sup>, HU Jinqiu<sup>1,2</sup>, CHEN Yiyue<sup>1,2</sup>

1 College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Key Laboratory of Oil and Gas Safety and Emergency Technology, Ministry of Emergency Management, Beijing 102249, China

3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, petrochina Co., LTD, Beijing 100083, China

**Abstract** Long-distance oil and gas pipeline is a key component of oil and gas strategic import channel. It has great significance to ensure the efficient and stable operation of pipeline for energy security. In order to meet the development needs of the integrity of long-distance pipelines, the development process, research hotspots, development status and existing bottlenecks in China were analyzed in this paper. The development plan was proposed from two levels of key technology and scientific research support conditions. As to the technical level, the full pipeline life cycle coverage, high-precision defect detection, risk management and control, emergency intelligent decision-making, and comprehensive application of core technologies such as information security assurance should be achieved. In another the localization of core equipment types, and the independent research and development system and key equipment should be fully applied in oil and gas pipelines. The localization of core equipment, fully apply self-developed systems and key equipment on oil and gas pipelines at home and abroad should be improved. The support in policies should be provided such as pipeline integrity management system, institutional mechanism construction and safety

引用格式: 董绍华, 袁士义, 张来斌, 胡瑾秋, 陈怡玥. 长输油气管道安全与完整性管理技术发展策略研究. 石油科学通报, 2022, 03: 435-446

DONG Shaohua, YUAN Shiyi, ZHANG Laibin, HU Jinqiu, CHEN Yiyue. Research on Integrity Development Strategy for Long-distance Oil and Gas Pipeline. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 435-446. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.038

legislation. At the same time, the investment in stable scientific research in personnel cultivation and laboratory construction, strengthen the promotion and application of results, and strengthen scientific and technological exchanges and cooperation to better ensure the development and improvement of pipeline integrity technology should be enhanced.

**Keywords** pipeline integrity; detection technology; online monitoring; smart pipeline system; emergency decision

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.038

近年来中国油气管道工程稳步推进,油气管网逐渐完善,合作建设多条陆上油气进口通道。中缅、中亚、中哈、中俄油气长输管道先后投入使用<sup>[1-2]</sup>。随着管线运行时间的增加,由于管道材质老化、制造缺陷、第三方破坏、自然灾害、误操作等因素引起的管道泄漏和燃烧爆炸等事故偶有发生,这类事故不仅破坏生态环境,导致人员伤亡,同时造成巨大的经济损失。

自21世纪以来,管道管理模式发生了重大变化,管道完整性管理逐渐成为全球管道行业预防事故发生、实现事前预控的重要手段,是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管理全过程,并贯穿管道整个全生命周期内。

中国油气管道完整性管理的发展历经20余年。自1995年,我国开展管道风险评价和管道安全评价研究,2001年中石油率先引进管道完整性管理并实施,取得了丰硕成果,形成了“三个一”的完整性技术群,即一套技术体系、一套标准体系、一个系统平台,覆盖管道储运设施的线路、场站、储气库和系统平台等多个领域。线路方面形成了本体安全保障、风险评估与控制、输送介质安全保障、抢维修及应急保障等技术群。场站完整性管理形成了站场工艺设施检测与评估、压缩机组诊断评估、定量风险评估、安全等级评估、设施完整性评价等技术群。储气库完整性管理领域形成了地下储气库风险控制、储气库建库及运行安全技术群。管道完整性系统平台领域形成了基于业务多源数据的管道应急决策GIS系统,智能管网初步在中俄东线建成。

本文依托中国工程院“油气长输管道国家治理体系战略问题研究”项目中“油气长输管道安全与应急科技支撑体系研究”课题,在分析我国管道完整性现状与瓶颈的基础上,对未来发展方向与关键技术提出了具体发展目标,同时从技术、政策与科研能力建设3个方面做出规划部署,最后提出了实现规划目标的对策建议。

## 1 长输油气管道完整性研究现状分析

### 1.1 管道完整性发展进程

我国管道完整性理论和技术体系基本来自于欧美发达国家。经过多年建设国外已形成执行严格、监管到位的管道安全管理体系。美国1968年颁布了第一部与管道安全有关的立法《天然气管道安全法》<sup>[3]</sup>;2002年颁布了《管道安全改进法案》<sup>[4]</sup>,2006年颁布了《2006管道检测、保护、实施及安全法案》,为管道完整性管理、腐蚀控制提供了法律保障;2012年颁布了《管道运输安全改进法》。英国1962年颁布了《管道法》<sup>[5]</sup>,1996年《管道安全条例》<sup>[6]</sup>问世。英国也在积极推广完整性管理工作,于2008年发布了公众可获取规范文件“PAS 55—资产管理”<sup>[7]</sup>,强调通过系统的和协调性的活动和方法,以最优的方式来管理其资产和资产生命周期内的资产相关的性能、风险和支出,以实现其组织战略计划。2009年,英国标准协会(BSI)发布了标准《陆上钢制管道实施标准》,给出了高压天然气管道风险评价的流程和方法,并明确给出了员工个人风险、公众个人风险和社会风险的可接受范围(ALARP)。目前,英国标准协会正在制定其完整性管理标准《管道系统第四部分:陆上海底钢制管道完整性管理实施标准》。德国的全部法律以制定法为主,不仅有体系完整的各种法典,也有大量的单行法规和比较完备的司法制度。涉及地下管线综合管理的主要有:德国建设法典(BauGB)、能源经济法(EnWG)、各种单行管线法规。

在管道完整性相关技术研究方面,通过使用Citespace文献计量软件<sup>[8]</sup>分析2000年至今的研究发展历程可见,2002至2005年的研究主要围绕管道的腐蚀机理与腐蚀监测,2010年左右形成了较完善的管道内腐蚀检测模型聚类,2013年形成了包括管道焊缝<sup>[9]</sup>、裂纹与断裂行为的残余应力聚类<sup>[10]</sup>,2015年与2016年分别形成了响应决策与完整性评价的聚类<sup>[11-13]</sup>,2018年形成了包括内检测器与清管器<sup>[14-15]</sup>的

研究聚类。如图 1 所示。

我国管道的完整性管理经历了引进吸收再创新的过程，二十余年取得了重要进展。2001 年中石油北京天然气管道公司制订了完整性体系文件，将陕京管道完整性管理程序文件、作业文件纳入 HSE 体系中；2002 年—2003 年联合英国 Advantica 公司改造了中油管道检测技术有限公司(原中油管道技术公司)液体管道检测器适用于天然气管道，首次在国内完成了陕京一线 912.5 km 的高压大口径天然气管道的内检测；2004 年 3 月在中国石油管道管理与技术交流会上，北京天然气管道公司发表了“以管道安全为中心，完整性管理为手段，开创管道管理的新局面”的技术交流论文并演讲，完整性管理引起高度重视；2004 年 7 月陕京天然气管线结合自身特点建立了管道完整性管理模式，完成了从管理理念向实施方面的转变，“陕京管道完整性管理模式与应用研究”项目取得重要进展，建立了适用的陕京管道完整性管理文件体系，同时在技术研发方面取得重要成果，全面系统的研究陕京管道完整性关键技术，针对国产化 X60 管线钢开展研究，在管道漏磁内检测、缺陷评价、复合材料补强修复方面，取得多项成果，初步建立了较为适用的陕京管道完整性技术体系<sup>[16]</sup>；2005 年中石油引进了国外 PII 公司的高清晰度内检测技术，在大港储气库配套管线港清(复)线 711 mm 上首次应用获得成功；2005 年中石油引进了英国导波公司的超声导波检测技术和方法，并在全国推广应用；2006 年 9 月，在加拿大 IPC 管道国际会议上，北京管道公司发表了“陕京管道完

整性管理最佳实践”的大会主题报告<sup>[17]</sup>；2007 年中石油引进 TNO-RISURVE、ANSYS、ABQUS 等管道力学分析方法，上述技术方法至今仍在线路场站风险管理中发挥重要作用，继续完善了完整性管理体系，形成包含线路、站场、储气库、系统平台的完整性控制与安全保障体系，建立了管道安全与材料测试实验室。2008 年以来发布了行业标准管道公众警示程序，规范管道第三方日常管理活动；2009 年中石油管道材料测试与安全实验室国家认证认可委员会 CNAS 证书，构建了完整性管理标准规范体系，共牵头发布制订企业和行业 79 部完整性管理标准<sup>[18]</sup>，2007 年—2009 年中国石油管道公司牵头开展管道完整性管理体系研究，针对所辖各类型管道开展研究技术与管理体系，初步建立管道完整性 GIS 系统；2009 年中石油制定了一套中石油集团公司的企业标准 SY/T1080.1-8-2009 系列标准；2011 年中石油管道完整性管理系统(PIS)上线运行，中石油所属管道企业全面应用；2011 年中石油管道公司针对在役管道螺旋焊缝检测、评价、修复关键技术取得重要进展，与 PII 共同研发螺旋焊缝三轴高清检测技术，解决了东北管网螺旋焊缝检测的难题；2012 年螺旋焊缝检测与评价技术在卡尔加里国际管道大会上宣读成果，并被授予全球管道奖；2014 年国家能源局发布了应力腐蚀 SCCDA 评估技术标准<sup>[19-20]</sup>。自 2015 年以来，我国完整性管理快速高质量发展，相继发布了《SY/T6975-2014 管道系统完整性管理实施指南》<sup>[21]</sup>、《GB32167-2015 油气管道系统完整性管理规范》<sup>[22]</sup>等国家及行业标准。同时，三轴超高清数字

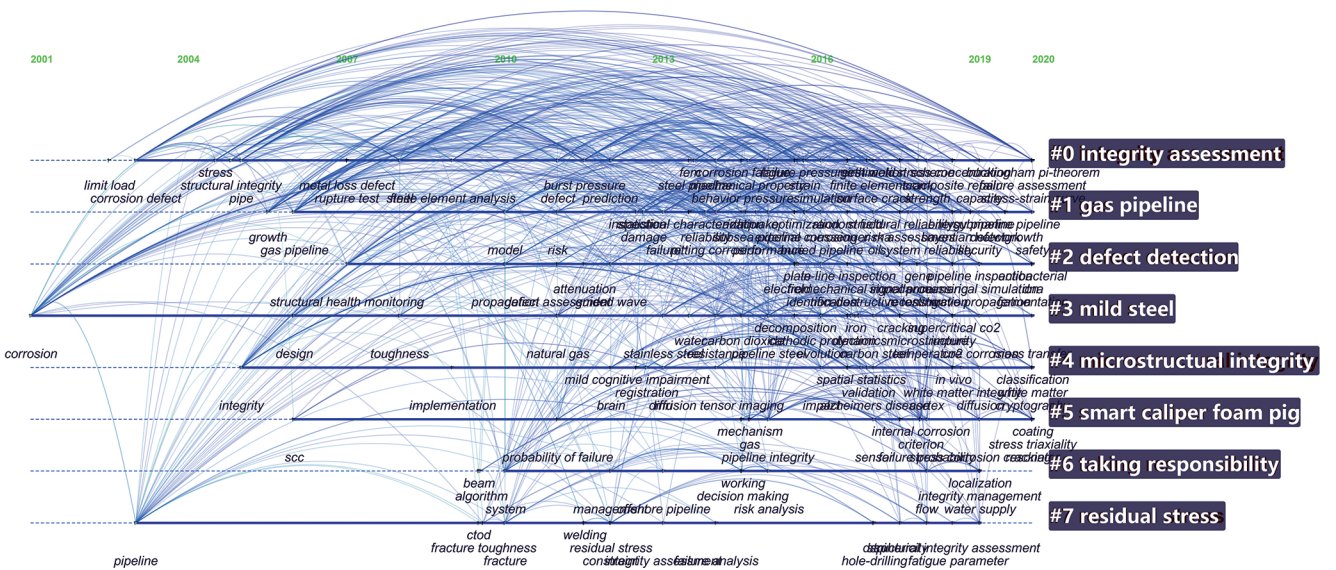


图 1 基于关键词分析的管道完整性发展进程  
Fig. 1 Pipeline integrity development process based on keyword analysis.

化亚毫米级复合检测技术国产化、中石化智慧管道系统中石化所属管道企业全面推广,基于数据孪生的智慧管网建设在中俄东线成功完成并应用、站库区完整性管理技术日趋成熟和应用,这些均标志着我国在油气管道系统完整性关键技术与工业化应用方面取得重要进展。

## 1.2 管道完整性研究热点

目前国际上对管道完整性研究的热点问题集中在内腐蚀检测<sup>[23-25]</sup>、残余应力与退化曲线<sup>[26]</sup>、智能清管器、漏磁检测、低碳钢<sup>[27]</sup>等方向。国内研究热点则主要分布在管道内检测器开发与应用、无损检测技术(包括漏磁检测<sup>[28-32]</sup>、电磁超声检测以及多功能复合检测技术等)、完整性评估理论体系、管道管材失效控制、维修技术以及风险评估与控制技术等。

管道完整性管理按照资产管理结构划分为管道本体、管道防腐、管道地质灾害和周边环境、站场及设施、地下储气库等5大类<sup>[33]</sup>。针对各类结构开展针对性的检测监测、风险管控、抢维修、应急与决策支持技术研究。建立了完善的管道完整性管理的标准体系、管理体系和技术体系<sup>[34-38]</sup>,提出了管道完整性管理的6步循环,整体包括数据采集、高后果区识别、风险评估、完整性评价、减缓与维修、效能评价,提出了管道完整性数据和检测、评估等技术的关键环节,地

理信息系统和企业资产管理系统与构架,给出了管道完整性管理体系的实施流程。

## 1.3 我国发展现状

我国在管道完整性领域的研究与2006年左右形成聚类,略晚于美国、英国、加拿大与澳大利亚,但截止目前发文量仅次于美国位列第二,如图3所示。当前我国主要发展的管道完整性研究与成果包括以下几个方面。

### 1.3.1 完整性管理体系

我国学者相继提出了完整性管理需覆盖管道站场、海底管道、燃气管网、集输管网、LNG接收站、储气库设施;完整性专项技术包括定量风险评估技术,地质灾害风险控制技术、管道内检测技术,有限元仿真模拟技术,泵机组、压缩机组在线检测与故障诊断技术,失效分析技术等需要深入研究,大量的实践证明管道安全预测、检测、预防、分析、诊断等方法和技术,对降低事故发生频率起了很大的作用,我国管道平均事故率统计数据由0.4次/每公里年降低为0.25次/每公里年,西气东输、陕京系统的事故率均低于在0.1次/每公里年,达到安全管理的国际一流水平。

### 1.3.2 完整性控制技术

我国分别对管道管体、站场与储气库等附属设施

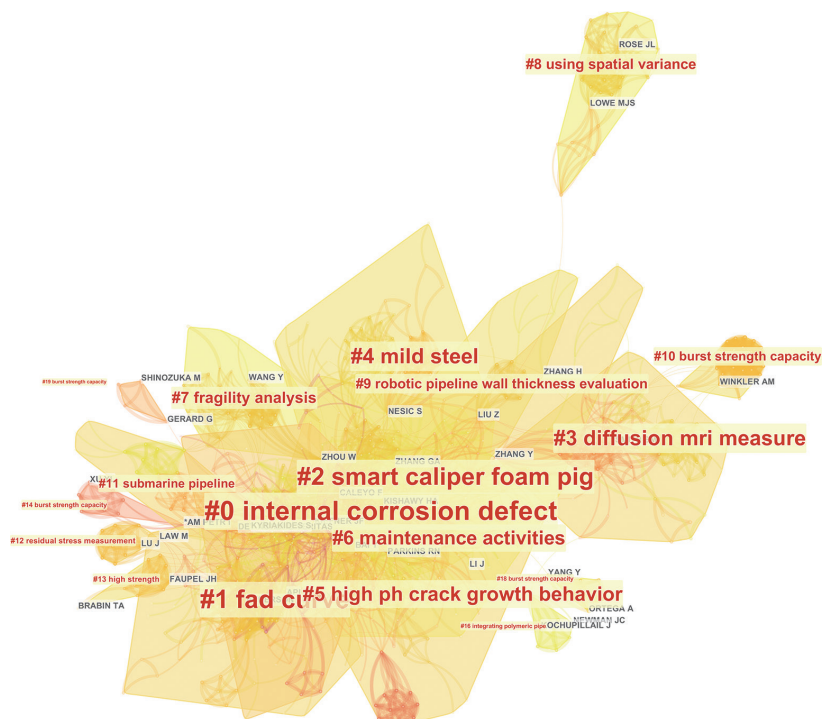


图2 管道完整性研究主题聚类

Fig. 2 Pipeline integrity research topic clustering.



图3 管道完整性研究国家发文量与中心度

Fig. 3 National publication volume and centrality of pipeline integrity research.

形成了较为全面的完整性控制技术。针对管道本体,从管道内外腐蚀检测、残余应力使用安全性、管道韧性材料起裂评估等多方面保障管道安全性。建立管道完整性评估理论体系,针对管道氢致开裂<sup>[40-42]</sup>、环焊缝/螺旋焊缝<sup>[43-48]</sup>/平面型缺陷评估理论与完整性评估模型,解决了老旧管线螺旋焊缝量化评价的难题。在可靠性、油气介质泄漏、地震灾害、管道地区等级升级等风险评价与控制技术也有一定成果,并建立了基于风险评价的管道维护决策支持系统。

### 1.3.3 管道现代信息技术

经过 20 余年的发展,我国油气管道完整性管理技术日臻成熟。从油气长输管道的完整性管理逐步向油气设施装备、城市燃气管道、油气田集输管网的完整性方向扩展,并取得多项技术创新成果<sup>[49-52]</sup>,通过建立管道完整性管理安全管控模式,消除了大量安全隐患,通过在各个方法的技术创新建立了管理中新的决策模式,大大提高了决策的智能性,实现了油气设施检测维修的有效性<sup>[50]</sup>。其中管道信息化在推进完整性管理的智能化和标准化建设等方面发挥主要作用,通过在技术标准建立、数据存储管理、系统架构和决策支持等方面开展工作,提升了数据的整体价值以及数据应用水平<sup>[54-59]</sup>。管道完整性管理利用管道历史数据资料,例如建设期数据、内外检测数据、日常运行数据、外部环境数据等,经校准、对齐、整合,以构建统一的管道大数据库,从而形成管道多源大数据<sup>[60]</sup>,通过搭建大数据分析平台的形式,实现可视化决策支持。

### 1.3.4 管道应急技术

我国专家学者通过数值模拟的方法研究油气输送介质在泄漏后的扩散速度和范围<sup>[61-67]</sup>,以辅助应急抢险抢险设备研发以及各层级不同险种的应急抢险机

制的完善,有效的提高了对管道突发事故的处置能力。截至目前,相对完善的管道泄漏维抢修技术包括:开孔封堵、管内智能封堵、外卡夹具,以及可用于尚未发生泄漏的含缺陷管道的复合材料修复技术。此外,厌氧型密封胶密封连接、针孔泄漏修复夹具等新型修复技术也为管道维抢修提供了更多的选择<sup>[67-70]</sup>。

## 2 我国管道完整性研究存在瓶颈

### 2.1 高级钢与老旧管道焊缝检测技术交叉应用困难

老旧管线存在不同程度腐蚀、裂纹、应力集中等缺陷。随着 X80 级以上高钢级管道的应用,以及在役老旧管道越来越接近失效的高发期,环焊缝开裂成为管道失效的主要因素。管道应力状态长期处于交变载荷环境,有的处于河谷地带、大江大河穿跨越等地段。目前高清内检测技术难以有效量化焊缝的体积型和裂纹型缺陷,并且受到诸多条件限制,环焊缝裂纹检测问题成为制约管道安全的世界性难题。需要研究复杂应力状态下高钢级焊缝容许的应力、应变极限状态,以及焊接的金相组织结构、焊接工艺热处理、焊缝的最大失效抗力等多因素耦合的问题,尽快建立焊缝内检测数据与无损检测射线图像的表征关系,找出存在的缺陷。

### 2.2 天然气管道泄漏监测仍存在技术困难

天然气管道泄漏监测方法较多,各有利弊,但整体技术亟待完善提高。数据分析法主要依据 SCADA 采集的数据,以及流量计温度、压力、流量等数据找出泄漏的位置,缺点是定位精度低、反应慢。次声原理法受环境噪声的影响,加大了对泄漏信号提取的难度,影响了泄漏监测与定位,小泄漏的判断定位难度较大;负压波法要求较大的压力降,适用于大泄漏或突发泄漏;音波声波法因其波长短、频率高等自身特点,衰减速度比较快,长距离很有可能检测不到信号。

### 2.3 公共服务与第三方防范技术亟待完善

我国尚未建立国家层面统一的挖掘报警系统,以及统一的管道安全特定施工作业申请与审批程序。未建立国家管道地理信息系统和与之配套的施工挖掘信息查询统一呼叫电话,未采取多举措预防施工挖掘过程中损坏管道事故的发生。

对打孔盗油和施工挖掘损坏仍以人防为主。社会参与度低,预警预报技术没有实质性突破,北斗卫星、

遥感技术、无人机巡线技术仍然处于局部应用和适用发展阶段,不能完全代替人工巡线;光纤第三方入侵技术仍然存在误报率高、灵敏度低、光纤振动信号微弱等情况。基于大数据的第三方防范技术、基于视频的第三方影像识别技术还处于研究阶段。

## 2.4 地区等级风险评价和管控面对动态挑战

随着现代城市扩张,原本人口稀少的地区已变成人口稠密的市区中心地带。根据中国石油所属22个地区分公司的初步调查,地区等级升级点达到9800多处。越来越多的管道地区升级情况对在役管道的安全管理带来了更大的挑战,因此非常有必要采取合理的风险控制措施以应由此产生的一系列问题。我国目前缺乏地区等级升级的风险评价标准和管控措施,政府和企业对地区升级管控均有顾虑,出台管控标准后对企业风险管控目标的落实是一个挑战。

## 2.5 智慧管道成果尚不能满足需求

智慧管道突出特点是管道数据深度挖掘与智能化决策支持。“智慧管道”概念衍生于“智慧地球”和“智慧城市”。2017年6月,中国石油集团公司依托中俄东线天然气管道工程试点建设了首条智能化管道。同年11月,中国石化发布了智能化管道管理系统2.0版。在2018年、2019年的中国智能管道大会上,中国石油管道公司和中国石化管道储运公司分别发布了油气智慧管网系统设计方案。目前,针对智能管道、智慧管网的宏观设计较多,但具体的实现方法与问题讨论相对较少。国内智慧管道建设均处于数据采集和存储阶段,管道系统大数据尚未形成。大数据的应用案例相对较少,仅限于在管道风险分析、内检测等方面的初步探索,缺乏深度分析和决策支持应用;基于大数据的管道泄漏监测和预警、灾害预警、腐蚀控制管理仍然属于空白;基于大数据的决策支持平台仅完成系统架构搭建,未实现决策支持功能的落地。如何提升模型的适用性和针对性,有效应用于管道运行管理及评估,把各环节产生的数据、信息系统等集成于一体还有待攻关。

## 2.6 管道信息安全面临威胁

在管道智慧化建设的同时,对包括蓄意攻击及非蓄意行为导致管道信息空间出现故障或异常的信息安全威胁这一新型、复杂安全隐患,缺乏充分认识和有效检测与预警方法。随着数字时代的来临,网络攻击呈现新特点、新趋势。针对油气管道系统有效的威胁

通常是通过本地或远程访问在网络域中启动,模仿组件故障,同时隔离网络与物理系统之间的连接,从而使油气运输物理过程不受控制。这将会导致油气运输过程延迟、动力机组拒绝服务(DoS),从而导致核心业务停摆或能量/物料的意外释放。例如,美国最大成品油管道运营商Colonial Pipeline因受到勒索软件攻击,被迫关闭其美国东部沿海各州供油的关键燃油网络长达一周<sup>[71]</sup>。与物理实体在自然界的失效相比,信息安全威胁对油气管道的运行具有创造更大灾难性后果的潜力<sup>[72]</sup>。因此在信息安全威胁深度跨域迭代以及攻击模式多样化的双重挑战下,急需从“信息-物理-社会”系统视角,研究油气智慧管道信息安全威胁驱动的新型致灾机理,创建早期预警方法,实现油气管道智慧、安全、可持续并行发展。

## 3 未来我国管道完整性技术发展方向

针对我国长输油气管道所面临的问题,未来发展必需紧紧围绕管道本质安全和公共安全风险控制为核心,全面实现管网的高效运行和安全管控,保障能源供给。在管道完整性技术层面上将建立基于全生命周期的智慧管网的风险管控机制,全面实现系统智能化数据采集、风险因素精准识别、系统自适应反馈与控制、高精度的完整性检测评价等,最大限度降低失效概率,减少次生灾害发生。

### 3.1 油气管道检测技术及装备

通过理论研究、计算模拟与试验相结合的方法,研究电磁控阵、压电超声、自动超声、瞬变电磁、主动声波、机器人、高频导波等信号的发射与接收技术,探索检测信号传输过程中遇到裂纹、缺陷时的反射信号规律,开发反射信号的数据处理系统,形成裂纹、缺陷的显示方法,最终开发管道内检测、环焊缝检测、外检测技术与装备,填补国内在管道检测技术和设备方面的空白,为油气管道的长周期安全运行、定期检测、完整性评估等提供技术支持,减少油气管道事故的发生率。主要可围绕管道缺陷检测、管道状态监测检测与定位等方面相关技术开展,如图4所示。

### 3.2 智慧管道系统信息安全威胁致灾风险预警

针对智慧管道信息安全威胁新型攻击行为建模,重点研究3种典型攻击模式(多步攻击、观察性攻击、横向移动攻击)的动态行为特点,研究典型油气运输

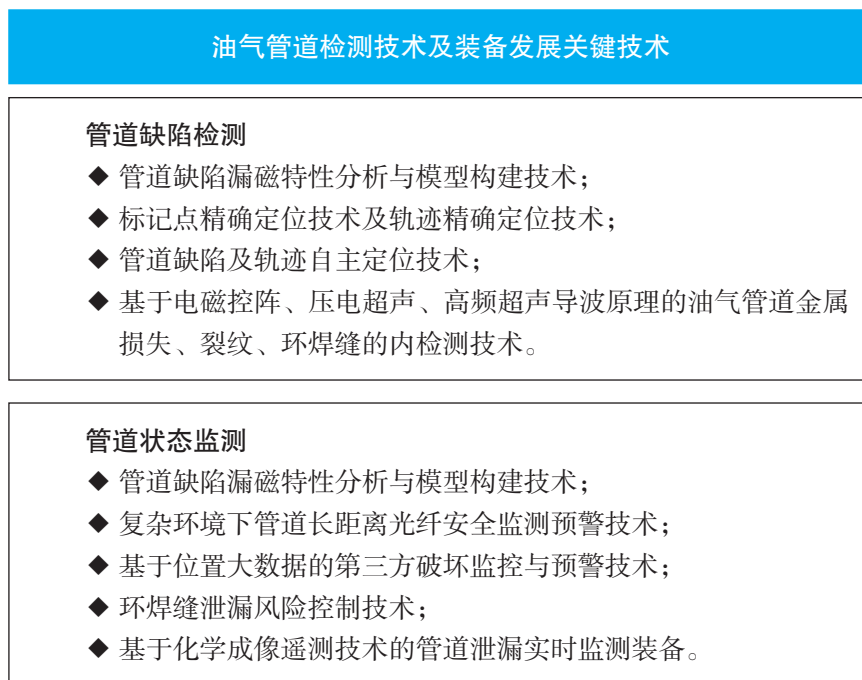


图 4 油气管道检测技术及装备发展关键技术

Fig. 4 Development Key technology of oil and gas pipeline detection technology and equipment.

环节(长输管道段、海底管道段、沿海接收站、海上浮式输运段等)的建模方法。开展信息安全威胁的跨区域响应及其时间依赖性研究,研究攻击行为和智慧管道系统固有响应机制之间的动态交互特性,建立攻击者行为预测和安全态势评估方法。

基于网络与系统功能的信息安全威胁跨域传播机理研究。研究信息安全威胁下管道各系统破坏与功能损失之间的关系。研究被攻击系统各种状态(渗透状态,受影响状态和受到损害的状态)的判定和定量建模,建立含状态转移、故障积累强度以及暂态过程持续时间的定量表征方法,提出智慧管道系统安全态势失稳奇点和判据。建立不同节点漏洞组合的攻击能力和系统脆弱性评价方法,并分析系统脆弱性指标对各种攻击类型时间窗口的敏感性。

### 3.3 公共安全的重大隐患监测与防护

针对长输油气管道中的管输产品泄漏、第三方破坏、地质灾害、大型输油泵故障、杂散电流腐蚀等威胁,通过理论研究、仿真计算、现场试验方法,围绕微弱泄漏信号提取与定位、长距离光纤传感与复杂信号识别、地质灾害识别监测、大型输油泵多源信息融合诊断、罐区激光多组分气体泄漏探测、高压直流干扰防御和评价等技术难点,开展油气管道安全状态监测与防护技术研究。研制主动激励式输油管道泄漏监

测技术及设备、基于复合模式光时域反射分布式光纤传感原理的长距离油气管道安全预警技术及设备,地质灾害作用下管土耦合监测技术、建立个性化故障模式库和诊断标准库,开发多源信息融合诊断和预测维护系统、布设安装方案和综合监测系统,形成油气管道杂散电流干扰危害评价准则和油气管道安全监测及防护国家标准,提高管道风险预控水平。

### 3.4 风险评价量化

针对特殊敷设方式和环境敏感区管段风险评价量化程度不高的问题,以“中国石油管道失效库”积累的典型失效案例为基础,结合中石油 2009 年以来风险评价工作识别的风险点开展研究。采用不确定性方法进行管道及油罐失效概率理论研究,改进管道及油罐失效概率模型,通过生命线工程影响范围仿真计算、管道和油罐失效后果仿真计算,获得灾害强度分布和风险值,进行灾害分级、风险分级和隐患分级,提出隐患治理与风险管控措施。主要可围绕管道安全评价与风险预警方面相关技术开展,具体技术可包括:(1)环境敏感区和特殊敷设方式下的定量风险评价技术;(2)环境敏感型高后果区泄漏事故仿真与决策支持技术;(3)管道信息安全威胁致灾风险分析与早期预警;(4)多因素耦合下作用下的管道安全评定技术。

### 3.5 维抢修技术与设备

针对油气管道智能维抢修封堵器的结构设计、速度及姿态控制难题及高钢级、高压、厚壁油气管道的封堵密封严密性和可靠性问题。基于现有国内油气管道维抢修技术基础,结合国外成熟、先进的油气管道维抢修技术,以“油气管道在线开孔封堵”技术为依托,针对近年的大口径规格管道(如中俄东线、陕京四线等)进行相应维修、抢修装备的研发设计。针对国际上最先进的“管道智能维抢修封堵器”开展攻关研制,搜集国内外的相关资料,通过对该装备的行走、锚定机械设计以及无线通信定位等关键技术进行攻关,掌握该设备的自主设计、研发、应用。具体技术可包括:(1)油气管道无痕(免三通)维抢修技术及工艺研究;(2)油气管道泄漏快速疏导与堵漏技术及装备;(3)特殊地区管道高效维抢修技术。

### 3.6 设施完整性评价准则

针对以高钢级为主的管道完整性评价准则不确定的问题,通过理论计算、有限元模拟、试验研究和现场验证方法,研究高钢级管道完整性评价技术。通过研制开发小冲杆试验装置及微探针压痕测试方装置,建立油气管道微损试样试验方法。以中石油干线管网在用离心式压缩机失效案例为基础,通过建立核心部件失效模式库,建立离心式压缩机组损伤、腐蚀及疲劳评价方法。具体技术可包括:(1)高钢级管道完整性与适用性评价技术;(2)高钢级管材各向异性与变形和断裂行为技术;(3)大口径高压油气管道韧性止裂关键技术;(4)复杂载荷下环焊缝的缺陷容限判定技术;(5)低温低应力管材脆性断裂控制技术;(6)高压/超高压直流输电干扰下管道腐蚀控制技术;(7)X80管道在内压及外载条件下的承压能力及缺陷增长规律研究;(8)信息安全威胁下智慧管道新型失效机理与致灾风险。

### 3.7 安全与应急辅助决策支持

围绕管网系统安全综合评价技术和大数据分析技术两条主线,建立管道安全保障技术体系及安全保障决策支持平台,实现管道重大灾害区域预测及应急资源调配决策支持;通过大型物理试验模型和多种环境下的工程示范作为测试手段和应用平台,实现管道安全保障技术体系的工程应用。

### 3.8 管道完整性智能化管控

建设智能化管控系统,应用大数据、移动互联、

人工智能等先进技术,联动管道本体及附属设施、管线运行、管线隐患、周边环境等数据信息,集管线运行管理、应急响应管理、隐患治理管理、巡线管理应用、大数据应用等功能为一体,形成数字化、可视化、标准化的智能管控模式。

## 4 保障措施和对策建议

### 4.1 政策保障及对策建议

#### 4.1.1 完整性管理体系建立与审核

针对国内管道完整性管理存在的问题,从企业完整性管理体系建立的框架、技术、方法、内容出发,发展完整性管理体系的质量控制、技术培训和审核等关键要素的具体技术与方法。

#### 4.1.2 管理体制机制

研究我国油气管道全生命周期的管理体制、机制建设方案,国家管网与地方管网的供需关系,上下游产业协调和供需关系以及油气田和社会资源的衔接。

#### 4.1.3 管道安全立法方面

持续增强对油气管道安全管理的研究,及时发现现行法律法规中随着社会发展产生的与管道安全管理实际情况不相匹配的问题,解决油气管道安全管理相关的法律《石油天然气管道保护法》、《特种设备安全法》及新《安全生产法》之间相互矛盾的问题,提供配套标准和相关制度的支撑,合并与石油石化行业长输油气管道相关技术标准的要求存在的差异。在完善技术支持体系建设的基础上,提高与管道安全相关的法律法规的适用性和执行力。

建立管道地役权制度,保障管道企业的用地权利和土地权利人的合法利益,化解矛盾冲突,改善企民关系。调节涉及民事关系,管道通过农村集体土地和他人取得使用权的国有土地、影响土地使用的,管道企业应当给予补偿。

### 4.2 科研能力建设保障及对策建议

#### 4.2.1 国家级管道安全与完整性实验室建设

依托优势学科开展技术研发工作,努力筹建国家级管道安全重点实验室,配套建立大型工程实验室,建议包括:管道工艺实验室、管道安全实验室、管道材料实验室、管道防腐实验室、管道环保实验室、管道完整性实验室、管道焊接实验室、管道内检测实验室、维抢修技术与装备材料实验室、动力诊断实验室、智慧管道信息安全实验室等。实现产学研一体化,用



于油气管道安全与完整性领域主体技术的研发。

在科技创新能力建设上, 国家级管道安全重点实验室以油气设施安全、完整性、大数据及工程实践为主体的产学研一体化工程中心, 瞄准世界前沿技术, 实现研发技术产业化。

#### 4.2.2 持续稳定科技研发投入强度

建议依据国家科技投入要求, 按照国家油气管网公司与各大石油天然气公司科技投入平均水平, 建立油气长输管道安全与应急科研经费稳定投入机制。

#### 4.2.3 搭建国内外管道技术交流平台

强化交流合作, 坚持“1+N”的科技创新模式, 加强同国内外企业、科研机构合作与交流。积极参加国际管道协会(PRCI)研究工作, 实现与国外管道研究机

构技术共享。建立以中国国际管道会议为主、国际研习会为辅的技术交流平台, 及时掌握国内外先进技术。加大人才引进力度, 积极引进和培育高端技术人才。

#### 4.2.4 加强科技成果共享及推广应用

改进研发组织模式, 试行科技项目研究应用一体化, 需求提出部门牵头研究, 并负责应用。开展油气长输管道安全与应急科技成果集成, 将“十三”以来在不同层次、不同地区公司产生的、分散在不同研究单位的科技成果统一集成, 形成系统的技术成果, 在所属管道企业全面推广。建立有效的奖惩机制, 对推广面广、经济效益好的科技成果, 按照一定比例对项目研究团队和应用单位进行奖励。

## 参考文献

- [1] 乔雪峰, 吕骞. 中俄东线开通运营 助推油气管道智能化[EB/OL]. [2020-09-25]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2019/1205/c1007-31491638.html>. [QIAO X F, LV Q. The opening and operation of the China-Russia Eastern route has boosted the intelligence of oil and gas pipelines [EB/OL]. [2020-09-25]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2019/1205/c1007-31491638.html>.]
- [2] 刘杨. 中亚天然气管道上半年向国内输气超 190 亿立方米[EB/OL]. [2020-09-25]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-07/30/content\\_5531272.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-07/30/content_5531272.htm). [LIU Y. The Central Asian gas pipeline delivered more than 19 billion cubic meters of gas to China in the first half of this year [EB/OL]. [2020-09-25]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-07/30/content\\_5531272.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-07/30/content_5531272.htm).]
- [3] United States Congress. PL 90-481 Natural Gas Pipeline Safety Act of 1968 [EB/OL]. [2020-09-25]. <https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/docs/Natural%20Gas%20Pipeline%20Safety%20Act%20of%201968.pdf>.
- [4] United States Congress. HR 3609 Pipeline safety improvement act [EB/OL]. [2020-09-25]. <https://www.congress.gov/bill/107th-congress/house-bill/3609>.
- [5] UK Public General Acts. Pipe-lines Act 1962. [EB/OL]. [2020-09-25]. <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/Eliz2/10-11/58/contents>.
- [6] UK Public General Acts. Pipelines Safety Regulations 1996. [EB/OL]. [2020-09-25]. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/1996/825/contents/made>.
- [7] British Standards Institution. PAS55: 2008 Asset Management [EB/OL]. [2020-09-25]. <https://www.assetmanagementstandards.com/pas-55/>.
- [8] 李杰, 陈超美. Citespace: 科技文本挖掘及可视化(第二版)[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016, 1-5. [LI J, CHEN C M. Citespace: Text Mining and Visualization for Science and Technology (2nd Edition) [M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2016: 1-5]
- [9] MIRZAEI A S, WU G. Residual stress in pipeline girth welds- A review of recent data and modelling[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2019, 169: 142-152.
- [10] MADJID M B, SABAH A A W, ZAHLOUL H, et al. Finite element analysis of the integrity of an API X65 pipeline with a longitudinal crack repaired with single- and double-bonded composites[J]. Composites Part B: Engineering. 2015, 77: 431-439.
- [11] CHALGHAM W, WU K Y, MOSLEH A. System-level prognosis and health monitoring modeling framework and software implementation for gas pipeline system integrity management[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 84, 103671.
- [12] IQBAL H, WAHEED B, HAIDER H, et al. Mapping safety culture attributes with integrity management program to achieve assessment goals: A framework for oil and gas pipelines industry[J]. Journal of Safety Research, 2019, 68: 59-69.
- [13] WANG Y H, HOU X Q, ZHANG P, et al. Reliability assessment of multi-state reconfiguration pipeline system with failure interaction based on Cloud inference[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 137: 116-127.
- [14] CANAVESE G, SCALTRITO L, FERRERO S, et al. A novel smart caliper foam pig for low-cost pipeline inspection—Part A: Design and laboratory characterization[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 127: 311-317.
- [15] RAMELLA C, CANAVESE G, CORBELLINI S, et al. A novel smart caliper foam pig for low-cost pipeline inspection - Part B: Field test and data processing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2015, 133: 771-775.

- [16] 董绍华, 姚伟. 陕京天然气管道完整性管理与实践[J]. 油气储运, 2005, 24(B12): 8-13. [DONG S H, YAO W. Integrity management and practice of Shaanxi-Beijing Natural Gas Pipeline[J]. Oil & gas storage and transportation, 2005, 24(B12): 8-13.]
- [17] 姚伟. 油气管道安全管理的思考与探索[J]. 油气储运, 2014, 33(11): 1145-1151. [YAO W. Consideration and exploration of oil and gas pipeline safety management[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(11): 1145-1151.]
- [18] 董绍华, 王联伟, 费凡, 等. 油气管道完整性管理体系[J]. 油气储运, 2010, 29(9): 641-647. [DONG S H, WANG L W, FEI F, et al. Oil and gas pipeline integrity management system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(9): 641-647.]
- [19] 国家能源局. SY/T 0087-2016 钢质管道及储罐腐蚀评价标准[S]. 北京: 石油工业出版社, 2016. [National Energy Administration. SY/T 0087-2016 Standard of steel pipelines and tank corrosion assessment[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.]
- [20] 国家能源局. SY/T 6975-2014 管道系统完整性管理实施指南[S]. 北京: 石油工业出版社, 2014. [National Energy Administration. SY/T 6975-2014 Guidance for pipeline system integrity management application [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.]
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 32167-2015 油气输送管道完整性管理规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. [The Central People's Government of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB 32167-2015 Oil and gas pipeline integrity management specification[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.]
- [22] ASKARI M, ALIOFKHAZRAEI M, AFROUKHTEH S. A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 71: 102971.
- [23] MELO C, DANN M, HUGO R J, et al. Extreme value modeling of localized internal corrosion in unpiggable pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020, 182: 104055.
- [24] WANG Z Q, ZHOU Z Y, XU W C, et al. Study on inner corrosion behavior of high strength product oil pipelines[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 115: 104659.
- [25] MAKHUTOV N A, PERMYAKOV V N, REZNIKOV D O. Strength of trunk pipelines with critical damages[J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 20: 9-16.
- [26] BOUKORTT H, AMARA M, MELIANI M H, et al. Hydrogen embrittlement effect on the structural integrity of API 5L X52 steel pipeline[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(42): 19615-19624.
- [27] LIU B, HE L Y, ZHANG H, et al. The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method[J]. Measurement, 2017, 103: 275-282.
- [28] SHI P P, BAI P G, CHEN H E, et al. The magneto-elastoplastic coupling effect on the magnetic flux leakage signal[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 504: 166669.
- [29] YANG L J, WANG Z J, GAO S W, et al. Magnetic flux leakage image classification method for pipeline weld based on optimized convolution kernel[J]. Neurocomputing, 2019, 365: 229-238.
- [30] WU L B, YAO K, SHI P P, et al. Influence of inhomogeneous stress on biaxial 3D magnetic flux leakage signals[J]. NDT & E International, 2020, 109: 102178.
- [31] WU D H, LIU Z T, WANG X H, et al. Composite magnetic flux leakage detection method for pipelines using alternating magnetic field excitation[J]. NDT & E International, 2017, 91: 148-155.
- [32] 王宏安, 陈国明. 基于深度学习的漏磁检测缺陷识别方法[J]. 石油机械, 2020, 48(05): 127-132. [WANG H A, CHEN G M. Magnetic flux leakage defect detection based on deep learning[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(05): 127-132.]
- [33] 黄维和, 郑洪龙, 吴忠良. 管道完整性管理在中国应用 10 年回顾与展望[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 1-5. [HUANG W H, ZHENG H L, WU Z L. Overview of pipeline integrity management application over the past decade and its prospect in future in China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 1-5.]
- [34] 李鹤林. 油气管道运行安全与完整性管理[J]. 石油科技论坛, 2007(2): 10-25. [LI H L. Oil and gas pipeline operation safety and integrity management[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2007(2): 10-25.]
- [35] 赵新伟, 李鹤林, 罗金恒, 等. 油气管道完整性管理技术及其进展[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(1): 129-135. [ZHAO X W, LI H L, LUO J H, et al. [J]. Oil and gas pipeline integrity management technology and its progress[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(1): 129-135.]
- [36] 杨祖佩, 王维斌. 油气管道完整性管理体系研究进展[J]. 油气储运, 2006, 25(8): 7-11. [YANG Z P, WANG W B. Research progress of oil and gas pipeline integrity management system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2006, 25(8): 7-11.]
- [37] 董绍华, 杨祖佩. 全球油气管道完整性技术与管理的最新进展—中国管道完整性管理的发展对策[J]. 油气储运, 2007, 26(2): 1-17. [DONG S H, YANG Z P. The world oil & gas pipeline integrity management and technology latest development and Chinese pipeline countermeasure[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2007, 26(2): 1-17.]
- [38] 董绍华, 韩忠晨, 张余. 管道设计与完整性管理失效控制案例分析[C]// 中国国际管道会议(CIPC2013)论文集编委会, 中国国际管道会议 CIPC2013 论文集. 北京: 中国石化出版社出版, 2013: 252-259. [DONG S H, HAN Z C, ZHANG Y. Failure control case analysis of pipeline design and integrity management [C]// Editorial Board of Proceedings of China International Pipeline Conference (CIPC2013), Proceedings of China International Pipeline Conference (CIPC2013). Beijing: China Petrochemical Press, 2013: 252-259.]

- [39] 李敬法, 苏越, 张衡, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展[J]. 天然气工业, 2021, 41(04): 137-152. [LI J F, SU Y, ZHANG H, et al. Research progresses on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(04): 137-152.]
- [40] 张圣柱, 程玉峰, 冯晓东, 等. X80 管线钢性能特征及技术挑战[J]. 油气储运, 2019, 38(05): 481-495. [ZHANG S Z, CHENG Y F, FENG X D, et al. Performance characteristics and technical challenges of X80 pipeline steel[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(05): 481-495.]
- [41] 付威, 吕宇玲. 油气管道在役焊接烧穿及氢致开裂预测[J]. 热加工工艺, 2018, 47(23): 241-245. [FU W, LV Y L. Burn-through and hydrogen induced cracking prediction of oil and gas pipeline during in-service welding[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(23): 241-245.]
- [42] 甘丽君. X100 管线钢焊接接头在 H<sub>2</sub>S 环境下氢致开裂及氢捕获行为研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018. [GAN L J. Hydrogen-induced cracking and hydrogen trapping behavior of welded X100 pipeline steel in H<sub>2</sub>S environments[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.]
- [43] 沙胜义, 项小强, 伍晓勇, 等. 输油管道环焊缝超声波内检测信号识别[J]. 油气储运, 2018, 37(07): 757-761. [SHA S Y, XIANG X Q, WU X Y, et al. Ultrasonic ILI signal identification technology for girth weld defects of oil pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(07): 757-761.]
- [44] 张足斌, 王婷婷, 焦震. 含体积型缺陷管道的剩余强度分析[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(10): 105-109+117. [ZHANG Z B, WANG T T, JIAO Z. Residual strength analysis of pipeline with volumetric defects[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2019, 38(10): 105-109+117.]
- [45] 王佳音, 帅健, 刘道乾, 等. 内压作用下含体积型缺陷弯管极限载荷研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(09): 158-163. [WANG J Y, SHUAI J, LIU D Q, et al. Research on ultimate load of elbow containing volumetric defects under effect of internal pressure[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(09): 158-163.]
- [46] 司成龙. 腐蚀体积参数对 X80 钢级管道剩余强度影响的特性研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018. [SI C L. Study on characteristics of corrosion volume parameters on residual strength of X80 steel pipes[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.]
- [47] 徐鹏飞. 含体积型缺陷输气管道在滑坡作用下剩余强度评价技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018. [XU P F. Research on residual strength evaluation technology of gas pipeline containing volume defects under landslide[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.]
- [48] 全冬禹, 王卫强, 孙邵洋. 管道体积型缺陷剩余强度评价方法误差分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2018, 38(02): 52-56+65. [QUAN D S, WANG W Q, SUN S Y. Error analysis of residual strength assessment methods for pipeline with volume defect[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2018, 38(02): 52-56+65.]
- [49] 杨玉锋, 郑洪龙, 余东亮, 等. 城市燃气输配管道完整性管理[J]. 油气储运, 2013, 32(8): 845-850. [YANG Y F, ZHENG H L, YU D L, et al. Integrity management of urban gas distribution pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(8): 845-850.]
- [50] 陈利琼, 李云云, 党美娟, 等. 油气管道系统资产完整性的实现[J]. 油气储运, 2014, 33(12): 1292-1296. [CHEN L Q, LI Y Y, DANG M J. Realization of oil and gas pipeline system asset integrity[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(12): 1292-1296.]
- [51] 马彬, 江枫, 马旭卿, 等. 燃气管道完整性管理体系架构及标准体系[J]. 煤气与热力, 2019, 41(10): 38-40. [MA B, JIAN G F, MA X Q, et al. Gas pipeline integrity management system architecture and standard system [J]. Gas & Heat, 2019, 41(10): 38-40.]
- [52] 孙青峰, 杨玉锋, 赵春磊, 等. 城镇燃气管网完整性管理体系研究与实践[J]. 天然气工业, 2020, 40(03): 123-129. [SUN Q F, YANG Y F, ZHAO C L, et al. Integrity management system of gas distribution pipeline: Research and practices[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(03): 123-129.]
- [53] 冯庆善. 管道完整性管理实践与思考[J]. 油气储运, 2014, 33(03): 229-232. [FENG Q S. Practice and cogitation on pipeline integrity management[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(03): 229-232.]
- [54] 周利剑, 贾韶辉. 管道完整性管理信息化研究进展与发展方向[J]. 油气储运, 2014, 33(6): 571-576. [ZHOU L J, JIA S H. Progress and development in the informatization of pipeline integrity management[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(6): 571-576.]
- [55] 贾韶辉, 周利剑, 郭磊, 等. 基于完整性数据库的管道应急信息化技术[J]. 油气储运, 2014, 33(6): 582-587. [JIA S H, ZHOU L J, GUO L, et al. Information technology for emergency response based on pipeline integrity database[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(6): 582-587.]
- [56] 郭磊, 许芳霞, 周利剑, 等. 管道完整性系统数据集成与应用[J]. 油气储运, 2014, 33(6): 593-598. [GUO L, XU F X, ZHOU L J, et al. Data integration and application of pipeline integrity management system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(6): 593-598.]
- [57] 李振宇, 黄保龙, 周利剑, 等. 油气管道站场完整性管理数据模型[J]. 油气储运, 2014, 33(6): 599-603. [LI Z Y, HUANG B L, ZHOU L J, et al. Data model for the station integrity management along oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(6): 599-603.]

- [58] 刘亮, 韩文超, 丁淑春, 等. 面向服务架构的管道完整性管理系统[J]. 油气储运, 2014, 33(6): 604–608. [LIU L, HAN W C, DING S C, et al. Pipeline integrity management system with service-oriented architecture[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(6): 604–608.]
- [59] 杨宝龙, 刘晓元, 周利剑, 等. 基于信息生态学理论的管道完整性管理系统[J]. 油气储运, 2014, 33(6): 609–614. [YANG B L, LIU X Y ZHOU L J. Pipeline integrity management system based on information ecology theory[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(6): 609–614.]
- [60] 关中原, 高辉, 贾秋菊. 油气管道安全管理及相关技术现状[J]. 油气储运, 2015, 34(05): 457–463. [GUAN Z Y, GAO H, JIA Q J. Oil/gas pipeline safety management and its technology status[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(05): 457–463.]
- [61] 李柯. 天然气长输管道泄漏工况数值模拟[J]. 油气储运, 2014, 33(1): 20–27. [Li K. Numerical simulation on leakage of long-distance gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(1): 20–27.]
- [62] 毛小虎, 郝永梅, 邢志祥, 等. 城市天然气管道动态泄漏扩散特性模拟分析[J]. 油气储运, 2014, 33(4): 374–379. [MAO X H, HAO Y M, XING Z X, et al. Simulation of dynamic leakage and diffusion characteristics of urban gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(4): 374–379.]
- [63] 王志方, 李熠辰, 张玉良, 等. 天然气站场泄漏爆炸对站控室影响的模拟分析[J]. 油气储运, 2014, 33(7): 740–743. [WANG Z F, LI Y C, ZHANG Y L, et al. Simulation of influences of leakage-induced explosion on control chamber at gas compressor station[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(7): 740–743.]
- [64] 王琳, 贺宝龙, 潘旭海. LNG泄漏在地面上蒸发速率的计算[J]. 油气储运, 2014, 33(6): 648–652. [WANG L, HE B L, PAN X H, et al. Calculation of evaporation rate of leaked LNG on the ground[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(6): 648–652.]
- [65] 范开峰, 王卫强, 李亮, 等. 城市燃气管道稳态泄漏数值模拟[J]. 油气储运, 2013, 32(8): 851–856. [Fan K F, Wang W Q, Li L, et al. Numerical simulation of steady state leakage for urban gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(8): 851–856.]
- [66] 戴联双, 白楠, 薛鸿丰, 等. 油品泄漏应急处理的受控燃烧[J]. 油气储运, 2013, 32(11): 1191–1193+1205. [Dai L S, Bai N, Xue H F, et al. Controlled combustion for oil leak emergency treatment[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(11): 1191–1193+1205.]
- [67] 张仕民, 梅旭涛, 王国超, 等. 油气管道维抢修方法及技术进展[J]. 油气储运, 2014, 33(11): 1180–1186. [ZHANG S M, MEI X T, WANG G C, et al. Oil/gas pipeline maintenance and emergency repair method and its progress[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(11): 1180–1186.]
- [68] 臧泉龙, 杨棕景, 明学江, 等. 登陆管道突发事件智能化应急处置体系开发研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(20): 94–96. [ZANG Q L, YANG Z Q, MING X J, et al. Development and research of intelligent emergency response system for landing pipeline emergencies[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(20): 94–96.]
- [69] 沈乐, 马修兵. 复杂工况应急补水跨河段管道安装技术研究[J]. 四川建筑, 2019, 39(02): 290–292. [SHEN L, MA X B. Research on the installation technology of emergency water replenishment across river sections in complex working conditions[J]. Sichuan Architecture, 2019, 39(02): 290–292.]
- [70] 卢昱帆, 陈国伟, 许洁. 天然气集输管道损害因素分析及治理措施探讨[J]. 清洗世界, 2019, 35(03): 48–49. [LU Y F, CHEN G W, XU J. Analysis of damage factors of natural gas gathering and transmission pipeline and discussion of treatment measures[J]. Cleaning World, 2019, 35(03): 48–49.]
- [71] 新华网. 受黑客攻击关闭的美国能源管道重启运营[EB/OL]. [2021–05–14]. [http://www.xinhuanet.com/world/2021-05/13/c\\_1127440667.htm](http://www.xinhuanet.com/world/2021-05/13/c_1127440667.htm). [Xinhua Net. U. S. energy pipelines shut down by hackers are back online[EB/OL]. [2021–05–14]. [http://www.xinhuanet.com/world/2021-05/13/c\\_1127440667.htm](http://www.xinhuanet.com/world/2021-05/13/c_1127440667.htm).]
- [72] 宋婧. 美国多州因网络攻击进入紧急状态 关键基础设施安全敲响“警钟”[EB/OL]. [2021–05–14]. <http://www.cena.com.cn/ic/20210512/111772.html>. [SONG J. U. S. States in State of Emergency over Cyber Attack Raises’ alarm ‘over Critical Infrastructure security[EB/OL]. [2021–05–14]. <http://www.cena.com.cn/ic/20210512/111772.html>.]

(责任编辑 王雨墨 编辑 马桂霞)