

中国油气管道技术现状与发展趋势分析

辛艳萍

中国石油大学胜利学院油气工程学院, 山东 东营 257061

摘要:结合中国油气管道技术的科技发展战略,总结了油气管道技术现状和发展方向。工程设计施工方面,中国已掌握了基于应变和基于可靠性的管道设计技术,开发了高钢级管道焊接、机械化补口、非开挖穿越等技术及装备,今后的科技攻关方向是管道建设智能化和安全高效化;材料与装备技术方面,X 80、X 90 /X 100 等高钢级管材开发与应用技术已走在世界前列,管道关键装备国产化已取得突破性进展,未来的技术攻关方向是提升管道设备智能化水平;油气管道输送工艺方面,易凝高黏原油管道输送技术达到国际领先水平,但成品油顺序输送、仿真优化等技术与国外存在一定差距;油气管道运行维护技术方面,管道完整性管理、安全监测、腐蚀防护等关键技术基本与国外同步,未来将继续推动管网系统可靠性技术工程应用。分析结果表明,中国油气管道的部分关键技术已居世界前列,今后需要在智慧管网建设和运行等方向重点攻关部署。

关键词:油气管道技术;发展现状;发展趋势

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.02.005

Current Situation and Development Trend of Oil and Gas Pipeline Technology in China

Xin Yanping

Shengli College, China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061, China

Abstract: Combined with the development strategy of oil and gas pipeline technology in China, the current situation and development trend of oil and gas pipeline technology are summarized. In terms of engineering design and construction, China has mastered the pipeline design technology based on strain and reliability, and developed high-grade pipeline welding, mechanical patching, trenchless crossing technology and equipment. In the field of materials and equipment technology, X 80, X 90 /X 100 and other high-grade steel pipe development and application technologies have taken the lead in the world. At the same time, a breakthrough has been made in the localization of key pipeline equipment, and the future technical research direction is to improve the intelligence level of pipeline equipment; in the pipeline transportation technology, the pipeline transportation technology of highly condensable and viscous crude oil has reached the international leading level, but there is certain gap between the technology of sequential transportation and simulation optimization of refined oil products and that of operation and maintenance, such key technologies as pipeline integrity management, safety monitoring and corrosion protection are

收稿日期:2020-01-10

基金项目:国家自然科学基金“浮式天然气液化过程中低温冷剂降膜流动与传热特性研究”(51604294)

作者简介:辛艳萍(1982-),女,山东蓬莱人,副教授,硕士,主要研究方向为油气储运安全技术。E-mail:934694569@qq.com

basically synchronized with that of foreign countries. In the future, we will continue to promote the application of pipeline system reliability technology. The results are that partial key technologies of oil & gas pipeline in China take the leading role worldwide and further efforts shall be made for the construction and operation of intelligent pipe network.

Keywords: Oil and gas pipeline technology; Development status; Development trend

0 前言

目前,中国已建成了“三纵四横、连通海外、覆盖全国”的大型油气管网。截至 2019 年底,我国长输油气管道总里程 13.52×10^4 km,覆盖全国 32 个省区市,年输石油约 3.5×10^8 t、天然气约 $1\ 500 \times 10^8$ m³。

近年来,中国的油气管道技术贯彻业务驱动的科技发展战略,建立了以工程设计施工、材料与装备、油气管道输送工艺、运行维护等领域为核心的技术体系,对国内油气管道技术的发展现状和发展趋势进行分析,可以为油气管道主营业务发展提供有效借鉴。

1 工程设计施工技术

随着中国油气管道业务快速发展,在管道设计、管道施工等方面的部分关键技术引领了世界管道科技水平的进步^[1]。

1.1 油气管道设计技术

1.1.1 基于应变的管道设计方法

基于应变的管道设计方法的关键是确定管道在地震、地质灾害中承受的应变及管道本身所能承受的应变极限。在设计应变的确定方面目前国内外采用的计算模型和方法类似,在容许应变上多引用国外的研究成果^[2-5]。该方法主要在地震区、活动断裂带、矿山采空区等区段进行应用,包括西二线、西三线、中缅等,解决了工程技术难题,推动了大应变钢管的研发和应用^[6]。

1.1.2 基于可靠性的管道设计技术

基于可靠性管道设计技术是一种极限状态的设计方法,关键是对不同管道极限状态下的荷载和抗力不确定因素进行定量分析计算^[7]。该技术针对管道实际的失效形式进行设计,以最小的成本达到既定的安全目标,并已在西二线典型地段的可靠性评估、中俄 $\Phi 1\ 422$ mm 管道的设计和校核中进行应用。

1.2 油气管道施工技术

1.2.1 高钢级管道焊接技术及装备

管道自动焊具有焊接速度快、焊接质量好、一次焊接合格率高、降低焊工的劳动强度等优势^[8]。中国开发的 CPP 900 系列自动焊接装备,包括管道坡口机、内环缝自动焊机、单/双焊炬管道全位置自动焊机、激光/电弧复合管道全位置自动焊装备等,逐渐取代了进口装备,

并引领了国内自动焊技术发展方向。

1.2.2 机械化补口技术及装备

机械化补口技术主要包括热收缩带补口技术、液态聚氨酯补口技术。

热收缩带补口技术机械化设备一般由自动除锈设备、中频加热设备与红外加热设备组成,该技术具有效率高、除锈均匀无遗漏、加热温度均匀一致、热收缩带收缩一致等优势^[9]。

液体聚氨酯机械化补口装备由自动除锈设备、中频加热设备和自动喷涂设备组成。主要用于长输油气管道现场防腐补口施工时的液体聚氨酯涂料喷涂。

1.2.3 非开挖穿越技术及装备

非开挖穿越技术方面已形成了以水平定向钻穿越为主、盾构为辅、顶管穿越为补充的非开挖穿越整体解决方案。目前国内水平定向钻穿越最长穿越距离达 3 500 m,最大施工管径为 1 219 mm,管径 1 016 mm 的最长施工长度达到 2 700 m。

1.3 工程设计施工技术发展趋势

目前,中国已具备了建设 12 MPa、 300×10^8 m³/a、X 80 钢级、直径 1 219/1 422 mm 的长距离管道技术能力,有效保障了国家油气战略通道的建设。面对管道业务发展形势,今后工程设计施工领域应重点关注以下方面的科技攻关:一是智能化设计、智慧工地等技术在管道建设中的应用;二是新型焊接技术、新型施工装备研发与应用、特殊环境施工技术及设备;三是管道建设的本质安全技术研究及应用。

2 材料与装备技术

根据国家相关政策的要求以及管道业务发展的迫切需要,中国在材料与装备领域开展国产化技术攻关,实现了高钢级管线钢及钢管、管道关键装备的国产化,显著降低了管道建设成本。

2.1 高钢级管线钢研发与应用技术

目前,国外陆上油品管道主要采用 X 65 及以下管线钢,长输天然气管道以 X 70 和 X 80 管线钢为主。X 80 管线钢是日本、欧洲、北美批量生产并正式投入使用的管线钢的最高钢级^[10]。2000 年前,中国长输管道主要采用 X 65 钢级以下管线钢,随着西一线、西二线的建设,X 70 和 X 80 高钢级管线钢技术得到了快速发展。

2.1.1 X 80 管线钢研发与应用技术

X 80 管线钢断裂控制技术方面:已经建立了 X 80 管线钢全尺寸气体爆破实验数据库,解决了高压大口径($\Phi 1\ 219\ \text{mm}$ 及 $\Phi 1\ 422\ \text{mm}$)高钢级管线钢的止裂韧性预测难题。

X 80 管线钢关键技术指标方面,确定了 X 80 管线钢强度的测试方法及要求,提出了热煨弯管和管件的化学成分及强韧性控制指标。

中国先后建设了西二线、中贵线、西三线、陕四线、中俄东线等 X 80 天然气管线,X 80 管线钢逐渐成为现代长距离输气干线管道的首选管材。

2.1.2 X 90 /X 100 管线钢研发与应用技术

X 90 /X 100 管线钢关键技术指标及产品开发方面:中国首先提出了基于止裂器的 X 100 管线钢以及基于止裂概率 X 90 管线钢的断裂控制方案,开展了 X 90 直缝焊管及螺旋焊管全尺寸爆破试验,填补了国际空白。

X 90 管线钢现场焊接及施工技术方面:开发了 X 90 /X 100 管线钢焊管专用焊材以及环焊缝自保护药芯焊丝,形成了 X 90 /X 100 管线钢焊接工艺及评价技术、施工配套技术,已基本具备开展 X 90 管线钢试验段工程的条件。

2.2 管道关键装备国产化技术

中国石油企业组织开展了 20 MW 电驱压缩机组、30 MW 燃驱压缩机组、大功率输油泵机组、关键阀门、执行机构、流量计、非标装备等油气管道关键装备的研制,已经形成了严格完整的管道关键装备国产化工作方法。

目前,油气管道关键设备国产化率超过 90%,压缩机组、输油泵机组等国产化设备已在西一线、西二线、庆铁四线等工程得到应用。

2.3 材料与装备技术发展趋势

总体来看,中国的高钢级管材开发与应用技术已走在世界前列,但设备长期运行可靠性、设备维护等方面与国外存在差距。未来管道材料与装备技术的发展方向主要有:大口径高钢级管材及管件的研发与应用;燃气轮机动力涡轮、输油管道强制密封阀、刮板流量计及输气管道孔板流量计等关键设备国产化研制;提升管道设备信息化、智能化水平,建设管道在线设备监测系统,完善管道设备故障库等。

3 油气管道输送工艺

中国针对油气输送与工艺技术领域面临的实际问题开展技术攻关,在易凝高黏原油管道输送、油气管道仿真优化等方面形成了系列技术成果,有效保障了油气管道的高效输送。

3.1 易凝高黏原油管道输送技术

通过科研攻关,中国形成了多项易凝高黏原油管道

输送技术体系,发明了新型纳米降凝剂,降凝幅度比国际同类产品提高 66%;掌握了冷热油交替输送、停输再启动、投产等非稳态工况模拟技术,温度计算误差小于 $2\ ^\circ\text{C}$;实现了不同管道在多油品、多分输、多点注入等输送要求下,在 25% ~ 110% 设计输量范围内安全、高效运行,奠定了中国油气管道输送技术的国际先进地位。

3.2 油气管网仿真与优化技术

油气管网仿真与优化技术是支撑油气管网设计、运行方案优化与调度等业务的核心技术,通过管道全线的水力、热力计算以及设备的工况计算,模拟油气介质在真实管道中的流动状态和设备运行状态,在此基础上,综合考虑油气管网资源市场情况以及管输能力等条件,建立油气管道运行优化数学模型,采用运筹学方法得到最优运行方案,保障油气管道经济、高效运行^[11]。

油气管道(网)运行优化技术难度较大,各国在理论层面的研究更多,成熟的优化软件产品则较少,主要依托具体问题定制优化产品。

经过持续攻关,中国天然气瞬态仿真与管网稳态运行优化技术与国外技术水平相当,稳态优化技术在管网结构适应性上更具优势;但在管网在线仿真和非稳态优化研究上与国外差距较大,仍处于起步阶段。

3.3 管道输送工艺发展趋势

中国的易凝高黏原油管道输送等技术已达到国际领先水平,但成品油顺序输送、仿真优化、低碳管理等技术与国外存在一定差距。结合生产需求,需要围绕两方面开展攻关:一是研发基于大型系统、多目标和在线数据的管网运行优化技术,实现天然气管网节能优化运行;二是研究成品油界面检测与跟踪技术,掌握油品质量衰减规律,突破成品油质量控制技术,实现多品种、多批次油品顺序输送。

4 油气管道运行维护技术

油气管道运行维护方面,中国已形成了完整性管理、腐蚀防护、管网系统可靠性等系列成果,部分技术达到国际先进水平,推动了油气管道运行维护技术进步。

4.1 完整性管理技术

4.1.1 管道缺陷检测评价技术

管道缺陷检测评价目的是判定管道缺陷,降低管道的安全运行风险。主要技术包括内检测技术和评价技术。

内检测技术包括管道检测器研发及特征识别判定技术,具体包括几何变形检测、漏磁检测、超声测厚、超声裂纹、电磁超声、惯性测绘内检测器研发;环焊缝缺陷、螺旋焊缝缺陷与金属损失相关凹陷等特殊缺陷识别判定等。

评价技术包括评估模型选用、输入参数处理选取等,具体包括凹陷与椭圆变形等几何变形缺陷,腐蚀与

划痕等体积型缺陷,裂纹与类裂纹等平面型缺陷,以及环焊缝缺陷、螺旋焊缝缺陷、直焊缝缺陷等。

目前中国在变形、漏磁、惯性测绘内检测器研发应用领域较成熟,在环焊缝缺陷、螺旋焊缝缺陷识别判定技术领域取得重大突破,但在超声测厚、超声裂纹、电磁超声技术研发与应用领域还存在差距。

4.1.2 油气管道风险评价技术

油气管道风险评价技术是通过识别管道系统安全运行的风险因素,评价事故发生的可能性和后果,提出风险减缓和风险控制的建议措施。包括半定量风险评价技术、定量风险评价技术。

半定量风险评价技术包括管道风险致因机理、半定量风险评价技术模型和指标体系。与国际领先的哥伦比亚管道集团 PVI 动态风险系统对比,目前中国侧重于评估典型时间点静态风险,还不能实现动态、主动的风险评估与预警。

定量风险评价技术核心包括失效库及失效概率计算模型、油气管道危害评估模型、个人及社会风险计算模型。中国的定量风险评价技术与 TNO、DNV 等企业对比,缺乏管道失效数据库的支撑,管道失效后果复杂建模研究与验证不足,管道线路风险可接受准则难题还未解决。

4.2 管道安全监测技术

泄漏是管道失效的最直接后果,也是污染、火灾等次生灾害演变的直接原因。对泄漏事故后果和致灾因素的及时报警和准确定位,是管道运行企业实现“安全高效”的直接诉求。

4.2.1 管道泄漏监测技术

目前,中国已形成负压波、音波、流量平衡等多种管道泄漏。现有泄漏监测系统对打孔盗油等突发事件的检测效果明显。

Enbridge 公司认为小于 5% 的泄漏,现有技术难以监测,基于压力检测的泄漏监测技术的灵敏度基本达到现有理论的合理边界,需要通过技术、管理和人等多种手段来解决泄漏监测问题。对于 1% 以下的小泄漏、缓慢泄漏需要进行理论创新。目前来看主要是运用主动激励式泄漏监测,不断提高油管道泄漏检测灵敏度;通过大数据融合判断提高报警准确率,不断满足生产需求。

4.2.2 光纤安全预警技术

光纤安全预警技术是利用管道同沟敷设的光缆,采用分布式光纤传感技术监测管道沿线第三方施工情况,实现第三方施工风险防控,变被动巡线为主动巡线。

国外管道安全预警主要通过管道沿线振动信号的监测实现对第三方施工的预警。管道沿线人为活动少,报警信息主要依靠现场确认,事件识别方面还停留在简单环境的分类研究水平。

中国管道沿线环境复杂,第三方活动频繁,需要进行复杂的事件识别和分类。简单环境的智能识别已基本成熟,正在开展不同地理环境、公铁路穿越等强背景噪声下的复杂环境智能识别。

4.2.3 管道地质灾害监测与评价技术

管道地质灾害监测与评价技术集风险识别、监测、评价、防护为一体,可对管道地质灾害风险进行动态管理,提出监测预警与风险减缓措施。

国外对地质灾害主要采取避让措施,防护工程设计标准较高。监测预警方面广泛采用卫星遥感、无人机、自动测量等技术进行区域性地质灾害监测,预警准确性高。风险管理方面国外很早就由成灾机理向风险评价方向转变,评价水平也由定性向半定量、定量发展,定量化水平不断提高。

中国管道多为穿越地质灾害易发区,为满足标准的设计,工程防护水平较低。灾害的识别主要依靠人工勘察,监测的自动化水平较低,监测精度和预警准确度不够。风险管理方面近十年才起步,半定量风险评价技术与国际水平一致,但定量风险评价水平较低,在评价模型、发展趋势预测等方面还需提高。

4.3 管道维抢修技术方面

管道修复是指对破损管道采取各种技术使其恢复正常承载能力,并经济、高效、快捷地恢复管道运行,对管输安全具有重要意义。

4.3.1 高钢级管道自动焊修复技术

中国依据中俄东线生产需求,开发 X 70、X 80 高钢级大口径管道的 B 型套筒自动焊接修复技术,解决高钢级管道焊接技术难题。

4.3.2 复合材料修复技术

采用湿法缠绕碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维布的方法实现管道缺陷补强。该方法作业快速,费用低,无需动火。

4.3.3 复合钢制内衬修复技术

中国自主研发的内衬钢制套筒,外缠复合材料,将套筒结构强度高、抗弯曲性能好的优点与复合材料能够改善承载能力、耐腐蚀的优点结合起来,达到 1+1>2 的修复效果。

4.4 管道腐蚀与防护技术

针对管道服役过程中的腐蚀风险,目前中国的防护控制技术体系包括如下关键技术。

4.4.1 防腐材料/涂层检测评价与修复技术

管道防腐层应用及检测评价技术方面,中国与国际水平基本一致,但国外在外防腐层类型选择上多样化,中国 3 PE 防腐层占绝大多数(约 85%)。

防腐层修复方面,中国技术较国外更加成熟,形成了一套完善的在役管道不停输防腐保温层修复技术。

4.4.2 阴极保护检测评价与模拟技术

通过引进吸收和自主攻关,中国的阴极保护检测评价技术已实现跨越式进步:从早期的“通电电位评价”到“断电电位评价”,再到近年来推行的“试片法评价”,检测评价水平稳步提升。

4.4.3 杂散电流检测评价与减缓

杂散电流是指正常管道阴极保护电流之外其他电流总称,可导致管道腐蚀加剧。

目前,中国已经建立相对完善的杂散电流检测评价和减缓技术体系,包含杂散电流干扰危害评价、同步检测技术、频谱分析技术等,为港枣线、新大线等近万公里管道和100多个站场杂散电流检测评价提供了技术支持。

4.4.4 管道内腐蚀防护技术

中国对长输管道内腐蚀研究起步较晚,在内腐蚀控制指标、监测和检测、内腐蚀直接评价等方面需要深入研究。

近年来,随着中国油气管道快速发展,管道腐蚀控制和管理技术进步迅速,在高压直流干扰评价与缓解技术、阴极保护试片法技术、地铁杂散电流控制方面已经逐渐显现技术优势。

4.5 管网系统可靠性技术

管网系统可靠性是指管网系统在规定运行条件和规定时间内完成规定输送任务的能力,通过统筹考虑管网物理系统、资源供应及市场需求,对管网安全性进行量化评价,以系统功能实现为最终目标,实现管网可靠运行^[12]。通过建立满足复杂天然气管网系统特点的物理管网分布式可靠度阶梯计算模型,在给定工况条件下,通过仿真对管网进行拆解,由可获取基本数据的最底层单元可靠度计算开始,向上逐级获得管网系统及任意子系统(即管线系统和站场系统)的可靠度。

目前,国外管道可靠性研究偏重于单元层面,主要表现为单条管线、站场设备和管道本体的可靠性研究,评价方法较成熟,已应用于生产实践,并取得显著效果。

中国针对管网系统层面的可靠性研究处于世界前沿,研究内容涉及管道运行本质安全、供气能力及经济性分析,建立了可靠性管理体系框架,有待进一步完善及推广应用。

4.6 管道运行维护技术发展趋势

总体来看,中国的管道完整性管理、安全监测、腐蚀防护等关键技术基本与国外同步。结合生产需求,需要围绕以下方面开展攻关:发展管道焊缝裂纹缺陷、管道应力在线检测技术与装备,提升焊缝缺陷的检测评价水平;降低误报漏报率,攻关天然气泄漏监测技术难题^[13-16];开展大型天然气管网可靠性研究,建立系统目标可靠度确定方法及系统可靠性增强理论,推动管网系统可靠性技术工程应用和智慧管网建设^[17-20]。

5 结论

1)根据国家《中长期油气管网规划》,到2025年中国油气管网将达 24×10^4 km,然而现有油气管道工程建设能力和速度与国家要求尚不匹配,工程建设质量有待进一步提升。

国际政治形势多变,中美贸易摩擦等问题的长期性和复杂性对中国国内技术造成很大冲击,部分核心技术和装备存在“卡脖子”风险,影响能源供应安全,实现管道核心技术和装备的自主研发已刻不容缓。

随着中缅、泰青威等大口径天然气管道环焊缝开裂失效事故的发生,环焊缝质量隐患对管道安全运行造成的风险凸显,管道风险评价和修护技术等方面依然存在诸多瓶颈问题,严重制约油气管道本体安全水平的提升。

2)综合分析当前我国油气管道科技面临的形势及问题,今后需要在油气管道设计施工技术、油气管道生产运行技术、管道环焊缝隐患排查与风险管控技术、智慧管网建设运行关键技术等四个研发方向进行重点攻关部署。一是从源头提升油气管道的建设能力和质量。二是组织技术攻关,实现核心技术自主、可控,提升油气管道生产运行可靠性水平,保障管网的运行安全和效益。三是持续开展环焊缝缺陷内检测、应力应变检测、安全评价、在线修复等方面的研究,提升管道本质安全。四是推动人工智能与管道业务的发展融合,形成智慧管网建设与运行成套技术与标准,保障“智慧管网”建设目标实现。

参考文献:

- [1] 杨杰. X 90 管线管冷弯过程数值模拟及性能研究[D]. 成都:西南石油大学,2016:15.
Yang Jie. Numerical Simulation and Performance Study of X 90 Pipeline During Cold Bending [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016: 15.
- [2] 王国丽,韩景宽,赵忠德,等. 基于应变设计方法在管道工程建设中的应用研究[J]. 石油规划设计,2011,22(5):1-6.
Wang Guoli, Han Jingkuan, Zhao Zhongde, et al. Application of the Strain Design to the Pipeline Construction [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2011, 22(5): 1-6.
- [3] 张蕾. 抗大变形管线钢焊接热影响区组织性能研究[D]. 西安:西安石油大学,2011.
Zhang Lei. Study on Microstructure and Property of High-Strain Pipeline Steel Welding Heat Affected Zone [D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2011.
- [4] 魏东吼,郑贤斌. 油气长输管道工程设计新方法述评[J]. 石油工程建设 2009,35(1):14-18.

- Wei Donghou, Zheng Xianbin. Discussion on New Design Methods of Long-Distance Oil and Gas Transmission Pipelines [J]. Petroleum Engineering Construction, 2009, 35 (1): 14 - 18.
- [5] 李鹤林. 油气管道基于应变的设计及抗大变形管线钢的开发与应用[J]. 石油科技论坛, 2008, 27(2): 19 - 25.
- Li Helin. Strain-Based Design for Pipeline and Development and Application of Pipe Steels with High Deformation Resistance [J]. Oil Forum, 2008, 27 (2): 19 - 25.
- [6] 夏 勇. 大吨位钢结构多吊点非对称整体提升施工控制技术[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013: 20.
- Xia Yong. Construction Technology of the Large Tonnage Multiple Lifting Points Integral Hoisting for Abnormal-Shaped Cantilever Steel Gallery [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013: 20.
- [7] 张振永, 周亚薇, 张金源. 国内天然气管道强度设计系数的评估研究[J]. 天然气工业, 2017, 37(4): 116 - 122.
- Zhang Zhenyong, Zhou Yawei, Zhang Jinyuan. Evaluation on Strength Design Coefficients of Domestic Natural Gas Pipelines [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37 (4): 116 - 122.
- [8] 闫 臣, 王玉雷, 薛振奎. 油气管道自动焊技术的发展及展望[J]. 焊接技术, 2016, 45(5): 83 - 88.
- Yan Chen, Wang Yulei, Xue Zhenkui. Development and Prospects of Oil and Gas Pipeline Automatic Welding Technology [J]. Welding Technology, 2016, 45 (5): 83 - 88.
- [9] 耿 平. 长输管道防腐补口施工质量控制要点[J]. 石油化工建设, 2012, 34(5): 44 - 45.
- Geng Ping. Some Quality Control Key Points in Long-Distance Pipeline Anticorrosion Construction [J]. Petroleum and Chemical Construction, 2012, 34 (5): 44 - 45.
- [10] 陈 优. 高强度管线钢焊接热影响区组织和性能的热模拟研究[D]. 苏州: 江苏大学, 2016: 19 - 24.
- Chen You. Thermal Simulation Research on Microstructure and Properties of Welding Heat Affect Zone for High Strength Pipeline Steel [D]. Suzhou: Jiangsu University, 2016: 19 - 24.
- [11] 吕梦芸. 基于模拟退火-蚁群算法的原油管道顺序输送运行优化模型[J]. 油气储运, 2017, 36(10): 1154 - 1161.
- Lü Mengyun. The Operation Optimization Model of Crude Oil Batch Transportation Pipeline Based on the Simulated Annealing-Ant Colony Algorithm [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36 (10): 1154 - 1161.
- [12] 何国玺, 梁永图, 方利民, 等. 考虑三维地形及障碍的煤层气田集输系统布局优化[J]. 油气储运, 2016, 35(6): 638 - 647.
- He Guoxi, Liang Yongtu, Fang Limin, et al. Layout Optimization of Gathering Systems in CBM Fields Considering Three Dimensional Terrains and Obstacles [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35 (6): 638 - 647.
- [13] 黄维和, 郑洪龙, 王 婷. 我国油气管道建设运行管理技术及发展展望[J]. 油气储运, 2014, 33(12): 1259 - 1262.
- Huang Weihe, Zheng Honglong, Wang Ting. Construction and Operation Management Technology and Prospect of Oil and Gas Pipelines in China [J]. Oil & Gas Storage And Transportation, 2014, 33 (12): 1259 - 1262.
- [14] 刘志刚, 王禹钦, 王学力. 油气管道运行维护安全技术研究新进展[J]. 天然气与石油, 2018, 36(4): 112 - 118.
- Liu Zhigang, Wang Yuqin, Wang Xueli. New Progress in Research on Safety Technology of Oil & Gas Pipeline Operation and Maintenance [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (4): 112 - 118.
- [15] 王 伟, 么秋菊, 冯亚辉. 长输管道完整性管理效能评价方法研究[J]. 能源与环保, 2019, 41(10): 49 - 52.
- Wang Wei, Yao Qiuju, Feng Yahui. Study on Evaluation Method of Integrity Management Effectiveness of Long-Distance Pipeline [J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41 (10): 49 - 52.
- [16] 李 睿, 蔡茂林, 董 鹏, 等. 地震区油气管道的应变与位移检测技术[J]. 油气储运, 2019, 38(1): 40 - 44.
- Li Rui, Cai Maolin, Dong Peng, et al. A Strain and Displacement Inspection Technology for Oil/Gas Pipelines in Earthquake Areas [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38 (1): 40 - 44.
- [17] 徐葱葱, 刘 冰, 张 妮, 等. 智能化技术发展对油气管道行业的启示[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(12): 1 - 5.
- Xu Congcong, Liu Bing, Zhang Ni, et al. Revelation of Intelligent Technology Development on Oil and Gas Pipeline Industry [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2019, 38 (12): 1 - 5.
- [18] 张天龙. 油气管道腐蚀机理与防治简述[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(10): 75 - 77.
- Zhang Tianlong. Corrosion Mechanism and Prevention of Oil and Gas Pipelines [J]. Total Corrosion Control, 2019, 33 (10): 75 - 77.
- [19] 张有渝, 袁 勇. 油气管道用技术标准中的问题剖析与建议[J]. 天然气与石油, 2019, 37(2): 23 - 27.
- Zhang Youyu, Yuan Yong. Analysis and Suggestion on Technical Standards for Oil & Gas Pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 2019, 37 (2): 23 - 27.
- [20] 周 舟. 中国石油智慧管网建设顶层设计基本完成[J]. 天然气与石油, 2019, 37(2): 95.
- Zhou Zhou. The Top-Layer Design of PetroChina Intelligent Network Construction is Basically Completed [J]. Natural Gas and Oil, 2019, 37 (2): 95.