

引文: 姜昌亮. 油气管道全生命周期质量管控与安全管理探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1081-1091.

JIANG Changliang. Quality control and safety management of oil and gas pipelines during its whole life cycle[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1081-1091.

油气管道全生命周期质量管控与安全管理探讨

姜昌亮

国家石油天然气管网集团有限公司

摘要: 以油气管道建设期质量提升为基础, 聚焦管道全生命周期质量管控, 梳理了中国油气管道质量管理发展历程和技术变革。以“八三”管道建设为开端, 中国长输油气管道建设历经了4次大的跨越式发展, 逐步形成“纵贯南北、横跨东西、覆盖全国、连接海外”的油气战略通道新格局。随着自动化、智能化技术应用越来越广泛, 油气管道建设水平与工程质量明显提升; 随着全生命周期风险评价、监测检测、完整性评价等完整性管理技术的成熟应用, 油气管道运行风险得到有效管控; 随着焊接技术水平与施工质量的提升、数字化技术的推广应用、全生命周期完整性技术体系的完善、高钢级管道失效机理的突破, 油气管道全生命周期本质安全及质量、安全管理水平得到有效改善。分析了油气管道建设质量与运行安全面临的挑战, 结合当前油气管道全生命周期环焊缝问题致因、全自动焊接及性能提升等关键质量控制要素, 讨论了质量、风险与安全在油气管道全生命周期的相互承接与支撑保障中的逻辑关系。结合中俄东线天然气管道工程建设与运行实践, 分析了质量控制、风险识别与安全管理的本质关系, 提出“质量控制为基础, 全要素管理为核心, 增强全生命周期抗风险能力”的建设质量与运行安全新模式。综合“工业互联网+”和数字化技术应用, 展望了油气管道质量控制与安全管理的技术方向。(图3, 参53)

关键词: 油气管道; 全生命周期; 质量管理; 安全管理; 全要素管理; 抗风险能力

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)10-1081-11

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.001

Quality control and safety management of oil and gas pipelines during its whole life cycle

JIANG Changliang

China Oil & Gas Pipeline Network Corporation

Abstract: The development history and technical change of oil and gas pipeline quality management in China were reviewed focusing on pipeline quality control in the whole life cycle, on the basis of quality improvement of oil and gas pipelines in the construction period. Starting with the construction of the “8.3” pipeline, China’s long-distance oil and gas pipeline construction has undergone four major stages of leap-forward development, forming a new pattern of oil and gas strategic channels “running north-south, crossing east-west, covering the whole country and connecting overseas”. With the extensive application of automatic and intelligent technologies, the construction level and engineering quality of pipelines have been significantly improved. With the mature application of whole life cycle risk assessment, monitoring and inspection, integrity evaluation and other integrity management technologies, the operational risks of pipelines have been effectively controlled. With the improvement of welding technology and construction quality, the promotion and application of digital technology, the improvement of the whole life cycle integrity technology system, and the breakthrough in the failure mechanism of high-grade steel pipelines, the intrinsic safety and the quality and safety management level of oil and gas pipeline in the whole life cycle have been effectively improved. Besides, analysis was conducted on the challenges faced by the construction quality and operation safety of oil and gas pipelines. In addition, the logical relationship of mutual undertaking and support between quality, risk and safety of pipelines in the whole life cycle was discussed, by considering the key quality control factors, such as the causes of girth weld defects, full-automatic welding and performance improvement. Moreover, the essential relationship among quality control, risk identification and safety management was analyzed based on the construction and operation practice of the China–Russia Eastern Gas Pipeline. Then, a new construction quality and operation safety model with “quality control as the basis, total-factor management as the core and enhanced whole life cycle risk resistance” was put forward. Finally, the technical direction of quality control and safety management of oil and gas pipelines was prospected based on the application of “Industrial Internet +” and digital technology. (3 Figures, 53 References)

Key words: oil and gas pipeline, whole life cycle, quality management, safety management, total-factor management, risk resistance

自 20 世纪 90 年代以来,随着中国经济的快速发展,油气管道迎来第 3 次建设高峰,快速规划建设了大量长输油气管道,逐步成为不可替代的能源基础设施。21 世纪初,伴随着能源需求的快速增长,以大口径、高压力、高钢级为特点的长输油气管道建设迎来了第 4 次建设高峰^[1-6]。但是,长输油气管道设施具有规模大、分布广、风险高等特性,随着大规模油气管道的建设与运行,如何对在建管道工程质量及运行期管道安全进行有效管控,确保其始终在低风险状态下安全运行的问题逐渐暴露出来,成为油气管道发展进程中不可回避的难题^[7-9]。笔者作为西气东输一线天然气管道、中缅油气管道海外段、漠大原油管道及中俄东线天然气管道等大型管道工程的建设与运行管理者,从西气东输一线天然气管道工程开始,便致力于焊接技术及其装备创新的水平提升,保障管道建设质量,深化管道完整性技术体系建设,确保管道“优生优育”模式的全生命周期本质安全。在“工业互联网+”时代背景下,数字化、网络化、智能化转型为管道建设质量提升和运行安全管理保障能力进一步增强提供了新的契机。针对管道运行面临的风险,研究

失效机理、风险评价、检测监测、完整性评价、修复可靠性等技术,提出了建设全生命周期的完整性管理体系,转型质量管理、风险识别与安全管理,全面提升工程建设质量,构建“质量控制为基础,全要素管理为核心,增强全生命周期抗风险能力”的建设质量与运行安全新模式。

1 发展历程

自 1970 年以来,中国管道人经过 50 多年来的不懈努力,长输油气管道从设计理念到技术水平都取得了跨越式发展(图 1)。管道建设从人拉肩扛经自动化施工向数字化、智能化建设发展,实现了设计标准体系从参考苏联体系到借鉴欧美规范直至形成自身特色的标准体系,设计能力从低压、低等级钢到 12 MPa、1 422 mm、X80 钢级,建成了覆盖全国的油气主干管网,实现了规模上从无到有、从小到大,技术上从学习模仿到自主研发、从整体落后到赶超先进的历史性飞跃^[10-12]。随着建设与运行技术的进步,油气管道质量管理体系的内容、形式及技术也不断发展提升。

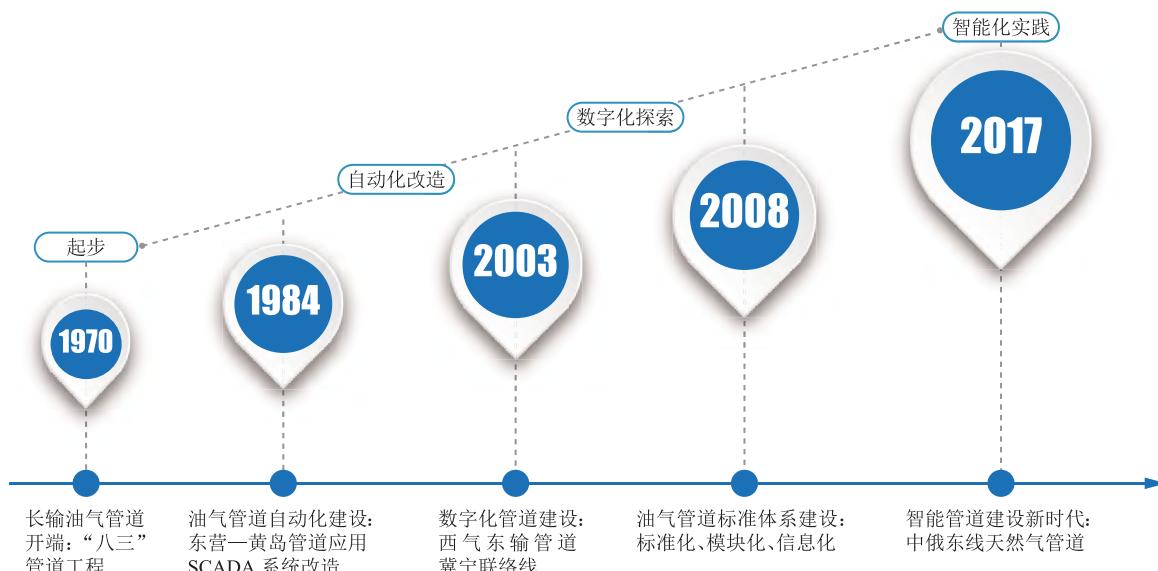


图 1 油气管道发展历程示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the development history of oil and gas pipelines

同时,在全球能源革命和后工业化发展的大潮中,能源互联网和智能化需求带给油气管道行业巨大的挑战和机遇。面对里程不断增加的油气管道业务,本着确保安全和降本增效的目标,在管道自动化水平和信息化技术不断提升的基础上,伴随大数据、物联网、云计算、人工智能等技术的不断发展,智能化技术在油气管道工程中的应用逐步深化,出现了基于数据挖掘、决

策支持、预测分析等技术的新型管理模式,油气管道进入了智能新时代^[13-16],油气管道质量管控与安全运行迎来了数字化变革的浪潮(图 2, PCM 为脉冲编码调制(Pulse Code Modulation))。

在油气管道数字化和智能化发展进程中,伴随油气管道第 4 次建设高峰的出现,X70 及以上钢级管线钢得到全面应用,大口径、高压力、高钢级管道为石油

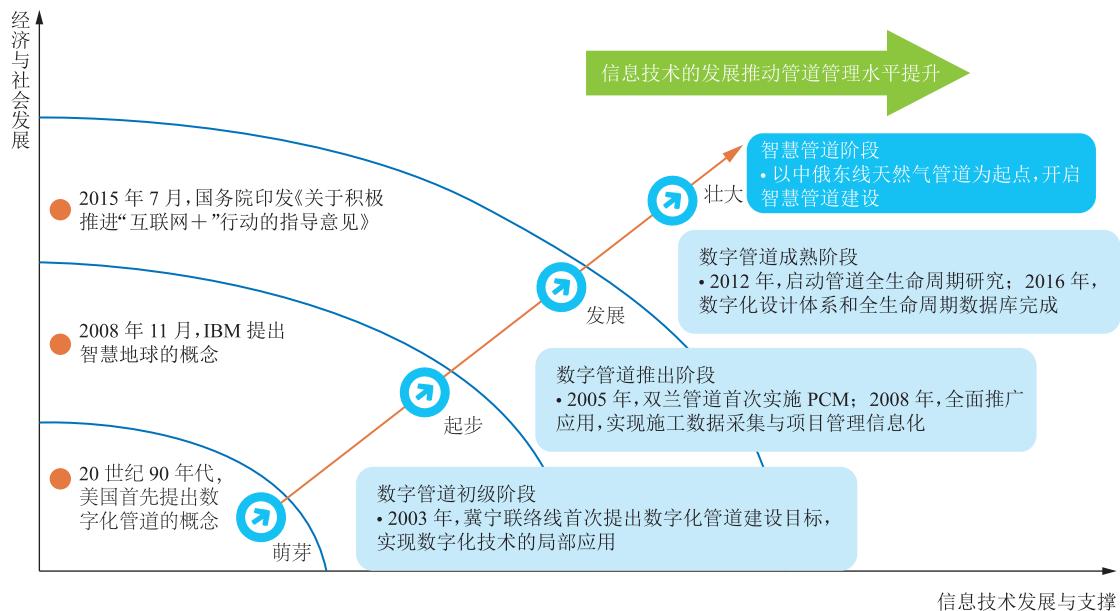


图 2 油气管道信息化发展历程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the development history of oil and gas pipelines informatization

天然气长距离输送提供了更加经济的方式,但也因认知和技术局限性带来了管道安全方面的新问题,质量控制技术与管理体系的重要性日益突显。在发现问题、分析问题、解决问题的过程中,对高钢级输气管道各环节质量控制点、重大工程质量管控体系的认识逐步深入,基本可以分为3个阶段(图3):①聚焦焊接缺陷、地质灾害的直观认知,通过水压试验、日常检测等方式控制管道风险。②针对焊接结构性能,对黑口、缺陷、特征焊口等环焊缝隐患进行排查,利用常规力学性

能、金相组织测试对割口失效进行分析,发现焊接结构力学性能分散、冲击功不达标、母材强度实际值超高等变壁厚、匹配、韧性储备不足的问题。基于此,通过改进焊接工艺、推行自动焊以及解读裂纹成因、规范割口分析行为等解决焊接结构几何不连续应力集中问题,控制管道风险。③聚焦热影响区软化、脆化的根源问题,推进管材及焊材成分优化,开展成分-组织-工艺-性能关系模型探索,推进油气管道全生命周期质量控制瓶颈问题的系统解决。

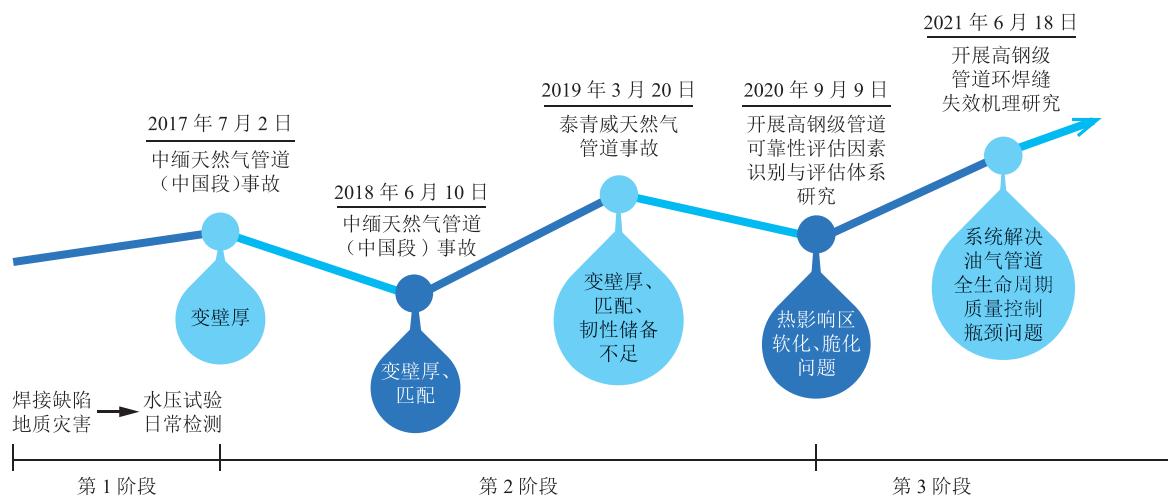


图 3 高钢级管道管理与技术发展认知历程图
Fig. 3 Cognitive process of high-grade steel pipeline management and technology development

2 面临挑战

2.1 油气管道安全与外部管理生态现状

在社会日益繁荣、城市化进程持续推进的过程

中,油气管道与社会发展之间出现诸多矛盾,管道高后果区数量逐年增加,严重威胁运行安全^[17-20]。已经建成的油气管道,经过多年运行,管道与站场设施隐患逐渐凸显,安全环保压力加大^[21-23]。快速建设期间

遗留的管道本体质量隐患、地质灾害、第三方损伤及违章占压等新老风险隐患交织,现场施工质量管控不到位、新材料与新技术认知局限性等多重因素叠加,极易诱发事故^[24-33]。工程隐性质量缺陷、老化及管理不到位是管道事故的主要致因。

油气管道本质安全首先来自设计和施工,当前管道完整性管理体系主要侧重运行期,建设期完整性管理和体系缺失使存量管道的完整性管理存在很大的不确定性和现实困难^[34]。中国管道运行企业管道完整性管理实施不均衡,特别是站场完整性管理体系刚刚起步,存在不同专业之间、不同企业之间发展不均衡的现象。国家法律法规对安全环保的监管要求日趋严格,管道沿线居民的安全环保意识不断增强,外部监管生态的变化要求管道企业必须采取更严格的安全环保措施,建设和运行更高质量、更低风险的管道。

2.2 高钢级管道带来的新要求

新材料、新工艺使油气管道质量与安全关键风险控制点、控制指标等都发生了新变化。在技术上缺失对管道质量与安全风险控制点的研究,会导致质量管控失效与管理缺失,带来运行风险及安全事故隐患。在传统概念里,缺陷是导致油气管道失效的主要原因,焊缝开裂主因是存在未熔合、未焊透、咬边等缺陷。通常试压阶段发生的很多失效都是焊接施工质量问题即环焊缝存在危害性缺陷导致的焊缝开裂,换言之,比较大的、对生产运行有较大危害的这一类缺陷在投产前的水压试验阶段就暴露出来了。但是,随着技术的进步与质量管理水平的提升,以及大口径、高钢级管道的使用,可检测的几何缺陷问题已最大程度规避,管道材料、结构等问题逐渐凸显。中缅天然气管道“7.2”和“6.10”失效断口整体呈脆性,未发现较大焊接缺陷,断口位置未发生明显屈服,但表现出明显的焊口韧性储备不足。这种情况也说明了高钢级管道相对于传统低钢级管道,在强度匹配、焊缝韧性、缺陷容限、不等壁厚的应变集中等方面更加敏感^[35-43]。

为了保障高钢级管道的服役安全,需要进一步控制作用在管道环焊缝上的应力,包括控制施加的应力及使应力集中最小化。建设期焊接施工过程中,在完成焊接拆除对口器后,施加在根部焊道上的应力最显著;管道环焊缝承受的另一个较大应力通常发生在施工过程中的提升和下沟过程中;带有错边的焊缝、壁厚过渡处的焊缝以及管道直管段与热煨弯管、弯头之间

的焊缝往往存在应力集中,极易出问题;当管道外形与管沟的外形不匹配时,也会产生较高应力。上述均是高钢级管道建设过程质量控制的重点,其对油气管道运行期安全的敏感性显著不同于传统低钢级管道。

2.3 数字化变革的新需求

在当前大规模、高规格管道建设环境下,每一个环节的质量问题都可能造成重大隐患,依靠传统结果抽检或人员旁站监督的模式不能满足质量保障需求,只有依靠数字化、智能化技术开展油气管道建设与运行全过程、全要素智能化数据采集、分析及预警,才能实现真正的全生命周期全要素质量管理。然而,当前的技术和认知水平需要基于数字化、智能化带来的发展形势变化,对油气管道(网)建设过程的质量管控模式和技术进行再认识。因此,需要在“工业互联网+安全建设运行”新背景下,无缝融合油气管道数字化与智能化建设运行需求,构建适应时代需求的油气管道全生命周期管理体系。实施路径为:推进工业互联网+安全建设运行智能化,通过现场无线局域网络实现关键施工作业视频监控、工况参数自动采集、施工助手移动终端应用等信息化与工业化技术融合,搭建智能工地,实现施工过程管控和施工数据数字化移交;通过提升自动化、信息化水平,加强关键设备监测和综合安防能力,探索站场无人值守运行管理模式,实现工作效率与管控能力双提升;通过提升面向本质安全的管道实时泛在感知能力,两化深度融合,探索管道天、空、地一体化管理模式,提高工作效率、降低经营成本、提升管控能力。

3 关键技术

管道运行安全要求对其全生命周期全要素风险进行识别与预控。单从油气管道全生命周期各阶段看,质量与安全貌似关系不大,但从运行风险管控的维度看,质量是本质安全的基础。当前,国内外尚无系统的油气管道全生命周期质量控制与安全管理理论,其应该是一种综合的管理理念和方法,旨在落实油气管道从设计、施工到投产的全过程建设质量管控,将风险控制在建设过程中,确保运行期风险可控,保障长周期安全运行。油气管道全生命周期完整性技术与管理体系,正是以运行风险识别与预控为出发点,提出建设期完整性管理的理念,要求建设期进行全要素质量控制,避免隐患和运行风险^[44]。

3.1 全生命周期完整性管理技术体系

国内外完整性管理范围和流程差异较大,很多国家的完整性管理标准未涉及包括设计、施工等环节在内的建设期完整性管理要求,但均提出对建设期管道实施完整性管理的理念。中国通过持续研究,确定了管道完整性管理体系框架,涵盖了建设期、运行期、废弃处理在内的管道全生命周期完整性管理,通过建设期关键环节关键要素风险识别,明确质量管控重点,确保建设期高质量设计和施工,提升本质安全。关键技术成果包括:

(1)明确了建设期管道完整性管理的原则,即建设期管道完整性管理应贯穿于预可行性研究、可行性研究、初步设计、施工图设计、施工、投产试运、竣工验收的全过程,应将完整性管理的理念、要求作为管道建设各阶段技术方案优化、决策的依据之一,应视风险评价为其完整性管理的重要环节,应保证建设期管道数据的真实、准确、完整。增加设计、施工、投产等各阶段完整性评估和审查节点,从设计和施工本质上保障管道运行安全;研究从本质上实现以运行期可操作性、可维护性及安全性等综合评估设计阶段的路由选择、设备选型等;在运行期重视重大更改项目阶段的完整性专项管理,避免重大隐患的产生及隐患反复治理、重复投入等情况。以提升项目全过程管控能力、完善全方位质量管控措施、打造一流工程建设管理团队为抓手,建立保障工程建设业务持续高质量、高速度发展的长效机制。

(2)建设期细分为可行性研究、设计、采购、制造、运输、储存、施工、预投产、投产、管理权交接等过程,围绕风险识别控制及数据采集和管理,分别提出了各阶段完整性管理的工作内容和要求,确保质量可控。在设计阶段,应充分考虑管道的质量保障措施、要求及存在的风险,通过风险评估和安全性能分析,确定合适的材料、工艺及结构,以确保设计满足管道系统安全可靠运行的需要。同时,加强设计与施工、运行等各阶段的协同与沟通,避免因设计不合理导致的质量问题和安全隐患。在施工阶段,通过引入先进的施工技术和规范化的施工流程,加强对施工质量的监督和控制,特别是对焊接质量的全面管理,以及焊接后的检验、吊装等环节,是保障运行期开裂风险可控的关键。在运行阶段,随着GB 32167—2015《油气输送管道完整性管理规范》的颁布实施,中国油气管道完整性管理得到深入发展,已经

形成相对完备的完整性技术与管理体系。但如果建设质量不过关,潜在的设计不合理、施工不规范、规划不到位等各种因素,都会导致“先天带有残疾”的管道投入使用,将大大增加运行阶段风险管控和安全管理难度。油气管道全生命周期质量与安全管理技术理论的应用可以有效提升管道系统的质量水平和安全性能,减少事故风险,保护人民生命财产安全和生态环境。但要实现油气管道全生命周期管理,需要政府、企业及专业机构密切合作,制定完善的管理标准和规范,并持续推进技术创新和培训,提升从业人员综合素质和管理水平。

(3)明确了建设期数据处理的技术要求,提出了建设期管道完整性数据应用模式及数据对齐的方法和要求。研究了建设期资产数据管理技术,确保关键资产的核心数据真实、全面、准确,保障全生命周期数据的一致性,从源头保障数据来源和质量。建立了管道完整性数据对齐规范,提供了从建设期数据向运行期数据转化的方法和手段,实现了管道完整性管理数据在两个阶段的无缝对接。

通过建设适应中国油气管道建设特征的建设期管道完整性管理体系,开发建设期管道完整性和风险评估系统,有效提升油气管道本质安全和抗风险能力,使中国油气管道在地质灾害、第三方损伤、腐蚀等失效事故率上从1次/(10^3 km·a)大幅下降至低于0.2次/(10^3 km·a),安全运行维护费用降低近30%。

3.2 焊接质量提升技术

在油气管道全生命周期安全运行保障技术方面,聚焦高钢级管道环焊缝的质量控制与安全,能够较清晰地体现油气管道全生命周期、全要素质量管理体系要点。环焊缝的失效致因通常可归纳为焊接缺陷、材料性能、载荷3部分^[45-49]。焊接缺陷主要分为平面型和体积型缺陷,其中平面型缺陷危害较大,主要包括裂纹、未熔合、未焊透等,焊缝位置错边、斜接、椭圆变形等几何缺陷也会影响环焊缝的承载能力。材料性能包括屈服强度、抗拉强度及断裂韧性,近年来研究重点集中在高钢级管道强度低匹配、热影响区软化、韧性不达标或离散等的产生原因及影响。载荷除了管道承受内压外,也可能承受周围土壤移动产生的附加载荷,如滑坡、沉降、地震等,对于在役埋地管道,控制管道外部载荷是避免环焊缝失效的有效手段。在役管道绝大多数都开展了漏磁和几何内检测,管体腐蚀、划伤、凹陷等体积型缺陷失效风险识别较充分,但环焊缝因受现场

施工条件复杂多变的限制,几何形貌往往不规则,对于内检测缺陷识别率相对管道本体较低,成为失效风险需重点管控的对象。

由运行期发现的环焊缝失效风险可以看出,只有在建设前有效识别环焊缝失效与缺陷成因机理,才能从设计中明确质量控制要点,确保焊缝运行期安全可靠。特别是在高钢级管线钢/管合金设计优化和焊接质量控制过程中,依据钢中C、Mn、Cr、Mo、Nb等合金元素对环焊缝焊接热影响区韧性的影响规律等,明确配套的管线钢/管制造技术及环焊工艺,确定自动焊管道在线焊接参数记录、热模拟、数值模拟以及实际焊接性能参数的强度性能参数预测技术,才能确保良好的焊接性能。因此,在设计阶段,需综合考虑现场焊接工艺关键参数和操作环节,建立制管过程(钢板、卷板、钢管)以及建设施工、焊接、焊材、监检测、运行、开挖验证、性能测试等全生命周期数据库,并避免产生吊装、下沟等全过程外载作用下环焊缝缺陷。综合分析各阶段、各因素影响脆弱性的关联性及权重,建立评估模型,预测材料、环境、人等对环焊缝质量的影响,明确质量管控关键。

3.3 智能化、数字化与质量管控技术

工程质量是建设的核心,近些年,在役管道出现了一些由质量问题引发的管道失效。在管道环焊缝质量风险排查工作中,经过内检测数据与竣工资料对齐,发现了无焊口施工安装记录、无检测记录、无底片的疑似“黑口”。通过调研分析近年来典型管道环焊缝失效案例,发现环焊缝失效致因主要集中在未熔合、根焊错边超差、强力组对、内壁根焊起裂、填充层数不符合规程要求等方面。其根本原因绝大多数是施工人员未按焊接工艺规程操作所致,且仅仅通过无损检测难以发现违章操作问题,因此,对于现场人员、机具设备、材料及施工过程的管控尤为重要。

通过多年探索和积累,在新建工程项目中搭建智能工地系统是极为有效的质量管控手段:基于物联网与移动应用技术,利用无线接入点及4G/5G网络在施工现场组建局域网,结合二维码、电子标签、摄像头、智能终端等设备,准确识别现场施工人员基本资料、岗位职责、资质证件等关键信息;在管材生产制造、采办调拨、现场施工作业等环节,通过扫码实现全过程管理;通过视频监控系统,实时监控现场整体情况以及焊接、防腐、下沟、穿跨越等关键工序,自动采集和实时传输焊接机工具况数据,以到达数据自动采集移交目标,实

现关键工序的质量行为可追溯、查询,有效提高现场质量管控能力,促进工地现场安全管理,提高施工资料数字化移交能力。智能工地是建设期借助智能化、数字化技术实施质量管控的典范,主要包括:

(1)工况自动采集及监视。对于油气管道建设行业,焊接是最核心的技术。对焊接工作涉及的焊机等设备进行改造,增加电流传感器、电压传感器、压力传感器、温度传感器及无线传输模块,采集和传输焊接电流、电压、送丝速度、防腐补口气压、温度等参数,并与焊口建立关联;与通过项目管理助手采集的结果数据进行对齐,实现焊接设备工况参数实时监控、焊接参数报警提醒、焊接质量分析等功能。

(2)工况数据验收。分析处理采集的工况参数,将各工序关键参数的特征值进行存档,结合焊接工艺规程标准值计算各工序参数符合率,由技术员、现场监理验收确认;在施工现场通过项目管理助手施工版对工况数据进行验收,质检员和监理签字确认,同步至系统;在系统中对自动采集的工况数据进行批量验收和审核。

(3)全部远程评片。将检测原始文件入库,利用入库的检测原始文件实现远程在线复评,满足检测方评片、第四方检测复评及检测单位互评需求,复核后记录复核结果,可在线查看。

(4)全部视频监控。根据建设现场临时性、移动性、复杂性等特点,针对不同场景采用不同的监控方式,如机组作业面场景采用固定场景布控球进行监控,焊接棚内采用隐蔽式针孔摄像头进行监控,下沟机组通过定制三脚架与布控球的组合方式进行监控等。

(5)重点区域管理功能。在隧道、站场等重点区域实现人员车辆定位、气体监测、盾构设备运行参数实时接收等功能。采用先进的脉冲无线定位技术,可以满足盾构施工场景下对人员、设备、车辆的高精度定位需求;隧道建设工程属于安全事故易发、多发的高危区域,随着施工深度增加,施工现场易出现一氧化碳、硫化氢、二氧化碳、燃性气体等对人体有害物质或发生爆燃等安全事故,通过加装传感器,结合数据集成和传输,实时监测气体组分,保障施工现场安全;通过前置终端,自动实时接收盾构机的运行参数,实现远程监视。

4 中俄东线天然气管道建设与运行实践

中俄东线天然气管道工程是国际上首次主体工

程同时采用 1 422 mm 大口径、X80 高钢级管线钢管、12 MPa 高压力、穿越高寒冻土区与原始森林的天然气长输管道。该管道全长 3 371 km, 与西气东输天然气管道、陕京输气管道等国家骨干天然气管网互联互通, 共同构成纵贯南北、横跨东西、覆盖全国、连接海外的全国性天然气供应网络, 每年稳定供应清洁优质天然气资源 $380 \times 10^8 \text{ m}^3$, 对保障国家能源安全和民生资源供应意义重大。为了实现中俄东线天然气战略通道建设和运行, 履行中俄两国政府之间照付不议合同, 保障该管道按时、高质、高效承接 $380 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 进口天然气, 管道建设质量和运行安全面临 3 方面技术挑战^[4,50-53]:

(1) 高钢级管道本体失效及评价理论不健全, 高效识别质量隐患成为挑战。管道材料及焊接的可靠性是当前高钢级管道建设与运行的基础和前提。近年来, 管道重大事故暴露出高钢级管道在复杂载荷作用下压缩屈曲失效与环焊接头拉伸破裂失效关键机制、预测理论缺失的问题, 导致建设过程中质量保障技术不足与质量管控目标不清。

(2) 全过程与全要素都成为可能造成质量缺陷与安全隐患的重要因素, 现有设计施工技术不能支撑管道高质量建设。随着管道钢级的提升, 管线钢的屈强比增大、韧性降低, 管道从屈服到断裂的安全裕量减小, 管道本体全生命周期安全风险升高, 高钢级管道建设面临越来越高的质量要求。因此, 必须从全要素、全过程提升精细化设计、施工质量控制的技术水平。

(3) 全自动焊接、耐低温管材管件制造与质量管控技术空白。中俄东线天然气管道沿线自然环境复杂, 多年冻土和林带交替分布, 工程沿线极端气温低至 -45°C , 且自然和社会依托极端匮乏, 现场焊接质量是工程质量管理的核心任务, 事关管道本质安全, 受焊接工艺、材料、环境及人为等因素影响, 不仅工作量大, 而且质量控制难度极大。依靠传统焊接技术、保温与伴热方法不能保证管道本体安全, 亟需攻克大口径全自动焊接、站场耐低温管材管件制造及质量管控技术, 确保工程质量与长期运行安全。

针对上述 3 大挑战, 构建了“基础理论创新、关键技术攻关、关键设备研制、工业示范应用”一体化技术与质量管理解决方案, 探索形成了高钢级管道屈曲失效评估技术, 开展了建运一体化设计平台、智慧工地施工管理技术、站场无人化操作支持技术、管道线路实时泛在感知技术等 21 项核心技术研究, 确保了工程的本

质安全。主要形成以下 3 大系列技术成果:

(1) 高钢级管道本体安全保障理论、焊接工艺与质量控制体系等。形成了考虑多匹配条件的大口径高钢级管道全自动焊接工艺、质量控制技术, 焊接一次合格率达 99%; 建立了一种优化的管道环焊缝极限载荷计算方法及改进的 X80 管道环焊缝裂纹失效评估模型, 实现了大应变条件下失效预测精度高于 95%; 构建了基于非线性稳定算法的管土耦合条件下高钢级管道屈曲数值求解方法, 计算效率较传统弧长法提高 50% 以上; 提出了 0.5% 应变需求下管径 1 422 mm 的 X80 管道焊接接头与母材的临界强度匹配系数指标。

(2) 高质量精细化数字化建设技术解决了全过程、全要素质量监管。建成了贯穿工程建设与运维阶段以资产为主线的数据信息一体化设计平台, 管道业务数据标准采用率高于 95%; 构建了智能工地远程监控平台, 管道建设过程现场机具 100% 全覆盖的实时视频监控、设备智能感知、数据自动采集、数据数字化移交、事件多维度回溯。

(3) 大口径高钢级天然气管道环焊缝自动焊接技术全面应用。基于已建成管道建设与运行经验, 面对低温环境等特殊要求, 研究采用全自动焊工艺技术, 并自主开发了环焊缝自动焊接、防腐补口等国产化新装备, 焊接一次合格率提升至 99%, 装备国产化率 100%, 工程质量显著提升, 为复杂条件下油气管道大规模高质量建设奠定了技术基础; 自主研发形成低温高钢级管材管件制造与质量管控技术, 低温 X80 高钢级系列直缝钢管、管件国产化制造技术, 产品各项技术指标均满足 -45°C 应用要求, 达到国际同类产品水平。

5 结论及展望

质量是安全的基础, 高质量设计、施工是油气管道安全运行的第一保障。建立“质量控制为基础, 全要素管理为核心, 增强全生命周期抗风险能力”油气管道建设质量与运行安全新模式, 使油气管道安全保障更有力, 并为其质量控制与安全管理的技术提升指明了方向。以中俄东线天然气管道工程高等级钢全自动焊接技术与失效风险研究为基础, 探讨了油气管道建设与运行质量风险一体化技术、焊接技术提升、数字化与智能化技术应用、全生命周期质量管控与安全管理体系等在提高油气管道建设质量及安全性方面的重要作用。实

践证明:上述研究应该是今后油气管道质量控制与安全管理技术的发展方向。此外,随着新技术的不断发展,数字化、智能化质量管控确保油气管道本质安全是必然趋势,需加大研究力度,以期将上述新技术高效应用于油气管道的质量控制和安全管理。当然,在工程实践中引入上述理论和技术面临诸多挑战,不仅包括资源投入、员工培训、数据处理等问题,还需从理论体系的完备、理念方式的转变等方面开展大量工作。

参考文献:

- [1] 黄维和,韩景宽,王玉生,沈珏新,程蕾.我国能源安全战略与对策探讨[J].中国工程科学,2021,23(1):112-117. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.01.017.
HUANG W H, HAN J K, WANG Y S, SHEN J X, CHENG L. Strategies and countermeasures for ensuring energy security in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 112-117.
- [2] 黄维和,周淑慧,王军.全球天然气供需格局变化及对中国天然气安全供应的思考[J].油气与新能源,2023,35(2):1-12,20.
DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2023.02.001.
HUANG W H, ZHOU S H, WANG J. Changes of the pattern of global natural gas supply and demand and thought on the security of Chinese natural gas supply[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(2): 1-12, 20.
- [3] 黄维和,梅应丹,吴丽丽,梁赟玲,赵晓丽.能源革命与中国能源经济安全保障探析[J].中国工程科学,2021,23(1):124-132.
DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.01.018.
HUANG W H, MEI Y D, WU L L, LIANG Y L, ZHAO X L. Energy revolution and security guarantee of China's energy economy[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 124-132.
- [4] 姜昌亮.中俄东线天然气管道工程管理与技术创新[J].油气储运,2020,39(2):121-129. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.02.001.
JIANG C L. Management and technological innovation in China-Russia Eastern Gas Pipeline Project[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(2): 121-129.
- [5] 姜昌亮.石油天然气管网资产完整性管理思考与对策[J].油气储运,2021,40(5):481-491. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.05.001.
JIANG C L. Consideration and countermeasures of asset integrity management of oil and gas pipeline networks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(5): 481-491.
- [6] 王振声,陈朋超,王巨洪.中俄东线天然气管道智能化关键技术
创新与思考[J].油气储运,2020,39(7):730-739. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.07.002.
WANG Z S, CHEN P C, WANG J H. Key technological innovations and thinking of pipeline intelligence in China-Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(7): 730-739.
- [7] 王振声,陈朋超,王禹钦,蔡培培,马江涛.科技创新与国际标准双轮驱动管道企业高质量发展[J].石油科技论坛,2019,38(4):13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1002-302x.2019.04.003.
WANG Z S, CHEN P C, WANG Y Q, CAI P P, MA J T. Two wheels of technological innovation and international standards propel high-quality development of pipelines enterprises[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2019, 38(4): 13-17.
- [8] 冯庆善.油气管道事故特征与量化的理论研究[J].油气储运,2017,36(4):369-374. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.04.002.
FENG Q S. Theoretical study on characteristics and quantification of oil and gas pipeline accidents[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(4): 369-374.
- [9] 冯庆善.“树生”事故致因理论模型[J].油气储运,2014,33(2):115-120. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.02.001.
FENG Q S. “Tree type” model of accident cause theory[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(2): 115-120.
- [10] 冯耀荣,陈浩,张劲军,张可刚.中国石油油气管道技术发展展望[J].油气储运,2008,27(3):1-8. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2008.03.001.
FENG Y R, CHEN H, ZHANG J J, ZHANG K G. The progress and prospect of oil and gas pipeline engineering technology of CNPC[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27(3): 1-8.
- [11] 霍峰,王玮,曹永利,王福宾.跨越发展的中国油气储运建设技术及未来走向[J].石油科技论坛,2016,35(3):44-51. DOI: 10.3969/j.issn.1002-302x.2016.03.009.
HUO F, WANG W, CAO Y L, WANG F B. China's construction technology of oil and gas storage and transportation and its future development direction[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2016, 35(3): 44-51.
- [12] 王乐乐,李莉,张斌,孙云峰,冯学书,高山卜.中国油气储运技术现状及发展趋势[J].油气储运,2021,40(9):961-972. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.09.001.
WANG L L, LI L, ZHANG B, SUN Y F, FENG X S, GAO S B. Current status and development trend of oil and gas storage

- and transportation technologies[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 961–972.
- [13] 宫敬. 从旁接油罐到管网联运再到智能调控——中国输油管道工艺技术 50 年发展回顾与展望[J]. 油气储运, 2020, 39(8): 841–850. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.08.001.
- GONG J. Review and outlook for development of oil pipeline technology in the past 50 years in China, from floating tank process to joint operation of pipeline network and further to intelligent control[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(8): 841–850.
- [14] 陈传胜, 李丹, 尹恒, 王盼锋, 全青, 王寿喜. 智能管道发展现状及具体领域智能化的探讨[J]. 天然气与石油, 2020, 38(5): 133–138. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2020.05.021.
- CHEN C S, LI D, YIN H, WANG P F, QUAN Q, WANG S X. Development status of smart pipeline system and discussion on its intellectualization application in this specific field[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(5): 133–138.
- [15] 贾建敏. 新时代油气管道管理工作面临的机遇与挑战[J]. 化工管理, 2021(7): 5–6. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2021.07.003.
- JIA J M. Opportunities and challenges for oil and gas pipeline management in the new era[J]. Chemical Enterprise Management, 2021(7): 5–6.
- [16] 谢武军, 谌杨, 褚荣光, 王兆坤, 马睿, 刘梓舟. 智能管网时代油气管道施工现场的标准化建设[J]. 石油工程建设, 2021, 47(增刊 1): 121–126. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2206.2021.S1.028.
- XIE W J, SHEN Y, CHU R G, WANG Z K, MA R, LIU Z Z. Standardization construction of oil and gas pipeline construction site in epoch of intelligent pipeline network[J]. Petroleum Engineering Construction, 2021, 47(S1): 121–126.
- [17] 戴联双, 张俊义, 张鑫, 张华兵, 项小强, 曹涛, 等. RiskScore 管道风险评价方法与应用[J]. 油气储运, 2010, 29(11): 818–820. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2010.11.005.
- DAI L S, ZHANG J Y, ZHANG X, ZHANG H B, XIANG X Q, CAO T, et al. RiskScore pipeline risk assessment and its application[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(11): 818–820.
- [18] 刘军. 对比国内外油气管道高后果区标准[J]. 当代化工, 2014, 43(12): 2609–2611. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0460.2014.12.040.
- LIU J. Comparison of standards for high consequence areas of oil and gas pipelines at home and abroad[J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43(12): 2609–2611.
- [19] 张学洪. 油气输送管道高后果区的识别与管理[J]. 石油工业技术监督, 2022, 38(9): 52–54. DOI: 10.20029/j.issn.1004-1346.2022.09.013.
- ZHANG X H. Identification and management of high consequence areas of oil and gas transmission pipeline[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2022, 38(9): 52–54.
- [20] 孙晁, 项小强, 冯文兴, 蒋庆梅, 宁怡雯, 王波. 在役管道高后果区设计符合性排查研究[J]. 石油管材与仪器, 2023, 9(3): 65–70. DOI: 10.19459/j.cnki.61-1500/te.2023.03.012.
- SUN C, XIANG X Q, FENG W X, JIANG Q M, NING Y W, WANG B. Investigation on design compliance of in-service pipeline in high consequence area[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2023, 9(3): 65–70.
- [21] 罗云, 程五一, 樊运晓, 鲁华璋, 刘卫红, 徐东超, 等. 现代安全管理[M]. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2009: 1–20.
- LUO Y, CHENG W Y, FAN Y X, LU H Z, LIU W H, XU D C, et al. Modern safety management[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 1–20.
- [22] 傅贵, 李宣东, 李军. 事故的共性原因及其行为科学预防策略[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(1): 80–83. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6094.2005.01.023.
- FU G, LI X D, LI J. Common factors leading to accidents and behavior type research based on prevention[J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(1): 80–83.
- [23] 王婷, 项小强, 戴联双, 冯文兴, 李保吉. 输油气站场 HAZOP 分析方法及其应用[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 97–100. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2011.10.023.
- WANG T, XIANG X Q, DAI L S, FENG W X, LI B J. A case study on the application of HAZOP in a gas transmission station[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 97–100.
- [24] PHMSA. Pipeline safety: girth weld quality issues due to improper transitioning, misalignment, and welding practices of large diameter line pipe[J]. Federal Register, 2010, 75(56): 14243–14245.
- [25] WANG Y Y, BRUCE W A, AMEND W E. Guidelines to address pipeline construction quality issues: PRCI: Catalog No.PR-186-104504-R01[R]. Chaniilly: Pipeline Research Council International Inc., 2013: 5–18.
- [26] WAN HAMAT W A, WAN ISMAIL W M M, IBRAHIM K A, ZIN G M, MD ARIS N S. Chapter 26 High strain weld solutions

- for geohazard active environment[M]//SALAMA M M, WANG Y Y, WEST D, MCKENZIE-JOHNSON A, A-RAHMAN A B, WU G Y, et al. Pipeline Integrity Management under Geohazard Conditions (PIMG). New York: ASME Press, 2020: 1-6.
- [27] The INGAA Foundation. Identification of pipe with low and variable mechanical properties in high strength, low alloy steels (White Paper)[R]. Washington D.C.: Interstate Natural Gas Association of American, 2009: 1-15.
- [28] KELIL T, AMARA M, MELIANI M H, MUTHANNA B G N, BOŽIĆ Ž, SULEIMAN R, et al. Assessment of API X65 steel pipe puffiness by a strain based design (SBD) approach under bi-axial loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104: 578-588. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.063.
- [29] Enbridge Pipelines Inc. Engineering report on long seam failures and girth weld cracks[D]. Calgary: National Energy Board, 2009: 1-47.
- [30] HARTBOWER C E, PELLINI W S. Explosion bulge test studies of the deformation of weldments[J]. Welding Journal-Welding Research Supplement, 1951, 3(a): 307s-318s.
- [31] SHRON R Z, BAKSHI O A. The static tensile strength of welded joints with a soft interlayer[J]. Shar Proiz. (English Translation in Welding Production), 1962, 5(a): 6-10.
- [32] SATOH K, TOYODA M. Joint strength of heavy plates with lower strength weld metal[J]. Welding Journal-Welding Research Supplement, 1975, 54(9): 311-319.
- [33] National Research Council. Effective use of weld metal yield strength for HY-steels[M]. Washington D.C.: The National Academies Press, 1983: 1-18.
- [34] 董绍华. 中国油气管道完整性管理 20 年回顾与发展建议[J]. 油气储运, 2020, 39(3): 241-261. DOI: 10.6047/j.issn. 1000-8241. 2020.03.001.
- DONG S H. Review of China's oil and gas pipeline integrity management in the past 20 years and development suggestions[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3): 241-261.
- [35] 冯庆善. 高钢级管道环焊接头强度匹配的探讨与思考[J]. 油气储运, 2022, 41(11): 1235-1249. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241. 2022.11.001.
- FENG Q S. Discussion and thinking of high-grade pipeline girth weld strength matching[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(11): 1235-1249.
- [36] 吴锴, 张宏, 杨悦, 刘啸奔, 隋永莉, 陈朋超. 考虑强度匹配的高钢级管道环焊缝断裂评估方法[J]. 油气储运, 2021, 40(9): 1008-1016. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.09.006.
- WU K, ZHANG H, YANG Y, LIU X B, SUI Y L, CHEN P C. Fracture assessment method for girth welds of high-grade steel pipelines considering strength matching[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 1008-1016.
- [37] 陈伯蠡, 周运鸿. 高强钢埋弧焊焊缝的强韧化研究[J]. 焊接学报, 1987, 8(3): 153-162.
- CHEN B L, ZHOU Y H. Improvement of toughness and strength of high strength steel submerged arc weld metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1987, 8(3): 153-162.
- [38] 王振家, 陈伯蠡, 戈成东. 为较高强度的结构钢选择焊接材料须考虑的两个因素[J]. 热加工工艺, 2004(8): 47-48, 62. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3814.2004.08.021.
- WANG Z J, CHEN B L, YI C D. Two factors about selecting welding material for HSLA steel[J]. Hot Working Technology, 2004(8): 47-48, 62.
- [39] 王振家, 戈成东, 陈伯蠡. 低碳调质钢焊接接头强度匹配的研究[C]. 西安: 第六届全国焊接学术会议, 1990: 145-149.
- WANG Z J, YI C D, CHEN B L. Research on strength matching of low carbon quenched and tempered steel welded joints[C]. Xi'an: The 6th National Welding Academic Conference, 1990: 145-149.
- [40] 严莺飞, 杨毅, 印建正, 陈伯蠡, 王振家. 钢焊接接头的强韧性设计原则的研究[J]. 机械工程学报, 1996, 32(2): 101-105.
- YAN Y F, YANG Y, YIN J Z, CHEN B L, WANG Z J. Design principle of the strength and toughness for steel welded joints[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1996, 32(2): 101-105.
- [41] 苏丽珍, 何莹, 李桂芝, 白芳, 牛冬梅, 王茂堂. 高钢级管线钢管环焊缝高强匹配研究[J]. 焊管, 2009, 32(9): 27-30. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3938.2009.09.006.
- SU L Z, HE Y, LI G Z, BAI F, NIU D M, WANG M T. High strength matching study on circumferential weld of high grade line pipe[J]. Welded Pipe and Tube, 2009, 32(9): 27-30.
- [42] 张宏, 吴锴, 刘啸奔, 杨悦, 隋永莉, 张振永. 直径 1422 mm X80 管道环焊接头应变能力数值模拟方法[J]. 油气储运, 2020, 39(2): 162-168. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.02.005.
- ZHANG H, WU K, LIU X B, YANG Y, SUI Y L, ZHANG Z Y. Numerical simulation method for strain capacity of girth welding joint on X80 pipeline with 1 422 mm diameter[J]. Oil & Gas

- Storage and Transportation, 2020, 39(2): 162–168.
- [43] 帅健, 孔令圳. 高钢级管道环焊缝应变能力评价[J]. 油气储运, 2017, 36(12): 1368–1373. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.12.004.
- SHUAI J, KONG L Z. Evaluation on strain capacity of girth welds in high-grade pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(12): 1368–1373.
- [44] 陈朋超, 冯文兴, 燕冰川. 油气管道全生命周期完整性管理体系的构建[J]. 油气储运, 2020, 39(1): 40–47. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.01.006.
- CHEN P C, FENG W X, YAN B C. Construction of full life cycle integrity management system for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 40–47.
- [45] 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. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.12.001.
- HUANG W H, ZHENG H L, WANG T. 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.
- [46] 曹永利, 姚登樽, 苏鑫, 周延, 于憬, 李海华. X80管线钢管体缺陷极限承载能力[J]. 油气储运, 2017, 36(12): 1361–1367. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.12.003.
- CAO Y L, YAO D Z, SU X, ZHOU Y, YU J, LI H H. The ultimate bearing capacity of defects in X80 pipeline steel[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(12): 1361–1367.
- [47] 赵新伟, 池强, 张伟卫, 杨峰平, 许春江. 管径1 422 mm的X80焊管断裂韧性指标[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 37–43. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.01.005.
- ZHAO X W, CHI Q, ZHANG W W, YANG F P, XU C J. Fracture toughness indicators of OD 1 422 mm X80 welded steel pipe[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 37–43.
- [48] 张振永, 孟献强, 孙学军, 周亚薇, 张金源. 中俄东线站场工艺管道用高钢级低温钢管韧性指标[J]. 油气储运, 2018, 37(4): 435–442. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.04.012.
- ZHANG Z Y, MENG X Q, SUN X J, ZHOU Y W, ZHANG J Y. Toughness index of low-temperature pipe of high steel grade used for the process pipelines at the station of China–Russia Eastern Natural Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(4): 435–442.
- [49] 张振永, 张文伟, 周亚薇, 薄国公, 邹宇. 中俄东线OD 1 422 mm埋地管道的断裂控制设计[J]. 油气储运, 2017, 36(9): 1059–1064.
- DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.09.013.
- ZHANG Z Y, ZHANG W W, ZHOU Y W, BO G G, ZOU Y. The fracture control design of the OD 1 422 mm buried pipeline in China–Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(9): 1059–1064.
- [50] 程玉峰. 保障中俄东线天然气管道长期安全运行的若干技术思考[J]. 油气储运, 2020, 39(1): 1–8. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.01.001.
- CHENG Y F. Technical insights into the long-term integrity and sustainability of China–Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 1–8.
- [51] 蒲明, 李育天, 孙骥姝. 中俄东线天然气管道工程前期工作关键点及创新成果[J]. 油气储运, 2020, 39(4): 371–378. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.04.002.
- PU M, LI Y T, SUN J S. The key to the preliminary work of China–Russia Eastern Gas Pipeline Project and innovative achievements[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(4): 371–378.
- [52] 张栋, 闫锋, 欧阳欣. 中俄东线天然气管道运行保障关键技术[J]. 油气储运, 2020, 39(8): 861–870. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.08.003.
- ZHANG D, YAN F, OUYANG X. Key technologies for operation guarantee of China–Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(8): 861–870.
- [53] 隋永莉, 王鹏宇. 中俄东线天然气管道黑河—长岭段环焊缝焊接工艺[J]. 油气储运, 2020, 39(9): 961–970. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.09.001.
- SUI Y L, WANG P Y. Girth welding technology used in Heihe–Changling Section of China–Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(9): 961–970.
- (收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2023-09-22; 编辑: 刘朝阳)
-
- 基金项目:** 国家管网集团科技开发项目“高钢级管道环焊缝失效机理研究”, WZXGL202105。
- 作者简介:** 姜昌亮, 男, 1965年生, 教授级高级工程师, 2001年博士毕业于中国科学院沈阳应用生态研究所生态学专业, 现主要从事油气管道建设与运行管理工作。地址: 北京市朝阳区东土城路5号, 100013。电话010-82279901。Email: jinyx@pipechina.com.cn
- 开放科学(资源服务)标识码(OSID):