

管线钢的腐蚀风险分析与防控管理

都本兰, 任玉波

(安丘市应急管理局, 山东 安丘 262100)

摘要: 概述了管线钢在管道运输行业的应用、面临的腐蚀问题, 分析了管线钢腐蚀带来的风险, 包括腐蚀危害和影响因素。综述了目前管线钢的腐蚀检测技术、安全评价技术及腐蚀控制和防护措施。最后, 针对管线钢腐蚀风险的认识和控制, 提出了未来发展需加强技术创新、智能化应用以及高效管理。

关键词: 管线钢; 腐蚀风险; 安全评价; 检测防护

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)12-0143-12

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.018

Corrosion Risk Analysis and Prevention Management of Pipeline Steel

DU Benlan, REN Yubo

(Anqiu Administration of Work Safety, Shandong Anqiu 262100, China)

ABSTRACT: The application of pipeline steel in the pipeline transportation industry and the corrosion issues it faces are summarized. The risks associated with pipeline steel corrosion are analyzed, including the hazards and influencing factors. Furthermore, the current corrosion detection techniques, safety evaluation technologies, and corrosion control and protection measures for pipeline steel are reviewed. Finally, in light of the understanding and control of pipeline steel corrosion risks, it is proposed that future development should emphasize technological innovation, intelligent applications, and efficient management.

KEY WORDS: pipeline steel; corrosion risk; safety assessment; detection and protection

管线钢作为管道运输领域的核心材料, 凭借其高强度、高韧性、出色的抗腐蚀性、耐高温性能以及优良的焊接特性, 在油气输送、化工生产、电力供应、城市建设及海洋工程等多个关键领域起到重要作用。在油气输送领域, 管线钢被广泛用于制造大口径焊接钢管, 如 X 系列、API 2WGr60 等, 这些钢管内部需承受高压、高温及腐蚀性介质的严峻考验, 而外部则多处于土壤、大气或海水等复杂环境中, 通常还伴有保温层的保护, 以维持其运行效率。在化工生产过程中, 管线钢内部需长期承受化学物质的腐蚀、高温及压力变化等多重挑战, 而外部则多处于工业大气环境中, 同样需要保温层的保护以维持其运行效率。为满

足这一需求, 通常采用 X52、X60、X65、X70 等耐腐蚀性、高温性能优异的高强钢材料, 以确保原料输送的安全性和稳定性。在热力发电和核电系统中, 管线钢更是扮演着输送燃料、冷却水和高温高压水蒸气等重要角色。其中, P91、P92 等合金钢材质的管线钢凭借其出色的性能, 成为了高压高温蒸汽系统中的重要管道材料。在海洋工程中, 管线钢遭受着更为严峻的环境。外部需承受海底高压、低温、强腐蚀等极端环境的侵蚀, 而内部则遭受输送介质的腐蚀作用。为此, X60、X65、X70 及其改良材质等具有优异耐蚀性、耐高温性和高强度的管线钢材料被广泛应用, 以确保海底管道的安全可靠运行。

收稿日期: 2024-11-01; 修订日期: 2024-12-12

Received: 2024-11-01; Revised: 2024-12-12

引文格式: 都本兰, 任玉波. 管线钢的腐蚀风险分析与防控管理[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 143-154.

DU Benlan, REN Yubo. Corrosion Risk Analysis and Prevention Management of Pipeline Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 143-154.

尽管管线钢在多个领域展现出了卓越的性能,但其仍面临着严重的腐蚀风险。管线钢同时遭受内部介质和外部环境的腐蚀作用。原油、天然气、化学原料等介质中的腐蚀性成分会对管道内部造成侵蚀,而腐蚀程度和类型则受到介质成分、温度、流速等多种因素的影响。此外,鉴于多数管道采取埋地敷设并有保温层保护,这种设计虽有助于维持管道效能,但也易于诱发保温层下的腐蚀(CUI)。一旦管道的内壁和外壁腐蚀情况加剧,将直接威胁到管道的完整性,导致腐蚀穿孔现象的发生,最终可能酿成泄漏事故。统计分析显示^[1-2],在导致管道失效的诸多因素中,腐蚀问题占据了相当显著的比例,具体数据见表1。管道腐蚀泄漏不仅会造成巨大的经济成本损失,更可能严重破坏自然环境,甚至对人们的生命安全构成威胁,产生不可估量的后果。因此,对管线钢的腐蚀问题进行深入研究,准确评估腐蚀风险,并探索有效的防护策略,对于保障管道安全、维护生态平衡及保护公众安全具有至关重要的意义。

表1 不同国家石油和天然气管道事故中
腐蚀因素占比统计

Tab.1 Statistics on the proportion of corrosion factors in oil and gas pipeline accidents in different countries

国家	事故发生时间	事故类别	腐蚀因素 占比/%
中国	1969—2003年	四川天然气管道事故	40
	2006—2015年	全国石油管道事故	9
	2006—2015年	天然气管道事故	10
美国	1985—1993年	石油管道事故	22
	1985—1993年	天然气管道事故	20
	2004—2015年	石油管道事故	25
	2004—2015年	天然气管道事故	18
欧洲 国家	1985—1993年	石油管道事故	28
	1985—1993年	天然气管道事故	16
	2003—2014年	EGIG天然气管道事故	24
加拿 大	1990—2015年	石油管道事故	34
	1990—2015年	天然气管道事故	65

1 管线钢腐蚀风险分析

1.1 管线钢腐蚀的危害

管线钢腐蚀造成的危害主要有3个方面,经济损失、生态环境破坏和人员伤亡。近年来,随着管道运输的快速发展,管道腐蚀引起的管道泄漏、管道爆炸事故仍然频繁发生,造成严重的财产损失。20年前,柯伟院士^[3]对我国管道使用现状的调查结果发现,管道腐蚀造成的设备和构件更换费、维修费和腐蚀防护费等直接经济损失每年最高达2288亿元,停产造成

的损失、腐蚀泄漏造成的产品损失费等间接经济损失,每年高达4979亿元,约为年国民生产总值的5%,为发达国家2~2.5倍^[4]。石油和天然气行业超过25%的故障与管线钢腐蚀有关^[5]。如中石油前郭石化分公司综合利用厂自1988年建成投产以来,每年发生的地下管线泄漏事故15~20个,按照维修费用每年递增10%计算,20年维修费、损失费合计845万元左右^[6]。胜利油田地面管线在强腐蚀区3~6个月就出现腐蚀穿孔,腐蚀泄漏造成管线年更换率约2.5%,造成损失6000万元/年,1999年更新管线费用就高达2.1亿元^[7]。2008年建成投运的雅克拉污水处理站,2009年—2010年6月,污水管线累计腐蚀泄漏40次,腐蚀治理费用高达27.2万^[8]。开发塔河油田过程中,集输管线腐蚀穿孔泄漏事故高达150多次,损失约8000万元,严重影响了原油正常采集和输送^[9]。

管线钢腐蚀泄漏的多次发生使生态环境也遭到严重破坏,甚至引发人员伤亡^[10]。如2006年,在美国阿拉斯加,英国石油公司(BP)Prudhoe Bay油田某原油管道发生腐蚀穿孔,导致 7.5×10^5 L原油泄漏,造成了环境严重污染。因为该油田担负着全美国每年20%用油量的运输,泄漏事故造成的原油供应突然停止,致使国际油价大幅度上升^[11]。2010年武汉曾因管线钢腐蚀造成煤气管道泄漏引起爆炸,致使上万人逃离,环境破坏和人员伤亡让人痛心。2011年,Bhat等报道了某石油运输管道($\phi 196 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm}$, X46钢)服役第8个月时腐蚀泄漏,大量石油流入附近农田,造成土壤环境大面积污染^[12]。2013年青岛也曾因管线钢腐蚀导致石油管道泄漏并引起爆炸,直接经济损失高达7.5亿元,甚至导致严重人员伤亡(62人死、136人伤),环境也遭到严重破坏。2015年10月,美国加州洛杉矶郊外Aliso Canyon地下天然气管道腐蚀失效,造成 10^5 t甲烷泄漏释放到大气中,造成巨大经济损失,并严重影响当地气候^[13]。此外,2022年6月18日,上海某石化公司某座环氧乙烷精制塔(T-450)和再吸收塔(T-320)之间的P-4507管道某处焊缝发生腐蚀断裂,导致大量工艺水泄漏,并引发后续爆炸。该次事故导致经济损失高达971.48万元,不仅给企业带来了巨大的经济损失,还严重影响了生产安全和环境保护。

由此可见,管线钢腐蚀是全球管道运输行业的重大挑战,对企业和国家经济构成严重威胁。在油气运输领域,腐蚀问题普遍,且多次引发严重泄漏事故,威胁生态和人员安全。数据显示,国内外腐蚀成本高昂且持续上升,其中油气运输行业的腐蚀成本占比非常大,如美国的石油天然气行业腐蚀损失占据了超过总成本的50%。随着管道运输发展,腐蚀问题愈发凸显,加强防控和治理已成为当务之急。管线钢腐蚀不仅关乎经济,更影响公共安全和环境可持续性。国际社会需共同努力,加强合作与交流,共同应对这一挑

战, 以降低经济损失、生态破坏和人员伤亡风险。

1.2 管线钢腐蚀影响因素

管道腐蚀的原因和机理复杂, 主要分为内壁腐蚀和外壁环境腐蚀, 以及土壤环境杂散电流腐蚀。内壁腐蚀主要由输送介质(如油气中的积水、二氧化碳、硫化氢等)引起, 这些介质含量越高, 腐蚀越严重。物理和化学破坏, 如盐结晶胀裂、中性化反应和硫酸盐侵蚀, 以及微生物的生命活动也会加速腐蚀。外壁腐蚀主要取决于管道所处的大气环境和土壤环境。大气腐蚀由水蒸气、污染性气体和微小颗粒物等造成, 金属暴露在大气中会形成薄液膜, 导致腐蚀。土壤腐蚀则是由于土壤颗粒间的空气、水和盐类构成电解质, 使埋地金属管道发生电化学腐蚀。土壤环境杂散电流腐蚀是非固定通路上流动的电流通过埋地金属管道时产生的腐蚀作用, 分为直流和交流杂散电流, 会加速金属管道的电化学溶解。为进一步探明管线钢的腐蚀影响因素, 从以下 4 个方面进行详细分析:

首先, 管线钢在输送燃气、石油、化工原料等介质过程中, 输送介质中的腐蚀性物质种类、浓度、温度、压力、流态等直接影响管线钢的腐蚀速率。例如, 川西地区某天然气管线钢腐蚀主要受到管内输送天然气含量、温度和压力有关。通过腐蚀产物和输送气体 CH_4 、 C_2H_6 、 CO_2 及 H_2S 的分析, 发现压力增大造成 Cl^- 穿透力增加, 同时与 H_2S 协同作用显著加速钢的腐蚀^[14]。某海底管线服役 7 a 后发生刺漏, 腐蚀穿孔最大孔径 4 cm, 经过失效原因分析发现, 管道中高含量的 CO_2 和管线底部积水是造成腐蚀穿孔主要原因^[15-17]。这是因为海底管道输送流体中含有 O_2 、 CO_2 、 H_2S 及硫酸盐还原菌(SRB)等多种腐蚀性强的介质, 腐蚀产物及微生物等在管道内壁形成垢盐, 发生隐蔽性较强的垢下腐蚀, 引发管道腐蚀穿孔泄漏。中国新疆某 X52 级输油管道起伏管段曾多次内腐蚀穿孔泄漏事故, 2013 年甚至发生爆管泄漏事件^[15]。经过失效分析发现, 管道低洼处聚集了微量游离水和积水, 导致 SRB 在此处大量繁殖, 促进管道低洼处发生局部腐蚀穿孔。根据长庆油田公司的管道事故统计, 从中国甘肃运往宁夏的原油管道(全长 270 km, X52 管线钢)曲子站附近 12 km 范围内腐蚀最为严重。1991—2004 年, 该区域发生了 63 次腐蚀穿孔事件。2016 年, 再次发生腐蚀泄漏后进行了失效分析, 确认腐蚀失效原因是遭受原油中溶解氧和硫酸盐还原菌(SRB)共同作用造成的局部腐蚀穿孔^[18]。

其次, 管线所处的土壤、水、大气等环境因素对腐蚀也有显著影响。上述中的电解质、微生物、水分含量等因素会影响管线钢的腐蚀行为。如 2004 年 4 月, 伊朗某石油公司的埋地管道(材质为 API 5L X52)发生腐蚀开裂, 导致大量石油泄漏。经失效分析发现, 管道外表面涂层失效破损, 潮湿土壤环境中的 SRB

和碳酸盐、碳酸氢盐以及弯曲应力的存在, 导致了应力腐蚀开裂(SCC)的发生^[19]。四川某天然气管道(材质为 X65 钢)腐蚀穿孔导致天然气泄漏, 通过失效分析发现, 失效管道外壁部分涂层剥离, O_2 、 CO_2 和 H_2O 与钢管接触发生腐蚀, 同时发生硫酸盐还原菌腐蚀, 管道内壁还发生了 H_2S 、 CO_2 腐蚀, 与管外腐蚀同时进行造成腐蚀穿孔^[20]。2000 年, 韩国石油天然气公司某长输管道(X65 钢)发生腐蚀穿孔, 引起严重的泄漏, 导致全面停工勘察^[21]。经过分析腐蚀产物、观察腐蚀坑形貌、检测土壤中的细菌数量等发现, X65 管线钢局部腐蚀穿孔的主要原因是管线钢剥离涂层下发生了 SRB 和产酸菌(APB)的微生物腐蚀。德国研究人员^[22]也报道了经过沼泽地的某条埋地输气管道腐蚀泄漏事件, 经过失效分析发现, 管道剥离涂层下发生了 SRB 腐蚀, 促使管道外壁发生局部快速腐蚀减薄, 增加了管道运输的安全风险。此外, 据调查^[23], 美国得克萨斯州和新泽西州的 4 段管道也发生了涂层下管线钢的微生物腐蚀, 促进了管道外的局部腐蚀失效。加拿大横加公司调查发现^[22], 加拿大阿尔伯塔省卡尔加里(TCPL)60 000 km 的天然气管道外部受到环境因素的影响, 发生管道外腐蚀约占管道腐蚀失效的 38%。腐蚀主要发生在涂层脱黏时, 管线钢暴露在地下水中, 溶解氧、地下水和微生物(厌氧菌), 微生物腐蚀起主导作用的腐蚀失效, 占管道外部腐蚀失效事故的 50%。2014 年, 我国山东某地 1 条输气管线钢管(X60 钢, 厚 7.1 mm)在埋地 13 个月, 因连续降雨某管段处于大量积水区, 管身出现 7~10 处腐蚀穿孔, 导致漏气严重。通过失效分析发现, 腐蚀失效原因主要是 SRB 与水中溶解氧和氯离子协同作用^[25]。

第三, 管线钢的材质、成分、组织结构等也会影响其耐腐蚀性能。如某石油天然气输送中螺旋缝埋弧焊钢管($\phi 1\ 219\ \text{mm} \times 18.4\ \text{mm}$, X80)发生腐蚀泄漏, 分析发现, 焊缝金属中的大型非金属夹杂物焊缝使得金属基体的连续性遭到破坏, 局部应力集中, 在腐蚀介质协调作用下发生 SCC, 导致钢管腐蚀开裂引起泄漏^[24]。华北某油田掺水管线的环焊缝发生腐蚀失效, 分析发现, 焊接过程造成根焊部位在服役过程中优先腐蚀, 腐蚀失效主要原因是焊缝与热影响区的成分和组织不均一性^[27], 导致高压输送管线的环焊缝、弯管等应力集中处成为腐蚀失效多发的薄弱部位^[28-29]。2016 年某储气库管道服役 11 a 后弯头位置发生氢致开裂, 经分析发现, 弯管工艺控制不当造成其材料硬度偏大、脆性增加, 导致在外部应力和阴极保护产生的氢共同作用下发生氢脆断裂^[30]。2022 年 6 月 18 日, 上海某石化公司某管道焊缝的腐蚀断裂就位于管道的弯折处, 平时经常受到介质的冲刷, 应力较高。这种高应力状态与腐蚀介质共同作用, 加速了管道的腐蚀过程, 最终导致应力腐蚀破裂。

此外,管线的设计和施工质量也会影响其腐蚀风险。例如,管线的布局、支架设置、防腐层选择等都会影响腐蚀环境。施工质量差则可能导致防腐层破损、焊缝缺陷等问题,进而加剧腐蚀风险。如2011年运行9 a的山东某天然气管道发生SCC引生爆裂事故,分析发现,管道外表面因机械划伤使涂层破损,涂层破损处优先发生腐蚀,局部应力集中和腐蚀介质共同作用导致SCC^[31]。2012年12月,美国西弗吉尼亚州的哥伦比亚输气公司地下天然气输送管线发生腐蚀泄漏导致爆炸,造成严重经济损失。事故调查后发现,SM-80管线钢联合使用了涂层与外加电流阴极保护措施,在施工过程中,回填土中的石块破坏了涂层,阻碍了阴极电流保护,造成管线钢外部腐蚀穿孔^[30]。侯保荣院士^[32]在对引滦入津水源干管的腐蚀调查中发现因城市埋地管道下半部在吊装、拖拉时损伤率最大,焊缝补口时现场施工难度大,质量很难控制。这些人为因素加之下半部环境腐蚀严重,蚀坑和穿孔部位有80%~90%都集中在管道中下部或底部,对供水造成极大的威胁和隐患。

造成管道腐蚀失效的原因往往是多种因素共同作用造成的。如王小玉等^[33]统计分析了西部某油田管道失效数据,结果表明,造成该油田管道失效的主要原因是管道运行年限长、制造工艺缺陷、内外环境介质腐蚀性强、细菌、腐蚀防护措施不当、施工过程不规范等多种因素综合造成的管道内外腐蚀穿孔。

2 管线钢腐蚀监检测、评价及防护

2.1 管线钢腐蚀检测技术

对管线钢进行定期腐蚀检测是保证管道运输安全的主要方式之一。检测方法主要有涡流检测法、漏磁通法、超声波法、激光检测法和电视测量法等^[34],可实现对管线钢腐蚀状态的有效检测。

2.1.1 涡流检测技术

涡流检测法是一种非接触式的无损检测方法,建立在电磁感应原理基础上,管线钢的厚度、局部形状和缺陷、电导率、磁导率等的不同,施加激励信号后会获得不同的涡流响应,分析涡流状态变化可以获得管线钢腐蚀状态^[33]。脉冲涡流检测技术的激励信号采用脉冲电流代替了正弦电流,通过检测脉冲涡流电磁场的衰减程度评估管道壁厚的腐蚀程度。脉冲涡流检测不需要使用耦合剂,因此无需剥离保温层就能够灵敏识别保温层下不同类型管线钢的腐蚀缺陷,在保温层下管线钢腐蚀损伤检测的实际工程中起着重要作用^[36]。

自从美国ARCO公司20多年前首次研制世界上第一台涡流现场检测仪器TEMP设备,紧接着荷兰RTD公司在此基础上改进生产了管道腐蚀缺陷检测

的脉冲涡流INCOTEST检测系统,实现了不同管线保温层(或绝缘层、涂层、附着物等)下腐蚀缺陷的有效检测,即使设备处于运行状态,在线检测均取得了良好的效果^[37]。2005年,中国特种设备检测研究院(CSEI)使用RTD公司的INCOTEST系统已成功检测了数十条带保温层的工业管道,及时发现了严重腐蚀性缺陷。随后,CSEI与华中科技大学武新军教授等^[38]成功开发了钢腐蚀脉冲涡流检测系统,可检测出120 mm包覆层厚度下10%的管线钢腐蚀缺陷,检测精度提高,使脉冲涡流检测系统的适用范围进一步扩大。

为了在国内更好应用,我国结合国际先进涡流检测技术,自主研发适用于我国运输管道的涡流检测技术。如刘瑞云等^[39]开发了一种不受包覆层影响的在役管道缺陷脉冲涡流检测装置,陈浩禹等^[40]研制出了基于脉冲涡流的压力管道保温层下腐蚀检测新工艺,提高了在役管线钢腐蚀监检测效率,对输送管线钢的安全评估具有十分重要意义。韩扬等^[41]提出了铁磁管道壁厚脉冲涡流检测方法,成功用于核电厂在役管道非焊缝处的在线检测。综上可知,涡流检测可以开展非接触检测,检测灵敏度高,检测速度快,在腐蚀性强、温度较高和极冷等苛刻环境下缺陷的自动化检测中应用较广泛。涡流检测也有不足之处,包括无法直观显示缺陷形状和大小,对较深缺陷检测困难,检测精度低^[42]。

2.1.2 漏磁检测技术

漏磁检测技术是目前较成熟的管道无损腐蚀检测方法之一,在油气行业应用最广泛。管线钢是铁磁材料时,被磁化后,管线钢表面或近表面的缺陷处将形成漏磁场,能够在不破坏管道完整性的情况下,通过检测漏磁场的变化可探测出管线钢表面不同类型的腐蚀缺陷,并识别焊缝、阀门、三通、法兰和弯头等用以辅助缺陷定位,对腐蚀缺陷可实现定量检测^[43-44]。

早在20世纪60、70年代,美国Tuboscope公司和英国天然气公司先后研制出定性检测的管道漏磁检测设备,聚焦天然气管道的腐蚀缺陷检测。随后德国ROSEN公司、加拿大BJ管道检测服务公司、美国的TDW公司和GE PII公司相继开发了一系列的先进漏磁检测技术和漏磁检测设备,成功为世界上几十万公里输气管道开展了漏磁检测和完整性评价。

2000年以来,在引进国外先进漏磁检测技术基础上,我国科研机构和企业进行国产化自主研发,依次开发了1、2、3、4代三轴高清复合漏磁内检测器及数据自动分析系统^[45-50],在功能和精度等方面与国外逐步缩小差距,已经成功应用于石油与天然气管线钢的腐蚀缺陷检测,费用低、检测服务完善。近几年,我国又成功研发新一代超高清漏磁亚毫米级管道内检测器^[51-54],实现了亚毫米级通道间距的海量数据采

集和缺陷的精细化描述,突破了管道厚壁管磁化的检测难题,初步实现了管道小缺陷、环焊缝缺陷的精准检测,解决了油气管道针眼小面积深度腐蚀检测的难题^[53]。然而,漏磁检测容易受到噪声、材料杂质等的干扰,对较小的缺陷信号无法准确定量,往往依赖操作者的经验^[56-57]。因此,开发更加智能化的检测数据分析软件,进一步丰富超高清数据库的腐蚀缺陷数据,提升软件智能化分析识别能力,在微小腐蚀缺陷量化评价上进一步提高精度,是未来漏磁检测技术的发展方向。

2.1.3 超声检测技术

超声检测技术是利用超声波在管线钢等材质中的传播特性、波与腐蚀缺陷的相互作用机制进行检测的一种成熟技术^[58]。该技术通过超声探头,借助液体耦合剂与管壁耦合才能实现探测,主要应用于大管径液体管道,常用来检测壁厚,以确定腐蚀减薄,也可以探测出轴向和径向裂纹、缺陷的位置和深度,具有检测数据准确、直观的优点,因此成为油气管道腐蚀领域中主要的管道腐蚀检测手段^[59]。超声检测在管线钢腐蚀检测中应用过程中主要以厚度、裂纹和腐蚀缺陷为主,其中超声波定点厚度检测是油气输送管道腐蚀减薄检测最快速、最有效的手段^[58]。

超声导波的激励和接收方式主要有 3 种:压电式、电磁式和脉冲激光式。传统的超声检测技术是压电式超声检测技术,如德国 ROSEN 公司和 NDT 公司、美国 GE PII 公司的压电超声检测仪都具有很高的腐蚀缺陷检测精度,还能够实现在线监测,但是仅适用于液体管道的腐蚀缺陷检测。为了将超声检测技术用于输气管道,电磁超声换能器(EMAT)应运而生,电磁超声检测时不需要耦合剂与被检测管线钢耦合,具有非接触的优势^[60]。此外,电磁超声检测不受现场管道温度、表面质量、涂层的影响,对管线钢腐蚀缺陷(包括局部腐蚀坑、焊缝腐蚀缺陷、应力腐蚀和腐蚀疲劳裂纹等)检测效果良好,是油气长输管道现场监测的重要手段^[61]。如 ROSEN 公司研发的电磁超声裂纹检测器成为输气管道腐蚀缺陷检测的重要设备,能够在线检测应力腐蚀或疲劳裂纹、涂层剥离等^[62]。我国多家单位也研发了如 PS2000 系列等多款电磁超声道检测系统,检测灵敏度较高,能够配合管道对地埋管道腐蚀缺陷位置进行快速定位,保证了埋地管道的安全运行。但是电磁超声检测也有不足之处:电能损耗较大、转换效率较低、抗噪声干扰性差、接收信号质量较差^[63]。随着科技手段的迅猛发展,超声检测探头、探头扫描技术和信号收集处理技术也将随之更加智能化、自动化和便携化。如相控阵超声检测技术,不仅有成熟的检测系统软件、标准,相控阵检测仪器也很先进,已经用于多种管道的腐蚀缺陷检测^[64-66]。

2.1.4 其他管道腐蚀检测技术

超声、漏磁及涡流检测一般用于大直径管道的腐蚀缺陷检测,对于细管道腐蚀缺陷的检测,由于细管道空间狭窄,对传感器的要求较高。随着计算机技术和光电子技术发展,光电器件逐步小型化,光电检测技术逐渐用于管线钢腐蚀缺陷检测,具有非接触、信息量大、可见性和自动化程度高等优势,能够直接检测到管线钢内表面的裂纹和小的腐蚀缺陷,同时进行精确的三维测量和定位。目前用于管道腐蚀缺陷检测的光电检测方法主要有激光扫描法、电视测量法、视觉检测法等。但是激光检测法、电视测量法必须与其他方法配合,才能获得准确有效的腐蚀缺陷数据。例如,激光检测与超声检测相互配合形成了激光超声检测技术,兼具精度高、无损伤、非直接接触的特点。探测激光束可聚焦成 10 μm 小的点,实现微米级的空间分辨率,使腐蚀缺陷精确定位和尺寸测量,甚至可用于形状复杂如焊缝根部、细小管道内的检测^[67-68]。最先进的管道检测机器人往往融合多种检测技术实现对管道的综合检测服务,如 MISTRAS 的自动射线照相测试(ART)服务能够非接触式检测工作中管道的内部腐蚀和绝缘层下腐蚀。

2.2 管线钢的在线腐蚀监测

由于管线钢长期暴露于恶劣环境之中,容易受到多种腐蚀因素的侵袭,从而导致管道壁逐渐减薄、强度下降,严重时甚至会发生泄漏或断裂等灾难性事故。因此,实现在线腐蚀监测,及时发现并处理腐蚀问题,对于保障管道的安全稳定运行具有不可忽视的重要性。在线腐蚀监测技术是一种实时、动态的监测手段,能够精确地在线测量,并远程传输管道的腐蚀速率及相关参数。这一技术主要分为侵入式和非侵入式两大类。

2.2.1 侵入式

侵入式在线腐蚀监测技术通过将探针直接插入油气管道内部,使敏感元件与管道内部介质(如油、气、水等)直接接触,从而测量并反映管道内部介质的腐蚀特性参数。这类技术主要包括:

- 1) 电阻探针。通过测量敏感元件(电极)在腐蚀介质中的电阻变化来测定腐蚀率。其优点在于不受腐蚀介质限制,能够实现各种介质环境下连续监测,数据实时传输,响应速度快,便于远程监控。然而,电阻探针的加工精度要求较高,且相对于其他探针(如电感探针、线性极化探针),其精度和响应时间可能稍逊一筹。在某油田掺输管道腐蚀监测系统项目中,就成功应用了精密电阻探针技术,实现了对油、气、水多相流管道内腐蚀速率、腐蚀损耗量以及腐蚀等级评价的精确监测。

- 2) 电感探针。通过检测电磁场强度的变化来监

测试样的腐蚀情况。其优点在于适用于各种介质环境，响应速度快，抗干扰能力强。然而，电感探针的价格相对较高。在油气管道的重点腐蚀监测部位，电感探针得到了广泛应用，为管道的腐蚀监测提供了有力支持。

3) 电化学探针（又称线性极化探针）。在溶液体系内，通过测量极化电阻 R_p 来估算腐蚀速率。其优点在于监测灵敏度高（可达纳米级），响应速度快（仅需几分钟），且为原位、无损的腐蚀监测技术。然而，电化学探针主要适用于电解质腐蚀体系（如水系统），受电导率影响较大，易受介质污染，导致现场应用过程中监测数据不稳定。此外，电化学探针的成本也相对较高。因此，它主要用于含水介质的腐蚀环境，如循环冷却装置的进出口等。

4) 电化学噪声探针。通过检测腐蚀过程中引起的腐蚀电位或电偶电流的微弱波动来测量点蚀系数，进而计算初始点蚀及局部腐蚀趋势。这是一种原位无损监测技术，无需对被测电极施加外界扰动，无需提前构建电极过程模型。它能够监测分析管道的局部腐蚀和点蚀情况，检测设备简单，且易于实现远距离监测。然而，要获得可靠的测量结果，需要测量者具备足够的细心和专业知识。此外，数据具体分析及应用过程中的理论还需进一步深入研究。

2.2.2 非侵入式

非侵入式在线腐蚀监测技术则将监测探头安装在管道外壁，通过监测管道外壁相关的变化参数（如壁厚、温度、电阻及渗氢量等）来间接反映管道内的腐蚀速率。这类技术主要包括：

1) 在线测厚。利用超声波测厚探头，结合低功耗线路板设计和无线传输技术，实现远程无损在线腐蚀监测。其优点在于技术原理明晰，设备结构简单且价格相对便宜，无需插入管道内部，传感器不受腐蚀影响，且使用寿命长。然而，对于管道内壁较为粗糙的情况，测量效果可能会受到一定影响。腐蚀速率是通过间接计算得出的，因此响应时间较慢，且无法实时反映管道内的腐蚀速率。此外，该技术也无法用于缓蚀剂效果评价及优化工艺参数评价。在线测厚技术主要包括压电超声和电磁超声 2 种方式，其中压电超声需要耦合剂或波导杆来传递超声波，而电磁超声则无需耦合剂，且对被测管道表面要求不高，但换能器效率低且易受环境影响。

2) 氢通量探针。对于含氢元素的管道，氢分子（原子）能够通过管壁晶隙、位错等路径渗出管壁，并被收集器捕捉送入检测仪中进行监测分析。该技术主要用于 HF、 H_2S 、环烷酸等酸性腐蚀环境中，具有高灵敏性，且被广泛用于缓蚀剂评价、腐蚀风险部位确定以及内保护层完整性评估等方面。

3) 电指纹（FSM）技术。通过在管道表面焊接

传感针或电极矩阵来监测电极上采集电压与初始值的变化情况，从而检测由腐蚀引起的金属损失、脆裂和凹坑等问题。该技术无需泄漏风险、适用于硫化氢环境且可用于困难位置，同时无需耗材和取放工具，能够大面积测量并适用于无线在线测量，且不受导电性硫化亚铁膜影响。然而，该技术需要在管壁表面焊接矩阵电极，操作复杂且技术水平要求高，监测操作及数据分析也相对复杂且设备昂贵。

综上所述，管道腐蚀在线监测技术种类繁多且各具特色。在选择具体监测技术时，需要综合考虑管道的实际情况、监测需求以及成本等因素来做出最佳决策。

2.3 管线钢腐蚀安全评价

对于管线钢的腐蚀检测最终目的是实现对管道的风险检测和安全评价，因此管线钢的腐蚀检测必须是基于风险的检测，这便于识别高风险部位→对管道各部位的运行进行风险评价→进行风险排序→设计相应监测程序（软件）→根据监测结果采取措施→进行管道运行安全性评估→为管道完整性管理提供技术支撑。腐蚀是造成管道失效而影响安全运行的主要原因之一，因此根据管线钢腐蚀缺陷检测结果，分析管道腐蚀缺陷发生规律，评价在役管道的安全性非常重要。

美国机械工程协会早在 1984 年提出了针对油气管道的评价准则—ASME B31G 准则，主要基于单一缺陷预测管道失效压力，可以评价带有轴向裂纹、腐蚀缺陷的管道。后经历 1991 版、2009 版、2012 版共 3 次修订，采用了 Benjamin、Andrade、Freire 等学者的最新研究成果，考虑了相邻腐蚀缺陷的相互影响，能够获得更加精确的评价结果^[69]。挪威船级社与英国燃气公司合作推出 DNV-RP-F101 准则，形成一种综合考虑应力失效和腐蚀缺陷的影响评价管道安全失效状态的管道评价体系^[70]。美国 Battelle 研究院提出的 PCORRC 准则综合考虑了腐蚀深度和轴向长度对剩余强度的影响，极大程度上降低了管道评价的保守性，提高了评价结果的准确度^[71]。美国石油协会颁布了 API-579 方法，也综合考虑了相邻腐蚀缺陷的作用和载荷的影响，实现了服役过程中管道的安全评价^[72]。2010 年，美国腐蚀工程师协会（NACE）发布了管道外腐蚀直接评价方法（NACE SP0502），介绍了外腐蚀直接评价（ECDA）检测方法，包括预评价、间接检测与评价、直接检测与评价、后评价 4 个步骤。ECDA 方法的提出，完善了油气田和长输管道的 ECDA 体系，拓展了其应用范围^[73]。

21 世纪初，我国从国外引入直接评价技术，经过大量工程应用，目前也已形成相对完善的油气管道腐蚀检测评价体系^[62]。该评价体系以直接评价为核心，主要包括 ECDA、内腐蚀直接评价（ICDA）和

应力腐蚀开裂直接评价(SCCDA)。如行业标准 SY/T 0087.1~4 《钢质管道及储罐腐蚀评价》, 该标准在钢制管道的 ECDA、ICDA 和 SCCDA 方法基础上, 增加了钢制管道交流干扰腐蚀评价和油气管道腐蚀数据分析。SYT 6151《钢质管道管体腐蚀损伤评价方法》主要针对在役含有腐蚀损伤钢制管道制定了评价方法。这些标准均已经用于各行业的运输管道的腐蚀损伤评价, 为保障我国各行业运输管道的安全运行提供依据。

随着先进检测设备的研发与应用, 检测和评价技术得到快速发展, 近几年我国研究人员利用各种数据软件、数学算法、物理模型等提出了各种适用于不同工况的管线钢腐蚀损伤评价方法。如王宏军等^[74]提出了一种新的基于蒙特卡洛方法的管道安全评价方法, 针对油田管道内壁腐蚀特点, 分析检测到的管道腐蚀数据规律, 并对腐蚀缺陷生长规律进行预测, 基于安全预警模型进行管道安全评价, 用于某油田管道的管道失效年限预测, 可信度极高。中核武汉核电运行技术股份有限公司和中核核电运行管理有限公司的技术人员^[75]在国内外埋地管道腐蚀评价方法基础上, 首次对国内某核电厂的埋地管道开展了腐蚀检测与评价工作, 为核电厂埋地管道的腐蚀控制提供了技术支持。王站辉等^[76]为了油气管道腐蚀安全运行进行更加准确的评价, 综合分析 ASME B31G 标准、DNV-RPF101 规范、PCORRC 规范和有限元分析法等多种评价方法的评价结果发现, 非线性有限元分析方法的评价结果误差小、保守性低、集中性好、分布稳定, 适用于不同级别的钢制管道。何蕾等^[77]提出了一种智能优化算法与神经网络算法相结合的新方法, 将腐蚀管道可靠度变化规律融入建模过程, 能够在极短的时间内获得与蒙特卡罗模拟高度近似的评价结果。

综上可知, 国内外均形成以直接评价、检测、预测和预警为基础的管道评价技术, 已经在油气田等长输管道上实施较为系统、全面的完整性评价, 但是仍缺少评价方法技术的决策依据, 完整性管理缺乏统一和规范^[78]。

2.4 管线钢腐蚀控制及防护

对管线钢采取必要的腐蚀防护手段可以一定程度上避免或减缓钢制管道遭受环境介质(土壤、空气等)和输送介质(石油、天然气、污水等)的腐蚀。如钢制的油气输送管道和给排水管道大多为埋地管道, 管线钢内壁、外壁都可能发生腐蚀。对管线钢进行腐蚀控制, 避免管道腐蚀穿孔造成油、气、水泄漏及因此造成人员伤害、经济损失和环境污染, 是管道运输工程的重要内容。

控制管线钢腐蚀的最基本手段是合理选材和优化结构的防腐设计。选择耐蚀性强的 X52、X60、X65、X70 等管线钢材料, 控制管线钢中的非金属成分, 减

少非金属夹杂, 添加耐蚀合金元素提高其耐蚀性。如杨柯等^[79]通过在管线钢中添加少量铜元素研制了一种新型含 Cu 耐微生物腐蚀管线钢, 有效防止了管内外微生物腐蚀。整个管道系统尽量避免将不同金属材料进行偶接使用, 如必须选用不同材料焊接等方式偶接时, 应选自腐蚀电位相接近的材料, 且管道中的焊缝、螺栓和螺母、铆钉等材料的自腐蚀电位要比管道材料的自腐蚀电位高。铆接、螺栓和法兰连接的异种金属之间要进行绝缘, 如法兰连接采用绝缘套筒和绝缘垫片, 螺栓和铆钉连接后用胶泥等进行绝缘性密封, 使它们与腐蚀介质物理隔离。

管线钢的防腐保护是一个复杂且至关重要的任务, 它涉及多种策略和技术手段的综合运用。物理防护是其中的基础一环, 主要通过管道外部施加耐磨、耐腐蚀的涂层材料和包裹保温材料来实现。这些涂层和保温材料通常协同工作, 不仅提供保温效果, 还能有效防止保温层下的腐蚀发生^[80]。它们作为一道物理屏障, 隔绝了腐蚀介质和污染物与管道外表面的直接接触, 从而大大减少了腐蚀的风险。

在物理防护方面, 有一系列的标准和规范来指导涂层和保温材料的选择、施工及检验。例如, GB/T 50538—2020《埋地钢质管道防腐保温层技术标准》就详细规定了埋地钢质管道防腐保温层的设计、施工及检验要求, 适用于特定温度和环境下的管道外防腐保温。

除了物理防护, 电化学防护也是管线钢防腐的重要手段。它利用外加阴极电流或牺牲阳极的方式, 使管线钢处于阴极状态, 从而抑制腐蚀的发生。电化学防护通常与涂层防护相结合, 形成更为有效的防腐体系。相关的标准和规范如《钢质管道及储罐防腐蚀工程设计规范》和 GB/T 21448—2017《埋地钢质管道阴极保护技术规范》, 为电化学防护的设计、施工、验收和维护提供了详细的指导。我国的各个地区的长输油气管道, 通常采用牺牲阳极和涂层联合保护方式, 保护效果大幅度提升^[81-82]。

此外, 加强管道防腐的日常管理也是减少腐蚀事故发生的關鍵。这包括严格控制施工过程中的人员操作和工艺, 确保管道成型、焊接和安装的质量; 加强油气和给排水等长输管道日常运行的防腐工作, 及时分析腐蚀故障的原因, 并在定期检测的基础上做好预防工作; 严格记录管道运行的工况参数等内容, 做好管道剩余强度和腐蚀寿命的预测及预警工作。

为了进一步提高防腐效果, 还需要制定合理、完善的管理规范, 并加强工作人员的培训, 增强其安全责任意识。例如, 《腐蚀控制工程全生命周期通用要求》就规定了腐蚀控制工程在全生命周期内的通用要求, 包括设计、施工、验收、运行维护等方面的内容, 适用于各种环境下的腐蚀控制工程。

管线钢腐蚀控制与防护领域近年来取得了显著

进展,新材料与新技术的涌现为行业发展注入了新的活力,有以下多种创新:

1) 非晶合金涂层材料。这类材料凭借其卓越的高强度、高硬度、耐磨、耐腐蚀特性,在管线钢防腐领域展现出巨大潜力。通过将 Fe 基非晶粉末精细喷涂于管线钢表层,可形成一层坚固且耐腐蚀的保护屏障,显著提升管线钢的使用寿命,同时减少维护需求。兰州理工大学在此领域取得了突破^[83],成功研发出针对 X70 管线钢的新型 Fe-Ni-Cr-Co-Si-B-Nb 非晶涂层,相关研究深入而全面。

2) 高性能防腐涂料。这些涂料,如高分子环氧树脂聚合物和钛纳米聚合物等,以其出色的黏结力、渗透性和化学稳定性,在复杂环境中展现出优异的防腐性能。它们特别适用于输水、排污等易受腐蚀影响的管道系统,能有效抵御酸碱物质、溶解氧及 H₂S 等有害因素的侵蚀。

3) 合金化改进材料。通过在低碳钢中加入 Cr、Cu、Ca 等特定金属元素,可以显著提升其耐腐蚀性能,为管道生产提供了更优质的原材料选择。

4) 超音速火焰喷涂(HVOF)。作为一种高效、精密的喷涂技术,HVOF 能够确保非晶合金粉末等高性能防腐材料均匀、紧密地附着于管线钢表面,形成一层坚实的防腐层,有效隔绝腐蚀介质,延长管道使用寿命。

总之,管线钢防腐控制需综合施策,强化管理,融合新材料技术,才能确保长期稳定运行,促进行业健康发展。

3 结语

管线钢腐蚀风险分析是一个复杂而重要的过程,涉及多个方面的因素。通过深入了解腐蚀失效原因和腐蚀影响因素,明确腐蚀风险来源,开展有效的检测和监测手段对管道进行腐蚀管理,采取合适的防护措施,能够显著降低管线钢的腐蚀失效风险,保障管线钢安全可靠运行。在长期管道运输工程实践不断积累的基础上,借助于先进检测、预测和计算机等技术的迅猛发展,管线钢腐蚀风险的认识和控制的未来发展将紧密围绕技术创新、智能化应用以及高效管理展开,这些发展方向的实现将有助于降低管道腐蚀风险,提高管道运行的安全性和可靠性。

1) 不断研发新型耐蚀管线钢材料,如高性能合金、复合材料等,以提高管道的耐腐蚀性能。发展先进的防腐保温涂层技术、电化学保护技术等,为管道提供更为全面和有效的防护。

2) 远程监测技术的进一步发展,将实现更远距离、更稳定的数据传输和实时监测,用于长输管道的定时检测或在线检测,将降低人工巡检的频率和成本,提高监测的及时性和准确性。同时,智能监测系

统能够基于管道腐蚀失效和环境工况的大数据,利用云计算和人工智能算法,对监测数据进行深度分析、挖掘和预测,提前发现潜在的腐蚀风险,为决策提供科学的数据依据。因此,智能化的远程监测与维护系统是未来管道检测的主要发展方向。

3) 管道腐蚀检测技术的不断进步和智能化,将促进未来的检测标准和规范将更加完善、系统化,为腐蚀检测人员在管道完整性管理中提供统一的技术指导和管理依据,确保检测结果的准确性和可比性。人员培训与认证也应该作为管道腐蚀检测发展方向。通过加强人员培训和认证工作,可以提高检测人员的专业技能和素质,确保腐蚀检测工作的质量和安全。此外,注重跨部门、跨领域的协同管理也是未来管道腐蚀防护的重要方向,如与环保、安全等部门加强合作,能够共同推动管道腐蚀防护工作的深入开展。

参考文献:

- [1] 梁永宽,杨馥铭,尹哲祺,等.油气管道事故统计与风险分析[J].油气储运,2017,36(4):472-476.
LIANG Y K, YANG F M, YIN Z Q, et al. Accident Statistics and Risk Analysis of Oil and Gas Pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(4): 472-476.
- [2] 王旭.长输管道事故案例统计分析及对策研究[J].广州化工,2013,41(14):233-235.
WANG X. Statistical Analysis of Pipeline Accident Cases and the Research on Strategies[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(14): 233-235.
- [3] 柯伟.中国腐蚀调查报告[M].北京:化学工业出版社,2003:3-4.
KE W. Investigation Report on Corrosion in China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 3-4.
- [4] 米琪,李庆林.管道防腐蚀手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1994:3.
MI Q, LI Q L. Handbook of Pipeline Corrosion Protection[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994: 3.
- [5] YAN W, GUAN L, XU Y, et al. Numerical Simulation of the Double Pits Stress Concentration in a Curved Casing Inner Surface[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(1): 105-111.
- [6] 刘兵,管云生.地下管网采用阴极保护的可行性探讨[J].石油化工腐蚀与防护,2003,20(1):44-45.
LIU B, GUAN Y S. Exploration of Feasibility of Cathodic Protection for Underground Pipelines[J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2003, 20(1): 44-45.
- [7] 郑重,刘清华,杨向莲,等.胜利油田地面集输系统腐蚀状况分析[J].化工管理,2013(8):36.
ZHENG (C/Z), LIU Q H, YANG X L, et al. Corrosion Analysis of Surface Gathering and Transportation System in Shengli Oilfield[J]. Chemical Enterprise Management, 2013(8): 36.

- [8] 杨刚, 梁根生, 丁卫平. 雅克拉污水处理站污水管线腐蚀分析及治理建议[J]. 中外能源, 2010, 15(10): 103-105.
YANG G, LIANG G S, DING W P. Analysis and Control of Sewage Pipeline Corrosion in Yakla Sewage Treatment Station[J]. Sino-Global Energy, 2010, 15(10): 103-105.
- [9] 李占坤, 孙彪, 王喜乐, 等. 塔河油田油气集输管网腐蚀现状及防腐技术[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(3): 240-245.
LI Z K, SUN B, WANG X L, et al. Corrosion Status Situation and Anti-corrosion Technology of Oil Gas Gathering and Distribution Pipelines in Tahe Oilfield[J]. Corrosion & Protection, 2015, 36(3): 240-245.
- [10] 王聪, 马丹竹, 屈洋, 等. 腐蚀现状与解决理论研究进展[J]. 当代化工, 2015, 44(11): 2645-2647.
WANG C, MA D Z, QU Y, et al. Research Progress of Pipe Corrosion Situation and Corresponding Solutions[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(11): 2645-2647.
- [11] JACOBSON G A. Corrosion at Prudhoe Bay—A Lesson on the Line[J]. Mater Perform, 2007, 46: 26
- [12] BHAT S, KUMAR B, PRASAD S R, et al. Failure of a New 8-in Pipeline from Group Gathering Station to Central Tank Farm[J]. Materials Performance, 2011, 50(5): 50-54.
- [13] CONLEY S, FRANCO G, FALOONA I, et al. Methane Emissions from the 2015 Aliso Canyon Blowout in Los Angeles, CA[J]. Science, 2016, 351(6279): 1317-1320.
- [14] 姜雪梅, 姜金希, 魏涛, 等. 川西地区天然气管线内腐蚀机理研究及防护措施[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(8): 87-90.
JIANG X M, JIANG J X, WEI T, et al. Internal Corrosion Mechanism and Protective Measures of Natural Gas Pipelines in Western Sichuan[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37(8): 87-90.
- [15] 李发根, 韩燕, 赵雪会. 海底管道腐蚀失效分析[C]// 2015年油气输送管道高强度管线钢研究与应用技术国际研讨会论文集. 西安: 中国石油学会, 2015.
LI F G, HAN Y, ZHAO X H. Corrosion Failure Analysis of a Subsea Pipeline[C]// Proceedings of the 2015 International Symposium on Research and Application Technology of High Strength Pipeline Steel for Oil and Gas Transportation Pipelines. Xi'an: Chinese Petroleum Society, 2015.
- [16] 刘黎. X52 输油管道硫酸盐还原菌腐蚀行为研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
LIU L. Study on Corrosion Behavior of Sulfate Reducing Bacteria in X52 Oil Pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [17] XIAO R J, XIAO G Q, HUANG B, et al. Corrosion Failure Cause Analysis and Evaluation of Corrosion Inhibitors of Ma Huining Oil Pipeline[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 68: 113-121.
- [18] 张国礼, 秦立峰, 张峙, 等. 某海底管道失效分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2013, 28(1): 98-101.
ZHANG G L, QIN L F, ZHANG Z, et al. Failure Analysis of Some Submarine Pipeline[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2013, 28(1): 98-101.
- [19] ABEDI S S, ABDOLMALEKI A, ADIBI N. Failure Analysis of SCC and SRB Induced Cracking of a Transmission Oil Products Pipeline[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(1): 250-261.
- [20] 张书成, 吕玉海, 裴廷刚, 等. 天然气管道腐蚀穿孔失效分析与寿命预测[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(6): 74-78.
ZHANG S C, LÜ Y H, PEI T G, et al. Failure Analysis of Corrosion and Perforation and Life Prediction of Natural Gas Pipeline[J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(6): 74-78.
- [21] LI S Y, KIM Y G, JEON K S, et al. Microbiologically Influenced Corrosion of Underground Pipelines under the Disbonded Coatings[J]. Metals and Materials, 2000, 6(3): 281-286.
- [22] ENNING D, GARRELF S J. Corrosion of Iron by Sulfate-Reducing Bacteria: New Views of an Old Problem[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(4): 1226-1236.
- [23] PIKAS J. Case Histories of External Microbiologically Influenced Corrosion underneath Disbonded Coatings[C]// Corrosion 96. Colorado: NACE International, 1996
- [24] SHERAR B W A, POWER I M, KEECH P G, et al. Characterizing the Effect of Carbon Steel Exposure in Sulfide Containing Solutions to Microbially Induced Corrosion[J]. Corrosion Science, 2011, 53(3): 955-960.
- [25] 牛涛, 杨建伟, 王林, 等. 硫酸盐还原菌作用下 X60 管线钢的腐蚀穿孔机制[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(10): 1060-1064.
NIU T, YANG J W, WANG L, et al. Pitting Mechanism of X60 Pipeline Steel under the Action of SRB[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(10): 1060-1064.
- [26] 邵晓东, 戚东涛, 魏斌, 等. X80 管线钢管焊缝泄漏失效分析[C]// 第九届全国压力容器学术会议论文集. 合肥: 中国机械工程学会压力容器分会, 2017.
SHAO Xiao-dong, QI Dong-tao, WEI Bin, et al. Failure Analysis of Leakage in Welds of X80 Pipeline Steel Tubes[C]// Proceedings of the 9th National Conference on Pressure Vessels. Hefei: Chinese Society of Mechanical Engineering Pressure Vessel Branch, 2017.
- [27] 朱凯峰, 安静. 某油田注水管道环焊缝腐蚀穿孔失效分析[J]. 石油管材与仪器, 2022, 8(4): 75-79.
ZHU K F, AN J. Corrosion Reason Analysis of Girth Weld Used in Water Injection Pipeline[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2022, 8(4): 75-79.
- [28] 李云涛, 杜则裕, 陶勇寅, 等. 国产 X70 管线钢与焊接接头组织及 SSCC 性能[J]. 天津大学学报, 2005, 38(3): 274-278.
LI Y T, DU Z Y, TAO Y Y, et al. Microstructures and

- SSCC Properties for Base Metals and Welding Joints of Domestic X70 Pipeline Steels[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2005, 38(3): 274-278.
- [29] 曹睿, 丁云, 赵小康, 等. 管线钢焊接接头腐蚀与防护的研究进展[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2017, 29(6): 657-663.
CAO R, DING Y, ZHAO X K, et al. Research Progress on Corrosion and Protection of Welded Joints of Pipeline Steels[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2017, 29(6): 657-663.
- [30] 王梦蓉. 哥伦比亚气体输送公司管线爆裂事故(下)[J]. *现代职业安全*, 2014(9): 96-99.
WANG M R. The Pipeline Burst Accident of Columbia Gas Transmission Company (II)[J]. *Modern Occupational Safety*, 2014(9): 96-99.
- [31] 刘猛, 刘文会, 温玉芬, 等. 国内埋地长输管道应力腐蚀开裂风险现状[J]. *腐蚀与防护*, 2022, 43(5): 49-55.
LIU M, LIU W H, WEN Y F, et al. Stress Corrosion Cracking Risk Status of Long-Distance Buried Pipelines in China[J]. *Corrosion & Protection*, 2022, 43(5): 49-55.
- [32] 侯保荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
HOU B R. The Cost of Corrosion in China[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [33] 王小玉, 赵明辉, 徐梦雅, 等. 中国西部某油田管道失效原因及防护措施[J]. *腐蚀与防护*, 2024, 45(2): 119-122.
WANG X Y, ZHAO M H, XU M Y, et al. Failure Cause of Pipeline in an Oilfield in Western China and Protective Measures[J]. *Corrosion & Protection*, 2024, 45(2): 119-122.
- [34] 刘凯, 马丽敏, 陈志东, 等. 埋地管道的腐蚀与防护综述[J]. *管道技术与设备*, 2007(4): 36-38.
LIU K, MA L M, CHEN Z D, et al. Corrosion of Buried Pipeline and Its Anticorrosion[J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2007(4): 36-38.
- [35] 徐俊桥, 孙杰, 李绪丰, 等. 基于脉冲涡流技术的工业管道腐蚀检测[J]. *无损探伤*, 2023, 47(2): 45-48.
XU J Q, SUN J, LI X F, et al. Industrial Pipeline Corrosion Detection Based on Pulsed Eddy Current Technology[J]. *Nondestructive Testing Technologizing Technology*, 2023, 47(2): 45-48.
- [36] 何婷婷, 冯翠宁, 韩雪艳, 等. 脉冲涡流技术在保温层下管道腐蚀检测的应用研究[J]. *全面腐蚀控制*, 2022, 36(9): 118-123.
HE T T, FENG C N, HAN X Y, et al. Application of Pulse Eddy Current Technology in Pipeline Corrosion Detection under Insulation Layer[J]. *Total Corrosion Control*, 2022, 36(9): 118-123.
- [37] BRETT C, DE RAAD J A. Validation of a Pulsed Eddy Current System for Measuring Wall Thinning through Insulation[J]. *Proc Speie*, 1996, 2947: 211-222.
- [38] 武新军, 张卿, 沈功田. 脉冲涡流无损检测技术综述[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1698-1712.
WU X J, ZHANG Q, SHEN G T. Review on Advances in Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1698-1712.
- [39] 刘瑞云, 高整风. 一种不受包覆层影响的在役管道缺陷脉冲涡流检测装置: CN205877724U[P]. 2017-01-11.
- [40] 陈浩禹, 蔡刚毅, 刘海云, 等. 基于脉冲涡流的压力管道保温层下腐蚀检测新工艺[J]. *化工装备技术*, 2022, 43(5): 62-64.
CHEN H Y, CAI G Y, LIU H Y, et al. New Technology for Corrosion Detection under Insulation Layer of Pressure Pipeline Based on Pulsed Eddy Current[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2022, 43(5): 62-64.
- [41] 韩扬, 朱琪, 陈永安, 等. 脉冲涡流检测在核电厂管道的应用[J]. *南方能源建设*, 2024, 11(4): 118-126.
HAN Y, ZHU Q, CHEN Y A, et al. Application of Pulsed Eddy Current Detection in Pipeline of Nuclear Power Plant[J]. *Southern Energy Construction*, 2024, 11(4): 118-126.
- [42] 李少波, 杨静, 王铮, 等. 缺陷检测技术的发展与应用研究综述[J]. *自动化学报*, 2020, 46(11): 2319-2336.
LI S B, YANG J, WANG Z, et al. Review of Development and Application of Defect Detection Technology[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(11): 2319-2336.
- [43] 杜文飞, 李春光, 万四海. 管道漏磁检测的智能方法综述[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(6): 1-7.
DU W F, LI C G, WAN S H. Intelligent Methods for Pipeline Magnetic Flux Leakage Detection: A Review[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 47(6): 1-7.
- [44] 左万君, 戴西斌, 吴昌玉. 漏磁检测在管道损伤探测中的应用[J]. *无损检测*, 2024, 46(3): 56-63.
ZUO W J, DAI X B, WU C Y. Application of Magnetic Flux Leakage Testing in Pipeline Damage Detection[J]. *Nondestructive Testing Technologizing*, 2024, 46(3): 56-63.
- [45] 王富祥, 冯庆善, 王学力, 等. 三轴漏磁内检测信号分析与应用[J]. *油气储运*, 2010, 29(11): 815-817.
WANG F X, FENG Q S, WANG X L, et al. Signal Analysis and Application of Tri-Axial MFL Sensors for Pipeline In-Line Inspection[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2010, 29(11): 815-817.
- [46] 王富祥, 冯庆善, 王学力, 等. 三轴漏磁内检测信号分析与应用[J]. *油气储运*, 2010, 29(11): 815-817.
WANG F X, FENG Q S, WANG X L, et al. Signal Analysis and Application of Tri-Axial MFL Sensors for Pipeline In-Line Inspection[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2010, 29(11): 815-817.
- [47] 杨理践, 王玉梅, 冯海英. 智能化管道漏磁检测装置的研究[J]. *无损检测*, 2002, 24(3): 100-102.
YANG L J, WANG Y M, FENG H Y. Research on Intelligent Pipeline Magnetic Flux Leakage Tester[J]. *Nondestructive Testing*, 2002, 24(3): 100-102.
- [48] 张永江, 陈崇祺, 赫广令, 等. 高清晰度漏磁检测器的

- 研制及应用[J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21(4): 84-86.
- ZHANG Y J, CHEN C Q, HAO G L, et al. Research of High Resolution Pipeline Inspection Tools[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2008, 21(4): 84-86.
- [49] 武万辉, 郭勇, 王同德, 等. 管道漏磁检测技术及应用[J]. 管道技术与设备, 2009(2): 33-34.
- WU W H, GUO Y, WANG T D, et al. Magnetic Flux Leakage On-Line Inspection Technique and Its Application to Pipelines[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2009(2): 33-34.
- [50] 胡家铨, 焦晓亮, 郑莉, 等. 一种改进的支持向量回归三轴管道漏磁缺陷量化方法[J]. 无损检测, 2021, 43(3): 62-68.
- HU J C, JIAO X L, ZHENG L, et al. An Improved Support Vector Regression Method for Quantifying Magnetic Leakage Defects in Three-Axis Pipeline[J]. Nondestructive Testing Technology, 2021, 43(3): 62-68.
- [51] 李春雨, 马义来, 张莉莉, 等. 基于脉冲涡流的管道内检测系统设计[J]. 无损检测, 2018, 40(7): 65-68.
- LI C Y, MA Y L, ZHANG L L, et al. Design of Pipeline Internal Inspection System Based on Pulse Eddy Current[J]. Nondestructive Testing Technology, 2018, 40(7): 65-68.
- [52] 于超, 张永江, 李彦春, 等. 管道横向励磁漏磁内检测器研制[J]. 油气储运, 2020, 39(9): 1037-1041.
- YU C, ZHANG Y J, LI Y C, et al. Development of Transverse Excitation MFL Inline Detector[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(9): 1037-1041.
- [53] 杨辉, 王富祥, 玄文博, 等. 油气管道周向励磁漏磁检测技术优势与发展前景[J]. 油气田地面工程, 2020, 39(3): 1-4.
- YANG H, WANG F X, XUAN W B, et al. Advantages and Development Prospects of Circumferential Excitation Flux Leakage Detection Technology for Oil and Gas Pipelines[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2020, 39(3): 1-4.
- [54] 冯搏, 伍剑波, 邱公喆, 等. 高速漏磁检测方法的发展[J]. 无损检测, 2021, 43(2): 57-63.
- FENG B, WU J B, QIU G Z, et al. Development of High-Speed Magnetic Flux Leakage Testing Method[J]. Nondestructive Testing Technology, 2021, 43(2): 57-63.
- [55] 贾海东, 冯健. 油气管道周向励磁检测技术的研究[J]. 无损探伤, 2017, 41(4): 14-16.
- JIA H D, FENG J. Research on Circumferential Excitation Detection Technology of Oil and Gas Pipeline[J]. Nondestructive Testing Technology, 2017, 41(4): 14-16.
- [56] 董绍华, 田中山, 赖少川, 等. 新一代超高清亚毫米级管道内检测技术的研发与应用[J]. 油气储运, 2022, 41(1): 34-41.
- DONG S H, TIAN Z S, LAI S C, et al. Research and Application of a New Generation of Ultra-High-Definition Inline Detection Technology with Sub-Millimeter Precision[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(1): 34-41.
- [57] CHEN Q K, ZHANG J W, YE Q. Wire Rope Damage Detection Based on Magnetic Leakage and Visible Light[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2023, 23(3): 1275-1287.
- [58] SAHOO S K, GOSWAMI S S. Investigating the Causes and Remedies for Porosity Defects in the Casting Process: A Review[J]. BOHR International Journal of Engineering, 2023, 2(1): 15-29.
- [59] 刘慧芳, 张鹏, 周俊杰, 等. 油气管道内腐蚀检测技术的现状与发展趋势[J]. 管道技术与设备, 2008(5): 46-48.
- LIU H F, ZHANG P, ZHOU J J, et al. Current State and Development Trend of Internal Corrosion Detection Technology for Oil and Gas Pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2008(5): 46-48.
- [60] 费凡, 侯鹏, 韩铭, 等. 油气输送管道超声测厚技术的现状和发展[J]. 当代化工研究, 2021(3): 7-9.
- FEI F, HOU P, HAN M, et al. Status and Development Trend of Ultrasonic Thickness Measurement Technology for Oil and Gas Pipelines[J]. Modern Chemical Research, 2021(3): 7-9.
- [61] 黄松岭, 王哲, 王坤, 等. 管道电磁超声导波技术及其应用研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 1-12.
- HUANG S L, WANG Z, WANG S, et al. Review on Advances of Pipe Electromagnetic Ultrasonic Guided Waves Technology and Its Application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 1-12.
- [62] 曲志刚, 武立群, 安阳, 等. 超声导波检测技术的发展与应用现状[J]. 天津科技大学学报, 2017, 32(4): 1-8.
- QU Z G, WU L Q, AN Y, et al. Development and Application of Guided Wave Ultrasonic Testing Technique[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2017, 32(4): 1-8.
- [63] 吴志平, 陈振华, 戴联双, 等. 油气管道腐蚀检测技术发展现状与思考[J]. 油气储运, 2020, 39(8): 851-860.
- WU Z P, CHEN Z H, DAI L S, et al. Development Status and Thinking of Oil and Gas Pipeline Corrosion Detection Technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(8): 851-860.
- [64] 王文明, 王晓华, 张仕民, 等. 长输管道超声波内检测技术现状[J]. 油气储运, 2014, 33(1): 5-9.
- WANG W M, WANG X H, ZHANG S M, et al. Long-Distance Pipeline Ultrasonic Internal Inspection-State of the Art[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(1): 5-9.
- [65] 王雪, 薛岩, 周广言, 等. 管道环焊缝的相控阵超声检测[J]. 无损检测, 2020, 42(5): 75-78.
- WANG X, XUE Y, ZHOU G Y, et al. The Phased Array Ultrasonic Test of Pipeline Girth Weld[J]. Nondestructive Testing Technology, 2020, 42(5): 75-78.
- [66] 张炳奇, 孙旭, 杨坚, 等. 管道内壁裂纹的相控阵超声

- 检测[J]. 无损检测, 2021, 43(6): 31-35.
ZHANG B Q, SUN X, YANG J, et al. Phased Array Ultrasonic Detection of Inner Wall Cracks in Pipelines[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2021, 43(6): 31-35.
- [67] 张君娇, 郑晖, 潘强华, 等. 国内外超声相控阵检测一起性能测试评价标准比较与分析[J]. 无损检测, 2017, 39(5): 10-16.
ZHANG J J, ZHENG H, PAN Q H, et al. Comparison and Analysis of Domestic and Foreign Standards on Characteristics Evaluation of Ultrasonic Phased Array Testing Instruments[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, 39(5): 10-16, 98.
- [68] 冯广德. 管道内检测装置及应用技术进展[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(4): 91-97.
FENG G D. In-Line Inspection Tools and Application of Pipelines[J]. *Development and Application of Materials*, 2019, 34(4): 91-97.
- [69] 王颖, 王建林. 细管道内表面光电检测方法研究[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 735-739.
WANG Y, WANG J L. Optoelectronic Inspection of In-Pipe Surfaces[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(5): 735-739.
- [70] Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines: ASME B31G-2012[S]. American Society of Mechanical Engineers [asme], 2012.
- [71] Recommended Practice DNV RP-F101, Corroded Pipelines[S]. 2004.
- [72] STEPHENS D R, LEIS B N. Development of an Alternative Criterion for Residual Strength of Corrosion Defects in Moderate- to High-Toughness Pipe[C]// 2000 3rd International Pipeline Conference. Calgary: [s. n.], 2016
- [73] 王旭东, 徐杰, 孙冬柏, 等. 国外油气管道缺陷评估方法评介[J]. 机械工程材料, 2009, 33(4): 6-9.
WANG X D, XU J, SUN D B, et al. Appraisal of Oversea Oil Gas Pipeline Defect Assessment Methods[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2009, 33(4): 6-9.
- [74] 赵晋云, 郑娟, 刘晓峰, 等. ANSI/NACE SP0502-2010标准先进性分析[J]. 全面腐蚀控制, 2012, 26(8): 9-12.
ZHAO J Y, ZHENG J, LIU X F, et al. Analysis of Advantages of ANSI/NACE SP0502-2010[J]. *Total Corrosion Control*, 2012, 26(8): 9-12.
- [75] 王宏军, 国滨, 宫彦双, 等. 基于蒙特卡洛方法的油田管道内腐蚀状态安全评价及预测[J]. 化工机械, 2024, 51(3): 325-331.
WANG H J, GUO B, GONG Y S, et al. Safety Evaluation and Prediction of Corrosion Status of the Inner Wall of Oil-field Pipeline Based on Monte Carlo Method[J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2024, 51(3): 325-331.
- [76] 章强, 刘朝, 魏松林, 等. 核电厂埋地管道的外腐蚀检测与评价[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(7): 76-79.
ZHANG Q, LIU Z, WEI S L, et al. Evaluation and Measurement of External Corrosion for Buried Pipes in NPP[J]. *Corrosion & Protection*, 2021, 42(7): 76-79.
- [77] 王战辉, 马向荣, 高勇, 等. 不同钢级油气管道剩余强度评价方法对比[J]. 材料保护, 2020, 53(1): 67-74.
WANG Z H, MA X R, GAO Y, et al. Comparison of Residual Strength Evaluation Methods for Different Grades of Oil and Gas Pipelines[J]. *Materials Protection*, 2020, 53(1): 67-74.
- [78] 何蕾, 温凯, 吴长春, 等. 基于多种智能算法的腐蚀天然气管道可靠性评价方法[J]. 石油科学通报, 2019, 4(3): 310-322.
HE L, WEN K, WU C C, et al. Reliability Evaluation Method of Corroded Natural Gas Pipeline Based on Multiple Intelligent Algorithms[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(3): 310-322.
- [79] 马伟平, 窦志信, 姜垣良, 等. 长输管道完整性评价方法决策分析[J]. 石油工业技术监督, 2020, 36(8): 25-28.
MA W P, DOU Z X, JIANG Y L, et al. Decision-Making Analysis of Evaluation Methods for Integrity of Long Distance Pipeline[J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2020, 36(8): 25-28.
- [80] 杨柯, 史显波, 严伟, 等. 新型含 Cu 管线钢——提高管线耐微生物腐蚀性能的新途径[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 385-399.
YANG K, SHI X B, YAN W, et al. Novel Cu-Bearing Pipeline Steels: A New Strategy to Improve Resistance to Microbiologically Influenced Corrosion for Pipeline Steels[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(4): 385-399.
- [81] 吕晓亮, 唐建群, 巩建鸣, 等. 保温层下腐蚀防护的研究现状[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(2): 167-172.
(LÜ/LV/LU/LYU) X L, TANG J Q, GONG J M, et al. Research Status of Corrosion Protection under Insulation Layer[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2014, 26(2): 167-172.
- [82] 亓国良, 李亮. 长输天然气管道腐蚀的形成与防腐保护措施探析[J]. 石化技术, 2020, 27(1): 313.
QI G L, LI L. Formation of Corrosion of Long-Distance Natural Gas Pipeline and Analysis of Anti-Corrosion Protection Measures[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2020, 27(1): 313.
- [83] 赵振宇. 浅谈油气管道腐蚀影响和防腐方案[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(23): 40-41.
ZHAO Z Y. Discussion on Corrosion Influence of Oil and Gas Pipeline and Anticorrosion Scheme[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2023, 43(23): 40-41.
- [84] LI C Y, QUAN G N, ZHANG Q, et al. A Novel Amorphous Alloy Coating for Elevating Corrosion Resistance of X70 Pipeline Steel[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2024, 33(5): 1612-1629.