

天然气长输管道焊接质量控制关键技术研究

胡晓东 (中石化胜利油建工程有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 以天然气长输管道焊接质量控制为研究对象, 聚焦复杂工况下焊接缺陷频发、工艺适配性不足、管控流程脱节等核心问题, 提出磁场干扰多维度管控、焊接工艺动态优化、全流程质量闭环管理等关键技术方法。结合山东管网东干线工程高压线并行段案例验证, 应用这些技术后, 焊接一次合格率从96.32%提升至98%以上, 夹层未熔合缺陷发生率降低80%, 有效保障管道结构完整性与运行安全性, 技术方案经实践检验具备较强工程实用性与推广价值。

关键词: 天然气长输管道; 焊接质量控制; 复杂工况; 磁场干扰管控

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 002-0103-03

Research on Key Technologies for Welding Quality Control in Long-Distance Natural Gas Pipelines

Hu Xiaodong (Sinopec Petroleum Engineering&Construction Shengli Corporation, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: Taking the quality control of long-distance natural gas pipeline welding as the research subject, this study focuses on core issues such as frequent welding defects under complex working conditions, insufficient process adaptability, and disconnected management procedures. Key technical methods are proposed, including multi-dimensional magnetic field interference control, dynamic optimization of welding processes, and closed-loop quality management throughout the entire process. These methods are validated through the case study of the high-pressure parallel section in the East Mainline Project of Shandong Pipeline Network. After applying these technologies, the first-time welding pass rate increased from 96.32% to over 98%, while the incidence of interlayer incomplete fusion defects decreased by 80%. This effectively ensures pipeline structural integrity and operational safety. The technical solution has demonstrated strong practicality and applicability in engineering, making it highly valuable for promotion.

Keywords: Natural gas long-distance pipeline; Welding quality control; Complex working conditions; Magnetic field interference management

天然气长输管道是国家能源输送网络的核心载体, 根据《中国油气管道建设发展报告》显示, 截至2024年我国天然气长输管道里程已超13万km, 且仍以每年5%以上的速度增长。焊接接头作为管道系统的薄弱环节, 其质量缺陷引发的事故占管道安全事故总量的60%以上。当前, 管道与高压线并行、多介质管线同沟敷设等复杂工况日益增多, 传统质量控制手段难以应对, 亟需研究针对性关键技术, 为管道工程质量提升提供支撑。

1 天然气长输管道焊接质量控制的意义

1.1 保障管道全生命周期运行安全

天然气长输管道设计服役周期通常为30-50年, 输送压力普遍在6-12MPa, 介质易燃易爆特性决定了焊接接头需具备长期结构稳定性。据行业统计, 因焊接缺陷导致的管道泄漏事故中, 70%发生在投产5年内, 且事故处理平均成本超千万元/次。通过系统的焊接质量控制, 可将接头缺陷率控制在0.5%以下, 从源头杜绝因未熔合、未焊透等缺陷引发的应力集中、腐蚀加剧等问题, 确保管道在长期高压输送环境下的

安全运行, 避免对沿线居民生活、生态环境造成威胁^[1]。

1.2 提升工程经济效益与建设效率

焊接施工在天然气长输管道工程成本中占比达25%-30%, 若出现缺陷需进行割口返修, 单道焊口返修成本约为正常焊接成本的3-5倍, 且会导致工期延误。以某长度100km的管道工程为例, 若焊接一次合格率从96%提升至98%, 可减少返修焊口约170道, 直接节省成本超50万元, 缩短工期10-15天。同时, 高质量的焊接质量可降低管道运营期间的维护频次, 减少因检修导致的停输损失, 据测算, 合格焊接接头的年维护成本仅为缺陷接头的1/10, 长期经济效益显著。

1.3 支撑国家能源战略与管网建设

当前我国正加快构建“全国一张网”的能源输送格局, 西气东输三线、四线, 川气东送二线等重大工程持续推进, 管道建设向偏远地区、复杂地形延伸, 如穿越沙漠、海洋、山区等区域, 对焊接质量提出更高要求。可靠的焊接质量控制技术, 能确保在恶劣施工环境下仍保持稳定的焊接质量, 保障能源运输通道

的贯通与高效运行。例如，在沿海地区高压并行段施工中，通过有效的质量控制，可实现管道在高湿、强磁场环境下的高质量焊接，为能源供应提供坚实保障，助力国家能源安全战略落地。

2 天然气长输管道焊接要改善的问题

2.1 复杂环境干扰引发的焊接缺陷集中

在高压线路并行区域，由于高压输电线路产生的交变磁场强度可达 0.5–2mT，远超常规焊接环境的磁场阈值（0.1mT 以下），会导致焊接电弧产生不规则漂移，偏移量可达 2–5mm。这种漂移会使焊丝与熔池的相对位置不稳定，造成熔合不良，进而形成夹层未熔合、根部未焊透等缺陷，且缺陷多集中在焊缝六点点位的磁场影响敏感区域，常规的工艺参数调整难以抵消磁场干扰。此外，沿海高湿环境（相对湿度 > 80%）会导致焊材吸潮、熔池保护气纯度下降，增加气孔缺陷发生率；沙漠地区的风沙则会破坏保护气氛围，导致焊缝表面出现夹渣，这些复杂环境因素均对焊接质量构成严重挑战^[2]。

2.2 焊接工艺与工况的适配性不足

部分施工单位仍采用“一刀切”的工艺参数模式，未根据具体工况进行动态调整。例如，在焊接壁厚 27.5mm 的 X80 钢管道时，无论环境温度是 -10℃ 还是 30℃，均沿用相同的焊接电流、焊接速度等参数，低温环境下易因预热不足导致冷裂纹，高温环境下则会因熔池冷却过快产生未熔合。在多管线同沟敷设场景中，未考虑相邻管道的磁场叠加效应，仍按单管线施工顺序焊接，导致靠近已建管线的焊口缺陷率比远离区域高 15%–20%。

2.3 质量管控流程的闭环性与协同性缺失

当前长输管道工程虽已普遍采用自动化数据采集和视频监控等先进手段，但在流程协同与数据闭环应用上仍存在短板。在焊接前，尽管对材料进行了入场验收，但对过程中的状态变化管控存在脱节，例如，合格的焊材在领用后、使用前，可能因现场存储不当而受潮，导致批量气孔缺陷的产生，暴露出过程管控的“断点”。在焊接过程中，自动化系统采集的大量实时参数（电流、电压等）更多被用于事后追溯，而缺乏有效的实时分析与预警机制，当参数发生漂移时，系统无法及时向焊工发出预警并指导调整，导致缺陷形成后才能被动发现。在焊接后，无损检测发现缺陷并进行返修，但从“发现缺陷”到“优化工艺”的反馈链条过长或不完整，缺陷分析往往停留在直接原因层面，未能系统地、快速地反馈至前端的焊接工艺规程（WPS）进行迭代优化，导致同类问题在不同标段重复出现。管控流程的症结在于各环节数据未能形成

有效的“感知–分析–决策–执行”闭环，难以实现质量问题的预测性预防和持续性改进。

3 天然气长输管道焊接质量控制的具体方法和措施

3.1 复杂环境下焊接干扰管控技术

针对高压线路并行区域的磁场干扰，构建“接地优化–剩磁消除–磁场平衡”的多维度管控体系。在接地优化方面，采用“双端对称接地+动态微调”方案，每根钢管焊接前，在两端距管口 1.5–2m 处分别设置专用接地极，接地极采用镀锌钢管，埋深不小于 1.2m，通过铜缆（截面积 50mm²）与钢管可靠连接。同时，使用便携式磁场检测仪实时监测焊接区域的磁场强度，若发现磁场分布不均，微调接地极位置，使电弧周围磁场强度差异控制在 0.2mT 以内，削弱磁偏吹效应。

对于钢管剩磁问题，在组对前采用便携式消磁机进行检测，若剩磁强度超过 0.3mT，启动消磁程序：将消磁机线圈环绕钢管，以 50Hz 的频率、10–15A 的电流进行退磁，退磁过程中沿钢管轴向缓慢移动线圈，速度控制在 0.5m/min，确保剩磁降至 0.1mT 以下。在磁场平衡方面，根据高压线路的走向与间距，在焊接作业面两侧对称布置铁磁材料块，铁磁材料块与焊缝的距离保持一致，通过其对磁场的引导作用，抵消外部高压磁场的干扰，使电弧燃烧稳定性提升 80% 以上。

针对沿海高湿环境，优化焊材存储与保护气管理：焊材存储仓库配备除湿机，将相对湿度控制在 40%–60%，焊材出库后需在 4h 内使用，未使用完的焊材及时回库；保护气采用“二级减压+流量计监控”方式，氩气与二氧化碳混合比控制在 80:20，气体流量稳定在 28–30L/min，并通过在全封闭焊接防护棚内作业，有效隔离外部湿气与风沙，减少气孔、夹渣缺陷。

3.2 焊接工艺动态优化方法

建立“工况参数数据库–试焊验证–实时调整”的动态优化机制。首先，构建涵盖管材特性、环境参数、工艺参数的数据库：管材特性包括材质、壁厚、屈服强度；环境参数包括温度、湿度、风速；工艺参数包括焊接电流、电压、焊接速度、保护气流量。通过焊接工艺预规程设计，确定不同工况组合下的最优参数区间，例如，焊接 X80、壁厚 27.5mm 的管道时，环境温度 25℃、湿度 60% 条件下，最优参数为电流 280–290A、电压 30–31V、速度 16–17cm/min；温度降至 -5℃ 时，电流调整为 290–300A，同时将预热温度从 100℃ 提升至 120℃，确保熔池充分熔合。

在每个施工区段开工前，选取 3–5 道具有代表性的焊口进行试焊验证：试焊焊口需涵盖该区段的典型

工况,如靠近高压线路、同沟敷设等位置;试焊完成后,采用AUT(自动超声检测)进行100%检测,若发现缺陷,分析成因并调整参数。例如,若出现根部未焊透,适当增大根部焊道的电流5-10A,延长电弧在根部的停留时间0.5-1s;若出现夹层未熔合,优化填盖焊道的层间温度,将层间温度控制在150-200℃,确保前一层焊缝充分熔合。试焊合格后,将参数固化为《焊接工艺卡》,发放至各焊接机组,指导现场施工。同时,建立工艺参数实时调整机制:在焊接设备上加装智能监控模块,实时采集焊接电流、电压、速度、层间温度等参数,通过4G网络传输至云端平台。平台内置参数预警算法,当参数超出最优区间 $\pm 5\%$ 时,自动向焊工终端发送预警信息,提示调整。

3.3 全流程质量闭环管理措施

构建“事前预防-事中管控-事后改进”的全流程闭环管理体系。在事前预防阶段,强化材料与人员管控:对进场的钢管、焊材、保护气实施“三方联合验收”,钢管需进行外观检查、壁厚测量、材质复检,焊材需进行化学成分分析与力学性能试验,保护气需检测纯度与含水量,不合格材料严禁入场;对焊工进行专项培训,培训内容包括复杂工况焊接技巧、参数调整方法、缺陷识别等,培训后通过理论考试与实操考核,考核合格者方可上岗,且每季度进行一次技能复评,确保操作水平稳定。

在事中管控阶段,加强过程监控与巡检:焊接过程中,除智能监控系统实时采集参数外,质量检查员每2h进行一次现场巡检,重点检查接地系统连接情况、保护气管路密封性、坡口清理质量等,填写《焊接工艺纪律巡检记录》,发现问题立即要求整改。例如,巡检中发现接地电缆松动,及时重新紧固,避免因接地不良导致磁场干扰加剧;发现坡口表面有油污、铁锈,要求焊工用角磨机清理至露出金属光泽,确保熔合质量。

在事后改进阶段,完善缺陷分析与改进机制:焊接完成后,先进行外观检查,检查焊缝余高、宽度、咬边等指标,合格后再进行AUT检测;对检测发现的缺陷,建立《焊接缺陷台账》,记录缺陷位置、类型、尺寸,并组织技术人员、焊工召开缺陷分析会,从“人、机、料、法、环”五个方面排查成因。例如,针对夹层未熔合缺陷,若分析为磁场干扰导致,进一步优化接地与消磁方案;若为参数不当导致,调整工艺参数并重新试焊。同时,每月召开质量分析会,总结当月缺陷发生情况,制定改进措施,跟踪措施落实效果,形成“发现问题-分析原因-制定措施-验证效果”的闭环,实现焊接质量的持续提升^[3]。

4 天然气长输管道焊接质量控制案例分析

以山东管网东干线天然气管道工程施工一区段为案例,该区段为山东管网东干线的重要组成部分,其中包含3.5km高压线路并行区域,该区域内3条220kV高压线路与管道近距离敷设,且存在已建燃气管道、在建输油管道同沟敷设的情况,焊接施工面临严重的磁场干扰与空间受限问题。

施工初期,该区域采用常规焊接工艺与管控方法,焊接一次合格率降至96.32%,且集中出现夹层未熔合缺陷,缺陷主要分布在焊缝145°-180°区域,严重影响工程进度。为解决这一问题,项目团队应用上述焊接质量控制关键技术:优化接地系统,为每根钢管设置双端专用接地线并动态调整位置;对进场钢管进行剩磁检测,超标管材采用消磁机处理;根据现场磁场强度,在焊接区域对称布置铁磁材料,平衡外部磁场;同时,动态调整焊接参数,将保护气流量稳定在28-30L/min,优化层间温度控制^[4]。通过技术应用,该高压并行区域后续完成的42道焊口全部一次合格,焊接一次合格率大幅提升,未再出现集中性夹层未熔合缺陷。该案例表明,所提出的天然气长输管道焊接质量控制关键技术,能够有效应对复杂工况下的焊接质量问题,为同类工程提供了可借鉴的实践经验^[5]。

5 结语

天然气长输管道焊接质量控制是一项系统工程,需针对复杂环境干扰、工艺适配不足、管控脱节等问题,从技术、管理两方面协同发力。本文提出的磁场干扰多维度管控、焊接工艺动态优化、全流程质量闭环管理等关键技术,通过山东管网东干线工程的实践验证,能够有效提升焊接质量与一次合格率,为管道安全运行提供可靠保障。未来,随着智能化技术的发展,可进一步将数据平台、AI算法引入焊接参数优化,为我国能源管网建设的高质量发展提供更强有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 杜保健. 天然气长输管道全自动焊接质量的影响因素及管控措施[J]. 油气田地面工程, 2025, 44(05): 41-46.
- [2] 牛玉峰. 低温环境下天然气长输管道安装焊接质量提升策略[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(05): 48-51.
- [3] 方亮, 王淑梅. 高压天然气管道焊接技术及其质量控制措施[J]. 大众标准化, 2025(01): 13-15.
- [4] 张灿. 天然气长输管道焊接质量控制关键技术研究[J]. 化工管理, 2016(16): 152-153.
- [5] 刘华秋. 天然气长输管道施工技术研究[J]. 现代盐化工, 2025(01): 82-84.