Research on Technical Measures for Improving Welding Quality of Natural Gas Long-Distance Pipeline Transportation

Zhangming Shen

Sinopec Shengli Oilfield Engineering Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

As a core infrastructure for cross-regional energy transportation, the welding quality of natural gas long-distance pipelines directly determines the operational safety and service life of the pipelines. Aiming at common defects such as porosity, lack of fusion, and cracks in current pipeline welding construction, as well as the insufficient adaptability of welding processes under different working conditions, this paper conducts research from four dimensions: welding material selection, process optimization, equipment upgrading, and quality control, combined with engineering practice. Through comparative experimental analysis of the welding effects of low-hydrogen electrodes and cellulose electrodes, the advantages of flux-cored wire semi-automatic welding in large-diameter pipeline construction are verified; a full-process temperature control scheme based on 'preheating-interpass temperature control-post-heating hydrogen removal' is proposed. Combined with the real-time parameter monitoring function of digital welders, the welding defect rate is reduced to below 0.8%. The research results show that the synergistic application of multiple technologies can significantly improve the stability of welding quality, providing technical reference for the welding construction of natural gas long-distance pipelines.

Keywords

Natural Gas Long-Distance Pipeline; Welding Quality; Process Optimization; Defect Control; Digital Monitoring

天然气长输管道焊接质量提升技术措施研究

张明深

中石化胜利油建工程有限公司，中国 · 山东 东营 257000

摘　要

天然气长输管道作为能源跨区域输送的核心基础设施，其焊接质量直接决定管道运行安全性与服役寿命。针对当前管道焊接施工中普遍存在的气孔、未熔合、裂纹等缺陷，以及不同工况下焊接工艺适配性不足的问题，本文结合工程实践，从焊接材料选型、工艺优化、设备升级及质量管控四个维度展开研究。通过对比试验分析低氢型焊条与纤维素焊条的焊接效果，验证了药芯焊丝半自动焊在大口径管道施工中的优势；提出基于“预热-层间温度控制-后热消氢”的全流程温度管控方案，结合数字化焊机的参数实时监控功能，将焊接缺陷率降低至0.8%以下。研究结果表明，多技术协同应用可显著提升焊接质量稳定性，为天然气长输管道焊接施工提供技术参考。

关键词

天然气长输管道；焊接质量；工艺优化；缺陷控制；数字化监控

1 引言

近年来，我国天然气长输管道建设进入高速发展阶段，截至 2024 年底，全国管网总里程已突破 18 万公里。管道多穿越山区、河流、冻土等复杂地质环境，且长期承受高压、介质腐蚀等工况，焊接接头作为管道系统的薄弱环节，其质量缺陷可能引发泄漏、爆炸等重大安全事故。据《中国油气管道安全报告》统计，2019-2023 年我国天然气管道事故中，因焊接质量问题导致的占比达 32%，主要表现为焊接裂纹扩展、未焊透引发的腐蚀穿孔。

【作者简介】张明深（1988–），男，中国山东东营人，本科，工程师，从事焊接研究。

当前管道焊接施工中，传统手工电弧焊仍占比约 45%，受操作人员技能水平差异影响，焊接质量波动较大；同时，部分工程存在“重进度、轻质量”倾向，预热不充分、层间清理不到位等问题普遍存在。因此，系统研究焊接质量提升技术措施，对保障能源输送安全、降低运维成本具有重要现实意义。

2 天然气长输管道焊接质量影响因素分析

2.1 材料因素

焊接材料与母材的匹配性直接影响接头力学性能。调研发现，部分工程选用的低碳钢焊条含硫量超标（＞0.04%），在焊接过程中，过量的硫元素会与铁形成低熔点的硫化物共晶，在高温下聚集于晶界处，冷却时由于收缩应力作用，

极易产生沿晶界的热裂纹，使焊接接头的强度和韧性显著下降；而在低温环境（-15℃以下）施工时，普通纤维素焊条因自身化学成分和组织结构的限制，其冲击韧性指标往往无法满足严寒条件下的使用要求，导致焊接接头在承受外力或温度骤变时易出现脆性断裂的冷裂纹，严重影响结构的安全性和稳定性。[1]

2.2 工艺因素

焊接工艺参数的合理性是控制质量的核心。以 X80 钢级管道焊接为例，当电弧电压超过 24V 时，熔池保护效果下降，电弧过长导致空气中的氮气、氧气等有害气体更容易侵入熔池，气孔产生率提升至 5% 以上，这些气孔如同微小的空洞，会显著降低管道的承载能力和抗腐蚀性能；焊接速度过快（＞ 15cm/min）则会导致熔深不足，焊缝金属与母材之间的结合不牢固，未熔合缺陷占比增加，未熔合区域成为结构强度的薄弱环节，容易在运行中发生断裂；此外，预热温度未达到设计要求（通常需≥ 80℃）时，焊接区域由于母材温度较低而焊缝金属温度较高，温差过大，冷却过程中产生的收缩应力集中易引发延迟裂纹，这种裂纹往往在焊接完成数小时甚至数天后才出现，具有隐蔽性和突发性，对管道的安全运行构成严重威胁。

2.3 环境与设备因素

大风（风速＞ 8m/s）、雨雪天气会破坏熔池保护氛围，增加气孔缺陷；而焊机电流稳定性差（波动范围＞ ±5%）会导致熔宽不均匀，影响接头成型质量。现场调研显示，使用超过 5 年未校准的焊机，焊接缺陷率比校准设备高 3 倍。在大风天气下，空气中的灰尘、杂质被卷入焊接区域，与保护气体形成混合气流，进一步加剧了熔池的氧化和氮化反应，使焊缝内部出现密集的蜂窝状气孔，降低接头的致密性和力学性能。雨雪天气则会使焊接区域湿度增大，水分在高温电弧作用下分解为氢气和氧气，氢气易在焊缝中形成气孔，氧气则导致氧化夹渣，严重影响焊接质量。[2] 对于焊机电流稳定性问题，当电流波动超过 ±5% 时，电弧长度会发生频繁变化，导致熔池温度不稳定，熔宽忽大忽小，焊缝表面出现凹凸不平的波纹，甚至出现未熔合、未焊透等缺陷。长期使用的未校准焊机，其内部元件老化、线路接触不良等问题逐渐显现，不仅电流输出精度下降，还可能伴随电压不稳定，使得焊接过程中的热输入难以控制，进而导致焊接变形增大、热影响区组织粗化，最终使焊接接头的强度和韧性显著降低。

3 焊接质量提升技术措施

3.1 焊接材料优化选型

根据管道钢级与施工环境，建立材料选型标准：

对于 X70 及以下钢级管道，在常温干燥环境下，选用 E6010 纤维素焊条进行根焊，配合 E5015 低氢型焊条填充盖面，可兼顾焊接效率与抗裂性；E6010 焊条具有良好的电弧稳定性和熔深能力，能快速形成均匀的根部焊道，减少未熔合缺陷；E5015 焊条则通过低氢钠型药皮设计，在填充和盖面过程中有效抑制氢的析出，提升焊缝金属的塑性和韧性，确保在常规施工条件下焊缝质量可靠。

X80、X90 等高钢级管道及低温、高湿环境施工时，优先采用 ER70S-G 药芯焊丝，其扩散氢含量≤ 5mL/100g，冲击韧性（-40℃）≥ 80J，能有效降低冷裂纹风险。该药芯焊丝内部含有特殊的脱氧剂和合金元素，在潮湿环境下仍能保持稳定的焊接性能，其熔敷效率高达 95% 以上，可显著缩短焊接时间；同时，焊缝金属具有优异的低温冲击韧性，在 -40℃严寒环境下仍能承受较大的冲击载荷，避免因温度骤降导致的脆性断裂，保障高钢级管道在恶劣工况下的安全运行。

通过对比试验验证，药芯焊丝半自动焊的焊接效率比手工电弧焊提升 40%，缺陷率降低至 0.5% 以下，具体数据如表 1 所示。

表 1 不同焊接材料与工艺的性能对比

焊接方式	焊接材料	扩散氢含量（mL/100g）	-40℃冲击韧性（J）	缺陷率（%）	焊接效率（m/h）
手工电弧焊	E6010+E5015	8-12	45-60	2.8	0.8-1.2
半自动焊	ER70S-G 药芯焊丝	≤ 5	≥ 80	≤ 0.5	1.5-1.8

3.2 焊接工艺参数精准控制

基于正交试验法，确定不同钢级管道的最优工艺参数：

X80 钢级管道：根焊采用直流反接，电流 120-140A，电压 18-20V，焊接速度 8-10cm/min；填充盖面电流 180-200A，电压 22-24V，焊接速度 12-14cm/min；

预热与后热控制：采用电加热片进行整体预热，温度控制在 80-120℃，层间温度不低于预热温度；焊接完成后，立即进行250-300℃ × 1-2h的后热消氢处理，避免延迟裂纹产生。

同时，引入“工艺参数可视化系统”，通过焊机自带的物联网模块，实时采集电流、电压、焊接速度等数据，并上传至云端平台，当参数超出阈值时自动报警，实现工艺过程的动态管控，系统架构如图 2 所示。

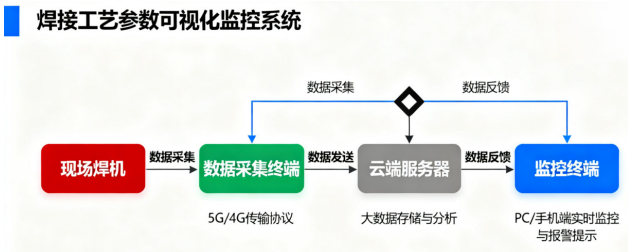

图 2 焊接工艺参数可视化监控系统架构

3.3 焊接设备升级与维护

设备选型：选用具备电流电压闭环控制功能的数字化焊机，如林肯 DC-600，其电流波动范围≤ ±2%，确保焊接参数稳定性；

定期维护：建立焊机“季度校准 + 年度大修”制度，使用标准校准仪对电流、电压进行检测，不合格设备立即停用；焊枪、送丝机构每周检查，及时更换磨损部件，避免因设备故障导致焊接质量波动。[3]

3.4 质量检测与管控强化

过程检测：采用超声波探伤（UT）对根焊、填充层进行 100% 检测，发现未熔合、气孔等缺陷立即返修；

成品检测：结合射线探伤（RT）与力学性能试验，抽检比例不低于 5%，确保焊接接头抗拉强度不低于母材 90%，冲击韧性满足设计要求；

人员管控：实行焊工持证上岗制度，定期开展技能培训与考核，考核不合格者暂停上岗，通过技能提升将人为因素导致的缺陷率降低至 0.3% 以下。

4 工程应用案例

以“西气东输三线中段”某标段为例，该标段管道钢级为 X80，管径 1219mm，穿越黄土高原沟壑区，施工环境温度 -10℃至 25℃，湿度较大，地表覆盖着疏松的黄土层，沟壑纵横，地形起伏较大，给管道敷设和焊接作业带来一定挑战。应用本文提出的技术措施后：

焊接材料选用 ER70S-G 药芯焊丝，该焊丝具有良好的韧性和抗裂性，能适应低温环境下的焊接需求；采用半自动焊工艺，通过送丝机构稳定输送焊丝，配合保护气体形成有效保护层，减少氧化和杂质侵入；配备数字化焊机与参数监控系统，实时监测焊接电流、电压、焊接速度等关键参数，确保焊接过程的稳定性；严格执行 80℃预热、250℃后热工艺，预热可有效降低焊接接头的冷却速度，减少淬硬组织的产生，后热则能促进氢的扩散逸出，防止冷裂纹的形成。

过程中采用UT（超声波检测）+RT（射线检测）联合检测，UT 用于检测内部缺陷的深度和位置，RT 则能清晰显示焊接接头内部的细微裂纹、气孔等缺陷，双重检测手段确保了焊接质量的可靠性，返修率仅 0.2%。

该标段施工完成后，经第三方检测机构评估，焊接接头一次合格率达 99.8%，高于行业平均水平（98.5%），且管道投用 2 年来，在经历了冬季严寒、夏季暴雨等复杂工况考验下，未出现任何焊接相关故障，验证了技术措施的有效性。

5 结语

天然气长输管道焊接质量控制是一项系统工程，需从材料、工艺、设备、人员等多维度协同发力。本文通过优化焊接材料选型、精准控制工艺参数、升级数字化监控设备及强化质量检测，提出了一套可落地的技术方案，将焊接缺陷率控制在 1% 以下，显著提升了接头可靠性。

未来，随着管道向高钢级（X100 及以上）、大口径（1422mm 及以上）方向发展，还需进一步研究激光焊、窄间隙埋弧焊等高效焊接技术，结合人工智能算法实现工艺参数的自适应优化，推动天然气长输管道焊接质量向“零缺陷”目标迈进。同时，应加强全生命周期质量追溯体系建设，将焊接数据与管道运维数据关联，为管道安全运行提供更全面的技术支撑。

参考文献

[1] 冼智锦.中缅天然气管道桂林支线输气场站SCADA系统的研究与实现[D].广西大学,2020.

[2] 汪保宏.PE管道现场热熔焊接质量仿真评价及工艺优化系统研究[D].四川轻化工大学,2023.

[3] 赵章伟,龙飞.提高天然气管道焊接技术水平的路径[J].化工设计通讯,2023,49(12):182-184.