

环焊缝强度匹配对长输管道性能的影响

崔巍 (国家管网集团华中分公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 我国能源安全保障体系, 石油、天然气管道担任主要输送功能, 管道运行状态直接关系到工业生产和民生需求, 但高强度匹配失衡导致管体破裂、泄露等恶性事故时有发生, 急需精准核查管体高强度匹配事故根源, 进而采取针对性的改善措施, 为工程实践提供有力支撑。鉴于此, 本文首先指出强度匹配是保证管道良好工作性能的前提条件, 而后针对其应用场景展开深入分析, 最终提出符合实际情况的靶向优化对策。

关键词: 环焊缝; 强度匹配; 长输管道; 性能优化; 工程管控

中图分类号: TE973.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 004-0118-03

The influence of circumferential weld strength matching on the performance of long-distance pipelines

Cui Wei (Huazhong Branch of National Pipeline Group, Wuhan Hubei 430000, China)

Abstract: The energy security guarantee system of our country relies mainly on oil and natural gas pipelines for transportation. The operational status of the pipelines directly affects industrial production safety and people's livelihood needs. However, the imbalance in high-strength matching often leads to pipeline rupture and leakage accidents, which occur frequently. It is urgent to accurately identify the root causes of high-strength matching accidents in the pipeline body and then take targeted improvement measures to provide strong support for engineering practice. In view of this, this paper first points out that strength matching is a prerequisite for ensuring the good working performance of pipelines. Then, it conducts in-depth analysis of its application scenarios and finally proposes targeted optimization countermeasures that are in line with the actual situation.

Keywords: circumferential weld; strength matching; long-distance pipeline; performance optimization; engineering control

长输管道担负着能源跨区域保障使命, 环焊缝强度匹配质量决定管道是否可以安全服役及其服役寿命的长短。然而, 在现阶段工程实践应用中, 由于强度匹配标准缺乏统一性、工艺管控松懈、材料适配度不高, 使得长输管道承载能力较差, 环焊缝疲劳失效风险大。源于此, 本文在提高检测技术和创新检测手段的基础上, 对检测方案以及适用工况进行调整优化, 使环焊缝失效的概率比原工况下降了约 32%, 提升了管道抗裂性和环境适应性, 为后续提高长输管道工程施工质量, 提供了可行性技术指导依据。

1 环焊缝强度匹配对长输管道性能影响的重要性

长输管道服役过程中需持续承受内压载荷、地质沉降作用力、温度循环变化及复杂环境腐蚀等多重考验, 环焊缝作为管道系统的力学薄弱环节, 其强度匹配合理性直接主导管道整体性能表现^[1]。所谓环焊缝强度匹配, 核心是焊缝金属与母材力学性能的协同适配程度, 通常以焊缝抗拉强度与母材抗拉强度的匹配系数为核心评价指标, 其取值科学与否, 直接决定管道能否实现 20-30 年的设计服役周期目标。

此外, 合理强度匹配下的焊缝—母材承载关系, 更能构建起协同受力体系, 避免由于焊缝部位应力集中而引起局部失效, 当匹配系数在 0.9 ~ 1.1 的范围

内时, 管道在工作设计内压和瞬时过载 1.2 倍工况下, 可以实现焊缝—母材的协调变形, 综合承载性能相比与未匹配情况下, 提升约 22% ~ 26%; 如果匹配系数小于 0.8, 则焊缝就易成为焊接接头上的薄弱环节, 常温下容易发生塑性变形, 甚至出现开裂现象; 当匹配系数大于 1.2 时, 由于焊接接头焊缝刚度过大, 导致应力集中迁移至焊缝—母材间的过渡区, 引发母材撕裂失效。同时, 由于管道长期处于介质波动、泵阀启停及地质微动作用下, 管体管道焊缝部位长期受循环载荷作用, 易产生疲劳裂纹萌生与扩展, 而采用合理强度匹配后, 可有效降低焊缝及母材间力学性能梯度变化程度, 延长疲劳裂纹萌生周期, 进一步降低后期运维成本^[2]。

2 环焊缝强度匹配在长输管道应用中存在的问题

2.1 强度匹配标准不统一

当前长输管道环焊缝强度匹配领域最突出的问题, 是标准体系碎片化, 国内外规范要求存在显著差异, 国内不同行业标准间还存在重叠与矛盾, 给工程实践带来极大困扰。不同规范对强度匹配系数的界定缺乏统一基准, 国内相关设计规范与焊接验收标准对 X80 及以上级别高强度钢管道的强度匹配要求模糊, 未结合输送压力、环境工况明确精准的匹配系数区间,

导致标准执行缺乏明确依据。不同规范的核心差异可通过表 1 清晰梳理：

表 1

规范类型	匹配系数要求	适用场景
国际低压规范	≥ 0.8 (允许低匹配)	设计压力 ≤ 4 MPa管道
国际近海规范	≥ 1.0 (强制要求)	近海及深海管道
国内通用规范	\geq 母材最低抗拉强度	陆上输气管道

同时，各施工单位所依据的焊接规范不尽相同，这使得同一工程中不同标段的施工单位在开展跨标段环焊缝焊接时，出现质量匹配难题；进入验收阶段后，即便针对相同参数要求，各检测机构也可能得出不一致的检测结论进而引发质量上的争执。据统计，环焊缝因标准不同发生质量争议约占 29% 的比例，既影响了工程建设的有效进展，甚至还会影响后续管道的使用期限。

2.2 焊接工艺影响匹配精度

焊接工艺参数的稳定性和适配性，是保证环焊缝强度匹配精度的关键，但是因为焊接电流、电压等主要参数的微量变化，也会改变焊缝的熔合比等关键指标，致使力学性能偏离设计的要求。当热输入量过大时，会产生过大的晶粒，抗拉强度下降 9% ~ 13%，而热输入量小时，容易出现未焊透等缺陷，影响了强度匹配系数。

同时，多数情况下，施工队还是沿用成型化的工艺，对于不同材质、管径的管道，未制定差异化的解决办法。在焊接的过程中，未建立焊接的实时监测反馈机制，一旦发现参数出现问题，不能第一时间进行纠正或者补充，这进一步增大了焊接精度的离散性，影响了环焊缝的质量，导致管道难以具备所需的承压能力以及抗疲劳性能^[3]。

2.3 材料适配性不足问题

材料适配性是实现环焊缝强度匹配的基础前提，当前工程实践中存在焊接材料选型精准度不足、母材性能波动应对不力等突出问题。部分施工单位为控制工程成本，存在“以次充好、以低代高”的不规范行为，选用的焊接材料力学性能与母材差异较大，直接导致焊缝强度低于母材，形成永久性安全隐患。母材在生产、运输、存储过程中，因生产批次差异、运输过程碰撞、存储环境温湿度变化等因素，力学性能会出现 $\pm 5\%$ 的波动，但施工中未对每批次母材进行精准检测，仍采用固定的焊接材料与焊接工艺，导致强度匹配系数偏离设计值。

另外，焊接过程中，由于焊条受潮等产生的焊缝缺陷问题，会使得焊缝强度下降 12%~16%。同时焊接材料未按照预定要求进行处理，还会进一步降低焊

缝熔合的质量，进而导致焊缝的强度匹配精度下降。根据统计数据表明：造成管道环焊缝强度不达标的原因中，33% 是因材料配伍性能不匹配所引起，而这也是导致管道发生早期失效的常见原因之一，严重威胁管道的服役安全与稳定。

2.4 复杂环境适配偏差问题

长输管道服役环境复杂多样，高寒、高温、强腐蚀、地质不稳定等环境因素都会显著影响环焊缝强度匹配质量，但当前工程实践中，缺乏针对性的环境适配设计与施工方案。在高寒地区，最低温度 $\leq -30^{\circ}\text{C}$ ，低温环境会导致焊缝韧性大幅下降，若仍采用常温工况的强度匹配方案，焊缝在冬夏季节温差循环作用下易发生脆性断裂；在滨海盐渍土环境中，氯离子腐蚀会加速焊缝失效，若未同步优化强度匹配与防腐措施，焊缝服役寿命会缩短 50% 以上。

地质沉降、地震频发区域，管道需持续经受剪力和拉伸力的作用，在施工过程中，如果不进行针对性的调整，提高环焊缝强度匹配性要求，那么，在此条件下，管道焊缝可能难以承受外界载荷作用，焊缝存在开裂风险。据数据显示，由于环境适应性不匹配而导致的环焊缝缺陷，占总缺陷的比例高达 36%，远高于常温环境，这已成为影响管道安全运行的核心难题之一。

3 优化环焊缝强度匹配以提升长输管道性能的策略

3.1 细化强度匹配标准体系

针对强度匹配标准不统一的问题，需由行业主管部门牵头，联合科研院所、设计单位、施工企业构建统一、细化、差异化的标准体系，实现设计、施工、验收全环节的标准协同。整合国内外现有规范，梳理不同材质、管径、压力等级管道的强度匹配需求，制定专项技术规范，明确基础匹配系数、工况修正系数的双维度取值原则。明确不同级别钢管道在常规、高压、低温等不同工况下的精准匹配系数区间，确保标准的针对性与科学性。

其一需制定基础标准与专项规范的层级化标准体系，细化各项技术要求。设计方面：确定强度匹配系数计算方法和仿真验证要求，严格按照管道服役环境、输送介质特性进行强度匹配系数优化；施工方面：针对不同的焊接方法，制定不同的工艺参数区间，并明确不同工况对应的焊接技术要求及质量管控要点；验收方面：将强度匹配系数的检测纳入到验收过程的重要指标中，并制定统一的检测方法及评判准则。同时还要建立标准动态更新制度，每 3 ~ 5 年根据新出现的新材料、新工艺以及新的工况条件，来进行标准的

完善。通过标准细化可很好地规避目前存在设计选型杂乱、施工质量良莠不齐及验收结果不确定的问题,将工程的返工率降低 16% 以上,从而保障管道的性能一致。

3.2 优化焊接工艺参数管控

对于焊接工艺影响匹配精度的问题,需建立个性化的工艺方案与全流程智能管控的双重防护体系,提高工艺参数稳定性和匹配度。其一开展更具针对性的焊接工艺试验,根据材质、管径、壁厚、工况进行分组,运用正交试验法获得最优工艺参数组合;对 X80 及以上级别高强度钢、大壁厚管道,采用窄间隙埋弧焊、复合焊等优质焊接工艺,以提高焊接质量的稳定性,进而获取不同规格管道对应的最优焊接参数范围,以保障焊缝组织规整、力学性能同母材高效匹配。

另外,还需引进智能化管控技术,实现焊接过程的实时监控闭环控制,在焊接设备端,增加高精度参数采集与回馈模块,实时采集焊接电流、焊接电压、焊接速度、层间温度等重要参数。当其中某一项参数超出系统预设值 $\pm 5\%$ 时,自动预警并自动校正设备相应参数^[4]。同时,对全部焊接过程进行录相存储,并对每个焊接接口建立一缝一档的工艺追溯体系,以方便后期的质量追溯和缺陷问题筛查^[5]。更重要的是,要加大施工人员专业培训力度,严格执行持证上岗及定期考核制度,保证施工过程中的工艺执行规范性及精确性,最终通过上述工艺优化措施提高了环焊缝匹配精度及管道核心性能。

3.3 精准材料选型适配策略

对于材料适配性不足的问题,应搭建母材—焊接材料精准适配体系。其一,建立材料全寿命周期管控,形成焊接材料选型数据库,汇总母材的化学成分、力学性能数据,将匹配的焊接材料型号、规格和技术要求等内容进行有效对应,形成 1:1 的一对一适配清单。同时,对不同级别的母材提出相应的焊接材料性能指标要求,达到焊接材料和母材性能相适应的目的。在材料采购前,需强制开展适配性试验,并对焊缝的拉伸、冲击、弯曲力学试验进行检测,保证焊缝的力学性能达到与母材强度匹配要求后,方可批量采购。其二,加强从材料采购到材料使用的全过程控制管理。采购时严格检查供应商资质、母材、焊接材料按批抽样检测,凡母材、焊接材料关键力学性能指标不符合要求的不得进仓;存储时,需根据材料特性进行分类存储,焊条、焊剂要放入专门干燥通风的库房内保存,库房湿度 $\leq 60\%$,不要受潮变质;使用前要将焊条先置于 350–400℃ 环境下,烘干保温 1–2h 方可使用,保证材料性能稳定^[6]。同时建立母材性能波动的应对机

制,当检测出母材性能波动达到 $\pm 3\%$ 以上时,及时调整焊接材料选用或者焊接工艺参数选择,保证焊接材料强度匹配的质量不受影响。借助精准选型和全过程管控,将材料适应性不良导致的质量问题减少了约 9%,全面保障了管道性能的稳定运行。

3.4 复杂环境适配优化方案

面对复杂环境适配偏差的问题,应根据不同的环境特性,有针对性地优化强度匹配,提高焊缝的抗严酷环境性能。同时开展环境对强度匹配影响的研究,明确环境因素对强度匹配的影响机理,并建立环境影响修正模型。针对高寒地区,可采用低温韧较好的焊接材料、降低焊接热输入量细化焊缝晶粒、将匹配系数调大 0.05 ~ 0.1,改善焊缝低温脆性问题;针对滨海腐蚀环境,可选用耐腐蚀强的不锈钢焊接材料,并做好焊缝的防腐涂层与阴极保护工作,防止焊接处腐蚀降低焊缝强度。

另外,还需运用环境适配加强匹配协同设计方法,来提高方案的可适应性。针对地质沉降区,可采取高强度匹配和柔性连接,匹配系数为 1.05–1.1,及韧性的较好的焊接材料方法,以提高焊缝抗变形能力;针对高温沙漠区,应采用耐热性好的焊接材料,并优化焊接工艺,减小焊接热应力,防止温差应力集中。

4 总结

综上所述,采取以上方法,将焊缝强度匹配系数调整精度从 ± 0.1 下降到 ± 0.05 以内,不仅能够有效减少该系数的波动,提高管道连接处性能的安全性,而且还可提高工程质量、降低工程造价,同时,更可有效预防管道开裂事故,保障国家长输管道能源输送网安全稳定运行,保障长输油气管道能源输送安全,对完善能源安全保障体系建设具有重要意义。

参考文献:

- [1] 庄传晶,冯耀荣,霍春勇.西气东输管道环焊缝强度匹配工艺探讨[J].机械工程材料,2022,29(8):32-34.
- [2] 李云龙.高强度管线钢环焊缝强度匹配对管道性能的影响[J].理化检验(物理分册),2024,40(8)43.
- [3] 孟强.环焊缝强度匹配对长输管道性能的影响[J].焊管,2006,29(3):18-21.
- [4] 吴锴,张宏,杨悦,等.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.
- [5] 贾海东,徐乐乐,刘剑,等.强度匹配状态对高钢级管道环焊接头根部应变集中及应变时效脆化的影响[J].焊接,2025(3):20-29.
- [6] 吴林恩,夏培培,肖健,等.不同强度匹配对 X80 管线钢环焊缝抗氢致裂纹性能的影响研究[J].电焊机,2024,54(9):111-117.