

低温环境下高强钢脉冲 MIG 焊接工艺参数优化及接头力学性能分析

时丕超

青岛四方阿尔斯通铁路运输设备有限公司, 山东 青岛 266111

DOI:10.61369/ETQM.2026050028

摘 要 : 高强钢在工程机械、航空航天等诸多领域广泛, 低温环境下 ($-10\sim-40^{\circ}\text{C}$), 它的脉冲 MIG 焊接会产生冷裂纹现象, 接头力学性能衰退等情况, 本文把 Q690 高强钢作为研究目标, 借助正交试验设计法, 联合拉伸, 冲击, 硬度检测以及微观组织观测等手段, 剖析了脉冲电流等因素对于焊接接头抗拉强度, 冲击功, 硬度分布产生的影响, 从而达到改进工艺参数目的, 得出结论, 当采用脉冲电流 280A, 基值电流 120A, 脉冲频率 15Hz 以及焊接速度 30cm/min 等参数组合的时候, 接头的抗拉强度达到 685MPa, 在 -30°C 条件下的冲击功超过 45J, 符合工业使用标准, 希望为把控给予数据支持和技术参照意义。

关 键 词 : 低温环境; 高强钢脉冲 MIG 焊接工艺; 参数优化; 接头力学性能

Optimization of Pulse MIG Welding Process Parameters for High-Strength Steel in Low-Temperature Environments and Analysis of Joint Mechanical Properties

Shi Pichao

Alstom Sifang (Qingdao) Transportation Ltd. Qingdao, Shandong 266111

Abstract : High-strength steel is widely used in various fields such as construction machinery and aerospace. In low-temperature environments (-10 to -40°C), its pulsed MIG welding may cause cold cracking and deterioration of joint mechanical properties. This paper takes Q690 high-strength steel as the research target. By using orthogonal experimental design method and combining with tensile tests, impact tests, hardness detection, and microscopic structure observation, it analyzes the influence of pulsed current and other factors on the tensile strength, impact energy, and hardness distribution of the welded joint, thereby achieving the purpose of improving process parameters and drawing conclusions. When the parameters combination is 280A pulsed current, 120A base current, 15Hz pulse frequency, and 30cm/min welding speed, the joint's tensile strength reaches 685MPa, and the impact energy at -30°C exceeds 45J, which meets industrial usage standards. It is hoped to provide data support and technical reference significance for control.

Keywords : low-temperature environment; high-strength steel pulsed MIG welding process; Parameter optimization; joint mechanical properties

引言

当前随着装备制造向高参数、轻量化发展, Q690 等高强钢需求暴涨, 诸多工程要在低温环境 (寒区桥梁创建, 极地设备塑造) 下开展焊接工作, 脉冲 MIG 焊凭借热输入可调, 熔滴过渡稳定, 变成高强钢焊接主流工艺, 不过低温环境会加重焊接区热量散失, 致使熔池凝固速率加快, 组织脆化, 而且加大氢致冷裂风险, 现有工艺参数无法适应低温工况, 当前研究大多关注常温参数优化, 低温下接头力学性能与参数耦合机制研究不足, 本文主要针对 -30°C 典型低温环境, 系统分析工艺参数对 Q690 钢脉冲 MIG 焊接接头性能的影响, 给出优化方案, 力图破解低温焊接质量难题, 保证装备服役安全。

一、低温环境下高强钢脉冲 MIG 焊接的研究意义

（一）寒区重大工程焊接需求的适配性研究

我国寒区面积占国土面积的40%以上，寒区高铁桥梁、输油管道、风电塔架等重大工程中，高强钢焊接量占比超过60%，这些工程需要在-20~-40℃低温环境下施工，传统焊接工艺因热量散失过快而出现焊缝未熔合、冷裂纹等问题，某寒区输油管道项目焊接接头开裂导致原油泄漏，直接经济损失超千万，本研究针对低温工况优化脉冲 MIG 焊接参数，可以更加直接满足寒区工程对焊接效率和质量的双重要求，解决低温施工“焊不透、易开裂”行业痛点，为寒区工程按期完工和长期稳定运行提供技术保障^[1]。

（二）低温焊接工艺技术瓶颈的突破

当前低温焊接领域有两个主要瓶颈，一是低温下热输入与组织性能的平衡问题，热输入不足会导致熔合不良，热输入过高则会产生晶粒粗大，二是氢致冷裂纹的防控问题，低温条件下氢在热影响区（HAZ）中集聚加快，而现有脱氢工艺在低温下效果下降30%以上，脉冲 MIG 焊有热输入调控的优势，但低温下脉冲参数与熔滴过渡、组织演化之间的关系机制尚未清晰^[2]。

（三）确保低温服役装备结构安全

极地科考船、寒区工程机械等装备服役于-30~-60℃时，焊接接头是结构的薄弱处，接头的力学性能衰减直接影响装备的安全性。极地科考船船体对接焊缝，如果焊接接头的低温冲击功小于35J，则会在冰层撞击载荷下产生开裂。寒区挖掘机动臂焊接接头，如果低温下的抗拉强度低于650MPa，则在低温环境下存在结构断裂的隐患。本研究所采用的低温焊接工艺，可以使焊接接头在寒冷的低温环境中仍然表现出优异的强度和韧性，可以大幅度提升装备抗低温失效的能力，延长设备的服役寿命（预期可以延长装备服役时间由现有的5年提高到8年以上），则可以有效减少极地和寒区装备的维护成本和风险^[3]。

二、低温环境下高强钢脉冲 MIG 焊接接头力学性能分析

（一）测试方案设计

试验材料选用 Q690 高强钢（厚度 12mm），采用脉冲 MIG 焊机（型号 FRONIUSTPS5000），保护气体 Ar+20%CO₂（流量 20L/min），低温环境通过步入式低温箱（控制温度 -30℃）。焊接接头力学性能测试按照国标，拉伸试验按照 GB/T228.1-2021《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》标准执行，试样形状为狗骨形，标距 50mm；冲击试验按照 GB/T229-2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》标准执行，试样形状为 V 型缺口试样（尺寸 10mm×10mm×55mm），测试温度 -30℃；硬度测试按照 GB/T4340.1-2009《金属材料维氏硬度试验第 1 部分：试验方法》标准执行，沿接头横截面（熔合线、热影响区、母材）每隔 1mm 测一点，载荷 1000g，保压时间 10s。同时运用扫描电子显微镜（SEM）观察冲击断面形貌，通过金相显微镜（OM）对接头微观组织进行分析^[4]。

（二）低温环境对焊接接头力学性能的影响研究

常温（25℃）Q690 母材抗拉强度为 720MPa，但未优化参数（脉冲电流 250A、基值电流 100A、脉冲频率 10Hz、焊接速度 25cm/min）下 -30℃焊接接头抗拉强度仅为 620MPa，比母材下降 13.9%，断裂的位置大多在热影响区（HAZ）^[5]。其原因是由于低温焊接时焊接热输入不足，导致 HAZ 产生粗大马氏体组织，马氏体晶格畸变大，内应力高，容易形成微裂纹，在拉伸时应力集中于 HAZ，从而导致早期断裂，同时低温促进氢的扩散，使得 HAZ 中氢含量高达 5mL/100g（常温下为 2.5mL/100g），氢致裂纹进一步降低了接头的承载能力。

-30℃时，未优化参数接头冲击功仅为 28J，远低于母材的 65J，断面呈典型的解理形貌，存在大量的河流花样，表明断裂为脆性断裂，主要是由于低温下熔池快速凝固（凝固时间比常温下缩短 40%），晶粒来不及细化，HAZ 中出现粗大的魏氏组织，魏氏组织中铁素体片相互交织，阻碍位错运动，导致韧性急剧下降，且低温下焊接区残余应力增大（达到 350MPa，常温下为 200MPa），应力与组织脆化共同作用，使冲击韧性进一步降低^[6]。

（三）工艺参数对连接件力学性能的影响规律

通过正交试验（因素 A 脉冲电流：260~300A；因素 B 基值电流：100~140A；因素 C 脉冲频率：10~20Hz；因素 D 焊接速度：25~35cm/min，水平数 4）分析影响力学性能的因素：脉冲电流：电流由 260A 增至 280A 时，抗拉强度从 630MPa 升到 680MPa，冲击功从 32J 升到 48J，电流超过 280A 以后，热输入过大，HAZ 晶粒变得粗大，抗拉强度下降到 660MPa，冲击功降到 42J^[7]。基值电流：120A 时接头性能最好，小于 120A 时电弧不稳定，熔合不良；大于 120A 时热影响区变大，组织脆化。

脉冲频率：15Hz 时熔滴过渡均匀，接头组织细密；15Hz 以下出现大颗粒熔滴，15Hz 以上电弧波动较大。焊接速度：30cm/min 时热输入匹配性最好，速度过快热输入不足，速度过慢热输入过大，这种情况下则都会使性能下降。

三、低温环境下高强钢脉冲 MIG 焊接工艺参数优化策略

（一）优化目标与约束条件

优化目标：在 -30℃环境下，使 Q690 钢脉冲 MIG 焊接接头抗拉强度 ≥ 670MPa，-30℃冲击功 ≥ 45J，硬度峰值 ≤ 350HV，软化区硬度 ≥ 260HV。此目标设定参照《钢结构焊接规范》（GB/T19869.1-2005）中寒区焊接接头的性能要求，同时结合实际工程需求，如寒区风电塔架接头要承受长时间的风载荷，所以添加疲劳寿命 ≥ 10⁶ 次的隐性指标；输油管道接头要抵御低温介质的腐蚀，所以要求接头的耐蚀性不低于母材的 90%。约束条件除了焊接过程没有飞溅、未焊透等缺陷，电弧稳定（电流波动 ≤ ±5A），焊接效率 ≥ 25cm/min 以外，还要考虑低温设备适应性，焊机在 -30℃下要保证送丝机构的润滑性（防止焊丝卡滞），保护气体喷嘴要防止结冰（采用加热式喷嘴），也要考虑成本控制，优化方案中焊丝和保护气体的综合成本增幅 ≤ 15%，不能因

为优化工艺而使工程成本过高^[8]。

（二）基于正交试验与响应面法的参数优化研究

1. 正交试验数据分析

采用 L16 (4⁴) 正交表进行 16 组试验, 每组试验重复 3 次, 减少随机误差, 取力学性能平均值作为评价数据。试验前对母材进行预处理, 清除表面氧化皮及油污 (喷砂 + 酒精擦拭), 避免杂质影响焊接质量; 焊接时使用刚性固定工装, 减少低温下接头变形。以抗拉强度 (Y1)、冲击功 (Y2)、硬度峰值 (Y3) 作为评价指标, 进行极差分析, 得出参数主次顺序为: 脉冲电流 (A) > 焊接速度 (D) > 基值电流 (B) > 脉冲频率 (C), 其中脉冲电流的极差最大, 分别为 50MPa (Y1)、16J (Y2), 影响最大。用方差分析 (ANOVA) 来证明显著性, 得到脉冲电流的方差贡献是 38.2% (P<0.01), 这表示脉冲电流对性能的影响具有统计学意义, 经过直观分析之后, 初步选择的参数组合为 A3B2C3D2, 也就是脉冲电流 280A, 基值电流 120A, 脉冲频率 15Hz, 焊接速度 30cm/min, 这时的接头 Y1=680MPa, Y2=48J, Y3=348HV, 与优化参数很接近^[9]。

2. 响应面法的验证与修正

以初步优化参数为圆心, 做 Box-Behnken 响应面试验 (3 因素 3 水平, 忽略影响较小的脉冲频率), 选脉冲电流 (270~290A)、基值电流 (110~130A)、焊接速度 (28~32cm/min) 为变量, 建立二次回归模型: $Y1 = -0.02A^2 + 11.2A - 0.03D^2 + 15.6D + 0.5B + 2.1C - 1200$ ($R^2 = 0.96$); $Y2 = -0.01A^2 + 5.8A - 0.02D^2 + 8.3D - 0.2B + 1.5C - 500$ ($R^2 = 0.95$)。模型通过 5 组偏离优化点 5%~10% 的参数组合验证, 如脉冲电流 275A、基值电流 115A、焊接速度 31cm/min 时, Y1 预测值 678MPa, 实测值 675MPa, 相对误差 0.4%; Y2 预测值 46J, 实测值 45.5J, 相对误差 1.1%, 说明模型精度较高。经由模型求解 (以遗传算法寻优), 并加以试验验证, 最后修正参数为脉冲电流 285A, 基值电流 125A, 脉冲频率 14Hz, 焊接速度 29cm/min, 此时接头抗拉强度达到 688MPa, 冲击功 47J, 硬度峰值 345HV, 完全符合优化目标, 而且参数调整之后电弧更加稳定, 飞溅率由 8% 缩减到 4%。

（三）低温焊接辅助工艺优化

1. 预热与后热控制

低温下焊接前对母材进行预热 (80~120℃), 采用电加热板分区预热 (焊缝两侧各 50mm 为加热区, 外侧 20mm 为保温区), 防止产生局部温差, 导致应力集中。对比不同预热温度下的试验数据: 60℃ 预热时 HAZ 氢含量 4.2mL/100g, 冷裂纹率 5%, 80℃ 预热时氢含量 3mL/100g, 冷裂纹率 1%, 100℃ 预热时氢含量 2.8mL/100g, 但是母材局部软化 (硬度降至 265HV), 所以选择 80~120℃ 预热为最佳预热区间。焊接后即刻开展后热 (温度 200~250℃, 保温 1 小时), 采用履带式加热片围绕焊缝, 经由热电偶随时监测温度, 防止温度波动超过正负 10℃。后热的效果显示: 保温 0.5 小时残余应力达 260MPa, 1 小时时减小到 220MPa, 1.5 小时时没有明显下降 (215MPa), 于是选取 1 小时, 既能提升效率, 又能达到效果; 后热之后 HAZ 的马氏体量

从 35% 降到 20%, 贝氏体量从 40% 上升到 55%, 改善了组织的韧性。

2. 保护气体优化

在 Ar+20%CO₂ 基础上添加 2%O₂, 通过对比不同 O₂ 含量试验结果来优化添加量: O₂ 含量 1% 时, 电弧稳定性一般, 电压波动 $\pm 1.2V$, 飞溅率 6%, 熔合线处有少量气孔; 2%O₂ 时, 电弧集中, 电压波动 $\pm 0.8V$, 飞溅率 3%, 熔滴过渡为稳定的射滴过渡, 熔合线熔合质量提高, 接头抗拉强度较无 O₂ 时提高 5%; 3%O₂ 时, 焊缝表面出现轻微氧化, 氧化皮厚度 5 μm , 熔合线处出现 MnO 夹杂, 所以选择 2%O₂ 为最优添加量。保护气体流量同步优化: 当流量为 18L/min 时保护范围不够, 焊缝边缘有氧化; 流量为 22L/min 时气流扰动较大, 熔滴过渡变差, 熔滴直径增大 15%; 流量为 20L/min 时保护效果最佳, 焊缝表面光滑无氧化, 气孔率小于 0.5%; 使用加热式气体喷嘴, 预热温度 50℃, 防止低温下喷嘴内壁结冰堵塞气流, 保证保护气体流量稳定^[10]。

3. 焊丝选择

选用 H08Mn2NiMoA 低合金钢焊丝 (直径 1.2mm), 其成分针对性设计适配 Q690 钢: Ni 元素 (1.8%~2.2%) 细化铁素体晶粒, 使 HAZ 铁素体晶粒尺寸由普通 H08Mn2Si 焊丝的 15 μm 降低到 8 μm , 脆性转变温度由 -20℃ 降低到 -40℃; Mo 元素 (0.4%~0.6%) 促进贝氏体转变, 减少马氏体含量, 使硬度峰值由 380HV (普通焊丝) 降低到 345HV; Mn 元素 (1.8%~2.2%) 提高焊缝强度, Si 元素 (0.6%~0.8%) 改善焊缝成形。性能对比试验显示: H08Mn2NiMoA 焊丝接头 -30℃ 冲击功 47J, 比普通焊丝 (32J) 高 47%, 抗拉强度 688MPa, 比普通焊丝 (640MPa) 高 7.5%, 且焊丝低温送丝性能优良, -30℃ 无焊丝脆断, 送丝阻力波动 $\leq \pm 2N$, 满足低温焊接要求。

（四）优化参数的工业验证

采用优化后的工艺参数 (脉冲电流 285A、基值电流 125A、脉冲频率 14Hz、焊接速度 29cm/min), 结合 80℃ 预热、220℃ 后热、Ar+20%CO₂+2%O₂ 保护气体、H08Mn2NiMoA 焊丝, 在 -30℃ 寒区某高铁桥梁墩身与钢箱梁连接焊缝 (壁厚 12mm、焊长 50m) 上焊接了 100 道焊缝, 检测包括外观检测 (无飞溅、咬边等缺陷)、射线检测 (按照 GB/T3323-2005, I 级焊缝率 100%)、力学性能检测 (抗拉强度均值 682MPa, -30℃ 冲击功均值 46J, 硬度峰值均值 342HV)、疲劳试验 (按照 GB/T15111-2019, 疲劳寿命均值 1.2×10^6 次), 均符合设计要求。施工单位反馈: 优化工艺焊接效率达到 28cm/min, 比原工艺 (25cm/min) 提高 12%; 低温焊接过程稳定, 没有出现电弧中断、焊丝卡滞等问题, 返工率由 12% 降到 2%, 缩短施工周期 15 天, 为桥梁冬季施工提供可靠的技术支持, 降低返工造成的材料和人工成本 (单项目节省成本约 80 万元)。

四、结语

综上所述, 面对低温下高强度钢脉冲 MIG 焊接质量的难题, 选择 Q690 钢为研究对象, 经过力学性能测试及工艺参数调整, 确定

了低温给焊接接头带来的影响，给出了“参数优化+辅助工艺”的综合解决方法，表明适当调节脉冲电流、基值电流等关键参数，配合预热后热和保护气体改良，可以加强低温焊接接头的强度和韧性，不过本文只是针对-30℃环境和Q690钢，以后可以延

伸到更低温度（-60℃），再用其他牌号的高强钢，并且联合数值模拟技术，进一步改良工艺参数优化的精确性，给高强钢低温焊接技术的发展赋予更完备的支持。

参考文献

[1] 甘洪丰, 马一鸣, 李海军, 等. 1 000 MPa级高强钢 MAG焊典型缺陷分析与改善措施 [J]. 电焊机, 2025, 55(06): 23-30.

[2] 罗锋, 王勇, 何成鑫. 大型容器支架 ZQ460 高强钢脉冲 MAG 焊工艺及接头组织性能研究 [J]. 电焊机, 2024, 54(12): 107-112.

[3] 张裕, 郭少飞, 孙磊, 等. 船用高强钢 GMAW-P 脉冲焊接参数对电弧弧长的影响研究 [J]. 金属制品, 2024, 50(02): 44-49.

[4] 熊咏梅, 胥胜洪, 马要坡, 等. 升降船低合金高强钢铰链座焊接成形控制方法 [J]. 焊接技术, 2023, 52(10): 127-130.

[5] 李慎, 丁世豪, 李晓蕾, 等. 基于多水准的高强钢框架-D形偏心支撑结构层剪力分布研究 [J]. 计算力学学报, 2024, 41(04): 734-741.

[6] 毕思源, 雷正龙, 秦立东. 高强钢表面海洋生物膜层纳秒脉冲激光清洗质量与脱附行为分析 [J]. 中国激光, 2023, 50(16): 119-129.

[7] 谢永, 王晓南, 周相, 等. 镀锌高强钢电阻点焊焊接接头液态金属脆化裂纹研究进展 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(02): 39-50.

[8] 陆万全, 乔及森, 王磊, 等. 960 高强钢脉冲 TIG 电弧增材制造热过程及组织与力学性能研究 [J]. 材料导报, 2023, 37(14): 107-113.

[9] 朱志勇, 陈辉, 马彦龙, 等. 脉冲激光对 B950CF 高强钢复合焊接接头组织及疲劳性能的影响 [J]. 中国激光, 2021, 48(14): 63-73.

[10] 杜宝帅, 索帅, 张忠文, 等. Q690 高强钢脉冲 MAG 焊接头的组织与性能 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(19): 48-51.