

# 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 山东省青岛市 266111

**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  $-30^{\circ}\text{C}$  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

## 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  $-30^{\circ}\text{C}$  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。

## 1. 低温环境下高强钢脉冲 MIG 焊接的研究意义

### 1.1 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  $-20\sim-40^{\circ}\text{C}$  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。

### 1.2 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<sup>[1]</sup>。

### 1.3 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  $-30\sim-60^{\circ}\text{C}$  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<sup>[2]</sup>。

## 2. 低温环境下高强钢脉冲 MIG 焊接接头力学性能分析

### 2.1 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%CO<sub>2</sub>(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)观察冲击断口形貌, 通过金相显微镜(OM)对接头微观组织进行分析<sup>[3]</sup>。

## 2.2 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)。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, 断口呈典型的解理形貌, 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<sup>[4]</sup>。

## 2.3 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。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。

## 3. 低温环境下高强钢脉冲 MIG 焊接工艺参数优化策略

### 3.1 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  $\geq 670\text{MPa}$ , -30℃ 冲击功  $\geq 45\text{J}$ , 硬度峰值  $\leq 350\text{HV}$ , 软化区硬度  $\geq 260\text{HV}$ 。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  $\geq 10^6$  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  $\leq \pm 5\text{A}$ ), 焊接效率  $\geq 25\text{cm/min}$  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  $\leq 15\%$ , 不能因为优化工艺而使工程成本过高<sup>[5]</sup>。

### 3.2 基于正交试验与响应面法的参数优化研究

#### 3.2.1 正交试验数据分析

采用 L16(4<sup>4</sup>) 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  $Y1=680\text{MPa}$ ,  $Y2=48\text{J}$ ,  $Y3=348\text{HV}$ , 与优化参数很接近。

### 3.2.2 响应面法的验证与修正

以初步优化参数为圆心, 做 Box-Behnken 响应面实验 (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%。

## 3.3 低温焊接辅助工艺优化

### 3.3.1 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。

### 3.3.2 保护气体优化

在 Ar+20%CO<sub>2</sub> 基础上添加 2%O<sub>2</sub>, 通过对比不同 O<sub>2</sub> 含量试验结果来优化添加量: O<sub>2</sub> 含量 1% 时, 电弧稳定性

一般, 电压波动  $\pm 1.2\text{V}$ , 飞溅率 6%, 熔合线处有少量气孔; 2%O<sub>2</sub> 时, 电弧集中, 电压波动  $\pm 0.8\text{V}$ , 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 O<sub>2</sub> 时提高 5%; 3%O<sub>2</sub> 时, 焊缝表面出现轻微氧化, 氧化皮厚度 5 $\mu\text{m}$ , 熔合线处出现 MnO 夹杂, 所以选择 2%O<sub>2</sub> 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。

### 3.3.3 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 $\mu\text{m}$  降低到 8 $\mu\text{m}$ , 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  $\leq \pm 2\text{N}$ , 满足低温焊接要求。

## 3.4 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%CO<sub>2</sub>+2%O<sub>2</sub> 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 (焊厚 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  $1.2 \times 10^6$  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)。

#### 结语:

综上所述,面对低温下高强钢脉冲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 $-30^{\circ}\text{C}$ 环境和Q690钢,以后可以延伸到更低温度( $-60^{\circ}\text{C}$ ),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] 黄志伟,董光耀,曹生亮. 焊接工艺参数对铝钢异种金属焊接接头性能和显微组织影响研究[J]. 济源职业技术学

院学报,2023,22(04):67-71.

[2] 戴浩,魏艳红,刘湘波,等. Q345钢多层多道焊工艺参数对接头组织及性能的影响研究[J]. 焊接技术,2023,52(12):39-41+145-146.

[3] 侯俊良,周博芳,周友涛,等. 工艺参数对异种铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能的影响[J]. 湖北汽车工业学院学报,2023,37(04):70-75.

[4] 杨海波,陈勇,徐育焱,等. 304不锈钢管TIG焊接头凝固行为及热力耦合研究[J]. 精密成形工程,2023,15(12):173-181.

[5] 师陆冰,杜佳俊,张志宏,等. 齿轮钢表面激光熔覆Ni基涂层工艺参数优化[J]. 金属热处理,2023,48(11):266-275.

作者简介:时丕超,出生年月日:1984年5月21日,男,汉族,籍贯:山东省菏泽市,学历:本科,职称:助理工程师,研究方向:焊接技术