

# 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~-40℃），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℃ 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考意义。

**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℃ 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~-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。

### 1.2 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~-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<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≥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≥10<sup>6</sup>次的隐性指标;燃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<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=680MPa, Y2=48J, Y3=348HV, 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:  $Y_1 = -0.02A^2 + 11.2A - 0.03D^2 + 15.6D + 0.5B + 2.1C - 1200$  ( $R^2 = 0.96$ ) ;  $Y_2 = -0.01A^2 + 5.8A - 0.02D^2 + 8.3D - 0.2B + 1.5C - 500$  ( $R^2 = 0.95$ )。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,  $Y_1$  预测值 678MPa, 实测值 675MPa, 相对误差 0.4%;  $Y_2$  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°C), 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°C 预热时 HAZ 氢含量 4.2mL/100g, 冷裂纹率 5%, 80°C 预热时氢含量 3mL/100g, 冷裂纹率 1%, 100°C 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°C 预热为最佳预热区间。焊接后即刻开展后热(温度 200~250°C, 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°C。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 ±1.2V, 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 ±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 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 μm, 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°C, 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 μm 降低到 8 μm, 脆性转变温度由 -20°C 降低到 -40°C; 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°C 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°C 无焊丝脆断, 送丝阻力波动 ≤ ±2N, 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°C 预热、220°C 后热、Ar+20%CO<sub>2</sub>+2%O<sub>2</sub> 保护气体、H08Mn2NiMoA 焊丝, 在 -30°C 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°C 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℃ 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] 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, 徐育娘, 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