

焊接接头力学性能与金相组织的关联性试验研究

杨 军

必维质量技术服务(上海)有限公司 上海 200011

摘要: 本文以Q235低碳钢为母材, E4303焊条进行手工电弧焊, 设置不同焊接电流参数开展试验。观察了焊缝区、热影响区及母材区的金相组织, 测试了接头的拉伸、冲击、硬度等力学性能。分析发现, 晶粒尺寸、相组成及热影响区组织与力学性能关联紧密。基于此提出焊接工艺优化建议, 包括精准调控参数、优化过程、强化焊后处理等, 为提升焊接接头质量提供依据。

关键词: 焊接接头; 力学性能; 金相组织; 关联性; 试验研究

引言: 焊接是工业制造中常用的连接技术, 焊接接头的质量直接影响结构件的性能与安全性。力学性能作为衡量焊接接头质量的关键指标, 与金相组织密切相关。不同焊接参数会导致金相组织变化, 进而影响力学性能。本文以Q235低碳钢为研究对象, 通过调整焊接电流开展试验, 探究焊接接头力学性能与金相组织的关联性, 为优化焊接工艺提供理论支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验选用工业常用Q235低碳钢作为母材, 其化学成分(质量分数)为: C 0.14%-0.22%, Si 0.12%-0.30%, Mn 0.30%-0.65%, S \leq 0.050%, P \leq 0.045%, 其余为Fe。母材尺寸加工为150mm \times 100mm \times 10mm的试板, 焊接前采用砂纸打磨试板表面, 去除氧化皮、油污等杂质, 确保焊接界面清洁。焊接材料选用E4303钛钙型低碳钢焊条, 焊条直径为3.2mm, 烘干温度为150 $^{\circ}$ C, 烘干时间1h, 避免焊条受潮影响焊接质量。

1.2 焊接工艺

采用手工电弧焊进行平板对接焊接, 焊接位置为平焊, 焊接坡口角度为60 $^{\circ}$, 钝边高度2mm, 间隙2mm。为探究焊接参数对金相组织与力学性能的影响, 固定焊接电压(22V)、焊接速度(10cm/min)、焊条伸出长度(10mm), 仅调整焊接电流, 设置4组试验参数: 组1(120A)、组2(140A)、组3(160A)、组4(180A), 每组制备3个平行试样, 确保试验结果的可靠性。焊接过程中采用直流反接极性, 焊后自然冷却至室温, 未进行后续热处理^[1]。

1.3 试验方法

1.3.1 金相组织观察

从每组焊接接头中截取10mm \times 10mm \times 10mm的试样, 经过切割、镶嵌、研磨、抛光等预处理后, 采用4%硝酸

酒精溶液腐蚀, 腐蚀时间10-15s, 清水冲洗后吹干。采用OLYMPUS GX71光学显微镜观察焊缝区(WZ)、热影响区(HAZ)及母材区(BM)的金相组织, 选取不同视场拍摄显微照片, 采用Image-Pro Plus软件测量晶粒尺寸, 统计各区域铁素体(F)、珠光体(P)的含量占比。

1.3.2 力学性能测试

(1) 拉伸试验: 依据GB/T 2651-2008《焊接接头拉伸试验方法》, 从焊接接头中截取标准拉伸试样(直径10mm, 标距50mm), 采用CMT5105电子万能试验机进行拉伸试验, 加载速率为2mm/min, 记录试样的抗拉强度与断裂位置。(2) 冲击试验: 依据GB/T 2650-2008《焊接接头冲击试验方法》, 制备V型缺口冲击试样(尺寸10mm \times 10mm \times 55mm, 缺口深度2mm), 采用JB-300B冲击试验机进行室温(25 $^{\circ}$ C)冲击试验, 每个参数组测试3个试样, 取冲击吸收功平均值。(3) 硬度测试: 依据GB/T 2654-2008《焊接接头硬度试验方法》, 采用HVS-1000维氏硬度计进行测试, 加载力为100g, 加载时间15s, 沿接头横截面从母材区到焊缝区每隔2mm测量一个硬度值, 每个位置测量3次, 取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 焊接接头金相组织特征

2.1.1 母材区金相组织

各组试样母材区的金相组织一致, 主要由铁素体和珠光体组成, 铁素体为多边形晶粒, 呈均匀分布状态, 珠光体以层片状形式弥散分布于铁素体基体中, 晶粒尺寸较小且均匀, 平均晶粒尺寸约为12 μ m, 铁素体含量占比约75%, 珠光体含量占比约25%, 该组织特征使母材具备良好的塑性与韧性^[2]。

2.1.2 焊缝区金相组织

焊缝区因经历快速加热与冷却过程, 金相组织受焊接电流影响显著。组1(120A)焊接电流较小, 焊接热输

入量低,冷却速度快,焊缝区组织以针状铁素体(AF)和少量珠光体为主,针状铁素体呈放射状分布,晶粒尺寸较小,平均晶粒尺寸约 $8\mu\text{m}$,珠光体含量占比约20%;组2(140A)热输入量适中,冷却速度适宜,焊缝区形成均匀细小的多边形铁素体与珠光体混合组织,铁素体晶粒平均尺寸约 $6\mu\text{m}$,珠光体含量占比提升至30%,组织致密性最佳;组3(160A)热输入量增大,冷却速度减慢,铁素体晶粒开始粗化,平均尺寸增至 $10\mu\text{m}$,珠光体含量有所下降,约22%,局部出现魏氏组织;组4(180A)热输入量最大,冷却速度最慢,焊缝区铁素体晶粒严重粗化,平均尺寸达 $15\mu\text{m}$,珠光体含量进一步降至15%,魏氏组织数量增多,组织致密性下降。

2.1.3 热影响区金相组织

热影响区是焊接接头中组织变化最复杂的区域,按温度分布可分为过热区、正火区与部分相变区。过热区因加热温度超过 A_{c3} (约 910°C)且保温时间短,晶粒发生严重粗化,形成粗大的铁素体与珠光体组织,平均晶粒尺寸达 $25\mu\text{m}$,是热影响区力学性能最差的区域;正火区加热温度在 A_{c3} 至 1100°C 之间,冷却后形成均匀细小的铁素体-珠光体组织,晶粒尺寸与母材接近,力学性能较好;部分相变区加热温度在 A_{c1} (约 723°C)至 A_{c3} 之间,仅部分组织发生相变,形成铁素体、珠光体与未相变组织的混合物,晶粒尺寸不均匀。随焊接电流增大,热输入量增加,过热区范围扩大,晶粒粗化程度加剧。

2.2 焊接接头力学性能测试结果

2.2.1 拉伸性能

各组试样拉伸试验结果显示,焊接接头的抗拉强度随焊接电流变化呈先升高后降低趋势。组1(120A)抗拉强度为 392MPa ,组2(140A)达到最大值 426MPa ,组3(160A)降至 405MPa ,组4(180A)进一步降至 378MPa 。拉伸试样的断裂位置主要集中在热影响区,占比达80%,少数试样断裂于焊缝区(组4占比最高)。分析认为,热影响区因过热导致晶粒粗化,是接头的力学薄弱环节,而焊缝区组织的细化与强化可提升接头整体抗拉强度。

2.2.2 冲击性能

室温冲击试验结果表明,冲击吸收功随焊接电流的变化趋势与抗拉强度一致。组1(120A)冲击吸收功为45J,组2(140A)达到峰值58J,组3(160A)降至42J,组4(180A)仅为32J。冲击试样的断裂形貌显示,组2试样断口呈韧性断裂特征,存在大量韧窝;组4试样断口呈脆性断裂特征,存在明显的解理面。这一结果与焊缝区组织特征密切相关,细小均匀的铁素体-珠光体组织可提

升材料的韧性,而粗化晶粒与魏氏组织会显著降低冲击韧性^[1]。

2.2.3 硬度性能

焊接接头横截面硬度分布显示,焊缝区硬度最高,热影响区硬度最低,母材区硬度介于二者之间,呈现“焊缝区高、热影响区低”的特征。组1(120A)焊缝区硬度为 182HV ,组2(140A)增至 198HV ,组3(160A)降至 175HV ,组4(180A)进一步降至 162HV ;热影响区硬度普遍低于母材区,组2热影响区最低硬度为 145HV ,组4降至 132HV 。硬度变化与金相组织密切相关,珠光体含量增加与晶粒细化可提升硬度,而晶粒粗化会导致硬度下降。

2.3 力学性能与金相组织的关联性分析

力学性能与金相组织关联紧密。其一,晶粒尺寸影响显著,符合霍尔-佩奇公式,晶粒越细,屈服与抗拉强度越高。组2(140A)焊缝区铁素体平均晶粒尺寸仅 $6\mu\text{m}$,细小晶粒增加晶界面积,阻碍位错运动,提升强度与硬度,还能分散应力集中,减少脆性断裂,提升冲击韧性;组4(180A)晶粒粗化,晶界面积减少,位错运动阻力降低,力学性能显著下降。其二,相组成影响重大,珠光体是硬脆相,增加可提升强度与硬度,过量会降低塑性与韧性;铁素体是塑性相,可提升韧性,含量过高会降低强度。组2(140A)焊缝区珠光体占比30%,与铁素体配比合理,综合力学性能最优;组1珠光体不足,强度提升有限;组3、组4珠光体下降且出现魏氏组织,韧性显著降低。其三,热影响区因过热晶粒粗化,形成粗大铁素体-珠光体组织,抗拉强度与硬度低于焊缝与母材区,是薄弱环节,多数拉伸试样断裂于此。随焊接电流增大,热输入增加,过热区扩大,晶粒粗化加剧,整体力学性能降低,优化焊接参数是提升接头质量关键。

3 焊接工艺优化建议

基于上述试验结果与力学性能-金相组织关联性分析,为实现Q235钢手工电弧焊接头综合力学性能的精准提升,结合工业生产实际需求,从参数调控、过程优化、焊后处理及质量管控四个维度提出以下细化优化建议,确保工艺的可行性与实用性。

3.1 核心焊接参数的精准调控

焊接电流是调控焊缝区组织与性能的核心参数,结合试验数据,需将焊接电流严格控制在 $135\text{--}145\text{A}$ 区间(最优值 140A),此区间内热输入量(约 $8\text{--}10\text{kJ/cm}$)可实现焊缝区冷却速度与组织转变的平衡,确保形成晶粒尺寸 $6\text{--}8\mu\text{m}$ 、珠光体含量28%~32%的优质铁素体-珠光体

混合组织。同时,需同步优化配套参数:焊接电压维持22V不变,避免电压波动导致电弧不稳定,进而引发焊缝夹渣、气孔等缺陷;焊接速度可微调至8-10cm/min,较原参数适当降低速度,可延长熔池凝固时间,减少针状铁素体的生成,提升珠光体分布均匀性,但需严格控制下限,避免速度过低导致热输入量超标,引发晶粒粗化。焊条伸出长度固定为10mm,此长度可确保电弧稳定性与焊条熔化效率,减少飞溅与未焊透风险。针对不同厚度Q235钢试板,需进行参数适配调整:当试板厚度 > 10mm时,可采用分层焊接工艺,首层焊接电流选用140A确保熔深,后续层电流降至130-135A,避免多层焊接叠加热输入导致晶粒粗化;当试板厚度 < 8mm时,电流可降至125-130A,配合5-8cm/min的焊接速度,防止烧穿与焊缝过宽^[4]。

3.2 焊接过程的多维度优化

焊接前预处理质量直接影响接头组织纯净度,需强化试板表面清理流程:采用砂纸打磨后,再用丙酮擦拭坡口及两侧20mm范围内区域,彻底去除氧化皮、油污及水分,避免杂质混入焊缝形成夹杂物,破坏组织连续性。对于存放超过24h的试板,重新清理,防止二次氧化。焊条烘干后需置于保温桶中随用随取,烘干后存放时间不超过4h,避免受潮导致焊缝气孔缺陷。焊接过程中需控制电弧长度在2-3mm,采用短弧焊接技术,可减少空气侵入熔池,降低焊缝含氧量,避免形成氧化夹杂物;焊接运条采用锯齿形摆动,摆动幅度控制在焊条直径的3-4倍,确保坡口两侧熔合良好,避免未焊透;焊接方向保持匀速推进,避免忽快忽慢导致热输入量波动。另外,焊接环境需满足要求,环境温度不低于0℃,湿度不超过80%,当环境湿度超标时,需采取除湿措施,防止焊缝氢致裂纹。

3.3 焊后处理的针对性强化

针对热影响区晶粒粗化的核心问题,需采用焊后正火处理细化组织:正火温度严格控制在920-950℃,保温

时间按试板厚度计算(3min/mm,最低不低于30min),确保热影响区粗大晶粒充分奥氏体化,随后随炉冷却至500℃以下再空冷,可使热影响区晶粒尺寸细化至15μm以下,抗拉强度提升15%-20%,冲击韧性显著改善。对于无法进行整体正火处理的大型结构件,可采用局部正火处理,通过火焰加热或感应加热方式,精准加热热影响区,避免对其他区域组织造成影响。焊后冷却阶段需优化冷却方式:对于普通结构件,焊后自然冷却即可,但需避免风吹、雨淋等快速冷却情况,防止产生焊接应力;对于承受载荷的关键结构件,焊后需进行缓冷处理,采用石棉布包裹焊缝及热影响区,缓慢冷却至室温,减少焊接残余应力,降低裂纹风险。此外,焊后需及时清理焊缝表面焊渣与飞溅,对焊缝进行外观检查,发现表面缺陷及时修补。

结束语

本文通过系统的试验研究,揭示了Q235低碳钢焊接接头力学性能与金相组织间的内在联系,明确了晶粒尺寸、相组成及热影响区组织对力学性能的影响机制。基于此提出的焊接工艺优化建议,具有较强针对性与实用性。后续研究可进一步拓展材料种类与焊接方法,深入探索复杂工况下接头性能变化规律,推动焊接技术持续发展。

参考文献

- [1]张念学,戚振,张义磊. 镁合金焊接接头力学性能的测试与分析[J]. 特种设备安全技术,2025(1):13-15.
- [2]蔡洪能,王浩丞,孙建涛,等. 预热处理对大型充油设备油箱薄弱部位焊接接头力学性能的影响[J]. 高电压技术,2025,51(7):3393-3401.
- [3]段琳芳. 钢筋焊接接头力学性能试验的检测方法分析[J]. 江苏建材, 2025(4): 46-48.
- [4]严密,赵彦龙,贺凯歌,等. 多次补焊对K4169高温合金焊接接头组织与力学性能的影响[J]. 焊接,2025(6):30-37.