

低碳钢手工电弧焊工艺接头性能研究

胡玉国

栾川龙宇铝业公司

摘要：手工电弧焊是低碳钢构件焊接的主流工艺，设备简便、操作灵活，广泛应用于机械制造、建筑工程等领域。低碳钢焊接性优良，但手工电弧焊中焊接参数、焊前准备等因素易导致接头组织与性能波动，影响构件服役可靠性。本文以低碳钢为研究对象，通过手工电弧焊试验，系统分析焊接电流、电弧电压、焊接速度对接头微观组织、力学性能及焊接缺陷的影响，探究工艺参数优化路径，为低碳钢手工电弧焊工艺规范实施与接头性能提升提供理论与实践参考。

关键词：低碳钢；手工电弧焊；焊接工艺；接头性能；微观组织

1 引言

低碳钢含碳量低于 0.25%，塑性、韧性及可焊性良好且成本低廉，广泛用于制造结构件、容器等。手工电弧焊因设备投入少、操作便捷、适应性强，成为低碳钢焊接的主要手段。焊接接头是构件薄弱环节，其性能决定构件承载能力和服役寿命。手工电弧焊中，焊接参数匹配不合理、焊前清理不彻底等易导致接头出现气孔、夹渣等缺陷，造成组织粗化、力学性能下降，甚至引发构件失效。目前相关研究多集中于单一参数对某一性能的影响，对工艺参数与接头组织、性能及缺陷的协同关联研究不够系统。因此，开展本研究，明确关键参数影响规律、优化焊接工艺，对提升低碳钢焊接构件质量、保障工程安全具有重要意义，可为实际生产提供指导。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验母材为 Q235 低碳钢，选用 10mm×100mm×300mm 板材，其抗拉强度 375-500MPa，屈服强度不低于 235MPa，伸长率不小于 26%，满足结构件使用要求。

焊接焊条选用 E4303 型 3.2mm 低碳钢焊条，钛钙型药皮，电弧稳定、脱渣性好，成形美观，适用于低碳钢手工电弧焊，可在交直流焊机上使用。

试验设备包括 ZX7-400 型直流手工电弧焊机、万能材料试验机、金相显微镜及硬度计，分别用于焊接操作、力学性能测试、微观组织观察及硬度检测。

2.2 试验方法

试验采用对接接头，焊前机械打磨清除母材待焊表面铁锈、油污等杂质，E4303 焊条经 150℃烘干 1 小时，去除药皮水分以防止氢气孔。

焊接采用直流反接，以焊接电流、电弧电压、焊接速度为关键变量设计多组对比试验，每组 3 个平行试样保证结果可靠，焊接后自然冷却至室温再进行性能测试与微观分析。

力学性能测试按国家标准进行，万能材料试验机测定接头抗拉强度和伸长率，布氏硬度计测试焊缝区、热影响区及母材区硬度，每个区域 5 个测试点取平均值。

金相显微镜观察接头微观组织，试样经打磨、抛光、腐蚀处理后，分析不同参数下组织变化规律及与力学性能的关联；同时通过外观检查 and 无损检测排查焊接缺陷并分析成因。

3 试验结果与分析

3.1 焊接参数对微观组织的影响

低碳钢手工电弧焊接头分为母材区、热影响区和焊缝区，各区域组织差异显著，且受焊接参数影响较大。母材区未受焊接热作用，微观组织为均匀细小的铁素体和珠光体，组织稳定，力学性能良好。热影响区组织变化受热输入影响最大，热输入由焊接电流、电弧电压和焊接速度决定。热输入增大时，加热温度升高、保温时间延长，晶粒粗化，出现粗晶铁素体、珠光体及魏氏组织；

热输入减小时，晶粒生长受抑制，以细晶铁素体和珠光体为主，组织性能更优。焊缝区由熔化后再凝固形成，主要为柱状晶和等轴晶。热输入适中时，冷却速度合理，等轴晶比例高，晶粒细小致密，力学性能优良；热输入过大导致柱状晶粗化、晶界偏析，韧性和强度下降；热输入过小易形成淬硬组织及未熔合缺陷。

3.2 焊接参数对力学性能的影响

3.2.1 抗拉强度

抗拉强度与接头微观组织密切相关，受焊接参数影响显著，焊接电流、电弧电压和焊接速度存在最优匹配范围，此时接头抗拉强度接近母材。焊接电流过小，电弧穿透力不足，易产生未熔合，抗拉强度显著下降；电流过大则热输入过高，晶粒粗化且易出现烧穿、气孔，抗拉强度降低。电弧电压过高，电弧拉长、能量分散，易产生飞溅和气孔；电压过低则穿透力不足，易形成未熔合，均会降低抗拉强度。焊接速度过快，热输入不足易形成淬硬组织和未熔合；速度过慢则热输入过大，晶粒粗化，均导致抗拉强度下降。

3.2.2 硬度

焊接接头硬度呈梯度分布，焊缝区最高、热影响区次之、母材区最低，与各区域微观组织直接相关。焊缝区冷却速度快，晶粒细小且可能存在少量淬硬组织，硬度最高；热影响区硬度受热输入影响，适中热输入下晶粒细小、硬度较高，热输入过大晶粒粗化、硬度降低，热输入过小易形成淬硬组织、硬度升高但韧性下降；母材区组织稳定，硬度最低且稳定。热输入增大时，热影响区晶粒粗化、硬度降低；热输入减小时，热影响区和焊缝区硬度升高，但过高硬度会降低接头韧性、易产生裂纹。

3.3 焊接缺陷分析

低碳钢手工电弧焊接头常见缺陷为气孔、夹渣、未熔合，均与焊接参数、焊前准备及操作规范相关。气孔主要为氢气孔和氮气孔，氢气孔源于焊条未烘干、母材表面有水分油污，氮气孔源于电弧电压过高、保护不足，焊接速度过

快也会导致气孔产生。夹渣由焊接参数不合理、焊前清理不彻底或操作不当导致，电流电压过低、熔池温度不足，或焊前、层间清渣不彻底，均会产生夹渣。未熔合源于电弧穿透力不足或焊接速度过快，电流电压过低导致穿透力不足，速度过快导致电弧来不及充分熔化母材，该缺陷会严重降低接头抗拉强度、易引发裂纹。

4 低碳钢手工电弧焊工艺优化

结合试验结果，从焊接参数、焊前准备、操作规范三方面优化工艺，提升接头性能、减少缺陷。针对 10mm 厚 Q235 低碳钢，最优焊接参数为：焊接电流 120-140A、电弧电压 22-24V、焊接速度 8-10cm/min，此范围内热输入适中，接头组织和力学性能最优，缺陷最少。焊前需彻底清理母材待焊表面，E4303 焊条 150℃烘干不少于 1 小时并保温存放，对接接头间隙控制在 2-3mm，确保电弧穿透力。焊接采用直流反接，焊条与母材夹角 45° -60°，运条速度均匀，采用直线或小幅摆动运条，保持短电弧；多层焊接时控制层间温度 150℃左右，层间清渣彻底。低温环境焊接需预热 50-100℃，避免冷裂纹；保持焊接环境干燥，防止气孔产生。

5 结论

本文通过试验研究，分析了焊接参数对低碳钢手工电弧焊接头的影响并提出工艺优化方案：焊接参数对接头微观组织影响显著，热输入适中时组织致密、晶粒细小，热输入过大易造成晶粒粗化，过小则易形成淬硬组织；焊接电流、电弧电压和焊接速度存在最优匹配范围，偏离该范围会导致接头力学性能下降、缺陷增多；气孔、夹渣、未熔合为主要焊接缺陷，与工艺参数、焊前准备及操作规范密切相关，经优化后可有效控制；针对 10mm 厚 Q235 低碳钢，确定最优焊接参数为 120-140A、22-24V、8-10cm/min，配合规范操作可获得综合性能优良的接头。后续研究可进一步探究不同接头形式、焊接材料对接头性能的影响，持续优化工艺以提升接头可靠性。

参考文献

[1] 杨国辉.低碳钢手工电弧焊试样背弯裂纹原因分析[J].化工装备技术,2024,25(2):38-40

[2] 杨兵兵.低碳钢薄板送丝手工焊条电弧焊工艺研究[J].热加工工艺,2025,36(3):39-40