

• 工艺技术 Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5258

G20Mn5QT 低合金铸件缺欠的焊补工艺研究

马 凯¹, 边惠惠², 魏 晓¹, 高志雄^{1,3}, 肖 骞⁴, 李剑波⁵

(1. 包头北方创业有限责任公司, 内蒙古 包头 014030 2. 山东劳动职业技术学院, 山东 济南 250300 3. 北京交通大学, 北京 100044 4. 中国铁路北京局集团有限公司, 北京 100089 5. 中车大连机车车辆有限公司, 辽宁 大连 116045)

摘 要: 针对 G20Mn5QT 低合金铸钢在轨道交通制动夹钳座等关键部件中出现的铸造缺陷, 系统研究其高质量焊补修复工艺, 以提升缺陷修复质量与构件服役可靠性。G20Mn5QT 作为一种广泛应用于转向架、制动系统等关键承载部件的低合金铸钢, 其铸造过程中常因工艺波动产生气孔、夹渣、裂纹等缺陷, 严重影响构件使用寿命与行车安全。焊补是修复此类缺陷、降低生产成本、提高材料利用率的关键技术手段, 但由于 G20Mn5QT 碳当量较高(0.48~0.64), 组织以马氏体为主, 焊接过程中易出现热影响区脆化、冷裂纹及残余应力集中等问题, 对焊接工艺提出了严格要求。基于此, 采用焊条电弧焊方法, 选用低氢高韧性焊材 ESAB OK48.04, 系统研究预热温度、层间温度、热输入等关键参数对焊接接头组织与性能的影响。通过力学性能测试、硬度分析及金相观察, 综合评价焊补接头的综合性能。研究表明, 在预热(200±10)℃、层间温度 210~300℃、热输入 1.0~1.8 kJ/mm 的工艺条件下, 焊补接头抗拉强度达 571 MPa 以上, 断后伸长率不低于 27%, -40℃冲击功最高达 130 J, 焊缝与热影响区硬度分布合理, 组织过渡连续, 无裂纹、气孔等缺陷。通过优化的焊补工艺, 可实现 G20Mn5QT 铸钢缺陷的高质量修复, 接头强度与母材相当, 低温韧性显著提升。

关键词: 低合金铸钢; 焊补; 热影响区脆化; 残余应力控制; 工艺评定

中图分类号: TG442

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)08-0926-10

Study on the Welding Repair Process for G20Mn5QT Low-alloy Casting Steel

MA Kai¹, BIAN Huihui², WEI Xiao¹, GAO Zhixiong^{1,3}, XIAO Qian⁴, LI Jianbo⁵

(1. Baotou Beifang Chuangye Co., Ltd., Baotou 014030, China; 2. Shandong Labor Vocational and Technical College, Jinan 250300, China; 3. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing 100089, China; 5. CRRC Dalian Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Dalian 116045, China)

Abstract: A systematic investigation was conducted on an advanced weld repair methodology aimed at rectifying casting defects in critical components, specifically brake calliper brackets manufactured from G20Mn5QT low-alloy cast steel, which are employed in rail transit systems. The primary goal is to improve the quality of defect remediation and enhance the operational reliability of these components. G20Mn5QT, a low-alloy cast steel widely used in vital load-bearing structures such as bogies and braking mechanisms, is prone to casting imperfections, including porosity, slag inclusions, and cracking, largely attributable to process variability. These defects substantially undermine the service life and safety performance of the components. Welding repair constitutes a pivotal approach to address these flaws, thereby lowering production expenses and optimizing material usage. However, the relatively elevated carbon equivalent of G20Mn5QT (ranging from 0.48~0.64), coupled with its predominantly martensitic microstructure, predisposes the welding process to challenges such as embrittlement within the heat-affected zone, cold cracking, and residual stress accumulation, necessitating stringent control over the welding parameters. On this basis, shielded metal arc welding (SMAW) utilizing the low-hydrogen, high-toughness electrode ESAB OK48.04 was employed to systematically evaluate the effects of critical welding parameters, including preheating temperature, interpass temperature, and heat input, on the microstructural

收稿日期: 2025-11-21

基金项目: 中国兵器工业集团科技研究开发计划 (JM220624)

作者简介: 马 凯, 1979 年生, 硕士, 高级工程师。主要从事铁路车辆工程设计。Email: zgcmk@126.com

通信作者: 边惠惠, 1984 年生, 硕士, 讲师。主要从事控制理论与控制工程教学。Email: 289543062@qq.com

引用格式: 马凯, 边惠惠, 魏晓, 高志雄, 肖骞, 李剑波. G20Mn5QT 低合金铸件缺欠的焊补工艺研究[J]. 铸造技术, 2026, 47(8): 926-935.

MA K, BIAN H H, WEI X, GAO Z X, XIAO Q, LI J B. Study on the welding repair process for G20Mn5QT low-alloy casting steel[J]. Foundry Technology, 2026, 47(8): 926-935.

characteristics and mechanical performance of the welded joints. Comprehensive assessments were conducted through mechanical testing, hardness profiling, and metallographic examination. The findings reveal that under optimized conditions, specifically, preheating at $(200 \pm 10)^\circ\text{C}$, interpassing temperatures between 210 and 300°C , and heat inputs ranging from 1.0 to 1.8 kJ/mm, the weld repairs achieve tensile strengths exceeding 571 MPa, fracture elongations of no less than 27%, and Charpy impact energies at -40°C reaching up to 130 J. The hardness distribution across the weld metal and heat-affected zone is uniform, with continuous microstructural transitions and an absence of defects such as cracks or porosity. The optimization of the weld repair process facilitates the high-quality restoration of casting defects in G20Mn5QT cast steel, yielding joint strengths comparable to those of the base material and significantly improving the low-temperature toughness.

Key words: low-alloy cast steel; welding repair; heat-affected zone embrittlement; residual stress control; process qualification

低合金铸钢泛指合金元素总含量小于 5% 的铸造钢材。通过在碳钢基础上添加少量锰、铬、镍、铜等合金元素,并利用微合金化技术,材料在有效保持优异铸造工艺性和熔融流动性的同时,显著提升了屈服强度、抗拉强度、韧性以及比强度。依据主要合金元素类型,低合金铸钢可分为锰系、铬系、镍系、铜系等类别^[1]。此类铸造钢材普遍具有良好的可焊性、较低的裂纹敏感性、良好的冲击韧性以及较高的疲劳强度^[2],因此广泛应用于工程机械、重型装备制造、船舶结构以及钢结构建筑等对材料性能要求严苛的服役领域^[3]。

G20Mn5 是 EN 10293^[4]以及 EN 10213-3^[5]标准中规定的牌号,其力学性能与 ASTM A148 Grade 80-50 相近,化学成分则与我国 JB/T 6402 标准中的 ZG20Mn 和 ZG20SiMn 牌号相似。凭借优异的低温性能,G20Mn5 在轨道交通车辆领域广泛应用于转向架构架上的牵引吊座、基础制动吊座等关键承载部件,以及牵引电机中的端盖、压圈、悬挂座、齿轮箱壳体、轴承座和悬挂系统组件,确保车辆在复杂工况和高载荷下的安全性与耐久性^[6]。然而,在铸钢件的实际生产过程中,由于原材料成分波动、熔炼温度控制偏差、浇注工艺失误等因素影响,难免会产生气孔、夹渣、裂纹、缩松等铸造缺陷。这些缺陷不仅显著提高铸件废品率和生产成本,还可能成为铸件在服役过程中的潜在失效源,显著降低部件的承载能力、疲劳寿命和整体安全性,严重时甚至可能引发重大事故。因此,对于承受高应力的关键部件缺陷修复至关重要。焊补是消除铸件缺陷、提升铸件服役可靠性的重要手段。依据 EN 15085-4^[7]标准,需开展焊接工艺评定,通过系统性的焊接试验,完整记录焊接过程参数,并测试焊接接头的拉伸强度、弯曲性能、冲击韧性、硬度等力学性能指标,同时进行焊接接头及热影响区的宏观组织/微观组织分析,以验证焊接工艺的可行性、稳定性和可重复性,确保获得满足设计和使用要求的焊接接头。基于焊接工艺评定结

果,编制焊接工艺规程,明确焊接方法、焊材选择、接头形式、预热/层间/焊后温度、焊接电流、焊接电压、焊接速度以及焊后热处理等关键工艺要素^[8]。因此,科学合理的焊补工艺评定对铸件焊补后的服役性能具有决定性意义。

国内外学者针对 G20Mn5QT 的焊补工艺进行了系统研究,旨在通过优化焊接参数、热输入控制及预热与后热措施,提升焊补接头质量。路浩等^[9]、胥钦渠等^[10]和崔健伟等^[11]从结构钢、工程钢、耐蚀钢,通过实验验证和数值模拟,围绕电弧能场对金属材料性能的调控,强调工艺参数对组织-性能的影响,然而,其研究未量化参数交互作用对关键工艺窗口边界的约束,难以推广至铸钢件缺陷的复杂场景。孙佳等^[12]对 5 种不同的 G20Mn5QT 焊补工艺(包括不同预热温度、焊后保温及热处理条件)进行了对比分析,结果表明,焊前预热配合焊后消应力热处理的工艺方案,能获得综合性能最优的焊接接头。该研究通过微观组织分析和力学性能测试证实,优化后的工艺使接头强度系数达到了 0.9 以上,明显降低了接头区域的硬度梯度。但此类优化仅针对标准试样,忽略了铸件实际缺陷的几何不规则性对热循环的影响,可能工艺可移植性不足。Jiao 等^[13]以 G20Mn5-Q355 铸钢接头环向对接焊缝为研究对象,研究了几何形状复杂的铸钢接头在热循环过程中应力演变的详细机制,焊后热处理可将轴向和环向残余应力峰值降低 90% 以上,残余应力的消减程度主要受焊后热处理温度的影响,而消减速率受加热速率的影响。虽推进了应力管理,却未与热输入参数形成集成模型,无法为核心工艺窗口提供完整温度-应力耦合框架。李春来等^[14]采用单面两道焊工艺对 8 mm 厚 G20Mn5 铸钢板进行熔化极活性气体保护电弧焊(metal active gas arc welding, MAG)对接试验,系统研究了接头的显微组织、硬度分布、拉伸性能及疲劳性能。结果表明母材向焊缝中心过渡时,硬度整体呈先升后降趋势,熔合线附近硬度峰值达 70 HRB 左右,焊缝区硬

度维持在 55~60 HRB,略高于母材硬度值;接头抗拉强度显著优于母材,但断后伸长率低于母材;接头高周疲劳强度与母材相当,且断裂位置均集中于热影响区。但是,其试验基于理想的对接接头,未涉及实际铸件缺陷的修复。Žuk 等^[15]使用 MAG 方法结合实芯焊丝 AUTOROD12.51,采用机械加工的方式模拟铸造缺陷,发现淬火样品的冲击强度更高。该研究凸显了交付状态的影响,但未建立工艺参数与缺陷类型的映射规则,参数容差范围仍依赖经验设定。

综上,现有研究虽在参数优化、应力控制和性能测试方面取得进展,却存在三大局限:①未系统整合热输入、温度管理及应力消减等要素;②忽视铸件缺陷多样性与组织非均质性对窗口稳定性的挑战;③工艺验证多限于实验室条件,难以覆盖转向架铸件等复杂服役场景。这些不足制约了铸钢件焊补工艺的标准化和可靠性提升。

因此,本文以某铁路车辆转向架用 G20Mn5QT 制动夹钳座铸件为例,针对典型铸造缺陷焊补的关键工艺技术开展研究。基于上述局限,尤其是工艺参数容差窄、缺陷复杂性导致的修复失效风险,本研究首次提出核心焊补工艺窗口概念,系统界定热输入、预热温度及后热处理的优化边界。通过系统梳理工艺流程、技术特征及质量控制方法,深入探讨焊补的工艺方法、关键参数及其对结构组织性能的影响规律,该窗口的提出填补了铸件缺陷修复中多参数协同控制的空白,对于提升铸件质量可靠性、降低制造成本、保障车辆安全运行具有重要的理论意义和工程价值。

1 低合金铸钢焊补的特殊性

1.1 材料分析

1.1.1 化学成分与机械性能

EN 10293 中规定,G20Mn5QT 的化学成分及力学性能如表 1 和 2 所示。

1.1.2 碳当量

碳当量(carbon equivalent, CE)是把钢中的碳以

及对淬硬、冷裂纹及脆化等有影响的合金元素含量换算成碳的相当含量^[16]。通过对碳当量的估算,可以初步评估低合金高强度钢冷裂敏感,这对预热、焊后热处理、线能量等焊接工艺条件具有重要的指导作用^[17]。当 CE<0.40%时,钢材淬硬倾向不大,焊接性能良好,不需预热;当 CE=0.40%~0.60%,特别当大于 0.5%时,钢材易于淬硬,焊接前需预热^[18]。

国际焊接协会^[19]推荐的碳当量 CE 计算公式为:

$$CE=C+\frac{Mn}{6}+\frac{(Cr+Mo+V)}{5}+\frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (1)$$

式中,元素符号均表示该元素的质量分数。

经计算,G20Mn5QT 制动夹钳座铸钢件的碳当量在 0.48~0.64 之间,属于焊接性能稍差的材料,因此在焊补时需要适当预热。

1.1.3 组织形态

G20Mn5QT 在淬火和回火后,显微组织状态主要是马氏体和少量残余奥氏体,如图 1 所示。

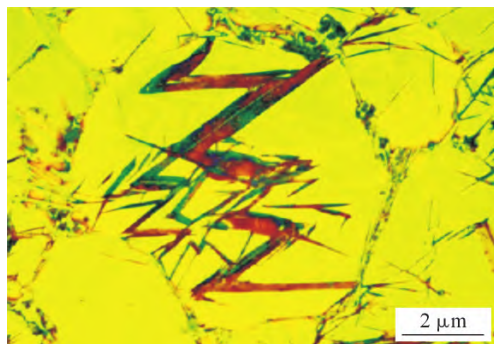


图 1 马氏体组织

Fig.1 Martensitic structure

马氏体材料具有较高的硬度与脆性,焊接接头复杂的拘束应力、热应力以及焊缝中扩散氢的共同作用,促使氢原子向高应力区和晶格缺陷密集区扩散聚集,一旦局部的氢浓度达到临界值,结合高应力状态,即引发脆性断裂,形成氢致延迟裂纹。同时,马氏体晶格中存在大量的、位错、孪晶界、相变引入的微孔洞等缺陷,形成氢原子的富集陷阱,导致局部氢浓度升高,进而大幅降低氢致裂纹的临界应力,使冷裂纹敏感性急剧增强。

表 1 G20Mn5QT 化学成分

Tab.1 Chemical composition of G20Mn5QT

(mass fraction/%)										
Element	C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Cr	Cu	V
Standard	0.17~0.23	≤0.60	1.00~1.60	≤0.02	≤0.02	≤0.40	≤0.15	≤0.30	≤0.30	≤0.05

表 2 G20Mn5QT 力学性能

Tab.2 Mechanical properties of G20Mn5QT

Mechanical properties	R_{σ}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	KV/J	Heat treatment
Standard	≥360	500	≥22	-	≥27 (-40 °C)	Quenching and tempering

1.2 铸造缺陷

铸件缺陷通常为气孔、缩孔、夹渣、裂纹等,如图2所示。

1.3 焊补的特殊性

1.3.1 热循环影响

在铸态组织固有的非平衡特性与焊接快速非平衡热过程的叠加作用下,焊接热影响区组织由粗大的奥氏体晶粒变成粗大的贝氏体或者马氏体,晶界的总面积减少,脆性夹杂物相对集中。容易引起铸件材料韧性下降、冷裂纹敏感性增强、抗疲劳性能衰减等风险。

焊接加热时,亚临界热影响区的铸态组织经历回火或球化,碳化物逐渐聚集增大。临界热影响区出现未完全奥氏体化的双相区,组织分布不均匀,导致组织软化区形成。高温奥氏体快速冷却后,形成高硬度的板条马氏体/贝氏体,构成粗晶区,造成组织硬化区。软硬交错带形成剧烈力学性能梯度,

软化区成为塑性变形集中带,硬化区则易引发脆性开裂。在循环载荷激励下,软硬交错带容易产生疲劳裂纹,并加速裂纹扩展的风险。

1.3.2 残余应力与变形控制

铸件自身的残余应力与焊接过程中产生的焊接应力相互叠加,导致产品焊接变形控制难度大。

焊接热循环使铸造残余应力重新分布:

$$\sigma_{\text{new}} = \sigma_{\text{cast}} \cdot e^{-k(T_{\text{max}} - \Delta\sigma_{\text{weld}})} \quad (2)$$

式中, k 为材料松弛系数; T_{max} 为峰值温度。

2 焊补关键工艺技术

2.1 工艺路线

铸件缺陷焊补工艺流程如图3所示。

2.2 焊接工艺要素分析

2.2.1 焊接方法

焊条电弧焊^[20]可实现平、立、横、仰全位置焊接,能适应铸钢件复杂结构的缺陷修复需求。通过调整

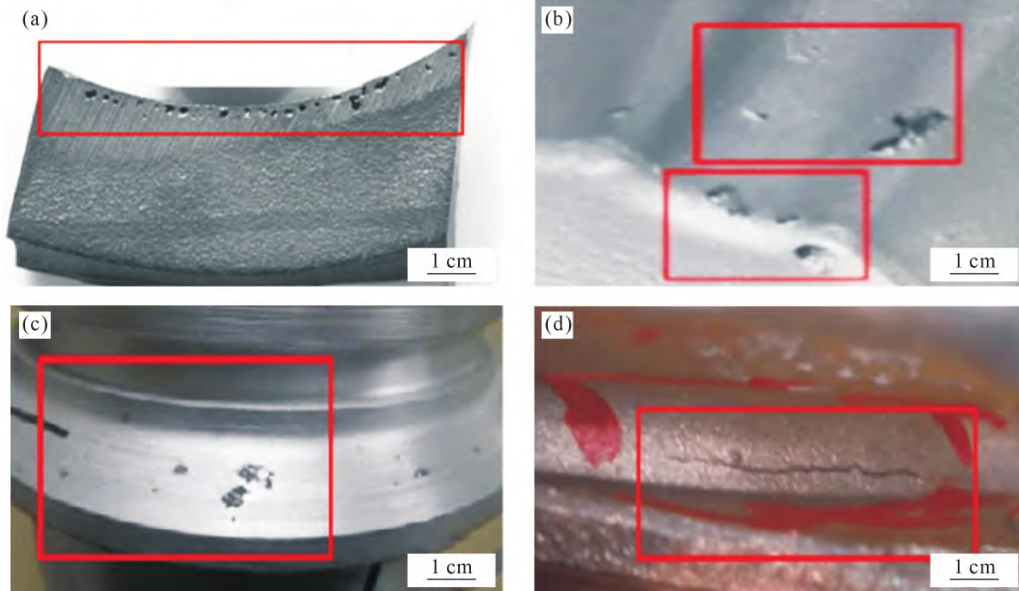


图2 铸钢件缺陷:(a) 气孔;(b) 缩孔;(c) 夹砂;(d) 裂纹

Fig.2 Defects in cast steel: (a) gas pore; (b) shrinkage hole; (c) slag inclusion; (d) crack

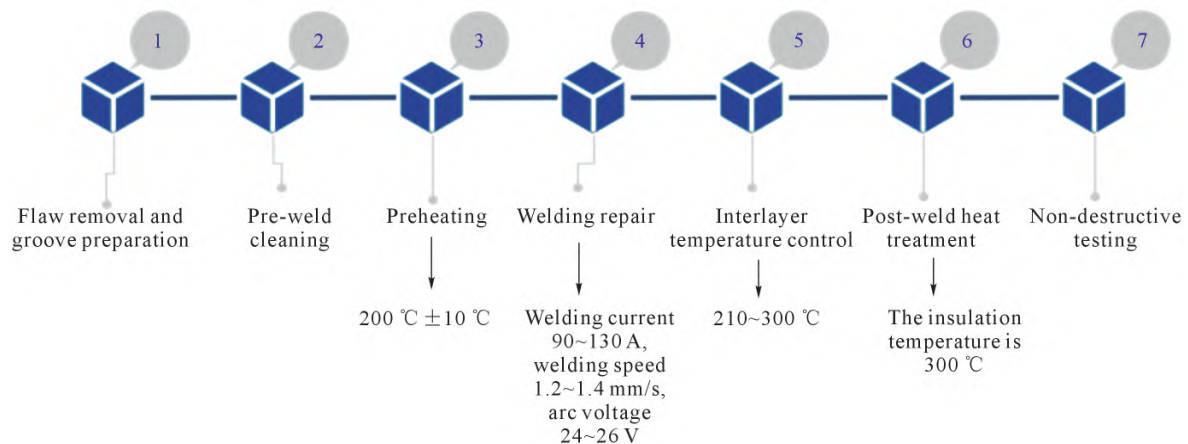


图3 缺陷焊补工艺流程

Fig.3 Defect welding repair process

焊条直径和焊接参数,并采取对称焊道顺序,可以减少单次热输入,抑制焊接热影响区晶粒粗化,降低冷裂纹风险,同时减小铸件整体变形,从而实现从小型气孔、夹渣到较大裂纹、缩松等多种缺陷的修复。但是,该方法存在修复效率相对较低的问题,不适合流水线批量生产。此外,其修复效果在很大程度上依赖于焊工的操作经验和稳定性,因此存在一定的局限性。适用于深腔、拐角及应力集中区等空间受限或自动化设备难以到达的部位,尤其适合修复直径小于 30 mm 的气孔、长度不超过 100 mm 的裂纹等中小型缺陷,以及厚壁铸件的局部区域。该方法常用于小批量、高附加值、疲劳敏感性较高的铸件的修复等场景。

熔化极气体保护焊^[20]电流密度大,熔敷速度快,生产效率显著高于焊条电弧焊。通过调整焊接参数和气体成分,可实现平焊、立焊、横焊等多种位置焊接。但是,相比焊条电弧焊,热输入相对较大,可能导致焊接热影响区晶粒粗化,影响铸件性能。该方法常用于批量生产或大规模缺陷修复等场景。

对于轨道交通行业,属于小批量生产规模,同时铸件的缺陷位置复杂,修复质量要求高。鉴于G20Mn5低合金铸钢对热输入的高度敏感性,优先考虑焊条电弧焊,并控制焊接参数。

2.2.2 焊接材料

焊接材料选择应考虑性能匹配、抗裂控制和工艺适配性等因素。根据焊接接头强度匹配原则,焊材熔覆的抗拉强度及屈服强度应达到或略高于铸件母材的标准值,同时确保焊缝金属在-40℃时的冲击韧性不低于27 J。在实际应用中,焊材强度的增幅通常控制在10%以内。根据ISO 3690标准要求,优先选用碱性焊条的低氢焊材,根据GB/T 3965标准,焊材熔敷金属中扩散氢含量应不大于5 mL/100g,以减小氢致裂纹风险。焊材中S、P含量应不大于0.02%(质量分数,下同),避免因偏析引发热裂纹。

根据G20Mn5QT铸件母材抗拉强度和S、P含量,选用ESAB OK48.04(等同于GB/T 5117-2012 E5016)焊条,熔敷金属的抗拉强度 R_m 为560 MPa,屈服强度 R_{el} 为480 MPa,伸长率 A 为30%,-40℃的冲击功 KV 为100 J。满足等强匹配要求,可以确保焊缝金属在低温下的抗脆断能力。

为确保焊接质量,焊接材料需预先烘干,烘干温度设定在300~350℃,并保持至少1.5 h的保温时间。

2.2.3 预热与层间温度控制

(1) 预热的必要性 G20Mn5QT低合金铸钢焊补时,焊材、工件表面油污及环境水分会引入氢原

子,预热可加速氢原子扩散逸出,降低焊缝金属中扩散氢含量。研究表明,预热温度每升高50℃,扩散氢含量可降低30%~50%,配合低氢焊材,可将氢致裂纹风险降至极低水平^[21]。

G20Mn5QT低合金铸钢的碳当量 CE 为0.48%~0.64%,焊后冷却速度过快易形成硬脆马氏体/贝氏体组织。预热可以减缓热传导速率,将焊接冷却时间控制在20~50 s范围内,避免奥氏体向马氏体转变,促进形成韧性更好的铁素体+珠光体或低碳马氏体组织,降低冷裂纹敏感性。

预热可降低焊接接头的温度梯度,减少冷却过程中因收缩不均产生的拉应力。对于厚壁铸件或转向架构架高拘束结构,预热能使焊接区域与整体结构温度场更均匀,避免局部应力集中导致的变形或开裂。研究表明,预热温度每提高100℃,焊接残余应力可降低20%~30%。

(2) 预热温度的确定 铸件的壁厚增加,会导致散热速度加快,当壁厚 ≤ 20 mm时,预热温度为150~200℃;壁厚 > 50 mm时,预热温度为200~250℃。

对于封闭腔体、多向焊缝交叉等拘束度较高的结构部位,需要额外增加30~50℃的预热温度。

$CE < 0.4\%$ 时,预热温度 ≥ 100 ℃; $0.4\% \leq CE < 0.6\%$ 时,预热温度150~250℃; $CE \geq 0.6\%$ 时,预热温度 ≥ 250 ℃。含Ni、Cr、Mo等合金元素会增加淬硬倾向,因此需适当提高预热温度,如含Mo的低合金铸钢,预热温度需比同 CE 值的Mn系钢高20~30℃。

当环境温度低于5℃时,需将预热温度提高20~30℃,以防止工件散热过快导致冷却速度超标。对于长期存放于低温环境的铸件,焊前需提前升温至15~25℃的室温,再进行预热,防止温差过大引发应力。

综上,G20Mn5QT制动夹钳吊座焊补前预热温度确定为 (200 ± 10) ℃。

(3) 层间温度上限控制 层间温度过高会导致焊接热影响区晶粒粗大,形成魏氏组织或上贝氏体,显著降低冲击韧性。一般控制在预热温度基础上增加50℃以内,且不超过250~300℃的范围。对于G20Mn5QT,层间温度设定为210~300℃,既避免过热,又保证氢扩散效果。

当层间温度接近上限时,可采用空冷、水雾冷却或铜垫板激冷。采用多层多道焊时,每道焊缝焊后需冷却至层间温度下限再施焊,避免连续焊接导致热量累积。

2.2.4 焊接参数

(1) 焊接电流对焊接质量的影响 随着焊接电

流的增大,电弧能量密度随之提升,焊缝的熔深会近似呈线性增加。但是,电流过高会导致母材熔化比例上升,稀释率从 15%增至 30%,可能引发焊缝合金元素稀释和热裂纹风险。同时,大电流易造成焊缝余高过高、熔宽增大,甚至出现焊瘤或咬边。再者,热输入的增加会使焊接热影响区高温停留时间延长,导致奥氏体晶粒粗化,冷却后形成粗大的板条马氏体/贝氏体,进而使低温冲击韧性衰减。研究表明,随着焊接电流的增加,焊接接头的冲击韧性呈现先增加后减少的趋势。

(2)电弧电压对焊接质量的影响 随着电压从22 V 提升至 30 V,电弧覆盖面积明显增加,熔深由 4.0 mm 减少至 3.2 mm,而熔宽则由 8 mm 增加至 12 mm,稀释率则相对稳定在 20%左右。但是,在高电压工况下,焊缝形状会趋于扁平,边缘熔合不良的风险显著增加。同时,电弧能量分散使热影响区宽度扩大,虽然在一定程度上抑制部分晶粒粗化,但亚临界区回火后硬度下降。同时,电压过高容易诱发电弧失稳,从而形成气孔缺陷;亚临界区软化使接头整体韧性协调性差,疲劳裂纹倾向在硬度梯度突变区萌生。

(3)焊接速度对焊接质量的影响 焊接速率提升导致单位长度热输入量降低。当速率由 150 mm/min 增至 300 mm/min 时,熔深自 4.5 mm 降至 2.0 mm,稀释率同步由 25%降至 12%,可能引发焊缝与母材界面熔合不良。同时,高速焊接易诱发焊缝表面波纹粗糙、边缘直线度劣化及“驼峰”焊道成形缺陷。冷却速率显著增大,促使焊接热影响区形成大量孪晶马氏体,导致冲击韧性急剧下降。此外,过低的焊接速率引发的热量积聚,导致热影响区晶粒粗化与碳化物析出产生协同效应,使韧性极剧下降;而过高的焊接速率会因淬硬组织主导脆性转变而加剧韧性恶化。

(4)热输入对焊接质量的影响 对于 G20Mn5QT 铸件,热输入需严格控制在 1.2~1.8 kJ/mm 范围内,此时 $t_{8/5}$ 为 20~35 s,可获得针状铁素体+低碳马氏体混合组织,-40 ℃冲击功稳定在 40 J 以上。

主要焊接工艺参数如下表 3 所示。

2.2.5 焊接操作工艺

(1)小线能量焊接技术 采用“小电流、高焊速、短弧长”的工艺参数组合。当使用 $\phi 3.2$ mm 焊条时,

焊接电流应控制在 90~130 A 范围内,焊接速度维持在 1.2~1.4 mm/s,电弧电压调节至 24~26 V,以确保线能量输入 ≤ 1.4 kJ/mm。电弧长度需严格控制在焊条直径的 0.5~1 倍范围内,以防止电弧过长导致空气侵入熔池及能量分散现象的发生。

(2)多层多道焊补工艺 在进行多层多道焊接时,对于质量要求较高的焊缝,每层厚度不应超过 4 mm。同时,单道焊道宽度应控制在焊条直径的 4 倍以内。每道焊缝完成后,应控制层间温度在 210~300 ℃ 范围内,以确保焊接质量。采用“交替对称”焊道顺序施焊,减少单侧热输入集中现象,如图 4 所示。

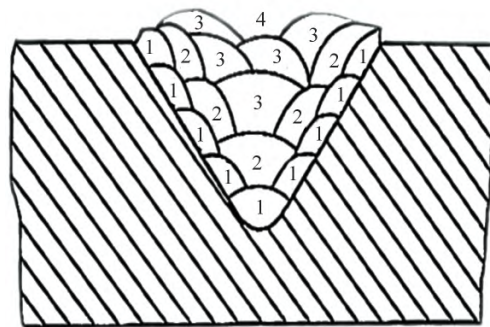


图 4 多层多道焊道排列图示

Fig.4 Multilayer multipass weld bead arrangement diagram

(3)清渣与缺陷清除 采用碳弧气刨工艺初步清除缺陷,刨槽宽度应不小于其深度的 1.5 倍。随后使用砂轮机进行打磨,直至基体金属呈现光泽,并彻底清除气刨形成的厚度约为 0.5 mm 的渗碳层。清渣作业完成后,实施磁粉探伤或渗透探伤,确认缺陷完全清除。每层焊接完成后,需使用镊子及钢丝刷对熔渣进行彻底清理,重点清除焊道边缘与死角区域的残留熔渣,以防止夹渣缺陷的产生,如图 5 所示。

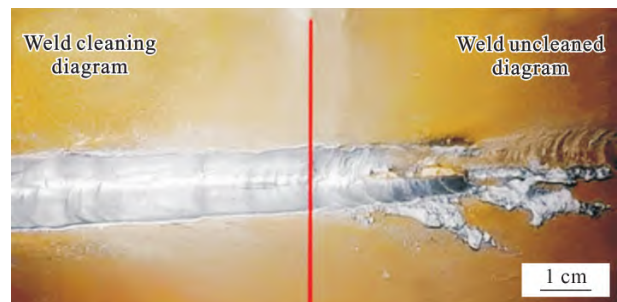


图 5 焊道清根图

Fig.5 Root cleaning of weld beads

表 3 焊接参数表
Tab.3 Welding Parameters

Defect	Material specifications/mm	Welding current/A	Welding voltage/V	Heat input/(kJ·mm ⁻¹)	Welding rate/(mm·s ⁻¹)
Surface crack	$\phi 2.5$	50~80	22~24	1.0~1.2	1.0~1.5
	$\phi 3.2$	90~130	24~26	1.2~1.4	1.2~1.7
Shrinkage porosity	$\phi 4.0$	180~210	26~28	1.6~1.8	1.5~2.0

(4)层间温度与应力控制 采用红外测温仪实时监测焊缝两侧 50 mm 处的温度,确保层间温度不低于 210 ℃且不高于 300 ℃。温度接近上限时,采用空冷或铜垫板局部激冷;温度低于下限时,用陶瓷加热片补热至目标区间。每焊补 2~3 层后,使用圆头锤对焊缝金属进行适度锤击,锤击密度为 5~8 点/cm²,释放应力。

(5)坡口设计 采用 U 型或双 V 型坡口,如图 6 所示,坡口角度 30°~45°,根部半径 ≥ 3 mm,避免锐角导致应力集中;厚壁小于 10 mm 的薄壁件可采用 I 型坡口,但需控制熔深超过 3 mm。

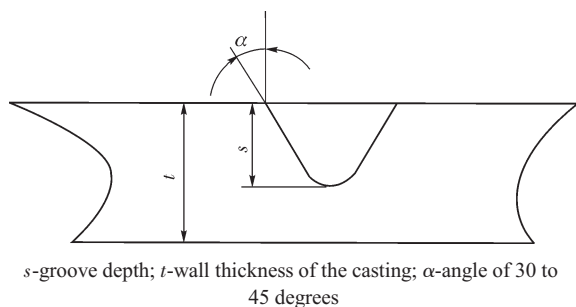


图 6 U 形坡口图示

Fig.6 U-shaped groove diagram

2.2.6 焊后热处理

焊后热处理可以实现消除焊接残余应力、改善热影响区组织和性能、促进氢扩散逸出的效果。研究表明,铸件厚度每增加 25 mm,保温时间延长 1 h^[22]。一般焊后热处理不得超过该牌号材质的回火温度,对于调质钢焊后热处理温度一般宜比原回火温度低 30 ℃左右。鉴于本文所述 G20Mn5QT 铸钢件原回火温度为 610 ℃,所以选择焊后热处理的保温温度为 580 ℃。

G20Mn5QT 制动夹钳座的最大壁厚为 50 mm,根据下式^[3]计算得出焊后热处理加热速度不应大于 110 ℃/h:

$$v_{\text{heat}} = 220 \times \frac{25}{t} \quad (3)$$

根据下式^[4]计算得出最小保温时间为 2 h:

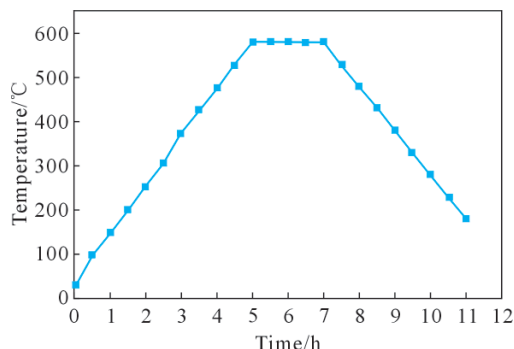


图 7 焊后热处理曲线

Fig.7 Postweld heat treatment curve

$$H = \frac{t}{25} \quad (4)$$

根据下式^[5]计算得出冷却速度不应大于 100 ℃/h:

$$v_{\text{cool}} = 200 \times \frac{25}{t} \quad (5)$$

式(3~5)中, t 为壁厚, mm。铸钢件焊补后的热处理曲线如图 7 所示。

3 焊补实验

3.1 焊接准备

采用 45 kW、500 kg 工频炉熔炼牌号为 G20Mn5 的铸钢件为试验材料,材料符合按照表 1 和 2 的要求,试件厚度采用 30 mm 厚板。

焊接试件尺寸加工成 500 mm×150 mm 试板,单边开坡口,预留 1 mm 钝角。两组试板采用对接焊方式,模拟铸件缺陷修复,焊接接头形式如图 8 所示。

3.2 焊接设备选择

试验选用了 YD-400AT 焊接。焊机参数如下表 4 所示。

表 4 电焊机参数表

Tab.4 Electrical welding machine parameters

Definition	Parameter
Model of the welding machine	YD-400AT
Control Method	IGBT Inverter Mode
Input power frequency/Hz	50/60
Rated input capacity/(kVA·kW ⁻¹)	17.6/16.7
Rated output current/A	400
Rated output voltage/V	36
Output current range/A	20~410

3.3 焊接质量

由图 9 可知,焊接接头表面成形良好,未发现未熔合等焊接缺陷。经磁粉探伤、射线探伤后焊接接头中未发现明显的焊接缺陷,评定结果为合格。

3.4 力学性能实验

拉伸试验每组 3 个平行试样,按 ASTM E8/E8M 在万能试验机进行;冲击试验每组 3 个试样,按 ASTM E23 在摆锤冲击仪进行。拉伸性能、冲击强度和剪切

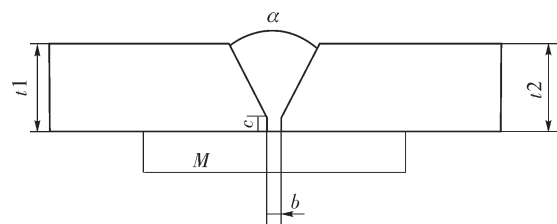


图 8 焊接接头型式

Fig.8 Joint design

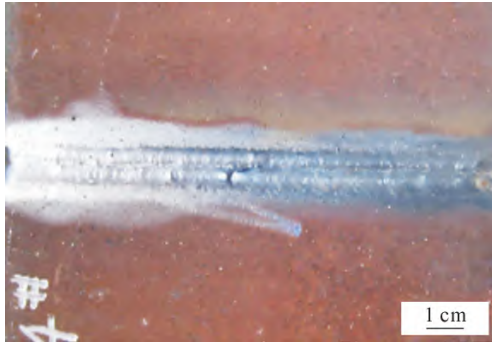


图9 焊接接头焊缝的宏观形貌
Fig.9 Macroscopic appearance of the weld joint

强度的测试结果如表5所示。

力学性能测试结果表明,焊接接头的抗拉强度与母材相当,断后伸长率良好,满足等强匹配原则,抗拉强度的测试值相差 ± 11 MPa,低于EN 10293标准允许波动范围 ± 30 MPa,表明数据具有良好可重复性。焊缝区在 -40°C 下的冲击功最高达130 J,显著高于母材(48 J),表明所选用焊材与工艺在保证强度的同时,有效提升了接头的低温韧性,这对于高寒区车辆运行具有重要意义。然而,冲击功的离散性较大(相差89 J),主要源于热影响区微观组织的局部差异,也有可能与局部微小焊接缺陷有关,后续需进一步优化工艺一致性。

将试验有效数据进行离散性分析,图10中展示的结果代表样本总体趋势,遵循ISO 5725-2标准要求。

3.5 硬度实验

按照图11所示进行硬度试验。由图12知,由母材到焊缝中心,硬度呈先升高后降低的趋势;熔合线处的硬度值最高,为 194 HV_{10} ,说明通过预热与热输入控制,有效抑制了淬硬马氏体组织的形成,降低了

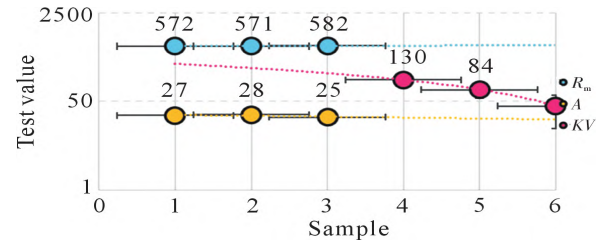


图10 试验数据离散图
Fig.10 Scatter plot of the test data

冷裂纹风险;焊缝区的硬度值在 $162\sim 180\text{ HV}_{10}$,略高于母材区的 $151\sim 168\text{ HV}_{10}$ 硬度值,说明焊缝区组织存在粗多边形铁素体和细针状铁素体。

3.6 金相组织分析

由图13可知,焊接接头融合良好,由焊缝区、热影响区和母材组成,其中,热影响区细分为不完全正火区、正火区和过热区。金相组织分析进一步证实,焊缝区以铁素体为主,热影响区(heat affected zone, HAZ)组织过渡连续,未出现明显的粗晶脆化区,表明所采用的“小电流、高焊速、短弧长”及多层多道焊工艺有效控制了焊接热循环对组织性能的不利影响。

4 结论

(1)热输入在 $1.0\sim 1.8\text{ kJ/mm}$ 范围内,配合适当的预热与层间温度控制,可有效调控焊接热循环过程,抑制热影响区晶粒粗化与马氏体脆化,促进针状铁素体与马氏体的混合组织生成,从而在保证强度的同时显著提升低温韧性。

(2)预热温度 $(200\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 与层间温度 $210\sim 300^{\circ}\text{C}$ 的合理匹配,不仅有效降低了氢致裂纹敏感性,还缓解了焊接残余应力的累积,适用于中碳当量($\text{CE} =$

表5 焊接试样力学性能
Tab.5 Mechanical properties of the welded samples

Mechanical property	Test value			Average value	Casting steel (G20Mn5QT)
R_m/MPa	572	571	582	575	590
$A/\%$	27	28	25	26.6	24
KV/J	130(-40°C)	84(-40°C)	41(-40°C)	85(-40°C)	48(-40°C)

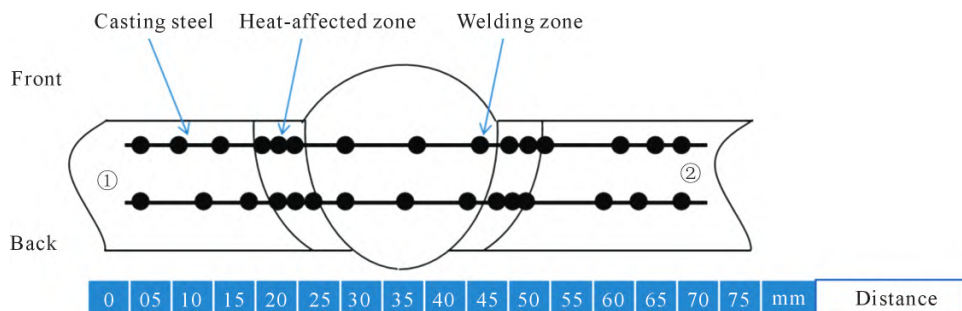


图11 硬度取样图示
Fig.11 Hardness sampling diagram

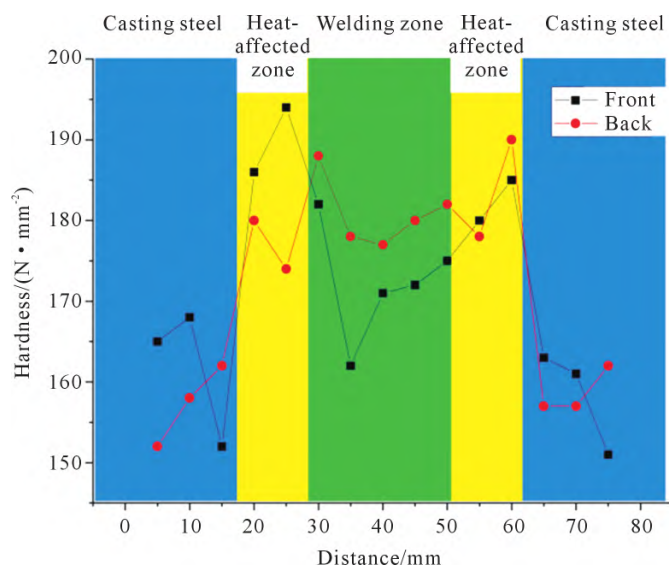


图 12 焊接接头硬度分布曲线

Fig.12 Hardness curves of the welded joints

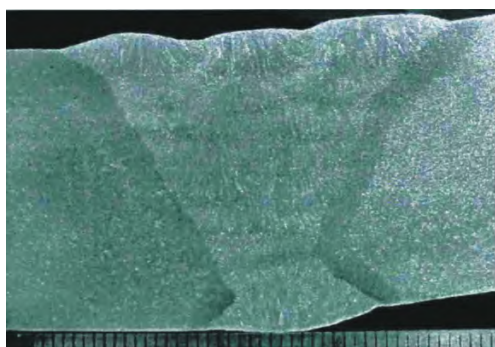


图 13 焊接接头的整体形貌

Fig.13 Overall morphology of the welded joints

0.48~0.64)低合金铸钢的焊接修复。

(3)采用等强匹配原则选用焊材,配合多层多道焊工艺,可实现焊缝区强度与母材相当,同时冲击韧性显著优于母材,体现出“强韧协同”的焊缝设计理念。

(4)针对低合金铸钢焊接,应严格控制热输入在 1.0~1.8 kJ/mm,预热温度不低于 200 ℃,层间温度不超过 300 ℃,以实现焊接质量的可控性与稳定性。

(5)建立“缺陷清除—坡口设计—预热控制—焊接操作—层间处理—焊后热处理”全流程质量控制体系,特别强调碳弧气刨后渗碳层的彻底清除与焊后 580 ℃×2 h 的消应力热处理。

(6)优先选用低氢型焊材,其扩散氢含量≤5 mL/100 g,S、P 含量≤0.02%,并结合小线能量、多层多道焊与对称施焊工艺,以缓解应力集中与组织不均匀性。

本研究首次针对 G20Mn5QT 铸钢提出以“预热(200±10) ℃、层间温度 210~300 ℃、热输入 1.0~1.8 kJ/mm”为核心的焊补工艺窗口,兼具工程适用

性与性能优越性。在保证等强匹配的基础上,实现了焊缝区低温冲击韧性的大幅提升,突破传统焊补接头韧性不足的瓶颈。通过热输入与温度场协同控制,有效抑制了 HAZ 脆化与残余应力集中,为低合金铸钢焊补提供了理论依据与工艺范式。

尽管本研究在 G20Mn5QT 铸钢焊补工艺方面取得了良好成效,未来仍需进一步开展复杂三维缺陷适应性、焊补区域疲劳性能评估及自动化焊补技术等方面的研究,以推动该技术在高可靠性部件中的广泛应用。

参考文献:

- [1] 中国国家标准化管理委员会. 铸造术语:GB/T 5611-2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
National Standardization Administration. Foundry terminology: GB/T 5611-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [2] YIN Y, MA T, HAN Q H, LU Y, ZHANG Y J. Material parameters in the GTN model for ductile fracture simulation of G20Mn5QT cast steels[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 34 (1): 04021412.
- [3] ZHANG Z X, LI Z W, WU H, SUN C Q. Size and shape effects on fatigue behavior of G20Mn5QT steel from axle box bodies in high-speed trains[J]. Metals, 2022, 12(4): 652.
- [4] European Committee for Standardization. Steel castings—Steel castings for general engineering uses: BS EN 10293: 2015 [S]. London: BSI standards Publication, 2015.
- [5] European Committee for Standardization. Steel castings for pressure purposes: BS EN 10213: 2007 [S]. London: BSI standards Publication, 2007.
- [6] 孙佳,梁炬星,谢莹莹,王鑫. 转向架用铸钢件焊补接头残余应力及疲劳性能研究[J]. 轨道交通材料,2025, 4(3): 41-45, 56.
SUN J, LIANG J X, XIE Y Y, WANG X. Research on the residual stress and fatigue performance of the repair welding joints in steel

- castings for bogies [J]. Materials for Rail Transportation System, 2025, 4(3): 41-45, 56.
- [7] European Committee for Standardization. Railway applications- Welding of railway vehicles and components production requirements: EN 15085-4: 2023[S]. London: BSI standards Publication, 2023.
- [8] 贾旭,吕昌略,戴如勇,周峰. 浅析铸钢件焊补过程质量控制[J]. 中国铸造装备与技术, 2024, 59(6): 59-63.
- JIA X, LYU C L, DAI R Y, ZHOU F. Analysis of the quality control of the welding and repair process of steel castings[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2024, 59(6): 59-63.
- [9] 路浩,巩照坤,邢立伟,张伟. 300M 超高强度钢电弧焊修复试验研究[J]. 焊管, 2025, 48(4): 47-53.
- LU H, GONG Z K, XING L W, QIANG W. Study on arc welding repair of 300M ultra-high strength steel[J]. Welded Pipe and Tube, 2025, 48(4): 47-53.
- [10] 胥钦渠,张延斌,张林杰. X80 管线钢 CMT 电弧增材修复应力场数值模拟[J]. 焊管, 2025, 48(8): 106-113.
- XU Q H, ZHANG Y B, ZHANG L J. Numerical simulation of stress field in CMT arc additive repair of X80 pipeline steel[J]. Welded Pipe and Tube, 2025, 48(8): 106-113.
- [11] 崔健伟,张鹏,王立新,聂新宇,李建国,邹运,董悦雷. 层间温度对 GMA 电弧增材制造不锈钢显微组织和力学性能的影响[J]. 焊管, 2025, 48(1): 35-40, 49.
- CUI J W, ZHANG P, WANG L X, NIE X Y, LI J G, ZOU Y, DONG Y L. Influence of interlayer temperature on microstructure and mechanical properties of stainless steel materials in GMA arc additive[J]. Welded Pipe and Tube, 2025, 48(1): 35-40, 49.
- [12] 孙佳,梁炬星,马传平,张振林. G20Mn5 铸钢件 MAG 焊焊补接头组织与力学性能研究[J]. 电焊机, 2024, 54(6): 66-73.
- SUN J, LIANG J X, MA C P, ZHANG Z L. Study on microstructure and mechanical properties of G20Mn5 cast steel joints by MAG repair welding[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(6): 66-73.
- [13] JIAO H H, JIN H, ZHENG R K, FAN Y C, LIU D H. Numerical simulation of the effect of post-weld heat treatment on residual stresses in G20Mn5 cast steel welded joints [J/OL]. Journal of Southeast University (English Edition), 2025. <https://link.cnki.net/urlid/32.1325.N.20251030.1528.002>
- [14] 李春来,秦庆斌,吴圣川,张晓军,梁涛,刘洋. G20Mn5 铸钢 MAG 焊接接头的组织与力学性能 [J]. 机械工程材料, 2020, 44(7): 8-11, 17.
- LI C L, QIN Q B, WU S C, ZHANG X J, LIANG T, LIU Y. Microstructure and mechanical properties of G20Mn5 cast steel MAG welded joint[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(7): 8-11, 17.
- [15] ŽUK M, DOJKA R. Repair welding of cast steel G20Mn5 [J]. Welding Technology Review, 2018, 90(5): 112-116.
- [16] 彭春涛. 激光 -MAG 复合热源焊焊接钢裂纹敏感性研究[J]. 金属加工(热加工), 2020(3): 19-21.
- [17] 张杨. 转向架构架用金属材料(钢)浅析[J]. 内燃机与配件, 2017(23): 65-69.
- [18] 马宝国,刘杰,王文轩. 异质冷焊法在汽轮机法兰与垫片密封焊中的应用探讨[J]. 中国设备工程, 2023(21): 97-98.
- [19] 李晓延,邹贵生. 国际焊接学会 (IIW) 2021 研究进展[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
- LI X Y, ZHOU G S. IIW 2021 research findings[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2022.
- [20] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第一卷)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [21] 黄巍,宋世和,周昀. 熔化极气体保护焊对低合金高强度钢熔敷金属扩散氢及冷裂纹的影响[J]. 焊接技术, 2024, 53(11): 116-121.
- [22] 乔春城. AP1000 钢制安全壳组装焊接工艺优化[D]. 北京: 中国石油大学, 2018.
- QIAO C C. AP1000 containment vessel assembly welding process optimization[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.

(责任编辑:杨浩雪)