

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.01.13

Q450NQR1耐候钢激光填丝焊与MAG焊 接头组织与性能对比

韩景茹¹, 赵娇玉¹, 黄君辉¹, 黄凤龙¹, 房博^{2*}

1. 中车齐齐哈尔车辆有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161002

2. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028

摘要: 通过对Q450NQR1高强度耐候钢进行激光填丝焊和MAG焊对接工艺试验, 研究了两种焊接方法下焊接接头微观组织及力学性能, 并对拉伸试件断口进行扫描分析。研究表明, 激光填丝焊和MAG焊接头焊缝区微观组织以粒状贝氏体为基体, 伴有先共析铁素体及少量的珠光体。两种焊接方法的接头显微硬度从焊缝到母材整体呈下降趋势, 激光填丝焊接头热影响区宽度较窄, 熔合线是硬度最高位置, 其硬化区平均硬度整体高于MAG焊接头同区域。两种焊接方法下试件弯曲性能良好, 拉伸试件断裂位置均在母材, 激光填丝焊接头具有更高的强度承载。拉伸断口扫描发现, 断口均呈现典型的微孔聚集型韧性断裂特征。

关键词: Q450NQR1耐候钢; 激光填丝焊; MAG焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)01-0095-06

Comparison of Microstructure and Properties between Q450NQR1 Weathering Steel Laser Welding with laser filler welding and MAG Welding Joint

HAN Jingru¹, ZHAO Jiaoyu¹, HUANG Junhui¹, HUANG Fenglong¹, FANG Bo^{2*}

1. CRRC Qiqihar Vehicle Co., Ltd., Qiqihar 161002, China

2. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China

Abstract: Through the experimental study of laser welding with wire feeding and MAG welding butt joint processes for Q450NQR1 high-strength weathering steel, the microstructure and mechanical properties of the welded joints under the two welding methods were investigated, and the tensile fracture surfaces were scanned and analyzed. The research indicates that the microstructure of the weld zone in both laser welding with wire feeding and MAG welding joints is based on granular bainite, accompanied by proeutectoid ferrite and a small amount of pearlite. The microhardness of the joints from the weld to the base metal shows an overall decreasing trend for both welding methods. The laser welding with wire feeding joint has a narrower heat-affected zone, and the fusion line is the position with the highest hardness, with its hardened area's average hardness overall higher than that of the MAG welding joint in the same region. The bending performance of the specimens is good under both welding methods, and the tensile fracture positions are all in the base metal, with the laser welding with wire feeding joint having a higher strength bearing capacity. The scanning of the tensile fracture surfaces reveals that the fractures all exhibit typical characteristics of ductile fracture with microvoid coalescence.

Keywords: Q450NQR1 weathering steel; laser filler welding; MAG welding; microstructure; mechanical properties

引用格式: 韩景茹, 赵娇玉, 黄君辉, 等. Q450NQR1耐候钢激光填丝焊与MAG焊接头组织与性能对比[J]. 电焊机, 2025, 55(1): 95-100.

Citation: HAN Jingru, ZHAO Jiaoyu, HUANG Junhui, et al. Comparison of Microstructure and Properties between Q450NQR1 Weathering Steel Laser Welding with laser filler welding and MAG Welding Joint[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(1): 95-100.

收稿日期: 2024-04-03 修回日期: 2024-07-16

作者简介: 韩景茹(1982—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事铁路货车焊接工艺研究。

通讯作者: 房博(1994—), 男, 硕士, 主要从事先进材料连接研究。E-mail: 18742598956@163.com。

0 引言

Q450NQR1 高强度耐候钢作为铁道车辆减重用钢,因其优良的焊接性和耐腐蚀等性能,被广泛应用^[1]。激光填丝焊是一种新型的材料连接方法,是利用激光作为热源同时照射在焊丝和焊缝区域上,熔化的焊丝和母材充分相熔合形成焊缝。相较于传统焊接方法,具有热输入低、焊接变形小等优点,且对工件装配间隙的宽容度较高,拓展了 Q450NQR1 高强度耐候钢在铁路车辆上的应用^[2]。

激光填丝焊的技术应用一直是国内外研究关注的热点。尹燕等人^[3]采用窄间隙激光填丝焊对 Q355ND 低合金高强钢实现了高效率焊接,获得优良焊接接头。彭进等^[4]利用高速摄像系统,通过跟踪预制于焊接路径上的 SiC 颗粒,对激光填丝焊和激光自熔焊的熔池流方向及表面波动规律对焊缝成形的影响进行了表征。Zhang^[5]针对大型结构焊缝中存在接头间隙匹配不均匀的问题,基于遗传算法和 BP 神经网络进行信息采集,利用激光传感器在连续焊接中对焊缝进行宽度、间隙、错变量精密测量,实现了全过程自适应参数激光填丝焊接。Gatzen^[6]研究了不同磁通密度和频率的低频磁场下激光填丝焊接对熔池流动状态和 Si 元素分布的影响,发现低频磁场对改善熔池流动条件、促进焊缝中元素均匀分布起着重要作用。众多研究表明,激光填丝焊是金属材料的有效焊接方法,但其焊接工艺性能与传统 MAG 焊的对比研究较少。两种焊接方法的线能量处于同一数量级,正面第一道线能量低于背面第二道,激光填丝焊的线能量低于 MAG 焊^[7-9],因此对比两种焊接方法得到的焊缝组织及力学性能具有重要意义。

本文以 Q450NQR1 高强度耐候钢为研究对象,对激光填丝焊和 MAG 焊的接头组织与力学性能进行系统研究,确定激光填丝焊接的工艺可靠性,为该材料激光填丝焊接进一步应用积累数据。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验材料

采用 Q450NQR1 高强度耐候钢为作为母材,

TH550-NQ-II 焊丝为填充材料,焊丝直径 1.2 mm,试验材料化学成分及力学性能如表 1、表 2 所示。

表 1 试验材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of test materials (wt. %)

材料牌号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
Q450NQR1	0.120	0.750	1.500	0.025	0.020	0.650	1.250	0.550
TH550-NQ-II	0.100	0.460	1.400	0.016	0.008	0.330	0.480	0.300

表 2 试验材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of test materials

材料牌号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	180° 弯曲	冲击功 $A_{kv}/J(-40^{\circ}C)$
Q450NQR1	450	530	22	合格	≥60
TH550-NQ-II	495	590	28	—	140

1.2 试验方法

Q450NQR1 高强度耐候钢试板尺寸为 300 mm×300 mm×5 mm,接头形式为对接,焊接试板装配图如图 1 所示。焊接组对前,对待焊试板的正反面焊接区域(20 mm 范围内)进行打磨,并使用工业丙酮擦拭待焊区域,将影响焊接的污物全部清理干净。选用森峰手持激光焊机进行激光填丝双面焊接,使用后置送丝方式,焊丝送入角度 45°。采用纯度 99.5% CO₂ 气体作为焊接保护气,流量 20 L/min,激光填丝焊工艺参数见表 3。MAG 焊选用松下 YD-500GL4 焊机,保护气 80%Ar+20%CO₂,气体流量 21 L/min, MAG 焊工艺参数如表 4 所示。

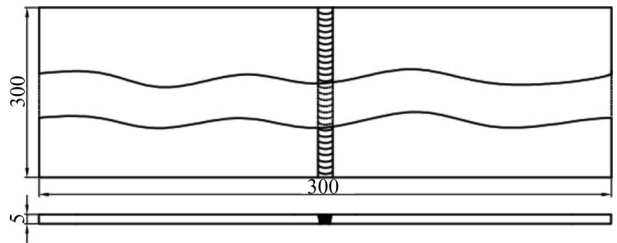


图 1 对接装配

Fig. 1 Picture of butt welding assembly

表 3 激光填丝焊工艺参数

Table 3 Laser filler wire welding process parameters

激光功率 /W	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)	送丝速度 /(cm·min ⁻¹)	扫描速度 /(mm·s ⁻¹)	线能量 /(kJ·mm ⁻¹)
950	3.2	60	400	0.30
1 300	3.4	60	400	0.38

焊接完成后进行 X 射线探伤,垂直于焊缝方向从试板切取金相、硬度以及拉伸试样。按照 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》,使用 Leica

表 4 MAG 焊工艺参数

Table 4 MAG welding process parameters

电流 /A	电压 /V	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)	焊丝倾角 /(°)	线能量 /(kJ·mm ⁻¹)
200	21.9	9.7	80	0.45
203	21.8	9.7	80	0.46

DMi8A 倒置金相显微镜下观察焊缝、热影响区和母材的显微组织形态;显微硬度采用 HV-1000B 型维氏硬度仪,按照 GB/T 27552—2021《金属材料焊缝破坏性试验 焊接接头显微硬度试验》规定的试验方法进行测试;弯曲试验和拉伸试验在 WDW-300E 型微机控制电子万能试验机上进行,分别按照 GB/T 2651—2023《金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验》和 GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》进行测试;规定试样方法测定焊接接头抗拉强

度、屈服强度等数据;采用蔡司 SUPRA 55 场发射扫描电子显微镜,按 JY/T 0584—2020《扫描电子显微镜分析方法通则》的分析方法,对拉伸断口进行微观形貌分析。

2 试验结果与分析

2.1 金相微观组织分析

图 2、图 3 分别为激光填丝焊和 MAG 焊接头不同区域的金相显微组织。由图可见,Q450NQR1 耐候钢母材为块状铁素体和少量珠光体,铁素体含量高于珠光体,具有良好韧性。激光填丝焊接头焊缝区微观组织的白色先共析铁素体沿柱状晶界分布,晶内基体为粒状贝氏体和少量的珠光体。图 2c 中激

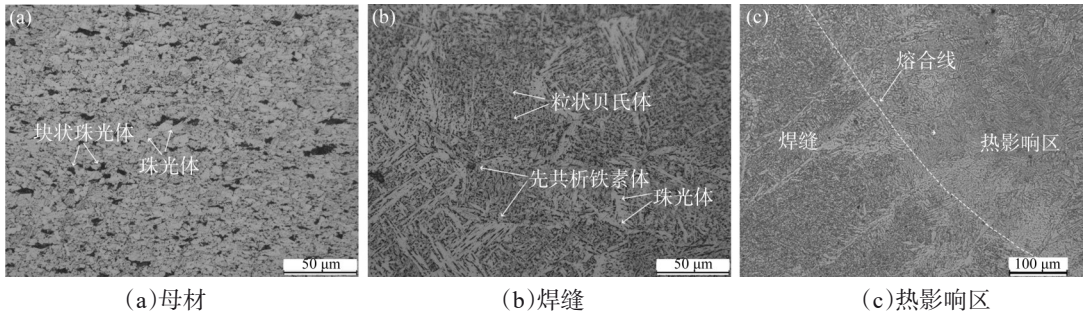


图 2 激光填丝焊接头不同区域显微组织

Fig. 2 Microstructure of different regions of laser wire-filled welded joints

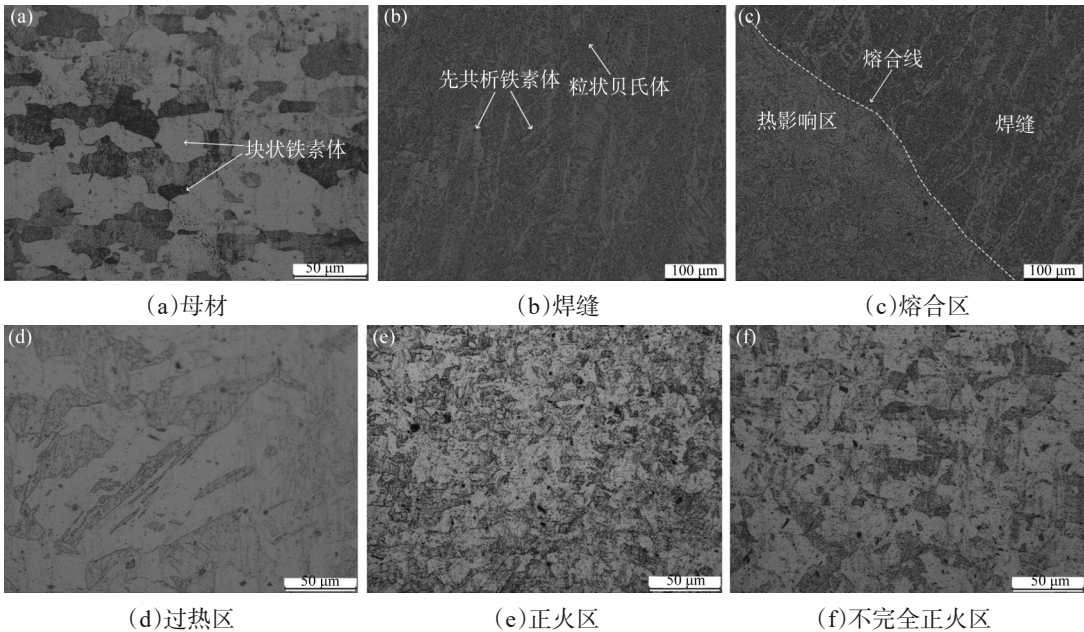


图 3 MAG 焊接头不同区域显微组织

Fig. 3 Microstructure of different regions of MAG welding joint

光填丝焊为热影响区,宽度较窄,熔合线清晰明显,左侧为焊缝区域,右侧为热影响区,无碳贝氏体沿晶界向晶内平行生长,柱状晶主轴的结晶位相严格,垂直于等温的熔合线向焊缝中心生长。图3b为MAG焊接头焊缝区域,可以看到粗大的铁素体和粒状贝氏体含量明显增多。MAG焊接头热影响区宽度相对激光填丝焊较大,这是由于MAG焊热输入相对较高,对比图2c、图3c,临近熔合线的过热区晶粒尺寸受热输入影响变得粗大,是力学性能最差的区域。图3e为接头正火区,晶粒尺寸得到细化,得到均匀细小的铁素体和珠光体组织。图3f为接头不完全正火区,晶粒尺寸受热循环影响较小,但是此区域铁素体未像正火区一样奥氏体化,晶粒尺寸与母材有较明显的差异,力学性能不如正火区。

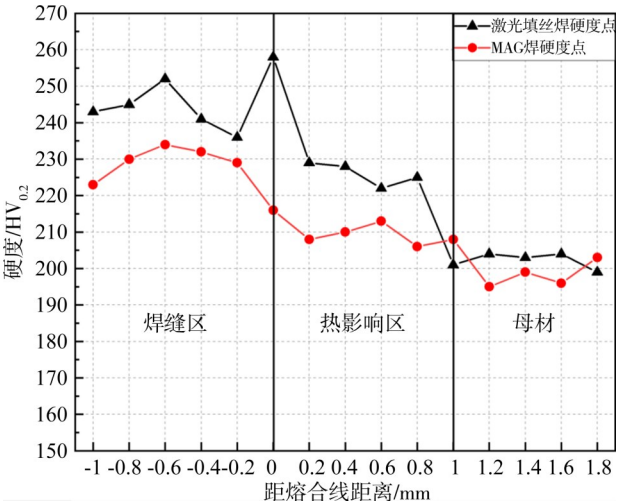


图4 焊接试验件显微硬度分布
Fig. 4 Micro-hardness distribution diagram of the welding test piece

2.2 显微硬度分析

对两种焊法的 Q450NQR1 耐候钢焊接接头进行显微硬度测试,焊缝,热影响区,母材每个区域各取 5 个点,每个点间隔 0.2 mm,试验载荷 200 gf。图 4 是激光填丝焊和 MAG 焊焊接试验件硬度分布。从焊缝区到母材区域,两种焊接接头的显微硬度整体呈现降低趋势。激光填丝焊接头热影响区是硬度变化较明显区域,熔合线是硬度最高位置,是塑性薄弱区域。激光填丝焊试件的焊缝和热影响区硬化区域平均硬度整体均高于 MAG 焊接头同区域平均硬度。这是因为采用激光填丝焊方法的焊接接头升温 and 冷却速率相对 MAG 焊较快,降低了热

循环对焊接接头的影响,因此热影响区域也相对较窄,粗晶区晶粒尺寸长大倾向较小,因此硬化区平均硬度相对于MAG焊同区域高一些。

2.3 弯曲试验结果分析

在每种焊法的试板上各截取 2 个面弯和 2 个背弯试件进行弯曲试验,表 5 为 MAG 焊和激光填丝焊接头弯曲试验结果。可以看出,两种焊法下,面弯和背弯试验时拉伸面上未发生开裂,具有良好的弯曲性能。

表 5 焊接接头弯曲试验结果						
Table 5 Welding joint bending test results						
试件号	焊接方法	试验类型	试件尺寸/mm	压头直径/mm	弯曲角/(°)	试件结果
1-1	MAG 焊	面弯	100×20×4	16	180	合格
1-2		面弯	100×20×4	16	180	合格
1-3		背弯	100×20×4	16	180	合格
1-4		背弯	100×20×4	16	180	合格
2-1	激光填丝焊	面弯	100×20×4	16	180	合格
2-2		面弯	100×20×4	16	180	合格
2-3		背弯	100×20×4	16	180	合格
2-4		背弯	100×20×4	16	180	合格

2.4 接头拉伸结果分析

在室温下对激光填丝焊和 MAG 焊接头进行拉伸试验,加载速度 5 mm/min,直至拉断。激光填丝焊和 MAG 焊试件室温拉伸试验结果如表 6 所示。由表 6 可知,两种焊接接头的断裂位置均为母材,焊缝强度高于母材,焊缝强度满足试验要求。激光填丝焊试件平均抗拉强度为 622 MPa,MAG 焊试件平均抗拉强度为 529 MPa,激光填丝焊接头具有更好的强度承载,力学性能优良。

表 6 试验件室温拉伸试验结果					
Table 6 Tensile test results of test piece at room temperature					
焊接方法	试件编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	断裂位置
激光填丝焊	1	625	543	16.7	母材
	2	618	532	14.3	母材
MAG 焊	1	529	427	18.4	母材
	2	528	428	19.1	母材

2.5 断口扫描分析

图 5 为激光填丝焊和 MAG 焊拉伸试件断口扫描图。可以看出,激光填丝焊和 MAG 焊拉伸试件断口中心和边缘区域均为密集型韧窝特征,为韧性断裂。激光填丝焊拉伸试件断口中心区域整体呈

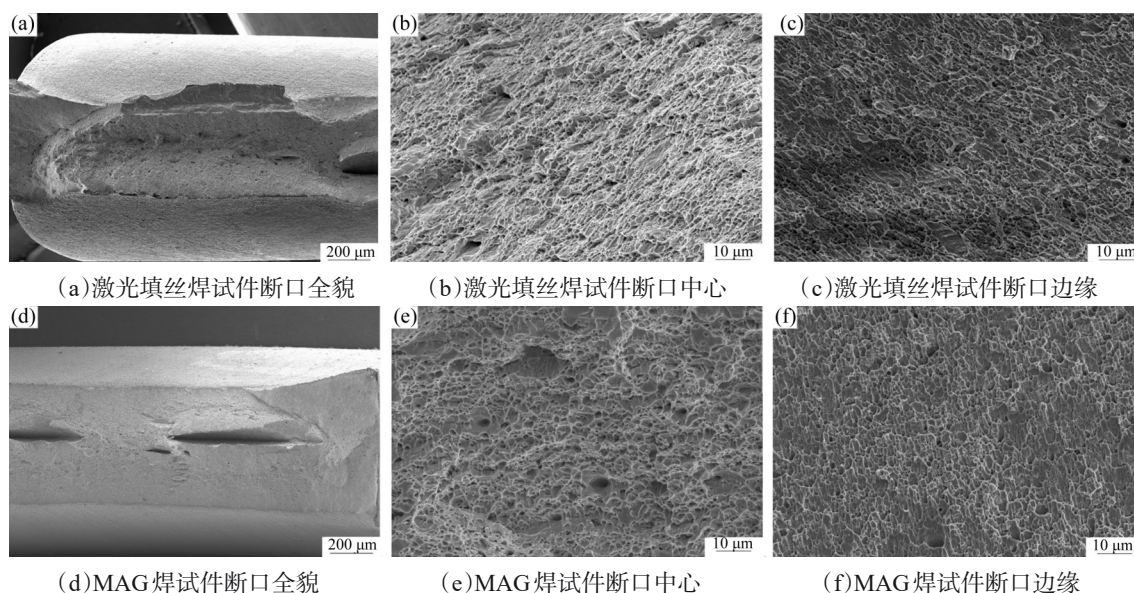


图5 拉伸断口扫描电镜图

Fig. 5 Tensile fracture scanning electron microscope image

现大量密集等轴韧窝;而MAG焊拉伸试件断口中心区域为相对扁平的韧窝,这也是MAG焊拉伸试件抗拉强度相比激光填丝焊试件低一些的微观特征具体体现。激光填丝焊和MAG焊拉伸试件断口边缘区域以密集而浅的韧窝为主,呈特定方向抛物线形,这是由于试件在拉伸过程中,边缘区域韧窝受剪切应力而拉长形成的断裂特征。

3 结论

(1)Q450NQR1耐候钢母材主要由块状铁素体和少量珠光体组成,具有良好的韧性。激光填丝焊焊缝区组织以粒状贝氏体为基体,并分布着先共析铁素体和少量珠光体。热影响区较窄,熔合线处晶粒尺寸细小,组织为无碳贝氏体。MAG焊焊缝区组织以粗大铁素体和粒状贝氏体为主,热影响区较宽,过热区晶粒尺寸粗大,力学性能较差。正火区和不完全正火区晶粒尺寸有所细化,但组织与母材存在差异。

(2)激光填丝焊试件的焊缝和热影响区硬化区域平均硬度整体均高于MAG焊接头同区域平均硬度。MAG焊接头焊缝区域硬度最高,而激光填丝焊接头热影响区是硬度变化较大区域,熔合线是硬度最高位置。

(3)弯曲试验时,MAG焊和激光填丝焊接头达到180°时,表面均未发生开裂,具有良好弯曲性能。

(4)在室温下,对激光填丝焊和MAG焊接头进行拉伸试验,两种焊接接头的断裂位置均为母材,焊缝强度高于母材,焊缝强度满足试验要求。激光填丝焊接头具有更高的强度承载,力学性能优良。

(5)激光填丝焊和MAG焊拉伸试件断口的中心和边缘区域均为微孔聚集型韧窝特征,为典型韧性断裂特征。

参考文献:

- [1] 汪创伟. 含钒高强度耐候钢板Q450NQR1开发[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(03): 129-133.
WANG C W. Development of High Strength Weathering Steel Q450NQR1 Containing Vanadium [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(03): 129-133.
- [2] Naeem M. High Power Fiber Laser Welding with Filler Material[J]. Photonics Views, 2019, 16(5): 51-55.
- [3] 尹燕, 龚岩, 肖梦智, 等. Q355ND厚板窄间隙激光填丝焊接头组织及性能分析[J]. 应用激光, 2023, 43(07): 42-48.
YIN Y, GONG Y, XIAO M Z, et al. Microstructure and Performance Analysis of Q355ND Thick Plate and Narrow Gap Laser Wire Filler Welding Joint [J]. Applied Laser, 2023, 43(07): 42-48.
- [4] 彭进, 王星星, 李刚, 等. 激光填丝焊对熔池动态行为及焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 72-79.

- PENG J, WANG X X, LI G, et al. Effect of Laser Welding with Filler Wire on Molten Pool Dynamic Behavior and Weld Formation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 72-79.
- [5] Zhang K, Li D, Gui H, et al. Adaptive control for laser welding with filler wire of marine high strength steel with tight butt joints for large structures [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 434-441.
- [6] Gatzen M. Influence of Low-frequency Magnetic Fields During Laser Beam Welding of Aluminium with Filler Wire [J]. Physics Procedia, 2012, 39: 59-66.
- [7] 徐佳祺, 周玉东, 曾庆威, 等. 热输入对焊缝金属组织及性能的影响 [J]. 焊接技术, 2019, 48(S2): 39-42.
- XU J Q, ZHOU Y D, ZENG Q W, et al. The Effect of Heat Input on the Microstructure and Properties of Weld Metal [J]. Welding Technology, 2019, 48(S2): 39-42.
- [8] 马清波, 黄显锋, 韩景茹, 等. 热输入对苛刻环境铁路货车用钢粗晶区组织与性能的影响 [J]. 电焊机, 2020, 50(12): 92-95.
- MA Q B, HUANG X F, HAN J R, et al. Effects of welding heat input on the microstructure and performance of coarse grained region of steel for railway freight cars in harsh environment [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(12): 92-95.
- [9] 黄显峰, 赵娇玉, 黄君辉, 等. 不同热输入 Q450NQR1 钢焊接过热区组织、硬度和冲击韧性的研究 [J]. 电焊机, 2020, 50(4): 107-110.
- HUANG X F, ZHAO J Y, HUANG J H, et al. Study on microstructure, hardness and impact toughness of welding overheated zone of Q450NQR1 steel with different heat inputs [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(4): 107-110.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>