

“华光新材杯”高质量论文推荐

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.10.01

面向高效低碳制造的轨道交通装备潜弧深熔焊接技术应用研究

胡文浩^{1,2}, 陈彦宏^{1,2}, 高峰^{1,2}, 姜斌^{1,2}, 刘宣佑^{1,2}, 王法兴³

1. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 063035

2. 河北省轨道车辆转向架技术创新中心, 河北 唐山 063035

3. 欧地希机电(上海)有限公司天津分公司, 天津 300385

摘要: 为推动轨道交通装备高效低碳制造, 针对潜弧深熔焊接技术, 以轨道交通装备常用的12 mm厚S355J2W+N耐候钢为对象, 通过焊接工艺试验、性能检测及多技术对比分析, 探究其焊接接头性能、焊接效能及行业适用性。试验结果表明, 潜弧深熔焊接技术可实现12 mm厚S355J2W+N耐候钢对接接头1道焊成形。焊接热输入仅为2.375 kJ/mm, 与激光-电弧复合焊(2.32 kJ/mm)、双丝焊(2.4 kJ/mm)相当, 较常规气保焊(3.71 kJ/mm)减少36%; 焊接变形最大值0.595 mm, 远低于常规气保焊的2.79 mm; X向焊接残余应力最大值320 MPa, 相比于常规气保焊(490 MPa)降低160 MPa, Y向残余应力在距焊缝中心线15~25 mm区域较常规气保焊低100 MPa以上。接头拉伸性能、弯曲性能、-40℃冲击试验、硬度试验结果和宏观金相质量均满足相应标准要求, 但应严格控制焊接热输入以保障低温韧性。效能对比显示, 潜弧深熔焊接时长仅86 s, 较双丝焊(145.7 s)、激光电弧复合焊(139.42 s)、常规气保焊(402.1 s)分别缩短41%、38%、79%; 加工过程总能耗较常规气保焊降低38.4%, 与激光电弧复合焊相当; 焊接碳排放量0.976 kg, 较常规气保焊减少81.7%。工程应用中, 该技术用于转向架构架焊接时较常规气保焊节约工时37.33%, 焊接碳排放节约9.279%。经综合评价, 潜弧深熔焊接技术在轨道交通装备中厚板部件焊接中, 质量可靠, 低碳、节能、高效制造综合优势明显, 在轨道交通装备行业具备应用的可行性和较高的推广价值。

关键词: 潜弧深熔焊接; 轨道交通装备; 低碳高效焊接; 焊接效能

中图分类号: TG405 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)10-0001-12

Research on the Application of Submerged Arc Deep Penetration Welding Technology for High-Efficiency and Low-Carbon Manufacturing of Rail Transit Equipment

HU Wenhao^{1,2}, CHEN Yanhong^{1,2}, GAO Feng^{1,2}, JIANG Bin^{1,2}, LIU Xuanyou^{1,2}, WANG Faxing³

1. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063035, China

2. Hebei Province Railway Vehicle Bogie Technology Innovation Center, Tangshan 063035, China

3. Odhise Electric (Shanghai) Co., Ltd., Tianjin Branch, Tianjin 30038, China

Abstract: In order to promote efficient and low-carbon manufacturing of railway equipment, this study focuses on the submerged arc deep penetration welding technology. Using the commonly used 12 mm thick S355J2W+N weathering steel for

收稿日期: 2025-08-28

基金项目: 中车唐山机车车辆有限公司科技项目(5212302-X947)

作者简介: 胡文浩(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事轨道交通装备先进焊接技术应用研究。E-mail: wenhaohu@163.com。

railway equipment as the subject, we conducted welding process tests, performance inspections, and multi-technology comparative analyses. The purpose is to systematically investigate the welding joint performance and welding efficiency, and to evaluate its applicability in the industry through engineering applications. The test results show that the submerged arc deep penetration welding technology can achieve a single-pass welding formation for the 12 mm thick S355J2W+N weathering steel butt joint. The welding heat input is only 2.375 kJ/mm, which is comparable to laser-arc hybrid welding (2.32 kJ/mm) and double wire welding (2.4 kJ/mm), and a reduction of 36% compared to conventional gas metal arc welding (3.71 kJ/mm). The maximum deformation is 0.595 mm, less than the 2.79 mm of conventional gas metal arc welding; the maximum residual stress in the X-direction is 320 MPa, which is 160 MPa lower than that of conventional gas metal arc welding (490 MPa), and the Y-direction residual stress is more than 100 MPa lower than that of conventional gas metal arc welding in the area 15~25 mm away from the weld centerline. The joint tensile properties, bending properties, -40°C impact test, hardness test results, and macro-metallographic quality all meet the corresponding standard requirements, but the welding heat input should be strictly controlled to ensure low-temperature toughness. Efficiency comparison shows that the submerged arc deep penetration welding time is only 86 s, which is 41% shorter than double wire welding (145.7 s), 38% shorter than laser-arc hybrid welding (139.42 s), and 79% shorter than conventional gas metal arc welding (402.1 s). The total energy consumption during the processing process is reduced by 38.4% compared to conventional gas metal arc welding, which is comparable to laser-arc hybrid welding; the welding carbon emission is 0.976 kg, which is reduced by 81.7% compared to conventional gas metal arc welding. In engineering applications, this technology saves 37.33% of man-hours and reduces 9.279% of welding carbon emissions compared to conventional gas metal arc welding when used for bogie frame welding. After comprehensive evaluation, the submerged arc deep penetration welding technology has reliable quality, obvious comprehensive advantages of low-carbon, energy-saving, and efficient manufacturing in the welding of thick plate components of railway equipment, and has feasibility and high promotion value in the railway equipment industry.

Keywords: submerged arc deep penetration welding; rail transit equipment; low-carbon efficient welding; welding efficiency

引用格式: 胡文浩, 陈彦宏, 高峰, 等. 面向高效低碳制造的轨道交通装备潜弧深熔焊接技术应用研究[J]. 电焊机, 2025, 55(10): 1-12.

Citation: HU Wenhao, CHEN Yanhong, GAO Feng, et al. Research on the Application of Submerged Arc Deep Penetration Welding Technology for High-Efficiency and Low-Carbon Manufacturing of Rail Transit Equipment[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(10): 1-12.

0 引言

随着国家“双碳”战略目标以及推动制造业向高端化、智能化、绿色化发展要求的提出,推广应用低碳高效制造技术成为各领域积极践行的目标。焊接作为轨道交通装备制造中的关键制造工艺,对产品的生产效率、制造能耗和碳排放都产生重要影响。开发应用绿色低碳、低能耗高效率制造的新型焊接技术成为轨道交通装备行业今后发展的趋势。

相较于其他装备产品,轨道交通装备产品需要服役于大运量、长距离、复杂线路条件高速运行等严苛条件,焊接接头必须具备优异的强度、抗疲劳和耐腐蚀性能;同时,不同的服役环境要求车辆焊接结构必须具备良好的耐低温性能;制造过程中要求严格控制残余应力和变形,以确保尺寸精度;同时,轨道车辆焊接部件结构复杂,焊接技术需具备

良好的制造适应性,以保证产品制造的质量。发展绿色低碳、高质高效焊接技术,不仅是落实国家“双碳”政策的客观要求,也是企业打造绿色低碳制造模式、实现产品全生命周期质量安全的内生动力。

潜弧深熔焊接技术作为一种新型的低碳高效焊接方法,已在煤矿机械^[1]、工程机械、重卡、船舶等行业得到成熟应用,分别应用于液压支架、下车车架、车桥、立柱等部件的焊接制造,在高效、低耗制造方面展现出显著优势。但目前尚未见该技术在轨道交通装备行业的开发与应用报道。基于此,本文以轨道交通装备常用中厚板材料为研究对象,通过基础工艺试验、接头性能检测、多技术效能对比以及工程应用验证,系统分析了潜弧深熔焊接技术的工艺可靠性、性能可靠性与制造优势,旨在为轨道交通装备行业新型焊接技术的开发应用,助力高效低碳制造提供理论支撑与实践参考。

1 轨道车辆焊接新技术开发及应用情况

在轨道交通装备行业,目前已形成涵盖钢、铝、钛合金三类主要材料,以电弧焊、电阻焊、激光焊、搅拌摩擦焊、螺柱焊、钎焊等多种焊接方法综合运用的现代焊接体系^[2]。随着“双碳”战略推进与高效制造需求升级,行业围绕激光焊、激光电弧复合焊、搅拌摩擦焊、增材制造等低碳高效焊接技术开展了大量研究,以突破传统工艺的能耗与效率瓶颈。

在激光及激光-电弧复合焊接技术领域,孙朝等^[3]研究了 SUS301L 不锈钢激光焊研究现状,指出激光焊因热输入集中、焊缝成形优良的特点,在车体薄壁构件焊接中的应用占比逐步提升,但受限于常规设备功率,其适用板厚多集中于 6 mm 以下,难以满足中厚板部件(如转向架构架)的焊接需求。徐王晔^[4]开展了对高速列车转向架用 SMA490BW 耐候钢中厚钢板 T 型接头激光-MIG 复合焊工艺及组织性能的研究,结果表明,与传统 MIG 焊相比,激光-MIG 复合焊焊接速度提升 180%,底板焊接变形降低了 35%,焊接效率得到提高。吴向阳等^[5]研究了动车组构架激光-MAG 复合热源焊接工艺参数,为激光-电弧复合焊接方法在构架制造中的应用提

供了工艺参数和技术基础。刘伟亮等^[6]研究了轨道车辆转向架构架常用 20 mm 厚壁 S355J2H 横梁管激光电弧复合焊工艺,验证了激光-MAG 电弧复合焊接横梁管的可行性。

在搅拌摩擦焊技术领域,张欣盟^[7]等系统梳理了搅拌摩擦焊技术及其应用发展。侯振国等^[8]介绍了搅拌摩擦焊技术在高速列车制造中的应用,认为该技术具有广阔的应用前景。张泽勇等^[9]以中车集团的技术应用为案例,详细阐述了搅拌摩擦焊在车体各部位的应用及工艺研究情况。在增材制造技术领域,杨凯强等^[10]对高速动车组轴箱激光增材制造的影响参数进行了分析,为后期高速动车组轴箱激光增材制造提供技术参考。火巧英等^[11]研究了厚板续合金冷金属过渡焊工艺及接头力学性能,通过开展工艺研究,获得了焊接质量合格的工艺参数。

根据以上研究成果及文献[12-17],调研了低碳高效焊接新技术在轨道交通装备行业的应用情况,如表 1 所示。每种焊接技术在低碳高效制造方面各具优势,但是也存在投入成本高、适用材质有限定、适用场景有限等问题。开发生产效率高、焊接能耗低、投入成本低、应用适应性广等满足综合需求的焊接技术成为轨道交通装备行业推广应用的客观需要。

表 1 轨道交通装备行业 3 种焊接新技术的应用情况

Table 1 Application of three new welding technologies in the rail transit equipment industry

对比项点	激光电弧复合焊接技术	搅拌摩擦焊接技术	增材制造技术
适用材质	钢、铝、铜及其合金	铝合金等非铁金属材料	钢、铝、钛及其合金
适用板厚范围	0.5~30 mm	1~30 mm	无明确限制
适用焊接结构	对接、角接	板材、型材	复杂结构件
质量可靠性	高	高	中等
焊接效率	高/可自动焊	中等/可自动焊	低/生产周期长
投入成本	较高	较高	高
适用场景	适用于长大焊缝的焊接,高精度高效焊大规模生产	铝合金车体部件等	原型制造和小批量生产

2 潜弧深熔焊接技术的原理

潜弧深熔焊接技术是将焊丝潜入母材深处产生电弧,加热母材深处,使母材从深处到表面的金属均被熔化并搅动熔池,从而产生比常规弧焊方法更深熔深效果的新型熔化焊接技术。当低电压时,焊接电源能够控制电弧实现大滴过渡,给母材底部加热保持较深的熔深;当高电压时,焊接电源能够控制电

弧实现旋转过渡,且能实现稳定焊接来支撑熔池金属的侧壁^[18-19]。潜弧深熔焊接技术原理如图 1 所示。

3 研究方法

3.1 焊接材料及试验方法

采用潜弧深熔焊焊接方法,对轨道车辆行业常用的 S355J2W+N 耐候钢开展了焊接工艺试验,化学

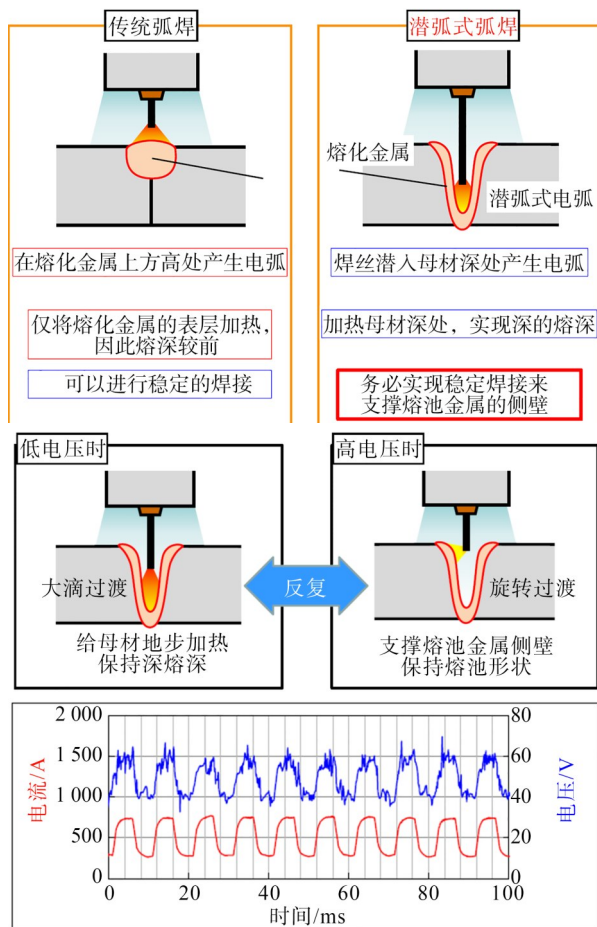


图1 潜弧深熔焊接技术原理

Fig. 1 Principle of submerged arc deep penetration welding technology
成分见表2。试验采用与常规气保焊相同的试板规格尺寸,即500 mm×300 mm×12 mm的对接试板。

表2 S355J2W+N 钢板化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of steel plate (wt. %)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo
0.061	1.33	0.389	0.009	0.009	0.22	0.43	0.005
Ti	Al	Nb	V	B	Cu	Zr	N
0.002	0.035	0.015	0.004	0.002	0.25	0.002	0.0055

针对潜弧深熔焊熔透能力强、熔覆效率高的特点,将焊接坡口从常规“大坡口小钝边”调整为“小坡口大钝边”,坡口角度从60°降至50°,钝边从1 mm增至4 mm。试板坡口背面铺设陶瓷衬垫,试板两侧采用卡具压卡。焊接设备采用 OTC FD19-V8+WB-DPS 型双机焊接机器人,单丝焊接,使用焊丝型号为 ISO14341-A-G 42 4 M Z3Ni1Cu D1.2,化学成分见表3;保护气体为80%Ar+20%CO₂混合气体,流量32 L/min。焊接过程采用高效焊(SHT)模式,实现1

道成形,具体焊接参数与常规气保焊对比见表4。

表3 焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of welding wire (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0.09	0.90	1.48	0.016	0.020	0.05	0.8	0.01	0.49

表4 对接试板焊接参数

Table 4 Welding parameters for butt test plates

焊接方式	坡口角度/(°)	钝边/mm	道数	电流/A	电压/V	焊接速度/(mm·s ⁻¹)	热输入/(kJ·mm ⁻¹)	焊接时长/s
潜弧深熔焊	50	4	1	420	41	5.8	2.375	86
常规气保焊	60	1	1	177	21.0	3.8	0.78	131.6
			2	233	26.6	3.8	1.30	131.6
			3	262	28.0	3.6	1.63	138.9
			合计	—	—	—	3.71	402.1

3.2 试验检测与分析方法

试板焊后分别按照 ISO 5817、ISO 23278、ISO 11666 标准,进行外观检测、磁粉检测和超声波检测。采用单臂划线仪对焊接试板的变形进行矩阵式测量;采用 Proto-iXRD 型应力测定仪,按照 GB/T 7704—2017 标准对试板焊接残余应力进行实测,如图2所示,面向焊接方向时,右侧为A侧,左侧为B侧,分别检测焊道长度中间位置焊缝中心线以及A侧距焊趾2 mm、5 mm、10 mm、15 mm、25 mm处和B侧距焊趾2 mm处的残余应力。

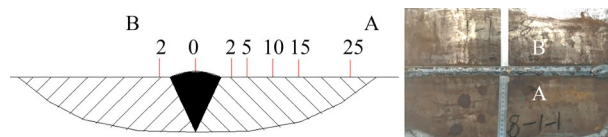


图2 试板焊接残余应力测点位置

Fig. 2 Measurement point locations for welding residual stress in test plates

按照 ISO 4136 标准对拉伸试样开展拉伸试验;按照 ISO 5173 标准开展弯曲试验;按照 ISO 17639 标准开展宏观金相试验,按照 ISO 9016 标准开展-40 °C 冲击试验,按照 ISO 9015-1 标准开展 HV10 硬度试验。

4 试验结果及分析

4.1 焊接变形结果及分析

在外观检测、磁粉检测和超声波检测结果均合

格的条件下,对潜弧深熔焊试板(记为试板A)与常规气保焊试板(记为试板B)进行了一系列检测和试验。首先,对焊接试板焊后变形进行测量,从焊缝起弧端、焊缝长度中心线到收弧端方向为纵向,以试板一侧至另一侧为横向,共测量了6×6处矩阵式测点。两种焊接试板的焊后变形数据对比如图3所示,负值变形数据表示试板下凹。试板A实测最大值(绝对值)为0.595 mm,最小值为0.075 mm,均值0.305 mm;试板B实测最大值2.79 mm,最小值0.25 mm,均值1.355 mm。通过对比数据可知,潜弧深熔焊试板的焊后变形量明显小于常规气保焊试板。

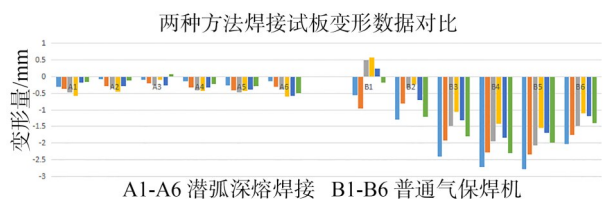


图3 试板焊后变形尺寸分布对比

Fig. 3 Comparison of post-weld deformation size distribution in test plates

分析变形差异成因:潜弧深熔焊通过焊丝潜入母材深处引燃电弧并维持电弧,实现了对板厚方向上更深层、更均匀的加热,热输入使得整个板厚截面的温度梯度减小,热膨胀与收缩更为均匀,从而有效降低了因不均匀塑性变形导致的残余应力和最终翘曲变形。相比之下,常规气保焊的热输入集中于表层,沿板厚方向形成较大的温度梯度,导致更大的不均匀收缩和宏观变形。

4.2 焊接残余应力测定结果及分析

试板A和试板B焊接接头残余应力测定结果如图4所示。两种接头的焊后残余应力整体分布规律类似:焊缝长度方向(X向)的应力最大值位于距焊缝中心线2 mm的焊趾处,垂直于焊缝长度方向(Y向)的应力最大值位于焊缝中心线,但潜弧深熔焊的残余应力分布更平缓,且峰值更低。由图4可知,试板A的X向残余应力最大值为320 MPa,较试板B的最大值490 MPa降低了约34.7%;Y向焊接残余应力在距焊缝中心线15 mm范围内与试板B相当,而在15~25 mm区域较试板B低100 MPa以上。

4.3 拉伸试验结果

两种焊接接头的拉伸试验结果如表5所示,抗

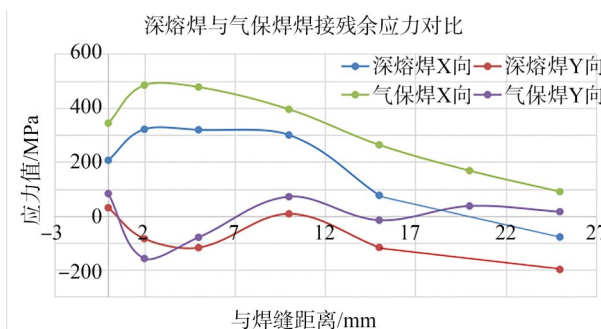


图4 两种焊接接头焊接残余应力对比

Fig. 4 Comparison of welding residual stress in two types of welded joints

拉强度均满足490~630 MPa的标准要求。其中,潜弧深熔焊接接头抗拉强度均值为572.5 MPa,拉伸试样断裂在母材区域,见图5;常规气保焊焊接接头抗拉强度均值为520.5 MPa,拉伸试样断裂在焊缝区域。潜弧深熔焊接接头的抗拉强度比常规气保焊提高了10%,且焊缝区的抗拉强度高于母材区。

表5 常规气保焊接试板拉伸试验结果

Table 5 Tensile test results of conventional gas-shielded welded test plates

序号	试样编号	抗拉强度 /MPa	均值 /MPa	标准值 /MPa	断裂 位置
1	深熔焊-1	556	572.5	490~630	母材
2	深熔焊-2	589			母材
3	常规焊-1	523	520.5	490~630	焊缝
4	常规焊-2	518			焊缝



图5 潜弧深熔焊接接头拉伸试验后试样

Fig. 5 Specimen after tensile testing of submerged arc deep penetration welded joints

4.4 弯曲试验结果

对潜弧深熔焊接接头进行了4个侧弯试验,弯曲角度180°,压头直径40 mm(4倍于板厚)。试验结果合格,如图6所示。

4.5 低温冲击试验结果

-40 °C低温冲击试验结果见表6及图7所示。两种接头的冲击功均值均大于27 J的合格标准,但差异较大。潜弧深熔接头焊缝区和热影响区的平均冲击功分别为45 J和39 J,而常规气保焊试样则高达137 J和106 J。由表2可知,虽然采用潜弧深熔



图6 潜弧深熔焊接接头弯曲试验后试样

Fig. 6 Specimen after bending testing of submerged arc deep penetration welded joints

焊接试板的总焊接热输入 2.375 kJ/mm 低于常规气保焊试板 3.71 kJ/mm,但是单道焊接热输入高于常规气保焊每一道的焊接热输入。因此,采用潜弧深熔焊接 S355J2W+N 耐候钢时,应通过严格控制焊接热输入来提高焊接接头的低温韧性冗余。

表6 -40℃低温冲击试验结果

Table 6 Low-temperature impact test results at -40℃

冲击试样	合格 值/J	焊缝区冲 击功/J	均值 /J	热影响区 冲击功/J	均值 /J	试验 结果
潜弧深熔焊 接试样	≥27	56, 40, 40	45	98, 50, 62	70	合格
常规气保焊 试样	≥27	119, 142, 150	137	124, 108, 212	106	合格

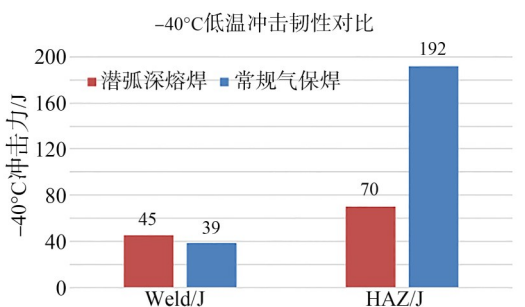


图7 -40℃低温冲击试验结果对比

Fig. 7 Comparison of low-temperature impact test results at -40℃

4.6 硬度试验结果

维氏硬度测试的测点分布如图8所示,两种接头的硬度分布对比如图9所示,硬度试验结果见表7、表8。根据 ISO15614-1 标准,经热处理后的硬度值应不大于 320 HV,试验结果合格。然而,两种接头的硬度分布有明显区别,如图10所示,潜弧深熔焊接接头在F排和R排的焊缝区平均硬度分别比常规气保焊接头高出约 37 HV 和 31 HV。

4.7 金相组织分析

图10、图11为两种焊接接头的宏观金相形貌,焊道之间已划出轮廓线。由图可知,12 mm厚的对

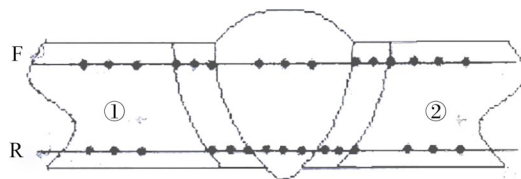


图8 硬度测点分布示意

Fig. 8 Schematic diagram of hardness measurement point distribution

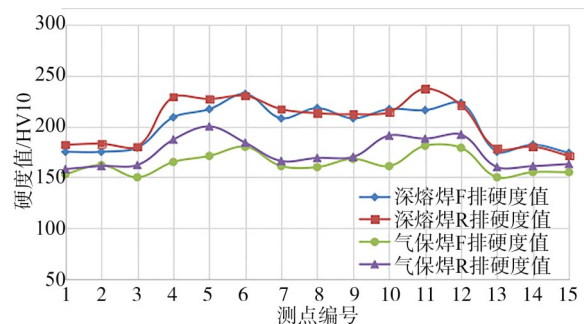


图9 两种焊接接头硬度值对比

Fig. 9 Comparison of hardness values between two types of welded joints

表7 潜弧深熔焊接试样硬度试验结果

Table 7 Hardness test results of submerged arc deep penetration welded specimens

区域及测点	F排测点数据	R排测点数据
①侧母材测点 1~3	175, 175, 179	182, 183, 180
①侧热影响区测点 4~6	209, 217, 232	229, 227, 230
焊缝区测点 7~9	208, 218, 208	217, 213, 212
②侧热影响区测点 10~12	217, 216, 223	214, 237, 221
②侧母材测点 13~15	175, 182, 174	178, 180, 171

表8 潜弧深熔焊接试样硬度试验结果

Table 8 Hardness test results of submerged arc deep penetration welded specimens

区域及测点	F排测点数据	R排测点数据
①侧母材测点 1~3	153, 162, 150	158, 161, 162
①侧热影响区测点 4~6	165, 171, 180	187, 200, 184
焊缝区测点 7~9	161, 160, 168	166, 169, 170
②侧热影响区测点 10~12	161, 181, 179	191, 188, 192
②侧母材测点 13~15	150, 155, 155	160, 161, 163

接 S355J2W+N 钢板对接接头,常规气保焊需要 3 道焊缝成形,而潜弧深熔焊仅需单道即可焊接成形。

图12是常规气保焊接接头的微观金相形貌。常规气保焊焊缝区金相组织以针状铁素体为核心,晶粒尺寸约 15 μm×3 μm,呈细密交错的针状分布;沿柱状晶晶界分布有先共析铁素体,呈薄膜状或短条状;铁素体基体上的岛状组织直径约 3~8 μm,弥散分布于针状铁素体间隙。焊缝区金相组织整体

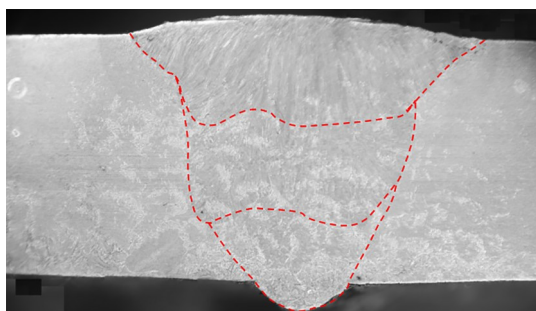


图 10 常规气保焊接宏观金相形貌

Fig. 10 Metallographic morphology of conventional gas-shielded welding

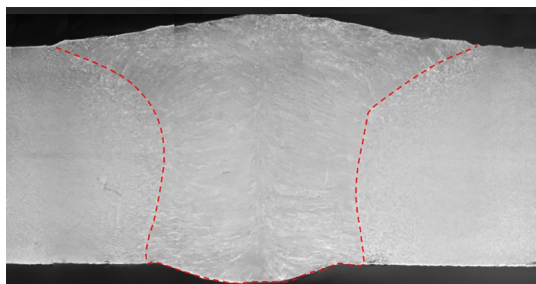
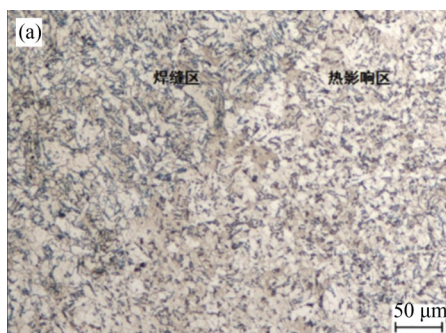
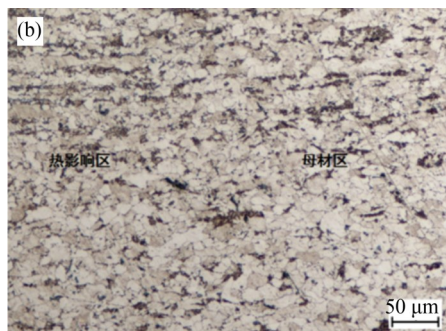


图 11 潜弧深熔焊接宏观金相形貌

Fig. 11 Metallographic morphology of submerged arc deep penetration welding



(a) 焊缝+热影响区



(b) 热影响区+母材

图 12 常规气保焊接微观金相形貌

Fig. 12 Microstructure morphology of conventional gas-shielded welding

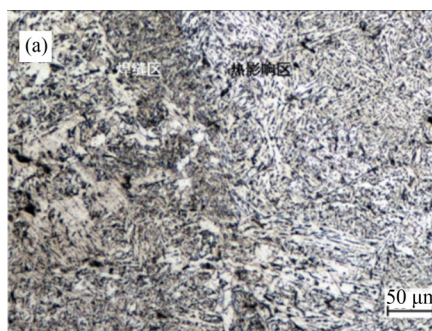
致密无疏松, 无明显块状粗晶。

热影响区以细条状铁素体和粒状贝氏体为主,

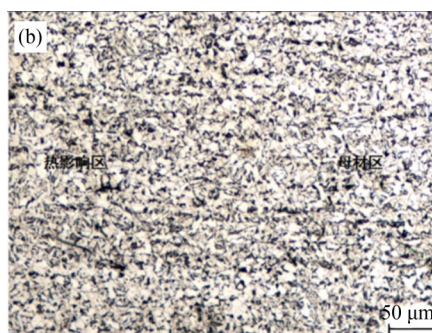
含少量珠光体。细条状铁素体单条晶粒尺寸约为 $40\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$, 部分条状晶粒沿轧制方向轻微定向分布; 粒状贝氏体岛状组织直径约 $8\sim 15\ \mu\text{m}$, 较焊缝区更粗大, 且多附着于条状铁素体边界; 珠光体片层状组织的团簇尺寸约 $15\sim 25\ \mu\text{m}$, 片层间距较宽, 与铁素体呈交替分布。组织纹理较焊缝区更粗大, 条状铁素体清晰可辨, 无过热导致的粗大等轴晶, 晶粒尺寸整体均匀。

图 13 为潜弧深熔焊接接头的微观金相形貌。焊缝区以粗大铁素体为基体, 呈块状或长条状, 单颗晶粒长度为 $30\sim 50\ \mu\text{m}$, 部分粗大晶粒尺寸达 $50\sim 55\ \mu\text{m}$; 伴生片层状珠光体, 局部可见少量粒状贝氏体, 无针状铁素体。珠光体以“铁素体+珠光体”混合团簇形式存在, 团簇尺寸约 $25\sim 40\ \mu\text{m}$, 片层结构清晰可辨; 粒状贝氏体岛状组织直径约 $10\sim 18\ \mu\text{m}$, 稀疏分布于铁素体基体。焊缝区组织整体粗大, 铁素体晶粒边界清晰, 珠光体团簇与铁素体交替分布, 无细密交织纹理(有别于气体保护焊的针状铁素体), 局部可见轻微成分偏析(沿晶界分布的浅色条纹)。

热影响区邻近熔合线区域组织以粗大等轴铁



(a) 焊缝+热影响区



(b) 热影响区+母材

图 13 潜弧深熔焊接微观金相形貌

Fig. 13 Microstructure morphology of submerged arc deep penetration welding

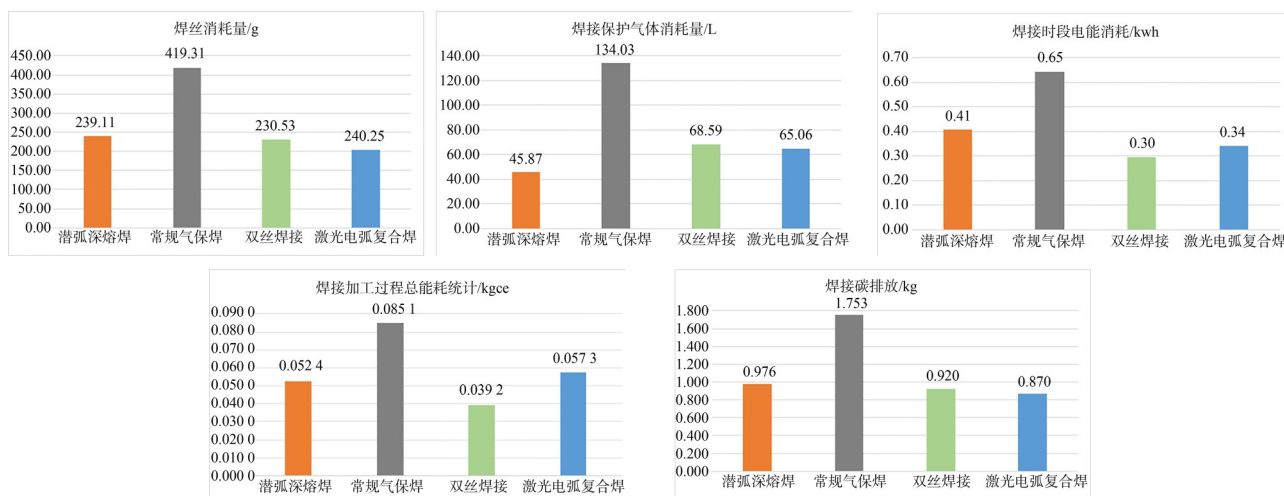


图 14 四种焊接方法的能耗及碳排放对比

Fig. 14 Comparison of energy consumption and carbon emissions for four welding methods

算结果见图 14。潜弧深熔焊接保护气体消耗量为 45.867 L, 比常规气保焊 134.033 L、双丝焊 68.585 L 和激光电弧复合焊 65.063 L 分别减少 65.8%、33.1% 和 29.5%。潜弧深熔焊接的保护气体消耗量最低。

5.3.3 焊接能耗核算

(1) 能耗核算依据。

根据国家标准 GB/T 43656—2024《焊接加工能耗检测方法》^[20]核算四种焊接方法的焊接能耗。

其中电能消耗、气体消耗和焊丝消耗的核算依据分别为: 根据 GB/T 2589—2020, 电力折算标准煤系数为 0.122 9 kgce/kWh。

保护气体 80%Ar+20%CO₂ 的 CO₂ 排放因子为 1.96 kg/m³, Ar 排放因子为 0.5 kg/m³。气体能耗按实际消耗量计算, 并折算为标准煤 (CO₂ 折算系数为 0.214 3 kgce/m³, Ar 为 0)。

焊丝生产碳排放因子为 2.75 kg/kg, 但焊丝消耗不直接计入能耗, 仅作为碳排放计算。

(2) 能耗计算公式。

根据 GB/T 43656—2024 中的式 (6), 焊接加工过程总能耗为

$$E_H = E_u + E_{\text{weld}} + E_{\text{gas}}$$

式中 E_u 为空载时段能耗, 暂不统计。 E_{weld} = 焊接时段电能消耗 W (kWh) $\times$ 0.122 9 kgce/kWh; W = 焊接电流 I $\times$ 电弧电压 U $\times$ 焊接时长 t 。 E_{gas} = 气体消耗量 (m³) $\times$ 折算系数 (CO₂ 为 0.214 3 kgce/m³, Ar 为 0)。

统计焊接时段电能消耗结果见图 13c。潜弧深

熔焊接电能消耗为 0.411 kWh, 比常规气保焊 0.645 kWh 节约 36.3%, 比双丝焊接和激光电弧复合焊分别高 39.3% 和 19.8%。

焊接加工过程总能耗 E_H 计算结果见图 13d, 可见潜弧深熔焊、常规气保焊、双丝焊、激光电弧复合焊四种焊接方法的焊接加工过程总能耗 E_H 分别为 0.0524 kgce、0.0851 kgce、0.0392 kgce、0.0573 kgce。潜弧深熔焊接加工过程总能耗比常规气保焊低 38.4%, 与激光电弧复合焊相当, 比双丝焊高 33.7%。

5.3.4 焊接碳排放核算

根据焊接碳排放 = 焊丝消耗的碳排放 $C_{\text{焊丝}}$ + 保护气体的碳排放 $C_{\text{气}}$ + 电能消耗的碳排放 $C_{\text{电}}$

钢焊丝生产排放因子约 2.5~3.0 kg CO₂/kg (含冶炼、轧制等环节), 取平均值 2.75 kg CO₂/kg。计算焊丝消耗的碳排放 $C_{\text{丝}} = 2.75 \times m_{\text{丝}}$ 。

CO₂ 直接排放因子为 1.96 kg CO₂/m³ (CO₂ 密度为 1.96 kg/m³, 假设全部释放)。氩气生产排放因子约 0.4~0.6 kg CO₂/m³ (根据生产能耗估算), 取 0.5 kg CO₂/m³。计算保护气体的碳排放

$$C_{\text{气}} = C_{\text{CO}_2} + C_{\text{Ar}} = 1.96 \times 20\% \times V_{\text{CO}_2} + 0.5 \times 80\% \times V_{\text{Ar}}$$

根据国家温室气体排放因子数据库关于全国电力平均 CO₂ 排放因子记录, 2022 年排放因子为 0.5366 kg CO₂/kWh, 计算焊接能耗的碳排放 $C_{\text{电}} = 0.5366 \times W$ 。

基于以上数据, 计算潜弧深熔焊接碳排放 0.976kg, 比常规气保焊 1.723kg 减少 43.4%, 比双丝

焊 0.907 kg 和激光电弧复合焊 0.854 kg 分别高 7.6% 和 14.3%。

5.5 小结

根据前述原理、试验验证和应用前景的分析,相比于常规气保焊,潜弧深熔焊接技术焊接热输入更低,焊接效率更高,焊接能耗和碳排放更低,适用于轨道交通装备产品中的中厚板部件焊接,如转向架构架、侧架、牵缓、枕梁、端梁、底架前端等部件。

相比于激光-电弧复合焊接技术,潜弧深熔焊接装备焊枪更加小巧,对复杂结构狭窄空间的焊接可达性更好^[21];对坡口状态的适应性更强;与常规气保焊接设备操作方法类似,更适用于操作者。因此,开发应用潜弧深熔焊接技术,对于轨道交通装备行业深入推进高效低碳制造模式具有很高的开发价值和长远意义。

6 应用案例

基于前述焊接工艺试验的结果,采用潜弧深熔焊接技术试制了某型转向架构架样件。构架主体材质为 S355J2W+N 耐候钢,板厚 10~16 mm,以 T 形接头 HY 形坡口和 V 形对接坡口为主要接头类型和焊缝形式,坡口角度从 60° 减小为 40°,钝边从 1 mm 增加为 4 mm,焊接电流 350~400 A。坡口焊缝整体实现了减 1 道焊接,焊道数量减少了 35.8%,同时减少了层间清理和检查的工时。

通过试制构架(见图 15),统计采用潜弧深熔焊接方法焊接构架工时为 900 min,比常规气保焊方法焊接工时 1 436 min 节约工时 536 min,节约工时比例为 37.33%,实现了构架产品的高效焊接制造。

采用潜弧深熔焊接方法焊接构架碳排放为 408.806 kg,比常规气保焊碳排放 450.620 kg 节约 41.814 kg,焊接碳排放节约 9.279%,实现了构架产品的低碳焊接制造。两种不同焊接方法焊接构架工时和碳排放对比如图 16、图 17 所示。

7 结论

(1) 采用潜弧深熔焊接技术焊接板厚 12 mm 的



图 15 潜弧深熔焊接试制构架及样件

Fig. 15 Prototype frame and sample fabricated by submerged arc deep penetration welding

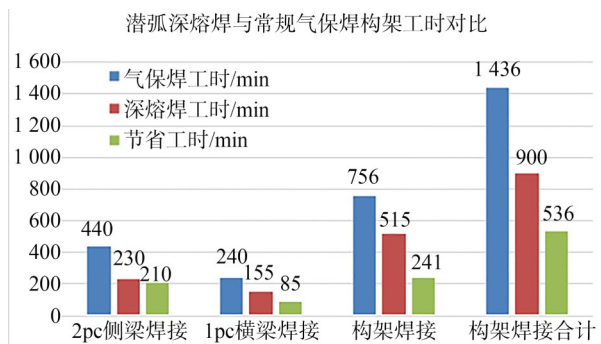


图 16 两种不同焊接方法焊接构架工时对比

Fig. 16 Comparison of man-hours for welding frames using two different welding methods

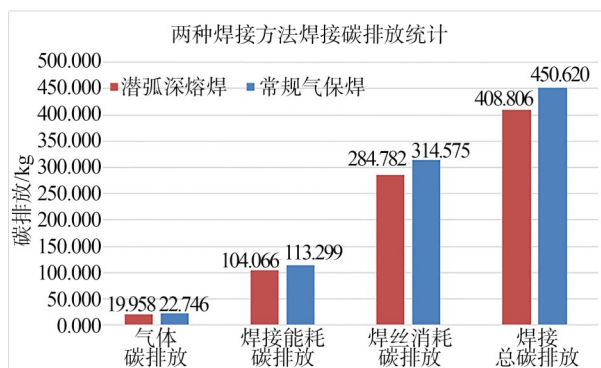


图 17 两种不同焊接方法焊接构架碳排放对比

Fig. 17 Comparison of carbon emissions for welding frames using two different welding methods

S355J2W+N耐候钢对接接头,1道焊接即可成形。相比于常规气保焊技术,焊接时长仅86 s,低于双丝焊接145.7 s,激光电弧复合焊的245.5 s和常规气保焊402.1 s,焊接时长比常规气保焊减少78.6%。

(2)潜弧深熔焊接热输入仅为2.375 kJ/mm,与激光-电弧复合焊(2.32 kJ/mm)和双丝焊2.4 kJ/mm相当,比常规气保焊3.71 kJ/mm减少36%。较低的总体焊接热输入使潜弧深熔焊接变形最大值仅为0.595 mm,低于常规气保焊的2.79 mm。潜弧深熔焊接X向残余应力最大值为320 MPa,比常规气保焊最大值490 MPa低160 MPa。Y向焊接残余应力与常规气保焊相当或低100 MPa以上。

(3)潜弧深熔焊接接头拉伸性能、弯曲性能、-40℃冲击试验、硬度试验结果和金相组织均满足相应标准要求,但应严格控制焊接热输入以减少粗大晶粒组织和魏氏组织,以提高冲击韧性安全冗余。

(4)通过试验验证,潜弧深熔焊接加工过程总能耗比常规气保焊低38.4%,与激光-电弧复合焊相当;潜弧深熔焊接碳排放0.976 kg,比常规气保焊减少81.7%,比双丝焊和激光-电弧复合焊分别高出6%和12.2%。潜弧深熔焊接技术在降低能耗和减少碳排放方面具备综合优势。

(5)通过工程应用验证,相比于常规气保焊技术,潜弧深熔焊接技术焊接构架节约工时37.33%,焊接碳排放减少9.279%,高效低碳制造优势明显,适用于焊接制造轨道交通装备产品中的中厚板部件,在轨道交通装备行业具有广阔应用前景。

参考文献:

- [1] 凡乃峰,李福永,杨国梁. CO₂潜弧焊在液压支架行业的可行性研究[J]. 金属加工(热加工), 2022(2): 23-27.
FAN N F, LI F Y, YANG G L. Feasibility Study of CO₂ Submerged Arc Welding in the Hydraulic Support Industry[J]. Metal Working (Hot Working), 2022(2): 23-27.
- [2] 韩晓辉,刘桐,李刚卿,等. 轨道客车连接技术难题及发展趋势[J]. 电焊机, 2024, 54(09): 1-13.
HAN X H, LIU T, LI G Q, et al. Technical Challenges and Development Trends of Rail Passenger Car Connection Technology[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(09): 1-13.
- [3] 孙朝,许世涛,雷文,等. SUS301L不锈钢激光焊研究现状[J]. 焊接技术, 2020, 49(1): 1-7.
SUN Z, XU S T, LEI W, et al. Research Status of Laser Welding for SUS301L Stainless Steel[J]. Welding Technology, 2020, 49(1): 1-7.
- [4] 徐王晔. SMA490BW耐候钢T型接头激光-MIG复合焊工艺及组织性能研究[D]. 江苏:江苏科技大学, 2018:2-7.
XU W Y. Study on Process and Microstructure Properties of Laser-MIG Hybrid Welding for T-Joint of SMA 490BW Weathering Steel [D]. Master's Thesis of Jiangsu University of Science and Technology, 2018:2-7.
- [5] 吴向阳,陶传琦,齐维闯,等. 动车组构架激光-MAG复合热源焊接工艺参数[J]. 大连交通大学学报, 2013, 34(6): 23-26.
WU X Y, TAO C Q, QI W C, et al. Welding Process Parameters of Laser-MAG Hybrid Heat Source for EMU Bogie Frame[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2013, 34(6): 23-26.
- [6] 刘伟亮,何广忠,李凯,等. 厚壁横梁管激光-MAG电弧复合焊坡口形式及工艺窗口优化研究[J]. 电焊机, 2021, 51(10): 87-93.
LIU W L, HE G Z, LI K, et al. Study on Groove Form and Process Window Optimization for Laser-MAG Arc Hybrid Welding of Thick-Walled Beam Tubes[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(10): 87-93.
- [7] 张欣盟,杨景宏,王春生,等. 搅拌摩擦焊技术及其应用发展[J]. 焊接, 2015(1): 29-32.
ZHANG X M, YANG J H, WANG C S, et al. Friction Stir Welding Technology and Its Application Development [J]. Welding & Joining, 2015(1): 29-32.
- [8] 侯振国,钮旭晶,李充,等. 搅拌摩擦焊技术在高速列车制造中的应用[J]. 电焊机, 2018, 48(3): 32-36.
HOU Z G, NIU X J, LI C, et al. Application of Friction Stir Welding Technology in High-Speed Train Manufacturing [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(3): 32-36.
- [9] 张泽勇,林正帅,傅晔,等. 搅拌摩擦焊在轨道交通车辆的应用研究[J]. 轨道交通装备与技术, 2020(5): 9-10.
ZHANG Z Y, LIN Z S, FU Y, et al. Research on Application of Friction Stir Welding in Rail Transit Vehicles [J]. Rail Transit Equipment and Technology, 2020(5): 9-10.

- [10] 杨凯强,薛海,杜文.高速动车组轴箱激光增材制造的影响参数分析[J].兰州交通大学学报,2021,40(5):72-78.
YANG K Q, XUE H, DU W. Analysis of Influencing Parameters on Laser Additive Manufacturing of High-Speed EMU Axle Boxes[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2021, 40(5): 72-78.
- [11] 火巧英,付宁宁,云中煌,等.厚板镁合金冷金属过渡焊工艺及接头力学性能[J].焊接技术,2019,48(1):40-43.
HUO Q Y, FU N N, YUN Z H, et al. Process and Joint Mechanical Properties of Cold Metal Transfer Welding for Thick Plate Magnesium Alloy[J]. Welding Technology, 2019, 48(1): 40-43.
- [12] 雷振,徐良,徐富家,等.激光-电弧复合焊接技术国内研究现状及典型应用[J].焊接,2018(12):1-6.
LEI Z, XU L, XU F J, et al. Domestic Research Status and Typical Applications of Laser-Arc Hybrid Welding Technology [J]. Welding & Joining, 2018 (12): 1-6.
- [13] 刘明辉.高强钢激光-电弧复合焊接技术研究[D].吉林:长春理工大学,2011:1-8.
LIU M H. Research on Laser-Arc Hybrid Welding Technology for High-Strength Steel[D]. Jilin: Changchun University of Science and Technology, 2011: 1-8.
- [14] 樊丁,董韶喆,余淑荣,等.激光-电弧复合焊接的技术特点与研究进展[J].热加工工艺,2011(11):164-169.
FAN D, DONG B Z, YU S R, et al. Technical Characteristics and Research Progress of Laser-Arc Hybrid Welding [J]. Hot Working Technology, 2011 (11): 164-169.
- [15] 荣豪.耐候钢SMA490BW激光-MAG电弧复合焊接工艺研究[D].四川:西南交通大学,2014:12-13.
RONG H. Study on Laser-MAG Arc Hybrid Welding Process for Weathering Steel SMA490BW [D]. Sichuan: Southwest Jiaotong University, 2014: 12-13.
- [16] 李达,孙明辉,崔占全.工艺参数对铝镁搅拌摩擦焊焊缝成形质量的影响[J].焊接学报,2011,32(8):97-100.
LI D, SUN M H, CUI Z Q. Influence of Process Parameters on Weld Formation Quality of Aluminum Magnesium Alloy Friction Stir Welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(8): 97-100.
- [17] 田根,王文宇,常青.电弧增材制造技术研究现状及展望[J].材料导报.2021,35(23):23131-23141.
TIAN G, WANG W Y, CHANG Q. Research Status and Prospect of Arc Additive Manufacturing Technology[J]. Materials Reports, 2021, 35(23): 23131-23141.
- [18] 刘忠杰,马场勇人,惠良哲生,等.厚板单道全焊透的大电流潜弧焊接方法[J].金属加工(热加工),2017(12):14-19.
LIU Z J, Baba I, Meguro T, et al. Large-Current Submerged Arc Welding Method for Single-Pass Full Penetration of Thick Plates[J]. MW Metal Forming, 2017 (12): 14-19.
- [19] 侯英杰,樊丁,黄健康.高效GMAW潜弧焊电弧特性数值分析[J].电焊机,2022,52(3):11-19.
HOU Y J, FAN D, HUANG J K. Numerical Analysis of Arc Characteristics of High-Efficiency GMAW Submerged Arc Welding [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(3): 11-19.
- [20] GB/T 43656—2024焊接加工能耗检测方法[S].北京:中国标准出版社,2024.
- [21] 胡文浩,毕越宽,段泽斌,等.一种转向架构架的焊接方法、转向架构架及轨道车辆:CN202311302092.4[P].2023.