

Q235钢CMT对接焊接工艺研究

张翔^{1, 2}, 李冰洁^{1, 3}, 韩善果^{2, 3}, 王瑞超¹

1. 五邑大学 广东江门 529000

2. 阳江市中乌巴顿技术研究院 广东阳江 529500

3. 广东省科学院中乌焊接研究所 广东广州 510000

摘要: 采用冷金属过渡 (CMT) 焊接技术对Q235钢实现对接焊接, 并对其力学性能进行检测, 进一步分析了焊接接头的组织与性能的关系。首先, 通过焊接参数优化, 筛选出部分成形质量优良的焊接接头。其次, 通过金相检测对焊接试样显微组织进行分析, 经对比发现, 45° 坡口工艺参数下成形良好; 观察其组织发现, 焊缝区域、完全重结晶区、部分重结晶区和母材区在显微组织上有显著差异; 对应性能在强度和硬度方面也有明显不同: 对接接头试样的抗拉强度在不同坡口角度下表现出差异, 30° 和45° 坡口的抗拉强度显著高于60° 坡口, 这与坡口角度导致的热输入差异有关。研究结果为Q235钢的CMT焊接工艺提供了理论支持, 促进了CMT焊接在工业上的应用。

关键词: CMT; Q235钢; 显微组织; 力学性能; 焊接工艺

Research on CMT butt welding process of Q235 steel

ZHANG Xiang^{1, 2}, LI Bingjie^{1, 3}, HAN Shanguo^{2, 3}, WANG Ruichao¹

1. Wuyi University, Jiangmen 529000, Guangdong, China

2. Yangjiang Zhongwu Barton Technology Research Institute, Yangjiang 529500, Guangdong, China

3. Sino-Ukrainian Welding Research Institute, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510000, Guangdong, China

Abstract: Use cold metal transfer (CMT) welding technology to realize butt welding of Q235 steel, and detects its mechanical properties, further analyzing the relationship between the structure and performance of the welded joint. First, through welding parameter optimization, some welded joints with excellent forming quality were screened out. Secondly, the microstructure of the welded sample was analyzed using metallographic means. After comparison, it was found that the 45° groove formed well under the process parameters; observing the structure, it was found that the weld area, complete recrystallization area, partial recrystallization area and base metal area Significant differences in microstructure; The corresponding properties are also significantly different in terms of strength and hardness: the tensile strength of butt joint specimens shows differences at different bevel angles, and the tensile strength of 30° and 45° bevels is significantly higher than that of 60° bevels, which is consistent with It is related to the difference in heat input caused by the groove angle. The results of this study provide theoretical support for the CMT welding process of Q235 steel and promote the application of CMT welding in industry.

Keywords: CMT; Q235 steel; microstructure; mechanical properties; welding process

基金项目: 阳江市科技项目 (SDZX2022007、SDZX2022009、RCZX2022024、SDZX2022002)。

通信作者: 韩善果, 高级工程师, 主要研究方向为激光加工装备与工艺、电弧焊接与增材, E-mail: shanguohan@163.com。

1 序言

随着制造业对焊接技术精度和效率要求的不断提高,传统的自动焊接技术已经难以满足现代工业高效、安全和低成本的发展目标^[1]。尤其是在焊接过程中的热输入控制和焊接质量保证方面,传统方法已达到其技术极限^[2]。在这样的背景下,冷金属过渡(CMT)技术以其独特的熔滴过渡机制和低热输入特性^[3],提供了一种新的解决方案。CMT技术通过精细控制送丝过程与熔滴过渡,实现了高质量的焊接效果,极大地降低了焊接飞溅^[4],优化了焊缝成形,已在汽车、航天及军工等领域得到广泛应用。

CMT技术的核心是实现冷金属传递,即在熔化金属的每一滴通过电弧传输到工件上时,电源会自动减小电流,从而使金属以较低温度进行传递^[5]。这种冷金属传递的特性有助于控制焊接过程中的热输入,减少热变形和焊接残余应力^[6]。其作用是在焊接过程中帮助控制焊丝的传递和稳定性,同时还可以帮助调节电弧的形态和能量分布,提高焊接接头的质量^[7]。CMT技术适用于多种材料的焊接,包括铝合金、镁合金、不锈钢等,尤其适用于对热输入和变形要求较高的焊接场景。它在全位置焊接、薄板焊接、角焊接等方面表现出色^[8]。总的来说,CMT技术通过冷金属传递、脉冲控制和智能反馈控制系统等多种手段,实现了对焊接过程的精细控制,从而提高了焊接质量、减少了变形和残余应力,是一种高效、稳定的焊接技术^[9]。

CMT全位置焊是一种先进的焊接技术,具有高效、低能耗、低气体排放等优点^[10],在全位置焊接领域具有广泛的应用前景^[11]。CMT技术是一种独特的短路MIG焊接过程,通过控制电弧的特殊运动方式,实现了对焊接熔池的精准控制和稳定传递金属的能力^[12]。与此同时,CMT全位置焊接技术结合自动化设备和智能化控制系统^[13],实现了焊接过程的自动化操作和实时监控。机器人焊接系统结合CMT技术,可以实现复杂焊接路径的高质量焊接,提高了生产效率和产品质量。CMT全位置焊接技术由于其低热输入和低飞溅特点,降低了焊接过程中的能源消耗和废物排放,符合现代制造业的环保要求,也符合可持续发展的趋势^[14, 15]。其应用越来越广泛,特别是在薄板焊接和高精度焊接领域^[16]

本研究目的是在探索CMT技术在Q235钢板对接焊接中的应用。本文专注于同种金属间的焊接性能研究,并试图通过CMT技术克服在Q235钢多位置焊接过程中遇到的关键技术难题。通过对4mm厚Q235钢板进行对接焊接试验,系统地分析了CMT焊接工艺对焊缝微观组织和力学性能的影响,旨在深入理解CMT工艺在提升Q235钢焊接性能方面的作用机理,为其在工业应用中的进一步优化和推广提供科学依据。

2 试验方法

试验选用尺寸为150mm×100mm×4mm的Q235钢板与 ϕ 1.2mm的金桥JQ·MG50-6碳素钢气体保护实心焊丝。在试验前,使用角磨机清除Q235钢板表面氧化层。保护气体采用98%Ar+2%CO₂,流量为15L/min。试验采用的CMT焊接系统如图1所示。该系统由Fronius CMT焊接电源TPS 5000、送丝机构VR 7000 CMT、KUKA六轴机器人KR20 R1810、KUKA控制柜KR C4、CMT焊枪及工作台组成。在试验时,导电嘴到基板的距离为10mm,选择Fronius焊接电源的一元化模式,在该模式下焊接电流、电弧电压与送丝速度自动匹配。



图1 CMT焊接系统

基于不同的焊接参数(送丝速度、焊接速度)进行单道多层对接成形试验,打底和盖面均采用相同的焊接参数。以表面气孔、裂纹和表面平整度为评价指标,对单道多层试样进行评价,进而筛选出5组成形质量优良的焊接参数(见表1)。

分别从试样的稳定区域截取一组金相试样。金相试样表面经抛光至镜面,并使用王水(HCL:HNO₃=3:1)浸蚀,浸蚀时间为5s。采用

表1 不同坡口形式全位置试验焊接参数

工艺类型	焊接电流/A	电弧电压/V	送丝速度/ (m/min)	焊接速度/ (mm/s)
30° 坡口立焊	180	15.8	4.6	6.66
45° 坡口平焊	180	15.8	4.2	6.66
45° 坡口横焊	181	16.2	4.6	6.66
45° 坡口立焊	183	16.6	6.3	6.66
60° 坡口立焊	181	15.8	4.8	6.66

Leica DM2700M光学显微镜拍摄并分析金相试样的显微组织。使用线切割方法，从试块上分别截取出不同方向的金相和硬度试样。采用Wilson VH1202显微维氏硬度计检测试样扫描及堆积方向的硬度。在室温环境下，采用GP-TS 2000M/300kN万能拉伸机进行拉伸试验。

3 试验结果与讨论

3.1 焊接电流对焊缝成形的影响

为了研究不同电流值对焊缝形态的影响，焊接速度固定为2.0m/min，焊接电流从80A开始，逐渐增加到260A。不同焊接电流的焊缝表面形貌如图2所示。由图2可知，当焊接电流设定为80A时，发现焊缝表面周期性地出现焊瘤，这表明电流过低时焊缝的均匀性受到影响。原因是在较低焊接电流条件下，送丝速度相对较慢，焊接电流熔化的焊丝量难以形成连续的、稳定的过渡，从而导致周期性焊瘤在焊缝上出现；随着焊接电流的增加，焊瘤逐渐减少直至消失，当焊接电流为160~220A时，焊缝成形相对均匀一致，没有明显的缺陷，特别是焊接电流为180A时，成形质量最好。然而，随着焊接电流继续增加，发现焊缝根部出现了形状像蜈蚣脚一样的过烧及周期性焊瘤，且焊接电流越大，这种现象



图2 不同焊接电流的焊缝表面形貌

变得越严重。

3.2 焊接坡口角度、位置对焊缝成形的影响

图3所示为不同坡口角度下，Q235钢板立焊缝表面形貌。这些焊缝分别代表不同焊接位置下的结果。对于30°坡口的试样，正面焊缝成形均匀，背面焊缝熔透，但熔透量较少，甚至部分试样尾部出现未熔合。对于60°坡口的试样，虽然背面焊缝熔透充分，但坡口的增大需要填充更多的金属，因此在单道多层焊工艺下，无法得到正面填充。为了更好地进行对比分析，60°坡口试样采用多层多道焊获得了良好接头。

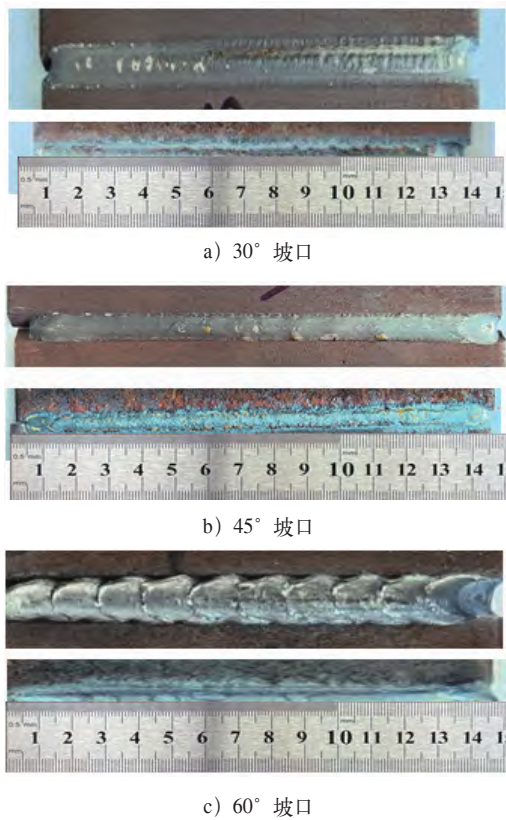


图3 不同坡口立焊缝表面形貌（上侧为正面、下侧为背面）
对于45°坡口的平焊（见图4a）、立焊（见图4b）、横焊（见图4c）试样，焊接电流维持在180A

左右,结果显示焊缝正面饱满,背面熔透充分,180A的焊接电流能够得到更为均匀且无缺陷的焊缝。对比3种位置焊缝成形,发现背面熔透,平焊位置最优,立焊次之,横焊最差。这主要是由于焊缝熔池受到电弧力、重力、表面张力等多种力的共同作用,平焊阶段电弧力和重力共同向下作用,焊缝熔透充分;立焊时虽然电弧力和重力处于垂直位置,但熔池熔液量大,易于穿透;横焊时电弧力和重力也处于垂直位置,但熔液中心偏离焊缝中心,熔透液体量减少。

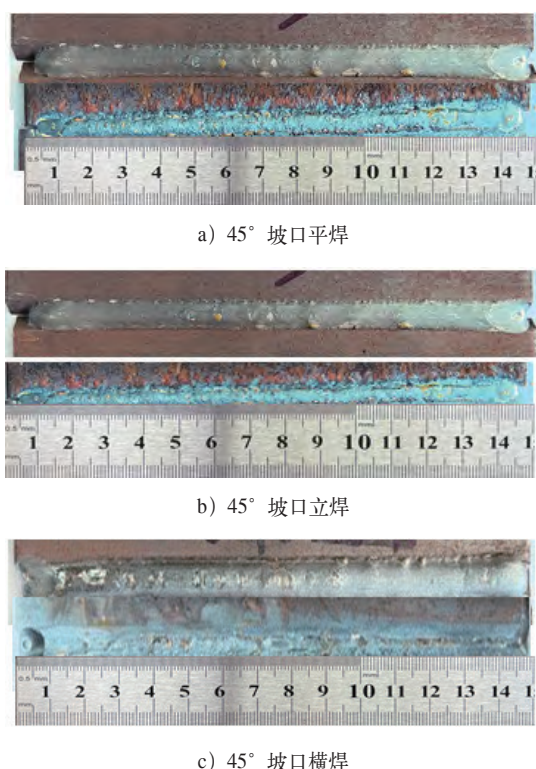


图4 45° 坡口形式焊缝形貌(上侧为正面、下侧为背面)

3.3 显微组织分析

45° 坡口立焊试样显微组织形貌如图5所示。由图5a可知,焊接接头大致分别为焊缝区、完全重结晶区、部分重结晶区和母材区4个区域。母材区的部分组织主要由铁素体和珠光体构成。在母材区的金相组织中(见图5b),铁素体明显多于珠光体,珠光体呈弥散状分布在铁素体之间,轧制方向明显,表明了原始材料加工过程的特征。热影响区部分铁素体和珠光体发生转变,形成奥氏体。在冷却时形成晶粒更加细小的铁素体和珠光体。而另一部分则未能转变为奥氏体,保持原有粗大的铁素体和珠光体晶粒,形成部分重结晶区(见图5c),热影

响区全部晶粒转化成奥氏体,并在冷却时成为均匀而细小的铁素体和珠光体,形成完全重结晶区(见图5d)。底部焊缝冷却速度快,晶粒细小(见图5e);顶部焊缝盖面因为有前面的加热,所以晶粒生长充分,晶粒大(见图5f)。

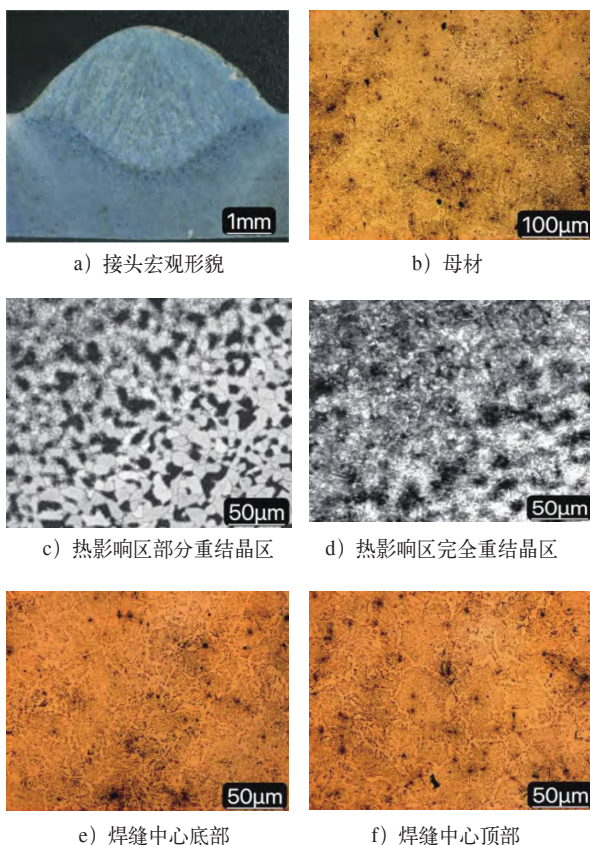


图5 45° 立焊焊接参数成形试样的金相组织

45° 坡口平焊的热影响区表现出明显的局部结构变化,其中重结晶区呈现出更细小的珠光体,而部分重结晶区则由粗大的珠光体和铁素体组成,其分布与焊接过程中的温度梯度和冷却速度有紧密的关系。焊缝区则因为较高的温度和相对较快的冷却速度,通常会表现出较硬的马氏体。与45° 坡口的其他位置相比,横焊和立焊的热影响区在显微结构上表现出珠光体和铁素体的不同混合程度,这些差异反映了运动位置的热量分布和部分组织形成的影响。

30° 坡口立焊热影响区(见图6a)的组织差异反映焊接过程中热量传输速度对材料局部结构的影响,尤其是在焊缝附近(见图6b),由于热量传递和冷却的差异导致了显微组织的重新排列。30° 坡口的焊接接头通常在热影响区表现出了更多的珠光

体和铁素体，而60°坡口立焊由于更大的温度梯度和不同的冷却条件，热影响区（见图6c）出现了更复杂的珠光体形态。

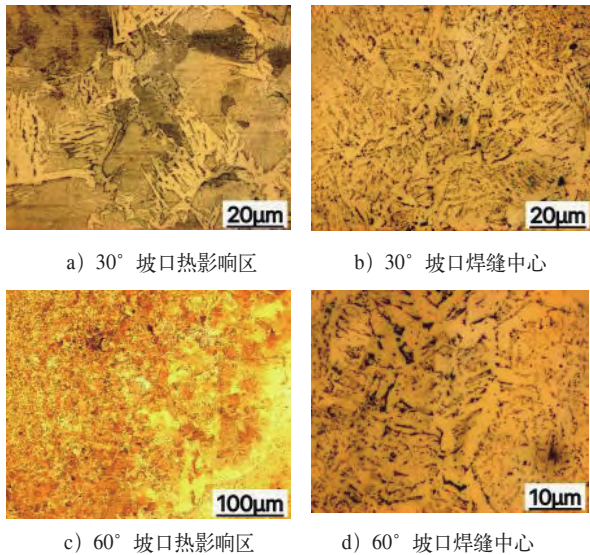


图6 30°、60°坡口立焊成形试样的金相组织

3.4 力学性能

不同坡口角度立焊试样显微硬度如图7所示。图7揭示了焊接接头截面水平和垂直方向的硬度分布特性，不同坡口接头硬度均表现出相似变化规律。从图7a可看出，焊缝区域显示出的平均硬度值是最高的，其中某些点的硬度值可达到205HV，这表明焊缝区因快速冷却而产生的微观组织变化导致硬度增加。焊缝越靠近母材处的硬度越小，而热影响区硬度为140~150HV。热影响区的硬度值主要受母材的脆硬倾向和热影响区的冷却速度影响，其中母材的脆硬倾向受化学成分影响较大，而热影响区的冷却速度主要是由焊接参数来决定的。不同坡口间的整体硬度走势大致相同，30°坡口距离焊缝中心较远处更先达到最高硬度值，45°和60°坡口依次逼近焊缝中心时达到最高硬度值。由图7b可看出，对焊缝区域整体硬度值都处于170~205HV之间，焊缝的硬度值变化小，但顶部和底部附近焊缝硬度变化大。这些硬度的变化趋势与焊接热输入和冷却速率密切相关，导致表面和焊缝中心组织大小和类型存在差别。

不同坡口角度立焊试样拉伸曲线如图8所示。由图8可知，拉伸后的试样几乎都断裂在母材处，即表明焊缝的力学性能优于母材。根据图8所示的拉伸曲线，可以具体分析立焊的不同坡口角度试样的

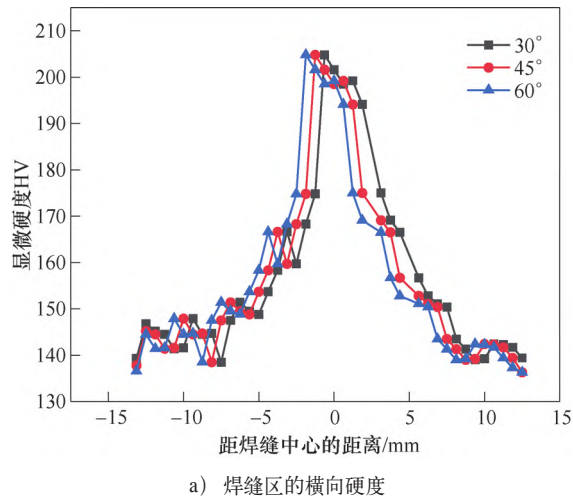
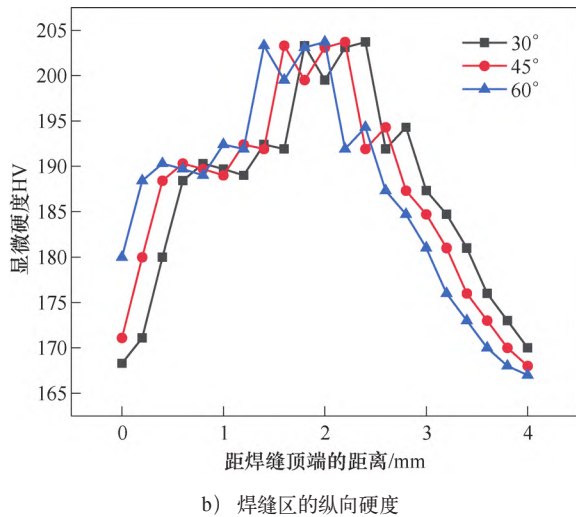


图7 不同坡口角度立焊试样显微硬度

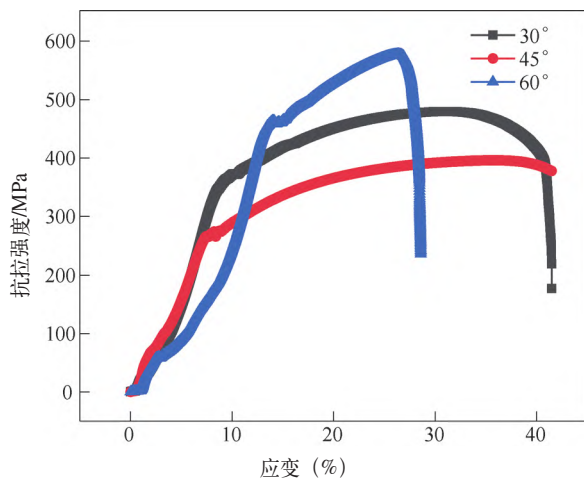


图8 不同坡口角度立焊试样拉伸曲线

力学性能参数。30°坡口试样的抗拉强度峰值约为577.44MPa，45°坡口试样的抗拉强度峰值更高，约为579.89MPa，而60°坡口试样的峰值则相对最

低, 约为507.2MPa。这主要是因为多层多道焊热输入大, 焊缝晶粒粗大, 导致接头拉伸性能降低。

4 结束语

本文对Q235钢的CMT对接焊工艺进行了研究, 结果表明, CMT对接焊工艺在Q235钢上表现出良好的焊接性能。

1) 经对比发现, 不同角度坡口中45°焊接试件在焊接电流为180A时外观质量高, 焊缝连续, 无明显缺陷。

2) 45°坡口平焊的热影响区晶胞明显变大, 由于热量传递和冷却的差异导致重结晶, 因此使得显微组织重新排列。

3) 硬度检测表明, 焊接接头硬度分布均匀, 无明显软化或硬化现象。焊缝区域显示出的平均硬度值是最高的, 其中某些点的硬度值可达205HV, 焊缝越靠近母材处的硬度越小。另外, 拉伸试验证实, 焊接接头的抗拉强度与母材相当, 断裂位置均位于母材处; 不同坡口角度之间对比表明, 45°坡口试样的抗拉强度峰值更高, 约为579.89MPa。

参考文献:

- [1] 周星宇, 刘红伟, 田甜. 冷金属过渡 (CMT) 技术综述[J]. 材料导报, 2024, 38 (S1) : 430-438.
- [2] 付毅帅, 樊磊, 常云峰, 等. 冷金属过渡技术在异质连接及增材制造中的应用[J]. 金属加工 (热加工), 2025 (1) : 81-90.
- [3] 祁星博, 李怡佳, 邓淞任. 冷金属过渡焊接技术的研究与应用[J]. 中国金属通报, 2022 (11) : 88-90.
- [4] 秦国梁. 窄间隙气体保护焊接工艺发展与应用[J]. 金属加工 (热加工), 2022 (9) : 8-20.
- [5] 刘小龙, 胡元峰, 隗会军. 中厚板气体保护焊不清根熔透焊技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023 (1) : 268-270.
- [6] SINDO K. 焊接冶金学[M]. 2版. 闫久春, 杨建国, 张广军, 译. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [7] 张良华. 薄板铝合金焊接中CMT焊接技术的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2016, 12 (3) : 28-36.
- [8] 胡玉. CMT焊接S32101双相不锈钢焊缝成形研究[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (3) : 76-82.
- [9] 冯飞, 傅彦青, 常海林, 等. 不锈钢复合板制备及其焊接技术研究进展[J]. 工业建筑, 2024, 54 (12) : 71-89.

- [10] 林筱鹏, 罗金山, 顾小燕, 等. 基于冷金属过渡的电弧熔丝增材Inconel 625合金的组织与性能研究[J]. 材料保护, 2022, 55 (10) : 17-23.
- [11] 安飞鹏, 李嘉琪, 蒋鹏, 等. CMT焊接技术在钛合金领域的研究现状[J]. 材料开发与应用, 2019, 34 (4) : 78-83, 90.
- [12] 娄宇, 郁银泉, 张艳霞, 等. 钢结构设计的现状与展望[J]. 钢结构 (中英文), 2024, 39 (10) : 46-57.
- [13] 陈晨, 张安, 邢彦锋, 等. 冷金属过渡电弧增材制造强制限位冷却工艺研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14 (8) : 104-110.
- [14] 李宏猷, 成小乐, 邢宇, 等. 面向锅炉水冷壁管的冷金属过渡熔覆工艺路径优化研究[J]. 热力发电, 2024, 53 (12) : 120-128.
- [15] 王天琪, 靖雯, 何俊杰. 镁合金CMT电弧增材制造成形过程的数值模拟[J/OL]. 天津工业大学学报, 1-9[2024-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1341.TS.20241204.1414.016.html>.
- [16] 孟广有. 焊接技术与工程专业人才培养模式探索[J]. 科学咨询 (科技·管理), 2022 (1) : 24.

MW 20241109