

DOI:10.11784/tdxbz202402011

2Cr13 马氏体不锈钢扫描激光-电弧复合焊接接头 元素分布及组织性能研究

郝康达^{1,2}, 刘友情^{1,2}, 徐连勇^{1,2}, 韩永典^{1,2}, 赵雷^{1,2}

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

摘要: 2Cr13 马氏体不锈钢力学性能优异、耐腐蚀性适中且价格低廉, 具有较好的利润空间, 一直以来是钢铁企业尝试发展的焦点。先前研究表明激光-电弧复合工艺有望通过焊丝材料的合理选择, 借助合金化的作用实现 2Cr13 不锈钢的高质高效焊接, 但存在合金元素分布不均的问题。为此, 本文在 2Cr13 马氏体不锈钢激光-电弧复合焊接中引入激光束扫描, 依靠其对熔池的强烈搅拌效应调控合金元素分布, 改善熔池冶金行为, 细化晶粒, 从而增强焊缝韧性。本文着重探讨了激光束扫描频率对焊缝中合金元素分布特征、焊缝组织和力学性能的影响规律。结果表明, 扫描激光束对熔池的高频搅拌效应加强了熔池对流, 驱动 Ni 元素由电弧作用区域向激光作用区域转移, 焊缝中 Ni 元素分布不均匀程度减弱。在扫描半径 0.4 mm 情况下优化的扫描频率为 20 Hz, 此时焊缝中激光作用区域 Ni 元素含量由不引入激光束扫描时的 1.52% 提高至 2.03%, 对应的奥氏体相含量由 4.7% 增加至 10.1%。同时, 激光束扫描行为降低了熔池温度梯度, 有利于改善焊缝成形, 热影响区粗晶区平均晶粒尺寸由 4.92 μm 降为 3.95 μm , 焊缝杯突测试中断裂位置由熔合线转向母材, 且杯突值由 4.82 mm 提升至 5.89 mm, 提升幅度达 22%。相关研究将对以后马氏体不锈钢焊接研究提供一定的理论指导, 对扩大马氏体不锈钢的应用领域具有重要的推动作用。

关键词: 激光-电弧复合焊接; 扫描激光; 元素分布; 马氏体不锈钢; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG457.11

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)02-0157-10

Elemental Distribution, Microstructure, and Mechanical Properties of 2Cr13 Martensitic Stainless Steel Processed via Hybrid Oscillating Laser-Arc Welding

Hao Kangda^{1,2}, Liu Youqing^{1,2}, Xu Lianyong^{1,2}, Han Yongdian^{1,2}, Zhao Lei^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China)

Abstract: The development of 2Cr13 martensitic stainless steel has long been sought in the steel industry because of the excellent mechanical properties, moderate corrosion resistance, and affordable price of the steel, which provide high profit margins. Studies have shown that hybrid laser-arc welding holds promise for realizing high-quality and efficient welding of 2Cr13 stainless steel by rationally selecting welding wire materials and leveraging alloying effects. However, there is an issue of the uneven distribution of alloying elements in hybrid laser-arc welding. To solve this issue, an oscillating laser beam was used during the hybrid laser-arc welding of 2Cr13 martensitic stainless steel. The oscillating laser beam can regulate the distribution of alloying elements through its intense stirring effect, which improves the metallurgical behavior and refines grains, enhancing the toughness of the weld. Further, the influence of the oscillating frequency of laser beam on the distribution characteristics of alloying elements in the weld, as well as the weld microstructure and mechanical properties, were investigated. Results show that the high-frequency stirring

收稿日期: 2024-02-20; 修回日期: 2024-04-10.

作者简介: 郝康达 (1987—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 郝康达, haokangda@tju.edu.cn.

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目 (21JCQNJC00520).

Supported by the Natural Science Foundation of Tianjin, China (No. 21JCQNJC00520).

effect of the oscillating laser beam on the molten pool enhanced convection in the molten flow, promoted the transfer of Ni from the arc zone to the laser zone, and reduced the nonuniform distribution of Ni in the weld. The optimized oscillating frequency was 20 Hz at an oscillating radius of 0.4 mm. For this frequency, the Ni content in the laser zone was increased from 1.52% when not using an oscillating laser beam to 2.03% when using an oscillating laser beam; the corresponding fraction of the austenitic phase was increased from 4.7% to 10.1%. In addition, the temperature gradient of the molten pool was reduced by the oscillating laser beam, which improved weld formation. The average size of the coarse grain area in the heat-affected zone was reduced from 4.92 μm to 3.95 μm , the fracture location was shifted from the fusion line to the base metal during a cupping test, and the cupping value was increased from 4.82 mm to 5.89 mm, showing an increase of 22%. These results will help deepen our understanding of the hybrid laser-arc welding of martensitic stainless steel and broaden its application range.

Keywords: hybrid laser-arc welding; oscillating laser; elemental distribution; martensitic stainless steel; microstructure; mechanical property

2Cr13 马氏体不锈钢力学性能优异、耐腐蚀性好且价格低廉,被广泛应用于汽车、化工和重工机械等工业领域。

马氏体不锈钢作为一种空气淬硬钢,焊接性能较差。常用的焊接方法有电弧焊接、激光焊接及激光-电弧复合焊接等。其中电弧焊接热输入过大,热影响区易形成粗大马氏体组织;激光焊接热输入小,但在不采用焊丝对焊缝成分进行调整的情况下,焊缝熔合区多为脆硬马氏体,难以满足工程使用需求^[1]。

激光-电弧复合焊接结合激光焊接能量密度高、热输入小以及电弧焊接冶金调节能力强的优点,从而可以获得更好的焊缝质量^[2]。滕彬等^[3]针对 3 mm 厚度的高强钢开展 MAG 和激光-MAG 复合焊接,发现激光-电弧复合焊缝的焊接热影响区仅为 MAG 焊缝的 1/4 左右,另外焊接效率大幅提升。然而,电弧热源穿透性差,焊丝中的合金元素很难达到焊缝底部,造成焊缝上部与下部元素偏析严重导致组织分布不均。Hao 等^[4]对马氏体不锈钢开展激光-电弧复合焊接,发现焊接接头成分组织分布不均,激光区 Ni 含量远低于电弧区,是熔合区内韧性最差的区域。

基于高频振镜的扫描激光-电弧复合焊接为解决上述问题提供了新机遇。通过激光束扫描行为搅拌扩大焊接熔池,有效促进熔池流动从而改善合金元素分布和焊缝成形。扫描激光束对熔池的搅拌效应还能抑制柱状晶的生长,起到细化晶粒的效果。另外,激光束扫描行为可以改变激光能量分布形式,显著降低熔池的温度梯度,改善结晶过程^[5]。Wang 等^[6]选用圆形扫描方式进行铝合金的扫描激光-电弧复合焊接,发现焊缝截面 Si 元素宏观偏析相比无扫描焊缝降低了 300%,焊缝合金元素趋于均匀化。Meng 等^[7]对激光扫描焊接异种材料的研究表明,通过光束扫描驱动的熔池搅拌效应,焊缝 Fe 元素整体均匀性相对

无扫描复合焊缝提高了约 25 倍。Cai 等^[8]发现在激光-MAG 复合焊接中引入激光扫描能够优化高强钢焊缝中柱状晶的生长方向,并提高焊缝冲击韧性。刘捷等^[9]发现高频激光扫描可以细化晶粒,有效提升焊缝的抗拉强度和断后伸长率。

上述研究表明,扫描激光-电弧复合焊接技术在提高马氏体不锈钢焊接性方面有很大的应用潜力,然而相关研究较少。因此,本研究针对 2Cr13 马氏体不锈钢进行扫描激光-电弧复合焊接,研究不同扫描参数对焊缝中合金元素分布、焊接接头组织及力学性能的影响,研究结果有助于实现 2Cr13 马氏体不锈钢高质量焊接,拓展其应用范围。

1 试验方法

母材选用厚度 4 mm、长 200 mm、宽 100 mm 的退火态 2Cr13 马氏体不锈钢板材,焊丝选用直径 1.0 mm 的 ER 310s 奥氏体焊丝,化学成分见表 1。焊接前,板材经铣削加工为 I 型坡口,通过机械打磨和无水乙醇擦洗去除材料表面的氧化膜和油污。

如图 1 所示,试验平台由 IPG YLS-10000 型光纤激光器、KUKA KR60HA 六轴工业机器人、Fronius Advanced 4000 CMT 焊机和 Scanlab 扫描振镜组成。焊接模式采用电弧在前、激光在后的电弧引导模式。在激光-电弧复合焊接过程中,激光束垂直于工件表面,离焦量为 0,电弧焊枪与板面的角度为 60°。焊丝干伸长(焊丝从导电嘴末端到板面的距离)为 12 mm,光丝间距(板面上光斑中心与焊丝中心之间的距离)为 3 mm。焊接保护气采用 97.5% Ar + 2.5% CO₂,气体流量 20 L/min。激光-电弧复合焊接参数为激光功率 3 800 W,电弧电流 100 A,焊接速度 1.8 m/min。激光扫描模式为圆形扫描,扫描参数如表 2 所示。

表 1 母材和焊丝化学成分

Tab.1 Chemical compositions of the base metal and filler metal

材料	w_C	w_{Si}	w_{Mn}	w_P	w_S	w_{Cr}	w_{Ni}	w_{Mo}	w_{Cu}	w_{Fe}
2Cr13	0.19	0.40	0.57	0.025	0.005	13.73	0.10	—	—	余量
ER 310s	0.09	0.38	1.65	0.021	0.003	25.81	19.34	0.02	0.08	余量

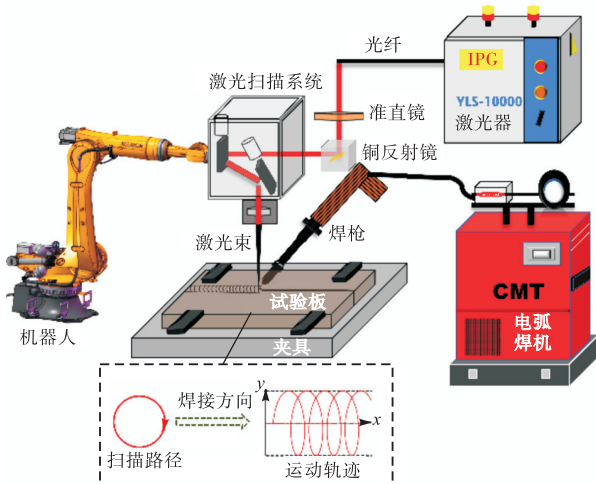


图 1 试验平台示意

Fig.1 Schematic diagram of the testing platform

表 2 扫描激光-电弧焊接扫描参数

Tab.2 Oscillating parameters of oscillating laser-arc welding

试样编号	扫描振幅 r/mm	扫描频率 f/Hz
1	0	0
2	0.4	10
3	0.4	20
4	0.4	40
5	0.4	60

焊接完成后,在焊缝中部制备金相、电子背散射衍射(EBSD)和杯突试样.首先对金相样品进行研磨和机械抛光,后采用 10% 草酸溶液进行电解腐蚀,电解电压为 25 V,电解时间为 45 s.使用光学显微镜观察其宏观形貌,借助蔡司 Sigma 300 扫描电子显微镜(SEM)和配备在 SEM 上的 BRUKER e-FlashFS 检测器对样品进行微观组织观察和 EBSD 分析. EBSD 试样采用 10% 高氯酸酒精溶液进行电解抛光,电解电压为 25 V,电解时间为 5 min.

如图 2 所示,在焊缝横截面电弧区选取 8 个微区($600 \mu m \times 400 \mu m$),过渡区及激光区分别选取 6 个微区($400 \mu m \times 400 \mu m$),利用蔡司热场扫描电镜配备的能谱仪(EDS)表征 Ni 元素在焊缝横截面的分布情况.电弧区 8 个微区以及过渡区和激光区 6 个微区内的平均 Ni 含量分别记作 I_A 、 I_B 和 I_C , I_A/I_B 和 I_A/I_C 值来定性表征合金元素分布的均匀程度,其值越

接近 1,表明焊缝合金元素分布越均匀^[10].

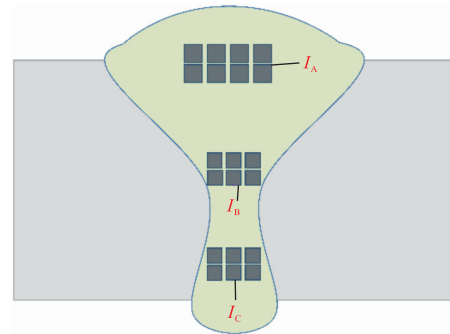


图 2 Ni 含量分析微区取样示意

Fig.2 Schematic diagram of microzones used for Ni content analyses

根据 ISO 20482—2003 标准,采用 BTJ-S300 杯突试验机测试焊缝杯突性能,杯突试验的测试结果均为 3 次测试的平均值,其断口形貌采用扫描电镜进行观测.

2 试验结果

2.1 焊接接头宏观形貌

图 3 为不同扫描频率下的焊缝横截面.焊缝截面的形状能够反映材料内部的激光能量分布状况.从图中可以看出,焊缝横截面呈现典型“酒杯状”形貌,包括上层宽而浅的电弧区及下层窄而深的激光区.在激光-电弧复合焊接过程中,电弧能量密度低、穿透性弱,主要作用在熔池上层浅部区域,而熔池下方主要受激光热源影响.定义过渡角 θ 为电弧区和激光区边界处夹角,电弧区与激光区交界处宽度为激光区宽度 L ,如图 3(a)所示.无扫描复合焊缝顶部宽度为 2.67 mm,而根部宽度减小为 0.71 mm,过渡角约为 139° .随着扫描激光的引入,熔池面积和焊缝宽度逐渐增大,焊缝成形更加饱满,且随着扫描频率的增加,电弧区与激光区形貌差异减小,即激光热源作用范围扩大,能量密度降低.同时,过渡角 θ 逐渐增大,从无扫描时 139.1° 增加到扫描频率 60 Hz 时的 172.3° ,如图 4(a)所示,有利于减小电弧区和激光区之间的差异.从图 4(b)中可看出,扫描频率 60 Hz 时激光区宽度达到 0.93 mm,相比于无扫描焊缝增幅接

近 31%.

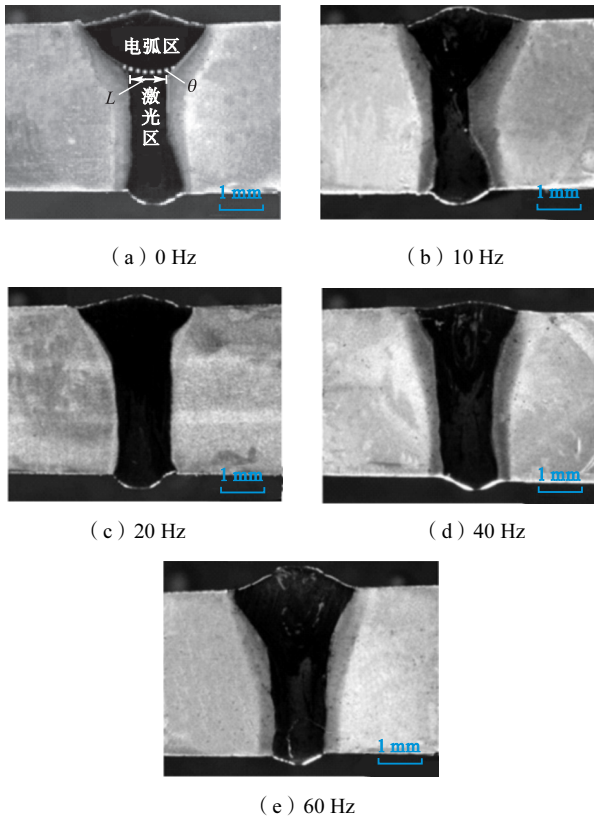
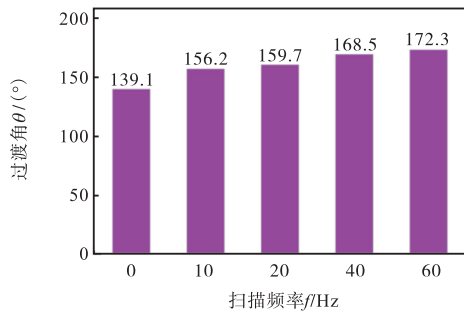
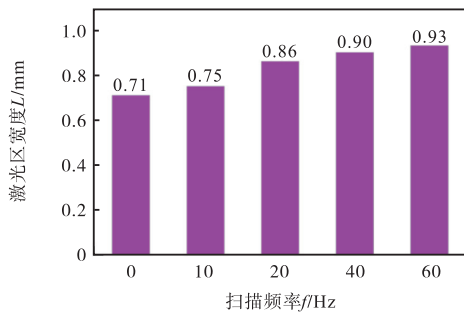


图 3 不同扫描频率下复合焊缝形貌

Fig.3 Morphologies of composite weld under different oscillating frequencies



(a) θ 与 f 关系



(b) L 与 f 关系

图 4 不同扫描频率焊缝特征

Fig.4 Weld formation characteristics under different oscillating frequencies

2.2 不同扫描频率下的元素分布

为了分析合金元素在焊缝区域的偏聚程度,利用蔡司热场扫描电镜配备的能谱仪表征 Ni 元素在激光-电弧复合焊缝横截面的分布情况.分别采用面扫描和微区扫描两种测试方式,不同扫描频率焊缝横截面面扫结果如图 5 所示.

从图中可以看出,无激光扫描时,焊缝电弧区亮度明显高于激光区,这表明电弧区聚集的 Ni 元素含量更高,焊缝存在元素宏观偏析.随着扫描频率的增大,激光区 Ni 元素强度增加.图 6 为扫描频率对焊缝 Ni 元素分布的影响,可以看出随着激光束扫描频率的增加, I_A/I_B 的比值趋近于 1, I_A/I_C 的比值也显著

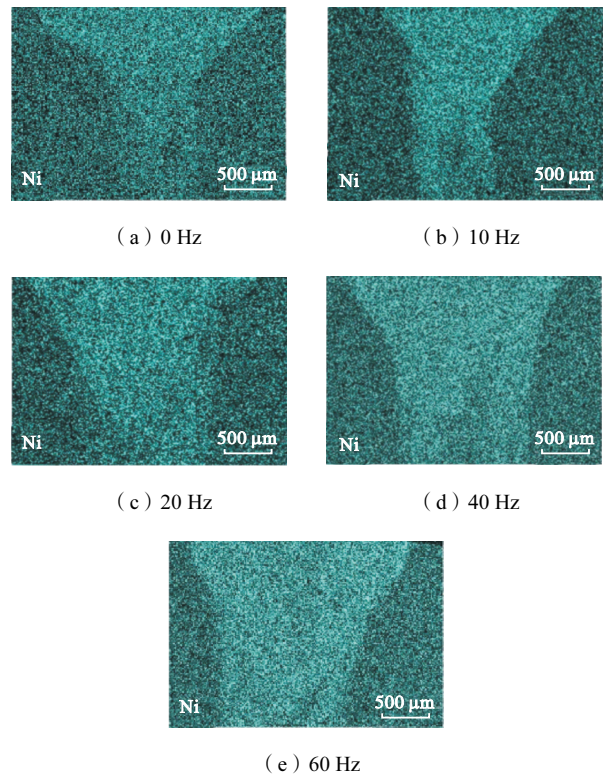


图 5 不同扫描频率下焊缝 EDS 面扫

Fig.5 EDS map oscillating results of weld under different oscillating frequencies

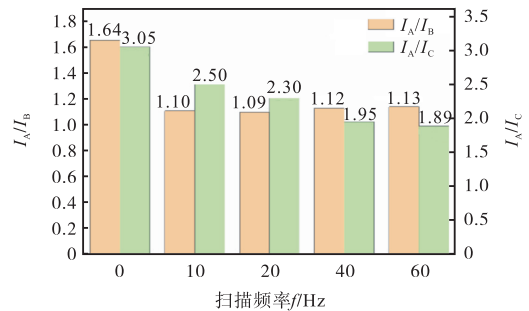


图 6 扫描频率对元素分布的影响

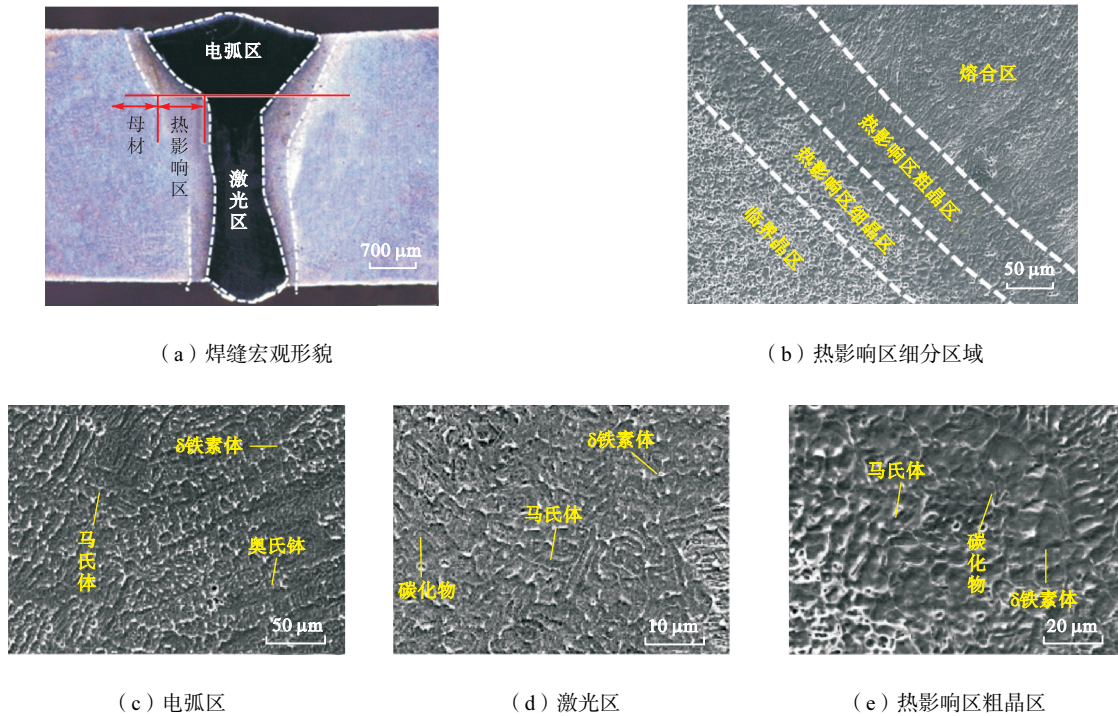
Fig.6 Effect of oscillating frequency on elemental distribution

减小,表明复合焊缝 Ni 元素的分布均匀性有所改善,这归因于扫描频率增大时,激光扫描搅拌效果增强,驱动熔池对流效果较好,驱动合金元素向激光区转移。

2.3 焊接接头微观组织

如图 7(a)所示,无扫描激光-电弧复合焊接接头由电弧区、激光区和热影响区 3 部分组成。在 SEM 下分别观察焊缝各区域微观组织特征,结果如图 7(b)~(e)所示。电弧区组织由于 Ni 元素的富集,焊

缝组织主要由大量奥氏体及 δ 铁素体组成,并含有少量板条马氏体,因而具有较高的韧性。而激光区组织则由大量板条状马氏体、少量条带状 δ 铁素体与少量奥氏体构成,韧性不佳。焊接接头热影响区由粗晶区、细晶区和临界晶区组成。其中,热影响区粗晶区是热影响区中加热温度最高的区域,同时该区域的奥氏体晶粒长大具有热惯性,导致热影响区出现粗晶脆化,是焊接接头热影响区最薄弱的位置。因此,后续组织分析主要针对激光区和热影响区粗晶区展开。



(a) 焊缝宏观形貌

(b) 热影响区细分区域

(c) 电弧区

(d) 激光区

(e) 热影响区粗晶区

图 7 焊接接头典型形貌

Fig.7 Typical morphology of the welded joints

2.4 焊接接头 EBSD 分析

针对焊接接头激光区底部中心位置开展 EBSD 测试,其 IPF 图和相图结果如图 8 所示。随着扫描频率的增加,激光区平均晶粒尺寸逐渐减小,从无扫描的 $4.75\ \mu\text{m}$ 降至 60 Hz 时的 $3.14\ \mu\text{m}$ 。这归因于激光束扫描行为降低了激光能量密度。同时 Ni 作为奥氏体形成元素,既可以扩大奥氏体相区,又促进了高温奥氏体的稳定性。统计各扫描频率下激光区奥氏体占比,结果如图 8(f)所示。得益于激光扫描改善合金元素分布,激光区奥氏体占比也随着扫描频率的增大,由 4.7% 增加至 12.6%。图 9 给出了热影响区 IPF 图以及粗晶区平均晶粒尺寸与扫描频率之间的关系,其热影响区取样位置紧邻电弧区与激光区过渡角处。随着扫描频率的增加,热影响区粗晶区的平均晶粒尺寸随扫描频率的增大呈现先减小后逐渐增大的趋势,当扫描频率达到 60 Hz 时,粗晶区晶粒尺寸达

到 $5.42\ \mu\text{m}$ 。

2.5 杯突性能

不同扫描频率的焊接接头杯突试验结果如图 10 所示,仅扫描频率 20 Hz 时,杯突试样断裂于母材,其余试样均沿着熔合线位置开裂。如图 11 所示,扫描频率 20 Hz 时,焊接接头杯突值从无扫描时的 4.82 mm 升至 5.89 mm,表明扫描振幅取 0.4 mm 时,扫描频率 20 Hz 可以有效提高焊接接头的焊缝韧性。

图 12 为扫描频率 20 Hz 及 60 Hz 时两种断裂位置的杯突断口形貌。可以发现断裂位置在母材处的杯突断口表现为典型的包含大量密集分布韧窝的韧性断裂模式;断裂在熔合线处杯突断口表现为明显的解理断裂特征,断口表面存在大量解理平面和河流花样,同时混合明显沿晶和穿晶裂纹以及极少量小而浅的韧窝。这进一步证明了在合适的扫描参数下,扫描复合焊接接头的韧性得到进一步提升。

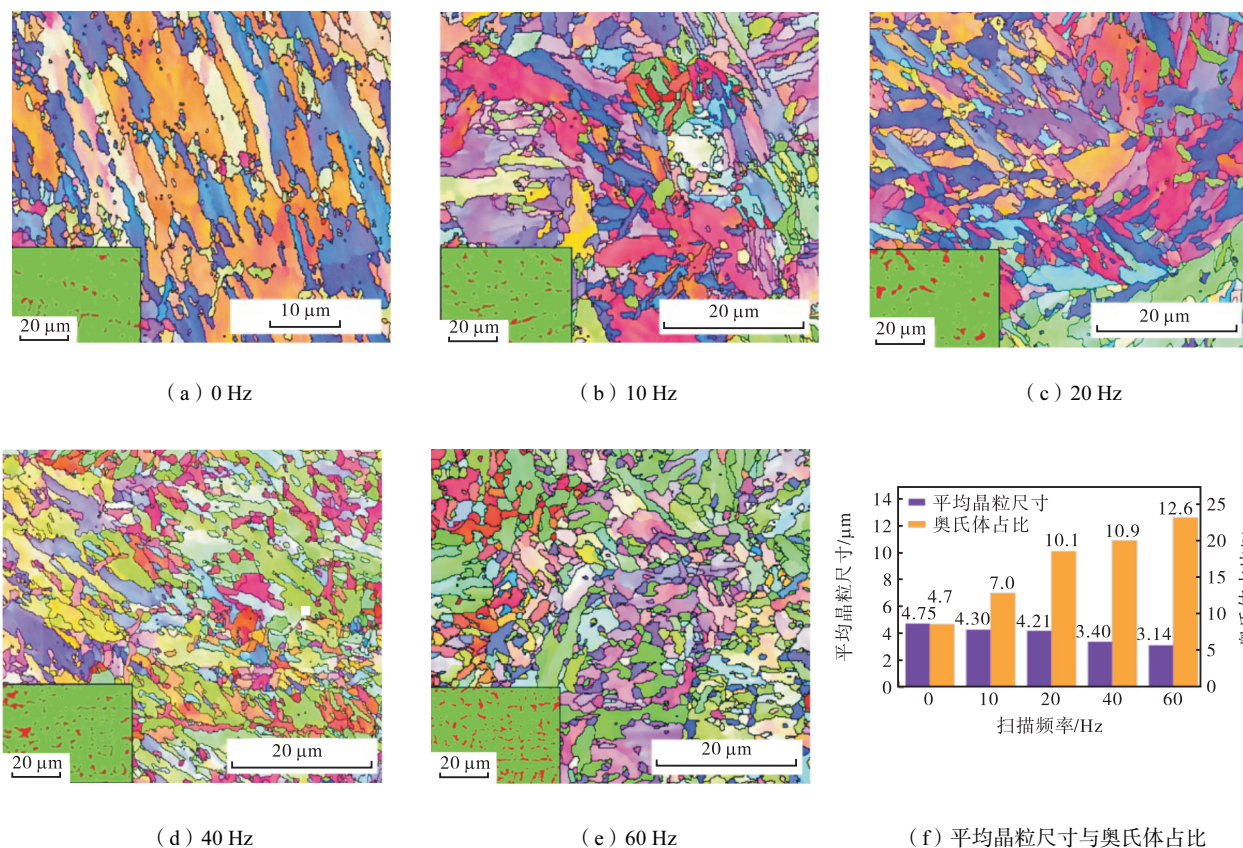


图 8 焊接接头激光区 EBSD 结果

Fig.8 EBSD results of the laser zone of the welded joints

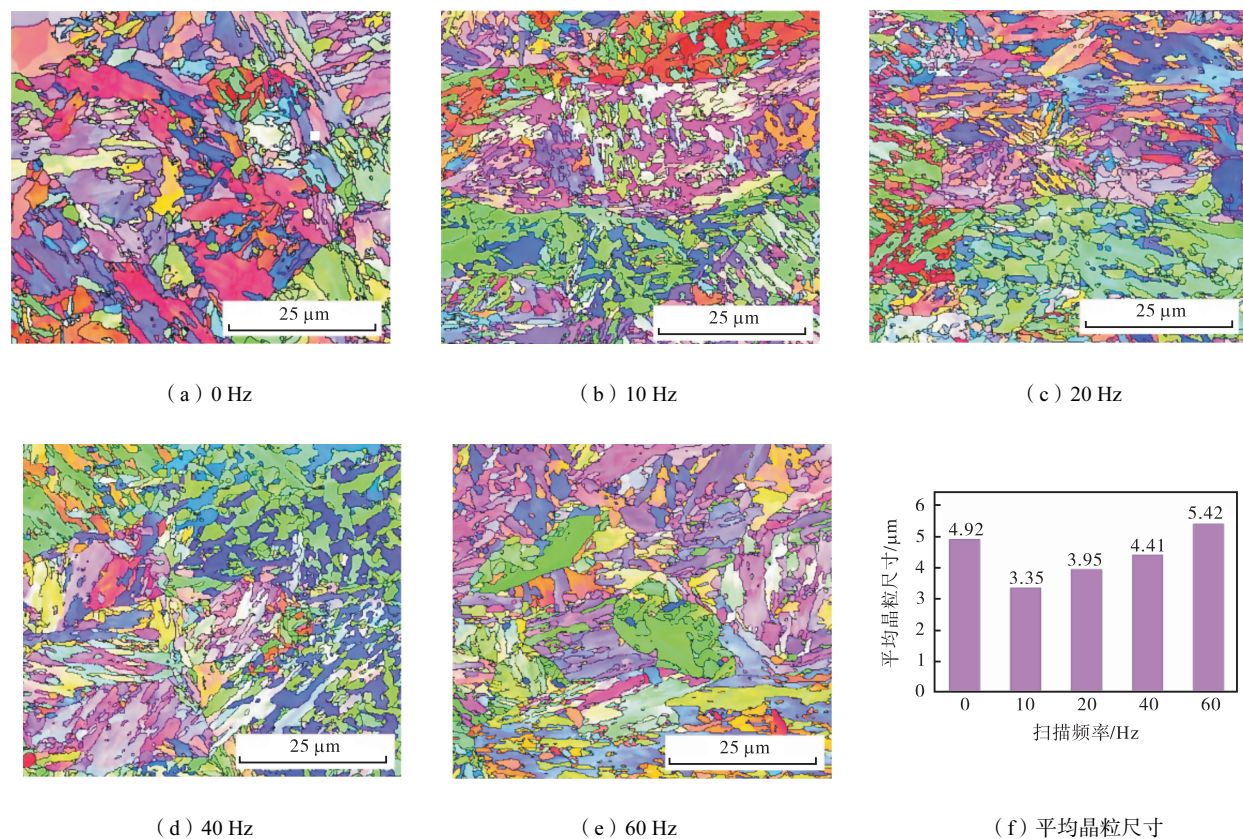


图 9 焊接接头热影响区 EBSD 结果

Fig.9 EBSD results of the heat affected zone of the welded joints

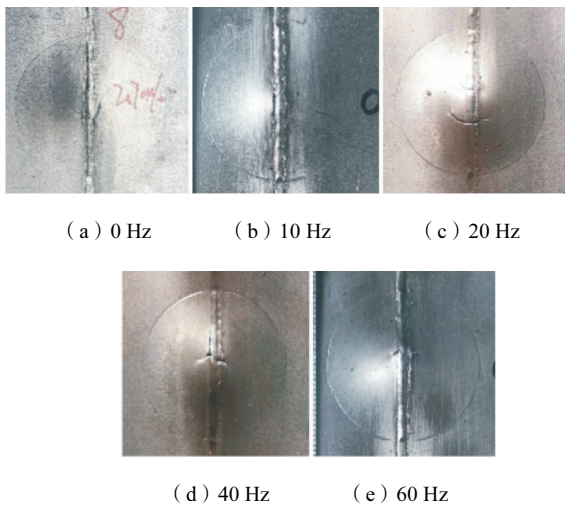


图 10 杯突试验断裂位置

Fig.10 Cupping test fracture location

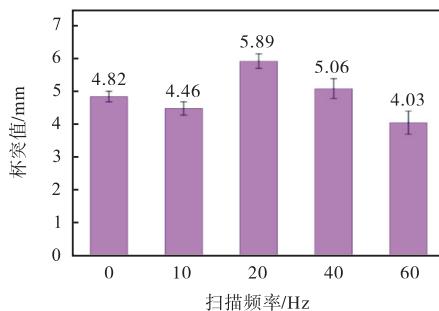
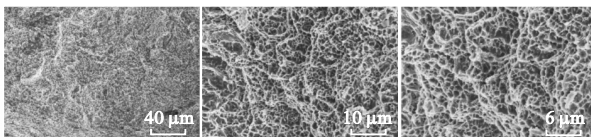
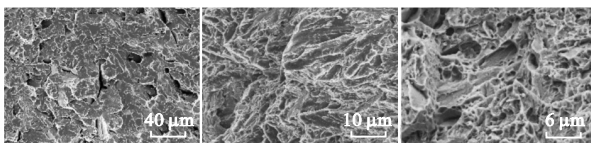


图 11 焊缝杯突试验断裂值

Fig.11 Fracture value determined from the cupping test



(a) 沿母材位置断裂杯突断面形貌(20 Hz)



(b) 沿热影响区位置断裂杯突断面形貌(60 Hz)

图 12 杯突试样断面微观形貌

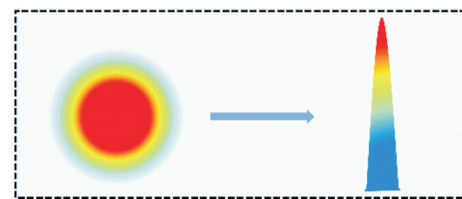
Fig.12 Microscopic morphologies of fracture of the cupping specimen

3 讨论

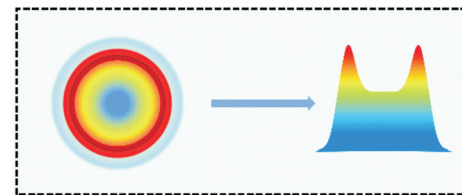
3.1 激光扫描频率对能量分布的影响

扫描激光作用下,焊缝成形的变化归因于激光能量分布形式的改变.如图 13 所示,常规激光热源具有典型的高斯分布特征,焊接熔池相对于焊缝中心面对称,焊缝中心能量最高,由中心向边缘能量逐渐降

低.而在激光扫描条件下,激光能量向焊缝两侧分散,在两侧扫描极限位置时能量沉积密度达到峰值,这是激光在两侧停留时间更长、热积累更多导致的.



(a) 无扫描



(b) 圆形扫描

图 13 激光能量分布示意

Fig.13 Schematic diagram of laser energy distribution

随着激光束扫描的引入,焊缝熔宽显著增加,电弧区与激光区形貌差异减小.无激光扫描时,光束的运动速度相当于焊接速度,激光走过的路径相当于焊接长度.而在扫描复合焊接过程中,激光束的实际线速度增加,激光运动的实际路径远远大于焊接长度,且激光运动路径长度随扫描频率增大而增加.激光能量辐射范围增大,降低了单位长度局部吸收的激光能量.因此,扫描激光焊接的能量积累峰值显著低于无扫描激光焊接.

扫描频率较低(10 Hz)时,激光光斑运动速度较小,激光能量在扫描路径上的重叠率较低,造成部分区域能量分布较高,出现能量作用盲区.这主要取决于光束运动方向:当焊接方向与激光扫描方向相同时,线速度相对较快;当焊接方向与旋转方向相反时,线速度相对较慢,导致两侧瞬时线能量的差异.因此焊缝成形两侧不对称,能量集中的区域出现较大熔宽.

当扫描频率增大至 20 Hz 时,激光运动速度进一步增加,激光实际运动轨迹大幅延长,激光运动路径的重叠率得到增加,从而使激光沿扫描路径上各点的停留时间及平均分布的线能量均降低.同时,激光能量进一步向焊缝两侧沉积,焊缝中心处累积的能量总量降低.随着振荡频率的增加,激光搅拌效应越强,加速了熔池流动并促进热传递,导致温度梯度减小,焊缝成形进一步改善.

当扫描频率继续增大时,激光的平均扫描速度随之增大,导致激光轨迹瞬时线能量进一步下降,然而

激光运动路径的叠加程度也随之增大,因此,继续增大扫描频率,熔池吸收的综合能量密度峰值相差无几.同时激光能量分布形式基本稳定,保持“中心凹两侧凸”的分布形式,焊缝中心处激光能量最低,能量峰值逐渐向焊缝两侧边缘沉积,会造成热影响区热输入升高,不利于提升焊接接头整体力学性能.

3.2 激光扫描对焊缝合金元素分布的影响

熔池内部主要熔流驱动力如图 14 所示:对于无扫描的激光-电弧复合焊接,熔池内部液态金属流动的主要驱动力是由熔池温度梯度差异形成的表面张力梯度而产生的马兰戈尼力、电弧压力及金属蒸气的反冲压力.激光匙孔附近液体在合力作用下沿垂直方向自上向下流动,并在熔池后方形成回流.而对于扫描激光-电弧复合焊接,匙孔高速转动对熔池产生的强烈搅拌效应,产生一个新的涡流,该涡流在水平面上移动.同时激光束的位置移动势必引起熔池表面张力方向的改变,因此扫描激光-电弧复合焊接的熔池流场更为复杂.

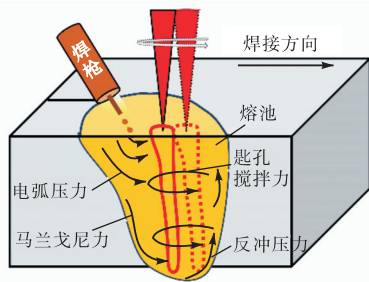


图 14 扫描激光-MAG 焊接熔池内部的主要熔流驱动力
Fig.14 Main melt drive in the weld pool for oscillating laser-MAG welding

对于无扫描的激光-MAG 复合焊接,穿透能力弱的电弧热源只能作用在熔池上方较浅的区域,而高能量密度的激光主要作用于熔池下部. Katayama 等^[11]根据 X 射线法观察的激光-MAG 复合焊接熔体流动结果及熔体流动数值模拟结果显示,熔池内主要存在两个熔体流动回路:一个出现在熔池上部,主要受电弧力和温度梯度差异引起的马兰戈尼力驱动,熔流回路宽而浅;另一个位于熔池底部,由金属蒸气的反冲压力驱动,熔流窄而深.随着扫描频率增大,相同能量密度的激光扫描过更多的面积,这同时会造成匙孔中金属蒸气量增加,金属蒸气反作用力增加,熔池朝激光区流动趋势明显增大.其次,匙孔高速旋转驱动一个水平方向的涡旋,根据流体动力学,匙孔壁在运动过程中必然会受到与瞬时速度方向相反的阻力(R),其计算式为

$$R = \frac{1}{2} C \rho A v_k^2 \quad (1)$$

式中: C 为阻力系数; ρ 为流体密度; A 为匙孔与流体运动方向的接触面积; v_k 为匙孔的移动速度.由式(1)可知,运动阻力的大小与匙孔的移动速度平方成正比,而匙孔的移动速度随激光扫描频率的增大而增加.因此,当扫描频率增大时,匙孔产生的搅拌效果增强,焊缝合金元素分布均匀性提升.

对于扫描激光-MAG 复合焊,整个熔池可以看成是一个搅拌釜,而其中做高速圆形扫描的匙孔则可看作一个搅拌器.根据化工原理的熔体搅拌理论,在搅拌作用下,液体的流动状态和搅拌强度可以用无量纲量搅拌雷诺数 Re 来表征.扫描激光束在熔池内的搅拌雷诺数的计算式为

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2)$$

式中: ρ 为熔体的密度; d 为搅拌器的直径,等于双倍扫描振幅; μ 为熔体的动态黏度; v 为搅拌器线速度.在圆形扫描模式中, v 可由下式表示

$$v = 2\pi r f \quad (3)$$

式中 r 为扫描振幅.将式(3)代入式(2)中,可得雷诺数 Re 的具体表达式为

$$Re = \frac{4\pi \rho f r^2}{\mu} \quad (4)$$

由于 2Cr13 熔池流体的密度和黏度分别为 7500 kg/m^3 和 $0.38 \times 10^3 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$,由此可根据式(4)计算出不同扫描参数下的雷诺数.通常当 Re 小于 1000 时,熔液的流动状态主要为层流;当 Re 大于 1000 时,熔液流动状态变为湍流.可以看出 Re 随扫描振幅和频率的增加而增大,即熔池的搅拌效应随扫描振幅和频率增加而增大.

如图 15(a)所示,对于常规激光-电弧复合焊接,熔池上部和下部均以层流为主.其次上、下两种层流会在中部过渡区相遇,因为过渡角 θ 很小,造成上部熔体流动容易在边界处阻塞和偏移,因此 Ni 元素主要富集在熔池的上半部分,而很难到达焊缝底部.因此无扫描复合焊缝的激光区中 Ni 含量最低,电弧区两侧镍含量偏高,熔池内部形成不均匀的合金元素分布.

如图 15(b)所示,对于 $r = 0.4 \text{ mm}$ 、 $f = 10 \text{ Hz}$ 的圆形扫描复合焊接,相比无扫描复合焊接,熔池电弧区与激光区形貌差异略微减小,激光作用区域小幅增加,过渡角 θ 增大.但此时的 Re 为 396,显然扫描参数还不足以引发熔池内部的湍流,因此熔体的流动类型与无扫描的相似,但扫描光束仍会在熔池部分区域

形成小型涡流区. 同时它还导致边界处的上部和下部熔体流动部分偏移, 造成整个熔池的流动减弱. 此时, 当熔滴落进熔池涡流区附近时, Ni 元素在较弱涡流作用下迁移至熔池一侧, 造成局部区域的元素富集.

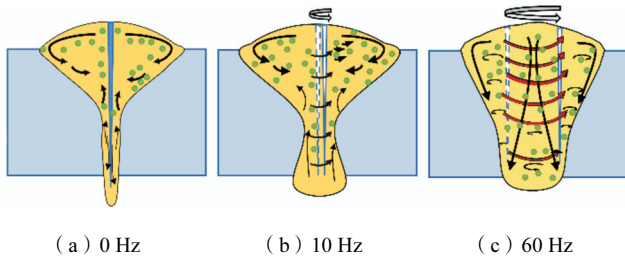


图 15 不同扫描参数下元素转移示意

Fig.15 Schematic diagram of element transfer under different oscillating parameters

如图 15(c) 所示, 当 $r = 0.4 \text{ mm}$ 、 $f = 60 \text{ Hz}$ 时 ($Re = 2380$), 此时扫描光束剧烈的扫描搅拌作用在熔池内部引入了明显的湍流, 带动周围的熔体形成了大范围涡流区. 因此熔池中由电弧力和马兰戈尼力驱动的两熔流回路的边界很大程度上被消除, 相比无扫描复合焊缝, 上部电弧区和下方激光区之间过渡角 θ 大幅增加, 降低了熔体从上向下流动的阻力, 促使溶质在熔池中充分扩散转移. 当 $Re > 1000$ 时, 扫描激光的强化搅拌作用可引入熔池内部明显的湍流, 有利于消除上、下熔体流的边界. 上方电弧作用区和下部激光作用区之间的过渡角也大幅增加, 使上、下熔体流动更加均匀. 合金元素更易到达熔池的底部, 从而获得了较均匀的合金元素分布.

随着扫描频率的增加, 熔池搅拌更剧烈, 焊缝中元素分布更加均匀. 但是, 当扫描频率达到一定程度时, 元素在激光区的分布比例不会线性增大, 这是因于过大的扫描频率造成熔池内温度梯度减小, 由温度梯度驱动的马兰戈尼层流削弱, 而且过快的冷却速度导致熔池凝固速度增加, 不利于熔池流动.

3.3 扫描频率对杯突性能的影响机制

对于无扫描激光-电弧复合焊接, 激光热源聚焦于焊缝中心, 能量集中, 导致中心处温度梯度极大. 同时, 受制于复合热源特点, 焊缝合金元素偏析严重, 激光区 Ni 元素含量偏低导致激光区组织为大量马氏体板条混合少量 δ 铁素体, 奥氏体占比仅为 4.7%, 因此激光区韧性较差.

当扫描频率为 10 Hz 时, 因为激光扫描频率小, 激光束扫描行为对熔池搅拌效果弱, 合金元素向激光区转移效果有限, 焊缝整体元素分布不均匀的问题仍然存在. 同时, 较小的扫描频率导致激光在扫描路径

上的重叠率较低, 能量分布不均匀, 导致焊道宽窄不齐的成形缺陷, 容易产生应力集中. 因此, 杯突测试中焊接接头易在成形不好的地方开裂, 性能不佳.

当扫描频率为 20 Hz 时, 随着扫描频率增大, 激光扫描搅拌作用增强, 合金元素进一步向激光区转移, 元素分布更加均匀, 底部奥氏体组织增多^[12]. 同时得益于扫描激光降低激光能量密度, 熔池内部温度梯度降低, 扫描熔池内部强对流及强涡流效应可将破碎枝晶从焊缝边缘快速卷入焊缝中心, 该区域均匀的温度梯度能够避免部分形核点熔化, 最终促进等轴枝晶的形成. 熔池激光能量密度降低, 激光区和热影响区粗晶区晶粒得到细化, 焊接接头整体韧性得到了提升^[13].

扫描频率继续增大时, 虽然焊缝元素更加趋向于均匀分布, 即焊缝 Ni 元素宏观偏析进一步减小. 但是随着激光扫描路径叠加程度加剧, 激光能量逐渐向焊缝两侧聚积, 在两侧扫描极限位置时能量沉积达到峰值, 因为激光在两侧停留时间更长, 热积累更多, 最终导致热影响区粗晶区晶粒粗大、性能恶化. 因此, 当扫描频率为 60 Hz 时, 热影响区粗晶区晶粒最为粗大, 焊接接头的杯突值最低, 韧性恶化.

4 结 论

(1) 激光束扫描频率的增大可以增大上、下熔池之间的过渡角 θ , 同时扫描激光束通过剧烈搅拌形成涡旋效应, 促进了熔池对流和元素转移, 焊缝 Ni 元素分布不均匀程度减弱, 焊缝激光区奥氏体占比从 4.7% 提高至 12.6%.

(2) 当扫描频率为 10 Hz 时, 热影响区粗晶区平均晶粒尺寸由 $4.92 \mu\text{m}$ 降为 $3.35 \mu\text{m}$; 随着扫描频率继续增加至 60 Hz, 其平均晶粒尺寸不断增加至 $5.42 \mu\text{m}$.

(3) 当扫描频率为 20 Hz 时, 焊接接头杯突试样断裂于母材, 杯突值由常规激光-电弧复合的 4.82 mm 提升至 5.89 mm, 提高了 22%.

参考文献:

- [1] 赵映龙. 2Cr13 不锈钢高拘束度结构焊接工艺研究[D]. 太原: 太原科技大学材料科学与工程学院, 2011.
Zhao Yinglong. Research on the Welding Process of 2Cr13 Stainless Steel with High Constraint Degree Structure [D]. Taiyuan: School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, 2011 (in Chinese).

- [2] Lang Q, Zhang X L, Song G, et al. Effects of different laser power and welding speed on the microstructure and mechanical properties of TRIP joints in laser-TIG arc hybrid lap filler wire welding[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 29: 102925.
- [3] 滕彬, 雷振, 王小朋, 等. 基于实际工况的超高强度钢薄板激光-MAG 复合热源焊接工艺特性[J]. *焊接*, 2013(9): 31-34.
Teng Bin, Lei Zhen, Wang Xiaopeng, et al. Characterization of laser-MAG composite heat source welding process for ultra-high strength steel thin sheet based on actual working conditions[J]. *Welding & Joining*, 2013(9): 31-34 (in Chinese).
- [4] Hao K D, Gong M C, Zeng X Y, et al. Effect of Ni content on rolling toughness of laser-arc hybrid welded martensitic stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 251: 127-137.
- [5] Lei Z L, Chen Y, Xia P Y, et al. Melt flow and grain refining in laser oscillating welding of β -21S titanium alloy[J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 145: 107456.
- [6] Wang L, Gao M, Zhang C, et al. Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 108: 707-717.
- [7] Meng Y F, Gong M C, Gao M, et al. Effects of oscillating laser offset on microstructure and properties of dissimilar Al/steel butt-joint[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106037.
- [8] Cai C, Li L Q, Chen X Y, et al. Study on laser-MAG hybrid weaving welding characteristics for high-strength steel[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022401.
- [9] 刘捷, 谢美蓉, 王梦飞, 等. 激光振荡扫描焊接 Ti₂AlNb/TC4 焊缝组织及力学性能[J]. *焊接*, 2021(11): 21-26.
Liu Jie, Xie Meirong, Wang Mengfei, et al. Organization and mechanical properties of Ti₂AlNb/TC4 welded by laser oscillatory scanning welding[J]. *Welding & Joining*, 2021(11): 21-26 (in Chinese).
- [10] 马晓阳, 李治, 吴艳明, 等. 激光-GMAW 复合焊焊缝合金元素分布不均匀性研究[J]. *材料开发与应用*, 2020, 35(5): 87-91.
Ma Xiaoyang, Li Zhi, Wu Yanming, et al. Study of alloy distribution inhomogeneity in laser-GMAW composite welds[J]. *Development and Application of Materials*, 2020, 35(5): 87-91 (in Chinese).
- [11] Katayama S, Kawahito Y, Mizutani M, et al. Understanding of laser and hybrid welding phenomena[J]. *Materials Science Forum*, 2008, 733(580/581/582): 535-538.
- [12] 王东坡, 巴凌志, 张智, 等. Ni、Mn 对埋弧焊缝金属组织和韧性的影响[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(12): 1308-1313.
Wang Dongpo, Ba Lingzhi, Zhang Zhi, et al. Effect of Ni and Mn on the organization and toughness of submerged arc weld metal[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2020, 53(12): 1308-1313 (in Chinese).
- [13] Zhang C, Li X W, Gao M, et al. Effects of circular oscillating beam on heat transfer and melt flow of laser melting pool[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(4): 9271-9282.

(责任编辑: 田军)