6005A 铝合金摆动激光焊接组织及力学性能研究

牛虎山¹,林化强²,崔洪芝^{1,3}

(1.山东科技大学 材料科学与工程学院,山东 青岛 266590;2.中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;3.中国海洋大学 材料科学与工程学院,山东 青岛 266404)

摘要:目的 优化铝合金摆动激光焊焊接接头组织结构,减少焊接缺陷,提高接头机械性能。方法 采用无 摆动、三角摆动和无穷摆动 3 种模式对 6005A 铝合金进行焊接。采用金相显微镜、扫描电子显微镜、能谱 仪对焊接接头的组织结构和元素分布进行表征;使用显微硬度计及拉伸试验机对接头进行力学性能测试; 利用扫描电子显微镜分析拉伸断口的形貌特征。结果 与无摆动和三角摆动两种模式相比,无穷摆动模式下 焊缝成形最佳,晶粒尺寸最小,元素分布最均匀,这得益于复杂的双向循环摆动设计对熔池产生的强烈搅 动效果。无摆动、三角摆动、无穷摆动模式下焊核平均显微硬度分别为 66HV、72HV、77HV; 3 种模式下 接头平均抗拉强度分别为 183.21、205.52、215.80 MPa;断裂模式分别为解理断裂、解理断裂+韧窝断裂及 韧窝断裂模式。无穷摆动模式同样显示出最佳的力学性能。结论 铝合金摆动激光焊接采用无穷摆动模式可 以获得组织均匀细小、无焊接缺陷且综合性能优良的焊接接头,该模式十分适合铝合金材料的焊接。 关键词:摆动激光焊接;铝合金;力学性能;三角摆动;无穷摆动;双向循环 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.04.004 中图分类号:TG456.7 文献标识码:A 文章编号: 1674-6457(2023)04-0033-07

Microstructure and Mechanical Properties of 6005A Aluminum Alloy by Oscillating Laser Welding

NIU Hu-shan¹, LIN Hua-giang², CUI Hong-zhi^{1,3}

 (1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China; 2. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Co., Ltd., Shandong Qingdao 266111, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Ocean University of China, Shandong Qingdao 266404, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the structure of the oscillating laser welded joints, reduce the welding defects and improve the mechanical properties of the joints. 6005A aluminum alloy was welded in three patterns: without oscillation, triangle

Received: 2023-02-05

基金项目:国家自然科学基金(U2106216, 51971121);泰山学者攀登计划(tspd20161006);山东省重大专项科技项目 (2019JZZY010303, 2019JJZY010360)

Fund: National Natural Science Foundation of China (U2106216, 51971121); The Taishan Scholarship of Climbing Plan (tspd20161006); Major-Special Science and Technology Projects in Shandong Province (2019JZZY010303, 2019JZZY010360) 作者简介: 牛虎山 (1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为铝合金激光焊接及其接头性能检测。

Biography: NIU Hu-shan (1998-), Male, Postgraduate, Research focus: laser welding of aluminum alloy and its joint performance test.

通讯作者:崔洪芝(1965-),女,博士,教授,主要研究方向为高能束表面强化及连接技术。

Corresponding author: CUI Hong-zhi (1965-), Female, Doctor, Professor, Research focus: high energy beam surface strengthening and joining technology.

引文格式:牛虎山,林化强, 崔洪芝. 6005A 铝合金摆动激光焊接组织及力学性能研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(4): 33-39. NIU Hu-shan, LIN Hua-qiang, CUI Hong-zhi. Microstructure and Mechanical Properties of 6005A Aluminum Alloy by Oscillating Laser Welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 33-39.

收稿日期: 2023-02-05

oscillation and infinite oscillation. The microstructure and element distribution of the welded joints were characterized with metallographic microscope, SEM and EDS. The mechanical properties of the joints were tested with microhardness tester and tensile tester. The morphology of tensile fracture was analyzed with SEM. The results showed that the infinite oscillation pattern had the best weld seam formation, the smallest grain size and the most uniform element distribution compared with the without oscillation and triangle oscillation patterns, due to the strong stirring effect of the complex double-cycle oscillation design on the molten pool. The average microhardness of the weld cores in without oscillation, triangle oscillation, and infinite oscillation patterns was 66HV, 72HV, and 77HV. The average tensile strength of the joints of the three patterns was 183.21, 205.52, and 215.80 MPa, respectively. Their fracture modes were destructive fracture mode, destructive fracture + dimple fracture mode, and dimple fracture mode, respectively. The infinite oscillation pattern also showed the best mechanical properties. Aluminum alloy oscillating laser welding with infinite oscillation pattern is very suitable for the welding of aluminum alloy materials.

KEY WORDS: oscillating laser welding; aluminium alloy; mechanical property; triangle oscillation; infinite oscillation; double-cycle oscillation

近年来,随着"海洋强国"战略的持续推进,海 洋工程装备作为经略海洋事业的重要支撑,已迈向高 质量发展的新阶段^[1-2]。铝合金具有较高的比强度、 优良的加工性能、良好的耐蚀性、无磁性及低温特性, 已被广泛应用于船舶及海洋工程领域^[3-5]。然而,铝 合金的焊接难题制约了其进一步发展^[6-8]。目前,铝 合金多采用 MIG 焊和 TIG 焊方式,但过高的热输入 往往会导致接头变形和软化^[9-10]。因此,为保证焊接 结构的安全性与可靠性,亟需提出新的焊接方法来提 高焊接接头质量。

激光焊接具有能量密度高、焊接变形小、焊接速 度快等优点,十分适合铝合金材料的焊接^[11-12]。然而, 微小的激光聚焦束斑需要极高的装配精度^[13],这限制 了激光焊接的工业应用。近年来,摆动激光焊接作为 一种新型激光焊接技术被提出,其通过引入激光摆动 的方式降低了焊件的装配难度,并对熔池产生搅动效 果^[14-17],成为了激光焊接工程化应用的有效途径。

国内外研究表明,摆动激光焊接在提高焊接稳定 性、减少气孔等焊接缺陷,以及优化组织结构等方面 有独特优势。Liu 等^[18]采用正弦摆动方式对 7075 铝 合金进行了焊接,发现激光摆动可有效改善匙孔稳定 性,并显著降低气孔缺陷。Wang等^[19]采用激光-MIG 复合焊对 Al-Si 合金进行了焊接 ,发现光束摆动提高 了熔池的搅拌效果并形成涡流泵效应,促进了熔池对 流和溶质转移,当摆动幅度高于0.8 mm 且频率高于 300 Hz 时,摆动激光-MIG 复合焊截面宏观偏析相比 常规复合焊降低了 300%。Chen 等^[20]研究了线形摆动 和环形摆动模式对高强钢接头组织及力学性能的影 响,结果显示,环形摆动模式下,柱状晶晶粒尺寸得 到显著细化,抗拉强度相比无摆动提升了 9.58%。 Wang 等^[21]研究了正弦、线形及环形摆动 3 种摆动模 式对 AA6061 铝合金接头质量的影响,发现环形摆动 模式可以促进柱状晶向等轴晶转变,优化焊缝成形性

并提高接头抗拉强度。

以上研究表明,摆动激光焊接可有效提高焊接质 量,且不同的摆动模式对焊接质量有显著影响。然而, 目前对于三角形摆动与无穷形摆动这类新型摆动模 式的研究较少。因此,文中着重揭示三角摆动、无穷 摆动对6005A-T6铝合金接头组织结构和力学性能的 影响,以确定最佳摆动模式,旨在为铝合金摆动激光 焊接模式的选择提供指导。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为 6005A-T6 板材,规格为 200 mm× 100 mm×2 mm,化学成分如表 1 所示。焊接前使用激 光清洗的方式对焊试板进行处理,以去除表面难熔氧 化膜。焊接试样不开具坡口。

表 1 6005A-T6 铝合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of 6005A-T6 aluminum alloy									
Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Mass fraction/%	0.5	0.35	0.3	0.5	0.7	0.3	0.2	0.1	Bal.

试验采用 SMATlas 4S 型光纤激光器作为光源, 采用 BWH30 麒麟双摆激光头实现光束摆动,并使用 焊接机器人进行自动焊接。焊接试验装置如图 1 所 示,激光束经聚焦镜聚焦后通过偏转振镜反射实现摆 动过程。振镜由电机驱动偏转,通过内置程序产生不 同摆动路径。选用无摆动、三角摆动和无穷摆动 3 种 模式进行焊接。保护气采用纯度为 99.999%的高纯氩 气。试验选取的工艺参数:激光功率 2 200 W,焊速 30 mm/s, 氩气流量 20 L/min,摆动宽度 2.4 mm,摆 动频率 18 Hz。



图 1 摆动激光焊接示意图 Fig.1 Schematic diagram of oscillating laser welding

焊后使用线切割垂直于焊缝取样,试样研磨抛光 后使用凯勒试剂腐蚀,使用光学显微镜和扫描电镜观 察其微观组织结构,并使用 EDS 进行元素分析。在 载荷 0.98 N、加载时间 20 s 的条件下测试接头横截面 显微硬度。根据《焊接接头拉伸试验方法》(GB/T 2651—2008),制备 3 组拉伸试样(图 2)进行拉伸 测试。



图 2 拉伸试样尺寸(单位:mm) Fig.2 Size of tensile specimen (unit: mm)

2 结果与分析

2.1 焊缝的成形

图 3 显示了 6005A 铝合金焊缝表面及截面宏观 形貌。3 种模式下获得的焊缝均无裂纹、咬边、未焊 透及气孔等焊接缺陷。摆动的引入扩大了激光作用区 域,使得三角摆动和无穷摆动模式下焊缝宽度更大并 降低了装配难度。图 3a 显示,无摆动模式下焊缝表 面较为粗糙且存在较多飞溅,表明该模式下焊接过程 不稳定。图 3c 显示,三角摆动模式下焊接过程 不稳定。图 3c 显示,三角摆动模式下焊接过程 不稳定。图 3c 显示,三角摆动模式下焊接过程 不稳定。图 3c 显示,三角摆动模式下焊接过程 化存在较多飞溅。图 3e 显示,无穷摆动表面无飞 溅产生且具有明显的鱼鳞纹,表现出最佳的焊接稳定 性。图 3b 显示,由于使用的激光为高斯热源,能量 中心集中,两侧分散,导致无摆动模式下焊缝背面 出现明显的内凹缺陷。图 3d 显示,三角摆动可以避 免背部凹陷缺陷的产生,但在表面出现内凹现象, 说明在该模式下仍存在能量分布不均现象。图 3f 显 示,无穷摆动模式下焊缝截面具有最完整光滑的过 渡,说明在该模式下能量得到均匀分布,从而有利 于焊缝成形。

2.2 焊缝的微观组织

图 4 显示了 3 种摆动模式下焊缝中心微观组织特 征。如图 4a 所示,无摆动模式下由于能量输入不均 匀,致使焊缝区在局部高热量输入部位产生了粗大的 胞状树枝晶粒,平均晶粒尺寸达到 223 µm。摆动激 光对熔池具有搅动效果,加剧了熔池对流,降低了熔 池内各部分温度差异^[22-23],因此,在一定程度上避免 了晶粒粗化现象的发生。如图 4b 所示,三角摆动模 式下焊缝区域晶粒粗化现象得到改善,平均晶粒尺寸 降至 136 µm。图 4c 显示,无穷摆动模式下焊缝区呈 现均匀细小的晶粒分布,粗大枝晶尺寸降至 85 µm, 表明该模式下能量得到有效分散,有利于焊缝组织结 构的优化。

2.3 焊缝的元素分布

为进一步探讨摆动模式对焊缝元素分布的影响, 利用 EDS 线扫描检测了从融合区到焊缝中心的 Mg 和 Si 元素分布,结果如图 5 所示。图 5a 显示,无摆 动模式下焊缝中的元素波动较大,说明存在较严重的 元素偏析现象。图 5b 显示,三角摆动模式下元素波 动显著降低,说明摆动的引入有效改善了焊缝中的元 素偏析现象。图 5c 显示,无穷摆动模式下元素分布 的均匀性得到进一步提高,显示出最稳定的元素分 布。但是,两种摆动模式下合金元素含量均较无摆动 时有所降低,这是由于摆动激光具有循环往复的运动 特性,会对熔池进行多次加热,从而增加了合金元素 的损失。



图 3 3 种摆动模式下焊缝的表面及截面形貌

Fig.3 Surface and cross-sectional morphology of the weld in the three oscillation patterns: a) surface morphology of weld without oscillation; b) cross-sectional morphology of weld without oscillation; c) surface morphology of weld with triangle oscillation; d) cross-sectional morphology of weld with triangle oscillation; e) surface morphology of weld with infinite oscillation; f) cross-sectional morphology of weld with infinite oscillation;









Fig.5 Distribution of Mg and Si elements in the three oscillation patterns: a) without oscillation; b) triangle oscillation; c) infinite oscillation

图6显示了3种模式下熔池流动及组织形成的示 意图。如图 6a 所示,无摆动模式下细小束斑集中在 较小的熔池上,使得激光与熔池形成强烈的相互作 用,宏观上表现出焊接过程不稳定,焊缝表面粗糙并 产生大量飞溅。图 6b 显示,三角摆动光束沿三角轨 迹做单向循环运动,较大的熔池范围缓解了激光与熔 池剧烈的相互作用,有利于光滑的焊缝表面形成;同 时,产生的对流提高了熔池中的流动性,促使柱状晶 脱落为中心等轴晶提供更多形核位点[24-25],从而达到 细化晶粒的效果。然而,由于三角摆动轨迹属于单向 循环,在拐角处由于速度降低往往存在热量累积^[21], 仍产生能量不均的现象。从宏观形态来看,焊缝表面 呈现不对称的形态,即在一侧出现凹陷。图 6c 显示, 在无穷摆动模式下,激光束沿无穷形轨迹做正向和逆 向双向循环运动,使得光束对熔池的搅动效果更为明 显,进一步促进了晶粒细化及元素均匀分布。而且双 向循环避免了能量单侧积累现象,使得无穷摆动呈现 出良好的焊缝成形性。





2.4 焊缝显微硬度

图 7 显示了 3 种模式下焊接接头截面的显微硬度 分布。3 种模式下接头的硬度曲线均沿焊缝中心呈对 称分布,其中焊缝区硬度水平最低,焊缝区平均硬度 从大到小依次为无穷摆动(77HV),三角摆动(72HV) 和无摆动(66HV)。显微硬度结果很好地对应于微观

组织特征:无穷摆动具有最均匀细小的晶粒组织,产生 了良好的晶界强化效果,从而呈现出最高的显微硬度。



Fig.7 Microhardness distribution of the cross-section of the weld in three oscillation patterns

2.5 拉伸曲线

图 8 显示了在 3 种模式下焊接接头的拉伸曲线, 所有接头都在焊缝区断裂,这与显微硬度曲线数据 相吻合。无摆动、三角摆动和无穷摆动 3 种模式下 焊接接头的抗拉强度分别达到 183.21、205.52、 215.80 MPa。其中,两种摆动模式下获得的接头强度 相比无摆动分别提高了 12%、18%。无穷摆动显示出 最佳的抗拉强度,这一方面得益于晶粒细化产生了更 多晶界,阻碍裂纹扩展;另一方面,元素均匀分布对 接头起到了弥散强化效果。此外,该模式下接头具有 最光滑完整的表面形态,有效避免了因凹陷处应力集 中产生的裂纹源,同样对接头强度起到有益效果。



Fig.8 Tensile curve of welded joint in three oscillation patterns

2.6 断口分析

图 9 显示了拉伸后样品断口形貌。图 9a 显示, 无摆动的断口主要由解理平面构成,属于解理断裂模 式。图 9b 显示,三角摆动模式下断口主要由较浅的 韧窝及部分解理面构成,属于韧窝断裂和解理断裂混 合断裂模式。图 9c 显示,无穷摆动断口全部由细小 密集的韧窝构成,属于典型韧窝断裂模式。从断口特 征来看,无穷摆动拥有最佳的塑性,这与拉伸曲线的 结果相吻合,表明无穷摆动模式可以有效提高接头的 韧性。





b 三角摆动



c 无穷摆动

图 9 3 种模式下断口形貌 Fig.9 Fracture morphology in three oscillation patterns: a) without oscillation; b) triangle oscillation; c) infinite oscillation

3 结论

采用 3 种激光束摆动模式对 6005A 铝合金进行 焊接,并分析了合金焊缝形态、显微组织、熔池行为 及力学性能,得到以下主要结论。

 1) 摆动激光焊有利于改善焊缝成型质量,避免 焊接缺陷产生,在无穷摆动模式下焊缝表面光滑完 整,具有最佳的焊缝成形性。

2)激光的搅动作用细化了焊缝中心等轴晶晶粒 尺寸,促进元素均匀分布。无穷摆动模式具有最佳优 化效果,这是由于其复杂的双向循环路径引起了强烈 的搅动作用。 3)无穷摆动模式下焊接接头具有最高的抗拉强 度及显微硬度,这得益于其细小的组织结构、均匀的 元素分布及良好的表面形态。

参考文献:

106-116.

- 彭涛,林忠钦,杨建民,等.海洋工程装备建造设备 发展浅探[J].中国工程科学,2016,18(4):109-112.
 PENG Tao, LIN Zhong-qin, YANG Jian-min, et al. An Exploration of Development of Construction Device for Ocean Engineering Equipment[J]. Engineering Sciences, 2016, 18(4): 109-112.
- [2] 师桂杰,冯加果,康美泽,等.极地海洋工程装备的应用现状及关键技术分析[J].中国工程科学,2021,23(3):144-152.
 SHI Gui-jie, FENG Jia-guo, KANG Mei-ze, et al. Polar Offshore Engineering Equipment: Development Status and Key Technologies[J]. Strategic Study of CAE, 2021,23(3):144-152.
- [3] 杨博均,魏木孟,邓玉,等. 铝及铝合金在自然水环 境中的腐蚀行为对比研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 106-116.
 YANG Bo-jun, WEI Mu-meng, DENG Yu, et al. Comparative Study on Corrosion Behavior of Aluminum and Aluminum Alloy in Natural Water Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5):
- [4] 侯健,张彭辉,郭为民.船用铝合金在海洋环境中的腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 59-63.
 HOU Jian, ZHANG Peng-hui, GUO Wei-min. Study on Corrosion of Aluminum Alloys for Ship Applications in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 59-63.
- [5] 左立杰,陈范铭,谷玲,等. 高强韧 Al-Zn-Mg-Cu 铝 合金在海洋工程装备中的应用展望[J]. 热加工工艺, 2023,52(3):1-5.
 ZUO Li-jie, CHEN Fan-ming, GU Ling, et al. Prospect of High Strength and Toughness Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloy in Marine Engineering Equipment[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(3):1-5.
 [6] 陈国庆,柳峻鹏,树西,等. 铝合金焊接工艺的研究
- [6] 陈国庆,柳政鹏,树四,寺. 伯百亚洋按上乙的研充 进展[J]. 焊接, 2017(9): 7-12. CHEN Guo-qing, LIU Jun-peng, SHU Xi, et al. Research Progress and Analysis of Aluminum Alloy Welding[J]. Welding & Joining, 2017(9): 7-12.
- [7] ZHANG Ruo-lin, TANG Xin-hua, XU Li-dong, et al. Study of Molten Pool Dynamics and Porosity Formation Mechanism in Full Penetration Fiber Laser Welding of Al-Alloy[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 119089.
- [8] WANG Tian-hua, LI Yi-wen, MAO Yun-he, et al. Research Status of Deep Penetration Welding of Medium-Thick Plate Aluminum Alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022,

120(11/12): 6993-7010.

 [9] 杨子涵,刘德博,杨思愚,等. 2219 铝合金 TIG 和 FSW 接头力学及疲劳性能[J]. 精密成形工程, 2023, 15(1): 17-24.
 YANG Zi-han, LIU De-bo, YANG Si-yu, et al. Mechanical Properties and Fatigue Properties of 2219

chanical Properties and Fatigue Properties of 2219 Aluminum Alloy TIG Joints and FSW Joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(1): 17-24.

- [10] LI Yi-wen, ZOU Wen-feng, LEE B, et al. Research Progress of Aluminum Alloy Welding Technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(5): 1207-1218.
- [11] 吴雁,肖礼军,孙士学,等.激光在铝合金焊接中的应用研究进展[J]. 热加工工艺, 2021, 50(15): 1-5.
 WU Yan, XIAO Li-jun, SUN Shi-xue, et al. Research Progress of Laser Application in Aluminum Alloy Welding [J]. Hot Working Technology, 2021, 50(15): 1-5.
- [12] 吕志超,洪洋,赵国江. 6063 铝合金单模光纤激光焊 接工艺研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(1): 159-164.
 LYU Zhi-chao, HONG Yang, ZHAO Guo-jiang. Single-Mode Fiber Laser Welding Process of 6063 Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(1): 159-164.
- [13] AALDERINK B J, PATHIRAJ B, AARTS R M. Seam Gap Bridging of Laser Based Processes for the Welding of Aluminium Sheets for Industrial Applications[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(1): 143-154.
- [14] 余世文,周昆,张威,等. 6.0 mm厚 5183 铝合金激光摆动焊接工艺研究[J]. 激光技术, 2018, 42(2): 254-258.
 YU Shi-wen, ZHOU Kun, ZHANG Wei, et al. Laser-Weaving Welding of 5183 Aluminum Alloy Plate with 6.0 mm Thickness[J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 254-258.
- [15] 雷正龙,毕思源,张新瑞,等. 2195 铝锂合金 T 型接头 双侧激光摆动焊接组织与性能分析[J].中国激光, 2022,49(8):30-39.
 LEI Zheng-long, BI Si-yuan, ZHANG Xin-rui, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Double-Sided

Laser Swing Welding of 2195 Al-Li Alloy T-Joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 30-39.

[16] AI Yue-wei, YU Long, HUANG Yi, et al. The Investiga-

tion of Molten Pool Dynamic Behaviors during the " ∞ " Shaped Oscillating Laser Welding of Aluminum Alloy[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 173: 107350.

- [17] JIANG Lai-he-ge, SHI Lin, LU Yang, et al. Effects of Sidewall Grain Growth on Pore Formation in Narrow Gap Oscillating Laser Welding[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 156: 108483.
- [18] LIU Tong-tong, MU Zhong-yan, HU Ren-zhi, et al. Sinusoidal Oscillating Laser Welding of 7075 Aluminum Alloy: Hydrodynamics, Porosity Formation and Optimization[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140: 346-358.
- [19] WANG Lei, GAO Ming, HAO Zhong-qi. A Pathway to Mitigate Macrosegregation of Laser-Arc Hybrid Al-Si Welds through Beam Oscillation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 151: 119467.
- [20] CHEN Cong, ZHOU Hai-peng, WANG Chang-jian, et al. Laser Welding of Ultra-High Strength Steel with Different Oscillating Modes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 761-769.
- [21] WANG Lei, GAO Ming, ZHANG Chen, 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.
- [22] ZHANG Chen, LI Xinwei, GAO Ming. 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.
- [23] WU Man-peng, LUO Zhen, LI Yang, et al. Effect of Oscillation Modes on Weld Formation and Pores of Laser Welding in the Horizontal Position[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 158: 108801.
- [24] ZHAO Jia-yi, WANG Jia-yao, KANG Xu-feng, et al. Effect of Beam Oscillation and Oscillating Frequency Induced Heat Accumulation on Microstructure and Mechanical Property in Laser Welding of Invar Alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 158: 108831.
- [25] YAN Sheng-hong, MENG Zheng, CHEN Bo, et al. Experimental Study on the Grain Evolution Induced by Thermal Characteristics during Oscillation Laser Welding of IN₇₁₈[J]. Materials Letters, 2022, 323: 132581.