

电流方式对5356-TIG增材制造组织性能的影响

赵鹏康^{1,2},蒲尊严^{1,2},杨笑宇^{1,2},李言^{1,2},李淑娟^{1,2}

(1.西安理工大学 陕西省机械制造装备重点实验室,陕西 西安 710048;

2.西安理工大学 教育部数控机床及机械制造装备集成重点实验,陕西 西安 710048)

摘 要 采用交流钨极氩弧焊(AC-TIG)方法成形多层单道5356铝合金薄壁件,研究电流方式对堆焊结构显微组织及力学性能的影响。结果表明:无脉冲电流方式成形件结合层组织呈枝晶状,基体存在大量尺寸为50~100 μm的气孔和缩孔等缺陷,沉积层由尺寸为100~150 μm的粗大等轴晶组成;脉冲电流试样结合层由具有明显择优取向的细小枝晶组成,气孔尺寸减小,沉积层由尺寸为50~100 μm的等轴晶组成;两种电流成形试样硬度值变化规律相似,即沉积层硬度值稳定而结合层波动剧烈,脉冲电流成形试样强塑性均高于无脉冲电流,两种试样在拉应力作用下均沿切向以韧性断裂为主,断口呈典型等轴韧窝状。结果表明:采用低频交流脉冲调质堆焊工艺,可获得最佳堆焊结构件,为实际工程应用提供理论依据及技术支持。

关键词 电弧增材;电流方式;5356铝合金;组织性能

中图分类号 TG444.2

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2020)02-0047-05

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200116.006

Effect of current mode on microstructure and mechanical properties of 5356-TIG additive manufacturing

ZHAO Pengkang^{1,2}, PU Zunyan^{1,2}, YANG Xiaoyu^{1,2}, LI Yan^{1,2}, LI Shujuan^{1,2}

(1.Shaanxi Provincial Key Laboratory of Machinery Manufacturing Equipment, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,

China; 2.Key laboratory of the Ministry of Education for Integration of CNC Machine Tools and Machinery Manufacturing

Equipment, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract The multi-layer single-pass 5356 aluminum alloy thin-wall parts were formed by alternating current tungsten inert gas welding (AC-TIG). Effect of current mode on the microstructure and mechanical properties of the formed parts during the surfacing process was studied. The results show that under the no-pulse current mode, dendrites and lots of defects such as pores and shrinkage holes of 50-100 μm appear in the combined layer, and larger equiaxed grains of 100-150 μm are formed in the deposited layer. Under the pulse current mode, fine dendrites with obvious preferential orientation and the smaller size of pores appear in the combined layer, and smaller equiaxed grains of 50-100 μm are formed in the deposited layer. The hardness of the samples formed by two kinds of current mode is similar, that is, the hardness value of the deposited layer is stable while that of the combined layer fluctuates violently. The strength and plasticity of pulse current specimen are higher than those of no-pulse current specimen. Both tensile specimens are mainly ductile fracture along tangential direction, and the fracture is typical equal-axial dimple. The results show that the optimum welding structure can be obtained by adopting low-frequency AC pulse welding process parameters, which will also provide theoretical basis and technical support for practical engineering application.

Keywords additive manufacturing with arc; current mode; 5356 aluminum alloy; microstructure and properties

收稿日期:2019-10-05;修回日期:2019-12-06

基金项目:中国博士后面上基金(2017M613172);陕西省教育厅自然科学基金(17JK0562);校博士启动基金(102-451116012)

第一作者:赵鹏康,男,博士;主要研究方向为金属材料焊接机理。E-mail:zhaopengkang@xaut.edu.cn。

金加工技术,2016,44(10):50-55.

- [13] ZHAO Mingchun, LIU Ming, SONG Guangling, et al. Influence of pH and chloride ion concentration on the corrosion of the Mg alloy ZE41 [J]. Corrosion Science, 2008, 50 (11) : 3168-3178.

- [14] 李克杰,李全安. Sm和Sb对时效态Mg-12Gd-2Y-0.5Zr合

金组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报,2011,32 (5):110-115.

- [15] 吴进,罗岚,刘勇,等. Mg-Al系镁合金的耐蚀性能研究进展[J]. 腐蚀与防护,2018,39(9):651-657.

- [16] 宋光铃. 镁合金腐蚀与防护[M]. 北京:化工工业出版社, 2006:49-51.

大尺寸复杂构件的低成本、高效快速近净成形是制造技术重要发展方向,在航空、航天、汽车及能源等工业领域具有不可替代的作用。增材制造是一种无模具,可直接低成本一体化制造复杂构件的新技术,其优越构型能力使现有制造技术在结构功能一体化制造方面难以实现的问题得以很好解决,成为低成本、短生产周期的制造新技术^[1-2]。为应对大型化、整体化结构件需求,基于堆焊技术发展起来的低成本、高效率电弧增材制造技术(wire arc additive manufacturing, WAAM)成为最合适方法^[3]。

铝合金因其密度小、比强度和断裂韧性高、抗腐蚀性好等优点,成为电弧增材制造优选材料^[4-6]。在铝合金电弧堆焊结构件显微组织与力学性能研究方面,已有大量卓有成效的研究成果:孙承帅等^[7]采用激光诱导 MIG 电弧增材制造技术研究了 5356 铝合金组织性能,结果表明,添加激光后成形试样整体冶金结合良好、无明显未熔合现象,且晶粒细小、力学性能提高。Wang 等^[8]采用 VP-TIG 方法研究了 5356 铝合金堆焊过程显微组织变化,结果表明,成形试样底部以柱状晶为主,随高度增加逐渐转变为等轴晶。杜乃成^[9]采用 P-MIG 方法开展了针对 5183 铝合金的电弧堆焊研究,提出采用组合过渡形式,在获得较高熔覆率的同时,能减少 Mg 的损失,并有利于铝合金成形焊道晶粒细化及接头强度提高。姜云禄^[10]基于冷金属过渡(CMT)方法研究了 5356 铝合金堆焊试样工艺与性能之间的关系,结果表明,合适的层间冷却时间可以保证成形效率和成形精度,成形试样平行成形方向上的力学性能高于垂直成形方向,固溶处理后试样的整体力学性能得到提高。针对不同电流方式 5356 铝合金 TIG 堆焊试样组织性能变化鲜有研究,基于此,作者系统研究不同电流方式 5356 铝合金 TIG 堆焊结构件沉积层与结合层组织,以及强塑性等力学性能的变化规律,为 5356-TIG 方法尽快投入实际工程应用提供理论基础和技术支撑。

1 试验

1.1 材料

选用 ER5356 铝合金焊丝,直径为 1.2 mm;选用 5052 铝合金堆焊基板,尺寸为 210 mm×120 mm×7 mm,化学成分,见表 1。利用快速装卸夹具固定四周。电弧增材成形系统包括工业机器人和焊机,电弧增材成形系统运动执行部分选用 TM1400G3,焊机选用松下 300BP4-钨极氩弧焊机(TIG),送丝装置用 YW-CRF011HAE 型数字化送丝机。堆焊方式为无脉冲交

流和脉冲交流成形两种,无脉冲交流堆焊工艺参数,如表 2 所示。脉冲交流频率为 2 Hz,峰值电流和基值电流分别为 170 A 和 100 A,对应送丝速度分别为 204、120 m/h,其余焊接参量与无脉冲电源相同。

表 1 焊丝和基板的化学成分(质量分数/%)
Table1 Chemical composition of welding wire and base material (mass fraction/%)

成分	5356	5052	成分	5356	5052
Si	0.25	0.25	Cr	0.10	0.30
Fe	0.40	0.40	Zn	0.10	0.10
Cu	0.10	0.10	Ti	0.15	0.05
Mn	0.10	0.10	Al	余量	余量
Mg	5.00	2.50			

表 2 试验工艺参数
Table 2 Experimental process parameters

参数	数值	参数	数值
焊接电流 I/A	170	弧长 L/mm	3
焊接速度 $v/(m \cdot h^{-1})$	19.2	起弧停留 t/s	0.4
送丝速度 $v'/(m \cdot h^{-1})$	204.0	熄弧延迟 t'/s	0.2
氩气流量 $q/(L \cdot min^{-1})$	15	层间温度 $T/^\circ C$	40~80

1.2 方法

堆焊结束后,在中间稳定区选取 10 mm×10 mm×10 mm 立方体试样进行组织观察,试样经打磨、抛光后用凯乐试剂(2 mLHF, 3 mLHCl, 5 mLHNO₃, 190 mLH₂O)腐蚀处理后在 OLYMPUS GX51 光学显微镜下观察显微组织。使用 Tukon 2100B 显微/维式硬度计测量堆焊截面硬度分布,载荷为 0.98 N、保压时间为 10 s、测试点间隔为 0.25 mm。依据 GB/T 2651—2008 进行焊接接头拉伸试验,拉伸试样尺寸:总长为 100 mm,标距部分长为 32 mm,宽度为 6 mm,厚度为 3 mm。拉伸试样取样位置平行成形方向,测试在 Instron 3382 型电子万能材料试验机上进行,应变速率为 10⁻² s⁻¹。使用 TESCAN-VEGA 扫描电镜进行接头拉伸断口形貌及第二相形态分布表征。

2 结果与讨论

2.1 不同电流方式堆焊结构件组织分析

图 1 为无脉冲交流电源堆焊试样稳定区组织。由图 1a 可以看出,该组织沉积层与结合层呈明显分层交替生长现象,主要归因于电弧增材成形过程逐层熔敷焊丝且每一层不同高度受热不均匀。由图 1b 可以看出,该组织呈枝晶状,主要由于结合层受再热作用而发生重熔再结晶反应,且电弧作用击碎的表面氧化层增加了凝固过程中的异质形核点。在基体上存在大量明显的黑点,规则的圆孔状黑点为气孔,形状不规则状黑

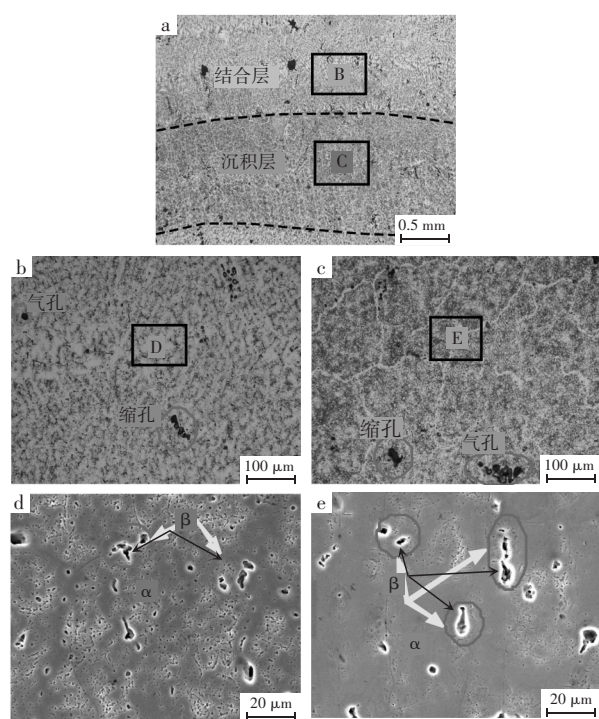


图1 无脉冲电流成形组织

Fig.1 Microstructures of sample formed by no-pulse current

点为缩孔,其尺寸为50~100 μm 。气孔形成主要是由产生的氢气以及液态金属中氢气不能充分溢出所致。氢气主要来自弧柱气氛中的水和吸附在氧化膜上的水。铝和氧的亲合力大,在空气中就能与氧化合,形成致密难熔且易吸附水的氧化铝膜,故在焊丝和沉积层上均易形成氧化膜,在电弧高温作用下吸附在氧化膜中的水分和弧柱气氛中的水分分解出氢,以分子状态被未熔化的氧化膜质点表面吸附,萌生气泡核,气泡附着在残留的氧化膜上不易脱离浮出,聚焦长大,形成集中式气孔。由于氧化膜质点密度大,沉到熔池底部,故这种气孔易在焊缝根部形成。此外,氢在液态铝合金中的溶解度远高于固态,两者相差约20倍^[11]。且铝的导热性强,在同样工艺条件下其熔合区的冷却速度是钢的4~7倍,凝固速度很快,故也不利于气泡的浮出,在铝合金凝固过程中形成气孔。部分气孔通过扩散,聚集长大,部分扩散不充分,形成分散的小气孔。缩孔形成主要与液态金属凝固过程有关,在冷却过程中,由于破碎枝晶的间隔,使液相凝固过程受阻且不均匀,导致液态金属回填不足,易在晶界处产生形状不规则的缩孔。由图1c可以看出,沉积层组织主要由粗大的等轴晶组成,这主要归因于无脉冲电流方式热输入较大,散热时间较长,热积累严重,从而经过较长时间冷却形成平均晶粒度达100~150 μm 的粗大组织,由于沉积层内部与空气接触较少,所以该区域气孔和缩孔也明显减小。

影响成形件性能的因素不仅有组织晶粒尺寸,还有第二相分布及大小,金属间化合物等因素。由图1d、e可以看出,在两个区域都存在弥散分布的第二相颗粒,结合层第二相颗粒数量明显高于沉积层。能谱分析表明这些黑色颗粒状物质主要为 $\beta\text{-Al}_3\text{Mg}_2$ 相,其中还存在少量金属间化合物 Mg_2Si 和 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$,其晶粒尺寸为5~10 μm ,有别于气孔和缩孔等宏观尺度黑点。

电弧堆焊成形中电弧电压与弧长保持不变,脉冲与无脉冲交流成形焊接速度相同,氩弧焊热效率系数为0.5,故热输入只受焊接电流影响。无脉冲交流成形电流保持170 A不变,脉冲交流成形中基值电流为100 A,峰值电流为170 A,因此,与无脉冲电流热输入相比,单位时间内脉冲电流热输入较小。

图2为脉冲交流电源堆焊试样稳定区组织。可以看出,结合层和沉积层也交替呈现(图2a)。结合层组织主要由具有明显择优取向的细小柱状枝晶组成,与无脉冲电流形成的组织相比,脉冲电流结合层气孔及缩孔等缺陷数量及尺寸等均减少,主要归因于脉冲电流热输入较小,故形成的气孔缺陷减少;脉冲电弧力使气孔在长大过程中受阻,且较低的热输入使组织快速冷却凝固,故形成的气孔及缩孔等缺陷来不及聚集长大(图2b)。沉积层组织,主要由等轴晶组成,与无脉冲电流形成的组织相比,脉冲电流沉积层晶粒尺寸明显变小,平均晶粒尺寸为50~100 μm 。这主要是由

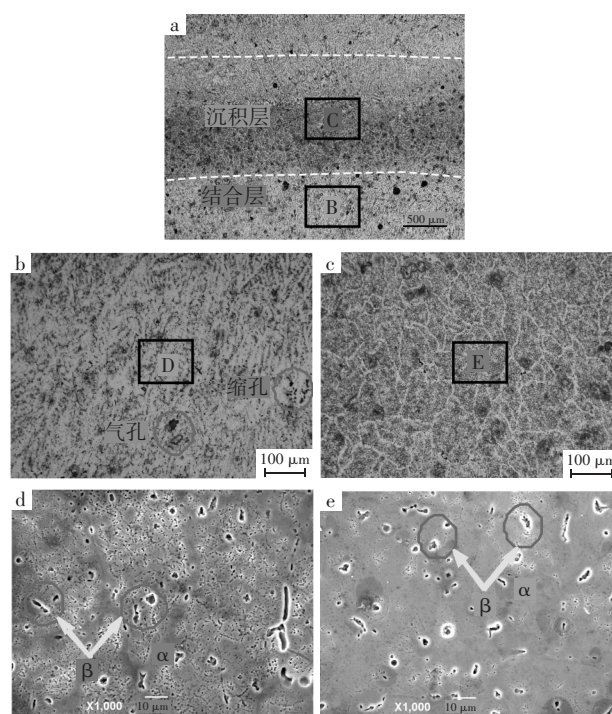


图2 脉冲电流成形组织

Fig.2 Microstructures of sample formed by pulse current

于脉冲电流单位时间内热输入较少,堆焊过程熔池受脉冲电流电弧力搅拌作用,形核率增加,快速凝固过程使晶粒长大受阻,形成较细小的晶粒(图2c)。与无脉冲电流对应区域相比,脉冲电流成形试样在两个区的第二相晶粒数量增加,晶粒尺度减小,这也与脉冲电流热输入较小有关(图2d、e)。

2.2 显微硬度分析

图3、4分别为无脉冲和脉冲电流成形试样在沉积层和结合层的显微硬度。每个试样沿垂直堆焊层方向打3条硬度线。从图3可以看出,在无脉冲电流成形试样中,沉积层硬度值比较稳定,其平均显微硬度值约为61HV±5HV,而结合层硬度值波动剧烈,较高硬度值范围与沉积层硬度值相同,而最低硬度值可达28.4HV。明显降低的硬度值主要是由于该结合层存在气孔、缩孔等缺陷,当压头处于这些位置时,压痕明显增大,对应硬度值降低。图4为脉冲电流成形试样显微硬度,与无脉冲电流成形试样硬度值变化规律类似,在沉积层硬度值稳定,其平均显微硬度值为62HV±5HV,而结合层硬度值也有较大波动,其波动范围略小于无脉冲结合层,最低硬度值约为40.3HV。两种电流成形试样硬度值对比表明,晶粒尺度等显微组织变化对沉积层硬度值变化影响较小,而脉冲电流成形试样结合层硬度值波动范围明显小于无脉冲电流成形试样,主要是由脉冲电流试样结合层气孔和缩孔等缺陷数量及尺寸减小所致。

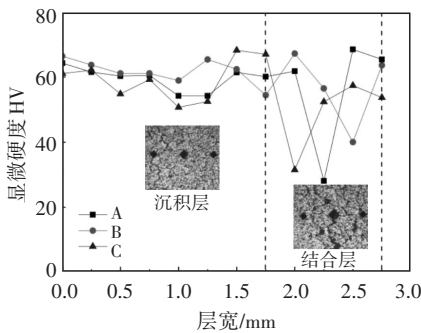


图3 无脉冲电流成形试样显微硬度
Fig.3 Microhardness of sample formed by no-pulse current

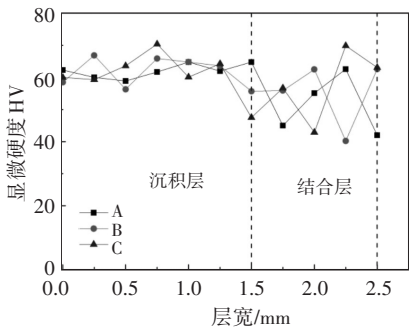


图4 脉冲电流成形试样显微硬度
Fig.4 Microhardness of sample formed by pulse current

2.3 强塑性分析

表3为两种电流方式水平方向试样强塑性试验结果。可以看出,脉冲电流成形试样平均屈服强度和抗拉强度分别为116.2 MPa和277.5 MPa,平均断面收缩率和伸长率分别为24.2%和30.4%;无脉冲电流成形试样平均屈服强度和抗拉强度分别为109.3 MPa和266.6 MPa,平均断面收缩率和伸长率分别为17.9%和25.9%。脉冲电流成形试样的强度和塑性均明显高于无脉冲电流成形试样,主要归因于沉积层晶粒尺寸和结合层缺陷的变化,脉冲电流成形试样沉积层晶粒细小,结合层缺陷较少且分布均匀,而无脉冲电流成形试样沉积层晶粒尺寸增大且结合层缺陷较多。

表3 两种热输入方式强塑性

Table 3 Strength and plasticity for two heat inputs

参数	无脉冲	脉冲
屈服强度 σ_s /MPa	109.3	116.2
抗拉强度 σ_b /MPa	266.6	277.5
断面收缩率 ψ /%	17.9	24.2
断后伸长率 δ /%	25.9	30.4

2.4 成形件断口特征分析

图5、6分别为无脉冲电流和脉冲电流两种热输入方式沿沉积层方向拉伸试样断口形貌特征。从图5a、6a可以看出,两种拉伸试样均沿切向断裂。图5b、6b为两种试样宏观拉伸断口形貌。可以看出,断口呈现大量气孔和缩孔等缺陷,缺陷较密集部位为结合层区域,两结合层之间的沉积层区域缺陷较少。沉积层与结合层断口放大形貌,如图5c、d和图6c、d所示。无脉冲电流成形试样沉积层断口为典型的等轴韧窝状,韧窝均匀,其平均尺寸为15~20 μm(图5c);图6c为脉冲电流成形沉积层断口。该断口也呈现出典型的韧窝状,韧窝尺寸小于无脉冲电流成形沉积层断口,其平均

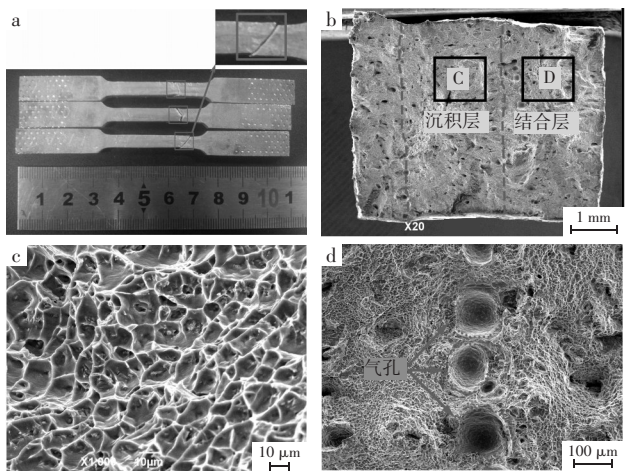


图5 无脉冲电流成形断口特征
Fig.5 Fracture of sample formed by no-pulse current

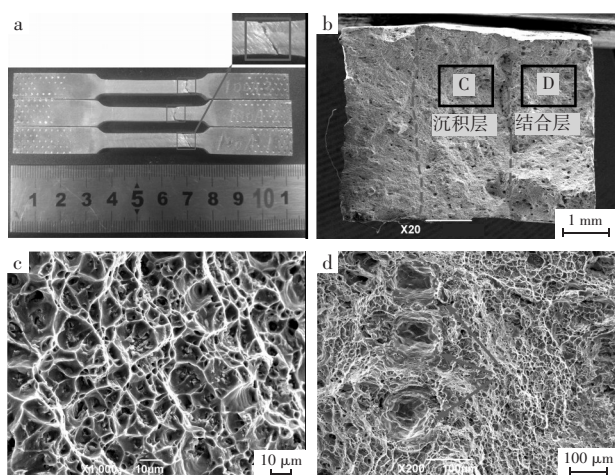


图6 脉冲电流成形断口特征

Fig.6 Fracture of sample formed by pulse current

直径为10~15 μm 。图5d为无脉冲电流成形试样结合层断口。该断口存在较多气孔,大气孔直径为50~100 μm ,表明该凝固过程中气孔发生了聚集长大,在大气孔旁边还分布有未聚集长大的微小气孔、缩孔等缺陷;图6d为脉冲电流成形试样结合层断口,该断口气孔直径略小于无脉冲电流成形断口,与此同时,缺陷的数量也减小。以上分析结果表明,两种电流方式拉伸试样均以塑性断裂为主,结合层为整个试样最薄弱部位,脉冲电流成形试样缺陷数量及尺寸均小于无脉冲电流成形试样。

3 结论

1) 无脉冲电流堆焊试样结合层组织呈细小枝晶状,在基体上存在大量尺寸为50~100 μm 的气孔和缩孔等缺陷,沉积层由尺寸为100~150 μm 的粗大等轴晶组成;脉冲电流堆焊试样结合层由具有明显择优取向的细小柱状枝晶组成,该区域气孔尺寸减小,沉积层由尺寸为50~100 μm 的等轴晶组成。

2) 无脉冲电流成形试样沉积层硬度值较稳定,约为61HV $\pm$ 5HV,而结合层硬度值波动剧烈,其最低硬度

值可达28.4HV;脉冲电流成形试样与无脉冲电流成形试样硬度值变化规律类似,其结合层最低硬度值约为40.3HV。

3) 脉冲电流成形试样水平方向强度和塑性均高于无脉冲电流成形试样,两种拉伸试样均沿切向以韧性断裂为主,结合层为整个试样最薄弱部位,沉积层断口呈典型等轴韧窝状。

4 参考文献

- [1] DAVID A. Powering up on powder technology[J]. Metal Powder Report, 2015, 70(6):285-289.
- [2] HERZOG D, SEYDA V, WYCISK E, et al. Additive manufacturing of metals[J]. Acta Materialia, 2016, 117(15):371-392.
- [3] GENG Haibin, LI Jinglong, XIONG Jiangtao, et al. Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2016, 22(6):1-12.
- [4] 柏久阳, 范成磊, 杨雨晨, 等. 2219铝合金TIG填丝堆焊成形薄壁试样组织特征[J]. 焊接学报, 2016, 37(6):124-128.
- [5] 曾涛, 晁耀杰, 邹龙江, 等. 5A06铝合金活性TIG焊接头组织与性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(4):82-86.
- [6] 董力群, 梁景恒, 毛镇东, 等. 6A01铝合金激光-MIG复合焊和MIG焊接头性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(2):60-63.
- [7] 孙承帅, 张兆栋, 刘黎明. 激光功率对5356铝合金激光诱导MIG电弧增材制造组织性能的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(9):13-18.
- [8] WANG Huijun, KOVACEVIC R. Variable polarity GTAW in rapid prototyping of aluminum parts [C]//Proceedings of the 11th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium, USA:Austin, 2000:360-376.
- [9] 杜乃成. 弧焊机器人金属快速成形研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
- [10] 姜云禄. 基于冷金属过渡技术的铝合金快速成形技术及工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [11] 孟庆森, 王文先, 吴志生. 金属材料焊接基础[M]. 北京:化学工业出版社, 2006:348-352.