

铝合金电弧增材制造技术研究发展现状

营梦, 郭纯, 李云, 康泰宇

安徽科技学院机械工程学院 安徽凤阳 233100

摘要: 电弧制造技术相对于工业制造来说, 是很重要的一门制造技术, 同时电弧制造技术又隶属于增材制造技术, 是其一个重要的分支。近年来, 由于工业快速发展, 对制造业加工质量的要求日渐加强, 这使得人们对电弧增材制造技术的投入加大力度, 使其进入飞速发展时期。结合电弧增材制造技术工作环境, 以及电弧制造技术加工出来的构件类型, 得出在加工较复杂的工件时, 其加工所需成本较低、短时间内能快速成形工件等高效加工成形特点, 综述了铝合金电弧增材制造技术的研究现状。

关键词: 电弧增材制造; 铝合金; 研究现状

1 序言

电弧增材制造 (WAAM) 类似于3D打印技术, 通过应用电弧产生的热量来提供工作时的热源, 将金属丝材熔化, 并按预先设定的路径将熔融金属丝材一层一层地堆积在基板上, 冷却成形为最终设计的零件^[1], 因此几乎可以满足任意复杂零件的制造, 且致密度高、冶金结合性能好、化学成分均匀、力学性能好。

该技术成形材料主要集中在钛合金、不锈钢、铝合金等。铝合金是在生铝之中添加碳元素以及其他合金化元素而形成的一种合金, 因其具有良好的可塑性, 以及塑性较强, 适合电弧增材制造技术, 故可作结构成形材料使用^[2-6], 随着航天航空等重要技术领域的进一步革新和发展, 这对复杂铝合金构件的制造技术提出了新的要求, 因此铝合金的增材制造技术成为了研究的重点。图1所示为利用WAAM技术制作的铝合金水泵转子。



图1 利用WAAM技术制作的铝合金水泵转子

2 电弧增材制造技术概述

2.1 电弧增材制造技术定义

增材制造技术在加工时, 所成形状是以数字模型为基础, 以导程线路为加工工序进行加工, 使材

料层层堆积, 形成规定形状, 从而制造出所需的零部件, 电弧增材制造热源是电弧, 并以Ar等惰性气体保护, 通过不断熔化的焊丝沿着计划路径逐层沉积, 最终得到相似的形状^[7-11]。一般可将电弧制造技术分为两种: 一种是非熔化极气体保护焊增材制造, 如钨极惰性气体保护焊, 以钨针作为电弧载体, 其热源和送丝相互独立, 电弧稳定, 飞溅小。另一种是熔化极气体保护焊增材制造, 其原料是丝材, 与GTAW相比, 具有热量集中、工作效率高、沉积快、堆焊结构好, 以及热输入小等优点^[12-19]。Fronius针对熔化极气体保护焊的焊接飞溅与电弧不稳定的缺点, 研发了冷金属过渡 (CMT) 技术, 其具有热输入小、无飞溅、电弧稳定的特点, 在材料制造中具有独特的优势, 因此目前GMAW技术又分

基金项目: 安徽省高校协同创新项目 (GXXT-2019-022), 安徽省自然科学基金项目 (1908085QE174), 安徽科技学院人才项目 (RCYJ201905)。

通信作者: 郭纯, 男, 博士, 副教授 (高级工程师), 主要研究方向为表面工程、增材制造、焊接。邮箱: guochun@ahstu.edu.cn。

为普通熔化极气体保护焊和CMT技术。

2.2 电弧增材制造技术特点

电弧增材制造（见图2）与其他正常制造技术的重要区别在于通常由常见的焊接电源作为电弧热源，如熔化极气体保护焊、钨极氩弧焊等焊接设备。其与激光、电子束热源相比，成本低，适应性强^[20-24]。

电弧增材制造具有如下特点：

1) 智能化制造：在无需模具、工装夹具和刀具的情况下，可实现智能化制造成形。

2) 周期短：通常只需几十分钟到数个小时，制造周期短，特别适合单件或小批量生产。

3) 灵活性和适应性强：传统减材制造复杂零件需5轴以上数控机床，不仅成本高，而且受刀具、零件体积及形状限制，甚至部分复杂结构依旧难以加工。

4) 材料利用率高：零件是通过逐层堆积进行增材制造，而不是传统形式的减材制造，成形的零件只需简单的加工或者表面处理就可使用。

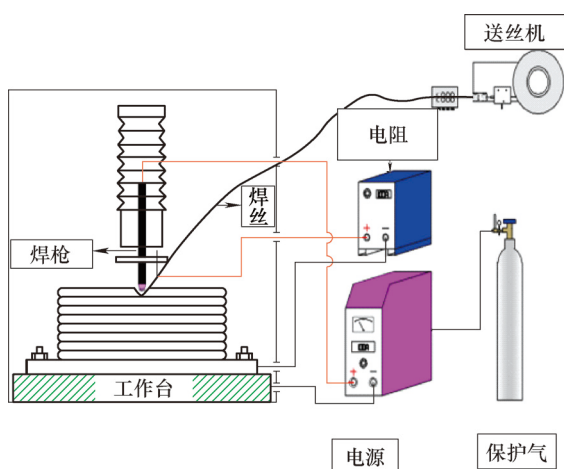


图2 WAAM工作原理

2.3 电弧增材制造技术应用

电弧增材制造相对于其他制造技术来说，其特点如下：制造周期短；自动化程度高；原材料利用率高，对零件尺寸的限制少。

电弧增材技术虽没有普遍使用，但是在少量重要领域，电弧增材技术应用确实很多，如：全焊缝金属成分高，密度高，力学性能好，已用于生物医学、航空航天等领域，并且有望在更多领域得到广泛使用^[25-29]。

英国学者在焊接工程研究中心做了大量研究，

利用堆焊技术将金属形状沉积技术应用于飞机机身快速制造上，这使得许多航天企业都使用WAAM技术，并使直接成形大型结构件越来越方便，缩短了大型结构件的研制周期^[30]。

针对航空航天领域的铝合金轴承、机舱截面、框架梁及格栅等典型结构零件，首都航天机械有限公司、北京航兴机械制造有限公司、华中科技大学等都进行了研究，并进行了应用试生产，如管道支撑件（2219合金）、壳体模拟零件（4043合金）、框架梁结构（5B06合金）及网格结构（4043合金）等^[31-35]。

3 铝合金电弧增材制造技术研究发展现状

利用离散型堆积原理，增材制造将零部件进行加工，根据加工路线进行层层堆积成形，从而将零件的三维模型进行成形，然后再进行材料逐层填充成为一种快速成形技术。该技术可制造出致密度高、结合性能好、几何形状精确、表面光滑的试件，能够满足铝合金零件呈现出的结构轻量化、性能复合化等优势^[36-41]。

3.1 国外研究现状

20世纪初，增材制造这个概念是来自美国的一工程师提出的，他通过堆焊的方法来进行金属工件堆积成形制造的技术^[14]，但之后该技术由于各种原因并未得到推广与应用，这是科技的一次滞后性或者停止性发展。

(1) 基于GMAW的铝合金电弧增材制造技术研究现状 早在1980左右，国外学者便开始对GMAW快速成形技术进行了大量研究。研究基础是熔化极气体保护焊接，具有许多相比于其他技术的优点，比如快速成形技术所需机械结构简单、生产效率高等优点，但也有其他有待提升的方面。例如，同时也具有热输入量大、需耐高温加工机械，以及成形精度低等缺点。

ORTEGA A G等^[42]通过采用基于霍尔效应的电流传感器来记录增材过程中的所有电流和电压波形，以更好地掌握其几何形状，从而提高工艺参数。进而更好地提升CMT增材制造成形件的尺寸精度；还使用优化的参数进行了100层堆叠的铝合金CMT增材制造试验，从而获得具有由标准偏差估算的宽度精度的100层铝合金CMT薄壁零件，由于添

加多层薄壁时的热量累积,需要逐渐提高焊接速率以维持恒定的层宽。

近年来,针对GMAW,以及电弧增材制造的成形零件结构和性能的研究工作仅处于结构分析、描述相关性能规律的阶段,缺少大量的试验数据来获取通用规律并进行更深一层的理论和机理分析。因此,如何加深机理分析以及高效提高铝合金GMAW零件的力学性能,将成为接下来研究工作的重点之一。

2008年,韩国KANGA B Y等^[43]采用在熔池区域供给更换变动保护气体的方法,解决了铝焊接及增材制造时产生的氢气孔问题。结果表明,当纯Ar与33%Ar+67%He混合气体分别作比较时,在Ar气和He气交替保护作用下,气孔率显然更低,如图3所示。因此,利用此方法可以很大程度地减少铝合金焊接及增材制造过程中氢气孔产生趋势,但是该方法对装置要求较高,且气体成本也较高。

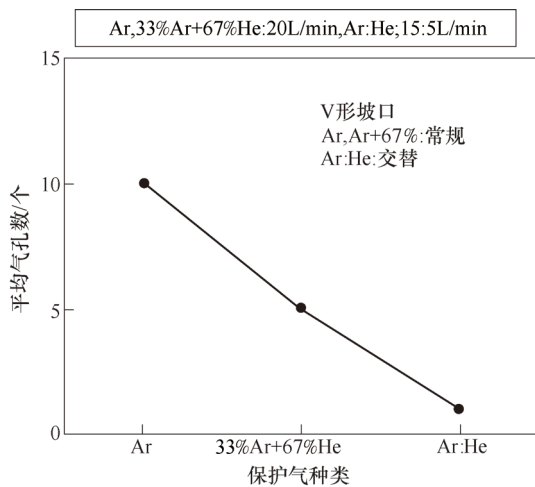


图3 不同保护气类型下的气孔数量^[43]

与传统的气体供应方法相比,该技术通过在相同的焊接条件下交替供应Ar和He来提供最低的焊接孔隙率;在相同的焊接条件下,与常规方法提供Ar和Ar+67%He的焊接相比,Ar和He交替供给进行的焊接产生了最深和最宽的焊接熔深曲线;与Ar+67%He相比,Ar和He的交替供给具有减少焊接孔隙率和改善焊接形状的优势。

当然,上述研究并不是孤立存在的,通过开发测试平台和系统来进一步研究工艺与性能之间的关系,以便在过程优化中获得更直观的结论。

(2) 基于GTAW铝合金电弧增材制造技术研

究现状 基于GMAW增材制造研究的同时,国外许多研究者也将研究方向转至基于GTAW的电弧增材制造技术,因其热输入较GMAW小,成形精度会更高。

美国Southern Methodist大学OUYANG等^[44]采用GTAW工艺堆焊5356铝合金构件进行研究,结果表明,影响零件尺寸精度和表面质量的主要因素有电弧长度、基板预热温度和层间温度,图4所示为快速成形件。挪威科技大学相关研究人员利用电弧增材制造技术制备5183铝合金薄壁结构,结果表明,成形样件微观组织和力学性能良好,但是需要进一步优化工艺参数,以减少气孔和热裂纹产生。

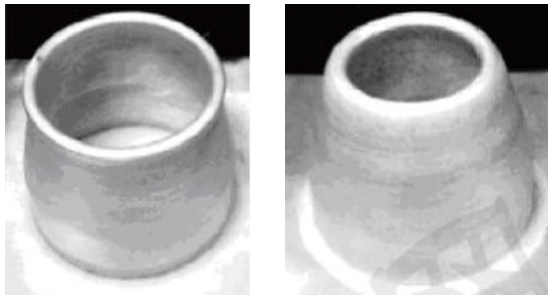


图4 快速成形的零件^[44]

CHO等^[45]利用GTAW系统探究了铝合金变极性热输入的影响,成果显示,钨极尖端磨损对脉冲电弧的稳定性有一定的干扰。

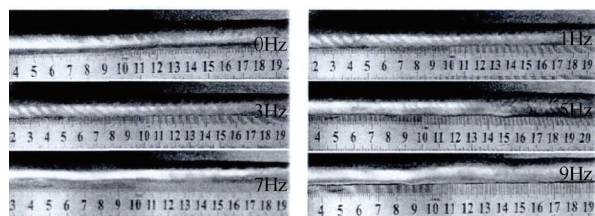
综上所述可以看出,近两年的研究主要还是通过不同的工艺试验对工艺方法进行优化,探究工艺过程对组织性能的影响因素。

3.2 国内研究现状

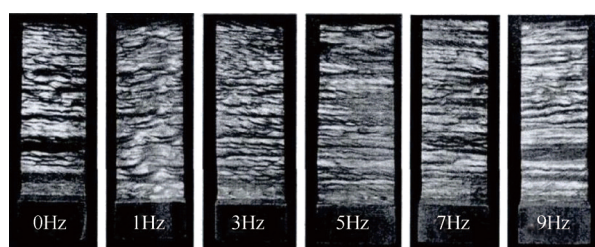
(1) 基于GMAW的铝合金电弧增材制造技术研究现状 南京理工学者何磊^[46]以铝合金双脉冲GMAW为研究着手点,进行双脉冲增材制造工艺试验,当加以低频脉冲时,电弧的特性对增材试样有诸多影响,研究结果表明,双脉冲GMAW增材制造技术可明显减少试样中的气孔数量,试样的显微组织主要为等轴晶,晶粒尺寸随着低频频率的增加先减小后增大,频率为1Hz时晶粒尺寸最小,当电弧特性从-10%变化到+10%时,在-3%和+3%时增材试样的力学性能达到最大值。图5所示为不同低频频率下多层单道直壁体外观形貌。

该项研究中双脉冲电弧增材制造与传统的增材制造方法相比,制造过程中可以更有效地去除铝合

金中的气孔。另外,当低频频率为3Hz时几乎无明显气孔,而直流脉冲堆敷的直壁体截面在底部和顶部有些许氢气孔存在,为类似研究提供了良好的参考。



a) 不同低频频率下直壁体的主视图



b) 不同低频频率下直壁体的俯视图

图5 多层单道直壁体外观形貌^[46]

刘一博等^[47]采用CMT技术研究了关于纵向磁场在铝/钢增材制造过程中的相关机理,试验表明,通过附加磁场可以变更电弧等离子体的运动行径,从而影响了电弧在基板表面和熔池内部的热能传输。结果表明,CMT解决了GMAW飞溅和电弧不稳定的问题,但是由于其有限的焊滴转移形式,CMT技术不适用于需要重叠附加沉积层的工作条件,这限制了其在厚壁领域的使用。

国内对GMAW成形工艺和表面质量的研究主要涉及成形工件的工艺优化,包括电弧特性和外部磁场的使用。从优化工艺参数方面来说,当前主要利用试验方法,面对各种不同的材料和焊接方法,选取重要的影响因素。

(2) 基于GTAW的铝合金电弧增材制造技术研究现状 伴随着工业现代化的进程,越来越多的国内企业、高校相继以材料成形工艺与控制开展了对电弧增材制造技术的研究。

通过实时监控,反馈和对堆积状态的在线控制,可以实现精确控制电弧增材制造的过程。从目前的文献资料来看,因为其以灵敏度和清晰度较高,以及模仿人类视觉行为的优点而成为最有前途的感测方法之一。上海交通大学的侯震^[48]以铝合金在脉冲

GTAW焊接过程中电弧声信号的熔透特性为研究起点,进行大量试验研究,通过推算与演练,分析出通透性识别系统模型对工件加工时的焊接有着很大影响,这套时域-频域特征的提取与识别系统,并创建了神经网络预测模型,在此基础上创建了声波信号和熔透状态相关性模型,并研发了相关的软件系统,焊件的焊缝成形质量得到了显著的提升。与主动视觉传感对比,被动视觉传感不需要增加额外光源,直接利用弧光照明检测区域。WANG等^[49]采用钨极氩弧热源增材制造研究了5356铝合金零件,利用CCD被动视觉传感对电弧弧长进行监测,避免多重堆积下钨极尖端到堆积层上表面间隔发生变化。

随着传感技术、图像处理技术和机器视觉识别技术的不断发展,视觉传感在焊接装配检测、过程监控及接头质量评价等方面发挥了越来越重要的作用。

哈尔滨工业大学的学者^[50]也对此做出大量研究,当研究材料为铝合金时,试验表明,4043铝合金零件内部存在大量垂直于焊缝方向的柱状晶,同时还存在枝晶和层间偏析现象,试样拉伸性能不存在各向异性现象。同时对2319铝合金增材(见图6)试验建立了焊缝层宽尺寸与工艺之间预测模型,该模型预测尺寸精度较高,误差大多在5%以内。



图6 2319铝合金成形件^[51]

综上所述,影响铝合金电弧增材制造过程因素很多,仅通过建立工艺参数和成形尺寸的模型精确控制成形尺寸比较困难。为了提高成形工艺的稳定性,提高成形尺寸的精度,有必要开发合适的传感技术来实时监测堆积宽度和高度,并通过设计智能控制器实现堆积工艺参数的自动调节。

4 存在的问题及发展趋势

伴随着航空航天产业发展,铝合金结构件的发展方向也已经朝着高精度尺寸和复杂形状发展,这使得对铝合金部件的制造技术有了更高的要求,故

在技术上需要采用更高的制造技术,以取代目前该技术上的关键性问题,以确保研发出来的部件结构性更加可靠。

目前,电弧增材制造技术存在的问题:

- 1) 热输入量大,对耐热性材料要求过高。
- 2) 复杂的热循环导致残余的内应力过大,造成增材制造过程中熔池不稳定。
- 3) 电弧不稳定,导致成形零件精度偏低,故需进行后续精加工。

因此,铝合金电弧增材制造技术需开展研究主要有:①对成形过程进行计算机仿真。②建立残余内应力预测模型。③进行工艺优化,增强工艺技术。

纵观国内外,目前对铝合金电弧增材制造技术的研究还处于初步研究阶段,仍然需要进行大量研究与试验推算,从而来进一步发展。当然,现阶段也取得了一定的成果,比如现如今,国外研究人员利用电弧增材制造技术成功研制出大型的金属结构零部件。然而,如何实现铝合金电弧增材制造技术加工时的有效、准确地控制,仍然处在待研发阶段,相信不久的未来,这一难题将会被突破,电弧增材技术将更加有效地加工出较精细的工件。

参考文献:

- [1] 任学磊,袁涛.丝材电弧增材制造常用材料及其缺陷研究进展[J].金属加工(热加工),2020(7):6-10.
- [2] 黄旺福,黄金刚.铝及铝合金焊接指南[M].长沙:湖南科学技术出版社,2004.
- [3] 熊艳才,刘伯操.铸造铝合金现状及未来发展[J].特种铸造及有色合金,1998(4):1-5.
- [4] 姜鹏举.5356铝合金电弧增材制造成形控制及性能研究[D].秦皇岛:燕山大学,2019:1-72.
- [5] 从保强,苏勇,齐铂金.铝合金电弧填丝增材制造技术研究[J].航天制造技术,2016(3):29-32.
- [6] 李玉飞.电弧增材制造5B06铝合金工艺及性能研究[D].武汉:华中科技大学,2017:1-72.
- [7] 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,2013:20-21.
- [8] 从保强,丁佳洛.CMT工艺对Al-Cu合金电弧增材制造气孔的影响[J].稀有金属材料与工程,2014,43(12):3149-3153.
- [9] 洪海涛,韩永全,童嘉晖,等.铝合金 VPPA-MIG 复合焊接电弧形态及伏安特性[J].焊接学报,2016(37):65-69.
- [10] 熊俊,薛永刚,陈辉,等.电弧增材制造成形控制技术的研究现状与展望[J].电焊机,2015,45(9):45-50.
- [11] 郝轩,黄永德,陈伟,等.基于 CMT 技术的铝合金电弧增材制造研究现状[J].精密成形工程,2018,10(5):88-94.
- [12] 张江帅.铝合金电弧增材制造技术研究现状及进展[J].中国化工贸易,2018(3):61-62.
- [13] 陈殿贺,李巍.铝合金薄壁铸件壳体机加工工艺研究[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2015,33(1):10-13.
- [14] MEHNEN J, DING J, LOCKETT H, et al. Design study for wire and arc additive manufacture [J]. International Journal of Product Development, 2014, 19 (1/2/3): 2-20.
- [15] 黄春平,黄硕文,刘奋成.金属材料增材制造技术[J].金属加工(热加工),2016(2):34-38.
- [16] 李涤尘,田小永,王永信,等.增材制造技术的发展.全国特种加工学术会议.2011:20-22.
- [17] BERMAN B. 3-D printing: The new industrial revolution[J].Business Horizons, 2012, 55(2):155-162.
- [18] 左为,李恒,丁敏.电弧增材制造技术研究现状与发展趋势[A].第二十一次全国焊接学术会议论文集[C].北京:机械工程学会,2016.
- [19] 王世杰,王海东,罗锋.基于电弧的金属增材制造技术研究现状[J].金属加工(热加工),2018(1):19-22.
- [20] 江宏亮,姚巨坤,殷凤良.丝材电弧增材制造技术的研究现状与应用[J].热加工工艺,2018,47(18):25-29.
- [21] 黄丹,朱志华,耿海滨,等.5A06 铝合金 TIG 丝材-电弧增材制造工艺[J].材料工程,2017(3):66-72.
- [22] 尹玉环,胡绳荪,刘望兰,等.TIG 电弧快速成形 5356 铝合金零件的研究[J].兵器材料科学与工程,2008,31(4):55-58.
- [23] 张瑞.基于 CMT 的铝合金电弧增材制造(3D 打印)技术及工艺研究[D].南京:南京理工大学,2016:20-22.

- [24] 黄卫东.如何理性看待增材制造(3D 打印)技术[J].新材料产业, 2013 (8) : 9-12.
- [25] 刘妙然.铝合金薄壁激光-电弧复合增材制造工艺研究[D].大连: 大连理工大学, 2019: 1-62.
- [26] 林鑫, 黄卫东.应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J].中国材料进展, 2015, 34 (9) : 684-688.
- [27] 耿海滨, 熊江涛, 黄丹, 等.丝材电弧增材制造技术研究现状与趋势[J].焊接, 2015 (11) : 17-21.
- [28] 黄秋实, 李良琦, 高彬彬.国外金属零部件增材制造技术发展概述[J].国防制造技术, 2012 (5) : 26-29.
- [29] 夏然飞.电弧增材制造成形尺寸及工艺参数优化研究[D].武汉: 华中科技大学, 2016.
- [30] 田彩兰, 陈济轮, 董鹏, 等.国外电弧增材制造技术的研究现状及展望[J].航天制造技术, 2015 (2) : 78-86.
- [31] 李权, 王福德, 王国庆, 等.航空航天轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术[J].航空制造技术, 2018, 61 (3) : 74-89.
- [32] 郭帆.铝合金预热焊丝 MIG 焊工艺特性研究[D].哈尔滨工业大学, 2019.
- [33] 潘龙威, 董红刚.焊接增材制造研究新进展[J].焊接, 2016 (4) : 27-32.
- [34] 陈亚莉.铝合金在航空领域中的应用[J].有色金属加工, 2003, 32 (2) : 11-14.
- [35] 王忻凯.铝合金搅拌摩擦增材制造工艺研究[D].南昌: 南昌航空大学, 2015: 1-62.
- [36] 张俊红.铝合金双脉冲焊电流波形调制技术及在增材制造中应用[D].广州: 华南理工大学, 2020.
- [37] 孙红叶, 从保强, 苏勇, 等.A1-6.3Cu铝合金电弧填丝增材制造成形与组织性能[J].航空制造技术, 2017 (14) : 72-76.
- [38] 郝轩, 黄永德, 陈伟, 等.基于 CMT 技术的铝合金电弧增材制造研究现状[J].精密成形工程, 2018, 10 (5) : 88-94.
- [39] 党晓玲, 王婧.增材制造技术国内外研究现状与展望[J].航空精密制造技术, 2020, 56 (2) : 35-38.
- [40] 陈殿贺, 李巍.铝合金薄壁铸件壳体机加工工艺研究[J].沈阳师范大学学报(自然科学版), 2015, 33 (1) : 10-13.
- [41] BROWN D. The effect of electromagnetic stirring and mechanical vibration on arc welding[J].Welding Journal, 1962, 41 (2) : 41-50.
- [42] ORTEGAAG, GALVAN LC, DESCHAUXBEAUME F, et al.Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al5Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process[J].Science & Technology of Welding & Joining, 2017: 1-17.
- [43] KANG B Y et al. Characteristics of alternate supply of shielding gases in aluminum GMA welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (10) : 4716-4721.
- [44] OUYANG J H, WANG H, KOVACEVIE R. Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: Process control and microstructure[J].Materials and Manufacturing Processes, 2002, 17 (1) : 103-124.
- [45] CHO J, LEE J J, BAE S H. Heat input analysis of variable polarity arc welding of aluminum[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015 (81) : 1273-1280.
- [46] 何磊.A1-Mg 铝合金双脉冲电弧增材制造技术及工艺研究[D].南京: 南京理工大学, 2017.
- [47] 刘一搏, 张鸿名, 孙清洁, 等.磁场作用下铝/钢 CMT 焊接温度场及熔池流动行为[J].机械工程学报, 2018, 54 (2) : 48-54.
- [48] 侯震, 许燕玲, 黄色吉等.视觉传感技术在机器人焊接中的应用[J].上海交通大学学报, 2016, 50(S1): 55-58.
- [49] WANG H J, JIANG W H, OUYANG J H, et al. Rapid Prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004 (148) : 93-102.
- [50] 王计辉.2219 铝合金交流 TIG 堆焊成型技术研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

MW 20210605