

铝合金增材制造技术研究进展

陈伟, 陈玉华, 毛育青

(南昌航空大学, 南昌 330036)

摘要: 铝合金广泛的应用市场和增材制造快速成形的优势, 使铝合金的增材制造技术成为研究的热点之一。从铝合金增材制造技术的角度出发, 总结了国内外铝合金增材制造所使用的不同工艺方法, 比较了各种方法的研究现状和最新成果, 并且重点总结了铝合金增材制造的成形控制问题, 对铝合金增材制造技术未来的研究热点和发展方向提出了预测。

关键词: 铝合金; 增材制造; 工艺方法; 成形控制

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.034

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)05-0214-06

Research Progress in Additive Manufacturing Technology of Aluminum Alloy

CHEN Wei, CHEN Yu-hua, MAO Yu-qing

(Nanchang Hangkong University, Nanchang 330036, China)

ABSTRACT: The wide application of aluminum alloy and the advantages of rapid formation make the technology of aluminum alloy additive manufacturing become one of the research hotspots. From the perspective of aluminum alloy additive manufacturing technology, this paper summarized the different technological methods used in the manufacture of aluminum alloy additive at home and abroad, compared the research status and latest achievements of various methods, and summarized the forming control problems in additive manufacturing and predicted the future research hotspots and development direction of aluminum alloy additive manufacturing.

KEY WORDS: aluminum alloy; additive manufacturing; process method; forming control

增材制造技术又称为快速成形技术、3D 打印技术。与传统加工方式相比, 增材制造技术能够直接近净成形, 无需模具, 因其产品从设计到生产的周期短、成本低等特点, 成为高校、科研院所的研究热点^[1-2]。铝合金密度低、强度较高、塑性好, 具有优良的导电性、导热性和抗腐蚀性, 在航空航天、交通运输等领域具有广泛的应用前景。随着产品技术水平的不断提高和研制周期的不断缩短, 对复杂精密铝合金构件的制造技术提出了新的要求, 不仅要求制造技术高效、快速, 而且还要具有随装备设计变化而变化的快速响

应能力, 以及对复杂精密构件生产制造的灵活适应性。传统的制造技术显然难以满足上述要求, 因此, 开发铝合金的增材制造技术成为研究的热点之一。近些年, 国内外学者从工艺方法、成形组织、力学性能、理论模型建立以及后续的加工等方面深入研究了铝合金增材制造技术的可行性, 获得了良好的效果。

1 铝合金增材制造技术的工艺方法

由于铝合金的种类众多, 不同类型的铝合金在不

收稿日期: 2017-07-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51265042)

作者简介: 陈伟 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电弧增材制造技术。

通讯作者: 陈玉华 (1981—), 男, 教授, 硕导, 主要研究方向先进材料连接、材料连接新工艺、新方法等。

同的增材制造工艺方法中获得的性能有一定差异。根据增材制造设备工作原理和热源类型的不同,目前国内针对铝合金的增材制造技术,主要的工艺方法有激光增材制造铝合金技术、电弧增材制造铝合金技术、电子束增材制造铝合金技术、激光-电弧复合增材制造铝合金技术、超声波增材制造铝合金技术和搅拌摩擦增材制造铝合金技术等。

1.1 激光增材制造铝合金技术

由于部分铝合金对激光存在较大的折射率,影响了激光增材制造在铝合金上的广泛应用。国内外目前使用激光作为热源研究铝合金的增材制造技术仅局限于铸造铝合金系列或者焊接性较好的铝合金。主要材料有 AlSi10Mg^[3-5], AlSi12Mg^[6], 7075^[7-9]。朱小刚等^[3]采用激光选区预铺粉的方式增材制造 AlSi10Mg 合金,分析了显微组织、拉伸性能、冲击性能以及倾斜件的成形质量,得出显微组织在激光扫描方向上存在各向异性;抗拉强度在垂直于激光选区熔化方向优于平行于激光选区熔化方向;当倾斜角度不大于 45° 时,倾斜面成形质量较好,当倾斜角度大于 50° 时,倾斜面易出现坍塌,难以成形。Marina Cabrini 等^[4]利用激光直接沉积,获得 AlSi10Mg 试样,从表面粗糙度、孔隙率和成形时表面的氧化膜厚度研究了 AlSi10Mg 增材试样的耐腐蚀性能,结果发现,表面粗糙度越高,孔隙率越大,均会导致抗腐蚀性能下降;而成形时表面形成的氧化膜能提高耐腐蚀性能。I. Maskery 等^[5]使用 X 射线断层扫描技术定量分析了激光选区熔化制造的 AlSi10Mg 的孔隙率,孔隙率的形成与熔池温度有直接关系,通过改变扫描策略和脉冲宽度可以获得质量最佳的 AlSi10Mg 增材制造试样,对比热处理后的试样,发现 AlSi10Mg 的显微组织和硬度发生改变,但是孔隙的数量、形状、大小和位置都不会因为热处理而改变,得出 AlSi10Mg 零件的性能和失效主要取决于微观组织和孔隙率。

对于 AW 7075 铝合金,国外也有学者进行了激光增材制造的相关研究。Kaufmann N 等^[7]通过激光送粉制备 AW 7075 铝合金,发现所有试样内部均产生热裂纹,裂纹方向绝大多数沿增材垂直方向产生,且发现预热铝粉对裂纹的产生没有明显改善,内部裂纹形貌见图 1。W. Reschetnik 等^[8]直接使用激光进行沉积 AW 7075 铝合金,研究了 AW 7075 铝合金抗拉强度和疲劳裂纹曲线,最大抗拉强度只有 200 MPa 左右,在应力比 $R=0.1$ 情况下,疲劳寿命远低于传统制造的铝合金性能,分析认为内部的裂纹是影响性能的主要原因。Maria L. Montero Sistiaga 等^[9]在前人基础上,在 AW 7075 铝合金粉末中按照合金比例添加质量分数为 4% 的 Si 元素,来降低熔融温度,发现 Si 元素能有效降低微裂纹,提高合金的流动性。时效

处理后的 AW 7075 增材制造铝合金硬度达到 (171 ± 4) HV,与传统制造 T6 态下的 AW 7075 铝合金硬度值 (175HV) 相差不大。

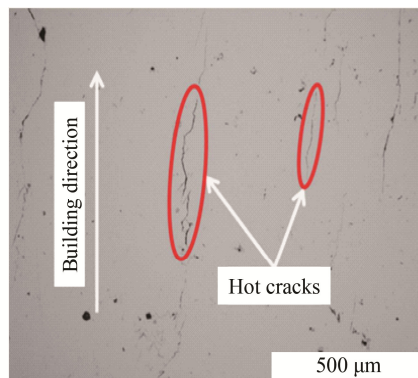


图1 激光增材制造技术制备 7075 铝合金中产生的热裂纹
Fig.1 Hot cracks in 7075 aluminum alloy by laser additive manufacturing

使用激光作为热源的铝合金增材制造技术,对于 AlSi10Mg, AlSi12Mg 等铸造铝合金,决定试样力学性能的主要因素是增材内部区域的孔隙率,控制孔隙率的比例,是获得优良增材制造铝合金产品的前提。对于 AW 7075 等变形铝合金,AW 7075 合金元素含量多,凝固结晶温度区间范围宽,有较大的裂纹敏感性,增材凝固冷却过程中产生的收缩应力超过该状态下金属的强度,即会产生热裂纹,通常加入 Si, Mg 等元素,降低熔点,形成具有熔点较低且固液相凝固区间较小的液态熔池,避免裂纹的产生;同时,适当减小激光功率,降低热输入量,能有效减少 AW 7075 合金凝固过程中产生裂纹等缺陷。

1.2 电弧增材制造铝合金技术

电弧增材制造技术实质是将气体保护焊的方法优化后,应用到增材制造领域。目前将电弧作为热源的增材制造工艺众多,主要有熔化极惰性气体保护焊接(MIG)、钨极惰性气体保护焊接(TIG)以及等离子弧焊接电源(PA)等,通常使用送丝的方式进行填充,完成增材制造的过程。电弧增材制造技术最大优势是成本低、熔敷率高、生产周期短。

对于电弧增材制造铝合金技术,国内学者的研究主要偏向于铝合金增材制造的成形工艺和力学性能。姜云禄^[10]采用 CMT 设备研究了 5356 铝合金的成形工艺,分析了电流、冷却时间、成形速度、提升高度对成形质量的影响,并采用固溶处理解决了增材区域不同方向上抗拉强度的差异,最终 CMT 增材制造 5356 铝合金的抗拉强度稳定在 275 MPa 以上,但未解释固溶处理前力学性能各向异性的原因。黄丹等^[11]使用 TIG 焊机作为热源,研究 5A06 铝合金的成形规律以及组织特征,第 1 层成形高度为最大达 3.4 mm,第 2—7 层为因为受热为不稳定区域,第 8 层后每层

高度稳定在 1.7 mm 左右。层间组织为细小的树枝晶和等轴晶；层间结合处组织最粗大，为柱状树枝晶；顶部组织最细小，由细小的树枝晶转变为等轴晶。孙红叶等^[12]使用复合超高频脉冲方波变极性钨极氩弧焊(HPVP-GTAW)作为热源，进行 Al-6.3Cu 合金的电弧填丝增材制造，分析了 Al-6.3Cu 合金构件内部组织为层状等轴晶粒，抗拉强度最大达到 261 MPa，相比于普通的变极性钨极氩弧焊抗拉强度 248 MPa 有所提升。从保强等^[13]研究了 CMT 工艺方法和保护气体流量对 Al-Cu 合金气孔的影响，在 CMT-PADV 工艺下，低热输入量和电弧对铝合金填充丝表面氧化膜的高效清理作用可减少甚至消除气孔陷。柏久阳等^[14]采用 TIG 焊机增材制备了 4043 铝合金试样，得出组织以柱状树枝晶为主，存在枝晶偏析和连续层间偏析，认为 4043 铝合金主要强化方式是固溶强化和纯铝基体的强度，两者不存在方向性，故电弧增材制造 4043 铝合金不存在力学性能的各向异性。

国外研究中，Amberlee S. Haselhuhn 等^[15]研究了使用低成本的 GMAW 作为热源制备了 1100, 4043, 4943, 4047, 5356 系列铝合金试样。通过拉伸和压缩试验，结合显微组织分析，对增材制造不同铝合金的力学性能进行了评价。得出 4000 系列合金孔隙率最低，强度最高，1100 系列孔隙率低，张力和压缩比最小，5356 铝合金孔隙率最大，导致 5356 试样和锻件相比性能差距较大，并且认为 4000 系列铝合金适合使用电弧增材的方法制备。

电弧增材制造铝合金尚没有足够的数据证明温度场的凝固过程，对工艺的改善没有足够的理论依据。电弧熔化焊丝形成的熔池是动态非均匀熔化/凝固过程，直接导致增材成形尺寸难以实现精确控制，表面粗糙度高，需要后续加工才能形成能够使用的结构件。

1.3 电子束增材制造铝合金技术

电子束由于能量密度高，作用在熔池上部时对轻质元素有较强的气化作用。使用电子束作为热源增材制造铝合金时，Al 元素易挥发、内部组织气孔倾向较大等缺点限制了电子束增材制造铝合金的应用。Craig Brice 等^[16]利用美国宇航局兰利研究中心的电子束自由成形系统，制备了 ER2319 铝合金试样，发现了 Mg 元素在电子束作用下发生了蒸发，Mg 元素含量降低直接导致了制备试样的力学性能下降。随后额外增加 Mg 元素制备新焊丝完成实验，在经过热处理后，ER2319 材料的最大硬度与锻造 ER2319 T8 状态下硬度相当。

1.4 激光-电弧复合增材制造铝合金技术

激光-电弧复合增材制造技术可以弥补两者单独

作用的不足，激光的加入能够提高电弧的稳定性，而熔化极气体保护焊又能发挥熔化焊的高效性，弥补激光能量的不足，所以“激光-电弧复合”用于增材制造技术，成为了一种有一定研究前景的新方法。

王鹏等^[17]使用 YAG 固体激光机加 MIG 电弧复合热源焊接系统，在 6061 基板上制备了 ER5356 铝合金焊丝的增材试样。研究了增材过程中冷却时间和力学性能的关系，在层间停留时间 60 s 时获得最大抗拉强度为 249.79 MPa 的零件，并且得出激光-MIG 复合增材制造墙体零件与单 MIG 焊增材制造相比，微观组织更为均匀。孙承帅等^[18]使用激光-MIG 复合制备了 ER5356 增材试样，分析了显微组织特征，其中顶部区域组织呈柱状晶和等轴晶状，中下部区域 Mg 元素含量高于顶部区域，组织呈树枝状。试样中存在氢气孔，主要是由氢元素在液态金属中的无法逸出和激光小孔的瞬间失稳造成的。

激光-电弧复合作为热源目前国内外研究并不广泛，两者结合一定程度上提高熔池流动稳定性，成形零件表面质量较好，零件整体的组织性能更加均匀。

1.5 超声波增材制造铝合金技术

相对于激光、电子束和电弧为热源的先熔化后再增材制造的方法，超声波增材制造(UAM)更接近与一种固相连接工艺，其工作原理是采用大功率超声能量，以金属箔材作为原材料，利用金属层与层之间振动摩擦产生的热量，促进界面间金属原子相互扩散并形成固态物理冶金结合，从而实现了快速逐层增材制造成形。

R. R. Dehoff 等^[19]利用超声波增材制造设备，制备了 3003 系列铝合金试样，并且进行回火处理研究了其特征。除在箔材界面处发现再结晶现象和大量位错存在外，还在界面区的微孔附近发现纳米晶，认为在超声波固结过程中，界面区部分铝可能存在熔化现象，这表明了 UAM 使铝合金产生动态再结晶过程的变形，并且使用纳米颗粒材料作为夹层材料，最终观察到纳米颗粒在超声作用下，在界面处分散发生熔化，形成增强相。S. Shimizu 等^[20]研究了 6061 铝合金的超声波增材制造效果，研究分析了接触表面的微观结构和分布。超声振动引起的剪切变形对显微结构有显著的影响。再结晶的驱动力使界面区域的颗粒呈等轴分布。超声振动使得接触面产生微相，并且界面处存在空隙。铝合金表面氧化层由超声波产生的振动从界面中挤出。挤压的氧化物层在界面处的某些点聚集或停留在空隙中，新生的接触表面未发现被氧化。M. N. Gushev 等^[21]研究了超声波增材制造 6061 铝合金退火后的抗拉强度，得出退火后沿增材生长方向的抗拉强度比未经热处理的增材试样的抗拉强度提高了 3 倍，退火使超声振动的结合面处晶粒重新生长，

得到性能更加均匀的组织。

超声波增材制造技术同样具有成形的高效性与高复杂性,属于自由净成形工艺,可以实现固态连接同系列或不同系列铝合金金属的结合和包层。超声波增材制造工艺不需要高温环境,不会造成合金元素的挥发,不影响连接的性能,因此,超声波增材制造铝合金具有一定优势。目前美国已经发展到第3代超声波增材制造设备,国外在超声波增材制造装备和相关的先进技术方面对我国实行严格的封锁,国内在超声波增材制造领域尚没有相关研究报告。超声波增材制造有着广阔的研究前景,目前尚未彻底建立超声波增材成形材料界面局部原子扩散方面的理论模型,界面塑性变形及摩擦升温方面尚没有统一的理论。

1.6 搅拌摩擦增材制造铝合金技术

搅拌摩擦增材制造技术也是利用摩擦产热的原理,完成固相连接的增材方法。王忻凯等^[22]研究了工艺参数对5A03-H铝合金搅拌摩擦增材制造成形的影响。G.M. Karthik等^[23]研究了钛粒子对铝基复合材料摩擦沉积的强化效果。添加质量分数为6%的钛粒子,与AA5083铝基材料形成良好的粘结层,钛粒子均匀分布,起到了细晶强化作用,制备的复合材料强度、硬度均可以与标准的AA5083锻压件相当。

2 铝合金增材制造技术的成形控制

增材制造的成形精度不高,稳定性较差以及可能存在的缺陷一直是制约和影响增材制造产品性能的主要因素,国内外学者通过一系列的理論模型研究尝试解决这些问题。

SURYAKUMAR等^[24]将焊道轮廓拟合成为抛物线,通过计算抛物线中心距得到焊道间距为0.667倍熔宽时成形最好。哈尔滨工业大学的XIONG等^[25]进一步对焊道轮廓的拟合性问题进行研究,发现送丝速度与焊接速度的比值对焊道轮廓拟合程度有很大的影响。当比值小于12.5时,抛物线拟合程度最好;而当比值大于12.5时,圆弧曲线拟合度最好。柏久阳等^[26]利用二次通用旋转组合方法设计试验样本,通过二次回归方程建立工艺参数(焊接电流、焊接速度、送丝速度、层间温度)与成形试样稳定区域焊道宽度尺寸预测模型,得出当电流小于95 A时,参数对焊道宽度的影响顺序为:电流>焊接速度>层间温度;当电流大于95 A时,参数对焊道宽度的影响顺序为:电流>层间温度>焊接速度。刘一博^[27]分析了多层多道金属叠加状态下的数学模型,并通过定义焊缝特征函数,准确描述了焊缝外轮廓特征,计算了相邻焊缝的最佳横向偏移量和层间提升高度。

3 结论与展望

铝合金增材制造技术拥有广阔的市场,但是增材制造技术中一些尚未解决的突出问题制约了铝合金产品的推广运用。

1) 铝合金增材制造的温度场和成形质量之间的内在关系尚未探索清楚。熔池温度变化是影响结构和性能的关键因素之一,如何控制熔池冷却速度与熔池各个方向上的温度梯度是研究的热点之一。熔池温度和冷却速度影响气孔、裂纹、残余应力以及组织均匀性等问题,研究温度场变化和实现温度场的控制,可以改变铝合金增材制造产品的结构和性能,抑制零件内部不良组织产生,有效控制逐层堆积过程中晶粒及显微组织演化,提高零件综合力学性能,成为研究中不可忽视的问题。

2) 铝合金增材制造成形件的后续精加工。增材制造技术成形铝合金构件表面粗糙度较高,电弧增材更是明显存在“台阶”效应,现有的研究表明,粗糙度对耐腐蚀性能有明显的降低作用,零件后续精加工是必不可少的环节。对于复杂结构的后续机加工,是研究者们面临的一大难题。

3) 重视超声波等固相增材制造技术,激光、电弧等熔化型热源带来一系列不稳定的因素造成了铝合金增材制造产品性能的不确定性。超声波增材制造轻质铝合金材料如Al/Al, Al/Ti, Al/Cu等同种或异种金属的叠层结构快速固结成形优势明显。大功率超声波设备的研发、超声波固结表面的微结构表征、接触表面的物理场参数等问题,都有待解决或完善。

随着研究的进一步深入,开拓不同条件下使用最优的工艺方法研制铝合金增材零件,保障零件的力学性能、成形精度,铝合金增材制造技术在直接制造领域的广泛应用必将实现。

参考文献:

- [1] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1—4.
LU Bing-heng, LI Di-chen. Development of the Additive Manufacturing (3D Printing) Technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1—4.
- [2] 李涤尘, 田小永, 王永信, 等. 增材制造技术的发展[J]. 电加工与模具, 2012(S1): 20—22.
LI Di-chen, TIAN Xiao-yong, WANG Yong-xin, et al. Developments of Additive Manufacturing Technology[J]. Electromachining & Mould, 2012(S1): 20—22.
- [3] 朱小刚, 孙靖, 王联凤, 等. 激光选区熔化成形铝合金的组织、性能与倾斜面成形质量[J]. 机械工程材料, 2017, 41(2): 77—80.

- ZHU Xiao-gang, SUN Jing, WANG Lian-feng, et al. Microstructure, Properties and Inclined Plane Flare Forming Quality of Aluminum Alloy by Selective Laser Melting[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2017, 41(2): 77—80.
- [4] CABRINI M, LORENZI S, PASTORE T, et al. Evaluation of Corrosion Resistance of Al-10Si-Mg Alloy Obtained by Means of Direct Metal Laser Sintering[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 231: 326—335.
- [5] MASKERY I, ABOULKHAIR N T, CORFIELD M R, et al. Quantification and Characterization of Porosity in Selectively Laser Melted Al-Si10-Mg Using X-ray Computed Tomography[J]. *Materials Characterization*, 2016, 111: 193—204.
- [6] LEARY M, MAZUR M, ELAMBASSERIL J, et al. Selective Laser Melting (SLM) of AlSi12Mg Lattice Structures[J]. *Materials & Design*, 2016, 98: 344—357.
- [7] KAUFMANN N, IMRAN M, WISCHEROPP T M, et al. Influence of Process Parameters on the Quality of Aluminum Alloy EN AW 7075 Using Selective Laser Melting (SLM)[J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 918—926.
- [8] RESCHETNIK W, BRÜGGEMANN J P, AYDINÖZ M E, et al. Fatigue Crack Growth Behavior and Mechanical Properties of Additively Processed EN AW-7075 Aluminum Alloy[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2016, 2: 3040—3048.
- [9] SISTIAGA M L M, MERTENS R, VRANCKEN B, et al. Changing the Alloy Composition of Al7075 for Better Process Ability by Selective Laser Melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 238: 437—445.
- [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.
- JIANG Yun-lu. Research on the Rapid Prototyping Technology and Forming Process of Aluminum Alloy Based on the CMT[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [11] 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, 45(3): 66—72.
- HUANG Dan, ZHU Zhi-hua, GENG Hai-bin, et al. TIG Wire and Arc Additive Manufacturing of 5A06 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(3): 66—72.
- [12] 孙红叶, 从保强, 苏勇, 等. Al-6.3Cu 铝合金电弧增材制造成形与组织性能[J]. *航空制造技术*, 2016, 480(11): 36—42.
- SUN Hong-ye, CONG Bao-qiang, SU Yong, et al. Geometry, Microstructure and Properties of Wire+Arc Additive Manufacturing Al-6.3Cu Alloy Deposits[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 480(11): 36—42.
- [13] 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.
- CONG Bao-qiang, DING Jia-luo. Influence of CMT Process on Porosity of Wire Arc Additive Manufactured Al-Cu Alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(12): 3149—3153.
- [14] 柏久阳, 王计辉, 师建行, 等. TIG增材制造4043铝合金薄壁零件组织及力学性能[J]. *焊接*, 2015(10): 23—26.
- BAI Jiu-yang, WANG Ji-hui, SHI Jian-xing, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 4043-Al Alloy Thin-walled Components Produced by Additive Manufacturing with TIG Welding[J]. *Welding & Joining*, 2015(10): 23—26.
- [15] HASELHUHN A S, BUHR M W, WIJNEN B, et al. Structure-property Relationships of Common Aluminum Weld Alloys Utilized as Feedstock for GMAW-based 3-D Metal Printing[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 673: 511—523.
- [16] BRICE C, SHENOY R, KRAL M, et al. Precipitation Behavior of Aluminum Alloy 2139 Fabricated Using Additive Manufacturing[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2015, 648: 9—14.
- [17] 王鹏, 张兆栋, 宋刚, 等. 铝合金激光-电弧复合增材制造工艺分析[J]. *焊接技术*, 2016(10): 10—13.
- WANG Peng, ZHANG Zhao-dong, SONG Gang, et al. Analysis of Laser-Arc Hybrid Additive Manufacturing Process for Aluminum Structures[J]. *Welding Technology*, 2016(10): 10—13.
- [18] 孙承帅, 张兆栋, 刘黎明. 激光诱导 MIG 电弧增材制造5356铝合金薄壁零件组织及力学性能[J]. *焊接技术*, 2017(5): 47—50.
- SUN Cheng-shuai, ZHANG Zhao-dong, LIU Li-ming. Microstructure and Mechanical Properties of 5356 Aluminum Alloy Thin-walled Parts Made of Laser-induced MIG Arc[J]. *Welding Technology*, 2017(5): 47—50.
- [19] DEHOFF R R, BABU S S. Characterization of Interfacial Microstructures in 3003 Aluminum Alloy Blocks Fabricated by Ultrasonic Additive Manufacturing[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(13): 4305—4315.
- [20] SHIMIZU S, FUJII H T, SATO Y S, et al. Mechanism of Weld Formation during Very-high-power Ultrasonic Additive Manufacturing of Al Alloy 6061[J]. *Acta Materialia*, 2014, 74(4): 234—243.
- [21] GUSSEV M N, SRIDHARAN N, NORFOLK M, et al. Effect of Post Weld Heat Treatment on the 6061 Aluminum Alloy Produced by Ultrasonic Additive Manufacturing[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016.

- [22] 王忻凯, 邢丽, 徐卫平, 等. 工艺参数对铝合金搅拌摩擦增材制造成形的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(5): 8—12.
WANG Xi-kai, XING Li, XU Wei-ping, et al. Influence of Process Parameters on Formation of Friction Stir Additive Manufacturing on Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(5): 8—12.
- [23] KARTHIK G M, RAM G D J, KOTTADA R S. Friction Deposition of Titanium Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 653:71—83.
- [24] SURYAKUMAR S, KARUNAKARAN K P, BERNARD A, et al. Weld Bead Modeling and Process Optimization in Hybrid Layered Manufacturing[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(4): 331—344.
- [25] XIONG J, ZHANG G, GAO H, et al. Modeling of Bead Section Profile and Overlapping Beads with Experimental Validation for Robotic GMAW-based Rapid Manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(2): 417—423.
- [26] 柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 87—90.
BAI Jiu-yang, WANG Ji-hui, LIN San-bao, et al. Width Prediction of Aluminium Alloy Weld Additively Manufactured by TIG Arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(9): 87—90.
- [27] 刘一搏. 铝/钢结构增材连接界面行为及磁场作用机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
LIU Yi-bo. Research on Interface Joining Behavior of Al/Steel Additive Manufacturing Structure and the Effect Mechanism of Magnetic Field[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.