

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.03.022

铝合金激光增材制造技术 研究现状与展望

李 帅, 李崇桂*, 张群森, 孙 帅, 王恩庭

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘 要:激光增材制造技术在现代工业发展中发挥了重要作用,为实现高精度制造以及复杂大型制件的生产,铝合金激光增材制造成为当前的研究热点。针对目前铝合金激光增材制造技术在试验过程中出现的粉末流动性差和铝合金的氧化严重以及熔池冷却时温差梯度过大等问题,综合国内外研究现状指出采用基体预热方法可以有效降低熔池冷却过程中的温度梯度,多次重熔可以降低气孔和球化的产生,新型合金粉末 Al-Cu/Al-Zn 可以降低铝合金的氧化问题。针对研究中的问题,提出建立有效温度控制机制来减少气孔、脱落等现象和研发激光增材制造新型专用粉末将会成为以后研究的重点。

关 键 词:激光增材制造;铝合金;温度控制;合金粉末

中图分类号: TG174.445

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2017)03-0098-04

Research Status and Prospect of Additive Manufacturing in Laser by Aluminum Alloy

LI Shuai, LI Chonggui*, ZHANG Qunsen, SUN Shuai, WANG Enting

(School of Material Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Laser additive manufacturing technology plays an important role in the modern industrial development, in order to realize high-precision manufacturing and production of complex large-sized parts, aluminum laser material manufacturing becomes the hotspot of current research. Aiming at the problems of poor fluidity, serious oxidation of aluminum alloy and excessive temperature gradient during cooling process in the aluminum alloy laser additive manufacturing technology, it was found that the matrix preheating method effectively reduced the temperature gradient, multiple remelting could reduce the new generation of pores and spheroidization, Al-Cu/Al-Zn alloy powder could reduce the oxidation of aluminum alloy. In view of the existing problems in the research, it is pointed out that the establishment of effective temperature control mechanism to reduce the porosity and shedding and the development of special powder for laser material manufacturing will become the focus of future research.

Keywords: laser additive manufacturing; aluminum alloy; temperature control; alloy powder

增材制造技术是20世纪90年代发展起来的不同于传统制造业的零部件制造方法,它的原理是采用逐层叠加的方式来进行零部件加工,与传统加工方式相比,它是一种“自上而下”的加工方法^[1]。经过多年的发展,增材制造已在当代社会工业变革中发挥了重要

作用,尤其是随着激光技术的发展,增材制造技术与激光技术的结合形成激光增材制造技术更成为制造业变革的重要突破之一。激光增材制造技术是兼顾精确成型、高性能成型及一体化成型技术,其优点有成型速度快、节省材料、耗时少及可以生产内部具有复杂结构的

收稿日期:2016-10-31;修回日期:2017-02-09

基金项目:国家自然科学基金(51402189);上海市“创新行动计划”部分地方院校能力建设专项计划(16030501100);上海工程技术大学研究生创新项目(16KY0503)。

第一作者简介:李帅(1990),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为激光表面改性。通信作者:李崇桂(1983),男,广西桂林人,博士,副教授,主要研究方向为激光表面改性。E-mail:chongguili@sues.edu.cn

零件,同时激光增材制造过程属于快速凝结过程,金属零件致密、组织细小^[2]。2016年8月欧洲某公司和法国某公司合作,为韩国通信卫星 Korea-sat-5A 和 Koreasat-7 提供增材制造零部件,这些零部件主要使用激光熔融技术并且在减小质量方面做出了重大突破,零件选用了 AlSi7Mg 合金并在验证阶段发现其孔隙率低于1%,通过了动态测试,使零部件的质量较传统工艺生产的零部件减少22%,成本下降了30%。

1 铝合金激光增材制造特点研究

1.1 铝合金在激光增材制造中的优势

铝是地球上存储量仅次于铁的第2大金属元素,纯铝的密度小,只有铁密度的1/3,熔点低,且铝是面心立方结构,因此它的可塑性强,可以根据需要制成多种形状的材料,同时铝合金的抗腐蚀性能、导热导电性能和强度较好。铝及铝合金的特点为其广泛应用奠定了基础。现如今,铝合金是工业材料中使用最广泛的有色金属之一,并在航空航天、汽车、船舶、机械制造等方面得到大规模使用^[3]。

目前市场上可供选用进行增材制造的铝合金粉末有:AlSi10Mg, AlSi12, 6061, 7050 和 7075。在合金中的 Al, Si 和 Mg 等金属元素在铸造过程中可组合形成共晶化合物使得材料的机械性能提高,并且制造成本也有所降低。同时铝合金液相线与固相线之间的温差范围很小,更利于激光加工。

1.2 铝合金在激光增材制造中的缺陷

随着增材制造技术的发展,逐渐形成了镍基合金、钛合金、铁基合金和铝合金这4类主流合金系列,但铝合金系列的发展缓慢,没有像其他几种合金系列一样取得较多的突破性进展,这主要是由铝合金在制造过程中的各种缺陷所导致的。铝合金粉末流动性差,密度低,使得在铝合金粉末传出过程中常会出现堵塞现象,使制件均匀性与连续性达不到标准。如果通过提高载气量来减少堵塞则又会对熔池稳定性与界面的连续性造成影响,因此现阶段铝合金的激光增材制造主要使用预铺粉而较少使用同轴送粉。另外铝合金激光吸收率低、热导率高也为增材制造带来很大的问题:激光功率过低则不能使铝合金完全融化导致出现表层熔化而底层没有熔化的现象;激光功率过高导致热导率过高使得能量散失过快,熔覆层与基体的结合出现开裂、脱落现象^[4]。另外铝合金的强氧化性也是激光增材制造成型过程中的一个难点,氧含量过高的情况下,铝合金极易形成一层氧化膜,导致熔覆层与基体的结合变得更加困难。

铝合金在成形过程中容易形成3种不同类型的气孔缺陷:①在含氢的环境下液固相态转变过程析出的氢气转变而成的氢气孔;②由于保护气体被卷入熔池底部形成的气孔;③在激光增材制造过程中形成的小孔由于外部张力变化导致小孔塌陷形成的气孔^[5-6]。这些气孔的存在使制件的力学性能、结构性能有不同程序的降低,而且制件的制造过程中也会遇到一些激光增材制造工艺上的缺陷如球化和热影响区等。因此如何有效的控制并消除这些缺陷是目前铝合金研究的重大难题。

2 铝合金激光增材制造研究现状

2.1 Al-Si 系合金研究现状

2.1.1 AlSi10Mg 合金

AlSi10Mg 铝合金粉末是如今研究最多的铝合金粉末之一。因为合金中含有较多镁元素, Mg 的活泼性比 Al 高,因此在氧化反应中首先产生的是 MgO,可以有效降低制造过程中基体内部的氧含量,降低铝的氧化反应对制件的影响。

在对 AlSi10Mg 铝合金粉末的研究中,国内外学者做了大量的实验。刘锦辉^[7]等利用 AlSi10Mg 粉末进行激光增材制造时,发现采用正交变化的扫描方式,经过多次重熔可以极大的改善零部件内部的气孔和球化缺陷,使得其成形面的表面质量有很大程序的提高。袁学兵^[8]等研究发现适当的在基体底部或周围部分进行预加热,可以使熔池的冷却速度下降,使熔池中的杂质气体排除,降低部件中的缺陷,提高部件的力学性能。同时在实验过程中加入一些其它金属元素可提高熔池的流动性,减少氧化铝杂质的形成。在 Kempen^[9]等的试验中,改变粉末形状、粒径大小和成分对比对成形质量有很大的影响,同时可以通过优化工艺参数来获得更加致密的成形制件与较好的制件表面粗糙度。Buch^[10]等通过改变工艺参数以及材料参数获得了致密度达到99.5%,抗拉强度达400 MPa的零部件。Louvis^[11]等对制件成型中的氧化铝的形成机理进行了分析,得出了氧化铝薄膜对熔池与熔池层间润湿特性的影响规律。李亚丽^[12]等利用模型分析了铝合金在激光增材制造过程中的温度场的变化情况,得出了激光功率和扫描速率对熔池尺寸大小的影响规律,同时模拟得出激光功率对熔池冷却速度影响很小,而扫描速度对其影响较大,但在层厚增加时,熔池在垂直于基体表面方向的温度梯度则与上述规律相反。

2.1.2 Al-7Si-0.3Mg 合金

目前对 Al-7Si-0.3Mg 的研究比较少,陈瑞^[13]等研

究了 Al-7Si-0.3Mg-0.15Fe 合金在凝固过程中冷却速度对凝固参数和组织性能的影响,实验表明如果冷却速度越高, α (Al) 初生相的形核温度、共晶反应速度和固相线的温度越低,同时二次枝晶臂间距和体积分数也会有明显的下降,铁相的平均长度也有显著的降低,使得铁相在基体中分布均匀,提高了基体的结构和力学性能。而且,提高冷却速度有利于共晶硅向纤维状分支结构的转变,减少了基体中的块状和板状共晶硅。A. Simchi^[14]等在研究 Al-7Si-0.3Mg 成形过程中加入增强颗粒 SiC,结果表明当 SiC 颗粒体积分数较低时,制件成形时的致密化速率符合一阶动力学公式并且速率常数有所增加,但当 SiC 颗粒体积分数超过 5% 时,速率常数急剧降低。同时在加入增强颗粒 SiC 后,熔体成形轨迹更加稳定,可以获得连续的成形界面。

2.1.3 AlSi12 合金

AlSi12 也是常使用的合金粉末,Shafaqat Siddique^[15]等利用 AlSi12 合金进行激光增材制造研究,试验结果表明裂纹生长行为和疲劳行为可以对通过基板预热进行有效控制。康南^[16]等使用共晶 AlSi12 与纯 Si 粉末的混合物进行激光增材制造,结果发现 Si 相的尺寸和形态受到激光功率的影响,激光功率过高时铝会在重熔过程中严重蒸发。

2.2 Al-Cu/Al-Zn 研究现状

相较于 Al-Si 系铝合金的研究,Al-Cu/Al-Zn 用于激光增材制造研究较少。Konrad Bartkowiak^[17]等人根据 Al-Si 合金粉末体系的特性分析,找出一种具有巨大潜力的新的合金体系 Al-Cu/Al-Zn 合金粉末,研究发现当粉末配比发生变化时,粉末颗粒尺寸的均值并没有发生大的变化,因此在颗粒尺寸均值这一方面材料的稳定性好;其次在熔化层中并没有发现脆硬的氧化层,这对于易受氧化困扰的铝基合金是一个好消息。虽然此项试验只是在基体上熔覆一层,但取得的效果良好,完全有可能用于多层增材制造。

3 铝合金激光增材制造的展望

3.1 温度控制机制建立

激光增材制造技术是一个伴随温度变化的制造过程中温度对其结构与性能有着重大影响,因此对温度控制机制的建立成为研究铝合金制造过程的重要方向。在激光制造过程中,熔池温度变化是影响制件结构与性能的关键点之一,如何控制熔池冷却速度与熔池各个方向的温度梯度是目前研究的热点之一。通过对这些问题的研究可以很好控制制件成形过程中出现的气孔、裂纹和球化等缺陷。现在研究最多的是在制

件制造之前对基体的预热,在基体上预热可以有效控制在激光扫面之后的熔池冷却速度,防止冷却速度过快引起的制件与基体冶金结合效果差甚至脱落的问题。但是目前预热基体的技术还未形成科学体系,在实验之前根据基体与粉末性质来控制预热温度的技术还不成熟^[18]。其次在制造过程中温度对粉末颗粒的流动形态和熔化机制的影响成为当前研究的又一个热点,只有对这个问题有了全面的了解,才能更好的从温度层面来控制制件的结构和性能。最后是在激光扫过之后通过循环温控系统来实现对熔池周围温度梯度变化的有效控制,使制件在性能上有较大的改变,这在目前的研究中也是热点之一^[19-20]。从以上 3 个方向来建立温度控制机制,以满足实际需求为基础,通过控制温度来改变制件的结构与性能,成为当前研究不可忽视的问题。

3.2 粉末技术的发展

激光增材制造可分为预铺粉的激光选区熔化成形技术(selective laser melting, SLM)和同轴送粉的激光熔化沉积成形技术(laser melting deposition, LMD)。而在铝合金激光增材制造技术上运用最广的是激光选区熔化技术,这是因为现如今的铝合金粉末在流动性以及致密性上都不适合采用同轴送粉方式,预铺粉成为铝合金粉末成形技术的主要选择^[21]。但在铝合金的大型制件制造上,预铺粉还没法满足要求。同轴送粉不受制件尺寸的限制,制件力学性可达铸件性能的优点使其成为解决此类难点的新方法。研究新型铝合金粉末,在现有的铝合金粉末的基础上尝试加入增强颗粒来改善其在流动性和致密性的缺陷,也可以对铝合金粉末的颗粒大小与分布、颗粒形状、外观形貌和聚集状态等做出改进,这将会成为铝合金激光增材制造研究的一个分支^[22-23]。

4 结语

近年来,激光增材制造技术迅猛发展,在现代工业发展中扮演重要角色,在当今工业以节能减排为目标的情况下,轻质合金成为研究热点之一,铝合金激光增材制造技术迅速发展,其制件已进入实用阶段,但是目前来看,制造过程中的温度控制机制研究与新型铝合金粉末研制仍然是具有巨大潜力,可以作为下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 顾冬冬,沈以赴. 基于选区激光熔化的金属材料零件快速成形现状与技术展望[J]. 航空制造技术,2012(8):32-37.
- [2] 刘业胜,韩品连,胡寿丰. 金属材料激光增材制造技术及在航空

- 发动机上的应用[J]航空制造技术,2014(10):62-67
- [3] 董鹏,李忠华,严振宇,等. 铝合金激光选区熔化成形技术研究现状[J]应用激光,2015,35(5):607-611
- [4] VISCUSI A, LEITAO C, RODRIGUES D, et al. Laser beam welded joints of dissimilar heat treatable aluminium alloy [J]. Journal of materials processing technology, 2016, 236:48-55.
- [5] KONG Weidong, WANG Shufan, WANG Di, et al. Preliminary study on direct manufacturing of customized lingual brackets by selective lasermelting[J]. Laser technology, 2012, 36(3):301-306.
- [6] LI Bao, WANG Hongwei, JIE Jinchuan, et al. Microstructure evolution and modification mechanism of the ytterbium modified Al-7.5% Si-0.45% Mg alloy [J]. Journal of alloys and compounds, 2011, 509(7):3387-3392.
- [7] 刘锦辉,史金光,李亚. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末的成形工艺[J]黑龙江科技大学学报,2015,25(5):509-515.
- [8] 袁学兵,魏青松,文世峰,等. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末研究[J]热加工工艺,2014,43(4):91-94.
- [9] KEMPEN K, THIJS L, YASA E, et al. Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg[J]. Solid freeform fabrication symposium, 2011, 22:484-495.
- [10] BUCHBINDER D, SCHLEIFENBAUM H, HEIDRICH S. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts [J]. Physics procedia, 2011, 12(1):271-278.
- [11] LOUVIS E, FOX P, SUTCLIFFE C J. Selective laser melting of aluminium components [J]. Journal of materials processing technology, 2011, 211(2):275-284.
- [12] LI Yali, GU Dongdong. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder[J]Materials and design, 2014, 63(2):856-867.
- [13] CHEN Rui, SHI Yufeng, XU Qingyan, et al. Effect of cooling rate on solidification parameters and microstructure of Al-7Si-0.3Mg-0.15Fe alloy[J]Transactions of nonferrous metals society of China, 2014, 24(6):1645-1652.
- [14] SIMCHI A, GODLINSKI D. Effect of SiC particles on the laser sintering of Al-7Si-0.3Mg alloy[J]Scripta materialia, 2008, 29(2):199-202.
- [15] SIDDIQUE S, IMRAN M, WALTHER F. Very high cycle fatigue and fatigue crack propagation behavior of selective laser melted AlSi12 alloy[J]International journal of fatigue, 2016, 94(2):246-254.
- [16] KANG Nan, CODDET P, LIAO Hanlin, et al. Wear behavior and microstructure of hypereutectic Al-Si alloys prepared by selective laser melting[J]Applied surface science, 2016, 378(8):142-149.
- [17] BARTKOWIAK K, ULLRICH S, FRICK T, et al. New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique[J]Physics procedia, 2014, 12(1):393-401.
- [18] 王梦瑶,朱海红,祁婷,等. 选区激光熔化成形 Al-Si 合金及其裂纹形成机制研究[J]激光技术, 2016, 40(2):219-222.
- [19] 王霄,王东生,高雪松,等. 轻合金构件激光增材制造研究现状及其发展[J]应用激光, 2016, 36(4):478-483.
- [20] 阚文斌,林均品. 增材制造技术制备钛铝合金的研究进展[J]. 中国材料进展, 2015, 34(2):111-119.
- [21] ROBERTS I A, WANG C J, ESTERLEIN R, et al. A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2009, 49(12/13):916-923.
- [22] GUSAROV A V, SMUROV I. Modeling the interaction of laser radiation with powder bed at selective laser melting[J]. Physics procedia, 2010, 5:381-394.
- [23] 张佳,刘锦辉,刘邦涛. 选择性激光熔化高温合金粉末成形工艺[J]. 黑龙江科技学院学报, 2013, 23(5):432-435.

西门子新一代 Simotics SD 电机

西门子全新一代 Simotics SD 重载型电机随附数字化包应对驱动技术领域的未来发展趋势。电机结构紧凑,节省空间,提供有 2 种基座规格:315 和 355。全新设计的电机系列具备优秀的散热性能,效率等级高达 IE3, IE4, 系统能效等级 IES2, 同时保持较高的功率密度。新颖、灵活的接线盒设计,使其可灵活地适应各种安装位置。基于全新智能电机解决方案,通过西门子基于云的开放式物联网操作系统——MindSphere, 用户可对电机状态进行分析,确定维护方案和时间。根据运行时间和负载情况,电机等驱动部件会受到不同程度的磨损或持续性损耗。当肉眼能看到这些变化时,磨损通常已发生相当长一段时间,可能会导致停机和不定期故障,乃至无法估量的经济损失。通过西门子智能电机解决方案和 MindSphere 技术,可随时随地访问相关电机数据,实现透明化操作和控制,从而显著提高生产率、可用性和生产性能,优化运维能力以及服务。

该系列电机标配 DataMatrix 标识码可实现电机的可读化识别。通过智能设备机读电机识别信息,快速读取电子铭牌等相关电机信息,从而实现简便调试和备件订货。利用“数字化双胞胎”,还可提供诸如 2D 图纸和 3D 模型等有价值的辅助工具。

(朱建芸)