

文章编号 1004-924X(2015)11-3005-07

高沉积率激光金属沉积 Inconel 718 的孔隙率控制

仲崇亮^{1,2,3}, 付金宝¹, 丁亚林^{1,2*}, Andres Gasser³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. Fraunhofer 激光技术研究所, Germany Aachen 52074)

摘要:为降低高沉积率激光金属沉积(Laser Metal Deposition, LMD)工艺中材料的孔隙率,研究了以镍基高温合金 Inconel 718(IN718)为粉末沉积材料的高沉积率 LMD 工艺中主要工艺参数对材料孔隙率的影响,以及通过调整工艺参数降低材料孔隙率的方法。以目标沉积率为 2 kg/h 的 LMD 工艺为基础,通过参数固化和分离的手段开展了高沉积率 LMD 的镀层实验,研究了主要工艺参数即激光功率、扫描速度及送粉量对 LMD 镀层材料孔隙率的影响,分析了不同参数下各镀层的横截面孔隙率及镀层孔隙率。实验显示:当激光功率从 1 440 W 增加到 4 214 W 时,镀层材料的孔隙率从约 1.5%降低至 0.02%左右;当扫描速度为 500 mm/min 至 5 000 mm/min 时,镀层材料孔隙率始终保持为 0.07%至 0.18%左右;当送粉量从 0.64 kg/h 增加至 6.48 kg/h 时,镀层材料孔隙率从约 0.01%增加至 0.84%左右。可见在高沉积率 LMD 工艺中,扫描速度对材料孔隙率无明显影响,而提高激光功率、限制送粉量均可有效降低 LMD 材料孔隙率,提高横截面孔隙率的一致性。

关键词:激光加工;激光金属沉积;增材制造;孔隙率;Inconel 718

中图分类号: TG456.7; TG442 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152311.3005

Porosity control of Inconel 718 in high deposition-rate laser metal deposition

ZHONG Chong-liang^{1,2,3}, FU Jin-bao¹, DING Ya-lin^{1,2*}, ANDRES Gasser³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Fraunhofer Institute for Laser Technology, Aachen 52074, Germany)

* Corresponding author, E-mail: dingyl1964@sohu.com

Abstract: To reduce the material porosity in Laser Metal Deposition (LMD) processing, the Inconel 718 (IN718) was used as powder additive in this study, and the influences of main process parameters on the material porosity in a high deposition-rate LMD were investigated. Then, the methods to reduce the material porosity were researched by adjusting these process parameters. Based on the newly developed target with a high deposition rate by 2 kg/h in the LMD process, a coating experiment was performed by parameter solidification and parameter separation and the effects of laser power,

收稿日期: 2015-03-06; 修订日期: 2015-04-07.

基金项目: 欧盟 AMAZE 项目(No. 313781)

scanning speed and powder mass flow on the material porosity were designed and carried out. Furthermore, the cross-sectional porosity and track porosity of tracks deposited by different process parameters were analyzed. The results show that as the laser power increases from 1 440 W to 4 214 W, the porosity of the longitudinal track decreases from about 1.5% to about 0.02%. When the scanning speed varies in the range of 500 mm/min to 5 000 mm/min, the range of track porosity is approx. 0.07% to 0.18%. Moreover, when the powder mass flow increases from 0.64 kg/h to 6.48 kg/h, the porosity increases from approx. 0.01% to 0.84%. It is shown that in high deposition-rate LMD, the scanning speed has no obvious influence on the porosity; and increasing laser power and reducing powder mass flow rate significantly reduce material porosity and increase the consistency of cross-sectional porosity.

Key words: laser processing; Laser Metal Deposition (LMD); additive manufacturing; porosity; Inconel 718

1 引言

激光金属沉积 (Laser Metal Deposition, LMD) 技术作为金属材料增材制造技术的典型代表,与快速成型同为金属材料激光 3D 打印技术。LMD 是基于激光熔覆技术发展起来的先进填料加工制造技术。该技术利用激光能量融化金属粉末并在基底材料上生成熔池,随着激光光斑的移动,进入熔池并熔化的粉末凝固后与基底材料形成冶金结合,通过层层堆积生成 3D 物理实体。与传统的加工工艺相比,LMD 工艺能够大幅度减少材料浪费、提高新产品的开发周期、并且适合个性化零件生产和复杂结构零件加工。同时,通过优化 LMD 的工艺参数可以控制材料的微观结构及力学性能等。因此,该领域近年来的研究越来越多,包括了 LMD 工艺的在线监测^[1]、工艺开发^[2-4]、仿真建模^[5]、微观结构及力学性能优化^[6-9]、大尺寸零件制造^[10]、材料缺陷^[11]等诸多方面。随着 LMD 工艺的逐渐成熟,它在航空航天、汽车、船舶等行业的应用也越来越多,同时,工业界对应用 LMD 工艺进行大尺寸零件生产的需求也日益明显。尽管传统 LMD 工艺在诸多方面已经具有较为成熟的技术,但是由于其工艺沉积率较低(通常不大于 0.3 kg/h),大尺寸零件生产的时间成本较高、经济性较实际期望低。为解决 LMD 工艺在加工生产大尺寸零件时存在的问题,高沉积率的工艺开发变得尤为重要。

由于零件的机械性能直接决定了材料是否可以应用,因此,开展有关 LMD 技术研究的最终目的是保证材料的机械性能。作为 LMD 材料的主要宏观缺陷,孔隙率严重影响拉伸强度、延展性、疲劳强度等材料力学性能,而 LMD 工艺参数对孔隙率具有显著影响。因此,有必要研究 LMD 工艺参数对材料孔隙率的影响,以便通过调整工艺参数达到降低材料孔隙率的目的。1999 年,Brice^[12] 等人在研究 Ti-6Al-4V 材料 LMD 工艺时提出镀层材料孔隙率会随着送粉量的增加而增加。随后,Kobryn^[13] 等人在该研究的基础上进一步研究了工艺参数对材料孔隙率的影响,并在 2000 年提出 Ti-6Al-4V 镀层材料的气孔会随着扫描速度的增加而降低。2009 年,针对 IN718 材料,Ng 等人^[14] 系统地研究了 LMD 工艺参数对镀层材料孔隙率的影响,并认为孔隙率不仅随送粉量的增加而增加,而且随激光功率的增加而增加。2014 年,Rasheedat 等人^[15] 研究了 LMD 工艺参数对钛合金材料孔隙率的影响,并且提出材料孔隙率随激光功率的提高或扫描速度的降低而降低。

不同合金在同一工艺参数下对 LMD 镀层材料孔隙率的影响可能不同,因此现有研究结论并不适合所有沉积材料;另外,上述研究均基于传统的 LMD 工艺,因此,得出的结论可能不适用于高沉积率 LMD 工艺。本文研究了高沉积率 LMD 工艺中激光功率、扫描速度及送粉量等主要工艺参数对镍基高温超级合金 Inconel 718(IN718)材

料孔隙率的影响,并给出了通过优化工艺参数来降低材料孔隙率的方法。

2 粉末材料的理化特性分析

Inconel 718 (IN718)作为析出强化型镍基高温合金,具有良好的焊接性能,且在室温(25°)及高温(650°)条件下均具有良好的抗拉伸强度即抗蠕变性能。该合金已用于制造航空发动机中高温工况条件下工作的结构件或承受动载荷的转子件等。

2.1 粉末材料的化学元素组成分析

粉末中的金属元素的百分比含量可以通过电感耦合等离子体原子发射光谱法分析得到。IN718 材料的化学元素组成成分标准及经 ICP 方法分析得到的粉末材料的化学元素百分比见表 1。

表 1 IN718 材料的化学元素百分比标准及经 ICP 分析得到的该材料的化学元素百分比

Tab.1 Chemical element composition of IN718; requirement and measurement result of used powder

化学元素	标准含量	测量结果
Ni	50.0~55.0	53.51
Cr	17.0~21.0	19.08
Fe	balance	17.51
Nb(+Ta)	4.75~5.5	4.89
Mo	2.8~3.3	2.98
Ti	0.65~1.15	0.99
Al	0.20~0.80	0.68

从表 1 可以看到:所使用的粉末的化学元素组成与 AMS(Aerospace Material Specifications)对 Inconel718 定义的元素组成相符。

2.2 粉末的形状、孔隙率及微观结构分析

实验中使用气体雾化法(Gas Atomization, GA)制备 IN718 粉末,该粉末的标称粒径为 45~90 μm 。经机械研磨及抛光的粉末颗粒的横截面光学显微照片如图 1 所示。

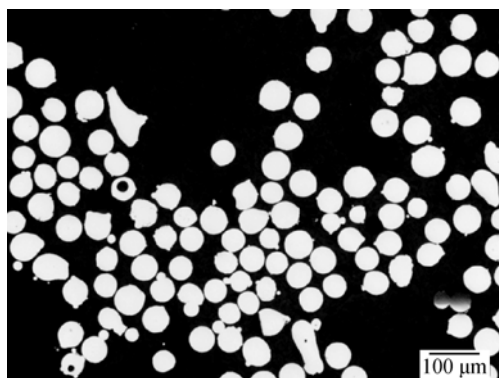


图 1 经打磨抛光处理后的粉末颗粒的光学显微照片
Fig.1 Micrograph of cross-section of polished IN718 powder particles

从图 1 可以看出:尽管大多数粉末颗粒为球形,但其中仍然混有形状及不规则的粉末颗粒;而且粉末中有一定数量的空心粉颗粒。参照图片右下角的比例标尺可知,照片中粉末的粒径绝大部分在标称粒径范围内。

由扫描电镜(SEM)观察到的粉末颗粒微观结构照片如图 2 所示。从图中可以看到:粉末颗粒的表面较为粗糙;在较大的粉末颗粒上附着有少量的卫星粉末颗粒。

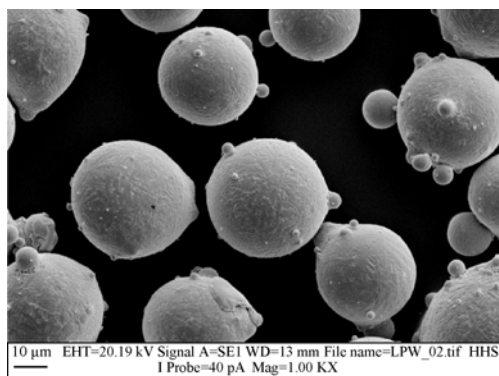


图 2 扫描电镜分析得到的粉末颗粒的微观结构
Fig.2 SEM image of IN718 powder

3 实验及分析方法

3.1 实验平台

高沉积率 LMD 实验平台主要由超高功率二极管激光器(最高输出功率为 12 kW)、可变焦光学系统、高沉积率粉末喷头、送粉器、龙门机床等组成。实验平台照片如图 3 所示。

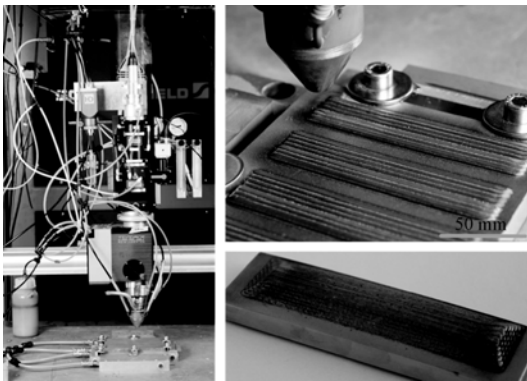


图 3 高沉积率 LMD 实验系统及该系统加工的实验样品 (单层及 3D 实体)

Fig. 3 Experimental setup of high deposition-rate LMD and deposited samples(single layer and 3D build-up)

3.2 实验参数规划

LMD 工艺的主要工艺参数包括激光功率 P_L 、扫描速度 v 及送粉量 \dot{m} 。为便于观察这 3 个参数对 LMD 材料孔隙率的影响,将 3 个参数进行分离,即将所讨论目标参数作为变量,其他参数作为常量固化后进行单道镀层实验。基于这种思路,以本项目开发的高沉积率 LMD 工艺为基础进行了实验方案设计。具体实验参数见表 2。

表 2 实验参数

Tab. 2 Experimental parameters

Group No.	P_L/W	$v/(mm \cdot \min^{-1})$	$\dot{m}/(kg \cdot h^{-1})$
1	1 445~4 214	1 500	1.91
2	3 858	5 00~5 000	1.91
3	3 858	1 500	0.64~6.48

为防止镀层氧化,实验中采用氩气作为工艺保护气(流量为 12 NL/min)。将粉末从送粉器中送出时使用氦气(流量为 4 NL/min)。整个实验过程中激光光斑直径恒定为 4 mm。

3.3 孔隙率定义及分析方法

这里借助 LMD 镀层横截面示意图对镀层横截面孔隙率及镀层孔隙率进行直观的定义。与工艺扫描方向垂直的 LMD 镀层横截面示意图如图 4 所示。

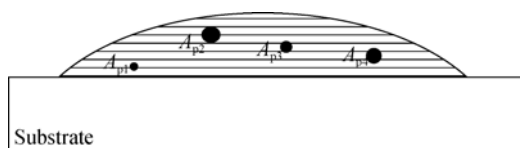


图 4 LMD 镀层横截面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cross-section of deposited track

镀层横截面的孔隙率 r_{CP} 定义为 LMD 镀层特定横截面上气孔所占面积与镀层总面积之比,即:

$$r_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{P,i}}{A_T}, \quad (1)$$

式中: $A_{P,i}$ 表示镀层横截面图像上第 i 个气孔所占的面积; A_T 表示镀层横截面面积。

镀层孔隙率 r_{TP} 定义为镀层上有限个横截面孔隙率的平均值,即:

$$r_{TP} = \frac{\sum_{j=1}^n A_{CP,j}}{m}, \quad (2)$$

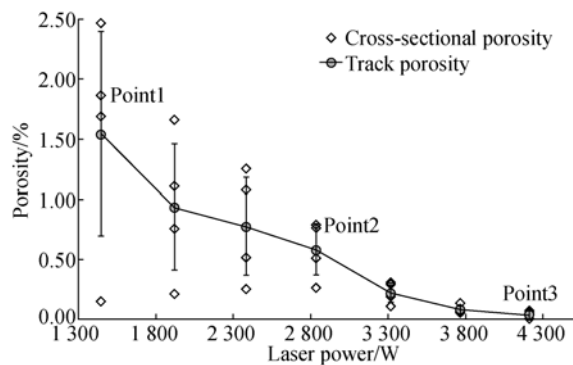
式中 m 表示选定的用于统计镀层孔隙率的横截面的个数。本文取镀层上随机选择的 4 个位置的横截面孔隙率的平均值作为镀层孔隙率。

对各单道镀层分别随机选定 4 个位置切开制备金相试样;然后,对试样进行机械研磨及抛光处理;最后,借助光学显微镜及相应的图像处理软件对镀层的孔隙率进行分析。

4 实验结果及讨论

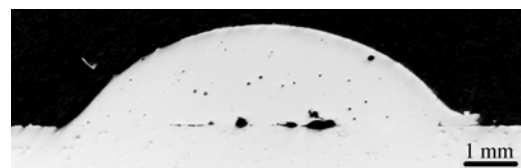
4.1 激光功率对材料孔隙率的影响与控制

分析第 1 组实验得到横截面孔隙率、镀层孔隙率及横截面孔隙率的标准差与激光功率间的对应关系,如图 5 所示。



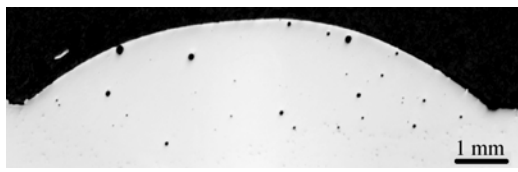
(a) 激光功率对孔隙率的影响

(a) Effect of laser power on porosity



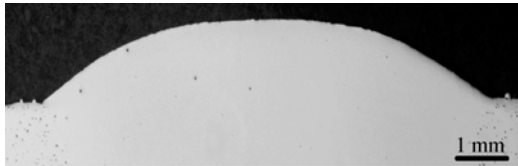
(b) 实验点 1

(b) Experimental point 1



(c)实验点 2

(c) Experimental point 2



(d)实验点 3

(d) Experimental point 3

图 5 激光功率对孔隙率影响的统计分析结果及代表性实验点镀层横截面的光学显微照片

Fig. 5 Statistic results of effects of laser power on porosity and micrographs of typical experimental points

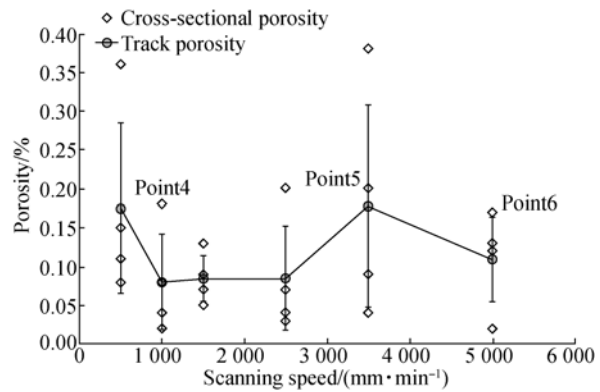
从图 5 可以看到,随着激光功率的增加,横截面孔隙率、镀层孔隙率均显著下降。当激光功率从 1 445 W 增加至 4 214 W 时,镀层孔隙率从约 1.5%降低至约 0.02%;横截面孔隙率标准差从约 0.8%降低至约 0.01%,该现象表明镀层各位置的孔隙率的一致性得到了提高。

当激光功率增加时,若送粉量不变,则单位质量粉末得到的能量增加,有助于更充分地熔化粉末;同时,高能量输入可以延长熔池寿命,使卷入工艺中的气体具有更充分的外逸时间。因此,较高的能量输入有利于降低镀层的孔隙率。该结论与传统 LMD 工艺研究的结论类似。实验结果表明,通过控制激光能量可以实现对高沉积率 LMD 材料孔隙率的控制,即提高激光功率可以有效降低高沉积率 LMD 材料的孔隙率。

4.2 扫描速度对材料孔隙率的影响与控制

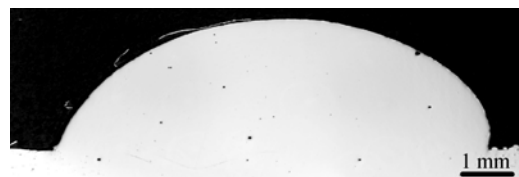
分析第 2 组实验得到横截面孔隙率、镀层孔隙率及横截面孔隙率的标准差与扫描速度间的对应关系,如图 6 所示。

图 6 表明,高沉积率 LMD 工艺中材料的横截面孔隙率及镀层孔隙率与工艺扫描速度无显著的对应关系。无论是横截面孔隙率、镀层孔隙率还是横截面孔隙率的标准差,在工艺扫描速度改变时均未随之有规律的变化。当扫描速度从 500 mm/min 增加至 5 000 mm/min 时,材料的镀层孔隙率始终为 0.07%~0.18%。



(a)扫描速度对孔隙率的影响

(a) Effect of scanning speed on porosity



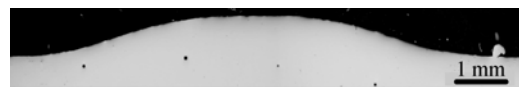
(b)实验点 4

(b) Experimental point 4



(c)实验点 5

(c) Experimental point 5



(d)实验点 6

(d) Experimental point 6

图 6 扫描速度对孔隙率影响的统计分析结果及代表性实验点镀层横截面的光学显微照片

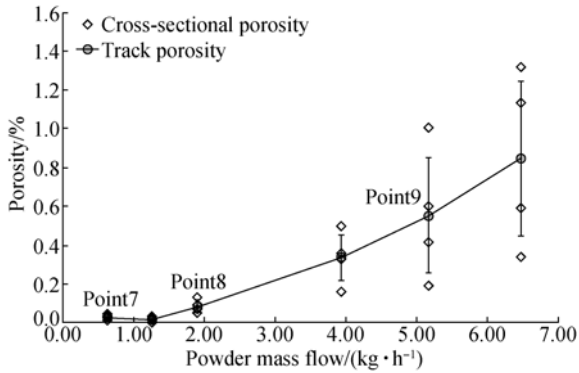
Fig. 6 Statistic results of effects of scanning speed on porosity and micrographs of typical experimental points

该结论与传统 LMD 工艺研究的结论不同。由于工艺过程中,材料的冷却率与扫描速度成正比,随着扫描速度的增加,材料冷却加快,不利于混入气体的外逸。但是,当扫描速度加快后,由于送粉量不变,且面熔池尺度基本保持不变(主要由激光光斑直径决定),镀层厚度会减小,即混入工艺的气体逸出至外界环境的路径变短,有利于气体的逸出。当一组作用方向相反的因素同时作用于工艺时,导致孔隙率与工艺扫描速度无明显的关系。而在传统 LMD 工艺中,由于镀层的绝对厚度较小,该现象不明显,因此得到的结论不同。

实验结果表明,在高沉积率 LMD 中,无法通过控制扫描速度来降低高沉积率 LMD 材料孔隙率。

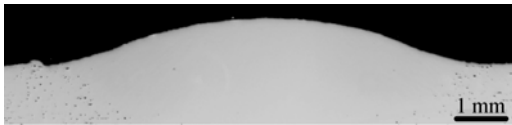
4.3 送粉量对材料孔隙率的影响与控制

分析第 3 组实验得到横截面孔隙率、镀层孔隙率及横截面孔隙率的标准差与送粉量间的对应关系,如图 7 所示。



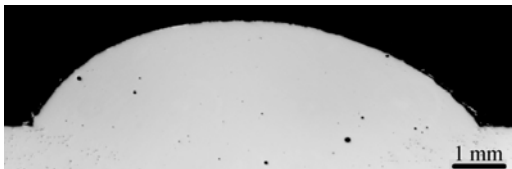
(a) 送粉量对孔隙率的影响

(a) Effect of powder mass flow on porosity



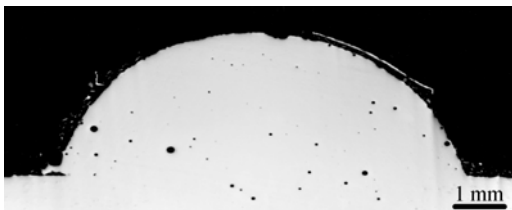
(b) 实验点 7

(b) Experimental point



(c) 实验点 8

(c) Experimental point 8



(d) 实验点 9

(d) Experimental point 9

图 7 送粉量对孔隙率影响的统计分析结果及代表性实验点镀层横截面的光学显微照片

Fig. 7 Statistic results of effects of powder mass flow on porosity and micrographs of typical experimental points

从图 7 中可以看到,随着送粉量的增加,横截面孔隙率、镀层孔隙率及横截面孔隙率的标准差呈明显的上升趋势。当送粉量从 0.64 kg/h 增加至 6.48 kg/h 时,镀层孔隙率从约 0.01% 增加至约 0.84%,横截面孔隙率标准差从约 0.02% 增加至约 0.4%。

当送粉量增加时,由于激光功率恒定,单位质量粉末得到的激光能量减小,不利于粉末的充分熔化。另一方面,由于激光光斑直径恒定,因此熔池尺寸基本保持不变,这会导致送粉量增加时镀层厚度的增加,从而阻碍引入工艺的气体逸出至外界环境。在高沉积率 LMD 工艺中,随着送粉量的增加,镀层材料的孔隙率显著增加。因此,通过限制送粉量可以降低高沉积率 LMD 材料的孔隙率。

5 结 论

本文以镍基高温合金 IN718 粉末为沉积材料,研究了高沉积率 LMD 的主要工艺参数激光功率、扫描速度及送粉量对 LMD 材料孔隙率的影响。首先分析了粉末材料的理化特性,具体包括粉末的化学元素组成、孔隙率情况、粉末颗粒的微观结构及形状等。然后以沉积率约为 2 kg/h 的高沉积率 LMD 工艺为基础,设计并完成了系列实验,对不同参数下各镀层的横截面孔隙率及镀层孔隙率进行了量化统计分析。

IN718 系列 LMD 实验及孔隙率量化分析结果表明:提高激光功率可以有效降低 LMD 材料的孔隙率,同时提高横截面孔隙率的一致性。与传统 LMD 工艺不同,高沉积率 LMD 工艺中扫描速度对材料孔隙率无明显影响。提高送粉量会显著增加材料的孔隙率,但会破坏 LMD 材料横截面孔隙率的一致性。因此,通过提高激光功率和限制送粉量可以降低高沉积率 LMD 工艺的材料孔隙率。

参考文献:

- [1] YA W, KONUK A R, AARTS R, *et al.*. Spectroscopic monitoring of metallic bonding in laser metal deposition [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 276-284.
- [2] GRAF B, AMMER S, GUMENYUK A, *et al.*. Design of experiments for laser metal deposition in maintenance, repair and overhaul applications [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 11:245-248.
- [3] AMINE T, NEWKIRK J W, LIOU F. Investigation of effect of process parameters on multilayer builds by direct metal deposition [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73: 500-511.
- [4] AMINE T, NEWKIRK J W, LIOU F. An investigation of the effect of direct metal deposition parameters on the characteristics of the deposited layers [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2014, 3:21-34.
- [5] MICHALERIS P. Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2014, 86:51-60.
- [6] HONG C, GU D, DAI D, *et al.*. Laser metal deposition of TiC/Inconel 718 composites with tailored interfacial microstructures [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 54:98-109.
- [7] ZHANG K, WANG S, LIU W, *et al.*. Characterization of stainless steel parts by laser metal deposition shaping [J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 104-119.
- [8] ZHAO X, CHEN J, LIN X, *et al.*. Study on microstructure and mechanical properties of laser rapid forming Inconel 718 [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 478:119-124.
- [9] BLACKWELL P L. The mechanical and microstructural characteristics of laser-deposited IN718 [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 170:240-246.
- [10] QIU C, RAVI G A, DANCE C, *et al.*. Fabrication of large Ti-6Al-4V structures by direct laser deposition [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 629:351-361.
- [11] YU J, ROMBOUTS M, MAES G. Cracking behavior and mechanical properties of austenitic stainless steel parts produced by laser metal deposition [J]. *Materials & Design*, 2013, 45:228-235.
- [12] BRICE C A, SCHWENDNER K I, MAHAFFEY D W, *et al.*. Process variable effects on laser deposited Ti-6Al-4V [J]. In: *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 1999:369-374.
- [13] KOBRYN P A, MOORE E H, SEMIATIN S L. The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43: 299-305.
- [14] NG G K L, JARFORS A E W, BI G, *et al.*. Porosity formation and gas bubble retention in laser metal deposition [J]. *Applied Physics A-materials Science & Processing*, 2009, 97:641-649.
- [15] AO S I, CASTILLO O, DOUGLAS C, *et al.*. International multi conference of engineers and computer scientists [C]. IMECS, Kowloon, Hong Kong, 2014:12-14.

作者简介:



仲崇亮(1985—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,2012年参加中欧联合培养博士生计划,主要从事高沉积率激光金属沉积、激光金属材料增材制造等方面的研究。E-mail: chongliang.zhong@gmail.com



付金宝(1982—),男,吉林长春人,助理研究员,2006年于吉林大学获得学士学位,2008年于浙江大学获得硕士学位,2010年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事航空成像与测量技术、线性系统模型降阶、控制系统中的信息描述方法、激光金属沉积等方面的研究。E-mail: ciomp2008_fjb@sina.com

导师简介:



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感相机稳定成像技术的研究。E-mail: dingyl1964@sohu.com