

电子束熔融直接金属成型工艺的研究

刘海涛, 赵万华, 唐一平

(西安交通大学制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 研究了工艺参数对电子束熔融工艺过程的影响, 采用线性回归分析建立了一个数学模型. 研究表明, 扫描线宽与电子束电流、加速电压和扫描速度呈明显的线性关系, 当搭接率为 0.5 时, 所获得的层面质量优于搭接率小于 0.5 时的层面质量, 回旋扫描路径可以减少热量的积累, 有效地防止金属小液滴的飞溅, 从而得到较好的层面质量. 针对实验中出现的电子与粉末碰撞造成的未熔粉末的飞溅, 采用优化的工艺参数对粉层进行预热, 从而大大减少了未熔粉末的飞溅. 对于扫描线的球化, 采用功率与扫描速度的比值大于 0.1 的工艺参数进行扫描, 获得了连续的扫描线. 通过对工艺参数的优化, 得到了性能优异的一维扫描线和二维层面, 为三维实体的成型奠定了基础.

关键词: 直接金属成型; 电子束; 工艺参数

中图分类号: TG669 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1307-04

Process Investigation of Direct Metal Fabrication Based on Electron Beam Melting

Liu Haitao, Zhao Wanhua, Tang Yiping

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The influence of the process parameters on electron beam melting process is investigated and a mathematic model is set up by linear regression analysis. The results show linear relationships of the width of scanning line with the beam current, accelerating voltage, and scanning speed. The quality of layer produced at R_0 equal to 0.5 is better than that produced at R_0 less than 0.5. The heat accumulation can be reduced by spiral scanning so that droplet splash is eliminated and high quality layer is obtained. Aiming at the unmelted powders splash from collision between electron and powders, optimized process parameters is selected to pre-heat the powders to obviously reduce the splash. For the balling of scanning line, the process parameters with the ratio of power to scanning speed greater than 0.10 are employed to form a continuous scanning line. One-dimensional scanning line and two-dimensional layer with high performance are obtained by process parameters optimization to lay a foundation for three-dimensional solid object fabrication.

Keywords: direct metal fabrication; electron beam; process parameter

电子束熔融(EBM)是一种以电子束为能量源的直接金属成型工艺, 与以激光为能量源的金属成型工艺相比, EBM 工艺具有能量利用率高、无反射、功率密度高、聚焦方便等许多优点, 在快速原型(RP)和快速制造(RM)领域的应用具有广阔的前

景^[1-4]. 2004 年, Cormier 等人^[5]研究了 H13 钢粉末熔融制备零件的机械性能和微观组织成分; 2005 年, 清华大学齐海波、颜永年等人^[6-7]做了初步的烧结试验. EBM 是一个复杂的工艺过程, 金属粉末的液相烧结和熔融、凝固是其主要的成型机制^[8]. 许多

工艺参数(加速电压、束电流、扫描速度、搭接率、扫描策略等)对这一过程有着重要的影响,目前对这一过程还没有文献进行详细的阐述.

1 工艺实验

EBM的工艺原理如图1所示.实验设备采用法国TECHMETA公司的电子束焊接机,在 $100\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的不锈钢基板上,铺层厚为 0.15 mm 的316不锈钢粉末,采用的电子束电流为 $1.5\sim 3.0\text{ mA}$,加速电压为 $20\sim 60\text{ kV}$,扫描速度为 $400\sim 1\,200\text{ mm/min}$.实验采用316不锈钢粉末,粒度为300目(大约 $50\text{ }\mu\text{m}$),呈正态分布,颗粒形状为球形,熔点约为 $1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

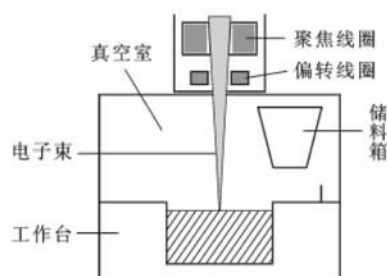
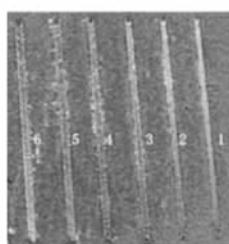


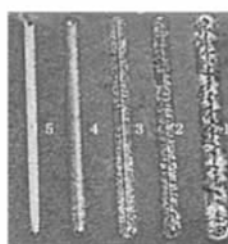
图1 EBM工艺的原理图

2 实验结果

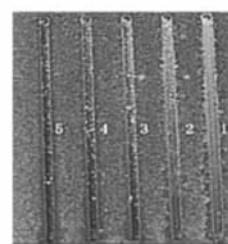
2.1 工艺参数对扫描线宽的影响



(a)电子束电流变化



(b)加速电压变化
1~5:扫描线编号



(c)扫描速度变化

图2 工艺参数变化时的扫描形貌

表1 理论线宽与实际线宽的比较

U/kV	I/mA	$v/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	理论线宽/mm	实际线宽/mm	误差/%
50	2.5	400	0.83	0.89	7.23
50	3.0	600	0.84	0.84	0.00
60	1.5	600	0.50	0.52	4.00
50	2.4	1\,000	0.52	0.49	5.77

图2为参数变化时的扫描形貌.图3~图5显示了电子束电流 I 、加速电压 U 和扫描速度 v 对扫描线宽 W 的影响.从图2中可以看出,随着 I 的增大, W 也随之增大,呈明显的线性关系,扫描线宽随 U 的增大而增大,但由于图2中的1、2、3号扫描线出现了球化现象,因此给线宽的测量带来了一定误差.当 v 增大时,扫描线宽减小,二者呈线性关系,但其影响远不如电子束电流和加速电压大,也就是说,扫描线宽对扫描速度不敏感.

Lin^[9]认为,激光熔覆的扫描线宽与光斑直径存在着对应关系,Steen^[10]则将扫描速度考虑在内,建立的扫描宽度与光斑直径、扫描速度的模型为

$$W = D(1 - a_i v) \quad (1)$$

式中: D 为光斑直径; a_i 为经验常数.

实际上,扫描线的宽度取决于输入功率的大小,不管是增大 I 还是增大 U ,实际上都是增大输入功率,而减小 v 则增大了单位时间内输入的功率.参考式(1),通过对图3~图5的数据进行线性回归分析,建立的模型为

$$W = a_1 UI(1 - a_2 v) \quad (2)$$

经计算, $a_1 = 7.57 \times 10^{-3}$, $a_2 = 4.33 \times 10^{-4}$.任选4组参数,应用式(2)计算的理论与实际扫描线宽的结果见表1.

2.2 工艺参数对层面质量的影响

2.2.1 搭接率 扫描线要想形成一个质量好的平面,相邻两道扫描线的合理搭接是必不可少的.如图

6所示,搭接率 $R_0=B/A$,采用3种不同的 R_0 ,即 $R_0=0.5$, $R_0=0.4$, $R_0=0.3$,其他参数为 $U=60$ kV, $I=3$ mA, $v=600$ mm/min,其结果如图7所示。从图中可看出, $R_0=0.5$ 的层面质量明显优于 $R_0=0.4$ 和 $R_0=0.3$ 的层面质量。

2.2.2 扫描路径 扫描路径是指零件每层内部的填充方式。文献[11]研究了扫描路径对零件机械性能的影响。实际上,扫描路径还将影响层面质量。本文采用了3种不同的扫描路径,其他参数为 $U=60$ kV, $I=3$ mA, $v=600$ mm/min, $R_0=0.5$,其结果如图8所示。

采用先扫描零件的长边的方式,前几条线形成的层面质量较好,但随着扫描的进行,由于真空中散热条件较差,热量累积严重,因此导致熔池过热沸腾,金属小液滴飞溅而出(飞溅问题后面将要重点讨论),冷却后形成小球落在未扫描的粉层上,从而影

响了层面的表面质量。在电子束扫描过程中,如果先扫描短边会使热量的积累更加严重,层面的后半部分由于金属小球的“污染”,因此质量更差。

回旋扫描可以较好地解决小液滴的飞溅问题,由于相邻的扫描线有较长的时间冷却,从而不会导致热量的累积,因此完全消除了金属小球的飞溅现象,层面的质量明显好于长边扫描和短边扫描。

3 讨论

3.1 两种飞溅现象

在电子束扫描的过程中会产生两种飞溅:第1种飞溅是由热量累积造成的熔池过热沸腾所产生的金属小液滴的飞溅,使层面质量变得很差;第2种飞溅是由于金属粉末没有熔融而被电子束直接冲开,没有参与成型,从而使成型的效率很低,甚至使成型无法进行下去。

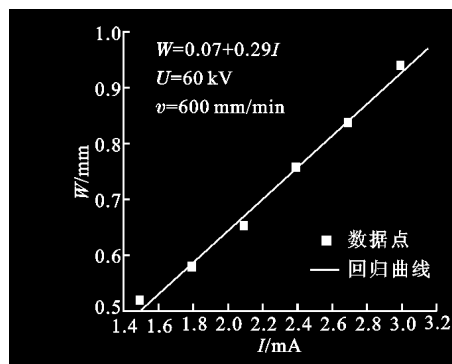


图3 电子束电流对扫描线宽的影响

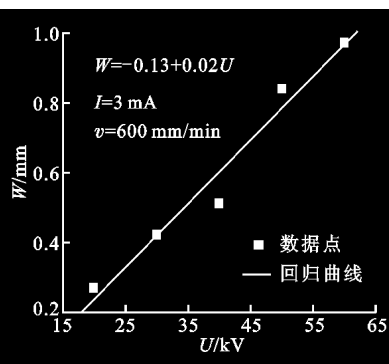


图4 加速电压对扫描线宽的影响

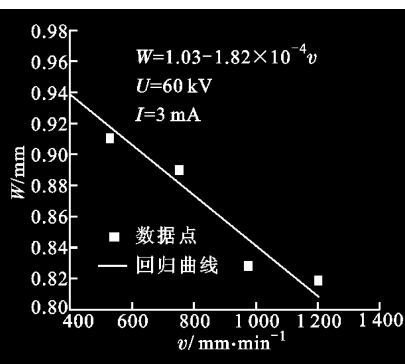
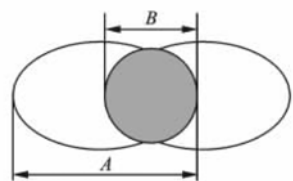
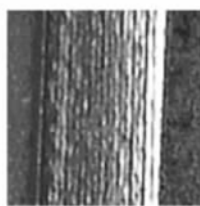


图5 扫描速度对扫描线宽的影响

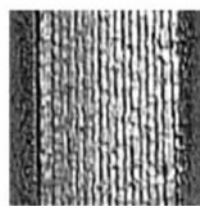


A:单道扫描线宽度;B:双道扫描线重叠部分宽度

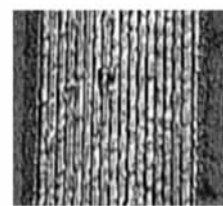
图6 搭接率示意图



(a) $R_0=0.5$

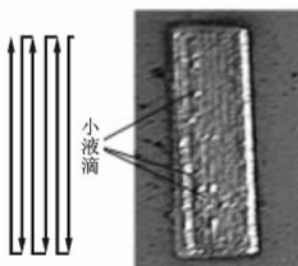


(b) $R_0=0.4$

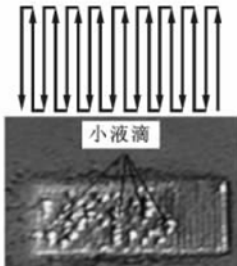


(c) $R_0=0.3$

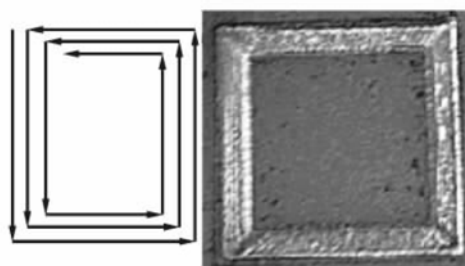
图7 不同搭接率对层面质量的影响



(a)长边扫描



(b)短边扫描

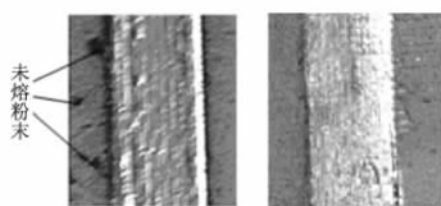


(c)回旋扫描

→:电子束扫描方向

图8 不同扫描策略对层面质量的影响

将待烧结粉末加热到一定的温度,增加粉末的黏度,从而使其对基板有一定的黏接力,可以有效地减小飞溅.文献[12]中采用的是将基板保持恒定的温度(80℃),文献[5]则采用预热工艺,即先用较小的功率、较快的扫描速度扫描粉层以增加粉末的黏度,然后再扫描成型.本文经过多次试验,最后采用60 kV的加速电压、1.0 mA的电子束电流和2 200 mm/min的扫描速度对粉层进行预热,然后再进行扫描.与图8a相比,可以看到飞溅大大减少了(见图9).



(a)未预热 (b)预热
图9 预热工艺对层面质量的影响

3.2 球形现象

球形现象又称为形球现象,是指金属粉末虽然熔融,但是没有形成一条完整平滑的扫描线,而是各自团聚成小球,如图4b中1、2号扫描线所示,这主要是由于熔融粉末形成的金属小液滴表面张力过大所致. Kruth^[11]指出,只有在合适的功率和扫描速度范围内,扫描线才能连续,否则就会出现球形现象.功率与扫描速度的比值

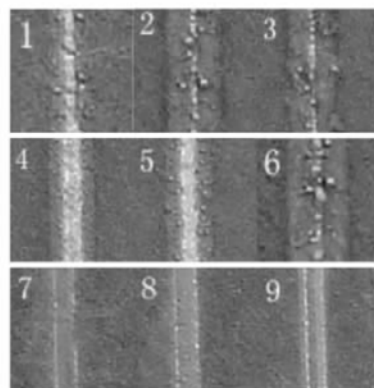
$$\eta = P/v \quad (3)$$

式中: P 为输入的功率.选取9组参数(见表2)进行

表2 η 与球化的关系

参数编号	P/W	$v/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	η	结果
1	40	400	0.10	临界
2	50	800	0.06	球形
3	50	1 200	0.04	球形
4	120	400	0.30	连续
5	120	800	0.15	连续
6	80	1 200	0.07	球形
7	80	400	0.20	连续
8	150	800	0.19	连续
9	150	1 200	0.13	连续

实验.实验发现,只有当 η 大于0.1时,才能得到连续的扫描线,否则扫描线会被球形化,如图10所示.



1~9:对应于表2中的参数编号

图10 不同 η 值的扫描线形貌

4 结 论

本文建立了描述电子束熔融316不锈钢粉末扫描线宽规律的数学模型,揭示了扫描线宽与电子束电流、加速电压和扫描速度呈线性关系,搭接率为0.5时的层面质量优于搭接率小于0.5时的层面质量.实验中出现了两种类型的飞溅:熔池过热沸腾产生的金属小液滴的飞溅和未熔融粉末的飞溅,采用回旋扫描路径可以减少热量的积累,有效地防止第1种类型的飞溅.采用60 kV的加速电压、1.0 mA的电子束电流和2 200 mm/min的扫描速度对粉层进行预热,可以有效地防止第2种飞溅.当采用功率与扫描速度的比值大于0.1的参数进行扫描时,可以获得连续的扫描线,而优化后的工艺参数可以获得优异的一维扫描线和二维层面,这对后续的三维实体的成型具有重要的指导意义.

参考文献:

- [1] Jeng J Y, Lin M C. Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110(1):98-103.
- [2] Simchi A, Petzoldt F, Pohl H. On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(3):319-328.
- [3] Santosa E C, Masanari S, Osakada K, et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(12/13):1459-1468.
- [4] Dirk A H, Matthias V W, Tobias W, et al. Structural mechanical and in vitro characterization of individually structured Ti-6Al-4V produced by direct laser forming[J]. Biomaterials, 2006, 27(7):955-963.
- [5] Cornier D, Harrysson O, West H. Characterization

- of H13 steel produced via electron beam melting [J]. Rapid Prototyping Journal, 2004, 10 (1):35-41.
- [6] 何伟, 齐海波, 林峰, 等. 电子束直接金属成形技术的工艺研究[J]. 电加工与模具, 2006(1):58-61.
He Wei, Qi Haibo, Lin Feng, et al. Technology research of direct metal forming based on electron beam [J]. Electromachining & Mould, 2006(1):58-61.
- [7] 齐海波, 颜永年, 林峰, 等. 电子束直接熔化技术中的粉末状态分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(8):1012-1015.
Qi Haibo, Yan Yongnian, Lin Feng, et al. Analysis of metal powder deposition in electron beam direct melting technology [J]. Journal of Tsinghua University (Sci and Tech), 2005, 45(8):1012-1015.
- [8] Kruth J, Mercelis P, Vaerenbergh J. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting [J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(1): 26-36.
- [9] Lin Jehnning, Hwang B C. Coaxial laser cladding on an inclined substrate[J]. Optics & Laser Technology, 1999, 31(8):571-578.
- [10] Steen W M, Weerasinghe V M, Monson P, et al. Some aspects of the formation of laser clad tracks[J]. SPIE, 1986, 650(1):226-234.
- [11] Kruth J, Froyen L, Vaerenbergh J, et al. Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149 (1/3): 616-622.
- [12] Simchi A. Direct laser sintering of metal powders: mechanism kinetics and microstructural features [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 428(1/2):148-158.

(编辑 管咏梅)