

三维金属零件的电子束选区熔化成形*

颜永年 齐海波 林峰 何伟 张浩然 张人佶
(清华大学机械工程系 北京 100084)

摘要: 针对电子束选区熔化成形技术中金属粉末在高能电子束作用下容易溃散的特点, 进行不同形状的 316L 不锈钢粉末的成形研究, 得出既不溃散又具有较好成形性的粉末配比。针对成形过程中成形区域的温度场分布特点, 提出成形件旋转法和多连通区域零件的薄层切割法, 能较好地解决成形件第一条扫描线球化和成形区域不同部位所需温度不相同的问题, 简化 CAD 模型的数据处理过程。在材料研究和工艺研究的基础上, 制造出三维金属零件, 层间为完全冶金结合, 层内没有未熔颗粒和空洞, 组织结构为均匀细小的蜂窝状枝晶组织, 水平和垂直拉伸试样的极限强度和断后伸长率为 600 MPa、40% 和 560 MPa、35%。

关键词: 快速制造 电子束选区熔化成形 316L 不锈钢粉末 温度场

中图分类号: TN101

0 前言

电子束快速制造技术是一种基于离散—堆积成形原理, 以高能量密度和高能量利用率的电子束作为加工热源, 对材料进行完全熔化成形的三维实体零件制造方法。与激光相比, 电子束具有能量利用率高、加工材料广泛、无反射、加工速度快、真空环境无污染及运行成本低等优点, 因此基于电子束的快速制造技术在国际上受到了越来越广泛的关注, 美国麻省理工学院、美国航空航天局、瑞典 Arcam 公司和我国清华大学均开发出了各自的基于电子束的快速制造系统^[1-2]。前两种利用电子束熔化金属丝材, 电子束固定不动, 金属丝材通过送丝装置和工作台移动, 与激光近形制造技术类似; 后两种利用电子束熔化铺在工作台上的金属粉末, 与激光选区熔化技术类似, 利用电子束实时偏转实现熔化成形, 该技术不需要二维运动部件, 可以实现金属粉末的快速扫描成形, 是目前国际上金属零件快速制造的研究热点之一。

本文采用自行研制的电子束选区熔化成形快速制造系统, 进行了不同颗粒形状的 316L 不锈钢粉末的快速制造, 针对高能运动的电子容易引起粉末溃散及成形区域温度场的特点, 提出了相应的解决方案, 并制备了内部组织完全致密的三维金属零件。

1 试验材料及设备

1.1 试验材料

试验所用材料为气雾化和水雾化的 316L 不锈钢粉末组成的混合粉末, 其中气雾化 316L 不锈钢粉末的粒径为 40~100 μm , 水雾化 316L 不锈钢粉末的粒径在 40 μm 以下, 混合粉末的质量分数如表 1 所示, 形貌如图 1 所示。形状规则的为球形气雾化粉末, 颗粒细小而不规则的为水雾化粉末。

表 1 316L 不锈钢粉末的质量分数 %

C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	Fe
0.017	71.000	12.800	2.100	0.800	0.100	0.025	0.005	余量

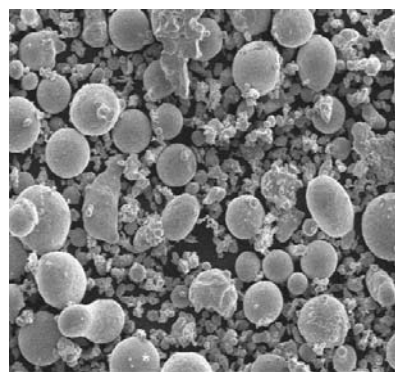


图 1 试验所用粉末形貌的扫描电镜照片 $\times 200$

1.2 试验设备

试验所用设备为自行研制的电子束选区熔化成形系统 EBSM 150-I, 成形空间为 $\phi 150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 加速电压为 0~60 kV, 电子束电流在 0~60 mA 之间可调, 电子束电流在 3 mA 下的束斑大小为 0.3 mm, 最高线扫描速度为 2 m/s, 成形室真空度为

* 国家自然科学基金(50475015)和教育部博士点基金(20050003046)资助项目。20060704 收到初稿, 20070206 收到修改稿

0.05 Pa。

电子束选区熔化成形技术 (Electron beam selective melting, EBSM) 的工艺原理如图 2 所示^[3-4]: 先在铺粉平面上铺展一层粉末并压实; 然后, 电子束在计算机的控制下按照断面轮廓的信息进行有选择的熔化, 层层堆积, 直至整个零件全部熔化完成; 最后, 去除多余的粉末得到所需的三维零件。

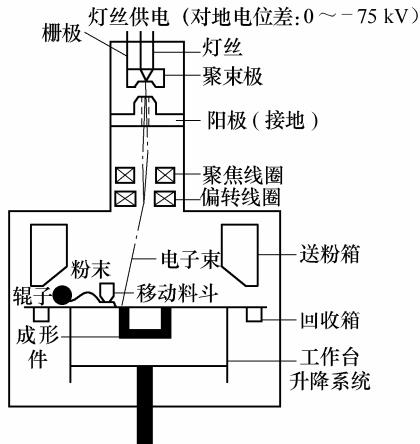


图 2 EBSM 技术工艺原理示意图

2 试验内容

EBSM 技术的研究内容主要涉及三部分: 试验所用材料的选取、填充线的扫描方式及工艺参数的研究。

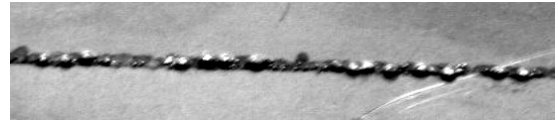
2.1 不同形状粉末材料的成形试验

对不同粉末比例的混合粉末进行了成形试验。结果发现: 雾化粉末(水雾化粉末的比例为 0%) 在电子束作用下极易发生粉末溃散现象, 即金属粉末受到某种“外力”作用, 以束斑为中心向四周飞出, 偏离其原来堆积位置, 后续成形过程无法实现。通过降低电子束电流($I_0 \leq 0.5 \text{ mA}$)和电子束的偏转扫描速度($v \leq 5 \text{ mm/s}$), 可以得到连续的线段, 如图 3a 所示。但如此低的电子束电流和扫描速度使得成形效率极为低下, 无法满足金属零件的多层快速制造。水雾化粉末(雾化粉末的比例为 0%) 能够承受较高的电子束电流($I_0 \leq 4.0 \text{ mA}$)和线扫描速度 ($v \geq 1000 \text{ mm/s}$)进行熔化成形, 但却不易得到连续的扫描线, 扫描线断开和聚球现象严重。

两种粉末相结合, 则不仅可以提高粉末抗溃散的能力, 而且可以克服粉末熔化后聚球现象的发生, 是一种适合于电子束选区熔化成形的材料组成。



(a) 雾化 316L 不锈钢粉末的一维成形形貌
($I_0 = 0.5 \text{ mA}$, $v = 1.5 \text{ mm/s}$)



(b) 水雾化 316L 不锈钢粉末的一维成形形貌
($I_0 = 2.5 \text{ mA}$, $v = 15 \text{ mm/s}$)

图 3 316L 不锈钢粉末在电子束作用下的一维成形形貌

2.2 填充线扫描方式

在 EBSM 技术中, 金属粉末按断面轮廓信息需要完全熔化及无孔洞决定了成形件内部同一条填充线的数据点之间与相邻填充线之间都必须有一定程度的重叠度, 填充线的扫描不仅占据了每层扫描的绝大多数时间, 而且填充线质量的好坏对成形件的内在质量具有直接影响。因此, 填充线扫描是 EBSM 技术的主要研究对象。在常见的填充线扫描方式中, Z 字形扫描方式克服了单向扫描带来微观组织各向异性的不足及空行程引起的冗余扫描时间, 扫描方式也相对简单, 偏转线圈对扫描信号改变的响应速度快。因此, 本研究采用 Z 字形扫描方式对填充线进行扫描。

针对粉末完全熔化成形技术中经常出现的第一条扫描线球化或第一条边不稳定性问题^[5-6], 在零件的 CAD 建模时将其旋转一定角度, 即对于图 4 所示的长方形成形件, 当 $\beta = 90^\circ$ 时, 第一条扫描边为长方形的长边; 当 $\beta = 0^\circ$ 时, 第一条扫描边为长方形的短边; 当成形件旋转一个角度, 即 β 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间时, 第一条扫描边长度很小, 甚至可以退化为一个点, 从而大大减少了第一条线的长度, 并有效避免了其球化现象的发生, 从而保证了扫描起始区间的成形质量。

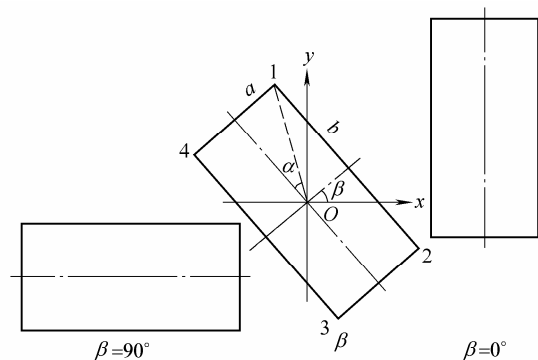


图 4 成形件旋转的填充线扫描方式示意图

从工艺稳定性的角度出发，相邻填充线的长度差距越小越好。对于图4所示的成形件，其相邻填充线的长度差距为

$$\Delta s = \frac{2\Delta h}{\sin 2\beta} \tag{1}$$

式中 Δh ——相邻填充线的间距

β ——成形件的旋转角度

当旋转角度 $\beta = 45^\circ$ 时，相邻填充线的长度差距最小。

对于含内孔零件的Z字形扫描方式，一般采用快速通过内孔的光栅扫描、分区扫描和轮廓偏置扫描三种形式。轮廓偏置扫描需要电子束在x和y两个方向频繁发生变化，从而对松散粉末造成很大的扰动，不利于熔化成形。因此，本研究不采用轮廓偏置扫描方式进行填充线的扫描熔化成形。又由于EBSM技术的目的是得到内部完全致密的金属零件，其扫描线间距很小，如果采用通过内孔的光栅扫描方式进行熔化成形，则会产生很多空程，影响成形效率，如图5a所示。分区扫描将零件分成多个子区域，相邻的子区域首尾相连(1→2→3→4)，形成连续的扫描路径，如图5b所示。分区扫描方式能减少空行程，成形效率高，但分层软件的程序编制复杂。

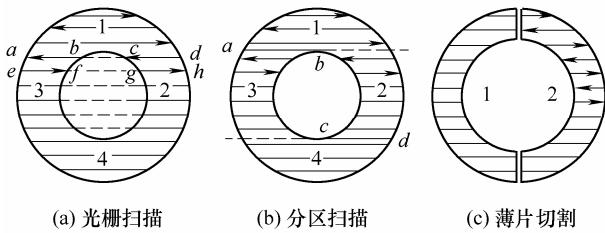


图5 含内孔零件的Z字形扫描方式示意图

为此，本研究在内孔零件CAD建模时，采用薄层切割法将内孔零件切成单连通区域，具体做法如图5c所示。切片为一个没有厚度的薄层，将零件分成1和2两个单连通区域，依次进行Z字形扫描，切缝部位依靠熔池进行“缝合”。薄层切割法的好处是：①能够避免复杂的数据处理，将复杂的多连通区域简化成多个单连通区域。②能够将填充线长度变短，相邻填充线的扫描时间间隔缩短，从而扫描当前线段时，上一条扫描线不仅保持了较高的温度，而且对当前熔化粉末有预热作用，粉末抗溃散能力与成形性都有极大的提高。

2.3 工艺参数的试验

EBSM技术中成形工艺参数众多，包括加速电压、电子束电流、束斑直径、聚焦电流、线扫描速度、填充线间距、铺粉厚度和成形室真空度等。为了研究方便，本研究中加速电压设为50 kV；成形

室真空度为0.05 Pa；当电子束电流在1.5~4 mA时，束斑直径为0.3 mm；铺粉厚度为0.5 mm。需要研究的工艺参数主要为：电子束电流、聚焦电流、线扫描速度以及填充线间距。

EBSM技术中，作用在粉末上的电子束能量密度不仅与电子束电流、加速电压、线扫描速度、填充线间距及束斑直径有关，而且与聚焦电流有很大的关系。因为高速运动的电子具有很强的穿透能力，不同聚焦程度的电子束对粉末的熔化行为具有较大的影响。为此，将EBSM技术中的能量密度因子 E_0 表示为

$$E_0 = k \frac{\eta U I_0}{\pi r^2} \frac{2r}{v} \frac{2r}{\Delta h} \frac{I_a}{I_F} \tag{2}$$

式中 k ——扫描成形件的形状系数

U ——加速电压

I_0 ——电子束电流

η ——能量利用率

r ——束斑直径

v ——线扫描速度

Δh ——填充线间距

I_a ——聚焦电流

I_F ——表面聚焦时的聚焦电流

图6显示了不同能量密度因子作用下，成形件层间结合情况的评分。根据曲线拟合，最佳能量密度因子的取值范围为 $E_0 = 60 \sim 70 \text{ GJ/m}^3$ ，相对应的工艺参数为：加速电压50 kV，电子束电流为2.5~3 mA，聚焦电流400 mA，填充线间距0.15 mm，线扫描速度30~40 mm/s。

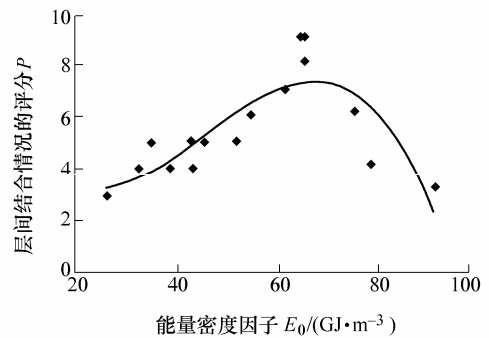


图6 不同能量密度因子作用下的成形件层间结合情况

3 分析与讨论

3.1 粉末溃散性对材料组成的影响

研究发现，与粉末溃散性有关的因素主要有：电子束电流、加速电压、扫描速度、粉末流动性和粉末的大小，其中粉末流动性又是最为关键的因素。研究中采用的雾化粉末为规则形状的球形

粉末,流动性好,粉末之间的摩擦因数和运动粘度小,从而造成其极易发生溃散现象,只能在较低电子束电流和扫描速度作用下成形。水雾化粉末形状不规则,粉末之间相互搭接,摩擦因数和运动粘度远大于气雾化粉末,所以电子束电流和扫描速度可以提高。

水雾化粉末不易得到连续扫描线的原因是:水雾化粉末的表面形状不规则,表面能高。当电子束作用到其上时,不规则的尖角部位迅速发生熔化,将周围的粉末黏结在一起,随着电子束电流的增加和线扫描速度的降低,粉末熔化程度加剧,周围的粉末被熔池大量吸收过来。当电子束扫描下一个点时,由于该点与前一点相邻区域的粉末被吸走了一部分,造成该点周围的粉末数量不够,从而产生聚球和扫描线断开的现象。在较低电子束电流和线扫描速度作用下,气雾化粉末也被前一点的熔池吸走了部分粉末,但其松装密度比水雾化高,当前点仍有足够多的粉末满足熔化需要,所以气雾化粉末能形成连续的扫描线。

从抗溃散能力的角度出发,水雾化 316L 不锈钢粉末远优于气雾化粉末,但其松装密度差的原因会导致成形件不致密及表面质量较差,不具备完全使用功能。另外,由于制粉工艺不同,水雾化 316L 不锈钢粉末的氧质量分数(3×10^{-3})远高于气雾化粉末的氧质量分数(8×10^{-4})。混合粉末中水雾化粉末的比例过高,不仅会造成粉末的流动性降低,堵塞送粉装置,降低成形件的松装密度,而且还会加大成形件中的氧质量分数,最终降低成形件的力学和物理性能,如腐蚀性能、拉伸性能等。

研究中,采用气雾化和水雾化两种粉末相搭配的原则进行了不同比例的成形试验,很好地解决了粉末溃散及松装密度和表面质量差等问题,得到了适合 EBSM 技术的粉末材料,二者的比例气雾化粉末为 60%~80%,水雾化粉末为 20%~40%。气雾化粉末直径较大,作为“骨架”材料,水雾化粉末直径较细,作为填充材料。

3.2 成形区域温度场对填充线扫描方式的影响

不管是采用成形件旋转法,还是多连通区域采用薄片切割法,目的均是为了使得成形区域的温度能满足粉末熔化的需求:成形区域的温度既要保证所被选择的粉末发生完全熔化,而且又要避免输入能量过大,以免引起粉末溃散和金属蒸发加剧。

成形区域的温度控制需要解决三个方面的问题:① 第一条扫描线球化问题或第一条边不稳定性。② 不同区域能量分布问题。③ 多连通区域的扫描顺序问题。

第一条扫描线球化或第一条边不稳定性的产生过程如下:对于图 4 所示的不进行旋转的成形件,开始部分是一条条较长的填充线,相邻填充线的扫描时间间隔较长。当扫描后一条填充线时,前一条填充线由于与周围粉末之间存在较大的温度梯度,形成的液相来不及向周围铺展就快速冷却凝固^[7],并且由于热量损失过快,已成形层的上表面很难发生熔化,从而约束不住当前层的下表面,这些溶液在表面张力的作用下就聚集成球。第一条扫描线球化不仅影响了当前层的高度,导致后一层铺粉发生困难,而且降低了成形件内在质量,必须加以避免。本研究采用的成形件旋转法不仅将开始部分的填充线尺寸明显变短(图 4),而且开始部分相邻填充线的扫描时间间隔也缩短了,在输入能量不变的情况下,后一条填充线很快就获得了前一条填充线传递过来的热量,从而降低了热传导速度,间接地加大了输入能量。该方法不仅有效地降低了第一条边缺陷(球化,甚至扫描线断开)的发生,而且可以减少或避免对第一条边施加过多的能量导致粉末溃散现象发生的几率。

对于单连通区域,区域内部不同部位的温度分布存在较大的差别:开始扫描时,由于成形区域存在较大的温度差,热传导速度较快,为了保证粉末完全熔化及与已成形层形成冶金结合,需要较高的输入能量;中间部位的前端是已经扫描过的区域,具有较高的温度,与当前扫描部分的温度差小,热传导速度慢。后端是即将扫描到的部位,当前扫描部分的温度稍有下降就受到下一次电子束的加热作用(或者热传导),热传导速度也相应减慢。因此,输入能量必须有所减小;结束部位扫描时,虽然成形区域的前端温度较高,但成形区域的后端,即不参与熔化成形的粉末的温度较低,热传导速度较快,因此结束区域需要的能量介于中间区域和开始区域之间。为了解决第一条扫描线球化而采取的成形件旋转法同样可以解决以上问题:由于开始和结束区域的填充线段较短,相邻时间间隔也较短,热传导速度也有所延长,从而通过降低热传导速度来提高输入能量。

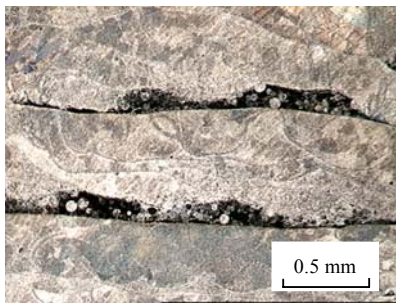
多连通区域成形件的成形借鉴单连通区域旋转法,首先将多连通区域成形件旋转一定角度,然后再采用薄片切割法将多连通区域分成独立的子区域,则不仅保证了子区域热量传递的连续性,而且使得子区域开始和结束部位的填充线长度和相邻填充线的间隔变短,从而延缓了这两个部位热传导速度。

3.3 能量密度因子对成形件性能的影响

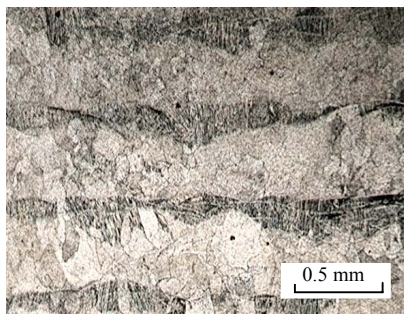
从图 6 可以得知,能量密度因子过低时($E_0 \leq 60 \text{ GJ/m}^3$),输入的电子束能量不能保证将当前层的

粉末和已成形层上表面一定厚度的区域一起熔化，致使层间结合不牢，出现未熔颗粒，严重影响层间结合强度。

图7a为能量密度因子为44.4 GJ/m³作用下的层间结合情况的低倍光学照片图，从图7a中不仅可见层间有未熔颗粒，而且每层上表面的曲线非常光滑，没有被电子束二次重熔的痕迹。图7b的能量密度因子为66.8 GJ/m³，层间和层内都未见未熔金属粉末和空洞，层间为冶金结合，各层仍清晰可见，上下两层之间有0.1 mm左右的重熔区。这两种不同能量密度因子作用下的成形件层内显微硬度差别不大，均在180 HV 0.5左右，但层间的显微硬度差别很大，分别为145 HV 0.5和178 HV 0.5。能量密度过大时($E_0 > 80 \text{ GJ/m}^3$)，不仅会发生部分元素在高温下蒸发的现象，而且会重新出现扫描线断开及球化现象，这是由于粉末过分熔化后不断吸收周围的粉末，并将这些粉末加以熔化，造成下一个点周围的粉末减少。



(a) $E_0 = 44.4 \text{ GJ/m}^3$ (层间评分为4)



(b) $E_0 = 66.8 \text{ GJ/m}^3$ (层间评分为9)

图7 不同能量密度因子作用下的层间结合情况

4 三维零件的成形及性能检测

4.1 三维零件的成形

需要制造的圆柱形零件具有以下特征：含内孔，20°的锥台，内孔直径变化，中间部位内孔直径比两头大，左右穿孔。该零件由不同大小和壁厚的圆环组成，因此采用薄层切割法，将圆环分成两个

独立的扫描子区域。

零件高度为45 mm，总层数为93层(开始3层在去除底板时切削掉)，每层制造平均时间为120 s左右，铺粉时间为20 s，总时间为4 h。制造完毕后，冷却20 min后取出。由于取出零件时温度没有完全降下来，表面可见氧化痕迹，如图8a所示，图8b为机加工后的照片图。



(a) 机加工前



(b) 机加工后

图8 带不等径内孔、锥台和垂直穿孔的成形件照片

4.2 性能检测

扫描成形件沿z轴方向切开，在丹麦Struers金相制样镶嵌机上进行试样镶嵌、预磨及抛光，然后在由Fe₃Cl 5 g、HCl 50 mL及去离子水100 mL组成的侵蚀液中进行腐蚀，并在日本HIROX公司的KH-1000视频显微分析仪上进行光学观察。层间结合情况与图7b类似，层间完全冶金结合、层内没有未熔颗粒和空洞。图9为层内微观组织的高倍光学显微照片图，该组织是枝晶组织的横断面形貌，为蜂窝状结构，组织均匀致密，无缺陷。

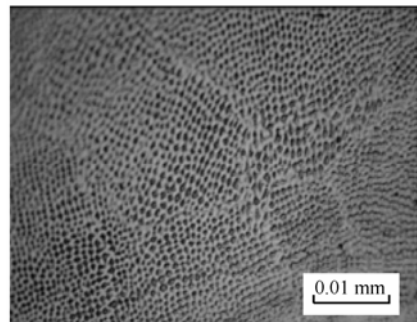


图9 层内微观组织的高倍光学显微照片

采用优化得到的能量密度因子所对应的工艺参数制备了拉伸试样，并经线切割加工成板状拉伸试样，在WDW型电子万能试验机上进行拉伸性能试验，加载速率为2 mm/s，拉伸试样没有进行热处理。表2显示了拉伸性能测试结果，水平拉伸试样和垂直拉伸试样的极限强度都高于消失模铸造态，由于晶粒细化，屈服强度比传统工艺高20%以上，采用EBSM技术制造的成形件可以完全满足使用要求。

表 2 拉伸性能测试结果

试验测试对象	屈服强度	抗拉强度	断后伸长率
	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$
水平拉伸试样 (EBSM)	330	600	40
垂直拉伸试样 (EBSM)	300	560	35
消失模铸造态	260	517	39

5 结论

(1) 进行了不同形状的 316L 不锈钢粉末材料的电子束选区熔化成形研究, 得出了既不溃散又具有较好成形性的粉末组成。

(2) 针对成形区域的温度场对成形质量的影响, 提出了解决第一条扫描线球化和不同部位所需能量不尽相同的成形件旋转法。

(3) 针对多连通区域的成形特点, 提出了一种薄层切割法, 将多连通区域分成温度场连续的子区域, 并将其与成形件旋转法相结合。

(4) 针对 EBSM 技术, 提出了影响成形件性能的能量密度因子, 并对不同能量密度因子作用下的层间结合情况进行了分析, 得出了适合本研究所采用材料的能量密度因子为 $60\sim 70 \text{ GJ/m}^3$ 。

(5) 制造了 316L 不锈钢的三维金属零件, 内部组织致密, 层间为冶金结合, 拉伸性能优于传统制造工艺。

参 考 文 献

- [1] WOHLERS T. Rapid prototyping, tooling and manufacturing state of the industry annual worldwide progress report [M]. Colorado: Wohlers Associates, Inc., 2005.
- [2] YAN Yongnian, LIN Feng, QI Haibo, et al. Technology Research of Direct Forming Mould Based on Electron Beam [C]// China Die & Mould Industry Association. Proceedings of 2005 Mori Seiki 2nd International Conference on Die & Mould Technology, October 17-19, 2005, Beijing. Beijing: China Machine Press, 2005: 165-170.
- [3] 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, 8(45): 1 012-1 015.
- [4] CORMIER D, HARRYSSON O, WEST H. Characterization of H13 steel produced via electron beam melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2004,10 (1): 35-41.
- [5] DAS S. On some physical aspects of process control in direct selective laser sintering of metals-part III [C]//

BARLOW J, BEAMAN J, BOURELL D, et al, eds. Twelfth Solid Freeform Fabrication Symposium, August 6-8, 2001, The University of Texas at Austin. Austin: The University of Texas, 2001: 102-109.

- [6] MORGAN R, SUTCLIFFE C J, NEILL W O. Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39 (4): 1 195-1 205.
- [7] 潘琰峰. 316 不锈钢金属粉末的选择性激光烧结成形研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.

PRODUCED THREE-DIMENSIONAL METAL PARTS BY ELECTRON BEAM SELECTIVE MELTING

YAN Yongnian QI Haibo LIN Feng
HE Wei ZHANG Haoran ZHANG Renji
(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Aimed at the problem that metal powder is easily break out of the powder bed under the action of high-energy electron beam, two kind shapes of 316L stainless steel powder are investigated, and the mixture powder which has the good forming ability and high counteract ability again the high-energy electron beam are gained. Aimed at the characteristic of temperature field during electron beam selective melting (EBSM), the rotating and slicing methods of multi-connect areas are adopted, which not only solve the problem of first line scan balling and the matching between the regions of the part and the temperature distribution, but also simplify the data processing of CAD model. Under the research on the materials and scanning methods, some three-dimensional parts are manufactured, the interfaces between the layers are fully metallurgical bonding, no unmelted particle and voids are founded in the part, the microstructure of the three-dimension forming parts are fine and cellular dendrites. The ultimate strength and elongation of the parallel and the vertical testing samples are 600 MPa, 40 % and 560 MPa, 35 %, respectively.

Key words: Rapid manufacturing

Electron beam selective melting

316L stainless steel powder

Temperature field

作者简介: 颜永年, 男, 1938 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为快速制造、生物制造及重型机械制造。

E-mail: dmeyyn@mail.tsinghua.edu.cn