

电子束选区熔化成形技术及应用*

冉江涛¹, 赵 鸿^{1,2}, 高华兵³, 果春焕¹, 王建东¹, 张 群², 姜风春¹

(1. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 航天海鹰哈尔滨钛业有限公司, 哈尔滨 150001;

3. 青岛哈船材料成型研究院有限公司, 青岛 266000)

[摘要] 电子束选区熔化成形技术是一种以电子束为热源的金属材料增材制造技术,可成形具有复杂形状的高性能金属零部件,在航空航天、生物医药、汽车制造等领域有着广阔的应用前景。简要介绍了电子束选区熔化成形技术的基本原理,综述了不同粉末材料电子束选区熔化成形组织与性能研究现状、电子束选区熔化成形过程数值模拟方法、电子束选区熔化成形技术的应用,最后指出改进技术迫切需要解决的问题并展望其未来发展趋势。

关键词: 电子束; 选区熔化; 金属材料; 组织与性能; 数值模拟

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.01/02.046



冉江涛

博士研究生,研究方向为钛合金增材制造。参与黑龙江省应用技术研究及开发计划项目重大项目等项目。

增材制造(Additive Manufacturing)技术是一种通过逐层连接材料来制造零部件的加工技术,也被称作3D打印、快速成形、快速制造以及自由成形。增材制造无需模具,不受刀

*基金项目:国家重点研发计划(2017YFB1103700);黑龙江省应用技术研究及开发计划项目重大项目(GY2018ZB0042)。

具的限制,能简化制造程序,缩短新产品研制周期,可大幅度缩短工件成形所需的工时,材料利用率高,成本低,符合现代绿色制造业低碳、节能、高效的产业发展方向。

电子束选区熔化成形技术(Selective Electron Beam Melting, SEBM)是一种粉末床沉积技术,是增材制造技术发展到了21世纪的一种子技术,该技术基于离散堆积原理,以电子束为热源,在计算机的控制下选择性地熔化金属粉末,逐层熔化,层层叠加,最终形成致密的三维金属零部件。该技术具有成形速度快、成形效率高、能量利用率高、成形件力学性能出色等优点,可成形具有复杂形状的高性能金属零部件^[1-5],广泛运用于航空航天、生物医药等领域^[6-8]。

本文简要介绍了电子束选区熔化成形技术的基本原理,综述了不同材料电子束选区熔化成形的组织与性能研究现状、电子束选区熔化成形数值模拟方法、电子束选区熔化成形

技术的应用及成形质量问题,最后展望了其发展趋势。

电子束选区熔化成形技术的发展

SEBM技术创始于20世纪90年代初期的瑞典,1997年瑞典Arcam公司成立。2003年3月第一台SEBM设备S12成功上市,随后Arcam公司分别推出A系列(A1, A2, A2X, A2XX)和Q系列(Q10Plus, Q20Plus)两种系列不同型号的电子束选区熔化设备。典型型号SEBM设备性能参数如表1所示。

2004年清华大学林峰教授申请了我国最早的SEBM成形装备专利并开发了国内第一台实验室SEBM成形装备,最大成形尺寸为 $\phi 150 \times 100\text{mm}$ ^[9]。汤慧萍团队于2007年联合林峰教授开发了针对钛合金的SEBM-250设备,最大成形尺寸为 $230 \times 230 \times 250\text{mm}$,层厚为 $100 \sim 300\mu\text{m}$,功率 3000W ,束斑尺寸

为 $200\mu\text{m}$, 扫描速度为 $10\sim 100\text{m/s}$, 零件成形精度为 $\pm 1\text{mm}$ ^[9]。随后该团队开发了试验用 SEBM-S1 设备, 功率 3000W , 束斑尺寸 $200\mu\text{m}$, 扫描速度 $10\sim 100\text{m/s}$, 粉末层厚^[9]。西安赛隆金属材料有限责任公司先后推出型号为 sailong-S200 及 sailong-Y150 两种型号的电子束选区熔化成形设备, 前者用于生产和科研, 具有两个成形仓, 后者用于生物医疗领域。天津清研智束科技有限公司于 2017 年推出型号为 QbeamLab 的电子束选区熔化成形设备, 最大成形尺寸为 $200\times 200\times 240\text{mm}$, 成形精度为 $\pm 0.2\text{mm}$, 电子束最大扫描速度为 10000m/s 。

如图 1 所示, 电子枪的灯丝受热发出电子, 电子在加速电压的作用下进行加速, 形成高速电子束, 电子束通过电磁透镜聚焦成一点, 随后通过偏转透镜进行偏转, 在计算机的控制下选择性地熔化金属粉末, 从而实现零部件的快速成形。粉末材料 SEBM 成形时, 粉末在耙子系统的作用下均匀地铺展在基板上, 系统利用低电流和低扫描速度的散焦电子束对粉末进行预热, 随后采用更大的电流和扫描速度对粉末进行熔化, 熔化完成后成形平台下降一个层厚的距离再次进行铺粉—预热—熔化循环, 直至整个零部件在真空下成形完成。

粉末材料电子束选区熔化成形组织与性能研究现状

电子束选区熔化成形技术可加工 Ti-6Al-4V、钛铝合金、钴基合金、镍基合金、铜、316L 不锈钢等多种粉末材料, 研究人员对这些粉末材料电子束选区熔化成形组织与性能进行了大量研究。

1 粉末材料电子束选区熔化成形组织

不同材料 SEBM 成形组织结构的共同点是都存在与成形方向平行的柱状晶粒, 如图 2 所示^[3, 10-14]。材

表1 不同型号SEBM设备性能参数

Table 1 Performance parameters of different types of SEBM equipment

工艺参数	型号 Q10Plus	型号 Q20Plus	型号 A2X
最大成形尺寸/mm	200×200×180	350×380 ($\phi\times h$)	200×200×380
电子束功率/W	50~3000		
电子束扫描速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	≤ 8000		
成形效率/($\text{cm}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	≤ 80		
束斑直径/ μm	≥ 100	≥ 180	0.2~1
层厚/mm	0.05~0.2		
粉末颗粒直径/ μm	45~105		
成形表面质量 $R_a/\mu\text{m}$	25~35		
真空度/ $\times 10^{-4}\text{mbar}$	5	5	5

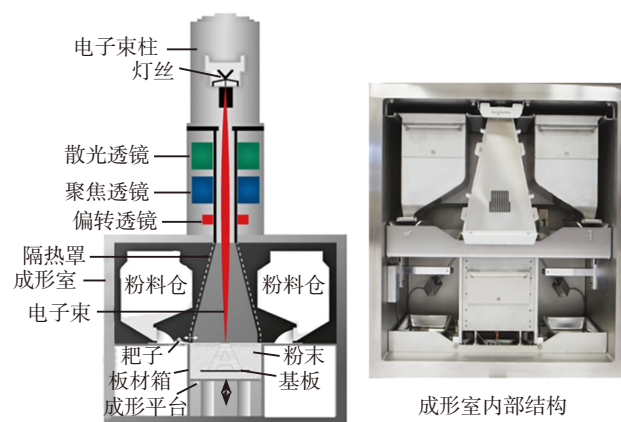


图1 电子束选区熔化成形装备结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of selective electron beam melting equipment

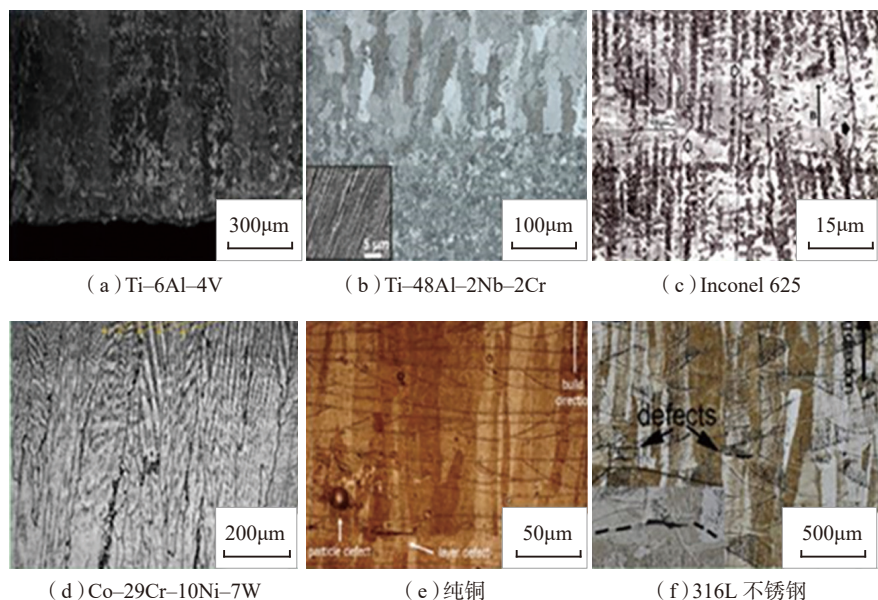


图2 不同材料SEBM成形平行于成形方向的柱状晶结构

Fig.2 Columnar structures of different materials parallel to build direction

料不同,晶粒成分、含量及形貌分布也不同。由于粉末材料成形时处在真空环境下,成形过程中产生的热量主要通过热辐射和热传导散失。沿着成形方向,材料熔化后凝固成固体,和粉末相比,固体的导热系数更高,因而热传导主要沿着成形方向进行,使得成形方向的热梯度比其他方向大,晶粒不断外延生长,形成柱状晶结构。

试样的成形尺寸和成形高度对其成形组织有显著影响。Tan 等^[8]指出原始 β 晶粒的宽度以及间距随着建造高度的增加而增加。Zhao 等^[15]的研究表明随着试样尺寸增加, α 板条厚度下降。Wang 等^[5]研究表明 SEBM 成形件的组织随着建造高度的增加而细化,随着试样厚度增加而粗化。Sinan 等^[6]在高度为 2mm、5mm 的试样顶部区域发现了马氏体,而高度为 18mm 的试样顶部区域的马氏体却不明显。Tan 等^[4]在厚度为 1mm 的试样顶部区域发现了马氏体组织,而厚度为 5mm、10mm 以及 20mm 的试样在同样的区域均没有发现马氏体组织,揭示了 Ti-6Al-4V 合金 EBM 成形过程中马氏体完整的相变路径为:

$$S_{(\text{powder})} - L_{(\text{melt})} - \beta_{\text{prior}} - \alpha' + \alpha_{\text{primary}} + \beta_{\text{retained}} - \alpha_{\text{secondary}} + \beta。$$

综上,粉末材料 EBM 成形时具有明显的尺寸效应和方向效应。试样的尺寸通过影响试样在成形过程中的冷却速率来影响成形组织。沿着成形方向,热量迅速通过已凝固层传递给基板,因而晶粒生长速度较快。

2 粉末材料电子束选区熔化成形性能

对粉末材料电子束选区熔化成形性能研究主要集中在力学性能、理化性能及生物相容性。粉末材料电子束选区熔化成形具有优良的力学性能,国内外研究人员对 SEBM 成形件的力学性能进行了大量研究,其

中以室温拉伸性能为主。表 2 为不同研究人员得出的拉伸力学性能数据。由表 2 可知,不同的研究人员得到的力学性能数据存在明显的差异,造成这种差异的原因在于 SEBM 成形件的力学性能受到多种因素的影响,包括成形装备、成形方向、工艺参数、成形件尺寸及厚度等。

对于 Arcam A2 系统,垂直建造的 Ti-6Al-4V 试样的抗拉强度高于水平建造试样,而前者的屈服强度和断后伸长率均低于后者;对于 Arcam Q10 系统,前者的抗拉强度、屈服强度及断后伸长率均高于后者^[20]。Bruno 等^[3]指出垂直建造的 Ti-6Al-4V 试样延展性高于水平建造的试样,Zhao 等^[10]发现垂直建造的 Ti-6Al-4V 试样延展性低于水平建造的试样。Wang 等^[5]发现随着建造高度增加, Ti-6Al-4V 试样的硬度由 343.0HV 增加到 362.5HV;而随着样品厚度增加,试样硬度由 357.9HV 降为 340.1HV。Tan 等^[8]则指出随着建造高度增加, Ti-6Al-4V 试样的硬度由 327HV 降为 319HV。Galarraga 等学者的研究表明,在与成形方向垂直的方向上疲劳裂纹扩展的门槛值比与成形方向平行的方向上裂纹扩展的门槛值高 15%

左右^[21]。当 Ti-48Al-2Cr-2Nb 圆柱棒试样的轴线方向与成形方向的夹角为 45° 时,试样的疲劳强度和经过热等静压处理的铸造试样相当^[22]。可见,粉末材料 SEBM 成形具有明显的方向效应。

热后处理等方法通过改变成形件的微观结构来改变成形件的力学性能。热等静压处理能使 Ti-6Al-4V 成形件内部孔洞和空隙等缺陷闭合,粗化成形件的组织,因而能使 Ti-6Al-4V 成形件的抗拉强度和屈服强度下降,疲劳强度和断后伸长率提高^[23]。对 Inconel 625 镍基合金成形件进行热等静压处理使其拉伸强度由 0.75GPa 增加到 0.77GPa,屈服强度由 0.41GPa 降为 0.33GPa,断后伸长率由 44% 增加到 69%^[12]。 β 退火热处理能使 Ti-6Al-4V 成形件的疲劳门槛值提高 35%~45%,原因是退火处理后粗化的组织消除了成形件的各向异性,提高了裂纹扩展路径的不规则性^[21]。伍斯特理工学院综合材料设计中心的研究团队系统地研究了热处理对 Ti-6Al-4V 成形件组织和力学性能的影响,建立了拉伸强度、屈服强度、断后伸长率关于 α 板条厚度的方程^[24]。

对于生物医疗领域,除了关注成

表2 Ti-6Al-4V合金电子束选区熔化成形室温拉伸力学性能

Table 2 Tensile mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy produced by selective electron beam melting at room temperature

抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ /%	研究团队
1150 ~ 1200	1100 ~ 1150	16~25	University of Texas ^[1]
948.1~1030.8	889.1~957.2	4.35~12.4	University of Malta ^[3]
980~1200	890~1100	18~25	Northeastern University ^[10]
1000~1020	920~940	13±1	National Institute of Standards and Technology ^[16]
964.5±0.3	851.8±5.8	16.3±0.8	National Institute of Standards and Technology ^[17]
900~1200	900~1150	11.7	Honeywell FMT ^[18]
1000~1102	950~1048	15~16	ZAL Center of Applied Aeronautical Research ^[19]

形件的力学性能,还关注其理化性能和生物相容性。赵冰净等^[25]系统地研究了 Ti-6Al-4V 电子束选区熔化成形的理化性能和生物相容性,结果表明 SEBM 成形件具有良好的理化性能和生物相容性。Koike 等^[26]研究发现 Ti-6Al-4V (ELI)成形件在人工唾液中的腐蚀行为和锻造及铸造 Ti-6Al-4V (ELI)试件相当,在人体正常氧化电位范围内具有明显的钝化特性和优异的耐腐蚀性。Zhao 等^[27]系统地研究了 Ti-6Al-4V 电子束选区熔化成形的耐腐蚀性,结果表明 SEBM 试件的耐缝隙腐蚀性优于锻造试件及 SLM 试件,在电极电压大于 1.5 V 时,SEBM 试件的耐腐蚀性优于锻造试件及 SLM 试件。

电子束选区熔化成形数值模拟方法

电子束选区熔化成形中运用到的数值模拟方法有离散单元法、蒙特卡罗方法、格子玻尔兹曼方法、有限元分析、相场模拟等方法。离散单元法主要用于模拟粉末床生成,蒙特卡罗方法主要用于追踪电子的轨迹。有限元分析、格子玻尔兹曼方法、相场模拟等方法研究得比较多,应用场

合也更为广泛。

1 有限元分析法

有限元分析是一种利用数学近似的方法求解复杂偏微分方程的数值计算方法。有限元分析最大的优点是能够使复杂的工程问题简单化,缺点是进行精度分析时需耗费大量的计算资源,在处理无限求解域问题时存在困难。对粉末材料 SEBM 成形过程中的温度场和应力应变进行分析 and 计算时主要使用有限元分析这种数值计算方法。

阿拉巴马大学机械工程系的研究团队借助有限元模拟了 Ti-6Al-4V 电子束选区熔化成形过程中电子束束斑大小和粉末孔隙率对熔池几何形状和温度分布的影响,如图 3 所示^[28]。由图 3 可知,随着粉末孔隙率增加,熔池变得更深、更短,熔池的最高温度也越高,而熔池的宽度几乎没有变化。随着电子束束斑直径增加,熔池的最高温度降低,原因是在电子束功率相同的情况下,束斑直径越大,能量密度就越低,对金属粉末的穿透深度下降,因而熔池变浅。在增大电子束功率的前提下,可适当增大电子束的束斑直径,从而提高成形效率。

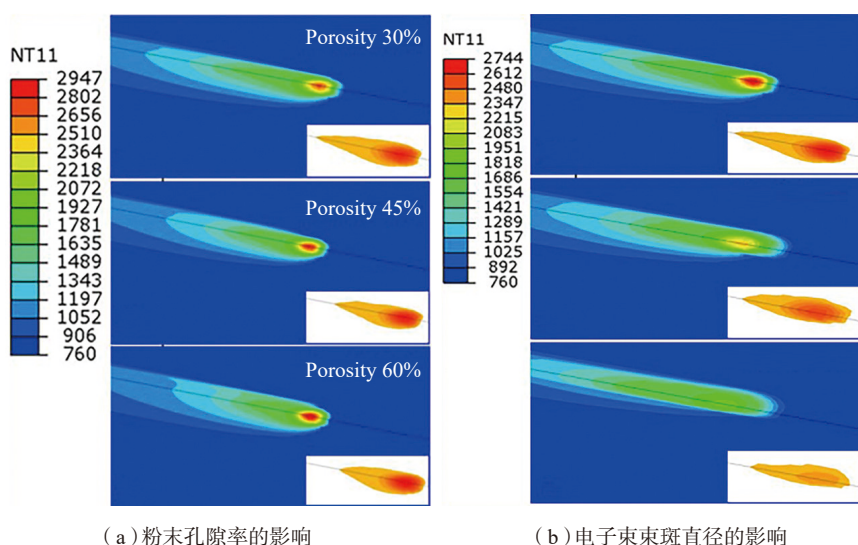


图3 粉末孔隙率和电子束束斑直径对熔池几何形状及温度分布的影响

Fig.3 Effect of beam size and powder porosity on geometry and temperature distribution of melt pool

纽伦堡埃朗根大学应用力学系的研究人员借助有限元分析得到了 Ti-6Al-4V 电子束选区熔化成形过程中不同时刻的温度分布,如图 4 所示^[29]。由图 4 可知,与电子束接触的粉末区域温度最高,当超过材料的熔点后材料迅速熔化,随后由于电子束移动以及周围粉末材料的导热作用,热量迅速散失,熔化的材料迅速冷却并凝固。该模型的不足之处在于模拟的熔池的最高温度比实际最高温度低。

2 格子玻尔兹曼方法

格子玻尔兹曼方法是在格子气自动机基础上发展而来的一种数值模拟方法,通过离散时间、空间、粒子速度来离散粒子动力学。该方法能有效描述粒子的运动,在处理流体与固体作用时比较直观,能处理复杂的边界条件,因而特别适合处理粉末材料电子束选区熔化成形过程中的固-液耦合问题。

Körner 等^[30]借助格子玻尔兹曼方法模拟了随机堆积的粉末床的堆积密度对熔池几何形状的影响,如图 5 所示。当粉末的堆积密度由 39% 增加到 74% 时,熔池形状逐渐接近半圆形,较高的堆积密度更有利于获得形状规则的熔池。

德国纽伦堡大学的研究团队研究了电子束选区熔化成形过程中通道状缺陷的形成和扩展机理,借助格子玻尔兹曼方法模拟了缺陷的演变过程,如图 6 所示^[31]。该模型成立的条件是重力在整个过程中起次要作用,同时瑞利时间远远小于扩散时间。此模型很好地揭示了 Ti-6Al-4V 成形过程中成形件内部通道状缺陷形成的机理,有利于进一步改进 EBM 工艺。

3 相场法

相场法 (Phase Field Method) 主要通过求解微分方程来获取研究对象在时间和空间上的瞬时状态,使用相场法能够处理具有复杂边界条件

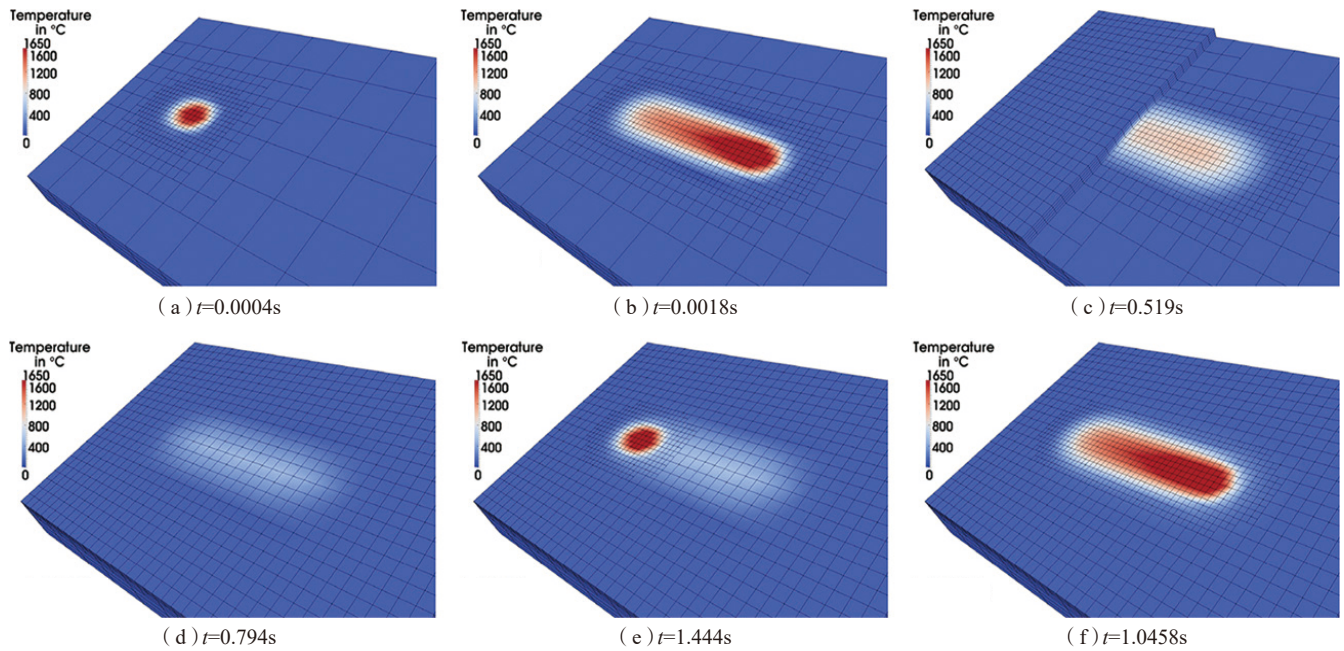


图4 Ti-6Al-4V成形过程中不同时刻温度分布

Fig.4 Temperature distribution with time during electron beam melting of Ti-6Al-4V

和初始条件的输运问题和相变问题,预测微观组织的演变过程,对于优化SEBM工艺具有重要意义。相场法的缺点是需耗费大量的计算时间,只能模拟具有少数枝晶的非常小的域。相场模型最初是用来模拟过冷纯熔体中枝晶的生长过程,现已扩展到合金的凝固过程。Wheeler等^[32]提出了第一个用于合金凝固的相场模型,该模型以热力学一致的方式导出,假设界面区域内的任意一点都是具有相同成分的固体和液体的混合物,是目前使用最为广泛的相场模型。Suzuki等^[33]提出了一个适用于二元合金的新模型,该模型与Wheeler提出的模型的不同之处是界面区自由能密度的定义不同。该模型广泛运用于模拟传统凝固过程和快速凝固过程中的组织演变。Gong等^[34]运用相场法研究了Ti-6Al-4V电子束选区熔化成形过程中的组织演变规律,模拟了柱状晶粒在不同时刻的生长情况,讨论了过冷度以及不同速度函数对枝晶生长及形貌的影响并得出结论,过冷度越大,枝晶生长速度越快,柱状枝晶的宽度及间距随扫描

速度的增加而降低。图7为不同时刻柱状枝晶的生长情况。

电子束选区熔化成形技术的应用

电子束选区熔化成形技术具有扫描速度快、能量利用率高、成形件力学性能优良等优点,在航空航天、生物医疗、汽车制造等领域得到了广泛应用。

1 航空航天领域

结构复杂是叶轮等航空航天零

部件的特点之一,而电子束选区熔化成形技术可成形具有复杂形状的零部件,因而该技术在航空航天领域得到了广泛应用。calRAM公司利用SEBM技术制造了具有复杂内流道的Ti-6Al-4V火箭发动机叶轮,如图8所示。意大利航空公司Avio采用SEBM技术制造了航空发动机低压涡轮用TiAl叶片,如图9所示,引起了业内广泛关注。TiAl基合金,尤其是新一代高Nb-TiAl合金具有优良的高温强度、抗蠕变、高温抗氧化和

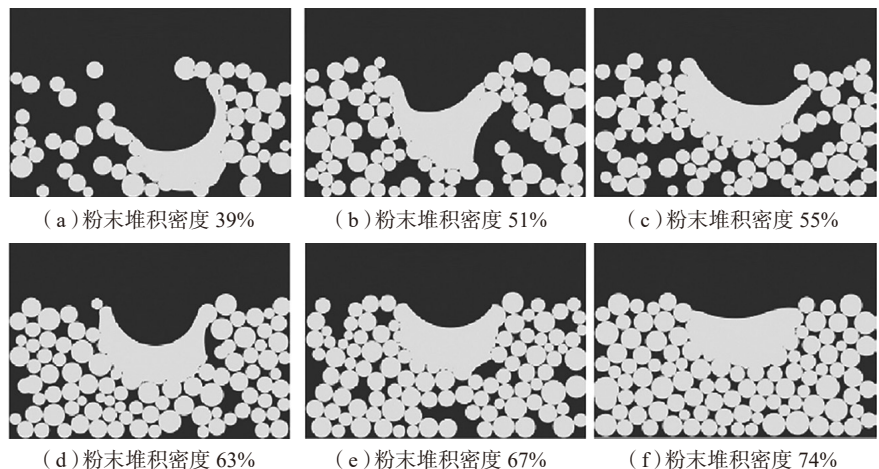


图5 粉末堆积密度对熔池几何形状的影响

Fig.5 Effect of powder packing density on geometry of melt pool

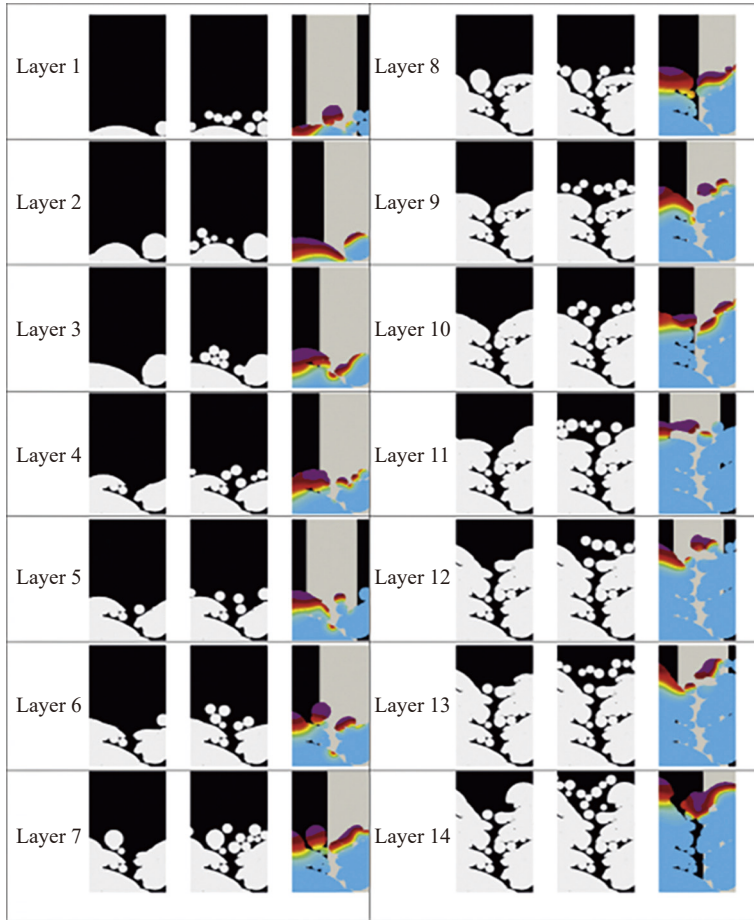


图6 通道状缺陷的演变过程
Fig.6 Evolution of chunnel-like default

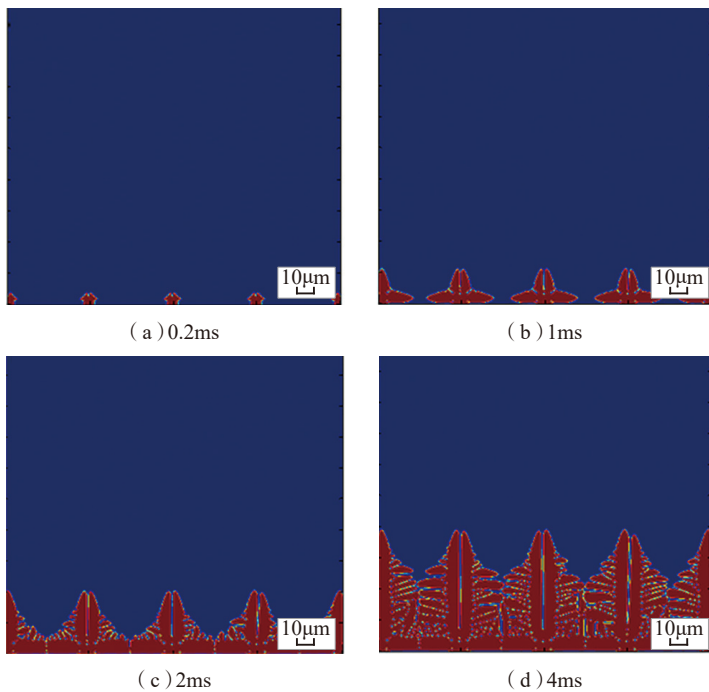


图7 柱状结构在不同时刻生长情况
Fig.7 Columnnar structure growth at different time

阻燃性能,但其室温脆性和加工性能差,传统的加工制备方法均难以满足工程应用需要^[35]。Avio公司在制造TiAl叶片取得的成功表明SEBM技术可作为一种制造TiAl基合金的新方法,给TiAl基合金研究提供了新方向。

西北有色金属研究院的研究团队利用SEBM技术制造了用于航空发动机润滑系统的Ti-6Al-4V蜂窝结构油气分离转子,如图10所示,该转子具有六角锥形孔道,压缩强度为110MPa,油气分离效率高达99.8%,比泡沫结构的镍基合金油气分离转子的通风阻力更低^[36]。此研究结果表明未来在制造油气分离转子时有望使用Ti-6Al-4V合金代替镍基合金,对于实现航空航天零部件的减重具有重要意义。

2 生物医疗领域

近年来,生物医用金属材料得到了广泛应用。钛及钛合金具有弹性模量低、比强度高、耐腐蚀、生物相容性好等优点,是医疗植入物的首选材

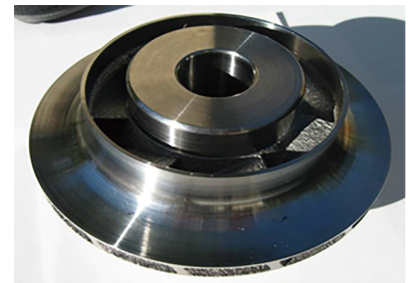


图8 利用SEBM技术制造的Ti-6Al-4V叶轮
Fig.8 Ti-6Al-4V impeller produced by SEBM technique



图9 Avio公司利用SEBM技术制造的TiAl涡轮叶片
Fig.9 TiAl turbo blade fabricated using SEBM technique by Avio

料。然而钛合金植入物和人体骨刚度的不匹配会造成应力屏蔽现象,导致骨吸收,引起假体松动。研究表明,使用多孔结构能够有效降低钛合金植入物的弹性模量,预防应力屏蔽现象。由于钛合金的熔点较高,在高温下对氧气等气体化学亲和性极高,使用传统制造技术制造多孔结构存在困难,孔隙大小和形状也很难控制。粉末材料的电子束选区熔化成形是在真空环境下完成的,更有利于获得性能优良的产品,因而该技术在生物医疗领域得到了广泛应用。

Heinl 等^[37-38]利用电子束选区熔化成形技术成形了不同类型的 Ti-6Al-4V 网格结构,发现利用 SEBM 技术成形的多孔钛的弹性模量和人体骨的弹性模量在相似的范围内变化。此研究表明 SEBM 成形的多孔钛可作为用于骨置换的生物医用材料,极大地激发了科研人员对多孔钛的研究热情,对于促进 SEBM 技术在生物医疗领域的应用具有重要意义。在他们的基础上,更多人员加入到了利用 SEBM 技术成形医疗植入物的浪潮中,取得了诸多成果。Heinl 等^[37]利用 SEBM 技术制得了 Ti-6Al-4V 椎间融合器原型。



图10 利用SEBM技术制造的蜂窝结构 Ti-6Al-4V 油气分离转子

Fig.10 Ti-6Al-4V oil gas separation rotor using SEBM technique

Murr 等^[39]利用 SEBM 技术制造了用于全膝关节置换手术的开孔结构 Co-29Cr-6Mo 股骨假体。Yan 等^[40]利用 SEBM 技术制造了用于下颌骨重建的 Ti-6Al-4V 支架,如图 11 所示。目前,SEBM 技术已经被应用于臼杯的批量生产中^[41]。

由此可见,SEBM 技术在生物医疗领域应用前景十分广阔。利用 SEBM 技术可实现医疗植入物的小批量定制化制造,可通过对植入物的孔隙形状、大小与分布进行调节来使植入物的性能与人体骨的性能相适应,最大限度减小应力屏蔽现象,而采用传统制造方法则很难实现。

3 其他领域

斯德哥尔摩大学阿列纽斯实验室的研究人员探讨了利用 SEBM 技术制备国际热核反应堆内部容器部件的可行性,提供了广泛用于核聚变领域的 SS316L 不锈钢 SEBM 成形的第一组微观结构和力学性能数据^[15]。利用 SEBM 技术可成形具有多孔结构的功能性零部件,这些多孔结构可应用于过程工程,充当催化剂工程的热交换器、混合器或载体^[42-46]。图 12^[45]为氢释放装置,由 10 个平行反应管组成,反应管采用 SEBM 技术

制造且具有催化功能。该装置有利于从全氢化 N-乙基咪唑中快速高效地分离出氢。

电子束选区熔化成形技术存在的问题

1 粉末溃散

粉末溃散是指金属粉末受到某种外力的作用,以束斑为中心向四周飞出,偏离原始堆积位置而导致后续无法成形的现象^[47]。清华大学的齐海波教授对粉末溃散现象的原因进行了分析,首次提出电子束对粉末产生的压力是粉末溃散现象的主要原因,建立了 316L 不锈钢粉末受力分析模型并推导了计算溃散电流的公式^[48-49]。随后杨鑫等^[50]在此基础上引入了一个与材料物理性质相关的修正系数用于计算溃散电流。此理论对于指导后续的成形工艺试验具有重要意义,但是无法解释粉末全面溃散现象。Sigl 等^[51-52]对粉末溃散现象的原因进行了系统的分析与讨论,一致认为粉末之间的静电排斥力是粉末溃散现象的主要原因。Kahnert 等^[53]和 Eschey 等^[54]认为除考虑粉末之间的静电排斥力、电子束对粉末的压力之外,还应考虑洛伦

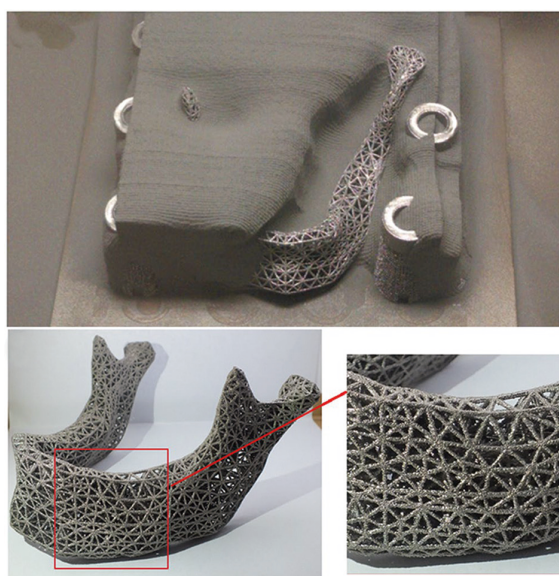


图11 利用SEBM技术制造的Ti-6Al-4V 支架

Fig.11 Ti-6Al-4V scaffold produced by SEBM technique

兹力的影响。

大多数学者认为对金属粉末进行预热是预防粉末溃散现象的主要方法,但 Eschey 等^[54]对 SEBM 技术中的预热工艺提出了质疑,认为无需对金属粉末进行预热。笔者认为,预热工艺必不可少。预热使粉末部分熔化,粉末颗粒之间形成烧结颈,粉末颗粒聚团成块,增强了整个粉末层的导电性,减小了粉末颗粒之间的静电排斥力,同时烧结颈的形成使得粉末颗粒之间的结合力增强,能承受较大电流、较高扫描速度的电子束的冲击作用,因而有利于预防粉末溃散现象。和球形粉末相比,非球形粉末之间的摩擦阻力较大,在一定程度上也能预防粉末溃散现象,但非球形粉末的使用容易使扫描线断裂、不连续、产生球化现象。因此可考虑使用球形粉末与非球形粉末的混合粉末。

此外,对试样进行合理布局也能在一定程度上预防粉末溃散现象。笔者研究发现,使用图 13 (a)、(b)所示的布局时,在成形第 4 层左右的时候都出现了严重的粉末溃散现象,使成形失败。而使用图 13 中(c)所示的布局时,整个成形过程未出现粉末溃散现象。试样均为 $\phi 15\text{mm} \times h100\text{mm}$ 的圆柱棒,图 13 (a)~(c)均为俯视图。对于这种现象,笔者认为采用图 13 (a)、(b)所示的布局时,成形区域有一大块区域无成形试样,因而成形过程中输入给

整个粉末层的能量较低。成形前几层的时候,因对基板进行了预热,基板的温度较高,在一定程度上对金属粉末起着烧结作用,因而未出现粉末溃散现象。随着层数增加,无成形试样的区域因能量较低,无法对新铺展的粉末进行有效的烧结,因此新铺展的粉末在电子束作用下发生了溃散现象。由此可见,对试样进行合理布局也有利于预防粉末溃散现象。

2 金属粉末球化

球化现象是指金属熔化未能均匀铺展而是形成大量彼此隔离的金属球的现象^[9],如图 14 所示^[55]。球化现象是由熔池的不稳定性造成的,当熔池的表面张力超过了已凝固层对熔池的润湿作用力时,熔池破碎成液滴以降低其表面能。根据能量最低原理,液滴的形状趋于球形,因为球形液滴的分子总势能最小。目前关于球化现象的研究相对较少。Gusarov 等^[56]用 Plateau-Rayleigh 毛细不稳定性来解释球化现象,提出



图12 具有10个反应管的氢释放装置
Fig.12 Hydrogen release unit consisting of ten parallel reactor tubes

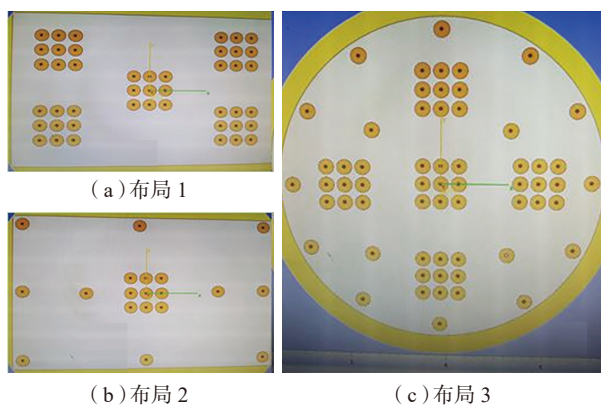


图13 试样在成形室的布局
Fig.13 Layout of specimens in the building chamber

可通过降低熔池的长宽比等措施来预防球化。清华大学的颜永年教授认为非球形粉末球化的趋势比球形粉末大,原因是非球形粉末表面形状不规则,表面能更大^[57]。

3 成形件表面产生裂纹

Chauvet 等^[58]在成形一种不可焊接的镍基高温合金时,发现了沿着成形方向超过几毫米的裂纹,如图 15 所示。笔者认为此裂纹可能为凝固裂纹或液化裂纹,这两种裂纹的形成都需要液膜存在。当晶界能大于固液界面能的两倍时,液膜即使在较低温度下也能稳定存在。对于大角度晶界,其界面能通常较高,同时硼等元素容易在晶界偏析、富集,降低了固液界面能,因此热裂纹对大角度晶界敏感。为了避免镍基合金在 SEBM 成形过程中产生裂纹,应降低硼元素的含量以减小在晶界形成低熔点液膜的可能性,同时采用适当的熔化策略使晶粒细化,提高成形件的抗热裂性。

4 成形件表面粗糙

尽管电子束选区熔化成形技术

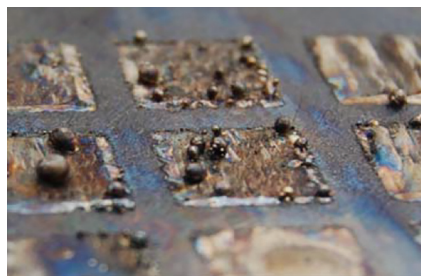


图14 Ti-6Al-4V合金SEBM成形过程中的球化现象
Fig.14 Melting ball during selective electron beam melting of Ti-6Al-4V

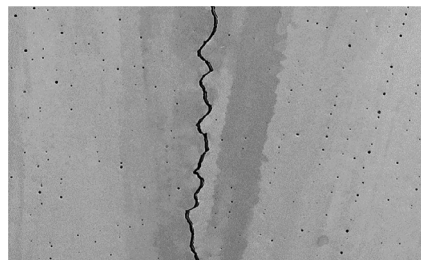


图15 镍基合金EBM成形沿着成形方向的裂纹
Fig.15 Hot crack along the build direction in selective electron beam melting of Ni-base alloy

有诸多优势,但成形件表面粗糙这一缺点限制了其在航空航天等领域的应用,如何降低成形件的表面粗糙度成为业内关注的重点。粉末材料 SEBM 成形理想的表面是光滑且致密的平面,没有孔洞等缺陷,为了研究工艺参数对粉末材料 SEBM 成形表面质量的影响,研究人员建立了工艺窗口或工艺图,处于工艺窗口内的工艺参数能成形具有致密平整表面的试样。Juechter 等^[59]给出了 Ti-6Al-4V 关于线能量和扫描速度的工艺窗口。Scharowsky 等^[19]给出了 Ti-6Al-4V 关于扫描速度和体能量的工艺窗口,如图 16 所示^[59]。Juechter 等^[60]给出了 Ti-45Al-4Nb-C 关于面能量和扫描速度的工艺窗口。Guschlbauer 等^[61]给出了纯铜关于电子束功率和扫描速度的工艺窗口。这些工艺窗口或工艺图对于快速选择合适的工艺参数具有重要

意义,缺点是只能反映部分因素对成形质量的影响。

Safdar 等^[2,62-66]广泛研究了不同因素对成形件表面粗糙度的影响,这些研究对于降低成形件的表面粗糙度具有一定指导意义。然而成形件的表面粗糙度受到粉末粒径、铺粉厚度、工艺参数、成形方向、成形件厚度等多种因素的综合作用,因而单独考虑某一种因素往往不能得到令人满意的结果。因此需对这些影响因素进行系统性深入研究,探究其对成形件表面粗糙度的影响规律,从而更有效地降低成形件的表面粗糙度,促进 SEBM 技术在航空航天等领域的应用。

5 成形件内部出现气孔与熔化不良等缺陷

电子束选区熔化成形的材料内部缺陷主要包括气孔和熔化不良,如图 17 所示。电子束选区熔化成形所用的原材料主要为雾化粉末,气雾

化粉末中很容易混有空心粉,空心粉的存在使粉末材料 SEBM 成形时容易在材料内部出现气孔。不合适的工艺参数容易使材料熔化不良,产生孔洞等缺陷。气孔和孔洞等内部缺陷会对材料的力学性能产生不利影响。热等静压处理可以显著减小因熔化不良产生的孔洞等内部缺陷,原因是热等静压处理使得试样内部的孔洞逐渐封闭,减小了孔洞的密度。

结论

随着材料技术、信息技术、控制技术、无损检测技术等技术的不断发展和完善,SEBM 技术也在逐步发展和完善,成形精度不断提高、成形件力学性能愈发出色,已经开始为社会带来源源不断的效益。未来其可能的发展方向包括:

(1) 实现小批量、低成本、个性化植入物的定制化制造。传统医疗植入物大批量生产最大的问题在于植入物很难和患者病变部位周围骨组织相适应,由此产生各种不适应问题,引起并发症。结合医学 CT、图像处理技术以及计算机三维建模软件,SEBM 技术可实现个性化医疗植入物的定制化制造。

(2) 实现大尺寸、高精度、复杂异型金属零部件的快速制造。目前世界上 SEBM 设备的最大成形尺寸为 $\phi 350\text{mm} \times h 380\text{mm}$,成形尺寸仍然有限,限制了电子束选区熔化成形技术在航空航天等领域的应用。成形尺寸越大,熔化每层金属粉末所需的能量也越高,对 SEBM 设备输出功率的要求也更高。此外,成形尺寸越大,电子束的偏转角度也越大,聚焦程度下降,可能导致成形精度降低,零部件边缘部位因能量输入不足而熔化不良,因而成形大尺寸零部件对 SEBM 设备的控制精度提出了更高要求。未来可考虑使用双电子枪甚至多电子枪系统代替单电子枪系统,从而进一步扩大成形尺寸。

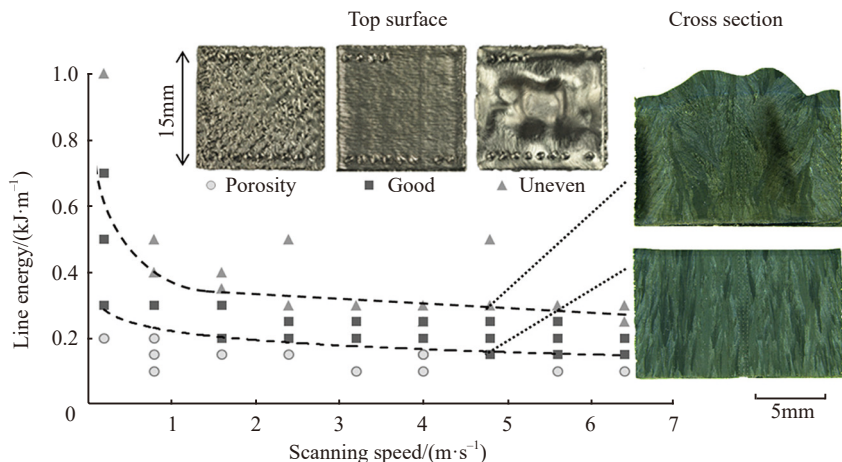


图16 Ti-6Al-4V关于扫描速度和线能量的工艺窗口

Fig.16 Process window of Ti-6Al-4V corresponding to scan speed and line energy

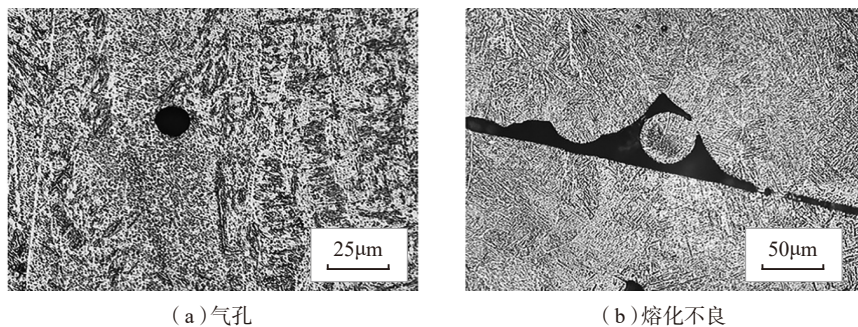


图17 电子束选区熔化成形的材料内部缺陷

Fig.17 Gas porosity and lack of fusion

(3) 实现复合材料、梯度功能材料、难熔难焊金属材料的高精度快速成形制造。近年来,电子束选区熔化成形技术所用粉末原材料种类逐渐增多,然而复合材料、梯度功能材料 SEBM 成形存在困难,镍基高温合金等难熔难焊金属材料 SEBM 成形容易产生裂纹,成形工艺不成熟,需进一步研究。

(4) 与传统机加工技术结合实现金属零部件增减材复合制造。SEBM 技术等增材制造技术的缺点是成形的零部件表面质量和几何精度远未达到理想状态,而数控机床具有精准度高等优点,因此将 SEBM 技术与数控加工技术进行结合,在同一台机床上实现增减材工艺的复合,有利于降低生产成本,提高生产效率,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] MURR L E, QUINONES S A, GAYTAN S M, et al. Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2009, 2(1): 20-32.
- [2] WANG P, SIN W J, NAI M L S, et al. Effects of processing parameters on surface roughness of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting[J]. *Materials*, 2017, 10(10): 1121.
- [3] BRUNO J, ROCHMANA, CASSAR G. Effect of build orientation of electron beam melting on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(2): 692-703.
- [4] TAN X, KOK Y, TOH W Q, et al. Revealing martensitic transformation and alpha/beta interface evolution in electron beam melting three-dimensional-printed Ti-6Al-4V[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26039.
- [5] WANG P, TAN X, NAI M L S, et al. Spatial and geometrical-based characterization of microstructure and microhardness for an electron beam melted Ti-6Al-4V component[J]. *Materials & Design*, 2016, 95: 287-295.
- [6] AL-BERMANI S S, BLACKMORE M L, ZHANG W, et al. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti6Al4V[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2010, 41(13): 3422-3434.
- [7] MURR L, GAYTAN S, CEYLAN A, et al. Characterization of titanium aluminum alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58: 1887-1894.
- [8] TAN X, KOK Y, TAN Y J, et al. Graded microstructure and mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting[J]. *Acta Materialia*, 2015, 97: 1-16.
- [9] 汤慧萍, 王建, 逯圣路, 等. 电子束选区熔化成形技术研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2015(3): 225-235.
- TANG Huiping, WANG Jian, LU Shenglu, et al. Research progress in selective electron beam melting[J]. *Materials China*, 2015(3): 225-235.
- [10] SCHWERDTFEGER J, KÖRNER C. Selective electron beam melting of Ti-48Al-2Nb-2Cr: Microstructure and aluminium loss[J]. *Intermetallics*, 2014, 49: 29-35.
- [11] MURR L, MARTINEZ E, GAYTAN S, et al. Microstructural architecture, microstructures, and mechanical properties for a nickel-base superalloy fabricated by electron beam melting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 2011, 42(11): 3491-3508.
- [12] PHAN M A L, FRASER D, GULIZIA S, et al. Horizontal growth direction of dendritic solidification during selective electron beam melting of a Co-based alloy[J]. *Materials Letters*, 2018, 228: 242-245.
- [13] LODES M A, GUSCHLBAUER R, KÖRNER C. Process development for the manufacturing of 99.94% pure copper via selective electron beam melting[J]. *Materials Letters*, 2015, 143: 298-301.
- [14] ZHONG Y, RÄNNAR LE, LIU L, et al. Additive manufacturing of 316L stainless steel by electron beam melting for nuclear fusion applications[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2017, 486: 234-245.
- [15] ZHAO X, LI S, ZHANG M, et al. Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting[J]. *Materials & Design*, 2016, 95: 21-31.
- [16] HRABE N, QUINN T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build plate and part size[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 573: 264-270.
- [17] HRABE N, QUINN T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 573: 271-277.
- [18] EVERHART W, DINARDO J, BARR C. The Effect of scan length on the structure and mechanical properties of electron beam-melted Ti-6Al-4V[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 48(2): 697-705.
- [19] SCHAROWSKY T, JUECHTER V F, SINGER R, et al. Influence of the scanning strategy on the microstructure and mechanical properties in selective electron beam melting of Ti-6Al-4V[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(11): 1573-1578.
- [20] ZHAI Y, GALARRAGA H, LADOS D A. Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 69: 3-14.
- [21] GALARRAGA H J, WARREN R A, LADOS D, et al. Fatigue crack growth mechanisms at the microstructure scale in as-fabricated and heat treated Ti-6Al-4V ELI manufactured by electron beam melting (EBM)[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 176: 263-280.
- [22] CHO K, KOBAYASHI R, OH J Y, et al. Influence of unique layered microstructure on fatigue properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys fabricated by electron beam melting[J]. *Intermetallics*, 2018, 95: 1-10.
- [23] HRABE N, GNÄUPEL-HEROLD T, QUINN T. Fatigue properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 94: 202-210.

- [24] GALARRAGA H, WARREN R J, LADOS D A, et al. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM) [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 685: 417-428.
- [25] 赵冰净. 3D 打印 Ti-6Al-4V 理化性能及生物相容性研究 [D]. 北京: 中国人民解放军医学院, 2016.
- ZHAO Bingjing. Evaluation of Ti-6Al-4V alloy biocompatibility, physical and chemical property fabricated by electron beam melting and selective laser melting[D]. Beijing: Medical College of the Chinese people's Liberation Army, 2016.
- [26] KOIKE M, MARTINEZ K, GUO L, et al. Evaluation of titanium alloy fabricated using electron beam melting system for dental applications[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(8): 1400-1408.
- [27] ZHAO B, WANG H, QIAO N, et al. Corrosion resistance characteristics of a Ti-6Al-4V alloy scaffold that is fabricated by electron beam melting and selective laser melting for implantation in vivo[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 70: 832-841.
- [28] SHEN N, CHOU K. Thermal modeling of electron beam additive manufacturing process: powder sintering effects[C]// *ASME International Manufacturing Science & Engineering Conference Collocated with the North American Manufacturing Research Conference & in Participation with the International Conference on Tribology Materials & Processing*. Indiana, 2012.
- [29] RIEDLBAUER D, STEINMANN P, MERGHEIM J. Thermomechanical finite element simulations of selective electron beam melting processes: Performance considerations[J]. *Computational Mechanics*, 2014, 54(1): 109-122.
- [30] KÖRNER C, ATTAR E, HEINL P. Mesoscopic simulation of selective beam melting processes[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(6): 978-987.
- [31] BAUEREIB A, SCHAROWSKY T, KÖRNER C. Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2522-2528.
- [32] WHEELER A A, BOETTINGER W J, MCFADDEN G B. Phase-field model for isothermal phase transitions in binary alloys[J]. *Physical Review. A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(10): 7424-7439.
- [33] SUZUKI T, ODE M, KIM S G, et al. Phase-field model of dendritic growth[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2002, 237-239(1): 125-131.
- [34] GONG X, CHOU K. Phase-Field modeling of microstructure evolution in electron beam additive manufacturing[J]. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 2015, 67(5): 1176-1182.
- [35] 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(2): 111-119, 135.
- KAN Wenbin, LIN Junpin. Research progress on fabrication of TiAl alloys fabricated by additive manufacturing[J]. *Materials China*, 2015(2): 111-119, 135.
- [36] TANG H P, WANG Q B, YANG G Y, et al. A honeycomb-structured Ti-6Al-4V oil-gas separation rotor additively manufactured by selective electron beam melting for aero-engine applications[J]. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 2016, 68(3): 799-805.
- [37] HEINL P, ROTTMAIR A, KÖRNER C, et al. Cellular titanium by selective electron beam melting[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2007, 9(5): 360-364.
- [38] HEINL P, MÜLLER L, KÖRNER C, et al. Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting[J]. *Acta Biomaterialia*, 2008, 4(5): 1536-1544.
- [39] MURR L E. Open-cellular metal implant design and fabrication for biomechanical compatibility with bone using electron beam melting[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 76: 164-177.
- [40] YAN R Z, LUO D, HUANG H, et al. Electron beam melting in the fabrication of three-dimensional mesh titanium mandibular prosthesis scaffold[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 750.
- [41] MURR L, GAYTAN S, MEDINA F, et al. Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Science*, 2010, 368(1917): 1999-2032.
- [42] INAYAT A, SCHWERDTFEGGER J, FREUND H, et al. Periodic open-cell foams: Pressure drop measurements and modeling of an ideal tetrakaidehedra packing[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(12): 2758-2763.
- [43] RAMIREZ D A, MURR L E, LI S J, et al. Open-cellular copper structures fabricated by additive manufacturing using electron beam melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(16): 5379-5386.
- [44] KNORR T, HEINL P, SCHWERDTFEGGER J, et al. Process specific catalyst supports—selective electron beam melted cellular metal structures coated with microporous carbon[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 181-182: 725-733.
- [45] PETERS W, EYPASCH M, FRANK T, et al. Efficient hydrogen release from perhydro-N-ethylcarbazole using catalyst-coated metallic structures produced by selective electron beam melting[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(2): 641-649.
- [46] KLUMPP M, INAYAT A, SCHWERDTFEGGER J, et al. Periodic open cellular structures with ideal cubic cell geometry: Effect of porosity and cell orientation on pressure drop behavior[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 242: 364-378.
- [47] 韩建栋, 林峰, 齐海波, 等. 粉末预热对电子束选区熔化成形工艺的影响 [J]. *焊接学报*, 2008(10): 77-80, 117.
- HAN Jiandong, LIN feng, QI Haibo, et al. Effect of powder preheating on selective electron beam melting process[J]. *Transactions of the China Welding Institute*, 2008(10): 77-80, 117.
- [48] 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): 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 (Science and Technology)*, 2005(8): 1012-1015.
- [49] QI H B, YAN Y N, LIN F, et al. Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2006, 220(11): 1845-1853.

- [50] 杨鑫, 汤慧萍, 葛渊. 粉末性能对电子束选区熔化快速成形的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007(S3): 574-577.
- YANG Xin, TANG Huiping, GE Yuan. Effect of powder properties on selective electron beam melting process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007(S3): 574-577.
- [51] SIGL M, LUTZMANN S, ZAEH M F. Transient physical effects in electron beam sintering[C]//Proceedings of 17th Solid Freeform Fabrication symposium. Austin, 2006.
- [52] MILBERG J, SIGL M. Electron beam sintering of metal powder[J]. Production Engineering, 2008, 2(2): 117-122.
- [53] KAHNERT M, LUTZMANN S, ZAEH M F. Layer formations in electron beam sintering[C]// Proceedings of 18th Solid Freeform Fabrication Symposium. Muenchen: Institute for Machine Tools and Industrial Management, Technische Universitaet Muenchen, 2007.
- [54] ESCHEY C, LUTZMANN S, ZAEH M F. Examination of the powder spreading effect in Electron Beam Melting (EBM)[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 81(18): 5724-5728.
- [55] F ZÄH M, LUTZMANN S. Modelling and simulation of electron beam melting[J]. Production Engineering, 2010, 4(1): 15-23.
- [56] GUSAROV A V, YADROITSEV I, BERTRAND P, et al. Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting[J]. Applied Surface Science, 2007, 254(4): 975-979.
- [57] 颜永年, 齐海波, 林峰, 等. 三维金属零件的电子束选区熔化成形[J]. 机械工程学报, 2007(6): 87-92.
- YAN Yongnian, QI Haibo, LIN Feng, et al. Selective electron beam melting of three dimensional metal parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007(6): 87-92.
- [58] CHAUVET E, KONTIS P, JÄGLE E, et al. Hot cracking mechanism affecting a non-weldable Ni-based superalloy produced by selective electron beam melting[J]. Acta Materialia, 2017, 142: 82-94.
- [59] JUECHTER V, SCHAROWSKY T, SINGER R F, et al. Processing window and evaporation phenomena for Ti-6Al-4V produced by selective electron beam melting[J]. Acta Materialia, 2014, 76: 252-258.
- [60] JUECHTER V, FRANKE M M, MERENDA T, et al. Additive manufacturing of Ti-45Al-4Nb-C by selective electron beam melting for automotive applications[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 118-126.
- [61] GUSCHLBAUER R, MOMENI S, OSMANLIC F, et al. Process development of 99.95% pure copper processed via selective electron beam melting and its mechanical and physical properties[J]. Materials Characterization, 2018, 143: 163-170.
- [62] SAFDAR A, HE H Z, WEI L Y, et al. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(5): 401-408.
- [63] JAMSHIDINIA M, KOVACEVIC R. The influence of heat accumulation on the surface roughness in powder-bed additive manufacturing[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2015, 3(1): 014003.
- [64] KLINGVALL EK R, RÄNNAR L-E, BÄCKSTÖM M, et al. The effect of EBM process parameters upon surface roughness[J]. Rapid Prototyping Journal, 2016, 22(3): 495-503.
- [65] MOHAMMAD A, MUSHABAB AL-AHMARI A, ALFAIFY A, et al. Effect of melt parameters on density and surface roughness in electron beam melting of gamma titanium aluminide alloy[J]. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(3): 474-485.
- [66] SCHAROWSKY T, BAUEREIB A, KÖRNER C. Influence of the hatching strategy on consolidation during selective electron beam melting of Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5-8): 2809-2818.

通讯作者: 姜凤春, 工学博士、教授、博士生导师, 研究方向为金属复合材料优化设计与先进制造、增材制造技术与装备、材料性能测试等, E-mail: fengchunjiang@hrbeu.edu.cn。

Selective Electron Beam Melting Technique and Its Application

RAN Jiangtao^{1,2}, ZHAO Hong^{1,2}, GAO Huabing³, GUO Chunhuan¹, WANG Jiandong¹,
ZHANG Qun², JIANG Fengchun¹

- (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Aerospace Hiwing (Harbin) Titanium Industry Co., Ltd., Harbin 150001, China;
3. Qingdao Hachuan Advanced Materials Manufacturing Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

[ABSTRACT] Selective electron beam melting technique (SEBM) is a kind of metal additive manufacturing technique using electron beam as heat source, can form high-performance metal parts with complex shapes. It has been widely applied in aerospace industrial, biomedical application, automobile manufacturing and other fields. The basic principle of selective electron beam melting technique is briefly introduced, the microstructure and properties of different materials produced by selective electron beam melting technique are reviewed, and the numerical simulation methods of SEBM process and the application of SEBM technique are also summarized in this paper. Finally, some problems to be solved in forming quality of selective electron beam melting technique are pointed out and its development trend is forecasted.

Keywords: Electron beam; Selective melting; Metallic material; Microstructure and property; Numerical simulation

(责编 铃兰)