

电子束粉末床熔融技术发展综述

李宏新^{1 2 3} 梁啸宇^{1 2 3} 张磊^{1 2 3} 林峰^{1 2 3}

(1. 清华大学机械工程系 北京 100084; 2. 先进成形制造教育部重点实验室 北京 100084;
3. 生物制造与快速成形技术北京市重点实验室 北京 100084)

摘要: 电子束粉末床熔融技术是一种有着广泛应用前景的金属增材制造技术,低应力、高能量利用率等特点使其在高温合金、高熔点金属成形等方向有着巨大优势。近年来,随着更多研究人员及企业进入该领域,电子束粉末床熔融装备有了诸多进展,且在新材料及工艺开发方面也取得了重要突破。本文对电子束粉末床熔融技术原理、近年来进展进行综述并对其今后的发展方向进行展望。

关键词: 增材制造; 电子束粉末床熔融; 装备; 材料; 工艺

中图分类号: TF37 **文献标志码:** A

A Review of the Development of Electron Beam Powder Bed Fusion Technology

Li Hongxin, Liang Xiaoyu, Zhang Lei, Lin Feng

Abstract: Electron beam powder bed fusion technology is a metal additive manufacturing technology with wide application prospects. The characteristics of low stress and high energy utilization make it have great advantages in the fields of high temperature alloys and high melting point metal forming. In recent years, with more researchers and enterprises entering this field, advances have been made in electron beam powder bed melting equipment, and important progresses have also been made in the development of new materials and processes. In this paper, the principle and recent progress of electron beam powder bed fusion technology have been reviewed and its future development direction has been prospected.

Key words: additive manufacturing; electron beam powder bed fusion; equipment; material; process

增材制造(Additive manufacturing, AM)基于离散数据模型,通过添加材料的方式成形三维零件,相比于传统成形工艺,具有材料利用率高及可成形复杂结构零件等优势,受到了制造业的重视,被认为具有广阔的应用前景及巨大的发展潜力。在工业领域,以不锈钢^[1-3]、钛合金^[4-5]、高温合金^[6-7]等为代表的金属材料应用广泛,其相关增材制造技术及工艺备受关注。

在金属增材制造技术中,以粉末床为基础的粉末床熔融工艺(Powder bed fusion, PBF)以平均粒径在30~100 μm的金属粉末为原材料进行零件逐层成形,相比于定向能量沉积(Directed energy deposition, DED)等以金属丝为原材料,其粉末床支撑更有利于成形内部精细结构,因此在医疗植入物^[8]、复杂结构^[9]、航空航天^[10]等领域具有广阔应用前景。其中,采用电子束为热源的电子束粉末床熔融(Electron beam powder bed fusion, EB-PBF)技术相比于采用激光为热源的激

光粉末床熔融(Laser powder bed fusion, L-PBF)技术,具有更高的能量利用率及成形效率,且成形过程中的高温环境更有利于成形脆性材料、易裂材料等,具有更广阔的材料适应性。

近年来,随着更多的企业与研究者进入EB-PBF领域,EB-PBF技术的装备及成形材料得到了极大的拓展。本文将从EB-PBF技术的原理出发对EB-PBF技术进行介绍,并对近年来EB-PBF技术在装备及工艺方面的最新进展进行综述,对其发展前景进行分析探讨。

1 EB-PBF 技术及装备

1.1 热源

图1展示了EB-PBF设备的示意图,其由电子枪系统、真空系统、送粉机构及成形平台等几个主要部分组成。不同于L-PBF,因大气对电子束的散射作用,EB-PBF工艺需要工作在真空环境^[11]。

热源决定了EB-PBF技术的基本特征。EB-PBF工艺以高速运动的电子束为热源,成形时电子动能被材料吸收而转化为热能以熔化粉末。电子枪用于提供高能电子束,其通常由阴极、栅极、阳极组成,如图1所示。其中电子从阴极射出,并在阴极与阳极之间施加电场以对电子进行

收稿日期: 2022-07-24

作者简介: 李宏新(1995—),男,博士研究生,主要从事电子枪、电子束粉末床熔融技术等方面的研究。

通讯作者: 林峰(1966—),男,教授,主要从事增材制造、生物制造、重型液压机及预应力钢丝缠绕等方面的研究。

基金项目: 中国国家自然科学基金委员会-国际(地区)合作与交流项目,项目名称: 电子束选区熔化中吹粉现象的基础研究,项目编号: 52061135113。

加速,而栅极可施加反向电场以抑制阴极电子射出,从而控制电子数量,进而控制电子束的束流强度和电子束能量。

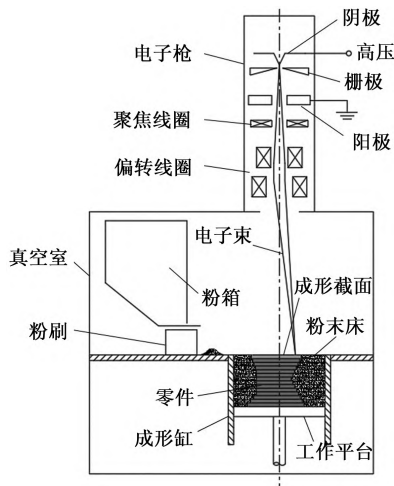


图1 EB-PBF 设备示意图

Figure 1 Schematic diagram of EB-PBF equipment

当前普遍采用的热发射阴极电子枪,通过加热阴极以使得电子从阴极表面逸出,因此具有更广泛的环境适应性,常用于热加工,其常用的阴极材料有高熔点纯金属(如钨)、硼化物(如六硼化镧)等。其中硼化物阴极工作温度低、逸出功较小,具有更大的电流发射密度和工作寿命^[12-13]。

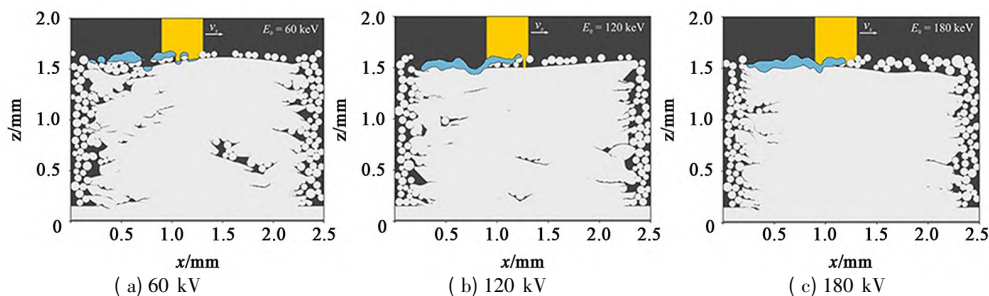


图2 不同加速电压下成形仿真结果

Figure 2 Simulation results of forming under different accelerating voltages

1.2 成形过程

电子束从阳极孔射出后,其经过下方聚焦线圈和偏转线圈中电流产生的磁场进行汇聚和偏转,并最终在成形平面上加热或熔化粉末,逐层形成三维零件。其聚焦与偏转通过电磁场控制,可快速调节,偏转速度可达数千米每秒。不同于L-PBF成形,EB-PBF工艺在熔化粉末层之前会对整个粉末床以散焦电子束进行预热过程。其作用是通过加热粉末床,使得粉末之间产生微烧结,从而增加其导电性,这利于电荷的传导,以避免因电荷滞留在粉末颗粒上而引发粉末床溃散现象的发生;同时,预热粉末床还可降低成形过程中的热应力,从而减少裂纹的产生。因此,粉末床的预热温

按照阴极加热方式的不同,电子枪可分为直热式与间热式两种类型。其中直热式电子枪通过对阴极通以电流,利用阴极电阻的热效应对其加热,结构简单,但电流引起的磁场会影响其聚焦^[14];间热式电子枪采用其它热源(另一个灯丝或激光等)对阴极进行加热,避免了电流磁效应,有利于电子枪聚焦,但增加了结构复杂度^[15-16]。

对电子枪来说,电子束的功率 P 由阴极发射电流 I 和阴极与阳极之间的加速电压 U 的乘积定义,EB-PBF技术常用功率在3~6 kW之间。加速电压决定了电子的最终运行速度,热加工用电子枪加速电压通常在30~150 kV之间,而EB-PBF设备采用的典型加速电压为60 kV。对于电子束来说,提高加速电压会增大电子动能,从而增强电子束穿透能力并减小电子束束斑直径。研究发现在EB-PBF工艺中,当加速电压提高后,由于电子束穿透金属蒸气能力的增强,电子束的能量利用率有显著提升^[17]。模拟及实验结果表明提高加速电压有利于减小EB-PBF工艺中的未熔合缺陷,如图2所示^[18-19]。但从设备角度,提高加速电压会更容易导致电子枪发生高压放电现象,因此会对真空环境提出更高要求,且设备的射线防护能力也需加强^[20]。

度与成形材料有关,如成形铝合金时预热温度为350℃^[21],而成形镍基高温合金时则需1000℃以上^[22]。

在成形过程中,其主要成形参数包括束流 I 、扫描速度 v 、线间距 d 、层厚 L 等。通过以上参数的组合可获得线能量密度 P_L (UI/v , J/m)、面能量密度 P_A (P_L/d , J/mm²)、体能量密度 P_B (P_A/L , J/mm³)等不同表征热输入的指标。图3展示了Ti6Al4V材料的典型成形区间^[23]。热输入不足会导致层间未熔合和孔隙缺陷,最终形成多孔状上表面;而热输入过高会导致熔池在反冲压力的作用下发生流动,从而产生波浪状上表面。在合适的成形参数区间,EB-PBF试样的致密度可超过

99.5% ,且上表面粗糙度可降低至 $Ra15\ \mu\text{m}$ 以内 ,其侧表面粗糙度通常在 $Ra20\sim35\ \mu\text{m}$ 之间^[24]。

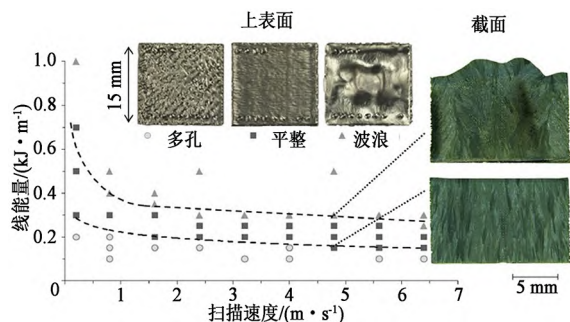


图3 EB-PBF工艺中的典型成形区间及试样表面
Figure 3 Typical forming area and sample surface in EB-PBF process

对于成形试样来说 ,其主要评估参数有致密度、组织、表面质量、力学性能等。通过调节材料成分、预热参数、成形参数、扫描策略等可有效调节制件成形质量 ,EB-PBF工艺典型成形件力学性能通常可达到同等材料的锻件水平^[25]。此外 ,在EB-PBF工艺的真空环境中 ,元素的蒸发也是在成形时需要考虑的影响因素 ,尤其对于低熔点金属如铝、铜等 ;其与线能量密度显著相关 ,采用较低的线能量密度可降低元素蒸发^[26]。

1.3 装备发展

最早的 EB-PBF 设备由瑞典 Arcam 公司于 2002 推出 ,此后的二十年内 Arcam 一直是全球唯一一家提供商业化 EB-PBF 设备的公司。在 Arcam 公司的推广下 ,EB-PBF 技术在航空航天及骨科植入物等领域展示出了重要的应用前景 ,但 Arcam 公司设备的封闭性限制了该技术的推广与应用^[27]。

清华大学工程系自 2004 年开始自主研发 EB-PBF 设备 ,并先后给国内的西北有色院、中科院合肥物质研究院等电位研发了科研用 EB-PBF 设备。

2015 年以来 ,陆续有多家国内外公司进入该领域并相继推出多型商品化的 EB-PBF 设备 ,极大地拓宽了其应用范围。这些公司有清研智束有限公司、西安塞隆金属材料有限公司、日本电子株式会社 (JEOL)、瑞典 Freemelt 公司、英国 Wayland Additive 公司等。

JEOL 公司及 Wayland Additive 公司声称其设备参考半导体制造领域的电子束光刻技术 ,可屏蔽或中和电子电荷 ,无需预热粉末床即可避免粉末溃散 ,降低了成形成本 ,其设备如图 4 (a) 所

示^[28]。Freemelt 公司开发出以二级激光加热电子枪为热源的 EB-PBF 设备 ,如图 4 (b) 所示^[29] ,该设备在不同束流下束斑可保持一致性 ,有利于工艺稳定性。

国内方面 ,清研智束有限公司相继开发出成形高度可达 700 mm 的单枪 EB-PBF 设备和成形幅面可达 600 mm × 600 mm 的 2 × 2 阵列式四枪 EB-PBF 设备 ,如图 5 所示。此外 ,清华大学机械系近年开发出加速电压可达 90 kV 的激光加热电子枪 ,并将其应用于 EB-PBF 设备中 ,实现了高压电子束粉末床熔融工艺 ,该技术显著提高了 EB-PBF 工艺的预热效率、成形效率及电子束的能量利用率^[17,30]。以上装备技术进步对于 EB-PBF 技术的工业化应用有重要推动作用。

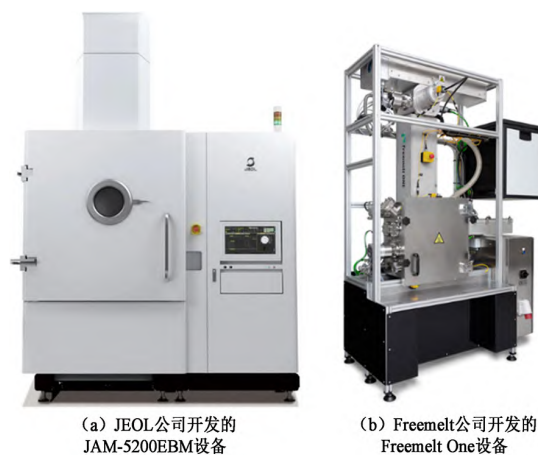


图4 JEOL公司和 Freemelt 公司开发的 EB-PBF 设备
Figure 4 EB-PBF device developed by JEOL and Freemelt

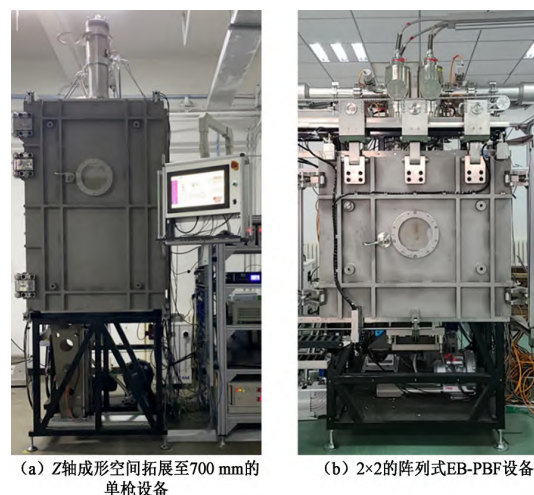


图5 清研智束有限公司开发的大尺寸 EB-PBF 设备
Figure 5 Large-scale EB-PBF equipment developed by Quickbeam Co., Ltd.

为进一步提高 EB-PBF 成形件性能及工艺稳定性 ,德国 Körner 课题组^[31-33]与清华大学林峰课题组^[34]将基于背散射电子和二次电子的在线检测技术引入 EB-PBF 的成形过程 ,该技术通过采

用探测板检测电子束扫描在试样和粉末床表面产生的背散射/二次电子信号,以避免传统光学方法中金属蒸镀的影响,可实现对表面形貌和孔隙的实时监测和反馈控制,有效地改善了成形件孔隙率并提高成品率。其原理如图 6 所示^[35]。

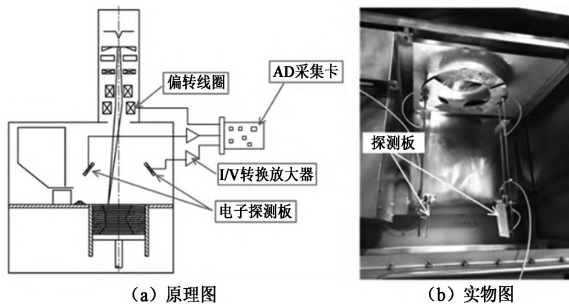


图 6 二次电子探测装置
Figure 6 Secondary electron detection device

2 EB-PBF 成形材料与应用

EB-PBF 技术可成形大部分金属,其典型应用材料包含镍基合金、钛铝合金、钛合金等,此外对

于铜、钨合金等也有部分研究。此外,PBF 工艺还可用于制备点阵多孔结构、拓扑优化结构等传统工艺难以成形的复杂轻量化结构。

2.1 材料成形

(1) 钛合金。钛合金具有很多优越的性能,如低密度、高机械强度、耐腐蚀性能、无人体过敏反应等,具有巨大的应用潜力。Ti6Al4V 是在 EB-PBF 技术中最广泛应用的材料,EB-PBF 技术制造的典型 Ti6Al4V 试样的微观结构为有序的薄片状网篮组织,其组织随着热输入的增大而变得粗大,此时强度会有所降低,如图 7 所示^[36]。此外,研究人员采用 EB-PBF 成形 TA15 钛合金,其结果显示 EB-PBF 成形 TA15 合金室温拉伸性能优于锻态 TA15 钛合金,极限抗拉强度最高可达 1050 MPa,断后伸长率达 13.02%。在 EB-PBF 成形工艺的温度场演变条件下,TA15 钛合金内部呈现网篮组织、魏氏组织共同存在的特征,且在部分工艺参数下存在马氏体相^[37-38]。

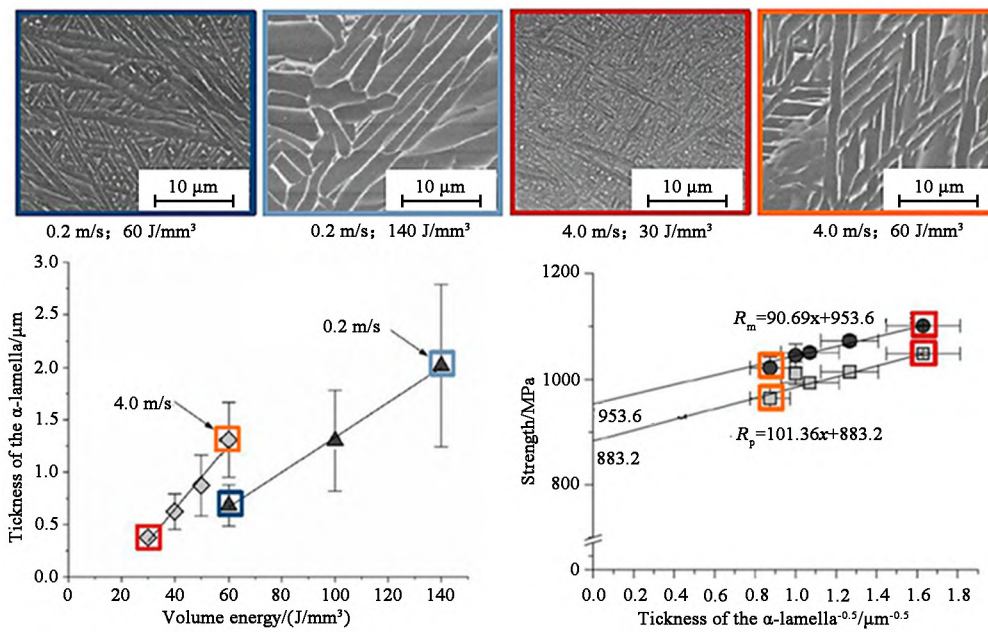


图 7 EB-PBF 成形 Ti6Al4V 不同成形参数下组织及力学性能

Figure 7 Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V formed by EB-PBF under different forming parameters

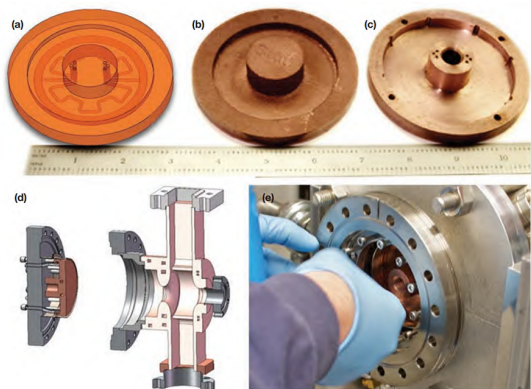
(2) 钛铝合金。钛铝合金可用于制作航空发动机低压涡轮叶片等工作温度超过 700℃ 的热端部,而其密度只有 4 g/cm³ 左右。但钛铝合金的室温塑性低、脆性高,传统工艺成形难度大。而 EB-PBF 工艺的高粉末床温度、低应力成形特点,为钛铝合金的三维打印成形提供了可能性。美国通用电气公司采用 Arcam 公司的 EB-PBF 设备成功制备出 Ti48Al2Cr2Nb 低压涡轮叶片,并实现了规模化生产。

(3) 铜合金。铜作为一种具有优异导电性及

导热性的材料,在散热等领域具有广泛的应用。研究者采用 EB-PBF 工艺,成功制备出内流道直径最低至 1.5 mm 的铜试样并将其应用于加速器的阴极结构中,如图 8 所示^[39]。值得注意的是,由于铜易于氧化的特性,EB-PBF 成形过程中需要更高的真空度且粉末回收过程中也需要格外避免氧化以防止成形件过高的氧含量从而影响其性能。

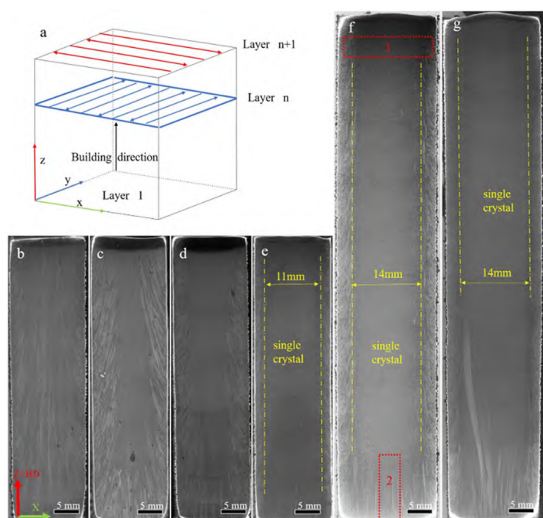
(4) 镍基合金。镍基合金在高温下具有优异的力学性能,常用于发动机叶片、燃烧室等部位。

通常 EB-PBF 成形镍基合金为柱状晶^[40],但近年来已有个别团队通过调整成形过程中的粉末床温度、扫描策略,在多晶的基板上成功制备出镍基合金单晶,如图 9 所示^[41-42]。这展示出了 EB-PBF 技术在晶体组织调控方面的巨大潜力。



(a) 三维模型; (b-c) 实物图; (d-e) 零件装配位置

图 8 EB-PBF 成形具有内流道的纯铜试样
Figure 8 EB-PBF forming pure copper sample with inner flow channel



(a) 成形扫描策略; (b-g) 成形尺寸逐渐变大的单晶。

图 9 EB-PBF 技术成形的不同尺寸 In738 合金单晶
Figure 9 In738 alloy single crystals with different sizes formed by EB-PBF technology

(5) 铌钨合金。高功率与高吸收率的电子束为其成形高熔点合金提供了可能性。研究人员对铌钨难熔合金进行 EB-PBF 成形,其电子束电流和扫描速度对 EB-PBF 成形 Nb521 样品表面形貌的影响如图 10 所示^[43]。在 0.7 m/s 的扫描速度和 13 ~ 16 mA 的束流范围内,EB-PBF 打印的 Nb521 合金样品可以获得平坦的上表面,表面形貌如图 11(a) 所示。图 11(b) 中云图表示样品表面的粗糙度,结果表明 15 mA 条件下样品可获得最小的表面粗糙度。如图 12 所示,这些样品的相对密度

在 96.15% ~ 99.19% 之间,而在 15 mA 的束流下获得了致密度最大的样品。

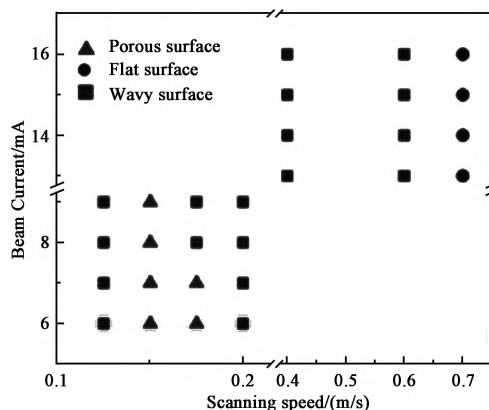


图 10 不同电子束电流和扫描速度对 Nb521 样品表面形貌的影响

Figure 10 Effects of different electron beam currents and scanning speeds on surface morphology of Nb521 samples

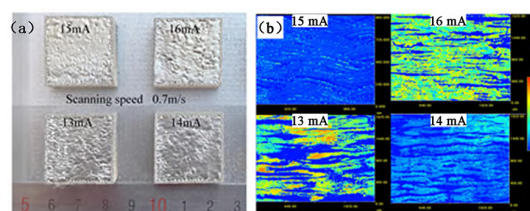


图 11 扫描速度为 0.7 m/s 时不同束流下表面形貌

Figure 11 Surface morphologies under different beam currents when the scanning speed is 0.7 m/s

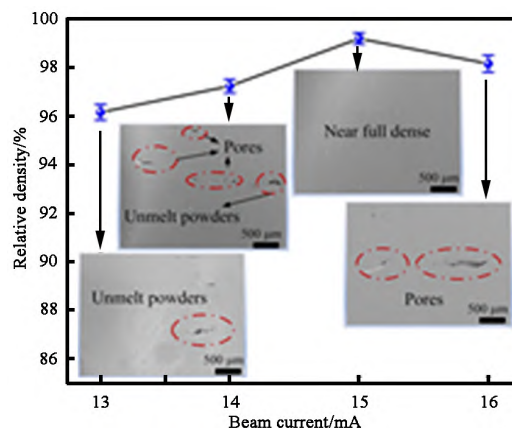


图 12 不同扫描电流对 Nb521 样品致密度的影响

Figure 12 Influence of different scanning currents on Nb521 sample density

2.2 结构功能材料与应用

PBF 工艺在成形金属植入物时相比传统工艺可以更好地实现个性化和仿生化结构制备,因此在诸如髌臼杯、膝关节、脊柱融合器等医疗植入物个性化定制式生产方面具有良好的应用前景。EB-PBF 打印的骨科植入器械具有模仿人体骨骼多孔结构的孔隙结构,以及相对粗糙的表面,可以很好地促进人体骨组织长入及其与植入器械的结

合。此外,植入物须拥有与人体骨骼相匹配的弹性模量。如果金属植入物的弹性模量过高,就会出现应力遮挡效应,引起人体骨骼的萎缩,引发骨质疏松^[44]。Murr L E 等^[45]采用 EB-PBF 技术制备了有效孔径约 400 μm 的 CoCrMo 材料大腿骨植入物(见图 13)和 Ti6Al4V 材料膝盖胫骨植入物(见图 14)。通过优化设计植入物多孔网状结构的致密度,保证了植入物和人体骨骼具有相似的弹性模量,从而减轻应力遮挡效应。Van B S 等^[46]研究了孔隙对细胞在金属植入物上增殖与分化的效果,指出孔径在 500 μm 的六边形孔隙周围细胞生长最快,且孔隙大小比孔隙形状对细胞增殖的影响更大,但细胞分化则同时受孔隙形状与大小的影响。Ponader S 等^[47]研究了 EB-PBF 成形 Ti6Al4V 的表面粗糙度对细胞生长的影响,发现当 R_a 低于 24.9 μm 时,表面粗糙度对细胞增殖和分化有积极影响,而当 R_a 高于 56.9 μm 时,表面粗糙度不利于细胞增殖。

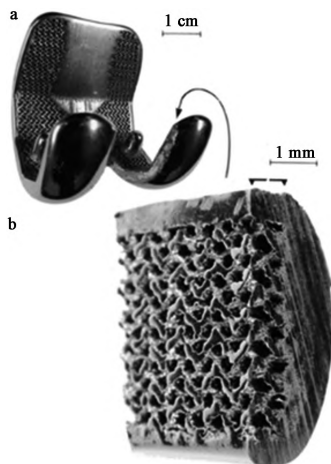


图 13 EB-PBF 成形 CoCrMo 材料大腿骨植入物成形件及局部放大图

Figure 13 Formed parts and local enlarged view of CoCrMo material femoral implant formed by EB-PBF

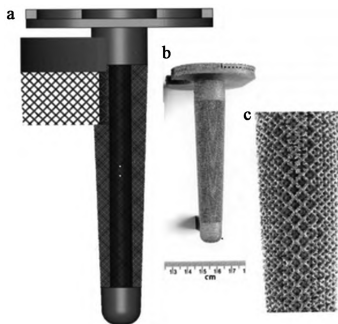


图 14 EB-PBF 成形 Ti6Al4V 材料膝关节胫骨植入物三维模型、成形件及局部放大图

Figure 14 Three-dimensional model, formed parts and local enlarged view of Ti6Al4V material knee joint tibia implant formed by EB-PBF

PBF 工艺的离散-堆积成形特点还为开发异于传统材料特性的超材料提供了可能性,如 Schwerdtfeger J 等^[48]通过 EB-PBF 成形了具有负泊松比的结构,结果如图 15 所示。研究表明通过改变结构形状和致密度,成形结构的弹性模量和泊松比都可随之改变。这提供了一种定制材料性能的方法。

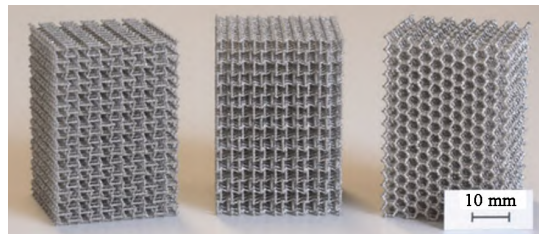


图 15 EB-PBF 成形的 Ti6Al4V 负泊松比结构
Figure 15 Ti6Al4V negative Poisson's ratio structure formed by EB-PBF

此外,周俊等^[49-51]采用 47Al2Cr2Nb 合金粉末,通过电子束多遍扫描,控制累积输入总能量以实现 Al 元素可控蒸发的方法,将 TiAl 合金转化成钛合金,其拉伸强度及延伸率明显提高。并通过对不同区域输入不同电子束总能量的方法,开发了功能梯度材料的选择性蒸发制备新技术,试样组织如图 16 所示^[51]。该技术只用一种合金粉末材料,制备出多材料功能梯度结构,突破了粉末床熔融增材制造技术难以制备铺粉平面内和三维方向功能梯度结构的限制。

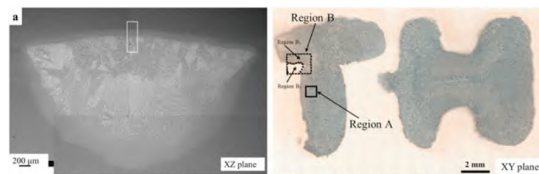


图 16 EB-PBF 成形的 Ti6Al4V/TiAl 梯度结构功能材料
Figure 16 Ti6Al4V/TiAl gradient functional material formed by EB-PBF

3 展望

通过以上综述可以看到,近年来无论是设备还是材料方面,EB-PBF 技术都取得了较大的进展,但该技术依然具有进一步发展和改进的潜力。其主要研究方向有:

(1) 大型化。目前激光粉末床熔融技术已经实现十二台激光器的阵列式扫描,其成形幅面已超过 1 m,这对于成形大尺寸零件并提高成形效率至关重要。而 EB-PBF 技术因电子枪阴极寿命及稳定性都低于激光器,因此其阵列式大尺寸技术依然有待拓展。

(2) 电子枪技术改善。目前电子枪阴极寿命仅数百小时,而电子束聚焦质量仍有待提高,其束斑直径会随功率增大而增大。因此开发更高精度、更高寿命的电子枪是 EB-PBF 工艺进一步发展的重要一环。

(3) 新材料开发。目前 EB-PBF 工艺成形的材料多为传统金属材料,在成形过程中低熔点元素易挥发,从而会导致其成分与性能的变化。因此一方面需要针对 EB-PBF 工艺特点开发专用材料,以保证制件性能,另一方面则需要进一步拓宽 EB-PBF 成形材料范围,充分发挥 EB-PBF 的高能量密度、高温低应力成形条件,发展出新型、高性能材料。

(4) 在线监测与成形过程闭环控制。EB-PBF 工艺在粉末床铺送、预热、熔化沉积等过程中存在诸多不可控因素,易出现变形、未熔合等缺陷,从而影响成品率、影响成形零件的性能质量。因此,有必要通过光学、背散射/二次电子、图像识别等多种检测技术,建立成形过程的在线监控和成形质量的在线反馈,结合成形参数的在线调整,实现成形过程的闭环控制,以保证 EB-PBF 工艺的成形质量。

(5) 复合与增减材制造。受限于电子束束斑尺寸、粉末粒径、粉末床阶梯效应等因素,EB-PBF 工艺的制件表面质量及对内孔结构的成形能力难以进一步提高。因此开发与激光选区熔化、数控切削等工艺结合的复合制造、增减材制造新技术,突破 EB-PBF 的技术瓶颈,大幅提高成形精度和成形效率,也将是重要技术发展趋势。

4 结论

增材制造是未来制造技术的重要发展方向。近年来,作为极具前景的金属增材制造技术,EB-PBF 技术无论是在成形机理研究、新装备研发,还是在新工艺、新材料开发等方面都取得了显著的进展,并在航空航天、医疗器械等领域获得越来越多的应用。

我国已逐步实现了 EB-PBF 设备的自主化和产业化,相关的基础研究也获得了国际认可,并在大尺寸 EB-PBF 和复合 EB-PBF 技术方面走在了世界前列。这将有助于形成中国特色的 EB-PBF 技术体系,推动我国先进制造技术实现跨越式发展。

参考文献

[1] Cormier D, Harrysson O, West H. Characterization of H13 steel produced via electron beam melting [J].

Rapid Prototyping Journal, 2004, 10(01): 35-41.

[2] Zhong Y, Rönner L E, 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.

[3] Qi H, Yan Y, 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.

[4] Rafi H, Karthik N, Gong H, et al. Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting [J]. Journal of materials engineering and performance, 2013, 22(12): 3872-3883.

[5] Sun J, Yang Y, Wang D. Mechanical properties of a Ti6Al4V porous structure produced by selective laser melting [J]. Materials & Design, 2013, 49: 545-552.

[6] Amato K, Gaytan S, Murr L E, et al. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting [J]. Acta Materialia, 2012, 60(05): 2229-2239.

[7] Jia Q, Gu D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 585: 713-721.

[8] Ponader S, Vairaktaris E, Heintz P, et al. Effects of topographical surface modifications of electron beam melted Ti-6Al-4V titanium on human fetal osteoblasts [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials, 2008, 84(04): 1111-1119.

[9] Schwerdtfeger J, Schury F, Stingl M, et al. Mechanical characterisation of a periodic auxetic structure produced by SEBM [J]. physica status solidi (b), 2012, 249(07): 1347-1352.

[10] Tan X, Kok Y, Tor S B, et al. Application of electron beam melting (EBM) in additive manufacturing of an impeller [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2014), Singapore. 2014: 26-28.

[11] Hassel T, Klimov G, Beniyash A. Beam extraction using non vacuum electron beam by reduced acceleration voltage [J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1109: 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1109/1/012017>.

[12] Edinger R. Laser heated electron beam gun optimization to improve additive manufacturing [C]//2018 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, 2018.

[13] Chulkov I, Goncharov A, Dragunov V, et al. The features of lab6 cathode operation in a technological electron-beam gun [J]. Russian Electrical Engineer-

- ing, 2021, 92(12): 767-771.
- [14] 胡元视, 左从进, 郭光耀, 等. 灯丝电流磁场对电子枪束流品质的影响[J]. 航空制造技术, 2010(09): 81-84.
- [15] Roy P, Moon A, Mima K, et al. Study of a laser-heated electron gun [J]. Review of scientific instruments, 1996, 67(12): 4098-4102.
- [16] 郭光耀, 韩瑞清, 李晋炜. 基于激光加热阴极的高精密焊接电子枪研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(10): 93-97.
- [17] Li Hongxin, et al. Effects of the higher accelerating voltage on electron beam powder-bed based additive manufacturing of Ti6Al4V alloy [J]. Additive Manufacturing, 2022(50): 102579.
- [18] Klassen A, Bauereiß A, Körner C. Modelling of electron beam absorption in complex geometries [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(06): 065307.
- [19] Osmanlic F, Klassen A, Scharowsky T, et al. Numerical investigation of the influence of electron beam acceleration voltage in powder based additive manufacturing processes [C]//Proceedings of the International Conference on Electron Beam Technologies, Varna, Bulgaria, 2016: 13-48.
- [20] Cleland M R, Parks L A. Medium and high-energy electron beam radiation processing equipment for commercial applications [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 208 2003: 74-89.
- [21] Kenevisi M S, Lin F. Selective electron beam melting of high strength Al2024 alloy; microstructural characterization and mechanical properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020: 155866.
- [22] Sames W J, Unocic K A, Helmreich G W, et al. Feasibility of in situ controlled heat treatment (ISHT) of Inconel 718 during electron beam melting additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2016: S221486041630241X.
- [23] 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(09): 252-258.
- [24] Galati M, Minetola P, Rizza G. Surface roughness characterisation and analysis of the electron beam melting (EBM) process [J]. Materials, 2019, 12(13): 2211.
- [25] Zhai Y, Galarraga H, Lados D A. Microstructure evolution, tensile properties, and fatigue damage mechanisms in ti-6al-4v alloys fabricated by two additive manufacturing techniques [J]. Procedia Engineering, 2015, 114: 658-666.
- [26] Klassen A, Forster V E, Juechter V, et al. Numerical simulation of multi-component evaporation during selective electron beam melting of TiAl [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247.
- [27] GE Additive. Products: Arcam ebm spectra h [EB/OL]. 2022 [2022-07-10]. <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/ebm-machines/arcam-ebm-spectra-h>.
- [28] JEOL. Products/additive manufacturing 3D printer [EB/OL]. 2022 [2022-07-10]. <https://www.jeolusa.com/products/Additive-Manufacturing-3D-Printer>.
- [29] Freemelt, Inc. 3d printers: Freemelt one [EB/OL]. 2022 [2022-07-10]. <https://freemelt.com/freemelt-one/>.
- [30] Li Hongxin, et al. Performance of High-Layer-Thickness Ti6Al4V Fabricated by Electron Beam Powder Bed Fusion under Different Accelerating Voltage Values [J]. Materials, 2022(15), 5: 1878.
- [31] Wong H, Neary D, Jones E, et al. Pilot capability evaluation of a feedback electronic imaging system prototype for in-process monitoring in electron beam additive manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(1-4): 707-720.
- [32] Wong H, Neary D, Jones E, et al. Benchmarking spatial resolution in electronic imaging for potential in-situ Electron Beam Melting monitoring [J]. Additive Manufacturing, 2019, 29: 100829.
- [33] Wong H. Pilot investigation of surface-tilt and gas amplification induced contrast during electronic imaging for potential in-situ electron beam melting monitoring [J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101325.
- [34] Zhao D C, Lin F. Dual-detector electronic monitoring of electron beam selective melting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 289: 116935.
- [35] 赵德陈, 张磊, 林峰. 电子束选区熔化过程电子光学监测系统研究 [J]. 电加工与模具, 2019(06), 1-56.
- [36] Scharowsky T, Juechter V, Singer R F, 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).
- [37] Yang Jixin, Huang Yongjiang, et al. Microstructure evolution and globularization mechanism of lamellar phases in Ti6.5Al2Zr1Mo1V produced by electron beam melting [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14: 1921-1933.
- [38] Yang Jixin, Chen Yiqiang, et al. Hierarchical microstructure of a titanium alloy fabricated by electron beam selective melting. Journal of Materials Science & Technology [J]. 2020(42): 1-9.
- [39] Frigola P, Harrysson O A, Horn T J, et al. Fabricating copper components with electron beam melting [J]. Advanced Materials & Processes, 2014, 172(07): 20-24.
- [40] Amato K, Hernandez J, Murr L E, et al. Comparison of Microstructures and Properties for a Ni-Base Superalloy (Alloy 625) Fabricated by Electron Beam Melting [J]. Journal of Materials Science Research, 2012, 1(02): 435-438. (下转第 41 页)

耗时耗力,同时还影响正常生产节奏,因此,有必要设计成双滤袋除尘器形式,一用一备。

(2) 干式真空泵机组放置于泵房内,泵运行时,产生较大的热量,需设置大功率空调,用于改善室内环境。

(3) 干式真空泵系统内的每台泵均设置压力、温度、流量等监测元件,一旦有故障能在显示器终端显示,但是没有进一步开发智能分析平台,不能做到实时分析系统的健康状况,智能化、数据化水平有待提高。

(4) 工厂的冷却水质量达不到干式真空泵的使用要求,经常发生冷却水管的过滤器堵塞,造成设备报警,需要进行人工清理,有必要采用纯净水水源,并进行冷却水闭环循环。

6 结语

通过对 100 t VD 干式真空泵系统抽气能力指标的设计、系统设备的配置,对比分析了同规模蒸汽射流真空泵系统方案的经济性、稳定性、可靠性,结果表明:(1) VD 炉采用干式机械泵真空系统,其工艺指标和冶金效果与蒸汽射流真空泵系统真空系统相当,完全可以同等替代。(2) 干式

机械泵真空系统运行更为可靠,不受蒸汽温度、压力影响,其设备停产间隔时间长,维护简便,生产组织更加灵活。(3) 干式机械泵真空系统相比蒸汽射流真空泵系统真空系统,吨钢运行成本可节约 13.975 元,节约率 85%,经济效益好,同时也能为国家的节能环保事业贡献力量,值得在钢铁行业大范围推广。

参考文献

- [1] 陈龙,机械真空泵系统在炼钢行业的应用[J]. 山东工业技术,2018(07): 58.
- [2] 刘晓峰,安昌遐,杜亚伟,等. VD 真空精炼技术与装备的发展现状[J]. 中国冶金,2013,23(05): 7-11+16.
- [3] 刘玉魁. 真空工程设计[M]. 北京: 化学工业出版社,2016: 438-443,1489-1494.
- [4] 吴建龙,赵腾,马正锋,等. 炼钢用低碳绿色机械真空泵系统研发与应用[J]. 重型机械,2022(02): 20-26.
- [5] 陈瑞,王朝霞,赵慧超. 干式泵抽真空系统在包钢 100 t VD 精炼炉的应用[J]. 钢铁研究,2015,43(05): 42-44.

编辑: 曾杰

(上接第 26 页)

- [41] Chauvet E, Tassin C, Blandin J J, et al. Producing Ni-base superalloys single crystal by selective electron beam melting[J]. Scripta Materialia, 2018, 152: 15-19.
- [42] Li Y, Yu Y F, Wang Z B, et al. Additive Manufacturing of Nickel-Based Superalloy Single Crystals with IN-738 Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35(03): 369-374.
- [43] Yang Jixin, Huang Yongjiang, et al. Precipitation behavior in a Nb-5W-2Mo-4Zr niobium alloy fabricated by electron beam selective melting[J]. Materials Characterization, 2021: 111019.
- [44] 刘建国,徐莘香. 应力遮挡效应与骨关节固定综合征[J]. 中华骨科杂志,1994(06): 374-378.
- [45] Murr L E, Amato K N, Li S J, et al. Microstructure and mechanical properties of open-cellular biomaterials prototypes for total knee replacement implants fabricated by electron beam melting[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2011, 4(07): 1396-1411.
- [46] Van B S, Chai Y C, Truscetto S, et al. The effect of pore geometry on the in vitro biological behavior of human periosteum-derived cells seeded on selective laser-melted Ti6Al4V bone scaffolds[J]. Acta Biomaterialia, 2012, 8(07): 2824-2834.

- [47] Ponader S, Vairaktaris E, Heinel P, et al. Effects of topographical surface modifications of electron beam melted Ti-6Al-4V titanium on human fetal osteoblasts. [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2008, 84(04): 1111.
- [48] Schwerdtfeger J, Schury F, Stingl M, et al. Mechanical characterisation of a periodic auxetic structure produced by SEBM[J]. Physica Status Solidi, 2012, 249(07): 1347-1352.
- [49] Zhou Jun, Li Hongxin, Yu Yefeng, et al. Research on aluminum component change and phase transformation of TiAl-based alloy in electron beam selective melting process under multiple scan[J]. Intermetallics, 2019, 113: 106575.
- [50] Zhou Jun, Li Hongxin, Yu Yefeng, et al. Characterization of interfacial transition zone of functionally graded materials with graded composition from a single material in electron beam powder bed fusion[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 832: 154774.
- [51] Zhou Jun, Li Hongxin, Yu Yefeng, et al. Fabrication of functionally graded materials from a single material by selective evaporation in electron beam powder bed fusion[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 793: 139827.

编辑: 常旭