电子束粉末床熔融增材制造装备发展综述

焦沫涵^{1,2,3},龙宏宇^{4,5},梁啸宇^{1,2,3},周俊^{4,5},林峰^{1,2,3*}

(1.清华大学 机械工程系 清洁高效透平动力装备全国重点实验室,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; 4.有色金属与特种材料加工全国重点实验室,南宁 530004;

5.广西大学 机械工程学院, 南宁 530004)

摘要:电子束粉末床熔融(EB-PBF)增材制造技术具备成形效率高、成形零件应力低等优势,适用于高温 合金、高熔点金属的成形,在航空航天、生物医疗等领域具有广阔的应用前景。对电子束粉末床熔融装备 的研究情况进行了概述,回顾了 EB-PBF 装备的发展历程,汇总分析了国内外主要厂商的装备特点及研发进 展,综述了抗吹粉、多材料、多束流复合 3 个方面装备的关键改进与创新方法。在此基础上,着重介绍了 离子中和、机械装置屏蔽、近红外预热等新型成形舱改进方案,及其对工艺过程稳定性的提升效果;介绍 了新型铺送粉装置改进方案对多材料成形的潜力,即该方案可有效满足多材料成形、成形效率提高等需求; 此外提出并实现了多电子枪同幅加热成形、电子束-激光复合成形等突破传统单电子枪加工思路的新型成形 技术。最后,总结了该方向的研究进展并对其发展前景和主要发展方向进行了展望。 关键词:增材制造;电子束粉末床熔融;电子束选区熔化;装备;材料加工

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.11.002

中图分类号: TH166 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2023)11-0009-12

Electron Beam Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: A Review of Equipment and Process Technology Developments

JIAO Mo-han^{1,2,3}, LONG Hong-yu^{4,5}, LIANG Xiao-yu^{1,2,3}, ZHOU Jun^{4,5}, LIN Feng^{1,2,3*}

 State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbomachinery Power Equipment, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Beijing 100084, China; 3. Bio-manufacturing and Rapid Forming Technology Key Laboratory of Beijing, Beijing 100084, China; 4. State Key Laboratory of Non-ferrous Metals and Specialty Materials Processing, Nanning 530004, China; 5. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

ABSTRACT: Electron beam powder bed fusion (EB-PBF) additive manufacturing technology is very suitable for forming superalloys and refractory metals due to its advantages of high efficiency and low forming stress in the formed parts. It has a broad application prospect in the aerospace and biomedical domains. This paper presented a comprehensive overview of the research concerning EB-PBF equipment. It delved into the historical evolution of EB-PBF equipment, meticulously examined the equipment characteristics as well as the research and development progress made by major domestic and international manufacturers,

引文格式: 焦沫涵, 龙宏宇, 梁啸宇, 等. 电子束粉末床熔融增材制造装备发展综述[J]. 精密成形工程, 2023, 15(11): 9-20. JIAO Mo-han, LONG Hong-yu, LIANG Xiao-yu, et al. Electron Beam Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: A Review of Equipment and Process Technology Developments[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(11): 9-20. *通信作者 (Corresponding author)

收稿日期: 2023-08-21

Received: 2023-08-21

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-VII-0016-0156)

Fund: National Science and Technology Major Project (J2019-VII-0016-0156)

and also overviewed key advancements and innovative approaches in three crucial dimensions: anti-smoking, multi-material integration, and hybrid beam manufacturing. On this basis, the new forming chamber improvement schemes such as ion neutralization, mechanical device shielding, and near-infrared preheating as well as its effect on improving the process stability were mainly introduced. The potential of new powder spreading and feeding device on materials forming was introduced, which effectively met the needs of multi-material forming and forming efficiency improvement. In addition, the multi-electron-gun simultaneous heating and forming, the electron beam-laser hybrid forming, and some other new methods were proposed and realized. Finally, the research progress in this direction was summarized and the prospect of its development and the main development direction was put forward.

KEY WORDS: additive manufacturing; electron beam powder bed fusion; electron beam melting; equipment; materials processing

近年来,粉末床熔融增材制造(Powder Bed Fusion, PBF)作为一种重要的现代制造技术,吸引 了大量学者。作为近净成形技术的代表,PBF 通过逐 层熔融粉末材料,实现了三维数字模型向实体构件的 转换^[1-2]。这种技术有别于传统制造工艺,它能一次 性成形传统工艺无法制造的复杂结构、中空结构等, 在大大提高零部件设计自由度的同时降低了零部件 出现接缝缺陷的可能,提高了产品的整体性能和可靠 性,同时消除了传统减材制造过程中的材料浪费。

基于不同能量源的粉末床熔融增材制造方式可 以分为2种:激光粉末床熔融技术(Laser Powder Bed Fusion, L-PBF)和电子束粉末床熔融技术(Electron Beam Powder Bed Fusion, EB-PBF)。如图1所示,





与 L-PBF 相比,使用电子束作为能量源的 EB-PBF 有 更高的能量利用率、粉末吸收率和成形效率,这种加 工方式对脆性金属、高温合金、高反材料的加工提供 了优良的条件^[3]。但是,它需要真空环境以防止电子 束散射^[4],这无疑增加了制造成本,限制了应用尺寸。 相对而言,L-PBF 的熔深较小,光斑较细,虽然效率 较低,但精度较高,且不需要真空环境,因此不受腔 室大小限制,但易受气体污染影响^[5-6]。

在 90 年代中期, SLM Solutions 和 EOS 公司开始商业化应用 L-PBF; 1997 年, Arcam AB 公司开始商业化应用 EB-PBF^[7]。目前, EB-PBF 的应用案例比 L-PBF 的少^[8]。然而,随着电子束增材制造行业的发展,EB-PBF 已在航空航天^[9]、医疗^[10]等多个领域展现出优势。例如,在航空航天领域,GE 集团在 2019 年开始利用 60 余台 Arcam 电子束加工设备批量制造 钛铝航空发动机低压涡轮叶片,在 2020 年将其装配 在 GE9X 发动机上并实现首飞^[11]。在医疗领域,该技术为患者量身定制了生物医学植入件,最典型的案例 是骨科人工髋关节植入的髋臼杯。据统计,每 30 例 髋关节手术中就有 1 例使用由 Arcam 设备成形的髋 臼杯^[12]。此外,在能源、汽车、电子等行业,EB-PBF 也在零部件精密制造、快速成形等方面展现出独特 优势。

EB-PBF 技术需要真空条件、精密的电子枪设计 和传动系统设计等,商业化应用的门槛较高,一度导 致它只有小规模应用。但随着技术水平的不断提高, 越来越多的厂商投入到了 EB-PBF 设备与技术的研发 中。近年来,针对 EB-PBF 成形过程的特点和应用需 求,还涌现出了如 Wayland 公司的中性束技术^[13]等新 兴研究路线。目前关于 EB-PBF 设备和技术的综述文 章较少,这些文章无法准确反映 EB-PBF 的发展现状 和未来趋势。因此,本文深入探讨了 EB-PBF 的设备、 应用、独特技术以及未来发展方向,同时揭示了其在 制造业中日益重要的地位。未来,随着制造技术的进 步,EB-PBF 的成形速度和成本将进一步得到优化, 其应用将更为广泛,尤其在航空、航天、医疗、能源 等领域,EB-PBF 技术有望推动技术创新升级。

1 电子束粉末床熔融的装备发展

电子束粉末床熔化(EB-PBF)也称为电子束选 区熔化(EBSM)或者电子束增材制造(EBAM),是 一种先进的 3D 打印技术。不同于 L-PBF 利用激光作 为能量源并利用振镜系统控制光束路径, EB-PBF 是 通过加热钨灯丝或者六硼化镧(LaB₆)单晶阴极发射 电子,并经过高压(≥60 kV)加速后形成电子束流 来轰击粉末床,将电子的大部分动能转化为金属粉末 的热能,进而熔化粉末进行成形^[14-15]。电子枪利用电 磁线圈来控制电子束流的偏转和聚焦,使其具备较高 的成形能力和精度。同时,为了减小电子与气体分子 (如氧气、氮气等)碰撞造成的能量损失,通常在高 真空度和氦气氛围下进行成形,这避免了因金属粉末 在高温下氧化而对成形零件的性能产生影响[16-18]。由 于电子束粉末床熔融技术有着较高的能量利用率和 成形效率,因此使用电子束粉末床熔融技术加工成形 高性能金属部件有着明显优势。

近年来,相关行业对 EB-PBF 技术的认可程度不断提高,随着电子枪技术、控制系统与 EB-PBF 工艺不断进步和成熟,EB-PBF 设备呈现出快速发展的趋势,如图 2 所示。本文对 EB-PBF 设备的发展历程及关键节点进行了概述,并对比分析了国内外商业化 EB-PBF 设备的最新研发进展。



图 2 电丁采标木体融反备)间反底历性 Fig.2 Evolution of EB-PBF equipment OEMs

电子束熔化的概念最早在 20 世纪 80 年代末被提 出,并在 20 世纪 90 年代得到进一步发展,其技术原 理由 瑞典 Arcam 公司与瑞典查尔姆斯理工大学 (Chalmers University of Technology)提出并取得专 利^[19],早期的工作包括使用电子束选择性地逐层熔化 金属粉末以建立复杂形状,这一阶段的主要工作是进 行概念性验证。生产的原型机体积大,也没有针对工 业规模生产对系统进行优化。

在 21 世纪初期, 电子光学技术有了显著的进展。

更精确的电子束聚焦和扫描技术被开发出来,这利于 更好地控制熔化过程,提高打印部件的分辨率和表面 质量。在此期间,制造商开始商业化应用 EB-PBF 系 统,使电子束粉末床熔融技术正式应用于工业。从 1997 年至 2012 年,Arcam 公司一直是全球唯一的 EB-PBF 商用化设备的供应商^[20],而此后,已经有超 过7家企业或公司成为 EB-PBF 设备的研发与生产商。 例如中国北京清研智束有限公司、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、日本三菱公司、德国 ALD 和 Pro-beam 公司等。

瑞典 Arcam 公司率先在 2002 年推出了全世界第 一台商用 EB-PBF 设备(EBM S12)^[21]。在此后的 21 年间,又陆续推出了 Arcam A1/A2/A2X、 Q10/10plus、Q20/20plus、Spectra H/L 系列的 EB-PBF 设备^[22],其中 Q 系列在生物医疗领域应用;A 系列 主要针对高温合金、金属间化合物(涡轮叶片、航空 结构件)以及新材料的开发;Spectra 系列则适用于 生产较大尺寸零件。2016 年,Arcam 公司被 GE (General Electric, USA)公司收购^[23]。

瑞典的 Freemelt 公司成立于 2017 年,于 2019 年研 发并对外销售了 Freemelt One EB-PBF 系统^[20,24],该系 统受限于真空室及成形缸尺寸,无法成形较大的零部 件,其优势在于能经济高效地开发新材料及成形工 艺,被很多科研机构采用。

清华大学机械工程系自 2004 年就开始开发具有 完全自主知识产权的 EB-PBF 设备,并先后给国内西 北有色院、中科院合肥物质研究院等单位提供了科研 型 EB-PBF 设备^[25]。2015 年,依托清华大学高端装 备研究院的 QBeam 公司(今北京清研智束公司)推 出了 2 款 EB-PBF 设备,即 Med 200 和 Lab 200 系列。 目前,清研智束 QBeam Lab 系列产品已经成功交付 俄罗斯等国家。2022 年,清研智束推出 Qbeam G350 和 S600 系列。前者采用了双电子枪阵列,可以实现 双枪同幅扫描(电子束间干扰位移≤10 μm),显著提 高了成形效率,保证粉末床温度在 1 250 ℃精确可控, 能够低应力成形热裂敏感材料,非常适用于大尺寸难 焊高温合金部件的成形; S600 则采用 2×2 阵列式电 子枪系统,结合 600 mm×600 mm 的成形幅面,可以 实现大尺寸零件的高效率成形。

西安赛隆金属材料有限公司成立于 2013 年,是 西北有色金属研究院控股的专业从事电子束选区熔 化装备及打印服务的高新技术企业。赛隆公司针对不 同的成形尺寸、金属材料及应用领域,推出了不同系 列与型号的电子束选区熔化设备,如 Sailong Y 系列、 T 系列及 H 系列。

德国 Pro-beam 公司专注于开发电子束和激光焊接、微孔钻孔和表面涂层技术。该公司的 EB-PBF 机器主要针对小尺寸和高生产率的应用领域。在 2021 年 Formnext 展上,该公司推出了 PB EBM 30S 设备,

该设备具有处理并行化、电子光学原位监测系统和独特的热分布曝光策略等一系列特点。

德国企业 ALD 最早从事真空熔炼和真空热处理 设备的研发与服务,是一家真空冶金经验丰富的制造 企业。该企业于 2020 年推出了一款电子束粉末床金 属 3D 打印系统——EBuild 850,也是截至目前市面 上成形幅面(850 mm×850 mm×1 000 mm)最大、电 子枪功率(45 kW)最高的电子束粉末床打印设备, 这种高电压电子枪设备不仅利于成形大尺寸零件,还 可以提高成形效率,例如支持使用更大粒径的粉末 (>150 μm)或低流动性的粉末。

日本于 2014 年成立了两家 EB-PBF 供应商,分 别为 TADA 和 JEOL^[26]。TADA 与 Pro-beam 类似,旨 在将电子束焊接专业知识引入 EB-PBF 市场,推出了 搭载 6 kW 电子的 EB-PBF 设备——EZ 300,也是日 本第一台 EB-PBF 设备^[27]。JEOL 拥有 70 多年的电 子光学研发生产经验以及 50 多年的电子束测量和光 刻专业知识,于 RAPID 2022 展上推出了一款工业级打 印机——JAM 5200EBM,其阴极寿命可达到 1 500 h, 是目前 EB-PBF 机器中阴极使用寿命最长的打印机。 此外,JAM 5200EBM 采用了一种名为"E-Shield"的物 理屏蔽技术,用来解决打印过程中的吹粉问题。

Wayland Additive 是一家英国初创公司,该公司 试图将成熟的电子束技术从半导体行业转移到增材 制造行业,并推出了 EB-PBF 商业设备——Calibur 3^[28]。该设备的特点是采用了一种称为 NeuBeam 的电 荷中和技术,即通过正离子流来中和带电粉末颗粒的 电荷,从源头上解决了吹粉现象^[13]。Wayland 还采用 了局部粉床预热工艺,即仅对打印件的粉末施加局部 热源,有效避免了粉末床烧结问题,提高了粉末的重 复利用率。

图 3 汇总了目前 EB-PBF 商业化设备的基本情况,分析了设备的基本成形能力和适用材料范围。表 1 梳理了设备的主要技术特点和指标。

2 电子束粉末床熔融设备的改进与 创新

2.1 抑制吹粉的装备与关键技术

在 EB-PBF 技术中,电子枪提供高能电子束并将 其发射到粉末表面,材料吸收电子的动能并转化为热 能对粉末进行熔化,射入粉末床的电子会在受照射的 粉末颗粒上积累,进而产生静电排斥,这种电子束与 粉末之间的瞬态相互作用会导致粉末剧烈运动,即吹 粉现象^[29],如图 4 所示^[30]。在吹粉过程中,成形幅 面上的粉末被扬起并散落到真空室中,破坏了粉末 层,使 EB-PBF 过程不可逆转的中止。

预热是防止吹粉的有效方法之一,这种方式是通 过预烧结粉末颗粒来提高粉末层的力学强度进而防 止吹粉^[31-33],研究者们通过进行大量试错实验来获得 不吹粉的工艺参数窗口^[34-35]。Wang 等^[30]、Eschey 等^[36] 和 Ye 等^[37]均通过高速摄影和电子信号检测的手段实 时监测了 EB-PBF 吹粉过程,提出了电子束吹粉是



图 3 商业化电子束粉末床熔融设备汇总 Fig.3 Comparison of commercially available EB-PBF equipment

Brand	Arcam(GE)	Free-melt	QBeam	Sailong AM	Mitsubi-	JEOL	Wayland	Pro-beam	ALD
Country	Sweden	Sweden	China	China	Japan	Japan	UK	Germany	Germany
Model	A/Q, Spectra L/H	Freemelt One	E200, S200/ 350/600, G350	Y150/P, T200 H400	EZ-300	JAM-520 0EBM	Calibur 3	PB EBM 30S	EBuild 850
Max Build size/cm	A: $20 \times 20 \times 38$ Q: $20 \times 20 \times 20$ Spectra: 35×43 $(\Phi \times H)$	12.6×20 (<i>Φ</i> × <i>H</i>)	E200: 20×20×45; S200: 20×20×23; S350: 35×35×50; S600: 60×60×70; G350: 35×35×70	Y: 15×15×18; T200: 20×20×45 H400: 40×40×40	30×30×45	25×40 (<i>Φ</i> × <i>H</i>)	30×30×45	30×30×40	85×85× 100
Accu- racy/mm	_		$\pm 0.2/100$	$\pm 0.2/100$					
Volt- age/kV	60	30-60	60	60	60	60	60	150	150
Power/kW	A and Q Series: 3; Spectra L/H: 6	6	E/S200: 3; S/G350, S600: 6	Y: 3; T/H: 6	6	6	5	15	45
Cathode	A series: Tun- gsten; Q/Spectra series: Sin- gle-crystal LaB ₆	Poly-cryst al LaB ₆	E200: Tungsten, ≥60 h; S/G series: Sin- gle-crystal LaB6 >600 h	Directly heat- ed tungsten, >60 h; Indirectly heated tung- sten, >500 h	Specially shaped cathode 1 000 h	Sin- gle-crysta l LaB ₆ , 1 500 h	Tungsten or LaB_6	_	_
Spot size/µm	>200 (Tungsten); 100 (LaB ₆)	200	140 (Tungsten); 180 (Single-crystal LaB ₆)	Y150/P: ≤ 300; T200: ≤100; H400: ≤300	_	_	>150 (Tungsten) 100 (LaB ₆)	Auto- matic sopt control	
Heat source	Joule heating	Laser heating	Joule heating	Joule heating	Joule heating	Joule heating	Joule heat- ing	Joule heating	
Powder supply	Powder hop- pers(gravity-b ased)	Addi- tional powder feed tank	Active powder supply (roller-based)	Active pow- der supply (roller-based)	Powder hop- pers(gravi ty-based)	Powder hop- pers(grav ity-based)	Movable powder tank (grav- ity-based)	Active powder supply	Active powder supply
In-situ monitor- ing	Optical cam- era	Elec- tron-optic al (ELO) imaging	ELO imaging (detectors located on heat shield); Optical camera	ELO imaging; Optical cam- era	ELO im- aging; Optical camera	Remote monitor- ing sys- tem; Op- tical camera	High-speed camera; Structure light scan- ning	ELO im- aging	Back- scattered electron imag- ing(BSE)
Software	Arcam beam control	Open- source	Metabuild	SEBM-ICS		Open- source	Open- source		

表 1 市面在售不同 EB-PBF 设备的比较 Tab.1 Comparison of different EB-PBF equipment in the market

可以被检测的,当吹粉现象发生时,相应的信号特 征可以反映出吹粉过程中不同阶段的粉末运动状 态,由此可以检测吹粉过程,从而预防或控制吹粉。

Arcam 公司在电子枪侧壁上安装了 X 射线传感器来监测电子枪内部的飞溅粉末^[38]。这种方法有助于防止电子枪损坏,但直到粉末完全扬起传感器才做出反应,这仍然会造成打印停止。

英国 Wayland Additive 公司^[28]针对吹粉问题提 出了 NeuBeam(中性束)工艺,通过在粉床上加载 正电荷中和粉末床中积聚的负电荷,防止带电的电 子束撞击松散的粉末床进而避免吹粉。当消除与粉 末充电相关的风险后,电子束熔化更像激光烧结。 NeuBeam 作用于粉末床的温度高于所用材料的退 火温度但低于烧结温度,这意味着未使用的粉末保 持松散状态,不会出现烧结后产生难以清理的硬质 粉末床的现象,极大地简化了粉末去除和后处理的 过程。

Freemelt 公司于 2022 年在瑞典申请了一项名为 ProHeat™的粉末床预热技术专利^[39],此项技术在粉 末床上方放置了一个加热保护装置,如图 5 所示,这 个加热板可以在粉末床和电子枪之间旋转。同时,加 热板被入射的电子束加热,通过二次辐射加热下面的 粉末,与现有的使用电子束预热粉床的方式相比,这 项技术属于间接加热,可以保证粉末在不与电子相互 作用的情况下被加热,从而消除了粉末带电,因此也 无须关心粉末的粒径和电导率。同时,该公司表示这 项技术可以不需要在成形室中填充惰性气体防止吹 粉,这样保证真空室中更好的真空度,有利于提高电 子束的质量。

日本的 JEOL 公司也针对吹粉问题研发了相应的



图 4 单点下束状态下吹粉发展过程的高速摄影图像^[30]

Fig.4 High-speed photographic image of smoking development process under the condition of fixed-position irradiation^[30]



a 加热板间接加热粉末床

b 加热板移开

c 电子束熔化成形

图 5 ProHeat[™] 的预热流程^[39] Fig.5 Pre-heating procedure for ProHeat^{™[39]}: a) powder bed heated by radiation; b) removal of heating plate; c) part fabrication by electron beam

解决方案。该公司使用一个环绕成形区域的 "E-Shield"^[40],即电子屏蔽圈,来避免粉末粒子的散 射和充电。这个设备的设计是为了最大程度地控制熔 化过程中粉末粒子的分散情况,以优化成形质量。

Sjöström 等^[41]提出了使用近红外辐射(Near-Infrared Radiation, NIR)的方式预热粉末床,他们将 一套尺寸为 100 mm×120 mm、功率为 6 kW 的 NIR 设备与 Arcam 的 EB-PBF 设备相结合(如图 6 所示), 成功实现了对底板和粉末床的加热。通过该技术成形 的 Ti6Al4V 和 316L 试样表现出了与传统 EB-PBF 相 似的组织特征和硬度。他们认为,通过利用 NIR 设 备辅助预热粉床,打印的单层时间缩短了 13%~80%, 并且指出,当电子束只负责成形时,灯丝的寿命将会 大大提高,维护成本有所降低。



图 6 近红外辐射(NIR)粉床预热图示^[41] Fig.6 Schematic representation of NIR power bed preheating^[41]

2.2 多材料成形

EB-PBF 在制备多材料方面具有很大的潜力,其 中梯度结构有着独特的性能和较易的制备过程。Guo 等^[42]开发了一种新型 EB-PBF 装置 (如图 7 所示), 该装置通过两侧的振动装置将不同材料的粉末送入 粉末混合装置中,粉末混合装置通过判断重量来控制 粉末混合比例,并通过机械混合至均匀,混合后的粉 末被平铺在粉末床上用来成形,他们成功制备出沿构 建方向上具有成分梯度的 Ti6Al4V/Ti47Al2Cr2Nb 材 料。Fu 等^[43]提出了一种选择性铺粉方法(如图 8 所 示),他们使用不同粒径的铜和钨的粉末成形了 Cu-W 功能梯度材料。在 EB-PBF 过程中, 当层厚较小时, 粉末混合物中的大部分粗粉末在铺粉时被移除,这导 致在粉末层中剩余了更多的细粉末。基于这种选择性 铺粉原理,在成形时可通过控制每一层的层厚,从而 控制成形件的化学成分。但由于打印完毕后的粉床由 混合粉末构成,很难对粉末进行回收利用。



图 7 振动下粉(a)以及混粉与铺粉示意图(b)^[42] Fig.7 Schematic diagram of vibrated powder supplement system (a) and powder mixing and powder spreading (b)^[42]

2.3 多束流复合成形

随着 EB-PBF 和 L-PBF 的发展,研究人员开始开 发新的增材制造工艺,通过结合不同制造方式的优 点,达到提升加工效率、扩大材料适应范围、提升加 工精度、解决单种增材制造工艺存在的技术瓶颈等目 的。EB-PBF 技术也衍生出了电子束-电子束复合、电 子束-激光复合的新方案。



图 8 Freemelt One 设备的成形室(包括供粉和铺粉装置)(a)以及选择性铺粉系统的示意图(b)^[43] Fig.8 Build chamber of Freemelt ONE machine equipped with spreading and feeding devices (a) and diagram of selective powder spreading system (b)^[43]

2.3.1 电子束增减材

林峰等^[44]在 2017 年开发了电子束增减材复合增 材制造装备,将电子束选区熔化与电子束切割功能结 合,通过电子束对成形件轮廓进行切割以提高成形件 表面质量,如图 9 所示。针对 316L 不锈钢,采用电 子束跳转脉冲切割和连续快速扫描切割 2 种方法,在 现有的 EB-PBF 设备中实现了电子束切割工艺^[45],并 与 EB-PBF 工艺结合,降低了 316L 不锈钢的侧表面 粗糙度,初步验证了电子束增减材工艺的可行性及其 改善 EB-PBF 成形件表面质量的能力。

2.3.2 电子束-电子束复合(双枪同幅)

为更好地保证粉末床在高温时的温度稳定性,避 免在电子束选区熔化时粉末床温度下降,清华大学与 清研智束合作提出了电子束与电子束复合的双枪同 幅、同步预热技术,使用2台电子枪,可分别进行选 区熔化和粉末床预热,实现了高温预热与成形加工在 同一幅面的同步进行(见图 10)。与传统 EB-PBF 工 艺相比,双枪同幅同步预热工艺有利于保持粉末床温 度的稳定性,可以保证粉末床在1000 ℃以上时的稳 定性,有利于解决难焊镍基高温合金零件成形过程



图 9 电子束增减材复合制造装备原理示意图(a)^[44]以及电子束增减材复合工艺实验的零件表面(b)^[45] Fig.9 Schematic diagram of EB-PBF and EB-cutting hybrid manufacturing machine (a) part surface of EB-PBF and EB-cutting hybrid manufacturing (b)^[45]



图 10 电子束双枪同幅复合增材制造原理示意图(a)以及电子束双枪复合增材制造装备(b) Fig.10 Schematic diagram of dual-electron-gun synchronous hybrid additive manufacturing (a) and dual-electron-gun hybrid additive manufacturing machine (b)

中的凝固裂纹问题。清研智束公司已推出了商业化的 Qbeam G350 设备^[46],使用双枪同幅技术,通过同步 进行粉末床的预热扫描和零件截面的填充与轮廓扫 描,可保证粉末床温度在1250℃时精确可控,适用 于形状复杂、裂纹敏感性材料零部件的加工制造,如 大尺寸薄壁零部件及金属间化合物、难焊高温合金、 难熔金属、高熵合金等。

2.3.3 电子束-激光复合

电子束粉末床熔融技术(EB-PBF)具有效率高、 温度可控、材料适应性广等特点,但由于束斑粗大, 其成形精度较低。激光粉末床熔融技术(L-PBF)的 成形精度高、制件表面粗糙度低,但成形效率较低。 清华大学李宏新等^[47]提出将 2 种选区熔化技术相结 合,以实现具有更高效率、更高精度和更高材料适应 性的电子束与激光复合选区熔化(EB-LHM)的新型 增材制造技术,并且开发了电子束-激光复合设备, 如图 11 所示。EB-LHM 的电子束和激光同步工作, 利用电子束能量利用率高的特点进行粉末床预热,利 用激光精度高的特点进行轮廓或主体成形,成功改善 了电子束增材制造 Ti6Al4V 的表面质量^[48]。电子束-激光复合的加工思路不仅能提高零件的成形质量,还 有望通过工艺上的结合解决 EB-PBF 的技术瓶颈。



图 11 电子束-激光复合设备示意图(a)与成形工艺过程(b) Fig.11 Schematic diagram of EB-LHM equipment (a) and forming process (b)

电子束与激光有很多种复合方式,例如电子束预 热-激光成形和激光预热-电子束成形等。Hao等^[49]对 比了上述 2 种电子-激光复合混合策略。结果显示, 2 种复合方式都可以得到致密度 99%以上的 Ti6Al4V 样品,并且通过混合预热策略调控温度场可以使材料展 现出不同的组织特征,其中电子束预热-激光成形复 合手段可以实现较高的强度(抗拉强度为 1059 MPa± 62 MPa)和较好的塑性(应变为 14.8%±4.0%)。

周斌^[50]使用 EB-LHM 设备进行了电子束-激光复 合预热的研究,他利用激光预先烧结并固定粉末床, 增强了粉末抗吹粉能力,之后利用大功率电子束继续 预热粉末床到指定温度,这样不仅可以避免吹粉问 题,还可以缩短预热时间,大大提高了 EB-LHM 的 材料适应性和成形效率。

3 总结与展望

增材制造是未来制造业的关键发展方向之一。近 几年,作为一种具有巨大潜力的金属增材制造方法, EB-PBF 技术在攻克技术难关的同时逐步产业化,并 在航空航天、医疗设备等行业得到了广泛的应用。我 国对 EB-PBF 的基础研究已经得到了国际认可,并 且逐步实现了设备的自主研发,特别是在大尺寸 EB-PBF 和复合 EB-PBF 技术方面,我国已经走在了 全球的前列。这将有助于推动我国先进制造技术的 发展。

近些年 EB-PBF 产业正处于快速发展阶段,不论 是在科研领域还是在商业领域,都有了实质性的进 步,但该技术仍然有进一步发展和改进的潜力,在未 来有以下几个方面值得进一步研究:

1)大型化。目前,L-PBF 设备厂家已经通过使 用阵列扫描的方式实现了超过1m的成形幅面,提高 了成形效率,这对制造大型零件和提升成形效率具 有重要意义。然而,由于电子束粉末床熔融 (EB-PBF)技术中电子枪的阴极寿命和稳定性相较 于激光器的低,其大尺寸阵列技术的发展仍有待深 入研究和探索。

2)集成化与智能化。目前,EB-PBF的集成化和 智能化程度仍有待提高。通过构建闭环制造体系,实 现粉末生产、零件制造、粉末回收等环节的无缝连接, 可以进一步优化制造流程。同时,引入工业4.0的智 能生产理念,建立成形质量的在线监测系统,实时调 整工艺参数,以及利用 AI 和大数据分析手段进行打印决策等,都有望大幅提升 EB-PBF 的成形质量和制造效率,降低制造成本。

3)新材料与新工艺的开发。目前,EB-PBF工艺 集中在钛合金、高温合金等具有特定本征的金属材料 的成形。需要根据具体材料的应用背景将电子束粉末 床熔融的优势最大化,进一步拓展 EB-PBF 材料的选 择范围,并开发 EB-PBF 专用的高质量金属粉末。此 外,应发展新的理论和表征手段来评估增材制造零件 微观结构和性能的关系,提高对增材制造零件的工 艺、结构、性能之间相互关系的理解。结合模拟仿真 建立打印参数与零件目标性能的模型,如温度场、溶 质场、冷却速率、凝固和晶粒生长等,减少缺陷,加 快新材料的开发进度,提高产品质量。

4)复合成形技术。EB-PBF仍有成形稳定性低、 精度差的问题,通过复合电子束、激光、数控切削等 工艺继续攻坚复合成形技术难点,提高成形精度、成 形效率和解决EB-PBF的技术瓶颈也将是重要技术发 展趋势。

5)电子枪技术。目前大多数 EB-PBF 设备使用 的是加速电压为 60 kV 的电子枪, 阴极寿命在几百小 时内, 通过提高电子枪加速电压、提高电子束光斑精 度、提升电子枪寿命是助力 EB-PBF 走向大规模产业 化的关键。

参考文献:

- FU Z, KÖRNER, CAROLIN. Actual State-of-the-Art of Electron Beam Powder Bed Fusion[J]. European Journal of Materials, 2022, 2(1): 54-116.
- [2] KHAJAVI S H, PARTANEN J, HOLMSTROM J. Additive Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain[J]. Computers in Industry, 2014, 65(1): 50-63.
- [3] 梁啸宇,张磊,林峰. 电子束粉末床熔融制备钛铝基金
 属间化合物研究进展[J]. 精密成形工程,2022,14(11):
 81-97.

LIANG Xiao-yu, ZHANG Lei, LIN Feng. Research Progress of TiAl Intermetallic Fabricated by Electron Beam Powder Bed Fusion[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(11): 81-97.

- [4] SCHAROWSKY T, BAUEREIß 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: 2809-2818.
- [5] HASSEL T, KLIMOV G, BENIYASH A. Beam Extraction Using Non Vacuum Electron Beam by Reduced Acceleration Voltage[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1109: 012017.
- [6] KLASSEN A. Simulation of Evaporation Phenomena in

Selective Electron Beam Melting[M]. Erlangen: FAU University Press, 2018.

- [7] KÖRNER C. Additive Manufacturing of Metallic Components by Selective Electron Beam Melting-a Review[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(5): 361-377.
- [8] 张朝瑞, 钱波, 张立浩, 等. 金属增材制造工艺、材料及 结构研究进展[J]. 机床与液压, 2023, 51(9): 180-196. ZHANG Chao-rui, QIAN Bo, ZHANG Li-hao, et al. Research Progress of Metal Additive Manufacturing Process, Materials and Structure[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(9): 180-196.
- [9] TAN X P, KOK Y, TOR S B, et al. Application of Electron Beam Melting (EBM) in Additive Manufacturing of an Impeller[C]// International Conference on Progress in Additive Manufacturing, Singapore, 2014: 327-332.
- [10] PONADER S, VAIRAKTARIS E, HEINL 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, 2010, 84(4): 1111-1119.
- [11] BLAKEY-MILNER B, GRADL P, SNEDDEN G, et al. Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A Review[J]. Materials & Design, 2021, 12: 110008.
- [12] CARRIERE P R. Energy and Charge Transfer during Electron Beam Melting[M]. Montreal: McGill University (Canada), 2018.
- [13] DEN B J A, HUSSEY M J, RICHARDSON W T, et al. Additive Layer Manufacture Using Charged Particle Beams: U.S. Patent 10,879,039[P]. 2020-12-29.
- [14] 李宏新. 90 kV 高压电子束粉末床熔融增材制造技术研究[D]. 北京:清华大学, 2022.
 Hong-xin. 90 kV High-voltage Electron Beam Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Technology Research[D].
 Beijing: Tsinghua University, 2022.
- [15] SIGL M, LUTZMANN S, ZAEH M F. Transient Physical Effects in Electron Beam Sintering[C]// 2006 International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2006: 464-477.
- [16] WANG C, TAN X, LIU E, et al. Process Parameter Optimization and Mechanical Properties for Additively Manufactured Stainless Steel 316L Parts by Selective Electron Beam Melting[J]. Materials & Design, 2018, 147: 157-166.
- [17] ZHONG Y, RÄNNAR 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.
- [18] RÄNNAR L E, KOPTYUG A, OLSÉN J, et al. Hierarchical Structures of Stainless Steel 316L Manufactured by Electron Beam Melting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 17: 106-112.
- [19] 张靖. 电子束选区熔化数字式扫描控制系统研究[D]. 北

京:清华大学,2011.

ZHANG Jing. Research on the Digital Scanning Control System for Electron Beam Selective Melting[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.

- [20] KOWEN J. Unrealised Potential: The Story and Status of Electron Beam Powder Bed Fusion[J]. Metal Additive Manufacturing, 2020, 6(2): 119-131.
- [21] ARCAM A. Arcam History[EB/OL]. (2015)[2023-08-10]. http://www.arcam.com/company/abo ut-arcam/history/.
- [22] ARCAM A. EBM® Electron Beam Melting-in the forefront of Additive Manufacturing[EB/OL]. (2019) [2023-08-10]. http://www. arcam. com/company/about-arcam/ history/.
- [23] LIETAERT K, WAUTHLE R, SCHROOTEN J. Porous Metals in Orthopedics[J]. Biomaterials in Clinical Practice: Advances in Clinical Research and Medical Devices, 2018(10): 281-301.
- [24] ALMEIDA H, VASCO J. Expectations of Additive Manufacturing for the Decade 2020-2030[C]// Progress in Digital and Physical Manufacturing: Proceedings of ProDPM'19, 2020: 10-19.
- [25] 李宏新,梁啸宇,张磊,等. 电子束粉末床熔融技术发展综述[J]. 大型铸锻件, 2022(5): 19-26.
 LI Hong-xin, LIANG Xiao-yu, ZHANG Lei, et al. A Review of the Development of Electron Beam Powder Bed Fusion Technology[J]. Heavy Casting and Forging, 2022(5): 19-26.
- [26] KYOGOKU H, CHIBA A, HASHITANI M, et al. The Development Status of the National Project by Technology Research Assortiation for Future Additive Manufacturing (Trafam) in Japan[C]// 2019 International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2019: 1641-1650.
- [27] 宮田, 淳二. 電子ビーム方式金属 3d プリンタの開発[J]. 粉体および粉末冶金, 2021, 68(10): 442-449.
- [28] WILL R C. Metal Additive Manufacturing: A "3rd" Way with the Pbf Process[EB/OL]. (2020) [2023-08-10]. https://www.waylandadditive.com/articles/metal-additivemanufacturing-a-3rd-way-with-the-pbf-process/.
- [29] 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.
- [30] WANG D F, ZHAO D C, LIANG X Y, et al. Multiple Stages of Smoking Phenomenon in Electron Beam Powder Bed Fusion Process[J]. Additive Manufacturing, 2023, 66: 103434.
- [31] LARSSON M, SNIS, ANDERS. Method and Device for Producing Three-Dimensional Objects: China, CN101678-455 B[P]. 2012-09-26.

- [32] KARLSSON J, NORELL M, ACKELID U, et al. Surface Oxidation Behavior of Ti-6Al-4V Manufactured by Electron Beam Melting (Ebm)[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 17: 120-126.
- [33] GIOVANNI R, MANUELA G, LUCA I. A Phase-Field Study of Neck Growth in Electron Beam Powder Bed Fusion (EB-PBF) Process of Ti6Al4V Powders under Different Processing Conditions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 123(3/4): 855-873.
- [34] LI Y, KAN W B, ZHANG Y M, et al. Microstructure, Mechanical Properties and Strengthening Mechanisms of In738lc Alloy Produced by Electron Beam Selective Melting[J]. Additive Manufacturing, 2021, 47: 102371.
- [35] LI Y, LIANG X Y, YU Y F, et al. Microstructures and Mechanical Properties Evolution of In939 Alloy during Electron Beam Selective Melting Process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 883: 160934.
- [36] ESCHEY C, LUTZMANN S, ZAEH M F. Examination of the Powder Spreading Effect in Electron Beam Melting (EBM)[C]// 2009 International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2009: 308-319.
- [37] YE J, RENNER J, KÖRNER C, et al. Electron-Optical Observation of Smoke Evolution during Electron Beam Powder Bed Fusion[J]. Additive Manufacturing, 2023, 70: 103578.
- [38] LJUNGBLAD U. History and Future of EBM[C]// 1st International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing EBAM, Germany, 2016.
- [39] ACKELID U. Preheating of Powder Bed: Swedish Patent WO2021SE50352[P]. 2021-10-21.
- [40] JEOL. Jam-5200ebm Electron Beam Metal Am Machine[M]. Tokyo: JEOL Web, 2022.
- [41] SJÖSTRÖM W, KOPTYUG A, RÄNNAR L E, et al. Near-Infrared Radiation: A Promising Heating Method for Powder Bed Fusion[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2023(3): 1-9.
- [42] GUO C, GE W, LIN F. Dual-Material Electron Beam Selective Melting: Hardware Development and Validation Studies[J]. Engineering, 2015, 1(1): 124-130.
- [43] FU Z W, YE J H, FRANKE M, et al. A Novel Approach for Powder Bed-Based Additive Manufacturing of Compositionally Graded Composites[J]. Additive Manufacturing, 2022, 56: 102916.
- [44] 林峰,周斌,闫文韬,等.电子束选区熔化与电子束切 割复合的增材制造装备:中国,CN201710047601.1[P].
 2017-01-22.

LIN Feng, ZHOU Bin, YAN Wen-tao, et al. Additive Manufacturing Equipment for Electron Beam Selective Melting and Electron Beam Cutting Composite: China, CN201710047601.1[P]. 2017-01-22.

- [45] 李宏新,林峰. 用于电子束增减材技术的电子束气化切 割工艺研究[J]. 电加工与模具, 2022(5): 53-57.
 LI Hong-xin, LIN Feng. The Study of Electron Beam Evaporation Cutting Process for Electron Beam Additive and Subtractive Hybrid Manufacturing[J]. Electromachining & Mould, 2022(5): 53-57.
- [46] QBEAM. Qbeam G350[EB/OL]. (2022)[2023-08-22]. https://www.qbeam-3d.com/page/926.
- [47] 李宏新,周斌,林峰. 电子束与激光复合选区熔化系统的开发[J]. 电加工与模具, 2018(S1): 59-63.

LI Hong-xin, ZHOU Bin, LIN Feng. The Development of Electron Beam and Laser Hybrid Selective Melting Equipment[J]. Electromachining & Mould, 2018(S1): 59-63.

- [48] ZHOU B, ZHOU J, LI H X, et al. A Study of the Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Fabricated by Slm under Vacuum[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 724: 1-10.
- [49] HAO M H, ZHANG L, ZHOU B, et al. Performance of Ti6Al4V Fabricated by Electron Beam and Laser Hybrid Preheating and Selective Melting Strategy[J]. China Foundry, 2021, 18: 351-359.
- [50] 周斌. 电子束-激光复合选区熔化系统的开发及复合工 艺研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
 ZHOU Bin. Development of Electron Beam-Laser Hybrid Selective Melting System and Research on Process[D].
 Beijing: Tsinghua University, 2018.

责任编辑:蒋红晨