

特约专栏

粉末床电子束 3D 打印 Ti-6Al-4V 合金的工程应用技术研究进展

汤慧萍

(西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016)

摘要: 电子束选区熔化(selective electron beam melting, SEBM)是 20 世纪 90 年代初期发展起来的一类金属 3D 打印工艺, 具有能量利用率高、成形效率高和成形应力低的突出优点, 并且是在真空环境中成形, 特别适用于高熔点、高活性、脆性金属材料复杂构件的高质量制造。由于其是一种粉末床熔融型 3D 打印工艺, 通常也称之为粉末床电子束 3D 打印技术。从粉末床电子束 3D 打印的粉末原料、组织与性能、复杂构件的成形能力和工程应用等方面, 介绍了作者团队 10 多年来在粉末床电子束 3D 打印稀有金属材料方面的工作积累, 重点介绍了粉末床电子束 3D 打印 Ti-6Al-4V 合金的研究进展, 最后结合 3D 打印技术整体发展趋势对粉末床电子束 3D 打印技术的发展前景和重点发展方向进行了展望。

关键词: 电子束选区熔化; 成形能力; Ti-6Al-4V; 组织与性能

中图分类号: TG146. 23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)07-0551-07

Research Progress on Engineering Application of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Selective Electron Beam Melting Process

TANG Huiping

(State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Selective electron beam melting (SEBM) is an additive manufacturing technology developed from early 1990s, which has the outstanding advantages of high energy utilization, high build efficiency, low residual stress and vacuum protection. It is suitable for the fabrication of complex components with high melting point, high activity and brittle metal materials. As a kind of powder-bed 3D printing technology, SEBM is also commonly referred as powder-bed electron beam 3D printing technology. In this paper, from the following aspects of SEBM technology, including raw materials, microstructure and mechanical properties, formability and engineering application of complicated components, the work of author's team on SEBM-ed rare metal materials over 10 years was reviewed. Especially, the research progress on SEBM-ed Ti-6Al-4V alloy was introduced on emphasis. Finally, based on the overall development tendency of 3D printing technology, the future prospects and development direction of SEBM technology were forecasted.

Key words: selective electron beam melting; formability; Ti-6Al-4V; microstructure and properties

1 前言

周廉院士是国际知名的材料研究和战略专家, 是西北有色金属研究院(以下简称“西北有色院”)老一辈科技

工作者的杰出代表。粉末冶金是西北有色院建院之初就确定重点发展的方向之一, 周院士十分重视西北有色院粉末冶金事业的发展。20 世纪 90 年代初, 他就站在全球新材料技术和产业发展的高度, 多次鼓励作者及其他青年科技工作者立足西北有色院在稀有金属材料领域的特色和优势, 锐意创新, 丰富和发展稀有金属材料粉末冶金技术。

正是在周院士的关心和支持下, 西北有色院的粉末冶金研究实力逐渐增强、产业不断壮大, 成立了金属多孔材料国家重点实验室(以下简称“重点实验室”)。重点

收稿日期: 2020-06-24 修回日期: 2020-07-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1101403); 广东省重点研发计划项目(2018B090906003)

作者简介: 汤慧萍, 女, 1966 年生, 教授, 博士生导师,

Email: hptang@c-nin.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202006031

实验室在粉末冶金稀有难熔金属材料、烧结金属多孔材料、稀有金属粉末制备和粉末床电子束 3D 打印技术 4 个方面形成了鲜明特色,并在这些领域先后主持获得了 3 项国家科学技术奖,7 项省部级科学技术一等奖。此外,在周院士倡导的“三位一体”发展模式带动下,重点实验室通过科技成果转化孵化出了 3 个高新技术企业,研制开发的煤气化用金属多孔元件、金属纤维及其制品、微孔金属膜材料、球形稀有金属粉末、粉末床电子束 3D 打印装备与制品等在国民经济发展和国防建设中得到了大量应用,取得了显著的经济和社会效益。

周院士高度关注目前正在蓬勃发展的 3D 打印技术,对作者团队从事的粉末床电子束 3D 打印技术,给予了大量无私的指导和支持。值此周廉院士 80 寿辰之际,结合作者 10 多年来在粉末床电子束 3D 打印技术方面的所思、所想和所做,特成此文。系统介绍作者团队近年来在粉末床电子束 3D 打印稀有金属材料方面的工作,特别是在粉末床电子束 3D 打印 Ti-6Al-4V 合金工程应用方面的进展。旨在一是向周廉院士等老一辈科技工作者的高瞻远瞩和对年轻人锐意创新的鼓励表达崇敬之情;二是,为更广范围的科技工作者提供参考,以共同推进我国 3D 打印技术的发展和工程应用的进步。

2 电子束选区熔化(SEBM)技术的基本原理

粉末床电子束 3D 打印,即 SEBM,是 20 世纪 90 年代初期发展起来的一种粉末床熔融型 3D 打印技术^[1],其工作原理如图 1 所示。首先,将待加工零件的三维模型按照一定厚度进行切片处理,得到三维零件的所有二维截面信息;在真空室内,以聚焦电子束为热源,在电磁偏转线圈的作用下,由计算机控制电子束逐点扫描零件截面区域内的金属粉末,使其实现熔化融合,而未被熔化的金属粉末仍松散堆积;完成一层加工后,工作台下降一个层厚的高度,再进行下一层铺粉和熔化,同时

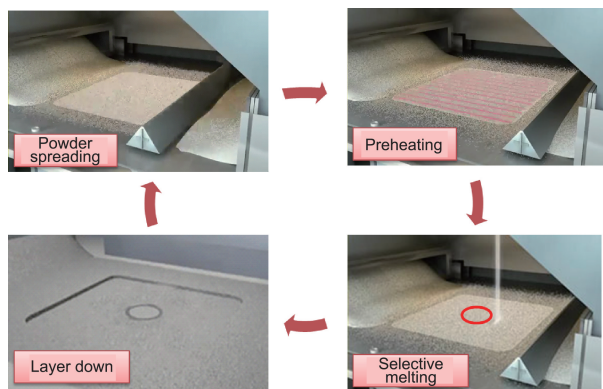


图 1 SEBM 技术的原理图

Fig. 1 Schematic illustration of SEBM technology

新熔化层与前一层熔合为一体;重复上述过程直至完成所有二维截面的扫描熔合,待零件冷却后从真空室中取出,在粉末回收系统中用高压空气吹掉松散粉末,得到三维零件,回收的粉末过筛后可继续使用。

3 Ti-6Al-4V 复杂构件的 SEBM 成形工程化技术

自 1995 年美国麻省理工学院 Dave 等^[2]提出利用电子束作为能量源将金属熔化以进行三维制造的设想以来,经过 20 余年的研究和发展,SEBM 技术和装备实现了商业化,并且开发出了成熟的 Ti-6Al-4V 合金成形工艺包,实现了 Ti-6Al-4V 复杂构件的打印成形。然而,对于 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金的组织性能均匀稳定调控、粉末极限循环利用次数以及精细点阵结构成形能力评价等方面的研究还不够深入,极大地限制了该技术的应用和发展。为此,作者团队为推进 SEBM 技术在复杂构件中的应用,重点进行了以下几个方面的研究。

3.1 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金的组织形成机制与均匀化调控方法

Ti-6Al-4V 合金是 1954 年美国研发的军用钛合金,因其高的比强度以及优异的可加工性、耐腐蚀性和生物相容性,在航空航天和生物医疗领域中得到了广泛应用。据统计,Ti-6Al-4V 合金在这两个领域中的使用量占据了全部钛合金用量的 50% 以上^[3]。然而,由于 SEBM 技术的热物理过程与传统技术存在巨大差异,研究人员对 SEBM 技术成形材料的组织性能特点还未形成统一认识,给其工程应用带来了极大挑战。

作者团队系统研究了 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金过程中的固态相变行为和微观组织演化,发现其典型组织由沿竖直方向贯穿多个层厚度的柱状原始 β 晶粒、晶内针状马氏体 α' 以及层片状 $\alpha+\beta$ 组织或跨晶界的块状 α_m 组成。在成形过程中,无扩散的马氏体相变、短程扩散的块状相变和长程扩散型相变均可发生。沉积态中微观组织的演变过程为 $L(\text{液态}) \rightarrow \beta \rightarrow \alpha' + \alpha + \beta \rightarrow \beta \rightarrow \alpha' + \alpha_m + (\alpha + \beta)$ 。当扫描熔化当前层厚后,微小熔池快速凝固保留高温 β 相,随即发生马氏体相变,在粉床预热过程中分解为片状 α 。在随后的层层沉积过程中,熔化潜热使以上组织重新进入 β 相区,后经长程扩散型相变(包括马氏体分解)转变为由 $\alpha+\beta$ 组成的经典网篮组织或魏氏组织,或经短程扩散相变转变为块状组织^[4],如图 2 所示。

采用 SEBM 技术成形较大尺寸 Ti-6Al-4V 合金构件时,由于粉末床在高度方向上存在自上而下的温度梯度,导致构件几何形态对其显微组织存在显著影响,造成 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金的微观组织、缺陷分布以及力学性能,与锻件相比存在巨大的不均匀性和不一致性^[5,6],如图 3 所示。

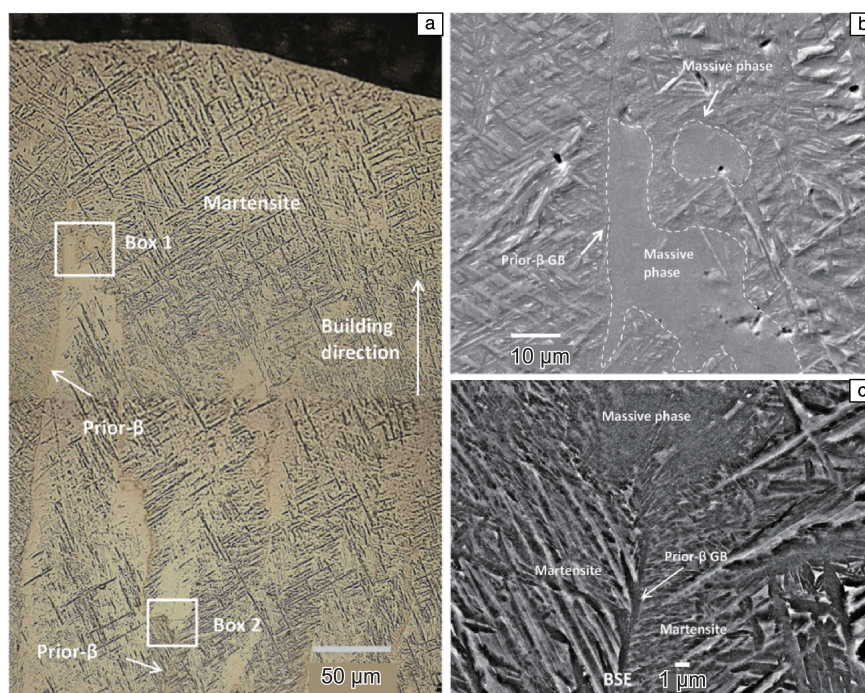


图 2 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金的典型微观组织^[4]：(a) 表层形貌的光学显微照片，图 2a 中区域 1(b) 和区域 2(c) 的 SEM 照片

Fig. 2 Typical microstructure of Ti-6Al-4V alloy fabricated by SEBM technology^[4]：(a) metallograph of top-layer, SEM images of box 1 (b) and box 2 (c) in fig. 2a

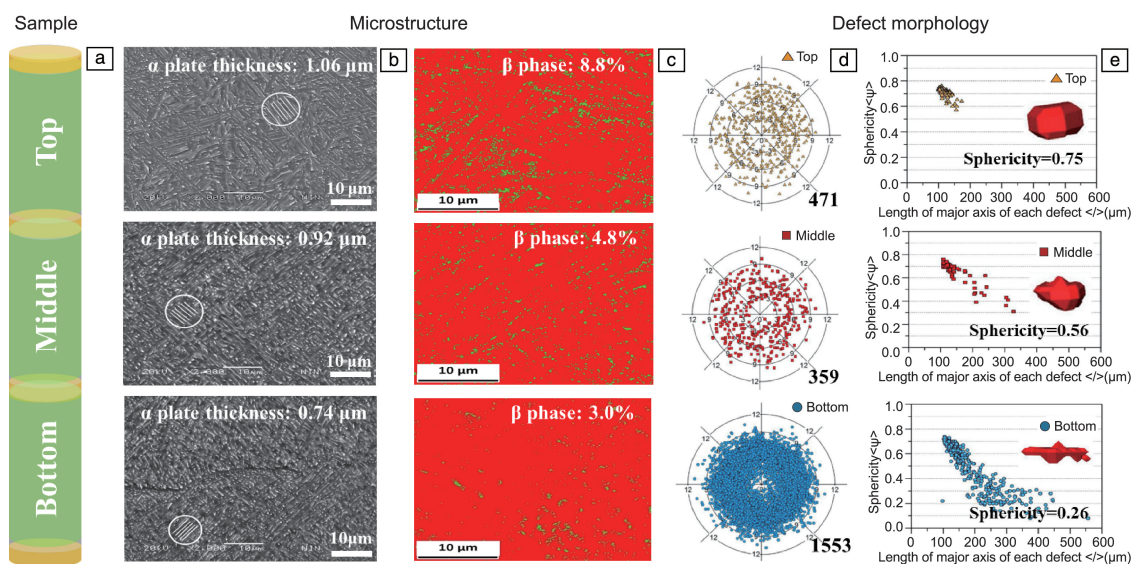


图 3 SEBM 技术成形的 Ti-6Al-4V 长棒材(样品尺寸： $\Phi 12\text{ mm} \times 300\text{ mm}$)^[5, 6]：(a) 取样示意图(黄色部分用于微观组织分析，绿色部分用于缺陷检测)；(b) 不同位置的 SEM 照片；(c) EBSD 表征的相分布图(红色代表 α 相，绿色代表 β 相)；(d) Micro CT 分析得到的缺陷数量与分布；(e) 缺陷形貌特征

Fig. 3 Ti-6Al-4V long rod fabricated by SEBM technology (sample size： $\Phi 12\text{ mm} \times 300\text{ mm}$)^[5, 6]：(a) sampling diagram (The yellow segments are for microstructure analysis, and the green segments are for defects detection)；(b) SEM images of different segments；(c) EBSD maps of phase distribution (Red color represents α phase, and green color represents β phase)；(d) the number and distribution of defects analyzed by Micro CT；(e) defect morphology characteristics

为了改善 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金大尺寸构件的微观组织均匀性，降低其不同部位的力学性能偏差，在

系统研究大尺寸棒材、板材微观组织特征及后处理工艺的基础上，作者团队提出了基于热等静压处理进行组织性能

调控的学术思想,采用 SEBM 技术成形了工程用 Ti-6Al-4V 复杂构件^[7, 8]。结果表明,在 920 ℃ 的温度和 100 MPa 的压力下经过简单的无包套热等静压处理 120 min 后,SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金的综合力学性能全面达到并部分超过锻件国家标准要求,并且力学性能的一致性偏差

(RSD)由 21.7%降低至 4.1%,如表 1 所示^[6]。基于上述系统深入的研究,作者团队主持制定了粉床电子束增材制造 Ti-6Al-4V 合金材料的国家标准(GB/T 34508-2017),为其工程应用奠定了坚实的理论基础。

表 1 热等静压处理前后粉末床电子束 3D 打印 Ti-6Al-4V 合金的室温拉伸力学性能^[6]

Table 1 Tensile mechanical properties at room temperature of SEBM-ed Ti-6Al-4V alloy before and after hot isostatic pressing(HIP) ^[6]					
Sample	Location	Yield strength/MPa	Ultimate strength/MPa	Elongation/%	Reduction in area/%
As-built	Top	903.6±24.6	991.8±21.7	16.4±0.8	51.4±2.4
	Middle	928.7±13.3	1011.7±14.8	13.6±1.4	38.9±2.8
	Bottom	911.9±34.3	995.5±28.5	13.5±0.4	33.9±1.5
	RSD	1.4%	1.1%	11.7%	21.7%
HIP	Top	800.1±12.1	909.4±2.4	16.7±0.8	55.8±3.0
	Middle	813.3±14.3	908.8±3.2	17.7±0.9	52.0±1.9
	Bottom	813.9±16.2	910.6±4.2	16.6±0.8	51.9±2.5
	RSD	1.0%	0.1%	3.5%	4.1%
ASTM F3001-14		≥795.0	≥860.0	≥10.0	≥25.0

3.2 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金的粉末循环使用极限

粉末循环利用对 SEBM 技术成形过程和构件性能具有重要影响,是降低 SEBM 技术制造成本的有效途径。长期以来,困扰 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金工程应用的另一关键是对粉末循环利用次数缺乏认知,生产中粉末只能单次使用,这造成构件制造成本居高不下,如何通过粉末循环利用降低成本,是加快 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 钛合金工程应用的关键。

通过对上百次生产的跟踪研究发现,随着 Ti-6Al-4V 合金粉末循环利用次数的增加,粉末的形貌、流动性、松装密度等物理特性虽有变化(如表 2 所示),但对成形过程基本无影响;然而,随着循环利用次数的增加,粉末的化学成分特别是 O 含量变化显著(如表 3 所示),据此得到 Ti-6Al-4V ELI 和 Ti-6Al-4V 合金粉末的循环使用

表 2 不同循环次数的 Ti-6Al-4V 合金粉末的物理特性^[7]

Table 2 Physical characteristics of Ti-6Al-4V alloy powders with different reuse times ^[7]			
Reuse times	Flowability /(s·50 g ⁻¹)	Apparent density /(g·cm ⁻³)	Tap density /(g·cm ⁻³)
0	32.47	2.56	2.96
6	29.50	—	—
11	29.50	2.58	2.94
16	27.85	2.59	2.91
21	28.34	2.57	2.88

表 3 不同循环次数的 Ti-6Al-4V 合金粉末和以其 SEBM 成形的样品的化学成分^[7]

Table 3 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy powders with different reuse times and SEBM-ed samples with these powders(ω /%) ^[7]						
Reuse times	O		Al		V	
	Powder	Sample	Powder	Sample	Powder	Sample
0	0.08	0.07	6.47	6.14	4.08	4.04
6	0.14	0.13	6.37	6.06	4.05	4.02
11	0.17	0.15	6.36	5.90	4.05	4.01
16	0.18	0.17	6.35	5.86	4.04	3.95
21	0.19	0.18	6.35	5.93	4.03	3.96

极限分别为 4 次和 21 次^[7, 9]。在粉末多次循环使用过程中,随着粉末 O 含量的增加,SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金的屈服强度和抗拉强度有所增加,但对其塑性影响较小,如表 4 所示^[7]。

3.3 SEBM 技术打印精细结构的成形能力

除直接成形复杂、致密构件外,SEBM 技术在直接成形薄壁、镂空以及复杂精密点阵、蜂窝构件方面同样具有巨大的发展潜力^[10]。然而,目前研究人员对 SEBM 技术制备复杂精密结构的成形能力缺乏认知,生产中存在设计盲目、成品率低的突出问题。

作者团队经过系统研究 SEBM 技术成形精细结构单元的几何拓扑结构对其冶金质量、微观组织以及力学性能的影响后,提出了以层间搭接率评判 SEBM 技术成形

表 4 以不同循环次数的粉末 SEBM 成形的 Ti-6Al-4V 合金样品的力学性能^[7]Table 4 Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy samples fabricated by SEBM technology with powders of different reuse times^[7]

Reuse times	O content /wt%	Yield strength /MPa	Ultimate tensile strength/MPa	Tensile elongation/%	Reduction in area/%	Density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
0	0.080	834.0±10.0	920.0±10.0	16.0±0.3	54±3.0	4.410±0.004
2	0.097	870.0±8.0	970.0±10.0	15.0±0.3	46±3.0	4.410±0.004
6	0.140	822.0±25.0	910.0±20.0	13.5±1.0	53±4.0	4.411±0.004
11	0.170	891.5±4.5	986.5±3.5	17.8±0.8	50±1.0	4.428±0.003
16	0.180	939.6±3.6	1028.1±4.1	15.3±1.8	42±4.1	4.380±0.018
21	0.190	960.0±30.0	1039.3±2.7	15.5±0.9	—	4.381±0.019

精细结构能力的学术思想，建立了层间搭接率与杆系几何结构之间关系的数学模型和粉末床电子束 3D 打印精细结构成形能力的判据(如式(1)和图 4 所示)^[11, 12]。

$$\varphi = \frac{L}{d/\sin\theta} = 1 - \frac{h}{d} \cos\theta \quad (1)$$

其中， φ 为层间搭接率， L 为两层之间的搭接长度， d 为细长杆直径， θ 为倾斜角， h 为分层厚度。当层间搭接率 $\varphi \geq 0.9$ 时，则可实现孔筋的连续成形。

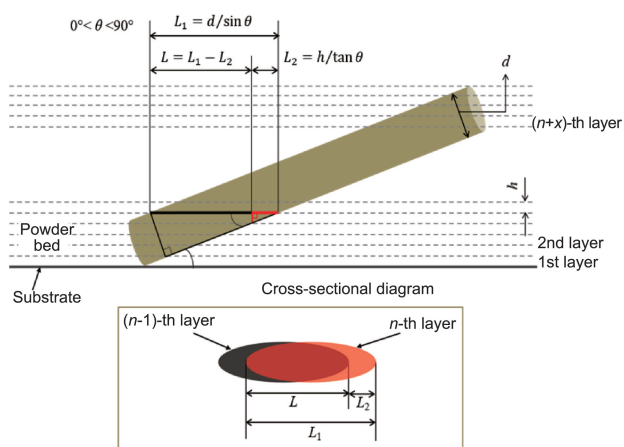


图 4 以层间搭接率评判 SEBM 技术成形复杂精密结构能力的示意图^[12]

Fig. 4 Schematic diagram of using interlayer lap rate judging the ability of SEBM technology preparing complicated and precise structure^[12]

围绕 SEBM 技术打印精细结构的工程应用需求，作者团队设计开发的 3500 余件点阵结构医疗植入体在临床得到成功应用，研制的航空发动机用钛合金蜂窝离心通风机通过地面考核，受到金属 3D 打印行业权威杂志 *Metal AM* 的关注，主持制定的增材制造 Ti-6Al-4V 钛合金蜂窝结构零件的有色行业标准(YS/T 1139-2016)已颁布实施。在以上研究和工程实践的基础上，作者团队建立了 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金复杂构件的工程体系，15 年来累计为我国航空航天、兵器、生物医疗等领域提供了超过 10 000 件的 Ti-6Al-4V 复杂构件，部分产品如图 5 所示。



图 5 SEBM 技术制备的 Ti-6Al-4V 复杂构件

Fig. 5 Complicated Ti-6Al-4V components produced by SEBM technology

以 SEBM 技术成形 Ti-6Al-4V 合金工程化应用的成功为范例，作者团队先后开发出了面向脆性、难熔金属材料的随形热处理技术以及专用扫描策略^[13, 14]，实现了 TiAl 金属间化合物^[15-19]和高熔点金属钼^[20]、钨^[21-23]、钼、铌及其合金复杂结构的高效制备。在科技部首批重点研发计划项目的支持下，为满足个性化多孔钼植入体的市场需求，作者团队建立了完善的基于 SEBM 技术的个性化多孔钼植入体制备的全流程工艺体系，实现了多孔钼孔隙率在 65%~95% 范围内的任意调控，化学成分满足医疗行业标准《外科植入物金属材料纯钼》(YYT0966-2014)的要求^[20]，部分构件如图 6 所示^[24]。

2018 年 5 月，作者团队与陆军军医大学西南医院联

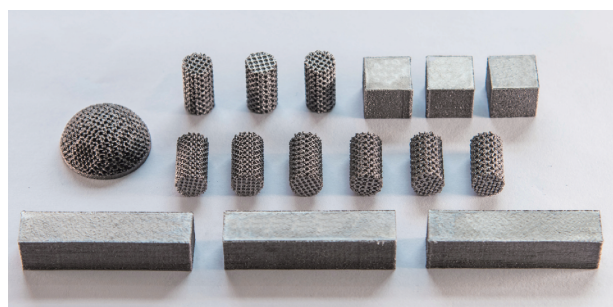


图 6 SEBM 技术制备的金属钼及多孔钼构件^[24]

Fig. 6 Tantalum and porous tantalum components produced by SEBM technology^[24]

合完成了全球首例 SEBM 技术制备的个性化多孔钽植入体的临床应用。截止 2020 年 6 月, 已完成 40 余例个性化多孔钽植入体的临床应用, 部分植入体如图 7 所示。

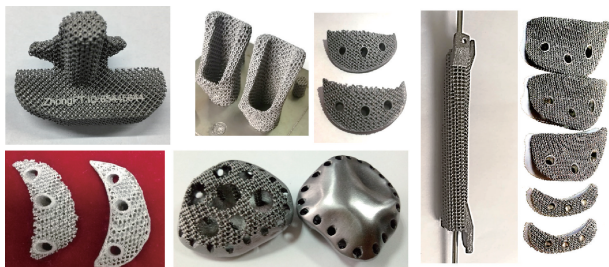


图 7 SEBM 技术制备的个性化多孔钽植入体

Fig. 7 Custom-made porous tantalum implants produced by SEBM technology

4 结 语

正如周廉院士在中国工程院“中国 3D 打印材料及应用发展战略研究”咨询项目总结会中提到的: 经过多年发展, 我国 3D 打印技术在高性能复杂构件制造等领域已达到国际先进水平, 成功研制的多种 3D 打印技术、装备及产品已经在航空、航天、汽车、生物医疗等领域逐步得到推广和应用。

SEBM 技术作为金属 3D 打印技术的重要分支, 其成形稀有难熔金属材料复杂构件的能力已被公众所认知、接受, 并在航空、航天以及生物医疗等领域取得了成功应用。然而, SEBM 技术在材料、装备以及应用等方面还有待深入研究, 故其未来发展重点主要集中在以下几个方面: ① 材料方面: 利用 SEBM 技术成形过程中熔池温度场循环变化的特点, 实现颗粒强化复合材料、单晶高温合金以及难熔金属间化合物等多种材料的组织控制和性能提升。② 装备方面: 开发束斑直径在 100 μm 以下的电子枪和控制系统; 研究成形质量在线监控技术, 实现 SEBM 工艺的闭环控制; 发展多束耦合装备, 突破 SEBM 工艺对成形尺寸的限制。③ 应用方面: 进一步降低 SEBM 技术成形构件的生产成本, 拓展其应用领域。

参考文献 References

- [1] 汤慧萍, 王建, 逯圣路, 等. 中国材料进展[J], 2015, 34(3): 225-235.
TANG H P, WANG J, LU S L, *et al.* Materials China[J], 2015, 34(3): 225-235.
- [2] DAVE V R, MATZ J E, EAGAR T W. Electron Beam Solid Freeform Fabrication of Metal Parts[C]// Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: University of Texas, 1995: 64-71.
- [3] POLMEAR I, STJOHN D, NIE J F, *et al.* The Light Metals[M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [4] LU S L, QIAN M, TANG H P, *et al.* Acta Materialia[J], 2016, 104: 303-311.
- [5] ELAMBASSERIL J, LU S L, NING Y P, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2019, 761: 138031.
- [6] LU S L, TANG H P, NING Y P, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2015, 46(9): 3824-3834.
- [7] TANG H P, WANG J, SONG C N, *et al.* JOM[J], 2017, 69(3): 466-471.
- [8] WANG J, TANG H P, YANG K, *et al.* JOM[J], 2018, 70(5): 638-643.
- [9] TANG H P, QIAN M, LIU N, *et al.* JOM[J], 2015, 67(3): 555-563.
- [10] ZHANG X Z, LEARY M, TANG H P, *et al.* Current Opinion in Solid State and Materials Science[J], 2018, 22(3): 75-99.
- [11] ZHANG X Z, TANG H P, LEARY M, *et al.* JOM[J], 2018, 70(9): 1870-1876.
- [12] 张学哲. 电子束选区熔化 Ti-6Al-4V 点阵材料成形能力及性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
ZHANG X Z. Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Lattice Materials by Selective Electron Beam Melting: Manufacturability and Properties [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [13] 贾文鹏, 汤慧萍, 刘海彦, 等. 一种可进行随形退火热处理的金属零件制造工艺: CN101417338[P]. 2009-04-29.
JIA W P, TANG H P, LIU H Y, *et al.* Manufacturing Process of Metal Parts Capable of Performing Shape Follow-Up Annealing Heat Treatment: CN101417338[P]. 2009-04-29.
- [14] 杨广宇, 贾亮, 刘楠, 等. 一种多孔钨材料的电子束分区扫描成形方法: CN109261967A[P]. 2019-01-25.
YANG G Y, JIA L, LIU N, *et al.* An Electron Beam Partition Scanning Forming Method for a Porous Tungsten Material: CN109261967A[P]. 2019-01-25.
- [15] 刘楠, 杨坤, 王建, 等. 一种 TiAl 合金涡轮叶片的制备方法: CN107931609A[P]. 2018-04-20.
LIU N, YANG K, WANG J, *et al.* A Preparing Method of a TiAl Alloy Turbine Blade: CN107931609A[P]. 2018-04-20.
- [16] 杨坤, 王建, 杨广宇, 等. 基于电子束 3D 打印技术制备 TiAl 合金构件的方法: CN107695350B[P]. 2019-08-30.
YANG K, WANG J, YANG G Y, *et al.* TiAl Alloy Component Preparing Method Based on Electron Beam 3D Printing Technology: CN107695350B[P]. 2019-08-30.
- [17] LU S L, TANG H P, QIAN M, *et al.* Journal of Central South University[J], 2015, 22(8): 2857-2863.
- [18] YANG G Y, JIA W P, ZHAO P, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2016, 45(7): 1683-1686.
- [19] WANG J, YANG K, LIU N, *et al.* JOM[J], 2017, 69(12): 2751-2755.
- [20] TANG H P, YANG K, JIA L, *et al.* JOM[J], 2020, 72(3):

1016-1021.

[21] YANG G Y, YANG P W, YANG K, *et al.* International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2019, 84: 105040.

[22] 杨广宇, 陈靖海, 刘楠, 等. 材料热处理学报[J], 2019, 40(9): 77-82.

YANG G Y, CHEN J H, LIU N, *et al.* Transactions of Materials and Heat Treatment[J], 2019, 40(9): 77-82.

[23] 杨广宇, 杨鹏伟, 刘楠, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2019, 48

(8): 2580-2584.

YANG G Y, YANG P W, LIU N, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2019, 48(8): 2580-2584.

[24] 杨坤, 汤慧萍, 李元元. 功能材料[J], 2020, 51(3): 3038-3046.

YANG K, TANG H P, LI Y Y. Journal of Functional Materials[J], 2020, 51(3): 3038-3046.

(编辑 王 瑶)



特约撰稿人刘正东



特约撰稿人韩恩厚



特约撰稿人赵永庆



特约撰稿人顾忠伟



特约撰稿人汤慧萍



特约撰稿人许并社



特约撰稿人单智伟



特约撰稿人常 辉



特约撰稿人陈人杰

刘正东:男, 1966年生, 中国工程院院士, 中国钢研科技集团有限公司副总工程师, 钢铁研究总院首席专家。1990年于清华大学金属压力加工专业获学士学位, 2001年于不列颠哥伦比亚大学钢铁冶金专业获博士学位。长期从事超超临界火电站、核电站和核动力工程用钢及其工程应用研发, 获国家科技进步奖一等奖1项和国家科技进步奖二等奖1项(均排名第一)、省部级特等奖2项(1项排名第一)、省部级一等奖4

项(2项排名第一)等。获授权专利56件(发明专利35件), 出版专著7部, 发表论文319篇。

韩恩厚:男, 1961年生, 现任中国科学院金属研究所二级研究员、国家金属腐蚀控制工程研究中心主任、中国科学院核用材料与安全评价重点实验室主任、中科院腐蚀控制工程实验室主任、中科院沈阳分院院长、广东腐蚀科学与技术研究院院长。当选(联合国)世界腐蚀组织(WCO)主席(2016-2019)、亚太材料科学院

(APAM)院长(2017-)。1982年毕业于东北工学院(现东北大学), 1995~1998年在美国麻省理工学院材料系、等离子体中心从事研究(Research Scientist)。长期从事材料腐蚀机理、工程装备的腐蚀控制技术、装备服役安全评价技术的研究与应用。3次担任国家“973”计划项目首席科学家, 担任国家重大科技专项课题、国家重点研发计划项目、国家重点基金项目负责人。研究结果在飞机、管道、核电站、电网、船舶、汽车、

航天系列型号、大型运载火箭中规模应用。以第一完成人获国家技术发明和科技进步二等奖3项、省部级一等奖5项。发表论文500余篇, 被他人引用1.5万余次, 授权发明专利120余件(含国际3件, 已经转让20余件), 合著、编译著作9部, 国外大会报告和邀请报告70余次、国内60余次。获惠特尼(Whitney)奖(材料腐蚀领域国际个人最高奖, 70余年来首位华人获奖者)、何梁何利科技进步奖、嫦娥四号突出贡献

奖、国务院政府津贴, 被评为“新世纪百千万人才工程”国家级人选、全国优秀科技工作者。

赵永庆:男, 1966年生, 教授、博士生导师, 西北有色金属研究院副总工程师。国家“万人计划”科技创新领军人才、“973”项目首席科学家, 国家重点领域创新团队“钛合金研制创新团队”带头人。长期从事钛合金的研发, 获国家科技进步二等奖、三等奖各1项, 省部级科技一等奖8项、二等奖12项; 创新研制钛合金30多种; 获授权发明专利81件。发表SCI收录论文300余篇; 编著《钛及钛合金金相图谱》《钛合金相变与热处理》《新型合金材料——钛合金》等专著。先后荣获全国劳动模范、“新世纪百千万人才工程”国家级人选、政府特殊津贴专家、全国优秀