钒钛材料与应用

电子束选区熔化成形方向选择对 TC4 合金性能的影响

孙宝福[1*], 陈家琪[1], 张　瑞[1,2], 莫力林[2], 黄星光[1]

(1. 桂林理工大学机械与控制工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林狮达技术股份有限公司, 广西 桂林 541004)

摘　要: 采用电子束选区熔化针对不同成形方向进行打印, 利用扫描电子显微镜(SEM)和金相显微镜(OM)研究了电子束选区熔化成形 Ti-6Al-4V 合金的组织特征, 获得了成形后 Ti-6Al-4V 合金力学性能, 揭示了成形方向选择对力学性能的影响规律。结果表明: 横向打印产品材料抗拉强度能够达到 986 MPa、屈服强度能够到达 880 MPa、延伸率能够到达 11.2%, 明显优于纵向打印产品材料的性能; 横向打印材料在打印过程中冷却速度较快, β 相先转化成 α′马氏体, 最后分解为 α+β 相组成的网篮组织; 纵向打印材料在打印过程中材料被反复加热, 最终形成魏氏组织(过热组织)。

关键词: Ti-6Al-4V; 3D 打印; 电子束选区熔化; 成形方向; 组织; 力学性能

中图分类号: TF823, TF124.3　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004−7638(2021)02−0043−05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.02.008　　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):**

听语音 聊科研 与作者互动

Influence of forming direction on properties of TC4 alloy during electron beam selective melting

Sun Baofu[1*], Chen Jiaqi[1], Zhang Rui[1,2], Mo Lilin[2], Huang Xingguang[1]

(1. College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;
2. Guilin Shida Technology Co., Ltd., Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: Electron beam selective melting was used to print in different forming directions. Scanning electron microscope (SEM) and metallographic microscope (OM) were used to study the microstructure characteristics of Ti-6Al-4V alloy formed by electron beam selective melting. The mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy after forming were obtained, and the influence of forming direction on mechanical properties of the alloy was revealed. The results show that the tensile strength, yield strength and elongation of the transverse printing products can reach 986 MPa, 880 MPa and 11.2% respectively, which are obviously better than those of the vertical printing products. The materials cool down faster in the transverse printing process, and the phase is transformed from β to α′ martensite and then decomposed into microstructure consisting of α+β phases. The materials are heated repeatedly during the vertical printing process, resulting in Widmanstaten structure (superheated structure).

Key words: Ti-6Al-4V, 3D printing, electron beam selective melting, forming direction, microstructure, mechanical properties

收稿日期: 2021−01−20

基金项目: 桂林理工大学大学生创新创业训练计划项目 。

作者简介: 陈家琪 (1998—), 男, 江苏宿迁人, 汉族, 硕士, 主要研究方向: 电子束 3D 打印成形性能研究, E-mail: 1193955269@qq.com。　*通讯作者: 孙宝福 (1970—), 男, 山东枣庄人, 副教授, 主要研究方向: 材料塑性成形, 金属增材制造工艺与性能, E-mail: 1204605467@qq.com。

0　引言

电子束选区熔化增材制造技术(EBSM)是最近几年发展起来的新型金属 3D 打印技术，利用电子束有选择性的熔化金属粉末来实现三维实体零件的制造。它将电子束热量密度高、能量利用率高、加工速度快、成形过程无污染的特点[1]，与快速成形技术结合起来，在人体植入物、航空航天小批量零件、医疗器械等快速制造方面具有独特的优势[2]。

电子束选区熔化技术使用电子束作为能量源对金属粉末进行加热熔化，在制造过程中相当于对材料进行了一次热处理，在加工过程中选择不同的成形方向会改变电子束对每层粉末进行的扫描时间，这意味着选择不同的成形方向会对产品材料性能产生影响。有研究者认为电子束选区熔化过程中选择不同成形角度打印出产品的金相组织含量有明显差异，且打印出产品内部不同方向含有的金相组织也不尽相同[3−4]。然而目前专门对不同成形方向打印出产品性能的研究很少。

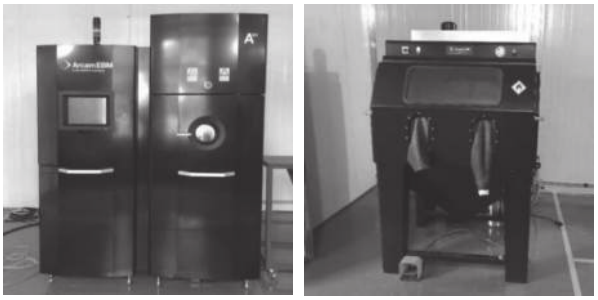
为此，笔者针对 Ti-6Al-4V 粉末的 EBSM 技术进行工艺研究，探讨 TC4 合金粉末在合适的工艺参数下，选择不同成形方向打印出产品材料的性能研究。

1　试验设备、材料及方法

1.1　试验设备及原理

本次试验采用的是瑞典 Arcam 公司开发设计的 Arcam A2X 型电子束选区熔化成形试验设备(如图 1 所示)。设备分为两个机柜，左侧为控制柜，包含计算机(用作图形用户界面)、PLC 及其他电子设备(包括高压电源)、控制柜顶部的警报塔(用于指示系统的当前状态)；右侧为室柜，包含真空室、真空系统和电子束单元。该设备最大加工尺寸为 200 mm×200 mm×380 mm；电子束功率范围在 50 ~ 3 000 W 内连续可调；电子束最大扫描速度为 8 000 m/s。

EBSM 设备原理如图 2 所示，主要部件为上部的灯丝，电流对其加热，再加上高压，产生电场，电子向阳极运动，经像散线圈、聚焦线圈、偏转线圈，形成高能量密度电子束，向下部真空室发射，对金属粉末进行扫描；下部是一个真空室，左侧粉仓用来存储金属粉末，铺粉器用来铺设粉末，电子束会对铺设在成形平台上的金属粉末进行扫描成形，成形过程是由下而上，成形平台在成形缸中不断下降，最终打印成形。



(a) Arcam A2X 型 EBSM 试验设备　　(b) 吹粉设备

图 1　Arcam A2X 3D 打印机
Fig. 1　Arcam A2X 3D printer

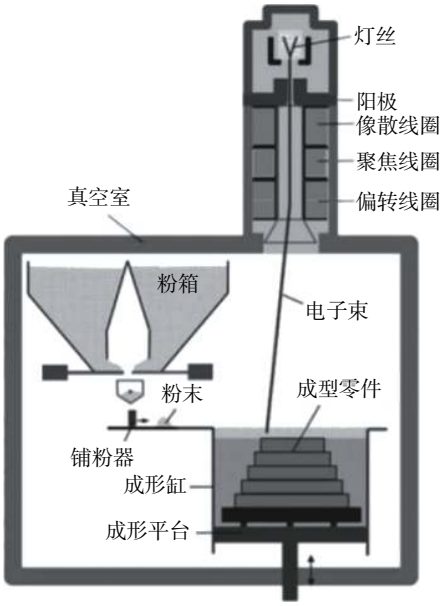


图 2　EBSM 设备原理
Fig. 2　EBSM equipment schematic diagram

1.2　试验材料

钛及其合金凭借着低密度、高强度、低重量比和出色的高温耐腐蚀性、优异的焊接性能、生物兼容性能，使其成功应用于需要高可靠性能的行业，如医药以及航空航天、汽车、化工等产业[5−6]。在大多数工程应用中，钛及其合金替代更重、更少维修或更具成本效益的产品材料。同时，因为钛合金的性能变化范围较大，所以能够适应不同的工作环境[7]。

试验采用 Ti-6Al-4V ELI (外科植入物用)钛合金粉末(如图 3 所示)，由瑞典 Arcam AB 公司生产，是一种气体雾化粉末，粉末的粒度规格为 45 ~ 100 μm[8]，形状呈完美球形。

Ti-6Al-4V ELI 金属粉末化学成分如表 1 所示。

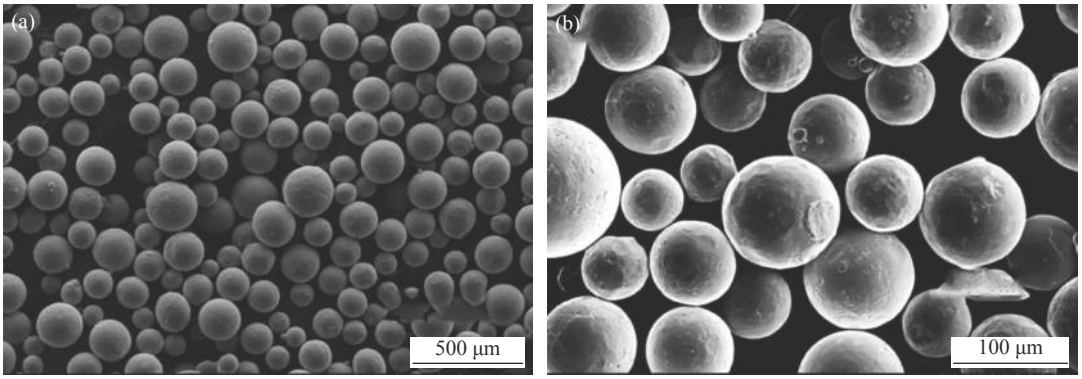


图 3　Ti-6Al-4V ELI 粉末形貌
Fig. 3　Morphology of Ti-6Al-4V ELI powder

表 1　Ti-6Al-4V ELI 粉末化学成分
Table 1　Chemical compositions of Ti-6Al-4V ELI powder

%

Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
6	4	0.03	0.1	0.1	0.01	0.003	Balance

1.3　工艺参数

利用 Solid works 三维制图软件建立 TC4 钛合金拉力棒模型, 加工试样尺寸如图 4 所示。利用电子束选区熔化设备 Arcam A2X 对 TC4 粉末扫描和熔化, 选择不同成形方向分别制备出垂直于基板(横向 H 组)和平行于基板(纵向 V 组)两组成形件, 打印路径为往复打印(如图 5 所示), 每组制备 3 个。成形工艺参数由 Arcam 公司提供, 如表 2 所示。

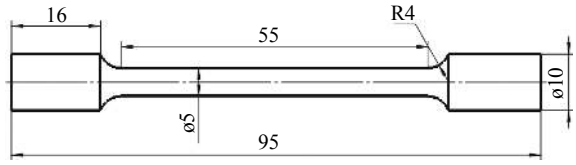


图 4　拉力棒试样加工尺寸
Fig. 4　Dimension drawing of tension bar specimen

图 5　打印路径示意
Fig. 5　Printing path diagram

表 2　试验工艺参数
Table 2　Process parameters

功率/W	速度/(mm·s^{-1})	直径/mm	扫描间距/mm
1 500	450	0.5	0.1

1.4　试验步骤

电子束加速电压为 60 kV, 聚焦电流为 25 mA (加工功率为 1 500 W), 灯丝电流为 10 A, 铺粉厚度为 0.05 mm, 用大小为 16 mA 的束流对成材板进行预热。预热时间为 25 min, 成材板的温度达到 640 ℃。对粉末进行预热, 对已经预热好的粉末层进行熔化扫描, 扫描速度为 450 mm/s。整个制备过程中, 成形仓维持在 6×10^{-2} Pa 的真空度, 然后再充入 5 ~ 8 Pa 的氦气作为保护气体, 成形过程结束后形成 1×10^{5} Pa 大气环境, 有助于零件的成形仓和成形件的快速冷却。整个增材制造过程共 15.5 h, 其中包括冷却 5.5 h。

制备完成后, 对试样进行性能检测。取 EBSM 法制备的两组拉力棒试样进行拉伸, 每种拉伸试样各取 3 根, 在同等的拉伸速率下, 获取两种不同制备工艺拉力棒试样的抗拉强度和延伸率。将试样放在 DR-SM07 超声波清洗器中分别使用酒精溶液和丙酮清洗, 用吹风机吹干作为观察拉伸断裂口的试样。金相显微组织观察试样为拉力棒试样中部截取的 3mm 厚度的圆片状试样, 使用砂纸研磨至表面光滑, 经过抛光腐蚀冲洗, 进行观察。

拉伸设备是型号为 WDW-100 型微机控制电子万能试验机。拉伸断裂口观察设备为利用 Hitachi 公司的 SEM-4800 扫描电镜。金相显微组织观察设备为徕卡显微系统贸易有限公司的 DMI8A 金相显微镜。

2　试验结果与分析

2.1　拉伸试样

EBSM 法选择不同成形方向制备出的两组(H 代表 EBSM 法横向制备的拉力棒试样, V 代表 EBSM 法纵向制备的拉力棒试样)试样外观无明显差异, 如图 6 所示。

2.2　拉伸试验分析结果

对 EBSM 法制备的拉力棒试样进行室温拉伸

性能测试，拉伸性能见表 3。

可以看出，横向试样 H 组的延伸率略高于纵向试样 V 组；EBSM 法制备的两组试样中，横向试样 H 组的抗拉强度和屈服强度都要高于纵向试样 V 组，说明横向成形样品的拉伸性能比纵向成形样品更加优异。而两种方法制备试样的拉伸强度比其相应的屈服强度略高，说明两种方法制备的样品在过了屈服点后加工硬化率（应力应变曲线的斜率）较低。

(a) H 组横向制备试样　　(b) V 组纵向制备试样

图 6　试样外观形貌

Fig. 6　Sample appearance morphology

2.3　拉伸断裂口分析结果

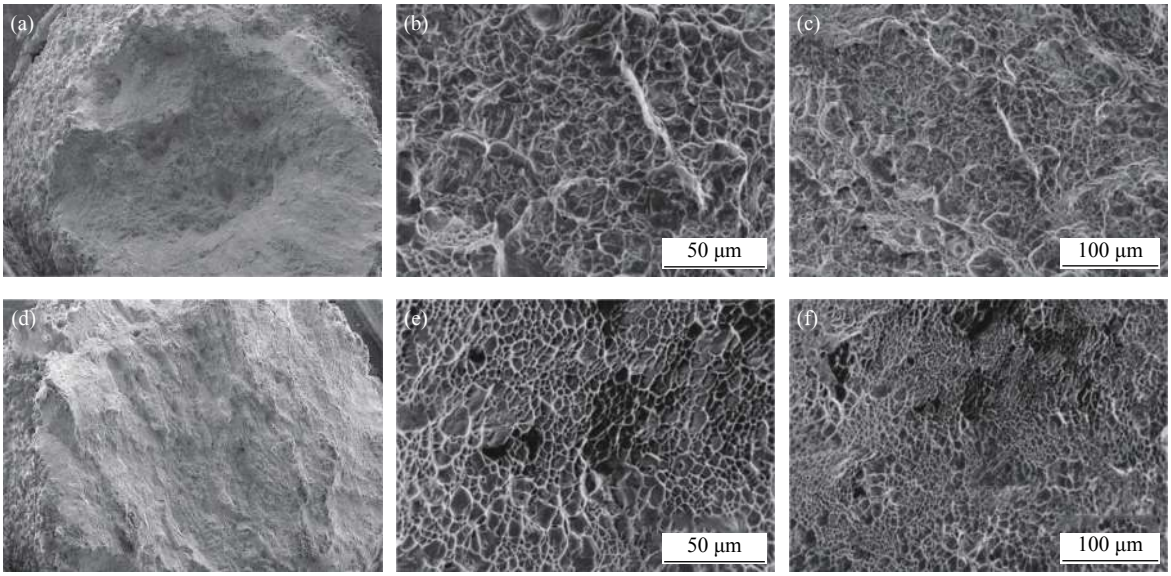
图 7 是两组拉力棒试样拉伸断口的电镜扫描形貌。EBSM 法制备的 H 组拉力棒试样断口形貌为典型的韧窝型穿晶断裂，（如图 7(b)、(c)所示）。宏观表面形貌呈现韧性凿峰状，出现了明显的颈缩现象；断口表面又有很多微孔聚合，裂纹穿过晶体内部扩展；断口表面形成了许多较深的韧窝（如图 7(a)所示），说明 H 组试样塑性较好，延伸率也比较高。

表 3　拉力棒试样室温拉伸力学性能

Table 3　Tensile mechanical properties

试样编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率 /%
H1	937	882	8
H2	942	892	14.4
H3	930	867	11.2
平均值	936	880	11.2
V1	755	714	7.4
V2	816	790	10
V3	780	724	9
平均值	783	742.7	8.8

EBSM 法制备的 V 组断口宏观形貌也是凿峰状（如图 7(d)所示），试样表面韧窝结构比较少（如图 7(e)、(f)所示），韧窝尺寸较 H 组试样小一些，也更浅一些，延伸率、塑性也相对更差一些。



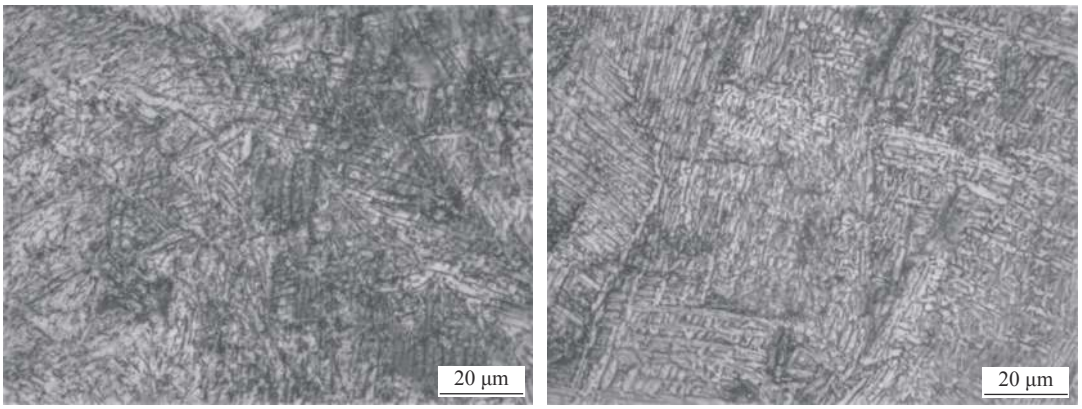
其中 (a)、(b)、(c) 为 H 组横向制备试样，(d)、(e)、(f) 为 V 组纵向制备试样

图 7　拉力棒拉伸断口电镜扫描形貌

Fig. 7　SEM of tensile fracture

2.4　金相显微组织观察

图 8 是钛合金试样微观组织光学显微照片。EBSM 成形 Ti-6Al-4V 的相转变过程如下：对于一层材料，由于电子束的熔化深度大于 1 个粉末层厚度，液相多次转化 β 相；之后，由于冷却速度很快，β 相先转化成 α′马氏体；在后续的成形中，材料多次被加热至固态相变温度，使得 α′马氏体分解为 α+β 相组成的网篮组织[9]。



(a) H 组横向拉力棒试样　　(b) V 组纵向拉力棒试样

图 8　TC4 钛合金拉力棒试样金相显微组织
Fig. 8　Metallographic microstructure of TC4 tension bar

图 8(a)是横向打印钛合金拉力棒试样的微观金相组织, 在增材制造过程中, 熔池从高温迅速冷却, 形成了原始凝固组织。其微观组织为极细小的片层或针状马氏体 β 转变组织, 合金在 β 相区加热后开始变形, 在变形过程中初始 β 晶界遭到破坏, 初始 β 晶粒内的 α 片层尺寸变小, 各片层交错排列, 形成网篮组织。网篮组织具有较好的抗拉性和延展性, 从拉伸试验结果来看, 与微观金相组织观察结果相符。

图 8(b)是纵向打印 TC4 钛合金的微观金相组织, 从图中可以看到形成的魏氏组织, 一般称为过热组织。文献 [9] 中提到 EBSM 成形 Ti-6Al-4V 时相的转变为: 液相→β 相→α′马氏体→针状 α+β。在纵向成形过程中, 电子束每层扫描时间短, 所以在第一层尚未降温的情况下, 已经开始对第二层进行扫描并对第一层材料重复加热, 因而冷却速度较慢, 最终形成魏氏组织, 其组织没有明显改变, 只不过是晶粒有所变小, 抗拉强度能够达到 1 000 MPa 以上, 但塑性和疲劳强度非常差。塑性和疲劳强度与拉伸试验结果相符, 但抗拉强度很低, 并没有达到 1 000 MPa, 与拉伸试验结果不符。其原因可能是纵向打印的拉伸试样中不同位置的金相组织有细微变化, 存在局部应力集中, 影响拉伸效果。

3　结论

通过室温拉伸试验, 研究了 EBSM 法在一定的工艺参数下选择不同成形方向制备的 TC4 钛合金在拉伸力学性能、拉伸断裂口和金相显微组织上的差别, 得到以下结论。

1) EBSM 法横向和纵向制备的 TC4 试样宏观特征没有明显差异, 但是力学性能有明显的差别。

2) EBSM 法横向制备 TC4 钛合金的抗拉强度平均值达到 986 MPa, 高于纵向制备 TC4 钛合金的 783 MPa。

3) EBSM 法横向制备 TC4 钛合金的屈服强度平均值达到 880 MPa, 高于纵向制备 TC4 钛合金的 742.7 MPa。

4) 横向试样金相显微组织为网篮组织, 延伸率优于显微组织为魏氏组织的纵向试样, 达到了 11.2%, 而纵向试样延伸率很差, 只有 8.8%。

参考文献

[1] Lai Qi, Li Junhan, Wu Enhui, *et al*. Research progress of electron beam vapor deposition[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(4): 76−81.
(赖奇, 李俊翰, 吴恩辉, 等. 电子束气相沉积的研究进展[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(4): 76−81.)

[2] Lawrence S Gould. Options in rapid prototyping technology[J]. Automotive Design & Production, 2006, 118(4): 84−85.

[3] Tong Shaohui, Li Dong, Deng Zenghui, *et al*. Effect of elective electron beam melting angle on microstructure of TC4 alloy[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(18): 83−85.
(童邵辉, 李东, 邓增辉, 等. 电子束选区熔化成形角度对TC4合金组织的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(18): 83−85.)

(下转第 90 页)