



模型处理对SEBM法制备TC4合金成型性能影响

徐博翰¹, 李小凤², 王枫^{1,3}, 莫健麒³

(1. 佛山桃园先进制造研究院, 广东 佛山 528225; 2. 顺德职业技术学院 智能制造学院, 广东 佛山 528300; 3. 广东粤科新材料科技有限公司, 广东 佛山 528225)

摘要: 模型处理是影响电子束选区熔化(SEBM)成型件性能和精度的关键因素之一。以TC4钛合金为研究对象, 利用电子束选区熔化快速成型技术制备横、竖两种不同摆放方式打印的R7拉伸试件, 并对拉伸试件进行室温拉伸试验。结果表明: 横向摆放的打印试件的力学性能, 比竖向摆放的打印试件的更优; 对拉伸断口进行宏观断口分析发现, 横向摆放的打印试件断口处没有明显的塑性变形且断裂位置几乎在中间, 而竖向打印的试件断口有明显的被拉长且断裂位置在试件上方; 对试件沿长度方向剖开, 分别选取试件上下两段进行金相组织观察分析发现, 横向打印试件上下端金相组织差异不大, 但竖向打印上端呈现出 α 相及转变相, 并且存在分层和气孔缺陷。由于横向摆放位置的打印试件与加工电子枪扫描方向一致, 且受热均匀, 因此具有较好的组织特性。

关键词: 模型处理; TC4; 电子束选区熔化; 力学性能; 金相组织

中图分类号: TG456.3; TG146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9981(2023)06-1155-06

引文格式: 徐博翰, 李小凤, 王枫, 等. 模型处理对SEBM法制备TC4合金成型性能影响[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(6): 1155-1160.

XU Bohan, LI Xiaofeng, WANG Feng, et al. Influence of Model Treatment on Forming Properties of TC4 Alloy Prepared by SEBM[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(6): 1155-1160.

0 引言

增材制造(AM)技术俗称3D打印, 是近年来得到快速发展的快速成型技术。AM技术在航天航空、微纳制造、生物医学工程等诸多领域中得到广泛的应用, 摆脱了传统的毛坯→切削→成品加工形式, 只需要将零件的三维模型进行切片分层处理, 生成加工路径, 再以不同的热源按照规定的路径逐层堆积, 直至形成致密的金属零件。该技术省去了传统加工所需要的刀具、夹具及多道且复杂的加工工序, 只需要在一台设备上即可制造出任意复杂形状的零件, 从而实现零件的自由制造^[1-4]。其中, 基于粉末层的电子束选区熔化技术(Selective Electron Beam Melting, SEBM)是以电子束为热源的一种新型增材制造技术^[5]。电子束的作用深度大且材料对电子束的吸收效果好, 在真空环境下能够有效的熔化合金粉末层。TC4(Ti-6Al-4V)合金是目前应用最广的钛合金, 由于TC4合金属于 $\alpha+\beta$ 两相合金, 其密度小、抗腐蚀能力强, 且具有良好的综合性能、成型性能和焊接性能, 因此成为钛合金工业中的王牌^[6]。

TC4合金在航空航天、汽车和船舶设备的各种减重应用中, 提供了最佳的全面性能。

在电子束选区熔化过程中, 模型的处理对成形质量和精度有着至关重要的影响, 不同的摆放位置、摆放方式、不同的分层方法和分层精度, 以及是否对零件添加支撑等都是需要考虑的因素。因此, 本文主要研究了不同的零件摆放位置对电子束选区熔化成型性能的影响^[7]。

1 试验部分

1.1 试验设备

试验采用瑞典电子束选区熔化设备Arcam A2X型3D打印机, 如图1所示。该设备由高能电子束枪、电源系统、观察系统、成形腔、真空系统及控制系统组成, 内部有刮粉靶、隔热罩、粉箱、加工台及加工仓等原件^[8]。在真空环境中, 电子束在偏转线圈驱动下, 按照规划好的加工路线进行扫描熔化预先铺设好的金属粉末, 完成后工作仓台下降一个层高, 刮粉靶从粉仓重新铺设一层粉末再进行熔化, 层层堆积

收稿日期: 2023-02-07

作者简介: 徐博翰, 硕士研究生, 研究方向为表面工程、增材制造, Email: 1339745363@qq.com。

成形所需零件^[9]。该设备工作原理如图2所示。

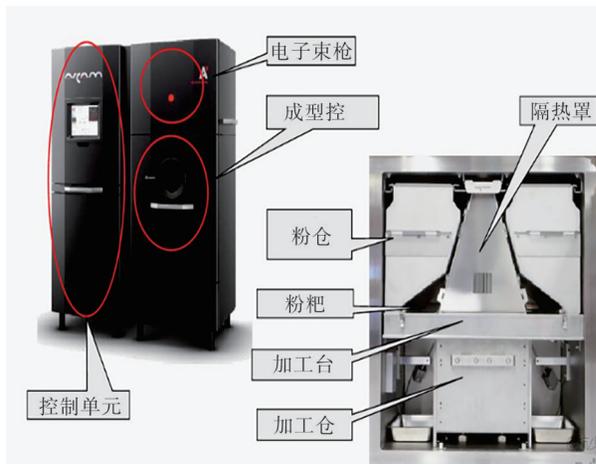


图1 电子束选区熔化制造设备

Figure 1 Selective Electron Beam Melting equipment

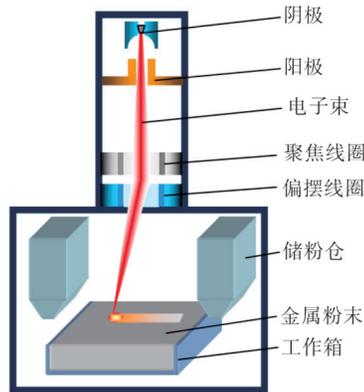


图2 电子束选区熔化工作原理图^[10]

Figure 2 Principle diagram of SEBM

1.2 试验材料

试验所用粉末为 Arcam TC4 ELI 合金球形粉末,其形貌如图3所示。该粉末是一种气体雾化粉末,通过外力将钛合金击碎为微小的液滴,再通过气雾快速冷凝得到,粉末粒径为 45—100 μm ,最小粒

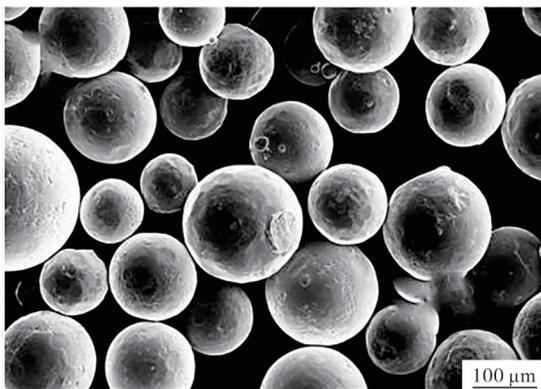


图3 TC4 ELI 粉末形貌图

Figure 3 TC4 ELI Powder morphology

径的限制保证了粉末的安全处理。与其他 TC4 球形粉末相比, Ti6Al4V ELI 中氧、氮、碳和铁的含量降低,使得粉末的间隙变得更低、更加致密,这些较低的间隙提高了 Ti6Al4V ELI 材料的延展性和断裂韧性,其化学成分列于表1。

表1 Ti6Al4V ELI 合金粉末化学成分
Table 1 Ti6Al4V ELI chemical composition

成分	Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
含量 w/%	6	4	1.2	0.014	0.03	0.06	8	余量

1.3 试验方法

首先,利用 Solidworks 绘制出所需打印的 R7 半径为 5 的拉力棒三维图,并导入模型处理软件进行处理,分别以横摆放和竖摆放的方式放在预设好的 200 mm×200 mm×380 mm 的工作平台空间内(见图4)。然后,进行模型分层处理,以及进行模型打印前修复去除坏边、翘边等,同时对横放打印的拉力棒添加支撑。最后,将生成程序导入增材设备中进行打印,不同的摆放方式代表着不同的扫描面积和扫描层数。电子束选区熔化成形工艺参数列于表2。

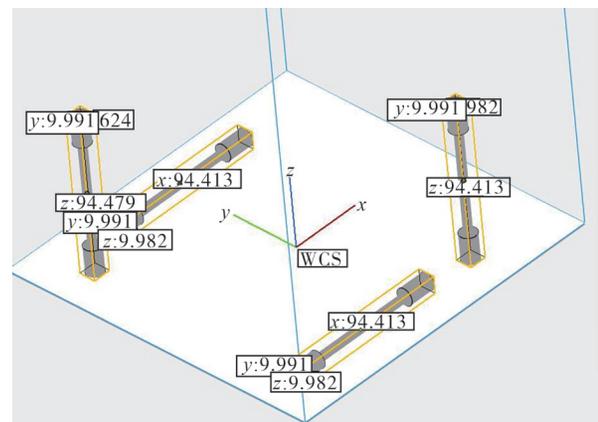


图4 不同摆放方式

Figure 4 Different ways of putting it

表2 电子束选区熔化成形工艺参数
Table 2 electron beam selective melting process parameters

扫描速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	聚焦电流/ mA	每层厚 度/m	电压/ kV	预热时长/ min
10	20	0.05	60	25

将制备出的 TC4 合金增材拉力样件进行室温拉伸试验,利用 Hitachi 公司的 SEM-4 800 型扫描电镜对拉伸断口进行观察。采用线切割机将横竖两种拉伸拉断后的钛合金试样沿伸长方向从中心剖面切开上下各一段,将切割好的试样依次用 400#、600#、

800#、1000#、1200#、1500#、2000#、3000#的砂纸进行粗磨,直至试样表面光滑且肉眼可见无明显划痕,再通过抛光机进行机械抛光,得到金相试样。采用HF+HNO₃+H₂O(体积比为1:2:48)的混合腐蚀溶液来腐蚀试样,在金相显微镜下进行组织观察^[11]。利用电镜分别对横竖打印的拉伸断口,进行断口观察分析。

2 试验结果与分析

2.1 力学性能

对横竖打印的样件进行室温拉伸试验后发现,横放打印的试件断裂位置处于样件的中间位置,竖放打印的试件断裂位置则在上端,结果如图5所示。



图5 拉伸试验结果
Figure 5 The tensile test

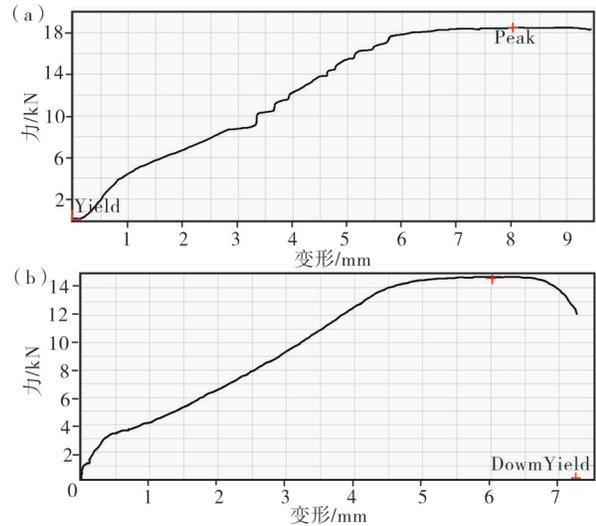
表3为快速成型TC4合金试样的拉断力学性能。由表3可知,横放打印的样件抗拉强度分别为934和908MPa、竖放打印的样件抗拉强度分别为756和754MPa,而延伸率分别为13%、14%和9.8%、10.1%。上屈服极限竖放打印试件比横放打印试件高了许多,说明竖放试件在拉伸过程中屈服时首次下降前的力比横打的试件要大,安全性能差。

表3 快速成型TC4合金力学性能

Tab.3 Mechanical properties of rapidly prototyping TC4 alloy

试样	最大力/kN	拉伸强度/ MPa	延伸率/%
横放打印1号件	18.348	934.457	13.122
横放打印2号件	17.838	908.483	14.054
竖放打印1号件	14.844	756.000	9.783
竖放打印2号件	14.644	745.814	10.161

图6为不同摆放方式的拉伸应力-应变曲线图。从图6可见:由于竖放打印的试件堆积方向与选区扫描方向不一致,使得整根样件上下段受热不均匀,力学性能也有所差异;总体而言,横放打印的拉伸样件力学性能优于竖向摆放样件。



(a)一横向打印;(b)一竖向打印。

(a)—horizontal printing; (b)—vertical printing.

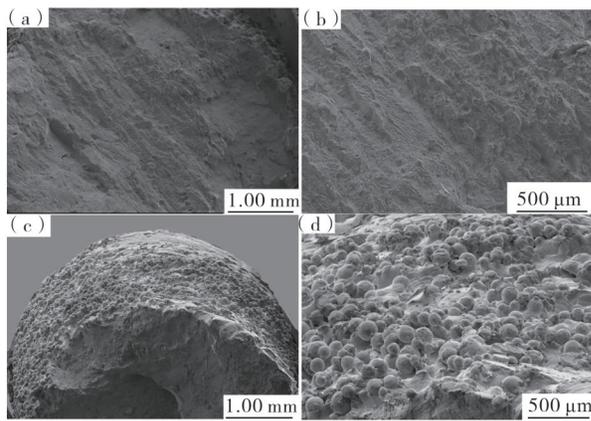
图6 不同摆放方式拉伸应力-变形曲线图

Figure 6 Tensile stress-deformation curves for different placement modes

2.2 断口分析

2.2.1 宏观断口分析

对进行力学拉伸实验后的横竖向摆放试件的断口宏观形貌进行分析观察,结果如图7所示。从图7(a)可见:横向摆放打印的试件断口没有明显的变形,并且剪切断裂明显^[12];宏观断口表面较为平整,断面也呈杯锥,但剪切唇区域较少;纤维区内粉末熔化效果较好,只有少许球形粉末未熔的现象出现在断口边缘。从图7(b)可以发现,断口处有大量的高密度短而弯曲的撕裂棱线条,呈现“河流状”的花样,以及断口有解理台阶和少量的孔洞,其原因可能是由于钛合金属于多晶体金属材料,受力后位向不同而导致的滑移面滑移。从图7(c)竖向摆放打印试件的宏观断口形貌可见,在拉伸的过程中,由于加工硬化率不足以抵抗形变集中在一个局部区域,导致断口被拉伸变形严重呈现颈缩现象,这是由于裂纹起源于纤维区并快速延展到了放射区,当裂纹扩展到表面时形成了韧性断裂的剪切唇,最后形成了杯状锥状的断口。并且在剪切唇和放射区断口边缘等处有许多未融化圆球。从图7(d)可见,未融化的圆球是TC4球形粉末,这是由于粉末没有得到充分的熔化,使得竖向打印试件的力学性能较横向的差距较大,竖向打印试件的断口在上端,初步判断应该是距离打印基板位置越远预热受热效果降低,使得打印情况越差、未融化的粉末越多^[13]。



(a)—横向摆放, 30×; (b)—横向摆放, 100×; (c)—竖向摆放, 30×; (d)—竖向摆放, 100×。

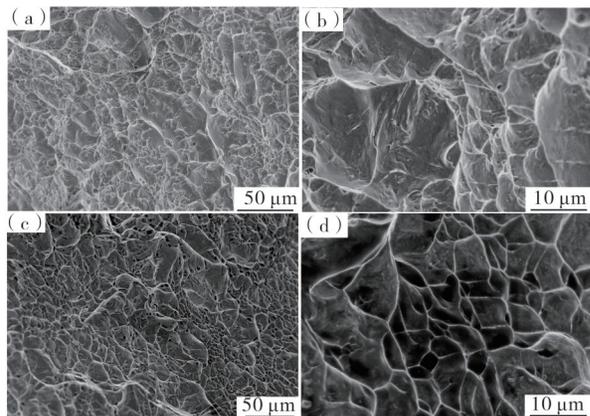
(a)—horizontal placement, 30×; (b)—horizontal placement, 100×; (c)—vertical placement, 30×; (d)—vertical placement, 100×.

图7 横竖向摆放打印试件的断口形貌

Figure 7 Fracture morphology of printed specimens placed horizontally and vertically

2.2.2 微观断口分析

对横竖向摆放拉伸试件的断口进行微观观察分析, 结果如图8所示。从图8可见: 横向打印试件断口产生许多韧窝, 但是相界面滑移形成的微孔较少, 并且在断裂位置处出现解理断层, 表明成形试件的延伸率和断面收缩率较好、塑性较强^[14]; 竖向打印试件断口的韧窝较浅, 断口韧窝周围有许多微孔, 这是由于在外力作用下使得处于平衡状态的微孔遭到破坏, 导致微孔变得更大, 试件的致密性和抗拉强度



(a)—横向摆放, 1 000×; (b)—横向摆放, 5 000×; (c)—竖向摆放, 1 000×; (d)—竖向摆放, 5 000×。

(a)—horizontal placement, 1 000×; (b)—horizontal placement, 5 000×; (c)—vertical placement, 1 000×; (d)—vertical placement, 5 000×.

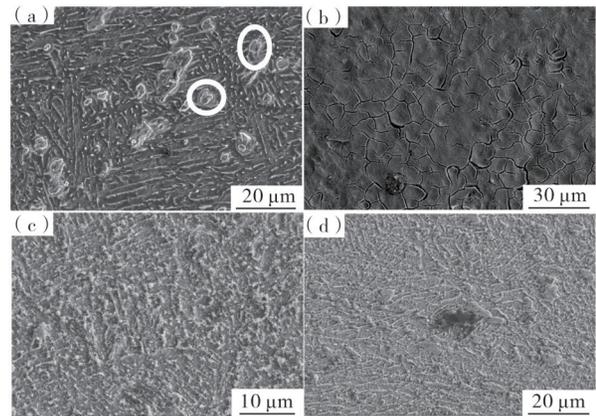
图8 横竖向摆放试件断口的微观形貌

Figure 8 Microscopic morphology of the fracture of the specimen placed horizontally and vertically

下降, 断面收缩率小和延伸率差而导致塑性也较横向打印的变弱。

2.3 金相组织分析

为了判定钛合金打印样件的组织形态、晶粒大小和析出物量的多少, 采用电子显微镜对处理过后的竖横向打印试件的金相样品进行观察, 结果如图9所示。从图9(a)可见, 竖向打印上段的样品的组织为典型的双态组织, 其特点为 β 相转变组织的基体上分布着互不相连的初生 α 相, 但其总含量不超过50%^[16], 这是由于测温热电偶在基板底部, 而竖向打印上段的试件距离测温基板过远, 加热预热不够准确均匀, 同时上段又属于试件加工的后半程, 后续层间预热和加热扫描的次数不多而无法起到缓慢冷却的效果, 所以钛合金热处理的加热温度低于了 β 相的转变温度, 从而得到双态组织^[16]。从图9(b)可见, 竖向打印下段试件的组织呈现为等轴晶粒的等轴组织, 因为下段打印试样距离基板近测温准, 每次扫描预热打印都相当于对下面的粉末层进行了一次重熔或退火预热, 所以呈现出退火组织, 这类组织塑性、疲劳强度和抗缺口敏感性及热稳定性均较好, 但断裂的韧性会较差。从图9(c)和图9(d)可以发现, 横放打印试件上段和下段的横切面均呈现出交错的网篮组织及网篮组织和魏式组织组成的双态组织, 这是由于横向打印每层粉末可以得到有效的预热, 使 β 相向 α 相无法及时冷却转变, 从而得到了成分相同但结构不一的固溶体^[17], 由于没有添加支撑及扫描面积过大的原因而产生了些许孔洞缺陷。同



(a)—竖向打印上段; (b)—竖向打印下段; (c)—横向打印上段; (d)—横向打印下段。

(a)—print the upper section vertically; (b)—print the lower section vertically; (c)—print the upper section horizontally; (d)—print the lower section horizontally.

图9 横竖向试件的金相组织

Figure 9 Metallographic organization of transverse and vertical specimens

时,对4个样品进行面扫衍射图谱分析Ti、Al、V、C、O等元素含量发现,4个样品元素含量几乎一致,摆放方式不同并没有造成元素的缺失。

综上所述,电子束选区熔化3D打印横向试件的力学性能比竖向摆放打印的试件更加优异,横向打印试件的塑性比竖向打印的要好,竖向打印的试件上下段的金相组织有所差异^[18]。

3 结论

以TC4合金为实验材料,通过电子束选区熔化技术以不同的模型摆放方式制备出拉伸样件,同时对试件进行力学性能测定、断口形貌和显微金相组织分析。

(1)以TC4合金为试验材料,Arcam A2X电子束真空焊机为试验设备,采用横竖两种模型摆放方式,制备电子束选区熔化增材成型R7拉伸试样,同时对其进行室温力学拉伸试验,发现横向打印和竖向打印的试件的力学性能有所差异,横向打印试件的抗拉强度、延伸率均比竖向打印的更优。

(2)将拉断后的横竖打印试件断口进行简单处理,利用扫描电镜,以30、100、1 000、5 000的倍数进行断口宏微观察并发现:横向打印试件的宏观断口较为平整、剪切唇区域小,沿着滑移方向呈现“河流状”的花样;横向打印试件的微观断口下有许多韧窝,但滑移产生的微孔较少,故其塑性较好;而竖向打印的试件的宏观断口呈杯锥状,在断口周围发现有许多未熔的球状粉末,这也是其力学性能差的原因之一;竖向打印试件的微观断口的韧窝较浅且微孔在外力作用下被拉大。

(3)对横竖试件断口进行扫描元素图谱分析发现,竖向打印试件的组成元素成分分布与横向的不一,可能是杯锥状断面扫描不均匀,也可能是打印时受热不均导致的。

(4)将横竖向打印的试件拉断后的上端和下端沿伸长方向剖开,对他们进行金相组织观察发现:横向打印上端和下端金相组织一致,呈现网篮组织及魏氏组织和网篮组织的双态组织;竖向打印试件的上端存在细长条的 α 相和转变相,并且有着气孔缺陷及打印未熔导致的分层缺陷,与下端组织有所差异。

因此,在打印长棒、长条状试件时,在模型处理上因尽量将其横向摆放在加工基板上,这样可以让电子束扫描面积更大,能够更加有效均匀的受热,并且在每一层打印过程中下面的打印层都能得到有效热传导,避免了过快的冷却。这种摆放方式的试件具有良好的力学性能及组织致密性。

参考文献:

- [1] 孙宝福,徐博翰,张莉萍,等.电子束熔丝增材制造成形路径的研究与优化—以304不锈钢为例[J].机械强度,2021,43(3):570-576.
- [2] 马北越,张博文,于景坤,等.3D打印技术及先进应用研究进展[J].材料研究与应用,2016,10(4):233-237.
- [3] 褚清坤,闫星辰,岳术俊,等.激光选区熔化成形Ti-12Mo-6Zr-2Fe(TMZF)合金微观组织及力学性能的研究[J].材料研究与应用,2021,15(4):350-357.
- [4] 贾亮,刘楠,杨广宇,等.电子束3D打印模型处理对钛合金零件成形精度的影响[J].钛工业进展,2019,36(5):1-6.
- [5] 郭超,林峰,葛文君.电子束选区熔化成形316L不锈钢的工艺研究[J].机械工程学报,2014,50(21):152-158.
- [6] 黄晓辉,左秀荣,刘凤芹,等.Ti6Al4V合金超塑性的研究进展及应用现状[J].材料研究与应用,2010,4(1):23-26.
- [7] 肖飞.选区激光熔化成形304不锈钢的力学性能研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [8] 潘士建.高能束快速成形TC4钛合金研究[D].沈阳:东北大学,2014.
- [9] 宁娅珊.电子束选区熔化成形大尺寸Ti-6Al-4V合金的性能研究[D].沈阳:东北大学,2015.
- [10] 巩水利,锁红波,李怀学.金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J].航空制造技术,2013,433(13):66-71.张嫚嫚.电子束与激光选区熔化法制备Ti-6Al-4V合金的组织与力学性能研究[D].沈阳:东北大学,2015.
- [11] 李红英.金属拉伸试样的断口分析[J].山西大同大学学报(自然科学版),2011,27(1):76-79.
- [12] 钟群鹏,赵子华,张峥.断口学的发展及微观断裂机理研究[J].机械强度,2005(3):358-370.
- [13] 陈德宁.钛合金激光选区熔化技术有限元分析[D].南京:南京理工大学,2016.
- [14] 周斌,周俊,李宏新,等.电子束选区熔化和激光选区熔化在低真空下成形Ti6Al4V的微观组织和力学性能对比研究[C].广州:中国机械工程学会特种加工分会,2017:7.
- [15] 杨广宇,贾文鹏,赵培,等.电子束选区熔化成形及后续热处理后Ti-47Al-2Nb-2Cr合金显微组织[J].稀有金属材料与工程,2016,45(7):1683-1686.
- [16] 杨鑫,奚正平,刘咏,等.电子束选区熔化技术对钛合金组织和力学性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2009,38(7):1272-1275.
- [17] 杨鑫,王婉琳,范亚卓,等.3D打印金属零件后处理研究现状[J].功能材料,2020,51(5):5043-5052.
- [18] 杨坤,汤慧萍,李元元.粉末床电子束3D打印医用金属材料的研究进展[J].功能材料,2020,51(3):3038-3046.
- [19] 任乃飞,葛小兵,王权,等.不锈钢316L间接选区激光烧结工艺参数优化研究[J].功能材料,2014,45(8):8083-8086.

Influence of Model Treatment on Forming Properties of TC4 Alloy Prepared by SEBM

XU Bohan¹, LI Xiaofeng², WANG Feng^{1,3}, MO Jianqi³

(1. Foshan Taoyuan Advanced Manufacturing Research Institute, Foshan 528225, China; 2. Shunde Polytechnic Institute of Intelligent Manufacturing, Foshan 528300, China; 3. Guangdong Yueke New Material Technology Co., Ltd., Foshan 528225, China)

Abstract: The model processing is one of the key factors affecting the performance and precision of the selective electron beam melting parts. This paper takes TC4 titanium alloy as the research object, and uses an electron beam selective melting rapid prototyping technique to prepare R7 tensile specimens with two different placement modes of horizontal and vertical printing. The tensile test of the tensile specimen at room temperature shows that the mechanical properties of the printed specimen placed laterally are better than those placed vertically. The macroscopic fracture analysis of the tensile fracture reveals that the horizontally printed specimen has no obvious plastic deformation and the fracture position is almost in the middle, while the vertically printed specimen has an obvious elongated fracture position and the fracture position is above the specimen. After the specimen is split along the length direction, the upper and lower sections of the specimen are selected for metallographic structure analysis. It can be seen that there is little difference in the metallographic structure between the upper and lower ends of the horizontally printed specimen, but the upper end of the vertically printed specimen presents α phase and transformation phase and exists stratification and porosity defects. In summary, the horizontally printed specimen has better microstructure characteristics because it has the same direction as the scanning electron gun and can be heated evenly.

Keywords: model processing; TC4; selective electron beam melting (sebm); mechanical properties; metallographic

(学术编辑:宋琛)