

电子束增材制造 TC4 合金制备熔道特征的研究

方星辰, 李忠文, 于治水

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘要: 利用电子束增材技术制备了 TC4 合金熔道, 并改变扫描速度、束流和离焦电流等工艺参数, 研究工艺参数对熔道表面形貌以及特征尺寸(熔深, 熔宽, 熔高和润湿角)的影响。研究表明, 随着扫描速度的降低和电子束电流的增加, 电子束线性能量输出增加, 熔道宽度和连续性均有所提高。当其它参数不变, 随着扫描速度的增加, 熔道变得不连续甚至发生球化反应。扫描速度、束流和离焦电流均对熔池有较大的影响, 随着扫描速度的降低以及束流的增加, 熔深、熔宽和熔高都在增加; 当离焦电流为 3 mA 时而熔深和熔宽最大, 润湿角最小; 电子束电流不变, 随着扫描速度的增加, 润湿角先增大后减小, 宽高比下降。

关键词: 增材制造; 熔道; TC4 合金; 工艺参数

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)03-1011-06

增材制造(additive manufacturing, AM), 又称 3D 打印, 是采用离散/堆积原理, 以高能束作为输入热源, 通过熔化或者烧结金属材料逐层熔化并且快速地进行凝固沉积, 最终形成致密的三维零件的一种技术^[1,2]。电子束选区熔化成形技术(electron beam melting, EBM)是其中一种代表性技术, 相较于其他增材制造技术, 它具有无需后续热处理、真空无污染、能量利用率高以及打印速度快等特点, 适合大型钛合金零件的打印^[3-5]。熔道是增材制造加工过程中的一个基本构建单元, 增材制造技术就可以看作是熔道叠加的成型技术, 熔道的特征对于产品成形质量有很大影响, 而通过改变工艺参数来改变能量密度可以避免很多不良的后果, 如熔道形状不规则和导致熔道之间结合不良的球化效应, 因此优化工艺参数十分重要^[6,7]。研究发现, 在低的扫描功率和高的扫描速率下熔道的宽度在降低, 熔道逐渐不连续, 最后产生球化效应^[8]。高的能量密度由于锁孔效应会造成熔池巨大波动, 从而产生巨大缺陷并阻碍熔池在扫描方向的生长^[9]。通过改变扫描速度、激光功率和层厚, SLM 制造的 TC4 合金熔道熔池从小孔模式变到传导模式^[10]。当提高送丝速率或降低束流功率时, 由于熔池的温度和尺寸减小, 组织变得细密并且铝蒸发损耗降低, 致使熔道的硬度增加^[11]。然而目前在 EBM 制备 TC4 合金过程中工艺参数和熔道之间的研究很少, 在 EBM 加工时, 熔道

主要受输出的线能量和离焦量(mA)的影响。而输出的线能量(ΔE)与电子枪电压(U_E)、束流(I_C)和扫描速度(V_S)之间满足下述关系^[12]:

$$\Delta E = \frac{U_E I_C}{V_S} \quad (1)$$

式中, 电子枪电压(U_E)一般是恒定的, 影响输出线能量的参数主要有束流(I_C)和扫描速度(V_S)。

本研究采用不同的工艺参数(扫描速度、电子束电流和离焦量)制备了一系列的 TC4 合金熔道, 研究了工艺参数对熔道外观形貌和特征尺寸(熔深、熔宽、熔高和润湿角)的影响。以期能够加深对 EBM 过程的理解并为参数的优化提供工艺窗口。

1 实验

使用的增材制造设备是原 Arcam 公司生产的 A2X 型电子束增材制造机, 其电子枪工作电压为 60 kV, 真空室背底真空度为 5×10^{-2} Pa, 加工时通入 He 气, 使其真空度达到 2×10^{-1} Pa, 通过电子束将基板预热至 720 °C, 然后进行粉末选区熔化加工, 每层步进距离为 0.05 mm。使用的粉末材料为颗粒直径在 45~105 μm 之间的 Ti6Al4V 合金粉末, 其化学成分如表 1 所示。试块的加工如图 1 所示, 为排除基体材料对熔道的影响, 首先在基板上加工 25 mm×20 mm×5 mm 的 TC4 试块作为支撑, 它可以防止稀释效应并且为熔道的构

收稿日期: 2021-03-11

基金项目: 上海市科委“创新行动计划”(17JC1400600, 17JC1400601); 上海市科学技术委员会创新计划地方高校能力建设(19030501300); 克拉玛依科技重大专项(2018ZD002B); 新疆科技项目(2019E0235)

作者简介: 方星辰, 男, 1994 年生, 硕士生, 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620, E-mail: 2515949014@qq.com

建提供支撑^[13]。在其上加工尺寸为 0.1 mm×0.1 mm×20 mm 的熔道，使用的工艺参数如表 2 所示。

采用 VHK-600K 超景深显微镜观察熔道表面形貌及截面组织，将切下来的试样镶嵌并用砂纸磨平后使用金刚石研磨膏进行抛光处理，腐蚀 45 s 后观察其截面，所用腐蚀剂为 5 mL HF+10 mL HNO₃+35 mL H₂O（体积比）。熔道截面的几何特征如图 2 所示，采用 VHK-600K 超景深显微镜测量熔宽（W）、熔高（H）、熔深（D）和接触角（ $\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$ ），并计算了宽高比（W/H）。

表 1 Ti-6Al-4V 合金粉末化学成分

Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
5.48	4.22	0.03	0.112	0.08	0.01	<0.003	Bal.

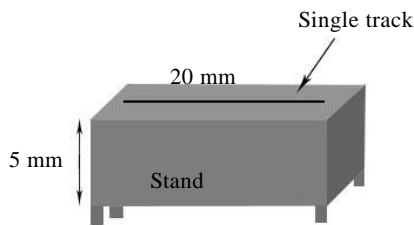


图 1 支撑块示意图

Fig.1 Schematic of melted single track on the stand

表 2 Ti-6Al-4V 熔道的工艺参数

Process parameter	Value
Beam current/mA	7, 10, 13
Focus offset/mA	0, 3, 6
Scanning speed/mm s ⁻¹	1000, 1500, 2000, 2500, 3000
Electron beam voltage/kV	60

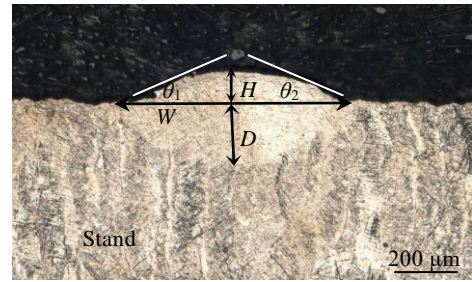


图 2 熔道几何特征示意图

Fig.2 Schematic diagram of melted single track on the stand

2 结果与讨论

2.1 熔道表面形貌

图 3 和图 4 分别是不同工艺参数处理的熔道形貌。从图 3 中可以看出，当线性能量输出为 0.30 J/mm，离焦电流为 0 mA 时，单道表面极为不连续，形貌为断断续续的液滴状。而随着线性能量输出的增加，粉末受到的电子束能量增加，粉末熔化形成的熔池温度升高，导致熔池的流动性和润湿性得到增加，电子束扫描区域外更多的粉末被融化，熔道宽度明显增加，同时也变得更加连续^[14,15]。从图 4 可以看到，当扫描速度为 2000 mm/s 时，线性能量输出较高，粉末熔化量较多，热作用时间长，拥有足够热作用时间流动，因此熔道很宽表面连续平整。而随着扫描速度的增加，粉末熔化量减少，热作用时间降低，熔道变窄，表面不连续，甚至有不连续液滴现象产生。当扫描速度到达 3500 mm/s 时，可以观察到球化效应的产生。Gu^[16]等认为高扫描速度下产生的球化效应主要是由于熔池中存在的马朗戈尼对流和熔液的毛细不稳定性。熔液从外向内流动会导致单道内熔液向中心球化。在这种情况下，熔液的凝固会因为球体的存在而受到干扰甚至被打断。

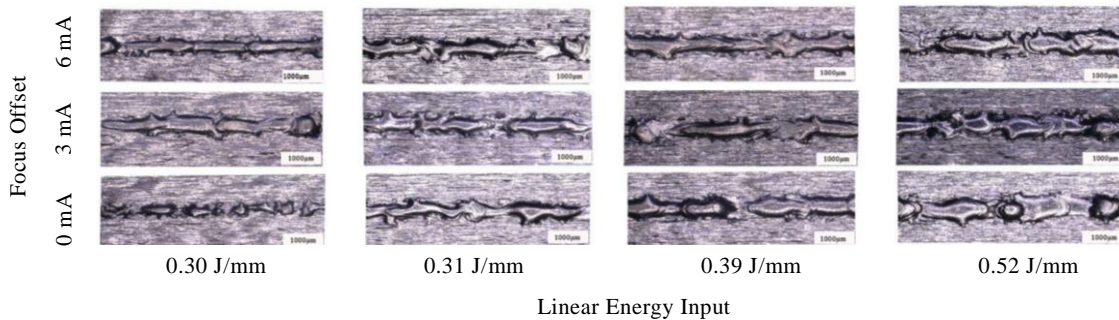


图 3 不同离焦量和线性能量输出下的熔道表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of the samples under different focus offsets and linear energy input

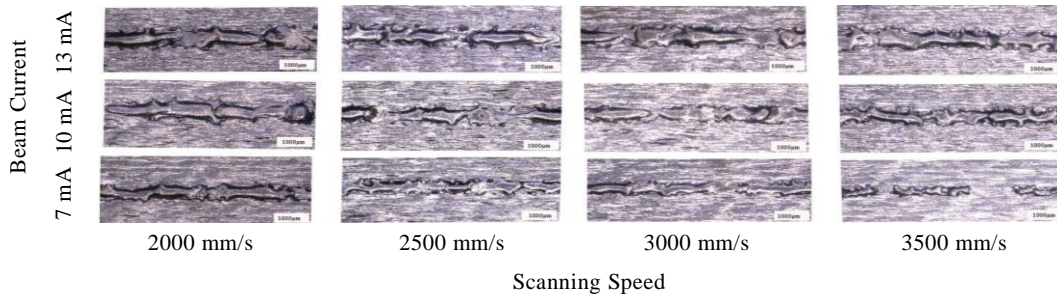


图 4 不同扫描速度和电子束电流下的熔道表面形貌

Fig.4 Surface morphologies of samples under different scanning speeds and beam currents

2.2 熔道熔池的特征尺寸

图 5 是不同工艺参数下获得的熔道横截面组织形貌。可以看到，随着电子束电流和扫描速度的变化，熔池的特征尺寸发生了明显的变化：当扫描速度增加并且束流下降时，熔道逐渐减小，这是因为扫描速度的增加以及电子束电流的降低都会降低线性能量输出，增材制造过程中粉末及基体重熔量减少，导致熔道尺寸减小。随着离焦电流的增加，电子束斑逐渐增大，单位面积的能量密度逐渐降低，当束斑电流为 3 mA 时能量密度下降产生的影响较小，束斑覆盖范围的增加使熔化的粉末增多，从而增加了熔道的尺寸。

从图 5 中测量了熔道的熔宽 (W)、熔高 (H)、熔深 (D) 接触角 (θ) 并计算了宽高比，每个熔道的具体实验结果如表 3 所示，将得到的结果绘制成图，可以得到工艺参数对熔池特征尺寸的影响，如图 6 所示。

图 6a、6b 分别为扫描速度和电子束电流对熔道的重熔深度和宽度的影响。从图中可以看到当扫描速度不变时，随着电子束电流的降低，熔宽和熔深均下降。而当电子束电流不变时，随着扫描速度的增加，熔宽和熔深同样在下降。这是由于线性能量输出增加，单道在形成的过程中会熔化更多的粉末并导致熔池变宽变深^[17,18]。由图 6d 可知，当离焦量增大时，熔宽和熔

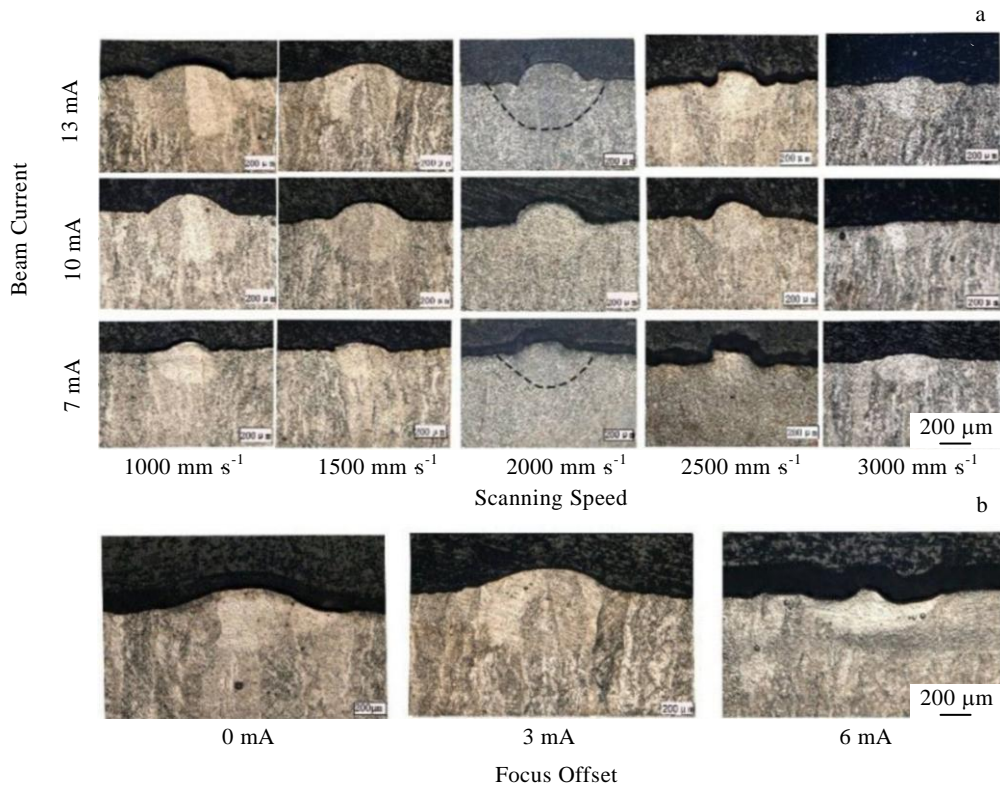


图 5 不同参数的熔道熔池几何特征

Fig.5 Molten pool characteristics of melted single tracks under different scanning speed and beam current (a) and different focus offsets (1500 mm/s, 13 mA) (b)

表 3 熔道实验结果

Table 3 Experimental results of each single track

Scanning speed/mm s ⁻¹	Beam current/mA	Focus offset/mA	Linear energy input/J mm ⁻¹	Re-melt depth/ μ m	Track height/ μ m	Track width/ μ m	Contact angle/($^{\circ}$)	Aspect ratio
1000	7	3	0.42	176	74	556	27	2.378
1000	10	3	0.60	261	129	826	35	2.023
1000	13	3	0.78	265	140	921	25	1.893
1500	7	3	0.28	143	74	547	25	1.932
1500	10	3	0.40	195	121	717	33	1.612
1500	13	0	0.52	147	113	703	25	1.301
1500	13	3	0.52	229	135	875	21	1.696
1500	13	6	0.52	122	70	611	30	1.743
2000	7	3	0.21	145	82	473	35	1.768
2000	10	3	0.30	182	113	669	37	1.611
2000	13	3	0.39	200	137	743	40	1.460
2500	7	3	0.17	118	81	451	34	1.457
2500	10	3	0.24	176	100	592	25	1.760
2500	13	3	0.31	188	97	646	40	1.938
3000	7	3	0.14	138	40	517	15	3.450
3000	10	3	0.20	152	45	594	7	3.378
3000	13	3	0.26	195	43	653	25	4.535

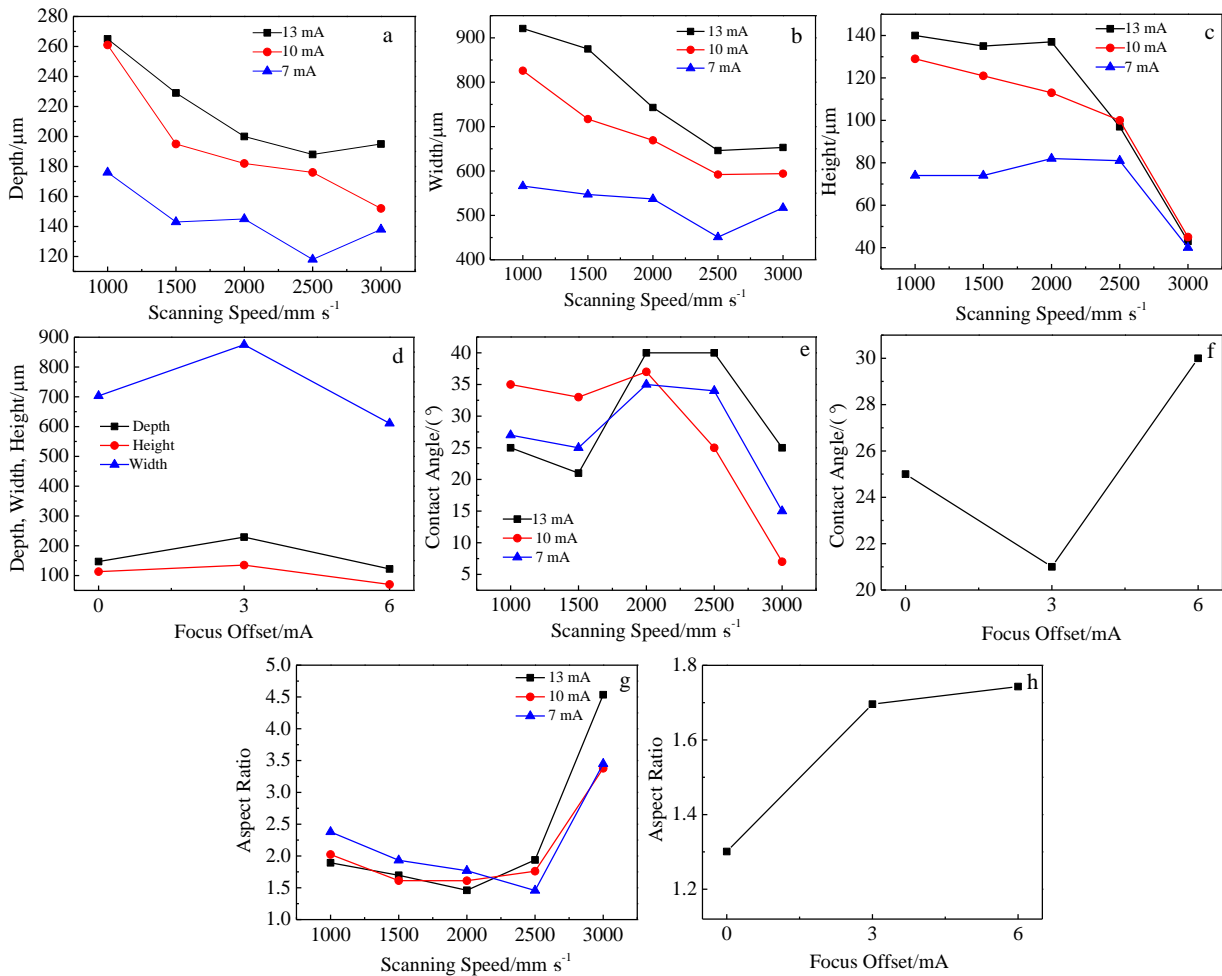


图 6 不同参数下熔池几何特征变化

Fig.6 Variation of melt pool characteristics under different parameters: (a) re-melt depth; (b) melt pool width; (c) track height; (d) width, track height and re-melt depth vs focus offset; (e) contact angle vs scanning speed; (f) contact angle vs focus offset; (g) aspect ratio vs scanning speed; (h) aspect ratio vs focus offset

深会先增大后降低, 这是因为离焦电流为 3 mA 时的束斑所融化的粉末最多。当线能量输出值为 0.78 J/mm 时, 重熔深度和熔宽的最大值分别是 265 和 921 μm (1000 mm/s、13 mA), 当线能量输出值为 0.17 J/mm 时, 最小值分别为 118 和 451 μm (2500 mm/s、7 mA)。

图 6c 及图 6d 分别为不同工艺参数对熔高的影响。可以看到当扫描速度不变, 随着电子束电流的增大, 由于线性能量输出增大, 粉末熔化量增多, 熔高增加。而当束流不变时, 随着扫描速度的增加, 熔高初始下降缓慢, 当扫描速度达到 2000 mm/s 时, 熔高下降速率增大。这是由于扫描速度较低时, 线性能量输出较大, 熔池内的粉末基本完全融化, 因此熔高变化幅度较小, 到 2000 mm/s 时, 粉末能够吸收的线能量迅速降低, 粉末熔化量迅速减少, 熔高迅速下降。从图 6d 可以看出, 由于离焦电流为 3 mA 时的束斑所融化的粉末最多, 熔高随着离焦电流的增加先增加后降低。当线能量输出值为 0.78 J/mm 时, 熔高的最大值为 140 μm (1000 mm/s, 13 mA), 当线能量输出值为 0.14 J/mm 时, 熔高最小值为 40 μm (3000 mm/s, 7 mA)。

图 6e、6f 分别为不同工艺参数对润湿角的影响, 从图 6e 中可以看出, 随着扫描速度的增加, 润湿角先增大后减小。这是因为当扫描速度较低时, 线性能量输出较高, 熔池内的温度也较高, 而高温可以促进马朗戈尼现象并使熔池铺展开来, 因而润湿角较低^[19]。而当扫描速度到达 2500 mm/s 后, 由于熔高的迅速降低, 润湿角迅速减小。从图 6f 可以看出, 由于离焦电流为 3 mA 时束斑所融化的粉末最多, 熔池内温度最高, 润湿角也最小。

当熔道铺展过窄时, 熔宽较小, 熔宽熔高之比比较小; 而当熔道铺展过宽时, 熔宽较大, 熔宽熔高之比显然较大, 因此对宽高比进行了计算。图 6g、6h 是不同工艺参数对宽高比的影响。可以看到固定电子束电流, 当扫描速度处于 1000~2500 mm/s 时, 宽高比在 1.5~2.5 的范围内波动, 随着扫描速度的增加宽高比下降, 这是因为随着扫描速度的增大, 熔高下降幅度比熔宽更大。当扫描速度为 3000 mm/s 时, 宽高比明显超过 3, 此时熔道铺展过宽, 成型质量不好。从图 6h 中可以看到随着离焦量的增大, 宽高比一直在增加, 结合图 5 可以看出随着离焦量的增大, 熔道的铺展是变窄的, 由于离焦电流为 3 mA 时熔宽最大, 且润湿角最小, 因此宽高比增加, 而当离焦量增加到 6 mA 时, 由于熔道铺展收缩, 宽高比继续增大。

有文献表明^[20], 当宽高比在 1.5~3 之间时, 熔道具有较好的成型质量。同时为保证成型过程相邻熔道能够充分搭接重叠, 熔深一般大于 3 倍的层厚即 150 μm 。

因此, 综合外观形貌、熔深和宽高比, 能获得较好熔道的工艺参数有 1000 mm/s (7、10、13 mA), 1500 mm/s (10、13 mA), 2000mm/s (10 mA), 2500 mm/s (13 mA), 离焦电流均为 3 mA。

3 结 论

1) 扫描速度的降低和电子束电流的提高都增加了线性能量输出, 熔道宽度明显增加并且更加连续; 随着扫描速度的增加, 熔道变得破碎不连续, 可以看到球化效应的产生, 这主要归结于熔池中存在的马朗戈尼对流和熔液的毛细不稳定性。

2) 随着扫描速度的降低、电子束电流的增加, 熔深、熔宽和熔高都在增加; 离焦电流为 3 mA 时而熔深和熔宽最大, 润湿角最小; 电子束电流不变, 随着扫描速度的增加, 润湿角先增大后减小; 固定电子束电流, 当扫描速度在 1000~2500 mm/s 增加时, 宽高比下降。

3) 综合外观形貌、熔深和宽高比获得了具有较好成型质量的 EBM 制备的 TC4 合金熔道。

参考文献 References

- [1] Zhu Zhishou(朱知寿), Shang Shouqiang(商国强), Wang Xinnan(王新南) *et al. Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2012, 29(6): 1
- [2] Wang Puqiang(王普强), Wu Mengjie(吴梦杰), Wang Yuyue(王豫跃) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2020, 63(10): 56
- [3] He Jianbin(何建斌), Xu Yan(许燕), Zhou Jianping(周建平) *et al. Machine Tool & Hydraulics*(机床与液压)[J], 2020, 48(2): 171
- [4] Kok Y, Tan X P, Tor S B *et al. Virtual and Physical Prototyping*[J], 2015, 10(1): 13
- [5] Wang Haojie(汪豪杰), Yang Fang(杨芳), Guo Zhimeng(郭志猛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(2): 709
- [6] Yadroitsev I, Krakhmalev P, Yadroitsava I *et al. Journal of Materials Processing Tech*[J], 2013, 213(4): 606
- [7] Li R D, Liu J H, Shi Y S *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2012, 59(14): 9
- [8] Dilip J J S, Zhang S S, Teng C *et al. Progress in Additive Manufacturing*[J], 2017, 2(3): 157
- [9] Shrestha S, Chou K. *Procedia Manufacturing*[J], 2018, 26: 857
- [10] Yang J J, Han J, Yu H C *et al. Materials & Design*[J], 2016, 110(11): 558

- [11] Karimi P, Deng D, Sadeghimeresht E *et al.* *Metals & Materials Society*[J], 2018, 52(3): 643
- [12] Tao Xuewei(陶学伟), Yao Zhengjun(姚正军), Zhang Shasha(张莎莎). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(9): 2913
- [13] Abioye T E, Folkes J, Clare A T. *Journal of Materials Processing Tech*[J], 2013, 213(12): 2145
- [14] Wu Fang(伍方), Sun Zhonggang(孙中刚), Li Bangyi(李邦恽) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(10): 3490
- [15] Qin Lanyun(钦兰云), Xu Lili(徐丽丽), Yang Guang(杨光) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(9): 2645
- [16] Gu D D, Hagedorn Y C, Meiners W *et al.* *Acta Materialia*[J], 2012, 60(9): 3849
- [17] Paria K, Esmaeil S, Joakim Å *et al.* *Materials Characterization*[J], 2019, 148(6): 88
- [18] Yang J, Yu H, Yin J *et al.* *Materials & Design*[J], 2016, 108(3): 308
- [19] Dezfoli A R A, Hwang W S, Huang W C *et al.* *Scientific Reports*[J], 2017, 7(1): 41 527
- [20] Huang J K, Pan W, Chen J S *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 36(2): 405

Study on Characteristics of TC4 Alloy Single Track Prepared by Electron Beam Melting

Fang Xingchen, Li Zhongwen, Yu Zhishui

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: A series of TC4 alloy single tracks were prepared by electron beam melting, and the effects of the process parameters such as scanning speed, beam current on the surface morphology and geometrical characteristics (re-melt depth, track width, track height, contact angle and aspect ratio) of a single track were investigated. The results show that with the decrease of scanning speed and the increase of beam current, the linear energy input increases and the width and continuity of single tracks are improved. When other parameters are fixed, with the increase of scanning speed, the single track becomes discontinuous and even the balling effect can be observed. The scanning speed, beam current and focus offset all have great influence on the melt pool. With the decrease of the scanning speed and the increase of beam current, the re-melt depth, track width, and track height increase. When the focus offset is 3 mA, the re-melt depth and track width are the maximum while the contact angle is the minimum. For the constant of beam current, with the increase of the scanning speed, the contact angle increases first and then decreases while the aspect ratio decreases.

Key words: additive manufacturing; melt track; TC4 alloy; process parameter

Corresponding author: Li Zhongwen, Ph. D., Lecturer, School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, P. R. China, E-mail: lizw@sues.edu.cn