

TC18 钛合金电子束熔丝成形 送丝工艺与显微组织性能

黄志涛, 锁红波, 杨光, 董伟, 杨帆

(北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: 利用电子束熔丝成形 (EBRM) 技术制备了 TC18 钛合金试样, 研究了相同热处理工艺条件下, 不同送丝方式对电子束熔丝成形 TC18 钛合金组织与性能的影响。结果表明: 电子束熔丝成形件经热处理后, 2 种工艺对应的宏观组织均为异常粗大的 β 柱状晶, 但是单丝工艺晶粒尺寸较双丝工艺细小; 2 种工艺成形后显微组织均为片状初生 α 相、 β 转变组织及晶界 α 相, 单丝片状初生 α 相含量多于双丝, 且片间距小于双丝; 单丝工艺对应的塑性及稳定性均高于双丝, 强度略低于双丝。

关键词: 电子束熔丝成形; TC18 钛合金; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号: TG146.2*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)03-0760-05

零件的轻量化、整体化、高性能、高可靠特性是现代武器装备发展的趋势, 同时带来了形状复杂化和大型化等问题, 传统制造技术因而面临严峻挑战, 难以甚至无法满足这些大型复杂关键构件的制造需求。鉴于此, 高效、低成本制造技术的开发与应用已经刻不容缓。电子束熔丝成形制造技术是近十几年才发展起来的一种制造高性能装备构件的新型近净成形工艺^[1-3]。该技术无需任何模具和刀具, 在真空室内通过高能电子束直接熔化金属丝材, 快速制造出复杂三维零件。其特点是成形速度快(3500 cm³/h)、保护效果好、材料利用率高^[4-6]、能量转化率高等特点, 在满足武器装备大型复杂金属结构的整体化制造、快速反应敏捷制造以及低成本制造方面具有巨大的优势^[7]。目前, 有关电子束熔丝成形的研究主要集中在 TC4 中强钛合金, 而对于成分相对复杂的高强钛合金 TC18 的研究相对较少。本研究采用电子束熔丝成形 (EBRM) 技术制备了 TC18 高强钛合金制件, 研究了不同送丝工艺对其组织形态与性能的影响, 为电子束熔丝成形工艺开发提供理论依据。

1 实验

成形用材料为 $\Phi 2.0$ 的 TC18 钛合金丝材, 其化学成分如表 1 所示; 成形基板为 6 mm 厚的 TC18 钛合金板。丝材用乙醇清洗并烘干, 基板经钢丝刷打磨去掉表层氧化皮, 并用乙醇擦拭干净。由于目前电子束熔丝成形送丝方式主要为单丝工艺和双丝工艺, 因此主要针对单/双丝工艺进行研究。电子束快速成形工艺参数见表 2。成形坯料尺寸为 600 mm \times 80 mm \times 55 mm。

为减少成形缺陷, 需对坯料进行热等静压处理, 工艺为: 900 $^{\circ}\text{C}/3 \text{ h}/120\sim 140 \text{ MPa}/\text{AC}$ 。然后进行热处理, 热处理工艺为 830 $^{\circ}\text{C}/2 \text{ h}$, 风冷+600 $^{\circ}\text{C}/5 \text{ h}$, 空冷。拉伸试验性能测试在 Z50 万能材料试验机上进行,

表 1 TC18 钛合金丝材化学成分

Table 1 Chemical composition of TC18 titanium alloy wire ($\omega/\%$)

Al	V	Mo	Fe	Cr	C	N	O	H	Ti
5.08	4.98	4.98	1.00	0.99	0.019	0.096	0.066	0.0035	Bal.

表 2 电子束熔丝成形工艺

Table 2 Electron beam rapid manufacturing process

Parameters	Beam accelerating voltage/kV	Focused current/mA	Beam current/mA	Wire feed rate/ m s^{-1}	Deposit velocity/ m s^{-1}
Single wire	60	820	30	15	5
Double wire	60	820	120	35	15

收稿日期: 2016-03-15

基金项目: 国家预研项目 (51318030203)

作者简介: 黄志涛, 男, 1982 年生, 博士, 北京航空制造工程研究所, 北京 100024, 电话: 010-85701493, E-mail: 13910384324@163.com

拉伸试样为 GB/T 228-2002 中推荐的 M10×Φ5 标准拉伸试样, 沿成形方向取样。在 Zeiss Axiovert 200 MAT 光学显微镜上进行金相显微组织观察, 腐蚀剂配比为 1 HF-1HNO₃-50 H₂O(体积比); 采用 SSX-550 扫描电镜进行断口观察。

2 实验结果

2.1 组织特征

2.1.1 宏观组织特征

图 1 为电子束熔丝成形 TC18 钛合金沿堆积方向的宏观组织图。由图可见, 成形后宏观组织为典型的沿堆积高度方向生长的粗大 β 柱状晶, 其高度几乎贯穿于整个堆积试件。根据柱状晶/等轴晶转变模型^[8]可判断, 在熔池下部, 温度梯度很高, 并且在真空中, 热量散失以向下的热传导为主, 因此导致其沿高度方向的分量也大于其它方向的分量, 所以晶粒向上呈柱状晶生长。此外, 由于成形过程中受多次热循环与较低的冷却速度的影响, 因此柱状晶可以充分长大。对比图 2a 和 2b 可知, 双丝工艺堆积对应的柱晶宽度为 0.5~4 mm, 整体较单丝工艺堆积对应的柱晶宽度 (0.5~2.5 mm) 宽。这主要是在成形过程中, 双丝送进方式对应的熔池深, 热输入能量大, 导致基体集热效应较单丝大。因此, 对应的柱状晶较粗大。

2.1.2 微观组织特征

图 2 是电子束快速成形 TC18 钛合金热处理后的显微组织。由图可见, 2 种工艺热处理后的显微组织均为网篮组织和沿晶界分布的初生 α 相。单丝沉积后, 晶界 α 相大多数呈不连续分布状态, 见图 2a; 双丝沉积

后的晶界 α 相呈连续分布状态, 见图 2b。在粗大 β 晶内部, 2 种工艺的组织形貌特征为在 β 转变组织上分布着呈交叉状分布、由若干个相互平行的片层状 α 相所组成的集束, 见图 2c 与图 2d。单丝工艺成形后, 集束内片层状 α 相的间距较小且排列相对规则; 而双丝工艺成形后, 集束内片层状 α 相的间距较单丝工艺明显增加, 且排列也较单丝工艺散乱。此外, 双丝工

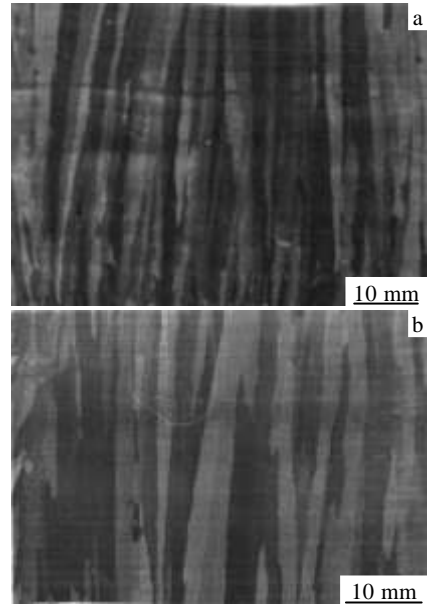


图 1 电子束熔丝成形 TC18 钛合金宏观组织
Fig.1 Macrostructures of the EBRM TC18 alloy: (a) single wire and (b) double wire

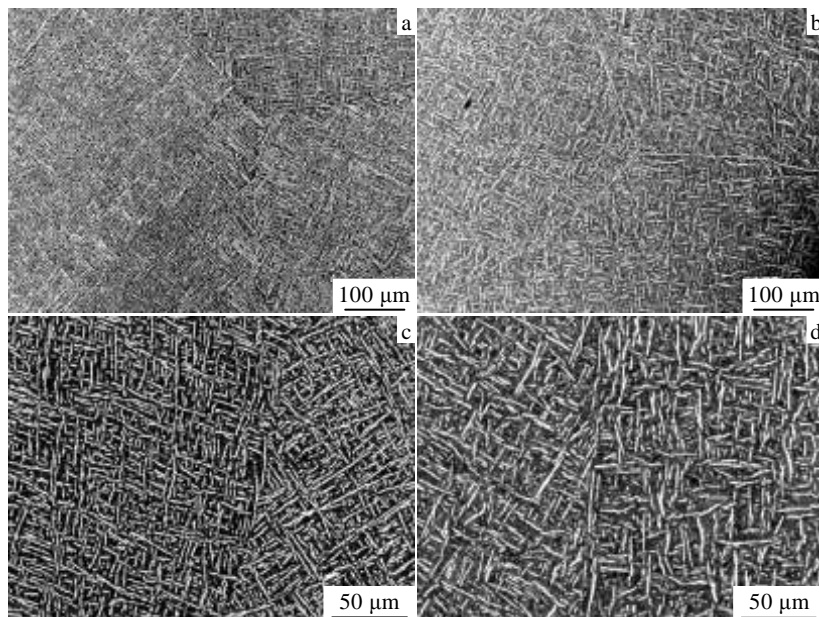


图 2 电子束熔丝成形 TC18 合金热处理显微组织

Fig.2 Microstructures of the EBRM TC18 alloy: (a, c) single wire and (b, d) double wire

艺组织中片层状 α 相所占的含量明显低于单丝工艺。

2.2 拉伸性能

2.2.1 强度特征

针对单/双丝成形试样进行拉伸试验, 每组随机取 6 个试样 (1~6)。图 3 为电子束快速成形 TC18 钛合金拉伸强度测试结果。由图可见, 双丝工艺对应的抗拉强度为 1091~1118 MPa、屈服强度为 1045~1066 MPa, 2 种强度具有一定的分散性; 单丝工艺对应的抗拉强度为 1067~1095 MPa、屈服强度为 1005~1034 MPa, 2 种强度也具有一定的分散性。对比 2 种工艺可知, 无论是抗拉强度还是屈服强度, 双丝成形件强度整体高于单丝成形件。

2.2.2 塑性特征

图 4 为电子束快速成形 TC18 钛合金塑性测试结果。由图可见, 单丝成形件的延伸率在 5.5%~8.5% 区间分布, 与强度类似, 延伸率也存在一定的分散性; 而双丝成形件的延伸率多数在 0.5%~8.0% 区间分布, 可以看出, 双丝成形件的塑性分散性较单丝成形件严重, 其塑性整体明显低于单丝成形件。

2.3 断口形貌观察

根据上述拉伸试验结果, 针对 2 种成形工艺, 分别选取不同塑性的典型试样进行断口观察。选择方式及断口观察结果见图 5。由图可见, 对于塑性高的样品, 其断口特征为穿晶断裂, 见图 5a 与图 5c; 对于塑性低的样品, 断口特征为沿晶断裂与穿晶断裂的混

合断口, 且可以明显地观察到二次裂纹沿晶界扩展趋势, 见图 5b 与图 5d。结合断口三要素原则^[9], 可判断塑性低的样品断裂起源于柱状晶表面, 并以此为源

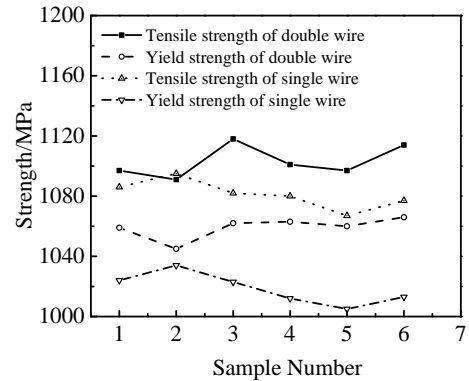


图 3 电子束熔丝成形 TC18 合金拉伸强度

Fig.3 Tensile strength of the EBRM TC18 alloys

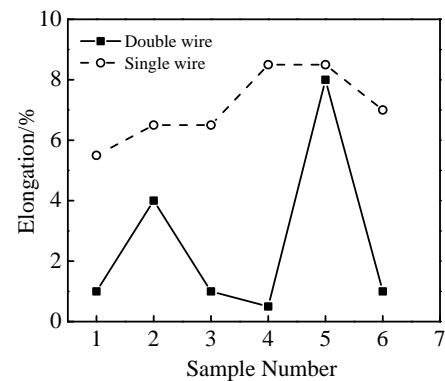


图 4 电子束熔丝成形 TC18 合金拉伸塑性

Fig.4 Plasticity of the EBRM TC18 alloys

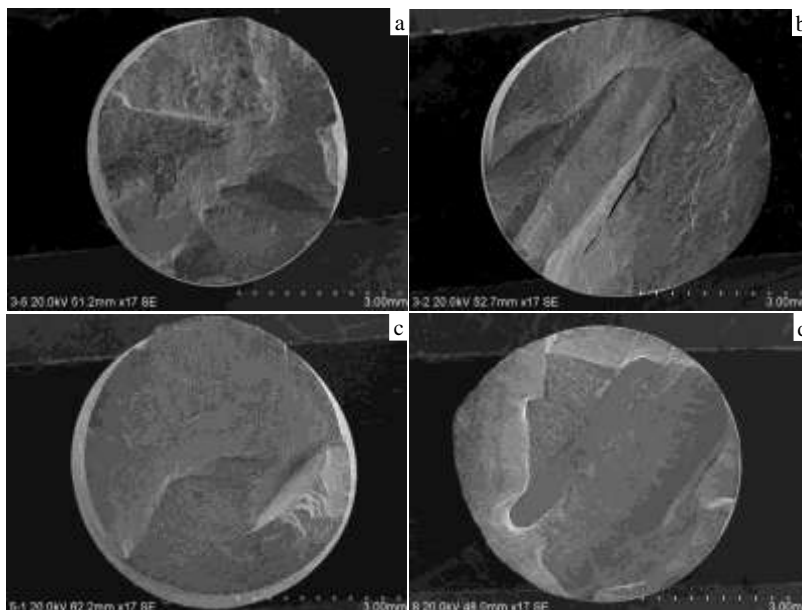


图5 电子束熔丝成形 TC18 钛合金断口形貌

Fig.5 Fracture macrostructures of the EBRM TC18 alloys: (a) single wire with elongation 8.5%, (b) single wire with elongation 5.5%, (c) double wire with elongation 8.0%, and (d) double wire with elongation 1.0%

形成裂纹向两侧扩展直至断裂。

3 讨论

受钛合金外延生长特性和电子束熔丝成形多次熔凝、多重热循环条件的影响,电子束熔丝成形后形成较传统加工工艺粗大的柱状晶组织。以往研究表明^[10],室温拉伸强度对于 β 晶粒尺寸变化不敏感,而拉伸塑性则随着 β 晶粒的长大而迅速下降,所以说异常粗大的 β 晶粒是导致成形件塑性较传统工艺低的重要原因之一,也是双丝工艺塑性低于单丝塑性原因之一。研究表明,室温拉伸强度与初生 α 相含量的关系不大,而拉伸塑性,特别是断面收缩率与初生 α 相含量有密切关系。其原因是在拉伸初期,变形量较小,在 α 相和转变 β 的相界面上形成空洞;随着拉伸变形程度的增加,这些空洞沿着相界面长大,初生 α 相对空洞长大起着阻碍作用,初生 α 相越多,平均自由路程越短,空洞长大过程中遇到的障碍就越多。因此,拉伸试样在断裂前产生更大的变形,从而获得更高的拉伸塑性。电子束熔丝成形后,单丝成形件显微组织中初生 α 相含量较多,且片层间距也小于双丝成形件,因此是导致单丝成形件塑性高于双丝成形件又一重要原因。结合宏观组织、晶界观察与断口观察结果可推测, β 晶粒间连续分布的晶间 α 相在拉伸过程中为薄弱区,在外力作用下以产生沿晶开裂,导致塑性降低。此外,由于双丝成形件中, β 转变组织含量较单丝高,因此可以判断,时效处理后双丝成形件组织中次生 α 相含量应高于单丝工艺,因此是导致双丝成形件强度整体高于单丝成形件的重要因素。从宏观组织观察结果看出,由于 β 晶粒尺寸异常粗大,导致拉伸试验结果受单个晶粒影响较大,取样位置不同,很可能由于受个别晶粒性质影响而导致拉伸塑性差距大,呈现出一定的分散性。由图2可知,双丝成形件晶粒尺寸均匀度较单丝成形件差,因而也可能是双丝成形件塑性分散性较单丝成形件严重的重要原因之一。

4 结论

1) 电子束熔丝增材制造成形后,宏观组织为异常粗大的 β 柱状晶;双丝成形件较单丝成形件更为粗大且不均匀。

2) 成形后显微组织均为片状初生 α 相、 β 转变组

织及晶界 α 相;单丝成形件组织中片状初生 α 相含量多于双丝成形件,且片间距小于双丝成形件。

3) 成形后拉伸试样强度稳定性较塑性好;单丝成形件塑性及稳定性均高于双丝成形件,而强度略低于双丝成形件。

参考文献 References

- [1] Huang Z T, Suo H B, Gong S L *et al.* *Materials Technology: Advanced Performance Materials*[J], 2016, 31(2): 115
- [2] Suo H B, Chen Z Y, Liu J R *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2014, 43(4): 780
- [3] Stecker S, Lachenberg K W, Wang H *et al.* *Society of Manufacturing Engineers Technical Conference Session*[J], 2006(2): 35
- [4] Gong Shuili(巩水利), Suo Hongbo(锁红波), Li Huaixue(李怀学). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2013, 20: 66
- [5] Yang Guang(杨光), Gong Shuili(巩水利), Suo Hongbo(锁红波). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2012, 19: 71
- [6] Chen Zheyuan(陈哲源), Suo Hongbo(锁红波), Li Jinwei(李晋炜). *Aerospace Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2010, 17: 36
- [7] Suo Hongbo(锁红波). *Microstructure and Mechanical Properties of Ti6Al4V Produced by Electron Beam Rapid Manufacturing*(电子束快速成形 TC4 钛合金显微组织及力学性能研究)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014: 2
- [8] Liu Bin(刘彬), Fang Yanli(方艳丽), Li An(李安) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(6): 1005
- [9] Yang Chuan(杨川), Gao Guoqing(高国庆), Cui Guodong(崔国栋). *Basic Knowledge of Failure Analysis for Metal Parts*(金属零部件失效分析基础)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 30
- [10] Wang Jinyou(王金友), Ge Zhiming(葛志明), Zhou Yanbang(周彦邦). *Titanium Alloys for Aviation*(航空用钛合金)[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1985: 206

Microstructure and Tensile Properties of TC18 Alloys by Electron Beam Rapid Manufacturing

Huang Zhitao, Suo Hongbo, Yang Guang, Dong Wei, Yang Fan

(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: The samples of TC18 titanium alloy were prepared by electron beam rapid manufacturing (EBRM). The effect of different wire feeding modes, single wire and double wire, on microstructure and tensile properties of the TC18 alloy by EBRM were studied. The typical macrostructure of the TC18 alloy exhibits large columnar β grains nucleated at the substrate after EBRM, and the size of single wire is finer than that of double wire. However, both processes cause flake primary α phase, β transformation microstructure and grain boundary α phase. The amount of primary α phase of single wire is larger than that of double wire, and the interlamellar spacing of single wire is smaller than that of double wire. The plasticity and stability of single wire are higher, while its strength is slightly lower than that of the double wire.

Key words: electron beam rapid manufacturing; TC18 titanium alloy; microstructure; tensile property

Corresponding author: Huang Zhitao, Ph. D., Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, P. R. China, Tel: 0086-10-85701493, E-mail: 13910384324@163.com