电子束选区熔化成形 Ti6Al4V 和 316L 不锈钢叶轮体微观组织和力学性能的研究

周 斌[1]，张 婷[1]，林 峰[1]，郭 超[1]，蔡振铭[2]，孔 啸[2]

(1. 清华大学，北京 100084)

(2. 上海电气电站设备有限公司 上海汽轮机厂，上海 200240)

摘 要：采用电子束选区熔化技术制造了 Ti6Al4V 和 316L 不锈钢 2 种不同材料的叶轮体，通过对比分析微观组织结构，测量尺寸精度、表面粗糙度、致密度和抗拉强度等方面性能，探讨利用增材制造技术制造叶轮体在工业上运用的可行性。结果表明：制造的 Ti6Al4V 和 316L 不锈钢叶轮体抗拉强度分别为 560~700 MPa 和 996~1120 MPa，均高于一般锻造标准强度水平，达到工业使用要求。钛合金叶轮体内部存在沿成形方向生长的柱状晶，组织为网篮组织，而成形截面较小的区域晶粒较为粗大，为粗片状的 $\alpha+\beta$ 相。不锈钢叶轮体内部存在有规律的鱼鳞状的扫描道熔合痕迹，存在部分粗化的枝晶。

关键词：增材制造；电子束选区熔化；微观组织结构；力学性能；叶轮体

中图法分类号：TG146.2+3；TG142.71 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X(2018)01-0175-06

电子束选区熔化（electron beam selective melting，EBSM）是 20 世纪 90 年代中期发展起来的一种金属零件增材制造技术[1]，其工艺特点是聚焦的电子束对已经铺展在成形区域表面的材料粉末薄层进行扫描，将位于零件截面区域内的薄层粉末熔化并沉积，成形的精度较高而且可以制作出具有多孔或内流到结构的零件[2]。

电子束的特点是作用深度较深，材料对电子束的吸收率较高。因此 EBSM 的粉末层厚度较厚（50~100 μm），粉末床及成形区域的温度较高（600~900 ℃），工件在成形过程中的热应力较小；扫描速度快，可进行分束多点同步扫描，可进一步降低热应力；适于加工脆性材料（如 TiAl 基合金等）和高熔点导电材料（如钨合金及 ZrB_2，ZrO_2 等陶瓷材料）；同时 EBSM 工艺的成形效率较高（可达 80 cm^3/h）[3,4]。

EBSM 广泛地运用于航空航天关键材料的加工技术研究，如钛合金、铝合金、TiAl 金属间化合物等高性能、轻合金材料，制造出了大推力氢氧火箭发动机氢泵叶轮、火箭喷管、前端锥零件和空间飞行器多孔构件。由于电子束具有快速预热功能，特别适合 TiAl 等金属间化合物的成形。意大利 AVIO 公司采用 EBSM 成形技术制造 TiAl 航空发动机叶轮、喷嘴、空心叶片等构件[5,6]。

压缩叶轮是离心式压缩机中惟一对气流作功的元件，气体在叶轮叶片的作用下，随叶轮作高速旋转，气体受旋转离心力的作用，在叶轮里扩压流动，压力得到提高。叶片有圆柱形和扭曲形两种，利用传统铸造和锻造工艺成形不了特别复杂的叶片结构，需要后续的机加工，制造难度较大，造价较高。而利用冲击焊接等工艺制造叶轮，会导致叶轮后盖板变形严重等问题[7]。

本实验采用 EBSM 技术制造 Ti6Al4V 和 316L 不锈钢 2 种不同材料的叶轮体，通过对比分析 2 种材料叶轮体的微观组织结构，测量尺寸精度、表面粗糙度、致密度和抗拉强度等方面性能，探讨利用增材制造技术制造叶轮体在工业上运用的可行性。

1 实 验

不锈钢叶轮体成形采用的粉末为西北有色金属研究院提供的气雾化 316L 不锈钢粉末，颗粒直径在 20~40 μm，平均直径为 30 μm；钛合金叶轮体成形采用的粉末为气雾化 TC4 钛合金粉末，颗粒直径在 40~104 μm，平均直径为 80 μm。运用瑞典 ARCAM 公司的 A2 型号电子束选区熔化设备进行叶轮体制造成形。设备的电子加速电压为 60 kV，最大束流 50 mA，最大功率 3 kW，可全自动实现零件的分层成形。

收稿日期：2017-01-10

作者简介：周 斌，男，1990 年生，博士生，清华大学机械工程系，电话：010-62782938，E-mail: zhoubin13@mails.tsinghua.edu.cn

成形结束后，将成形件沿电子束扫描方向的垂直面切开，利用光学显微镜观察上表面轮廓及微观组织，以研究成形件上表面形貌及微观组织的影响因素与原因。利用排水法测定试样的致密度，利用接触式粗糙度测量仪测量成形件上表面粗糙度，在叶轮体各部分分别沿成形方向和垂直于成形方向取拉伸样，做抗拉性能试验。

2　结论和分析

2.1　叶轮体成形

如图 1 叶轮体模型所示，叶轮体主要分成 3 个部分：圆柱(cylindrical)，圆盘(plate)和叶片(blade)。其中叶片部分成形最为复杂，性能要求也最为严格。

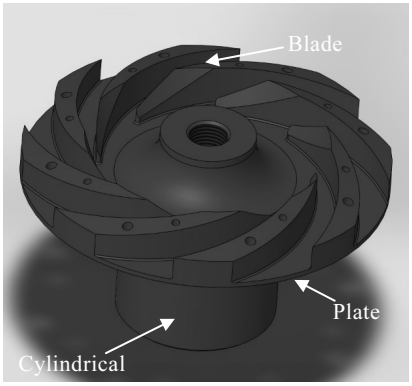


图 1　叶轮体模型示意图

Fig.1　Schematic model of impeller body

图 2 为 Ti6Al4V 和 316L 不锈钢叶轮外形及剖视图。考虑成形方向对叶轮体组织和性能的影响，当采用如图 2b 红色箭头方向为成形方向时，圆柱在下，叶片在上。叶片成形较为清晰，没有支架支撑，大大减少后期切削加工难度。但是叶片的散热不好会影响力学性能，可能产生缺陷；同时也需要设计底座支撑圆盘下表面，防止圆盘叶片变形；当采用如图 2d 红色箭头方向为成形方向时，叶片在下，圆柱在上。热变形较容易控制，但是叶片周围的支撑提高了后续切削加工的难度，增加了加工成本和时间。为此，作者分别采用 2 个不同成形方向制造叶轮体进行组织性能测试。

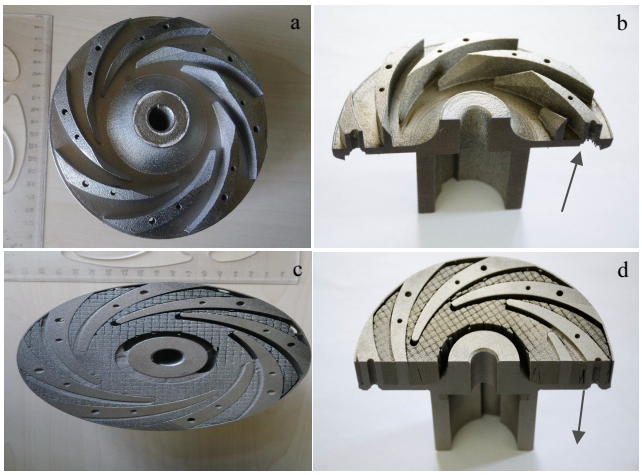


图 2　Ti6Al4V 和 316L 不锈钢叶轮外形及剖视图

Fig.2　Whole (a, c) and cross-sectional view (b, d) of Ti6Al4V (a, b) and 316L stainless steel (c, d)

2.2　尺寸精度

叶轮体尺寸测量结果如表 1 所示，沿成形方向的尺寸基本没有误差，精度非常高，而垂直于成形方向（堆积平面）测量结果均比理论值偏小，原因是制件在电子束扫描成形后，由于冷却速度较快，会有一定程度的收缩，导致测量结果比理论值偏小。高功率电子束的束斑直径为 0.2~0.4 mm，所得到的叶轮体成形精度为 0.22 mm，在电子束束斑直径范围内。

2.3　表面粗糙度

利用接触式表面形貌测量系统 Talysurf 5P-120 测量叶轮体成形上表面和侧面的表面粗糙度，得到结果如表 2 如示。

可以看出对于成形上表面的表面粗糙度，不锈钢和钛合金的测量结果接近，这是由于材料的沉积效果主要由束流与扫描速度的比值 P/v 决定，因此，成形上表面的表面粗糙度主要受束流与扫描速度的比值 P/v 参数的影响；而不锈钢叶轮体的 316L 不锈钢粉末颗粒直径较小（平均 30 μm），钛合金 TC4 粉末平均颗粒直径较大（平均 80 μm），这是导致钛合金叶轮体侧面表面粗糙度较大的原因。

表 1　叶轮体尺寸测量结果比较

Table 1　Impeller body size measurement result and comparison (mm)

	Maximum height	Maximum diameter	Plate		Cylinder	
			The inner hole diameter	The outer circle diameter	The inner hole diameter	The outer circle diameter
Theoretical value	79	145	14.5	36	40	60
Measurements value	79.00	144.78	14.42	35.80	39.94	59.92
Deviation value	0	0.22	0.08	0.20	0.06	0.08

表 2　叶轮体表面粗糙度测量结果

Table 2　Impeller surface roughness R_a measurements (μm)

Position	316L stainless steel	Ti6Al4V
Side	8.123	26.816
Upper surface	14.124	11.183

2.4　拉伸性能

为了分析叶轮体的拉伸性能，需要对叶轮体的各个部分进行力学性能测试。如图 3 所示，分别测量圆柱段，圆盘段和叶片的拉伸性能，分析沿垂直方向（成形方向）和水平方向（垂直于成形方向）拉伸性能的差异，测量结果如表 3 所列。

由表 3 数据可知，利用电子束选区熔化制造的不锈钢叶轮体抗拉强度达到 560~700 MPa，高于一般锻造标准强度水平（485 MPa，GB/T3280-2007），断后延伸率也达到 35%~54%，具有良好的塑性。钛合金叶轮体抗拉强度达到 996~1120 MPa，断后延伸率在 5%~12%。达到了工业运用的要求。

叶轮体各个部分拉伸性能都存在各项异性，水平方向（垂直于成形方向）抗拉强度都明显高于垂直方向（成形方向），而断后延伸率要稍低一些。叶轮体叶片部位的垂直方向抗拉强度要小于圆盘段和圆柱段部位的垂直方向抗拉强度，而叶片部位的水平方向抗拉强度却高于圆盘段和圆柱段部位的水平方向抗拉强度。



图 3　叶轮体拉伸试样及各部分取样位置

Fig.3　Impeller tensile sample and sampling position: (a) cylindrical tensile sample, (b) Ti6Al4V sampling position, (c) 316L stainless steel sampling position, (d) plate and blade tensile sample, (e) plate sampling position, and (f) blade sampling position

表 3　叶轮体的各个部分抗拉强度测量结果

Table 3　Measurements of various parts of the tensile strength

Sample		Tensile strength, R_m/MPa		Elongation, A/%	
		Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
316L stainless steel	Cylindrical	682.67	614.95	36.8	54.2
	Blade	695.33	602.33	35.1	43.9
	Plate	703.85	560.67	42.7	40.2
	GB/T3280-2007	485		40	
Ti6Al4V	Cylindrical	1001.48	996.58	7.0	12.1
	Blade	1125.31	840.89	8.3	5.0
	Plate	1021.11	949.67	7.8	7.3
	GB/T3621-2007	895		12	

2.5 金相组织

图 4 是钛合金叶轮体微观组织光学显微照片。如图 4a 所示，试样截面上可见沿成形方向生长的柱状晶。在截面内的区域，微观组织为网篮组织：细针状的交错排列的 α 相晶粒（白色）和晶界上的 β 相（黑色）。文献[8]对 EBSM 成形 Ti6Al4V 的相转变过程进行了描述：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，液相多次转化为 β 相；之后，由于冷却速度很快，β 相首先转化为 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 $\alpha+\beta$ 相组成的网篮组织[8]。

这充分说明了 EBSM 工艺的特点：将材料成形与热处理融为一体。因为电子束的功率密度大、被材料的吸收率高，可以使粉床整体温度保持在较高水平；在成形中，已经沉积的材料会被反复加热至固态相变温度以上，相当于对材料进行热处理。

由图 4 可以看出，TC4 钛合金的金相组织为沿成形方向生长的柱状晶，因此，垂直方向的晶界数量明显比水平方向的晶界数量少。由于拉伸变形时，缺少晶界阻碍位错的滑移，所以垂直方向的强度低于水平方向的拉伸强度；而位错滑移在晶界处受阻并塞积，则又引起应力集中并容易导致晶界微裂纹产生，因此垂直方向材料的延伸率高于水平方向的延伸率[9,10]。

图 5 是叶片段与圆柱段晶粒大小比较，可以看出叶片段的晶粒要比圆柱段粗大。在一般大截面的 EBSM 成形过程中，Ti6Al4V 的相转变如前所述，发生液相→β 相→α'马氏体→细针状的 $\alpha+\beta$ 相的转变。但是叶片的截面较小，电子束扫描往返时间短，刚扫描过的地方还来不及降温，就又被扫描到。因此，叶片部位的温度较高，降温时间较长，α'马氏体先分解为细针状的 $\alpha+\beta$ 相，后又粗化为粗片状的 $\alpha+\beta$ 相。相比细针状的 $\alpha+\beta$ 相的网篮组织，粗片状的 $\alpha+\beta$ 相大大降低了叶片垂直方向的抗拉强度，而在水平方向形成了更多的晶界，这又增加了叶片水平方向的抗拉强度。

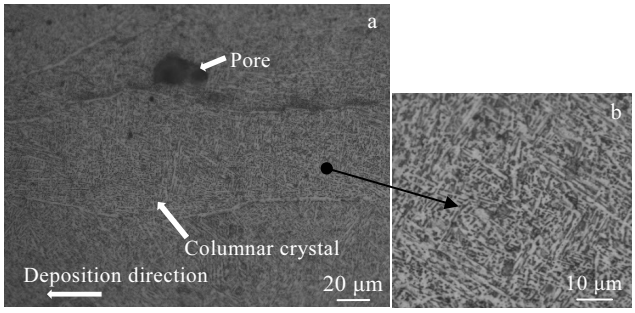


图 4 钛合金叶轮体微观组织光学显微照片

Fig.4 Optical micrograph of Ti6Al4V impeller body microstructure

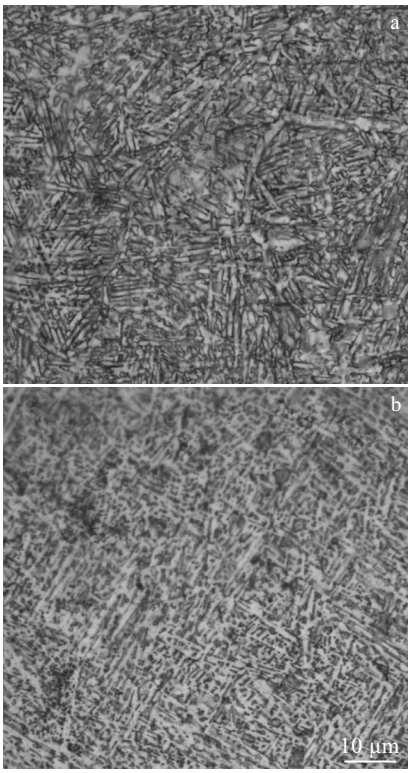


图 5 叶片段与圆柱段晶粒大小比较

Fig.5 Grain size of blade section (a) and cylindrical section (b)

这使得叶轮体叶片部分的垂直方向抗拉强度要小于圆盘段和圆柱段部位的垂直方向抗拉强度，而叶片部位的水平方向抗拉强度却高于圆盘段和圆柱段部位的水平方向抗拉强度。

图 6 是不锈钢叶轮体微观组织光学显微照片，可见有规律的鱼鳞状的扫描道熔合痕迹，可见明显孔隙。图中没有沿沉积方向连续生长的晶体，部分组织细密，具有快速熔凝特征；而部分组织则为粗化的枝晶。枝晶组织的生成是由于孔隙使熔池的散热条件变差，材料冷却速度降低[11]。

2.6 缺陷分析与致密度分析

对比分析电子束选区熔化制备的不锈钢和钛合金叶轮体微观组织光学显微照片（图 7），可以发现微观组织中均含有一定的缺陷，以孔隙为主要的缺陷。文献[12]指出，对于小的规则的球形气孔，可能是气雾化粉末中残留的气孔，在成形过程中由于能量密度波动没能有效排除，从而保留下的气孔；对于大的不规则形状的孔隙，可能是成形过程中的粉末飞溅和未熔合或者熔合不良导致的缺陷[12]。

通过排水法测定了不锈钢和钛合金叶轮体的致密度，发现致密度都达 99.1%以上。由 2.4 节可以得到孔隙的存在并不影响叶轮体的抗拉性能，但孔隙是否

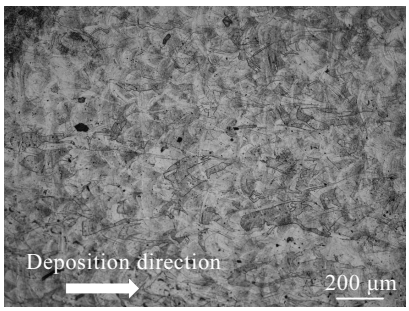


图 6　不锈钢叶轮体微观组织光学显微照片

Fig.6　Optical micrograph of 316L stainless steel impeller body microstructure

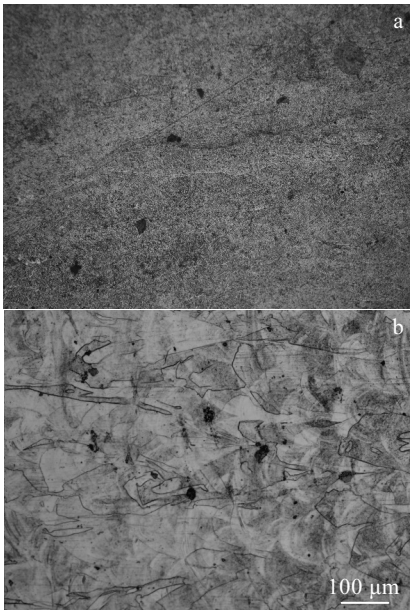


图 7　钛合金和不锈钢叶轮体微观组织光学显微照片

Fig.7　Microstructure of Ti6Al4V (a) and 316L stainless steel (b) impeller body

会影响叶轮体的使用性能需要后续的实验研究。从强度上说 EBSM 制造叶轮体达到了工业上使用的要求，但还需要后续疲劳试验和装机测试进一步验证 EBSM 制造叶轮体工艺在工业上运用的可行性。

3　结　论

1) EBSM 制造的 316L 不锈钢叶轮体抗拉强度达到 560~700 MPa，Ti6Al4V 叶轮体抗拉强度达到 996~1120 MPa，均高于一般锻造标准强度水平，达到工业运用的要求。

2) Ti6Al4V 叶轮体内部存在沿成形方向生长的柱状晶，组织为网篮组织，而成形截面较小的区域晶粒较为粗大，为粗片状的 $\alpha+\beta$ 相。使沿着成形方向的抗拉强度降低，而垂直于成形方向抗拉强度升高，且垂直于成形方向抗拉强度高于沿着成形方向抗拉强度。316L 不锈钢叶轮体内部存在有规律的鱼鳞状的扫描道熔合痕迹，存在部分粗化的枝晶。

3) 叶轮体中存在缺陷，主要以孔隙为主，孔隙的存在并不影响叶轮体的抗拉性能，但孔隙是否会影响叶轮体的使用性能需要后续的实验研究。

参考文献　References

[1] Zeng Guang(曾　光), Han Zhiyu(韩志宇), Liang Shujin(梁书锦) *et al*. *Materials China*(中国材料进展)[J], 2014(06): 376

[2] Frazier W E. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2014, 23(6): 1917

[3] Zäh M F, Lutzmann S. *Production Engineering*[J], 2010, 4(1): 15

[4] Qi Haibo(齐海波), Lin Feng(林　峰), Yan Yongnian(颜永年) *et al*. *Journal of Tsinghua University, Science and Technology* (清华大学学报,自然科学版) [J], 2007, 47(11): 1941

[5] Murr L E, Gaytan S M, Ceylan A *et al. Acta Materialia*[J], 2010, 58(5): 1887

[6] Filippini M, Beretta S, Patriarca L *et al*. *Procedia Engineering* [J], 2011, 10: 3677

[7] Lei Lili(雷利利), Wang Yang(王　洋). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*(农业机械学报)[J], 2006, 37(09): 190

[8] Guo C, Ge W, Lin F. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 217: 148

[9] Li Xiaorong(李小榕). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014

[10] Tolosa I, Garciandía F, Zubiri F *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2010, 51(5-8): 639

[11] Guo Chao(郭　超), Lin Feng(林　峰), Ge Wenjun(葛文君). *Chinese Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2014, 50(21): 152

[12] Karlsson J, Snis A, Engqvist H *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2013, 213(12): 2109

Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V and 316L Stainless Steel Impeller Body Made by Electron Beam Selective Melting

Zhou Bin[1], Zhang Ting[1], Lin Feng[1], Guo Chao[1], Cai Zhenming[2], Kong Xiao[2]

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Shanghai Electric Power Station Equipment Co., Ltd, Shanghai Steam Turbine Factory, Shanghai 200240, China)

Abstract: Ti6Al4V impeller body and 316L stainless steel impeller body were formed by electron beam selective melting (EBSM). By comparing the microstructure, dimensional accuracy, surface roughness, density and tensile strength of the impeller body, the feasibility of applying EBSM process in industrial impeller body manufacturing was evaluated. The results show that the tensile strengths of Ti6Al4V and 316L stainless steel impeller body are 560~700 MPa and 996~1120 MPa, respectively, which are higher than the standard level of wrought, meeting the requirements of industrial use. The microstructure in the Ti6Al4V impeller body is basket-weave $\alpha+\beta$, except those in leaf fragments are coarse flakes $\alpha+\beta$ phase because of their smaller cross-sections, and there are columnar crystals along the building direction. While the 316L stainless steel microstructure in the impeller body presents scaly scan path fusion marks, and there are some coarse dendrites.

Key words: additive manufacturing; electron beam selective melting; microstructures; mechanical properties; impeller body

---

Corresponding author: Lin Feng, Ph. D., Professor, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China, Tel: 0086-10-62788675, E-mail: linfeng@tsinghua.edu.cn