

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.02.001

增材制造钛合金微观组织及性能研究进展

张世凯¹, 马盼^{1,2*}, 柯林达³, 马永超⁴, 赵健^{1,2}, 于治水^{1,2}, 杨尚磊^{1,2}

(1. 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620; 2. 上海市激光先进制造技术协同创新中心, 上海 201600;
3. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 4. 山推工程机械股份有限公司, 山东 济宁 272073)

摘要:随着增材制造技术的不断进步,增材制造能够快速成型精密复杂的结构部件。为了使增材制造 Ti6Al4V 合金能够更好地被应用,国内外学者研究了基板预热、激光功率、扫描速率以及后续的处理等多种因素对于增材制造 Ti6Al4V 合金微观组织和力学性能的影响,发现选择适当的工艺参数及后处理能够提高其综合力学性能。目前,增材制造钛合金在微观结构上还存在一定的缺陷,结构件内的微小气孔以及未融化颗粒等因素阻碍着其力学性能的提高。未来在解决组织缺陷的同时,增材制造钛合金构件的应用也将是今后研究工作方向之一。

关键词:增材制造;Ti6Al4V 合金;基板预热;激光功率;扫描速率;微小气孔;未融化颗粒

中图分类号:TF124

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2019)02-0001-05

Microstructure and Properties of Ti6Al4V Alloy Fabricated with Additive Manufacturing

ZHANG Shikai¹, MA Pan^{1,2*}, KE Linda³, MA Yongchao⁴,
ZHAO Jian^{1,2}, YU Zhishui^{1,2}, YANG Shanglei^{1,2}

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai 201600, China;

3. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201620, China;

4. Shantui Construction Machinery Co., Ltd., Jinan, Shandong 272073, China)

Abstract: The continuous development of additive manufacturing technology enables rapid prototyping of complex structural components. To make the additive manufacturing Ti6Al4V alloy better applied, the effects of substrate preheating, laser power, scanning rate and subsequent processing on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy were studied by domestic and foreign scholars. It was found that the selection of appropriate process parameters and post-treatment can improve the comprehensive mechanical properties. At present, the microstructure of titanium alloy has certain defects, the micropores and unmelted particles in the components hinder the improvement of mechanical properties. In the future, while solving microstructure defects, the application of additive manufacturing titanium alloys components will be one of the future research directions.

Keywords: additive manufacturing; Ti6Al4V alloy; substrate preheating; laser power; scanning rate; micropores; unmelted particles

1 钛合金概述

钛合金是以钛为基体加入其他合金元素而构成的有色合金,钛合金中常用的合金元素有铝、锡、钒、钼、

铬、铁、硅及铜等。钛合金因密度小、比断裂韧性高、耐热性好、疲劳强度和抗裂纹扩展能力好、韧性及抗腐蚀能力强被广泛关注并获得大量应用^[1]。其中 Ti6Al4V

收稿日期:2018-08-10;修回日期:2018-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(051601110);上海市“创新行动计划”基础研究领域项目(17JC1400600);上海市“创新行动计划”基础研究领域项目(17JC1400601)。

第一作者简介:张世凯(1992),男,山东德州人,硕士,主要从事金属增材制造方面的研究工作。通信作者:马盼(1986),女,山东泰安人,副教授,硕士生导师,博士,主要从事金属增材制造/金属非平衡凝固方面的研究工作。E-mail:mapan@sues.edu.cn

合金是钛合金中使用比重最大的合金,其使用量已占据全部钛合金使用量的75%~85%,其余的很多钛合金都可以被看成是Ti6Al4V合金的改型。Ti6Al4V合金是 $\alpha + \beta$ 合金,组织比较稳定,有良好的韧性、塑性和高温变形性能。目前,钛合金的应用已涉足航空航天、汽车以及医疗等多个行业^[2]。

随着航空航天结构件一体化及轻量化发展趋势,传统的Ti6Al4V制备方法已经难以满足对精密复杂零件的需求,增材制造技术的出现解决了Ti6Al4V合金精密构件制造的难题。增材制造无需机械加工或任何模具,仅利用Pro/E、UG和CATIA等三维造型软件设计出的三维模型就可通过逐层固化叠加的方式直接成型复杂的精密构件。目前增材制造高性能的精密钛合金构件主要有激光选区熔化(selective laser melting, SLM)、电子束选区熔化(electron beam melting, EBM)两种方法。为了使增材制造Ti6Al4V合金构件能更好地应用于各行各业,学者们对SLM、EBM增材制造的Ti6Al4V合金进行了大量的研究。

2 增材制造钛合金微观组织研究

2.1 SLM成型Ti6Al4V钛合金的微观组织研究

激光选区熔化是通过高能激光熔化固体的粉末材料,然后通过逐层铺粉、逐层冷却固化,最终叠加上成三维零件的快速成型技术。朱加雷等^[3]研究了不同激光功率和扫描速度对SLM成型Ti6Al4V合金显微组织的影响。他选取多种不同的激光功率,发现当扫描速度不变,激光功率不断升高时,在Ti6Al4V钛合金显微组织中可以观察到与针状马氏体相似的结构增多,此组织结构是片状 α 相和晶间 β 相,而且激光功率越大,细针状 α 相的分布越均匀^[4]。He等^[5]研究了SLM制备的致密度接近98.3%的Ti6Al4V合金不同沉积方向上的显微组织,发现在XY方向上形成了胞状初生 β 晶粒,而在XZ和YZ方向上形成了柱状 β 初生晶粒,柱状晶沿着沉积层的沉积方向生长;此外,在XY、XZ、YZ3个方向上都显示有细小的针状 α' 马氏体。

梁晓康等^[6]研究了SLM制备Ti6Al4V钛合金及退火处理后的显微组织。研究发现垂直于堆积(xy方向)截面和平行于堆积(xz、yz方向)截面的显微组织有明显的不同。垂直于堆积方向截面的显微组织主要由针状马氏体 α' 相以及 β 相组成,平行于堆积方向截面的显微组织主要由粗大的初生 β 柱状晶构成,柱状晶主轴基本沿Ti6Al4V钛合金材料堆积方向。晶内呈现典型的魏氏 $\alpha + \beta$ 板条组织。退火处理后,针状 α

相的体积分数有所增加, α 板条发生一定的粗化。蒋军杰等^[7]发现SLM成型Ti6Al4V的微观组织为细针状 α' 马氏体,退火后组织粗化。Ti6Al4V合金试件侧面的显微组织是由贯穿多个熔覆层呈外延生长的 β 柱状晶粒组成,正面组织呈网格状,与激光扫描路径的层间旋转角度基本吻合。肖振楠等^[8]研究了SLM成型的Ti6Al4V钛合金在退火、两相区固溶及固溶时效3种热处理工艺下显微组织的变化。合金中观察到了细针状马氏体显微组织,几乎无 β 相,但通过840℃/2h/空冷退火处理后,Ti6Al4V钛合金的显微组织由 $\alpha + \beta$ 相构成;经940℃/1h/水淬固溶处理后, β 相的含量增加,晶粒变大,形成了 $\alpha + \beta$ 网篮状的交错组织;经940℃/1h/水淬和540℃/4h/空冷固溶时效处理后,形成了均匀弥散的 $\alpha + \beta$ 相,且 α 相变粗。

Zhang等^[9]研究了SLM制备Ti6Al4V合金在精锻和水淬火后的显微组织变化,发现Ti6Al4V合金试样的原始相为 α 相,经过精锻和水淬火后, β 相含量明显增加。Vrancken等^[10]研究了热处理工艺(先是热锻,再是退火)对SLM制备的Ti6Al4V合金显微组织的影响。发现当热处理温度低于 β 转变温度时,原马氏体 α' 相转变为 α 和 β 的层状混合物;当热处理温度高于 β 转变温度时,晶粒长大,形成大的 β 晶粒,冷却后向片状 $\alpha + \beta$ 转变。杨晶晶等^[11]研究了SLM成型Ti6Al4V合金的 β 转变温度。发现合金内的组织由原柱状 β 晶粒和与生长方向呈大约 $\pm 45^\circ$ 的针状马氏体组成。它的 $\alpha + \beta/\beta$ 相转变温度约为980℃,与铸造和锻造Ti6Al4V钛合金的 β 转变温度相近。SLM成型Ti6Al4V钛合金的过程中,裂纹是最常见、破坏性最大的一种缺陷。张升等^[12]研究了SLM成型Ti6Al4V钛合金过程中的裂纹和开裂行为及其成型机理,发现网篮状马氏体组织和温度梯度所导致的残余应力是产生裂纹的主要原因。SLM成型过程中极易积聚热应力,引起工件的变形和开裂。合适的热处理工艺能够释放由于快熔急凝过程所产生的残余应力,控制 $\alpha \rightarrow \beta$ 相的转变,调整相的形状、大小和含量,优化合金的显微组织和力学性能^[13]。

2.2 EBM成型Ti6Al4V钛合金的微观组织研究

电子束选区熔化成型是在真空环境下以电子束为热源,以金属粉末为成型材料,高速扫描加热预置粉末,通过逐层熔化叠加,获得金属零件。周斌等^[14]研究了EBM成型Ti6Al4V钛合金叶轮体的显微组织,发现叶轮体内部存在沿成型方向生长的柱状晶,组织为网篮状,而成型截面较小的区域晶粒较为粗大,为粗片

状的 $\alpha + \beta$ 相。葛文君等^[15]研究了不同体能量密度(P/V , 激光功率/扫描速率)下 EBM 成型 Ti6Al4V 合金的显微组织,发现合金内部组织为细针状马氏体、魏氏组织和网篮组织,细针状马氏体位于成型试样的顶部;随着体能量密度的增加马氏体区高度由 7~8 个铺粉层厚增加到 22~25 个铺粉层厚,内部组织由细长状魏氏组织变为魏氏组织和网篮组织组成的双态组织,片状 α 相的厚度也由 1~2 μm 增加到 2~4 μm 。

Safdar 等^[16]对 EBM 成型 Ti6Al4V 合金的微观组织进行了研究。发现在初始凝固过程中形成初生 β 相柱状形貌,其生长方向平行于沉积方向。EBM 制备 Ti6Al4V 合金的显微组织在 β 晶界处含有一定的 β 相,比金属铸造得到的 β 相更精细^[17]。Murr 等^[18]研究了 EBM 制备的 Ti6Al4V 合金的显微组织,发现合金内部组织以 α 相为主,相邻 α 相之间存在着小尺寸的 β 相。

通过以上对 SLM 和 EBM 成型 Ti6Al4V 合金的显微组织分析可发现,由于 SLM 法无需预热,冷却速率较大,其微观组织主要为 α' 马氏体;而 EBM 法需进行预热,冷却速率相对较小, Ti6Al4V 合金的微观组织是由 α 相和少量的 β 相组成^{[9]4}。虽然由于成型工艺不同导致显微组织上存在着差异,但是 SLM 和 EBM 成型 Ti6Al4V 合金的显微组织在平行于沉积方向上都具有初生 β 相柱状形貌。

3 增材制造钛合金性能的研究

3.1 疲劳性能的研究

3.1.1 SLM 成型 Ti6Al4V 合金的疲劳性能研究

与传统工艺制备的 Ti6Al4V 合金构件相比,由于 SLM 成型 Ti6Al4V 合金的显微组织中存在细针状马氏体相,导致其抗疲劳性较差^[19-20]。Hooreweder 等^[21]研究了消除应力与热等静压、热等静压与化学腐蚀后处理对 SLM 成型的 Ti6Al4V 合金构件疲劳寿命的影响。发现消除应力和热等静压处理后 Ti6Al4V 合金疲劳强度(10^6 周次)从 320 MPa 提高到 420 MPa;而通过热等静压和化学腐蚀先后处理的部件的疲劳强度(10^6 周次)提升幅度更大,约提高到了 640 MPa。疲劳强度是影响 SLM 制备的 Ti6Al4V 合金假体能否成功植入人体组织的关键因素之一。Benedetti 等^[22]研究了喷丸加工、热等静压及电解抛光 3 种后处理工艺对 SLM 制备 Ti6Al4V 合金的疲劳强度的影响。发现喷丸处理所产生较高的残余压应力能够减少疲劳裂纹的产生;热等静压处理能够熔化未熔融 Ti6Al4V 颗粒并且可以通过降低孔隙率来提高疲劳强度。这 2 种后处理方法是

提高 Ti6Al4V 合金疲劳性能的最有效的办法,使其疲劳强度和传统技术制造的 Ti6Al4V 合金疲劳性能相当。

3.1.2 EBM 成型 Ti6Al4V 合金的疲劳性能研究

Rafi 等^{[23]4}研究发现由于 EBM 制备 Ti6Al4V 合金的层状相显微组织导致其疲劳强度性能较差,仅为 340 MPa。王哲^{[24]4}研究了 EBM 成型 Ti6Al4V 合金的疲劳性能,发现经热等静压处理后,合金显微组织 α 相片层变厚,呈短粗状,具有很强的抗疲劳裂纹扩展能力;由于试样内部孔洞缺陷减少,避免了由孔洞缺陷直接导致裂纹源的形成,原始试样疲劳强度(10^7 周次)由 400 MPa 提高至 550 MPa。刘岩^[25]也研究了 EBM 成型 Ti6Al4V 合金的疲劳性能,发现经过热等静压处理后, Ti6Al4V 合金光滑试样的疲劳强度从原始态试样的 450 MPa 提高到 550 MPa。但是,经热等静压处理后,缺口试样存在的气孔被消除,导致其裂纹方向只沿着主裂纹方向扩展,而不会产生二次裂纹(二次裂纹的存在会减少主裂纹方向的能量,降低疲劳裂纹扩展速率),因此扩展速率加快,使得缺口试样的疲劳强度从原始态的 350 MPa 降低至热等静压态的 250 MPa。由于 SLM 制备 Ti6Al4V 合金显微组织内马氏体能够阻碍位错运动,使得其成型的合金疲劳性能优于 EBM 成型 Ti6Al4V 合金疲劳性能。

3.2 耐磨性能的研究

3.2.1 SLM 成型 Ti6Al4V 合金的耐磨性能研究

陈旭斌等^[26]研究发现经热处理的 SLM 制备 Ti6Al4V 试样比传统方法制备的 Ti6Al4V 试样具有更低的摩擦因数和磨损率。滑动摩擦初期,磨粒磨损占主导,逐渐地黏着磨损发生并占主导作用。Zhu 等^[27]研究了 3 种不同工艺制备 Ti6Al4V 试样(锻造加工, SLM, SLM + 热处理)的摩擦性能。发现经过热处理的样品表面具有保护性的摩擦氧化物并且没有发现塑性变形,而且磨损率最低;锻造加工的试样磨损最严重。Bartolomeu 等^[28]研究了 SLM 制备 5 种不同开孔尺寸(100~500 μm)的多孔 Ti6Al4V 结构件的摩擦性能。发现随着开孔尺寸的减小,支撑摩擦载荷的接触面积越大,耐磨性能越好。

3.2.2 EBM 成型 Ti6Al4V 合金的耐磨性能研究

目前,增材制造钛合金在医学领域的应用具有广阔的空间,主要是用于植入体的制造。但是植入体受到体液和微动的联合作用钛合金通常表现出较差的耐磨性^[29-30],这通常会加速金属碎片的释放,减少植入物的寿命。Bruschi 等^[31]研究了 EBM 制备 Ti6Al4V 合

金的切削加工和随后的热处理对磨损行为的影响。结果表明,与未经热处理的试件相比,经过热处理的试件具有更低的摩擦因数,更低的磨损率和更高的磨损度。切削加工和热处理具有协同效应,可以作为改善 EBM 成型 Ti6Al4V 耐磨性的有效策略。Jia 等^[32]制造的具有 3D 分级(宏观/微纳米)孔隙度的 Ti6Al4V 假体,用传统的微弧氧化技术进行加工,增强了骨结合的性质并提高了 Ti6Al4V 耐磨性能。

3.3 拉伸性能的研究

3.3.1 SLM 成型 Ti6Al4V 合金的拉伸性能研究

He 等^[5]研究了 SLM 制备致密度为 98.3% 的 Ti6Al4V 合金的拉伸性能。发现该方法得到的合金最大抗拉强度为 1 261 MPa,与锻造 Ti6Al4V 合金的拉伸强度基本一致。朱加雷等^[35]研究了 SLM 制备的 Ti6Al4V 合金试件。发现在合适工艺参数($P = 300$ W, $V = 1.5$ m/s)条件下,试件的拉伸强度可达到 1 227 MPa,延伸率至 8.2%。普通退火处理和再结晶退火处理方法都有利于改善材料的塑性性能,采用再结晶退火方法可以提高延伸率至 19.6%,但拉伸强度被不同程度的削弱。然而经固溶时效处理后 β 相向次生片状 α 相组织转变,晶间 β 相组织变得粗大,导致其不但不能提高试样的延伸率,而且强度略有下降。

3.3.2 EBM 成型 Ti6Al4V 合金的拉伸性能研究

王哲等^[24]研究了 EBM 成型 Ti6Al4V 合金和经热等静压处理后 Ti6Al4V 合金的室温拉伸性能。发现 EBM 制备的合金屈服强度(~ 932 MPa)比锻态合金(~ 855 MPa)高出 77 MPa,抗拉强度($\sim 1 002$ MPa)比锻态合金(~ 898 MPa)高出 104 MPa。由于热等静压处理过程中合金组织内位错发生运动,缠结中的位错重新组合,位错密度下降,应力得到释放;此外热等静压处理后 α 相片层粗化,热等静压处理后 Ti6Al4V 合金的屈服强度、抗拉强度均呈现下降趋势。Al-bermani 等^[33]研究了预热温度对 EBM 成型 Ti6Al4V 合金和热等静压处理(~ 920 °C) Ti6Al4V 合金的高温拉伸性能的影响。发现预热温度为 626 ~ 678 °C 范围内成型的 Ti6Al4V 合金的屈服强度和抗拉强度没有明显变化,预热温度为 700 °C 时成型的 Ti6Al4V 合金由于微观组织的粗化导致其屈服强度由 930 MPa 下降到 880 MPa;抗拉强度由 1 030 MPa 下降到 994 MPa。热等静压处理的 Ti6Al4V 合金试样,屈服强度和抗拉强度明显下降,在预热温度 626 ~ 678 °C 范围内经热等静压处理的 Ti6Al4V 合金的屈服强度保持在 870 MPa 左右,抗拉强度保持在 970 MPa 左右。预热温度为 700 °C 成

型并且经热等静压处理的 Ti6Al4V 合金 α 相粗大,显微组织明显粗化,导致屈服强度降低到 840 MPa 左右,抗拉强度降低到 940 MPa 左右。

4 结语

目前工业制造领域发展较快,结构形式多样,因此对加工和材料的要求相应提高。钛合金的特性拓展了其在工业制造领域的应用范围。对 Ti6Al4V 合金来说,传统的制备方法已经难以满足对精密零件的要求,而增材制造技术可以解决此类问题。

由于 SLM 法制备的 Ti6Al4V 合金试件内存在 α' 马氏体微观组织,EBM 法制备的 Ti6Al4V 合金试件内存在层状相微观结构,所以增材技术制备的合金的疲劳性能差于传统方法制备的 Ti6Al4V 合金。而 SLM 与 EBM 相比,SLM 法制备的合金试件疲劳性能好于 EBM 法制备的合金试件,这主要得益于 SLM 成型时其内部马氏体结构能够阻碍位错运动。不管是传统方法还是增材制造方法,Ti6Al4V 合金的耐磨性都比较差。在增材制造上,可以通过热等静压处理和热处理提高 SLM 和 EBM 成型试件的疲劳性能和耐磨性能。SLM 法制备的合金马氏体微观组织结构使其拉伸强度比 EBM 法制备的合金高,而 EBM 法制备的合金内部的层状 α 相微观组织使其具有较高的塑性。退火处理虽能够提高 SLM 成型延伸率,但其拉伸强度下降。经热等静压处理后,由于 EBM 成型的合金组织内发生位错运动,位错密度下降, α 相片层粗化,导致其屈服强度降低,拉伸强度也降低。

虽然增材制造技术能够制造复杂精密的结构部件,但其制造成本较高,难以得到广泛的应用。增材制造制备钛合金结构件,虽然大幅度提高了结构件的综合性能,但是在微观结构仍然存有一定的缺陷,结构件内的微小气孔使其疲劳性能严重降低。优化内部缺陷、低成本、稳定性、产业化及多领域的方向发展需作进一步研究。

参考文献:

- [1] 何阳,屈孝和,王越,等. 钛合金的发展及应用综述[J]. 装备制造技术,2014(10):160-161.
- [2] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报,2014,34(4):44-50.
- [3] 朱加雷,王凯,马桂殿,等. TC4 钛合金激光选区熔化成形性能研究[J]. 应用激光,2017(6):793-800.
- [4] ZHOU B, ZHOU J, LI H X, et al. A study of the microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by SLM under vacuum[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 724:1-10.
- [5] HE Beibei, WU Wenheng, ZHANG Liang, et al. Microstructural characteristic and mechanical property of Ti6Al4V alloy fabricated by

- selective laser melting[J]. Vacuum, 2018, 150:79–83.
- [6] 梁晓康,董鹏,陈济轮,等. 激光选区熔化成形 Ti6Al4V 钛合金的显微组织及性能[J]. 应用激光, 2014, 34(2):101–104.
- [7] 蒋军杰. 激光选区熔化成型医用 Ti6Al4V 合金的组织 and 性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015:86.
- [8] 肖振楠,刘婷婷,廖文和,等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金热处理后微观组织和力学性能[J]. 中国激光, 2017, 44(9):81–89.
- [9] ZHANG Qi, LIANG Zhenglong, CAO Miao, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy prepared by selective laser melting combined with precision forging [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(5):1036–1042.
- [10] VRANCKEN B, THIJS L, KRUTH J P, et al. Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting: microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 541:177–185.
- [11] 杨晶晶,喻寒琛,王泽敏,等. 激光选区熔化成形 TC4 合金的 β 转变温度[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(9):80–85.
- [12] 张升,桂睿智,魏青松,等. 选择性激光熔化成形 Ti6Al4V 钛合金开裂行为及其机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23):21–27.
- [13] HAN Jianchao, XIAO Shulong, TIAN Jing, et al. Microstructure characterization and tensile properties of a Ni-containing TiAl-based alloy with heat treatment[J]. Rare Metals, 2016, 35(1):26–34.
- [14] 周斌,张婷,林峰,等. 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[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(1):175–180.
- [15] 葛文君,郭超,林峰. 工艺参数对电子束选区熔化成形 Ti6Al4V 合金显微组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(12):3215–3218.
- [16] SAFDAR A, WEI L Y, SNIS A, et al. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti6Al4V [J], Materials Characterization, 2012, 65:8–15.
- [17] GUZLAR A, AKHTER J I, AHMAD M, et al. Microstructure evolution during surface alloying of ductile iron and austempered ductile iron by electron beam melting[J]. Applied Surface Science, 2010, 255(20):8527–8532.
- [18] MURR L E, GAYTAN S M, RAMIREZ D A, et al. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies[J]. Journal Materials Science&Technology, 2012, 28(1):1–14.
- [19] VAN HOOREWEDER B, BOONEN R, MOENS D, et al. On the determination of fatigue properties of Ti6Al4V produced by selective laser melting [C]//AIAA Structures, Structural Dynamic and Materials Conference. Honolulu, Hawaii, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics(AIAA), 2012:23–26.
- [20] VAN HOOREWEDER B, MOENS D, BOONEN R, et al. Analysis of fracture toughness and crack propagation of Ti6Al4V produced by selective laser melting[J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14(1/2):92–97.
- [21] VAN HOOREWEDER B, APERS Y, LIETAERT K, et al. Improving the fatigue performance of porous metallic biomaterials produced by selective laser melting[J]. Acta Biomaterialia, 2016, 47:193–202.
- [22] BENEDETTI M, TORRESANI E, LEONI M, et al. The effect of post-sintering treatments on the fatigue and biological behavior of Ti6Al4V ELI parts made by selective laser melting [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 71:295–306.
- [23] RAFI H K, KARTHIK N V, GONG Haijun, et al. Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(12):3872–3883.
- [24] 王哲. EBM 法 Ti6Al4V 合金组织与力学性能研究[D]. 沈阳:沈阳大学, 2013:77.
- [25] 刘岩. EBM 快速成型 Ti6Al4V 合金的疲劳性能研究[D]. 沈阳:沈阳大学, 2018:68.
- [26] 陈旭斌,葛翔,祝毅,等. 选择性激光熔化零件微观结构及摩擦学性能研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3):63–72.
- [27] ZHU Y, CHEN X, ZOU J, et al. Sliding wear of selective laser melting processed Ti6Al4V under boundary lubrication conditions [J]. Wear, 2016, 368/369:485–495.
- [28] BARTOLOMEU F, SAMPAIO M, ALVES N, et al. Tribological behavior of Ti6Al4V cellular structures produced by selective laser melting [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 69:128–134.
- [29] NIINOMI M. Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2008, 1(1):30–42.
- [30] MOLINARI A, STRFFELINI G, TESI B, et al. Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy [J]. Wear, 1997, 208(1/2):105–112.
- [31] BRUSCHI S, BERTOLINI R, GHIOTTI A. Coupling machining and heat treatment to enhance the wear behaviour of an additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy [J]. Tribology International, 2017, 116:58–68.
- [32] JIA Zhaojun, LI Ming, XIU Peng, et al. A novel cytocompatible, hierarchical porous Ti6Al4V scaffold with immobilized silver nanoparticles[J]. Materials Letters, 2015, 157:143–146.
- [33] AL-BERMANI S S, BLACKMORE M L, ZHANG W, et al. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti6Al4V [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(13):3422–3434.