

DOI: 10.11973/jxgccl202011017

# 激光选区熔化制备超薄铝合金板的可行性及力学性能

刘正武<sup>1,2</sup>, 时云<sup>1,2</sup>, 王毅<sup>1</sup>, 郝云波<sup>1,2</sup>, 崔宇涛<sup>1</sup>, 朱小刚<sup>1,2</sup>

(1. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245;

2. 上海复杂工程技术研究中心, 上海 200245)

**摘要:** 利用激光选区熔化(SLM)技术制备厚度为0.1~0.8 mm的AlSi10Mg铝合金薄板以及内腔间隙为0.5 mm的中空板,研究了薄壁结构SLM成形的可行性及成形件的力学性能。结果表明:SLM技术能够成形出壁厚0.2 mm以上的薄板以及空腔间隙0.5 mm的空心板,但厚度0.5, 0.6 mm的薄板出现空心现象,通过减小光斑尺寸及调整轮廓工艺参数进一步提高了SLM成形薄板的精度,避免出现空心薄板;SLM成形薄板及经T6热处理后的抗拉强度均超过200 MPa, 0.7 mm厚试样的力学性能较好;采用试验用SLM参数能够打印出薄壁、封闭腔散热器产品。

**关键词:** 激光选区熔化;铝合金;薄壁板;可行性;拉伸性能

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)11-0097-05

## Feasibility and Mechanical Properties of Ultra-thin Aluminum Alloy Sheet Prepared by Selective Laser Melting

LIU Zhengwu<sup>1,2</sup>, SHI Yun<sup>1,2</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, HAO Yunbo<sup>1,2</sup>, CUI Yutao<sup>1</sup>, ZHU Xiaogang<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing General Factory Co., Ltd., Shanghai 200245, China;

2. Shanghai Engineering Research Center for Additive Manufacturing of Complex Metal Components, Shanghai 200245, China)

**Abstract:** AlSi10Mg aluminum alloy thin sheets with thickness of 0.1—0.8 mm and hollow sheets with inner cavity gap of 0.5 mm were prepared by selective laser melting (SLM) technique. The feasibility of thin-walled structure SLM forming and mechanical properties of the formed parts were studied. The results show that the SLM technique could form thin sheets with wall thickness of more than 0.2 mm and hollow sheets with a cavity gap of 0.5 mm, but there was a hollow in the sheets with thickness of 0.5, 0.6 mm. The precision of SLM formed sheets was further improved by reducing the spot size and adjusting the contour process parameters, and the hollow thin sheet was avoided. The tensile strength of SLM formed and T6 heat-treated thin sheets were both over 200 MPa, and the specimen with thickness of 0.7 mm showed better mechanical properties. Adopting the test SLM process parameters could print thin-walled, closed-cavity radiator products successfully.

**Key words:** selective laser melting; aluminum alloy; thin-walled sheet; feasibility; tensile property

## 0 引言

随着航天技术的快速发展,卫星、雷达等产品不断追求极限性能,这对其复杂精密结构件制造技术的要求越来越高。薄壁结构在散热、零件精密化制

造方面应用广泛,然而采用传统加工技术制备薄壁产品时极易产生穿孔、翘曲、鼓包等问题,加工困难,成品率低。激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术是近年发展起来的一种激光快速成形技术,其基于三维数字模型,利用高能束激光逐层熔化金属粉末,层层堆叠,实现精密零部件的直接制造<sup>[1-2]</sup>。SLM技术具有制备产品尺寸精度高、产品性能优良、制造一体化等优势,能够高效、快速地响应航天装备设计变化,灵活适应复杂精密构件的生产制造。卫星、雷达等产品的散热器、集热器等零件

收稿日期: 2020-08-05; 修订日期: 2020-09-18

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1106100); 上海市科技人才计划基金资助项目(19XD1431600); 上海复杂金属构件增材制造工程技术研究中心资助项目(14DZ2253600)

作者简介: 刘正武(1990—),男,上海人,工程师,硕士

普遍具有薄壁翅片、空腔板、弯曲流道结构,甚至具有封闭腔结构,非常适合采用 SLM 技术进行制备。

目前,SLM 技术的研究主要涉及工艺参数优化、装备研制、软件开发、力学性能与组织控制等方面<sup>[3-6]</sup>,有关复杂薄壁类结构的成形可行性及性能研究未见报道。为此,作者以航空航天广泛应用的 AlSi10Mg 铝合金为研究对象,验证了 SLM 技术制备薄壁结构的可行性,然后测试了成形薄壁件的力学性能,分析了成形原理,并试制了薄壁封闭腔结构散热器产品,以期为具有薄壁内腔零件的 SLM 成形提供基础数据积累,为航天用难加工产品的设计和研制提供创新思路。

## 1 试样制备与试验方法

试验原材料为 AlSi10Mg 铝合金粉末,形貌及主要化学成分如图 1 及表 1 所示。可见粉末形貌为近圆形或椭圆形,粒径在 15~53  $\mu\text{m}$ 。

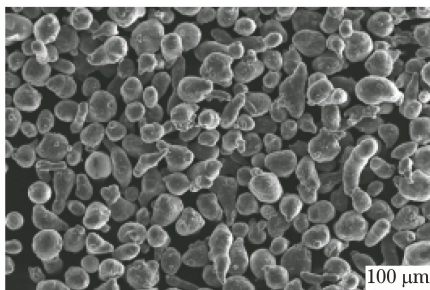


图 1 AlSi10Mg 铝合金粉末形貌

Fig. 1 Morphology of AlSi10Mg aluminum alloy powder

表 1 AlSi10Mg 铝合金粉末的化学成分(质量分数)

alloy powder (mass)										%
Si	Mg	Fe	N	O	Ti	Zn	Mn	Ni	Cu	
9.94	0.27	0.15	0.004	0.12	0.009	0.004	0.002	0.003	0.004	

使用雷尼绍 AM250 激光选区熔化设备制备 AlSi10Mg 铝合金板。基于团队前期研究结果<sup>[7-8]</sup>选取工艺参数:激光功率为 400 W,光斑直径为 135  $\mu\text{m}$ ,光点间距为 140  $\mu\text{m}$ ,预热温度为 80  $^{\circ}\text{C}$ ,铺粉层厚度为 25  $\mu\text{m}$ 。

首先采用上述工艺参数进行不同厚度实心薄壁板成形可行性试验,三维模型尺寸为 15 mm  $\times$  (0.1~0.8) mm  $\times$  15 mm(长 $\times$ 宽 $\times$ 高),共计 8 片试样。然后采用 SLM 技术成形中空薄壁板,空腔模型内腔间隙为 0.5 mm,两侧壁厚在 0.1~0.7 mm,长度和高度均为 15 mm,共计 7 片试样。最后制备 7 组薄板室温拉伸试样,试样形状和尺寸如图 2 所示,设

计厚度为 0.1~0.7 mm,每个厚度下分别成形 6 根平行试样。通过线切割机将拉伸试样取下,对其表面打磨以去除黏渣等杂质,每组取 3 根试样进行 T6 热处理,即在 (530 $\pm$ 5)  $^{\circ}\text{C}$  下保温 2 h 水冷,然后在 (170 $\pm$ 5)  $^{\circ}\text{C}$  下保温 8 h 空冷。按照 GB/T 228.1—2010,使用 Instron 万能试验机对成形态试样和热处理态试样进行室温拉伸试验,拉伸速度为 2 mm  $\cdot$  min<sup>-1</sup>,并与常规厚度(2 mm)试样进行对比。激光选区熔化纵向力学性能一般最低,故测试纵向力学性能。

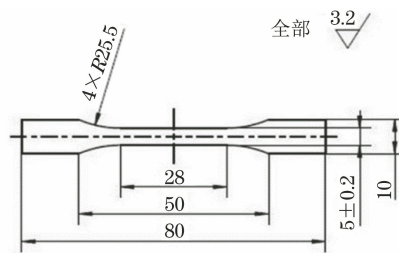


图 2 薄壁拉伸试样的形状及尺寸

Fig. 2 Shape and size of thin-walled tensile specimen

对薄板试样截面进行磨抛处理,用 Keller 溶液(HF, HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O 的体积比为 1:1.5:2.5:95)腐蚀约 20 s,利用 NOVA navoSEM 450 型扫描电子显微镜观察显微组织。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 薄板 SLM 成形可行性

由图 3(a)可以看出,0.2~0.8 mm 厚的 AlSi10Mg 铝合金薄板均可成形,但 0.5,0.6 mm 厚

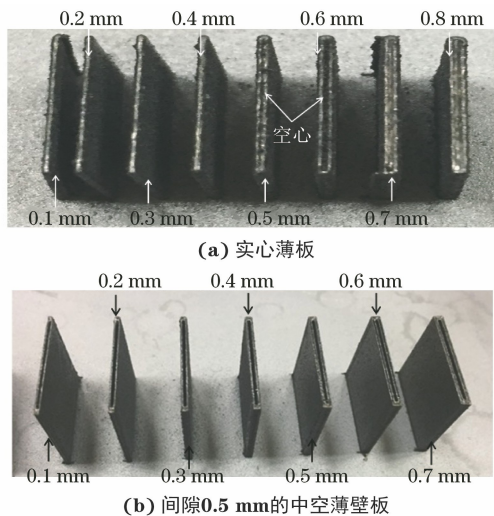


图 3 不同设计壁厚下 AlSi10Mg 铝合金薄板的 SLM 成形宏观形貌

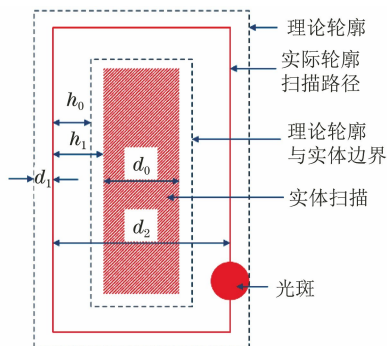
Fig. 3 Macromorphology of AlSi10Mg aluminum alloy thin sheets with different designed thickness formed by SLM: (a) solid thin sheets and (b) hollow thin sheets with 0.5 mm gap

薄板两侧轮廓发生剥离出现轻微空心现象。此外,0.1 mm 薄板的实测厚度约为 0.2 mm,说明试验所用激光选区熔化技术可成形薄板的壁厚最小为 0.2 mm。间隙为 0.5 mm 的中空薄板亦可成形,但 0.5,0.6 mm 厚中空薄板两侧板壁同样出现空心现象。

## 2.2 薄壁结构 SLM 成形原理

如图 4 所示,薄板的 SLM 成形包括轮廓扫描和实体扫描两个步骤,即激光束实际扫描的路径包括轮廓及内部填充实体两部分。轮廓可以多次扫描,此处只分析轮廓扫描一次的情况。图 4 中  $d_0, h_0, h_1$  均可以通过工艺参数进行设置,但受到光斑尺寸限制;理论上光斑尺寸越小,上述参数取值越小。薄板两侧轮廓通常都需要进行扫描,但实体部分视  $d_2$  大小决定是否扫描,若  $d_2 \leq 2h_1$ ,不扫描实体;若  $d_2 > 2h_1$ ,扫描实体。SLM 成形薄板的理论壁厚  $B_0$  为

$$\begin{cases} B_0 = 2d_1 + d_2 & (d_2 \leq 2h_1) \\ B_0 = d_0 + 2d_1 + 2h_1 & (d_2 > 2h_1) \end{cases} \quad (1)$$



$d_0$  为实体设计厚度; $d_1$  为额外光点补偿距离; $d_2$  为两侧轮廓间距;  
 $h_0$  为理论偏移扫描距离; $h_1$  为实际轮廓扫描与实体扫描距离

图 4 薄板 SLM 成形原理示意

Fig. 4 Schematic of SLM forming principle of thin sheet

试验用激光光斑直径为 0.135 mm,单道扫描宽度约为 0.2 mm, $d_1$  设置为 0.105 mm, $h_1$  设置为 0.23 mm。由图 5 结合成形原理分析可知:当  $B_0$  不大于 0.67 mm 时,薄板成形过程中激光束只扫描两侧轮廓,但当  $B_0$  在 0.1~0.4 mm 时,轮廓两道扫描间距可由光点补偿覆盖,两道轮廓可以重叠,薄板为实心;当  $B_0$  在 0.5~0.6 时,光点补偿不能覆盖轮廓两道扫描间距,轮廓分离,薄板出现间隙; $B_0$  为 0.7,0.8 mm 时,激光束开始扫描实体,将薄板填充为实心。由表 2 可以看出,成形试样的实测壁厚  $B_1$  与理论壁厚  $B_0$  相符合。

综上可知,决定 SLM 薄板成形的主要参数为

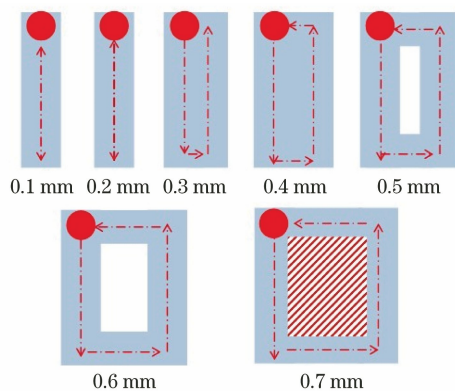


图 5 厚度 0.1~0.7 mm 薄板的 SLM 成形过程

Fig. 5 SLM forming process of thin plate with thickness of 0.1~0.7 mm

表 2 实心薄壁板的成形尺寸

Table 2 Forming size of solid thin plates

设计壁厚 $B$ /mm	理论壁厚 $B_0$ /mm	实测壁厚 $B_1$ /mm
0.1	0.21	0.20
0.2	0.21	0.22
0.3	0.30	0.31
0.4	0.40	0.41
0.5	0.50	0.49
0.6	0.60	0.59
0.7	0.70	0.71
0.8	0.80	0.81

$d_1$  和  $h_1$ ,两者均由光斑直径决定。理论上,在薄板壁厚不小于粉末尺寸的情况下,SLM 薄板成形极限尺寸由  $d_1$  决定,光斑直径越小, $d_1$  越小。通过使用小光斑激光器可以提高 SLM 技术的精密成形能力;通过变光斑技术,在轮廓区域使用小光斑可以提高精度,在实体区域使用大光斑高功率可以提高成形效率。此外,理论上通过设置使  $d_1 = h_1$ ,可以避免空心薄板出现的情况。中空薄板两侧壁板成形原理与上述单层薄板的一致,不再赘述。

## 2.3 显微组织

选取设计壁厚为 0.1 mm(实际壁厚 0.2 mm)的试样进行显微组织分析。由图 6 可知:SLM 成形薄板试样组织致密,不存在孔洞在层间分布的现象;共晶硅相呈短纤维状沿晶界分布,且其表面光滑,无明显棱角。根据 Al-Si 相图,凝固过程中首先生成  $\alpha$ -Al 初生相,随着温度的降低,生成共晶 Al-Si 相。共晶相一般沿着晶界分布<sup>[9]</sup>,上述显微组织形貌与之相吻合。

## 2.4 薄板室温拉伸性能

由图 7 可知:0.1~0.7 mm 设计厚度的 SLM 成形试样及其经 T6 热处理后的抗拉强度均超过



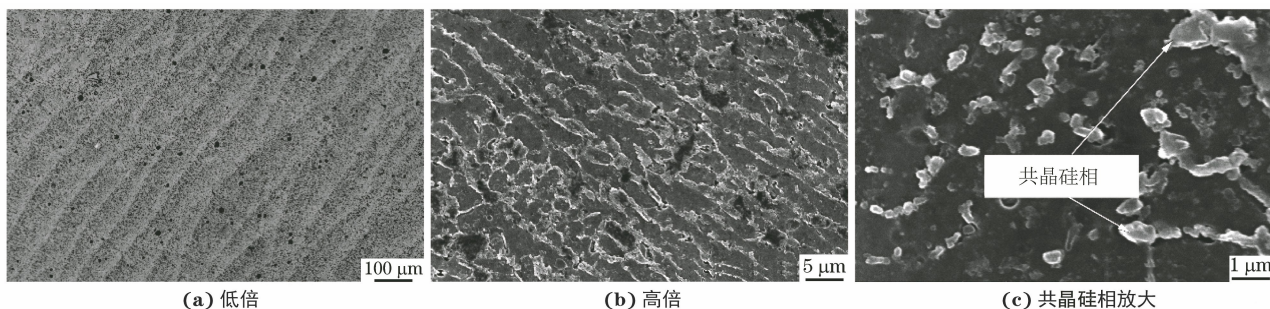


图6 SLM成形设计壁厚0.1 mm AlSi10Mg铝合金薄板截面显微组织

Fig.6 Microstructures of the section of AlSi10Mg aluminum alloy thin sheet formed by SLM with designed thickness of 0.1 mm:

(a) at low magnification; (b) at high magnification and (c) eutectic Si phase amplification

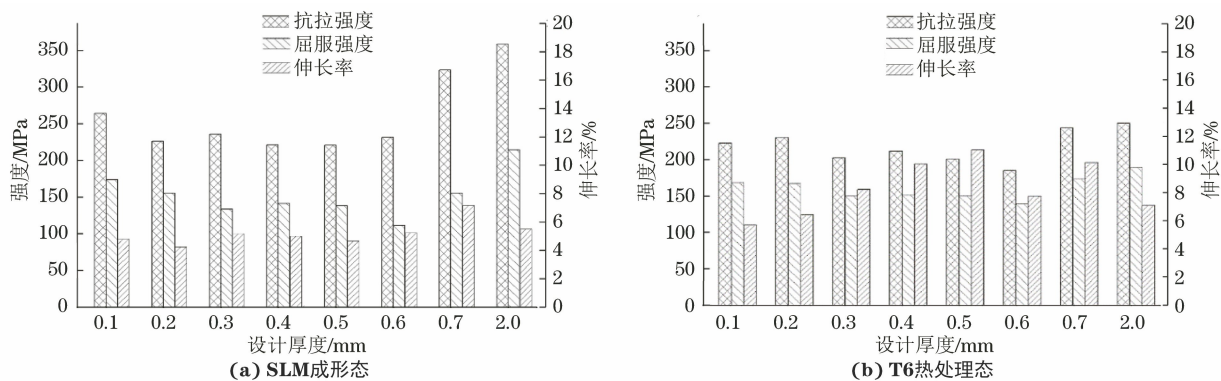


图7 不同设计厚度 SLM 成形态及 T6 热处理态 AlSi10Mg 铝合金薄板的室温拉伸性能

Fig.7 Room temperature tensile properties of SLM formed (a) and T6 heat-treated (b) AlSi10Mg aluminum alloy thin sheets with different designed thickness

200 MPa,虽然总体上略低于常规厚度试样的,但仍具有可观的强度,说明薄壁结构成形件力学性能良好,可满足众多非承力功能器件的使用要求;0.1~0.6 mm厚 SLM 成形试样的强度和伸长率相近,较 0.7 mm 的低,表明 SLM 过程中扫描实体内部可以在一定程度上提高薄板的强度;T6 热处理后薄板试样强度略有降低,塑性得到提高,符合一般的热处理影响规律,T6 热处理对薄板零件同样适用。

## 2.5 薄壁封闭腔结构散热器产品试制

基于上述成形性及力学性能研究,作者对翅片均温板散热器零件进行了一体化打印测试,其三维模型如图 8 所示,包络尺寸为 95 mm×95 mm×40 mm,翅片厚度为 1 mm,翅片内空腔间隙为 0.5 mm,底板内腔高度为 1.2 mm,用于存储液相冷却液,翅片底板预留直径 3 mm 的清粉口,最后通过焊接进行封堵。散热器零件 SLM 成形实物如图 9 所示,表面经喷砂处理,可见零件成形效果良好,内部粉末可通过清粉口清除,表明激光选区熔化技术可应用于薄壁类及中空内腔薄板类产品的研制。

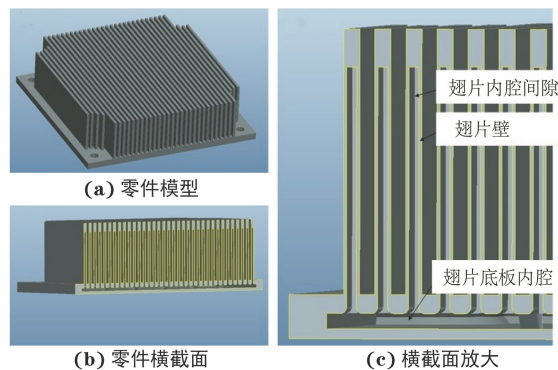


图8 中空内腔薄壁翅片均温板散热器结构示意图

Fig.8 Structure schematic of thin-walled finned temperature plate radiator with hollow cavity: (a) part model; (b) part cross section and (c) amplification of cross section

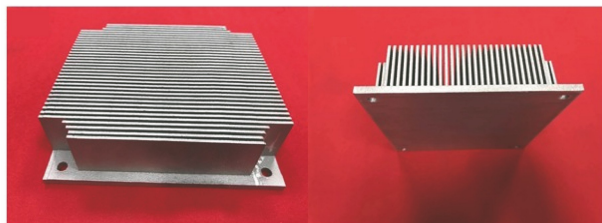


图9 中空内腔薄壁翅片均温板散热器 SLM 成形实物

Fig.9 SLM formed thin-walled finned temperature plate radiator with hollow cavity

### 3 结 论

(1) 试验采用的激光选区熔化工艺可成形壁厚 0.2 mm 以上的 AlSi10Mg 铝合金薄板以及壁厚 0.2 mm 以上、内腔间隙为 0.5 mm 以上的中空薄壁板;板厚小于 0.7 mm 时由两侧轮廓扫描形成薄板,无实体扫描填充,板厚大于 0.7 mm 时有实体填充;厚度 0.5, 0.6 mm 的薄板出现空心现象,通过减小光斑尺寸及调整工艺参数可进一步提高 SLM 技术成形精度,避免出现空心薄板;采用试验工艺参数可成功打印出薄壁、封闭腔散热器产品。

(2) SLM 成形 AlSi10Mg 铝合金薄板组织致密,表面光滑的共晶硅相呈短纤维状沿晶界分布;SLM 成形拉伸试样及其经 T6 热处理后的抗拉强度均高于 200 MPa;T6 热处理后试样强度降低、塑性提高,T6 热处理适用于该薄板零件。

#### 参考文献:

[1] 杨永强,吴伟辉,来克嫫,等.金属零件选区激光熔化直接快速

成形工艺及最新进展[J].航空制造技术,2006,49(2):73-76.

[2] 吴伟辉,杨永强.选区激光熔化快速成形系统的关键技术[J].机械工程学报,2007,43(8):175-180.

[3] 王晓,王怀明,祁俊峰,等.激光选区熔化制备负泊松比椭圆多孔 AlSi10Mg 合金性能的数值模拟[J].机械工程材料,2020,44(3):62-67.

[4] 马大卫,张文斌.铝合金激光选区熔化成型能力研究[J].制造技术与机床,2019(9):64-69.

[5] 侯伟,陈静,储松林,等.选区激光熔化成形 AlSi10Mg 组织与拉伸性能的各向异性研究[J].中国激光,2018,45(7):0702003.

[6] 闫泰起,唐鹏钧,陈冰清,等.退火温度对激光选区熔化 AlSi10Mg 合金微观组织及拉伸性能的影响[J].机械工程学报,2020,56(8):37-45.

[7] 孙靖,朱小刚,王联凤,等.扫描方式与预热温度对激光选区熔化制备大尺寸 AlSi10Mg 合金性能的影响[J].机械工程材料,2017,41(10):52-57.

[8] 杜洋,乔凤斌,郭立杰,等. AlSi10Mg 粉末激光选区熔化温度场的数值模拟[J].电焊机,2018,48(8):34-43.

[9] 马尧,岳源.热处理对激光选区熔化成形 AlSi10Mg 合金中共晶硅形貌与分布的影响[J].机械工程材料,2020,44(4):40-45.

(上接第 96 页)

[6] 高玉魁.陶瓷丸在喷丸强化中的发展与应用[J].金属加工(热加工),2008(1):59-60.

[7] 何少杰,杨文玉,郭步鹏,等.机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J].表面技术,2015,44(6):120-126.

[8] 高玉魁. TC18 超高强度钛合金喷丸残余压应力场的研究[J].稀有金属材料与工程,2004,33(11):1209-1212.

[9] YAO C F, WU D X, MA L F, et al. Surface integrity evolution and fatigue evaluation after milling mode, shot-peening and

polishing mode for TB6 titanium alloy[J]. Applied Surface Science, 2016, 387: 1257-1264.

[10] ALMANGOUR B, YANG J M. Improving the surface quality and mechanical properties by shot-peening of 17-4 stainless steel fabricated by additive manufacturing [J]. Materials & Design, 2016, 110: 914-924.

[11] 杨海欧,王健,周颖惠,等.电弧增材制造技术及其在 TC4 钛合金中的应用研究进展[J].材料导报,2018,32(11):1884-1890.

## 《机械工程材料》网上投稿说明

欢迎广大作者登录“材料与测试”网站(<http://www.mat-test.com>),点击“在线投稿”进入在线投稿系统。为增大稿件的录取几率,请参考投稿系统中提供的稿件模板进行写作。另外,请将稿件的大小控制在 10 MB 之内,否则会上传不成功。若您在使用过程中发现该系统的不完善之处或在使用过程中

中遇到问题,可直接与编辑部联系。

编辑部联系方式

电话:021-65556775-368,021-65541496

E-mail:mem@mat-test.com

《机械工程材料》编辑部