

激光与光电子学进展

飞机进气口格栅激光选区熔化成形技术研究

蔡小叶*, 胡家齐, 程宗辉, 张洁

国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007

摘要 采用激光选区熔化(SLM)成形技术制备了TC4试验件和飞机进气口格栅零件,分析了试验件的微观组织和力学性能。结果表明:对于相同处理态的试样,纵向试样断裂后对应的横向截面中的组织更为细小,细晶强化作用更明显,因此纵向试样具有更好的综合力学性能;打印态试样的显微组织由细针状 α' 马氏体组织组成;退火处理后,细针状马氏体 α' 相基本消失,组织为魏氏体集束和网篮组织构成的混合组织;退火态试样具有较低的强度和更高的塑性,室温、高温力学性能达到了锻件水平。基于试验件成形工艺制备了格栅零件,其单元网格尺寸精度优于 ± 0.1 mm,制造周期由传统工艺的7 d缩短至4 d。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; TC4钛合金; 格栅; 力学性能

中图分类号 TG142 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1714007

Selective Laser Melting Technology Applied into Aircraft Air Inlet Protective Grilling

Cai Xiaoye*, Hu Jiaqi, Cheng Zonghui, Zhang Jie

State-Owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu, Anhui 241007, China

Abstract In this study, selective laser melting (SLM) technology was used to produce test samples and aircraft air inlet protective grilling using TC4 powders. The microstructures and mechanical properties of printed samples were further analyzed. Results indicate that the cross section of fractured longitudinal samples has a fine microstructure, which leads to a strong fine-grain strengthening effect. Thus, superior comprehensive mechanical properties of the longitudinal samples are achieved. Moreover, the microstructure of the printed samples is found to comprise fine acicular α' martensite. After annealing, the α' martensites almost completely disappear. A new mixed microstructure comprising packets of the Widmannstatten and basket-weave microstructures is formed. The as-annealed samples possess high ductility and toughness with relatively inferior strength. In addition, the mechanical properties of as-annealed samples are equivalent to those of the as-forged ones. Based on the above-mentioned experimental results, the aircraft air inlet protective grilling of TC4 was prepared via SLM. The dimension precision of the unit grids is better than ± 0.1 mm. Moreover, the manufacturing periodicity is reduced from seven to four days.

Key words laser technique; selective laser melting; TC4 titanium alloy; protective grilling; mechanical properties

OCIS codes 160.3900; 140.3390

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2020-12-28; 录用日期: 2021-01-19

通信作者: *caixiaoye1002@qq.com

1 引言

飞机发动机进气口格栅主要用于阻止外来物进入进气道损坏发动机,该零件主要由钛合金板材采用传统机加工和电火花钻孔减材方式制造。钛合金的热导率小,切削加工温度较高,加之其抵抗弹性变形的能力小,因此钛合金零件的加工难度大、周期长,且材料利用率低。

激光选区熔化(SLM)成形技术特别适合于复杂结构形状零部件的制备,为格栅零件的制备提供了新思路。SLM技术基于离散-堆积原理,先将零件的三维模型离散成平面轮廓信息,再利用直径为30~50 μm的聚焦激光束,对金属粉末进行逐层选区熔化,熔道相互搭接成面,最终堆积成三维立体零件^[1-2]。目前,人们正在广泛开展SLM成形铁基^[3-4]、镍基^[5-7]、钛基^[8]等金属材料的相关研究。对于TC4材料的SLM制备,目前已经有了较为系统的研究:Han等^[9]研究了SLM过程中工艺参数对TC4组织与性能的影响,并发现当能量密度在120~190 J/mm³范围时,试样具有较高的致密度与硬度;Xu等^[10]在特定的SLM参数下,使制备的TC4试样发生原位马氏体分解,从而具备了高的强度和塑性,抗拉强度达到了1100 MPa,断后伸长率达到了11.4%;Vrancken等^[11]研究了热处理工艺对SLM试样力学性能的影响,结果表明,在850℃保温2 h(炉冷)后,试样的断后伸长率达到了12.8%,屈服强度达到了950 MPa。

现阶段SLM工艺的相关研究主要集中于实验室

级别样件的原材料、工艺、组织和性能的调控上^[12],而将该技术进行实际工程化应用的研究相对较少。鉴于此,本文先基于SLM工艺成形了TC4钛合金试验件,然后对试验件进行室温、高温力学性能测定与组织形貌分析,并依托该工艺参数打印了进气口格栅样件,以期SLM工艺的工业化应用提供技术支撑。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

金属粉末为无锡飞而康快速制造科技有限责任公司生产的TC4钛合金粉末,该粉末的典型形貌如图1所示,粉末基本呈球形,存在少量卫星粉。粉末粒度范围为15~53 μm,松装密度为2.1 g/cm³,振实密度为2.58 g/cm³,流动性为35.2 s/50 g,粒度分布如下: $D_{10}=25.27 \mu\text{m}$, $D_{50}=40.04 \mu\text{m}$, $D_{90}=60.34 \mu\text{m}$ 。粉末的化学成分如表1所示。

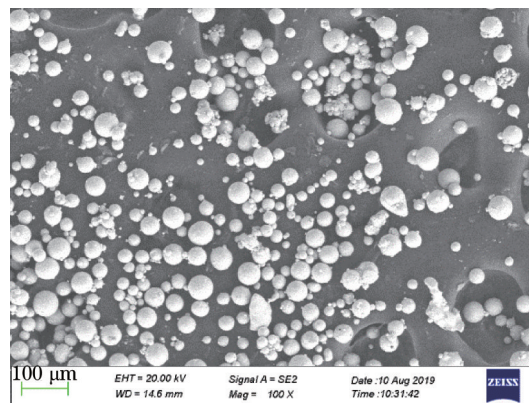


图1 TC4粉末的微观形貌

Fig.1 Microstructure of TC4 alloy powder

表1 TC4粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 alloy powder

| Element | Ti | Al | V | Fe | C | O | N | H |
|------------------|----|------|------|-------|------|-------|-------|--------|
| Mass fraction /% | - | 6.04 | 4.02 | 0.025 | 0.01 | 0.086 | 0.007 | 0.0026 |

2.2 试验方法

成形设备选用的是英国雷尼绍公司生产的AM 500E型金属3D打印设备。TC4钛合金试样的成形方法如下:

- 1) 利用QuantAM软件对STL模型进行摆放、切片分层,以及设计合理的扫描路径和选择成形工艺参数;成形工艺参数具体如表2所示。
- 2) 清洁成形舱和保护振镜,安装刮刀和基板,并将之调平。
- 3) 培养气氛,保护气体采用纯度为99.99%的氩气,同时预热基板至170℃。

- 4) 开始打印,用刮刀将一定层厚的金属粉末铺在基板上,观察前几层的铺粉情况,调节送粉量,加工完一层金属粉末后,工作平台下降一层厚度的高度,刮刀继续均匀地铺设下一层金属粉末;如此循环往复,直至金属零件被加工完成。图2为试验件示意图,规定沉积方向为纵向,垂直于该方向的截面为横向截面,单个横、纵向试样的尺寸均为13 mm×13 mm×65 mm。

- 5) 采用VAF-100真空热处理炉对部分打印态试样进行去应力退火处理,退火工艺为800℃保温4 h,随炉冷却。

表 2 TC4 钛合金的 SLM 成形工艺参数
Table 2 SLM forming parameters of titanium alloy

| Parameter | Power /W | Dot spacing / μm | Time of exposure / μs | Trace interval / μm | Layer thickness / μm |
|-----------|----------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Value | 170 | 75 | 60 | 65 | 30 |

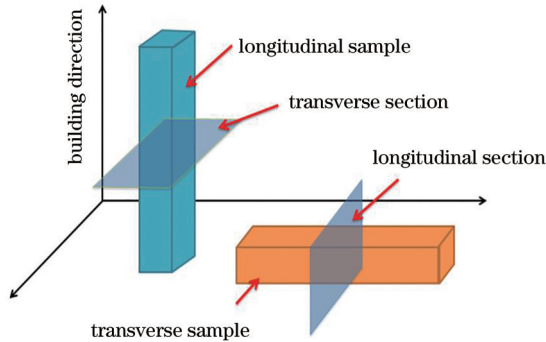


图 2 试验件方向示意图

Fig. 2 Direction schematic of samples

将横、纵向试样机加工成拉伸、冲击试样,采用 MT5105 型微机控制电子万能试验机按照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分 室温试验方法》测试室温拉伸性能,按照 GB/T 228.2—2015《金属材料 拉伸试验 第 2 部分 高温试验方法》测试高温(400 °C)拉伸性能;采用 JB-300 型冲击试验机按照 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》测试冲击韧性;从剩余的横、纵向试样中切取金相试样,经镶嵌、预磨和抛光后,采用 Kroll 试剂进行腐蚀,而后用 Axio Imager M2m 型金相显微镜对试样进行组织分析;采用 Sigma 300 型扫描电子显微镜进行断口形貌分析。

基于上述成形工艺参数打印格栅,格栅的三维模型如图 3 所示,格栅零件的尺寸约为 100 mm×100 mm×20 mm,格栅中单元网格的尺寸为 2.5 mm×2.5 mm。采用 Olympus DSX100 体式显微镜测量所打印的格栅单元网格的尺寸。

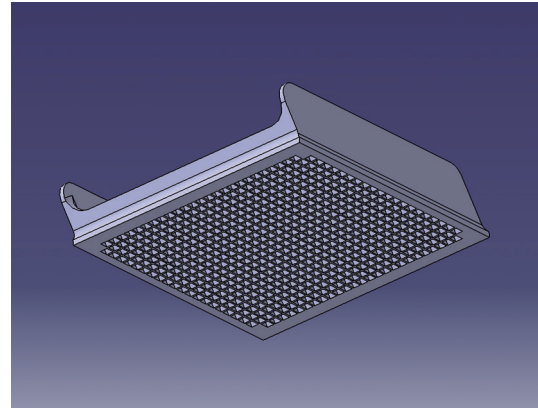


图 3 格栅模型图

Fig. 3 Diagrammatic figure of protective grilling

3 结果与讨论

3.1 显微组织分析

图 4 为打印态 TC4 合金的组织形貌。由图 4 可以观察到横、纵向截面组织均主要为细针状 α' 马氏体^[11],但两截面中的组织尺寸存在差异。这主要是由高温下 β 相的晶粒形貌差异导致的。对于纵向截面,在每层激光的扫掠过程中,熔池中的液相总是优先依附于熔池底部异质形核,且温度梯度的方向始终基本保持纵向方向,形成外延生长的较为粗大的柱状晶组织,导致其转变形成的 α' 马氏体块的尺寸较大。而对于横向截面,激光每层扫描后旋转 67°,温度梯度方向随扫描方向不停地变化,易形成不同取向的晶粒,高温下 β 相的晶粒尺寸受扫描策略的影响,基本与道次间距一致,约为 75 μm ,其转变后形成的组织也较小^[13]。此外,还可以发现,图 4

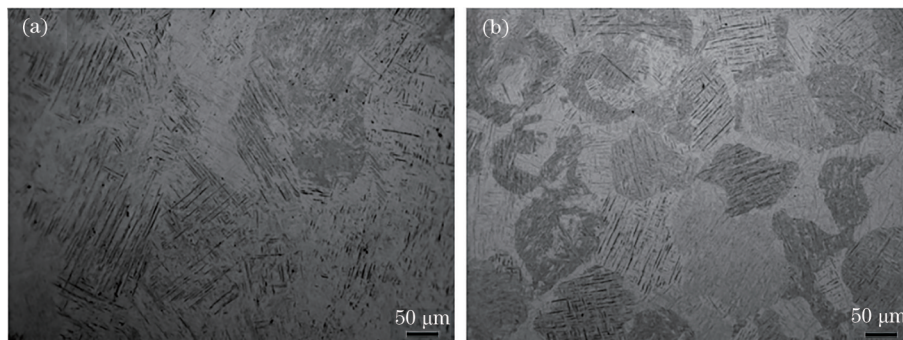


图 4 打印态 TC4 钛合金的微观组织。(a)纵向截面;(b)横向截面

Fig. 4 Microstructures of TC4 alloy formed by SLM. (a) Longitudinal section; (b) transverse section

中显示出了明暗相间的现象,这是由于循环热影响导致针状马氏体 α' 相发生了一定量的粗化和分解,从而改变了微区组织的耐蚀性^[14]。

图 5 为热处理后打印件的组织。由图 5 可见:经过 800 °C 退火处理后,黑色针状马氏体 α' 相基本消失,组织粗化,转变为由魏氏体集束和网篮组织组成的混合组织。结合文献[11]可以确定此时 α' 相已经完全转变为 α 相 + β 相。对比纵向与横向组织

可以发现,横向截面组织中存在大尺寸的 α 相。这是由于打印态横向截面组织中的细针状 α' 马氏体组织是成块出现的,在块与块之间有明显的界面区域,且该区域的腐蚀深度较浅,说明在道次间的循环影响下,组织中的针状马氏体 α' 相已经发生了分解,这为退火处理过程中该界面处的 α 相的长大提供了有利条件,从而导致横向截面组织中存在较多的大尺寸 α 相^[15]。

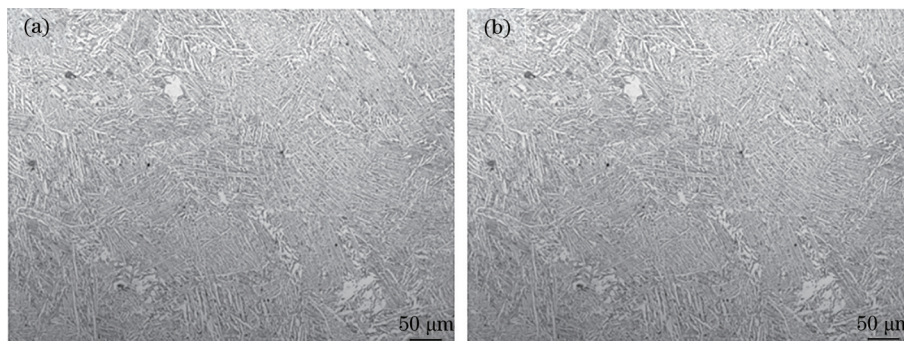


图 5 退火态 TC4 钛合金的微观组织。(a)纵向截面;(b)横向截面

Fig. 5 Microstructures of TC4 alloy after annealing. (a) Longitudinal section; (b) transverse section

3.2 室温拉伸性能分析

表 3 给出了不同状态 TC4 钛合金的室温力学性能。打印态横向 TC4 试样的抗拉强度 (R_m) 为 1220 MPa,断后伸长率 (A) 为 12.0%,纵向试样的抗拉强度为 1201 MPa,断后伸长率为 12.9%。退火态横向试样的抗拉强度为 1034 MPa,断后伸长率为 16.9%,纵向试样的抗拉强度为 1048 MPa,断后伸长

率为 19.0%。横向试样的各项性能均低于纵向试样,其本质是由组织的差异导致的。纵向试样的断裂截面对应于横向截面,组织更为细小,细晶强化是提高纵向试样性能的主要原因。此外,退火态试样的强度低于打印态试样,但其塑性与韧性增加。这是因为经过退火处理后,针状马氏体 α' 相消失,出现了魏氏体集束和网篮组织,因此强度降低,塑韧性增加^[14]。

表 3 不同状态 TC4 钛合金的室温力学性能

Table 3 Tensile properties at room temperature of TC4 in different states

| Sample | Tensile strength | Yield strength | Elongation A / % | Reduction of area Z / % | Impact toughness a_{ku} / (J·cm ⁻²) |
|---------------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------------------|---|
| | R_m / MPa | $R_{p0.2}$ / MPa | | | |
| Forge piece (HB 5432—1989) | ≥895 | ≥825 | ≥10 | ≥30 | ≥35 |
| Transverse as-printed sample | 1220 | 1087 | 12.0 | 30 | 37.85 |
| Longitudinal as-printed sample | 1201 | 1124 | 12.9 | 41 | 40.67 |
| Transverse as-annealed sample | 1034 | 936 | 16.9 | 45 | 43.67 |
| Longitudinal as-annealed sample | 1048 | 969 | 19.0 | 53 | 61.67 |

图 6 为 TC4 打印态和退火态试样的微观断口形貌。在断口纤维区,打印态试样的断口均呈现小韧窝 + 撕裂棱形貌,而退火态试样基本均呈现典型的韧窝形貌。这说明,退火处理后试样获得了更好的塑性。在相同的处理状态下,横向试样的拉伸断口更为平整,变形量较小,其塑性低于纵向试样。

3.3 高温拉伸性能分析

表 4 为 400 °C 下不同状态 TC4 钛合金的拉伸性

能。对于在同一方向取样的试样,打印态试样表现出了高的抗拉强度,而经退火处理后的试样的抗拉强度降低,塑韧性增加。退火态试样的综合力学性能较好,达到了锻件的力学性能指标。在相同的处理状态下,纵向试样的强度、塑性均略高于横向试样,这一规律与室温下测定的力学性能结果一致。

3.4 SLM 成形进气口格栅

基于上一节的数据结果可知,SLM 成形 TC4 合

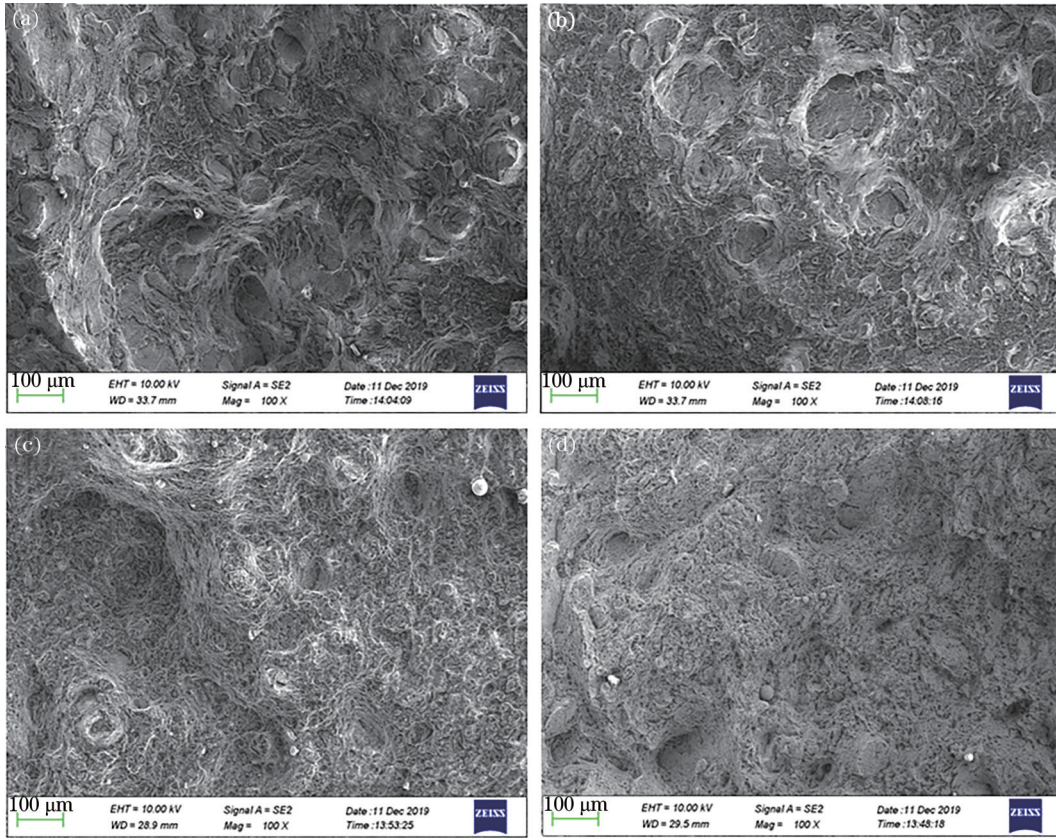


图 6 试样断口的 SEM 照片。(a)打印态纵向试样;(b)打印态横向试样;(c)退火态纵向试样;(d)退火态横向试样
Fig. 6 SEM images of specimen fractures. (a) Longitudinal as-printed sample; (b) transverse as-printed sample; (c) longitudinal as-annealed sample; (d) transverse as-annealed sample

表 4 不同状态下 TC4 钛合金的高温拉伸性能

Table 4 Tensile properties at high temperature of TC4 in different states

| Sample | R_m / MPa | $R_{p0.2}$ / MPa | A / % | Z / % |
|---------------------------------|-------------|------------------|-----------|-----------|
| Forge piece (HB 5432—1989) | ≥ 600 | — | ≥ 12 | ≥ 40 |
| Transverse as-printed sample | 885 | 722 | 10.5 | 45 |
| Longitudinal as-printed sample | 889 | 734 | 11.8 | 50 |
| Transverse as-annealed sample | 714 | 589 | 13.9 | 59 |
| Longitudinal as-annealed sample | 736 | 611 | 14.0 | 66 |

金的力学性能达到了锻件水平,故依据试验用工艺参数制备格栅。首先对格栅进行 SLM 成形(1 d),接着对成形件进行真空退火处理(1 d),以消除成形件的内应力,改善其综合力学性能。真空退火处理完毕之后,采用线切割将成形件从基板上切割下来,进行高压气体处理,以去除成形件表面或内部残留的金属粉末(1 d),再进行喷砂处理(1 d),完成零件的制备(共计 4 d)。观察零件表面未发现裂纹和变形等缺陷。最终处理完的格栅如图 7 所示。

格栅的传统制造加工工艺为:首先在厚钛合金



图 7 SLM 成形的格栅实物图

Fig. 7 Practical picture of SLM formed protective grilling

板材上铣出图中框架形状(1 d),然后对三个边框部分进行数控精加工(2 d),再对底板部分进行电火花打孔(1 d),接着对打出的孔进行精加工(1 d),再对整个零件进行热处理和吹砂处理(2 d)。由于钛合金的热导率小,因此切削加工温度较高,加之钛合金抵抗弹性变形的能力较小,因此格栅零件的传统

加工难度大且周期长(共计 7 d)。对比两种工艺可发现,采用 SLM 制备格栅,加工周期明显缩短。

对于 SLM 工艺制备的格栅,采用体式显微镜随

机测量了 5 处单元网格的四边边长,实际测量结果如表 5 所示。可见,相对于模型设定的 $2.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$,实测单元网格的尺寸精度优于 $\pm 0.1\text{ mm}$ 。

表 5 SLM 工艺制备格栅的单元网格尺寸测量结果

Table 5 Measured dimensions of the grille's unit grids prepared via SLM process

| No. of grids | Measured dimension /mm | | | | | | |
|--------------|------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | Edge 1 | Edge 2 | Edge 3 | Edge 4 | Maximum | Minimum | Average |
| 1# | 2.46 | 2.51 | 2.48 | 2.50 | 2.51 | 2.46 | 2.49 |
| 2# | 2.47 | 2.48 | 2.47 | 2.45 | 2.48 | 2.45 | 2.47 |
| 3# | 2.44 | 2.46 | 2.45 | 2.48 | 2.48 | 2.44 | 2.46 |
| 4# | 2.49 | 2.48 | 2.45 | 2.47 | 2.49 | 2.45 | 2.47 |
| 5# | 2.43 | 2.47 | 2.46 | 2.44 | 2.47 | 2.43 | 2.45 |

4 结 论

打印态试样的显微组织为细针状 α' 马氏体组织;进行 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 4 h 的退火处理后,组织为魏氏体集束和网篮组织的混合组织;退火态试样的强度较打印态降低,但塑韧性增加;退火态试样的室温、高温力学性能达到了锻件水平。

对于相同处理态的试样,纵向试样的综合性能更好,这得益于其断裂对应的横向截面组织更为细小,细晶强化作用更明显。

SLM 成形格栅的制造周期由传统工艺的 7 d 缩短至 4 d,单元网格的尺寸精度优于 $\pm 0.1\text{ mm}$ 。

参 考 文 献

- [1] Kruth J P, Froyen L, van Vaerenbergh J, et al. Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1/2/3): 616-622.
- [2] Yang Y Q, Chen J, Song C H, et al. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011401.
杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011401.
- [3] He K T, Zhou L, Yang L C. Microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel in the selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 091404.
贺可太, 周柳, 杨乐昌. 选区激光熔化中 316L 不锈钢的组织与力学性能[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 091404.
- [4] Yang C, Dong Z H, Chi C T, et al. Microstructure

and mechanical properties of 24CrNiMo alloy steel formed by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0502008.

杨晨, 董志宏, 迟长泰, 等. 选区激光熔化成形 24CrNiMo 合金钢的组织结构与力学性能[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0502008.

- [5] Zhao Y, Zhao G R, Ma W Y, et al. Study on process, structure, and properties of nickel selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171402.
赵响, 赵国瑞, 马文有, 等. 镍的激光选区熔化成形工艺、结构与性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 171402.
- [6] Huang S, Guo S Q, Zhang G H, et al. Microstructure and impact toughness of GH4169 samples fabricated by selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 051405.
黄帅, 郭绍庆, 张国会, 等. 选区激光熔化 GH4169 组织与冲击韧性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 051405.
- [7] Chen X J, Zhao G R, Dong D D, et al. Microstructure and mechanical properties of Inconel625 superalloy fabricated by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202002.
陈秀娟, 赵国瑞, 董东东, 等. 选区激光熔化制造 Inconel625 高温合金的组织与力学性能[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202002.
- [8] Zhang L C, Attar H. Selective laser melting of titanium alloys and titanium matrix composites for biomedical applications: a review[J]. Advanced Engineering Materials, 2016, 18(4): 463-475.
- [9] Han J, Yang J J, Yu H C, et al. Microstructure and mechanical property of selective laser melted

- Ti6Al4V dependence on laser energy density[J]. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(2): 217-226.
- [10] Xu W, Brandt M, Sun S, et al. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via *in situ* martensite decomposition[J]. Acta Materialia, 2015, 85: 74-84.
- [11] 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.
- [12] Shipley H, McDonnell D, Culleton M, et al. Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: a review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 128: 1-20.
- [13] Thijs L, Verhaeghe F, Craeghs T, et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2010, 58 (9): 3303-3312.
- [14] Zhang W X, Tang C L, Chen Z R, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy formed by selective laser melting[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(6): 122-127.
张伟祥, 唐超兰, 陈志茹, 等. 退火温度对激光选区熔化成形 TC4 钛合金组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(6): 122-127.
- [15] Katzarov I, Malinov S, Sha W. Finite element modeling of the morphology of β to α phase transformation in Ti-6Al-4V alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(4): 1027-1040.