DOI: 10.3901/JME.2020.21.208

热处理对激光选区熔化 GH3536 合金组织演变规律的影响研究*

孙闪闪¹ 滕庆¹ 程坦¹ 王基维² 陈吉祥² 白洁³
刘志福³ 魏青松¹

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室 武汉 430074;

2. 深圳信息职业技术学院 深圳 518172;

3. 北京动力机械研究所 北京 100071)

摘要: 利用激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)增材制造技术制备了 GH3536 镍基高温合金, 研究了直接时效、固溶及热等静压处理对 SLM 合金组织和裂纹的影响规律, 利用 XRD、SEM、EPMA、EBSD、TEM 等方法表征相组成和组织演变。结果表明: SLM 态组成相为 γ 相, 经固溶和时效热处理后, 晶界析出针棒状和片层状相, EPMA 结果表明这些相富含 C、Cr、Mo, 主要组成为 Laves 相和碳化物相; SLM 态试样经固溶热处理后, 合金元素扩散加强, 熔池边界逐渐消失; SLM 态平均晶粒尺寸 13.18 μm , 经高温热处理后, 合金晶粒发生再结晶, 平均晶粒尺寸减小, 经固溶处理后平均晶粒尺寸为 12.01 μm , 而经热等静压处理(1050 $^{\circ}\text{C}/3\text{ h}/120\text{ MPa}$)后平均晶粒尺寸为 10.87 μm 。SLM 态试样中存在 10~100 μm 的微裂纹, 裂纹起源于熔池内部并贯穿熔化道; 经直接时效和固溶热处理后微裂纹未明显改善, 而热等静压则可完全消除微裂纹。

关键词: 激光选区熔化; GH3536 镍基高温合金; 热处理; 热等静压; 显微组织

中图分类号: TG166; V252

Influence of Heat Treatment on Microstructure Evolution of GH3536 Superalloy Fabricated by Selective Laser Melting

SUN Shanshan¹ TENG Qing¹ CHENG Tan¹ WANG Jiwei² CHEN Jixiang²
BAI Jie³ LIU Zhifu³ WEI Qingsong¹

(1. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

2. Shenzhen Institute & Information Technology, Shenzhen 518172;

3. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100071)

Abstract: GH3536 superalloy is fabricated by selective laser melting (SLM), its microstructure evolution and crack variation under various heat treatments are studied. Microstructure evolution and phase identification are conducted by XRD, SEM, EPMA, EBSD, and TEM. the results indicate that the main constituent phase of specimens fabricated by SLM is γ phase. Needle-rod and lamellar phases which are rich in C, Cr and Mo elements are formed inside the grains, as well as the grain boundaries after heat treatment. These phases are mainly composed of Laves phase and carbides. The melt pool boundaries of specimens fabricated by SLM gradually become shallow and disappear after heat treatment, because of the improved diffusion effect of alloying elements. The average grain size of specimens fabricated by SLM is 13.18 μm , and it decreases to 12.01 μm after solution treatment, and the grain size is obviously refined to 10.87 μm after hot isostatic pressing, as a result of recrystallization. Micro-cracks can be observed in the matrix after SLM process, and the length is measured ranging from 10 to 100 μm . These cracks are found to originate inside the melt pool, and penetrate through the melt pool. After direct aging heat treatment and solution heat treatment, the size and distribution of micro-cracks do not improve significantly. However, after hot isostatic pressing, the micro-cracks are almost eliminated.

Key words: selective laser melting; GH3536 superalloy; heat treatment; HIP; microstructure

* 国家重点研发计划(2018YFB1105301)和武汉市科技计划(2018010401011281)资助项目。20191123 收到初稿, 20200615 收到修改稿

0 前言

镍基高温合金能在 600 °C 以上高温下长期工作, 具有优异的抗疲劳、抗氧化、抗热腐蚀以及高温组织稳定性和力学性能, 广泛应用于航空航天、能源等重要领域^[1]。但是, 镍基高温合金熔点高、难变形、易开裂和难切削, 常用的铸造、锻造和机加工制造复杂零件存在工艺流程长、能耗高、易开裂、模具/刀具损耗快等问题^[2-3]。激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)是一种金属增材制造技术, 可制造近全致密、力学性能优良的复杂金属零件^[4-5]。目前, 在 SLM 成形高温合金方面已有大量研究, 材料包括 Inconel625、Inconel718、Inconel738LC 和 K4202 等, 研究内容涉及工艺优化、组织与力学性能以及热处理等方面。Inconel625 高温合金是一种固溶强化型合金, 利用 SLM 成形可获得优良的性能^[2, 6]。张洁等^[7-8]利用 SLM 成形了致密度达 99.4 % 的 Inconel625 合金试样, 发现高的温度梯度导致在脆性 Laves 相附近形成应力集中并引起沿晶分布的微裂纹, 实施基板预热可抑制微裂纹的产生。李帅等^[9]研究发现 SLM 成形的 Inconel625 合金主要沿(001)方向生长的柱状晶组织, 一次枝晶臂间距 0.5 μm , 热处理后 MC 碳化物分布在晶界。MUMTAZ 等^[10]研究指出 SLM 成形 Inconel625 合金零件的上表面粗糙度随激光功率增大和扫描速度降低而减小, 但侧面粗糙度则增大。Inconel718 高温合金是一种时效强化型合金, 利用 SLM 成形 Inconel718 高温合金通常需要实施相应的热处理。刘守平等^[11]研究发现 SLM 成形的 Inconel718 合金经 980 °C 固溶后有短棒状 δ 相析出。邓晓阳等^[12]对 SLM 成形的 Inconel718 合金实施固溶加双级时效处理后细小柱状晶转变为等轴细晶, 并在晶界上析出短棒状 δ 相。Feng 等^[13]对 SLM 成形的 Inconel718 合金经 1 050 °C 固溶加双级时效处理, 柱状晶和细小枝晶转变为等轴晶, 晶内 δ 相溶解, 并在晶界析出了不同尺度的 δ 相。除此之外, 高铝高钽时效强化型 Inconel738LC 高温合金和国产化 K4202 铸造镍基高温合金 SLM 成形也有相关研究。ELECTRIC 等^[14]研究了 SLM 成形 Inconel738LC 合金的热处理工艺, 发现再结晶形成的退火孪晶增大了弹性模量的各向同性。MESSÉ 等^[15]研究发现 SLM 成形 Inconel738LC 合金经去应力退火能使亚稳态 MC 型碳化物转变为稳态 M_{23}C_6 , 从而降低再结晶温度。左蔚等^[16]研究发现 SLM 成形 K4202 合金形成了外延生长的柱状晶, γ' 强化相和碳化物析出受到抑制。黄文普等^[17]研究发现 SLM 成形 K4202 合金经固溶加时效处理后树枝晶转变为等轴晶, 并在

基体中析出碳化物, 显著提高了拉伸强度。

上述研究为理解 SLM 成形镍基高温合金的组织特征提供了有益参考, 但不同体系材料合金化原理不同, 组织和热处理工艺有很大的差异。GH3536 是一种 Fe 含量高、由 Cr 和 Mo 固溶强化的镍基高温合金, 可在 900 °C 以下长期使用, 短时工作温度可达 1 080 °C, 适用于航空发动机的燃烧室部件和其他高温部件^[18]。SLM 成形复杂整体化 GH3536 零件有潜在优势, 但目前 SLM 成形 GH3536 合金的研究鲜有报道。SLM 过程中熔池溶体冷却速率可达 10^6 K/s ^[19], 较快的冷却速度可能导致 GH3536 合金中的 Cr、Mo 来不及析出而形成过饱和固溶体^[2, 20-21], 起到了固溶强化的效果。另外如 laves、 δ 和 μ 等有害相^[20-21]的形成也会影响高温合金的使用性能, 利用热处理可以有效控制这些相的析出。为此, 本文以 GH3536 预合金粉末作为成形材料, 研究 SLM 成形 GH3536 合金的微观组织以及热处理对组织的影响, 为 SLM 成形高性能 GH3536 合金零件奠定基础。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料选用中国航发北京航空材料研究院定制的气雾化 GH3536 粉末, 化学成分如表 1 所示。粉末微观形貌如图 1 所示。粉末为球形或近球形状, 表面有少量卫星球, 平均粒径为 30.0 μm , 符合正态分布。试验前, 将粉末置于干燥箱中 80 °C 保温 8 h, 以去除粉末中的水分, 提高铺粉过程中的粉末流动性并降低粉末中的氧含量。

表 1 GH3536 粉末化学成分 (质量分数%)

元素	C	Cr	Co	W	Mo	Ti	Al	Fe	Ni
min	0.05	20.50	0.50	0.20	8.00	0	0	17.00	Bal.
max	0.15	23.00	2.50	1.00	10.00	0.15	0.50	20.00	Bal.

1.2 SLM 工艺

SLM 成形装备为 EOS M290, 该设备装配 400 W 的光纤激光器, 激光光斑直径 100 μm , 成形腔尺寸为 250 mm×250 mm×325 mm。选用 316L 基板, 经打磨、表面喷砂和清洁处理后进行成形试验。SLM 工艺参数选用优化试验后的工艺: 铺粉厚度 40 μm , 扫描间距 110 μm , 基板预热 40 °C, 扫描速度 960 mm/s, 激光功率 285 W, 逐行扫描策略, 相邻层间扫描方向旋转 67°。成形试样尺寸为 80 mm×10 mm×8 mm, 实物图及示意图分别如图 2a、2b, 经排水法测得成形后试样的相对致密度达 99.5%。

(a) 低倍形貌

(b) 高倍形貌

图 1 GH3536 粉末形貌

(a) 实物图

(b) 示意图

图 2 SLM 成形试样

1.3 热处理

根据合金特点制定两种热处理工艺^[15, 21-22]和热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)处理, 具体工艺如表 2 所示。热处理和热等静压各自分开实施, 各选取两组 SLM 试样进行试验。热处理采用合肥科晶材料技术有限公司生产的 OTF-1200X 型号开式管式炉, 升温速率 10 °C/min。整个热处理过程由 N₂ 保护, 氧含量 500 ppm($\times 10^{-6}$)。采用热等静压工艺对成形件进行后处理, 具体工艺为: 升温速率为 5 °C/min, 温度为 1 050 °C, 压力为 120 MPa, 保温保压 3 h, 随炉冷却, 热等静压炉气氛为 N₂。

表 2 SLM 成形 GH3536 合金的热处理工艺

工艺	过程
时效热处理(HT1)	720 °C/8 h+620 °C/8 h 炉冷
固溶加时效热处理(HT2)	980 °C/1 h/水冷 +720 °C/8 h+620 °C/8 h 炉冷
热等静压(HIP)	1050 °C/120 MPa/3 h

1.4 性能表征

对 SLM 态和两种热处理及热等静压态下的 GH3536 合金试样利用电火花线切割(Wire cut electrical discharge machining, WEDM)切取成 10 mm×10 mm×8 mm 块体。经金相制样后抛光处理, 采用日本岛津公司的 XRD 7000S 型 X 射线衍射仪进行物相分析, 扫描角度 25°~100°, 扫描速度 10°/min, 靶材为铜靶, 扫描步距 0.01°。金相腐蚀液成分 H₂O₂:H₂O=1:2, 腐蚀时间 5~10 s。采用 Quanta 650 FEG 型场发射扫描电镜进行显微组织观察及 EBSD 分析, 采用 EPMA-8050G 型电子探针显微分析仪进行元素分析。采用 Tecnai G2 F30 型场发射透射电子显微镜进行 TEM 分析。

2 试验结果与讨论

2.1 相分析

GH3536 粉末、SLM 态和各种热处理状态下的 XRD 图谱如图 3 所示。高温合金粉末及成形态样品

图3 不同状态下 XRD 结果

基体为 γ 相, 但组织织构存在差异: 粉末态最高强度衍射峰对应的角度为 43.5° , 织构沿(111)方向生长; SLM 态最高强度衍射峰对应的角度为 50.6° , 织构沿(200)方向生长。GH3536 合金是一种固溶强化 Ni-Cr-Fe 型的镍基高温合金, 大量合金元素固溶在基体中。SLM 成形过程中, 激光光斑快速移动, 熔池尺寸小, 因此凝固速度快, 大部分原子固溶到合金基体中, 同时非金属元素 C 也很难析出形成化合物。经热处理后, 合金的组织与 SLM 态基本相同, 都是 γ 相。其他金属间化合物和复杂碳化物相, 在 SLM 和热处理下可以析出, 但是由于含量低, 颗粒尺寸相对较小, 用 XRD 难以直接检测到^[23]。

2.2 显微组织

SLM 成形 GH3536 合金经腐蚀后显微组织如

图 4 所示。在激光扫描平面上(图 4a)可以明显看到彼此交叉的条状熔池, 且熔化道呈连续分布。试样表面存在微裂纹, 裂纹长度在 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间, 主要分布于熔池内部。分析裂纹高倍显微组织(图 4c)可以看出裂纹主要源于晶界, 这是由于该区域晶粒生长方向不一致, 凝固收缩作用对未凝固的金属液产生不同方向的拉应力, 致使液膜撕裂, 产生凝固热裂纹^[8]。同时, 晶界是元素偏析最严重的区域, 大量的 Mo、Cr 元素容易富集产生脆性相, 在后续的快速冷却过程中, 由于收缩作用产生的拉应力, 极易应力集中产生裂纹^[24]。但是, 裂纹究竟是在凝固过程中形成的, 还是在后续固态相变冷却过程中形成的本文未作深入研究。图 4e 沿激光扫描方向上的高倍显微组织显示, 熔池内部为垂直于熔池边界逆温度梯度方向生长的柱状晶。图 4b 为沿成形方向的显微组织, 熔池边界呈鱼鳞状分布, 邻近熔池搭接良好。高倍显微组织(图 4f)可观察到垂直于熔池边界向熔池中心汇聚生长的细小柱状晶, 晶间间距在 $0.8\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 之间。SLM 成形试样特有的熔池结构对力学性能不利, 在剪切应力的作用下裂纹易于在熔池中部萌发并扩展从而大大降低材料的塑性^[25]。

2.3 热处理对显微组织及裂纹的影响

2.3.1 熔池边界及裂纹

图 5 是 SLM 态和经两种热处理后的显微组织对比图, SLM 态可以看到明显的“层与层”、“道与道”的熔池边界搭接线(图 5a、5b)。熔池边界是造

图 4 GH3536 SLM 试样组织

图 5 GH3536 试样组织

成力学性能各项异性的因素之一, 熔池边界的消失可一定程度上改善力学性能, 因此热处理可以减小各向异性程度^[25]。对于 GH3536 合金, 经时效热处理后熔池边界搭接区变浅, 固溶热处理后熔池边界

基本消失。另外, SLM 态和热处理后微裂纹均存在, 热处理并不能消除裂纹, 裂纹是制约材料塑性的关键因素, 由于热处理未能改善 SLM 成形样中的微裂纹, 故其不能显著改善材料的塑性。图 6 是 SLM 态

经热等静压前后的裂纹及熔池边边界对比图。可以看出热等静压之后, 裂纹得到了愈合, 这是由于 SLM 态组织中的裂纹为封闭裂纹, 在高温及高压作

用下裂纹得到了焊合, 这有利于显著提高材料的塑性^[26]。同时, 热等静压处理后由于元素扩散及高程度再结晶的发生, 熔池边界消失。

图 6 GH3536 试样组织

2.3.2 微观组织相分析

图 7 为三种状态下合金的高倍 SEM 结果, 图中灰色为 γ 相, 白色为熔池边界及亚晶界析出相。SLM 态熔池边界及柱状晶间的亚晶界有微量白色相析出 (图 6a)。经双级时效热处理后亚晶粒边界及晶界析出片层状白色的相。在时效过程中, 固溶在 γ 基体中的过饱和合金元素进一步扩散脱溶进入晶界, 并在晶界处发生偏析, 促进析出相通过晶界平移进而长大^[20]。经固溶热处理后亚晶界数量减少, 亚晶界处的偏析程度降低, 针条状析出相沿平行于柱状晶生长方向分布, 相比于直接时效加上固溶热处理后沿晶界连续分布的片层状的相逐渐变的不连续, 这有利于提高材料的力学性能, 针对固溶强化型的 GH3536, 提高固溶温度和保温时间, 将位于晶界的片层状相充分分解为在晶粒内部弥散分布的颗粒状相, 对于提高材料的力学性能有积极的影响。经 HIP 处理后亚晶界基本消除, 合金元素固溶效果进一步加强, 未见到明显的析出相 (图 7d)。

2.3.3 元素分布

图 8~10 分别为 SLM 态和热处理试样的

EPMA 结果。从图 8 中可以看出 SLM 态组织中存在 C、Cr、Mo 偏析, Cr、Mo 偏析提高组织析出 Laves 相的倾向^[2], 进而提高了形成微裂纹的倾向。为了进一步分析 SLM 态试样组织中元素偏析的情况, 对 SLM 态和热处理试样进行了 TEM 分析观察纳米尺度上的组织如图 11 所示, 从 TEM 结果中可以看出, 亚晶粒边界 Mo、Cr 元素富集, 形成了元素正偏析, 在材料服役过程中易形成片层状的有害相, 同时对于 Mo、W、Cr 固溶强化型 GH3536, Mo、Cr 元素的偏析减弱了固溶强化效果。经固溶和时效热处理后, 晶粒边界 C、Cr、Mo 含量明显增高, Ni 显著降低, 这些元素的偏析促进碳化物和 Laves 相析出^[20]。晶界处针棒状和片层状相区域 Cr、Mo 元素质量分数比列接近 1:1, 相组成为 Cr_2Mo , 根据 GH3536 合金常见析出相的元素组成可确定为 Laves 相^[21]。针棒状 (片层状) Laves 相往往是裂纹形核和扩展的位置, 明显降低了高温合金的塑性及持久强度, 为了提高 GH3536 的力学性能, 通过高温固溶处理控制 Laves 相的析出。

图 7 SLM 态和热处理后 GH3536 合金的微观组织

图 8 SLM 态试样 EPMA 测试结果

图 9 HT1 态试样 EPMA 测试结果

图 10 HT2 态试样 EPMA 测试结果

图 11 SLM 态试样 TEM 能谱测试结果

2.3.4 晶粒取向及大小

图 12 为 SLM 态和热处理试样水平面 EBSD 结果。SLM 态的晶粒平均尺寸为 $13.18\ \mu\text{m}$ ，其中小尺寸($\leq 20\ \mu\text{m}$)晶粒体积分数为 82%，时效处理后晶粒平均尺寸为 $13.20\ \mu\text{m}$ ，小尺寸晶粒体积分数为 81%，没有发生明显变化，固溶处理后晶粒尺寸减少至 $12.01\ \mu\text{m}$ ，小尺寸晶粒体积分数升高至 86%。这主要是时效处理温度较低，未达到再结晶温度，固溶热处理发生了再结晶从而在晶界处生成了细小的晶粒，提高了小尺寸晶粒的体积分数，使得平均晶粒尺寸减小。HIP 处理后晶粒平均尺寸为

$10.87\ \mu\text{m}$ ，更小尺寸($\leq 10\ \mu\text{m}$)晶粒体积分数高达 74%，相比于 $980\ ^\circ\text{C}$ 固溶热处理，热等静压温度高达 $1050\ ^\circ\text{C}$ ，再结晶发生的程度更高，同时在 $120\ \text{MPa}$ 的压力下再结晶形成的晶粒生长受到了抑制，在图中(图 12d)明显看出在原始晶粒边界分布着大量细小晶粒。晶粒细化有提高材料的强度和塑性。结合 EBSD 结果 SLM 成形试样组织大角度晶界较多，热处理后大角度晶界变少，尤其是 HIP 处理后晶粒的取向得到了很大程度的优化，邻近晶粒的取向差变小，有助于提高材料的变形协调性，从而提高材料塑性。

图 12 不同状态下的晶粒取向

3 结论

(1) GH3536 粉末组织为 γ 基体，SLM 制备的 GH3536 试样中，合金元素几乎完全固溶在基体中，组织中主要为沿(200)晶向生长的 γ 基体，时效热处理后 GH3536 试样中亚晶界有富含 C、Cr、Mo 的片层状相析出，固溶加时效热处理后 GH3536 试样中晶粒内有针状相，晶界有片层状相析出，这些相富含 C、Cr、Mo 主要组成为 Laves 相和碳化物相。

(2) SLM 成形 GH3536 合金由柱状晶和等轴晶晶粒组成，平均晶粒尺寸为 $13.18\ \mu\text{m}$ ，试样水平方向为彼此交叉的条状熔池，成形方向为层层叠加的鱼鳞状熔池。时效处理后，晶粒尺寸未发生明显改变，熔池边界变浅。固溶加时效热处理后晶粒尺寸减小至 $12.01\ \mu\text{m}$ ，熔池边界几乎消失。热等静压处理后晶粒尺寸显著减小为 $10.87\ \mu\text{m}$ ，熔池边界消失。

(3) SLM 成形 GH3536 合金晶界 Cr、Mo 元素微观正偏析，时效及固溶加时效热处理后晶界 C、Cr、

Mo 元素正偏析。

(4) SLM 态试样中存在 10~100 μm 的微裂纹, 裂纹起源于熔池内部并贯穿熔化道, 这是由于在晶界存在易于引起应力集中的 Laves 脆性相。时效和固溶加时效热处理后裂纹未发生明显改善, 热等静压后微裂纹完全消除。

参 考 文 献

- [1] 王会阳, 安云岐, 李承宇, 等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(18): 482-486.
WANG Huiyang, AN Yunqi, LI Chengyu, et al. Research progress of Ni-based superalloys[J]. Materials Reports, 2011, 25(18): 482-486.
- [2] 丁文锋, 苗情, 李本凯, 等. 面向航空发动机的镍基合金磨削技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(01): 201-227.
DING Wenfeng, MIAO Qing, LI Benkai, et al. Review on grinding technology of nickel-based superalloys used for aero-engine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(01): 201-227.
- [3] 于静, 倪清泉, 赵琰巍, 等. PCBN 刀具切削镍基高温合金刀具磨损的试验研究[J]. 工具技术, 2013, 47(3): 18-21.
YU Jing, NI Qingquan, ZHAO Yanwei, et al. Tool wear experiment research of PCBN tools turning nickel-based superalloy[J]. Tool Engineering, 2013, 47(3): 18-21.
- [4] 左铁钊, 陈虹. 21 世纪的绿色制造——激光制造技术及应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 106-110.
ZUO Tiechuan, CHEN Hong. Green manufacture in 21 Century—laser manufacturing technology and application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 106-110.
- [5] 王迪, 钱泽宇, 窦文豪, 等. 激光选区熔化成形高温镍基合金研究进展[J]. 航空制造技术, 2018, 61(10): 48-59, 66.
WANG Di, QIAN Zeyu, DOU Wenhao, et al. Research progress on selective laser melting of nickel based superalloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(10): 48-59, 66.
- [6] 杨启云. 选区激光熔化成形用 Inconel 625 合金粉末及制品的性能研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2016.
YANG Qiyun. Study on properties of Inconel 625 alloy powder and products in selective laser melting[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2016.
- [7] 张洁. 激光选区熔化 Ni 625 合金工艺基础研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
ZHANG Jie. Study on foundational process of Ni 625 alloy formed by selective laser melting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.
- [8] 张洁, 李帅, 魏青松, 等. 激光选区熔化 Inconel 625 合金开裂行为及抑制研究[J]. 稀有金属, 2015, 39(11): 961-966.
ZHANG Jie, LI Shuai, WEI Qingsong, et al. Cracking behavior and inhibiting process of Inconel 625 alloy formed by selective laser melting[J]. Chinese Journal of rare Metals, 2015, 39(11): 961-966.
- [9] LI Shuai, WEI Qingsong, SHI Yusheng, et al. Microstructure characteristics of inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31(9): 946-952.
- [10] MUMTAZ K, HOPKINSON N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2009, 15(2): 96-103.
- [11] 孙骁. 选区激光成形用 IN718 合金粉末特性及成形件组织结构的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
SUN Xiao. IN718 powder characteristics used in selective laser melting and microstructures of selective laser melted IN718 sample[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [12] 邓晓阳, 鲁世强. 热处理对 SLM 成形的 Inconel 718 合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(8): 878-881.
DENG Xiaoyang, LU Shiqiang. Effect of heat treatment on microstructures of inconel 718 superalloy by selective laser melting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(8): 878-881.
- [13] FENG Keyun, LIU Peng, LI Huaixue, et al. Microstructure and phase transformation on the surface of Inconel 718 alloys fabricated by SLM under 1 050 $^{\circ}\text{C}$ solid solution+ double ageing[J]. Vacuum, 2017, 145: 112-115.
- [14] GEIGER F, KUNZE K, ETTER T. Tailoring the texture of IN738LC processed by selective laser melting (SLM) by specific scanning strategies[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 661: 240-246.
- [15] MESSÉO, MUÑOZ-MORENO R, ILLSTON T, et al. Metastable carbides and their impact on recrystallisation in IN738LC processed by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 394-404.
- [16] 左蔚, 张权明, 吴文杰, 等. K4202 高温合金激光选区熔化成形微观组织研究[J]. 火箭推进, 2017, 43(1): 55-59.
ZUO Wei, ZHANG Quanming, WU Wenjie, et al.

- Microstructure of selective laser melted nickel-based superalloy K4202[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2017, 43(1): 55-59.
- [17] 黄文普, 喻寒琛, 殷杰, 等. 激光选区熔化成形 K4202 镍基铸造高温合金的组织 and 性能[J]. *金属学报*, 2016, 52(9): 1089-1095.
- HUANG Wenjin, YU Hanchen, YIN Jie, et al. Microstructure and mechanical properties of K4202 cast nickel base superalloy fabricated by selective laser melting[J]. *Acta Metall Sinica*, 2016, 52(9): 1089-1095.
- [18] 刘浩, 王心美, 刘大顺, 等. 缺口对 GH3536 镍基高温合金蠕变性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(10): 2473-2478.
- LIU Hao, WANG Xinmei, LIU Dashun, et al. Influence of notch on creep properties of GH3536 nickel-based superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(10): 2473-2478.
- [19] 马明明. 两种典型金属零部件激光增材制造技术基础比较研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- MA Mingming. A comparative study on fundamentals of two typical laser additive manufacturing technologies of metallic components[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016.
- [20] 郭建亭. 高温合金材料学. 上册[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- GUO Jianting. *Materials Science and Engineering for Superalloys*[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [21] 于广娜, 宋玺玉, 曹一超, 等. 重复固溶处理对 GH536 合金板材组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2017, 42(11): 144-147.
- YU Guangna, SONG Xiyu, CAO Yichao, et al. Effect of repeat solution treatment on microstructure and properties of GH536 alloy plates[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(11): 144-147.
- [22] 崔彤, 王继杰, 俞肇元, 等. 长期时效对镍基合金的组织及高温拉伸性能的影响[J]. *金属热处理*, 2006, 31(8): 49-52.
- CUI Tong, WANG Jijie, YU Zhaoyuan, et al. Effect of the long-term aging on microstructures and high temperature tensile properties of a Ni-Based superalloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, 31(8): 49-52.
- [23] 杨盛志, 王晓彤, 李艳, 等. 强流脉冲电子束作用下镍基高温合金 GH4169 的微观结构及腐蚀性能[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(12): 50-56.
- YANG Shengjie, WANG Xiaotong, LI Yan, et al. Microstructure and corrosion resistance on the surface of nickel-based superalloy GH4169 treated by high-current pulsed electron beam[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(12): 50-56.
- [24] 张升, 桂睿智, 魏青松, 等. 选择性激光熔化成形 TC4 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.
- ZHANG Sheng, GUI Ruizhi, WEI Qingsong, et al. Cracking behavior and formation mechanism of TC4 alloy formed by selective laser melting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 21-27.
- [25] WEN Shifeng, LI Shuai, WEI Qingsong, et al. Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2660-2667.
- [26] 许鹤君, 李勇, 祁海, 等. 热等静压工艺对选区激光熔化成形 Hastelloy X 合金持久性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2018, 42(12): 57-61, 67.
- XU Hejun, LI Yong, QI Hai, et al. Effect of hot isostatic pressing process on stress rupture property of Hastelloy X alloy by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 42(12): 57-61, 67.

作者简介: 孙闪闪, 男, 1994 年出生。主要研究方向为 SLM 成形对高温合金组织性能的影响研究。

E-mail: 728172898@qq.com

魏青松, 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为增材制造与近净成形。

E-mail: wqs_xn@163.com