

DOI: 10.11973/jxgccl202310013

激光选区熔化 GH3536 合金表面状态对力学性能的影响

李 颖,侯慧鹏,张 婷,柴象海

(中国航发商用航空发动机有限责任公司,上海 200241)

摘要:采用激光选区熔化技术制备 GH3536 合金纵向和横向试样,经热处理和热等静压处理后,将一部分试样机加工成光滑表面试样,与打印表面试样进行对比,研究了表面状态对拉伸性能和疲劳性能的影响。结果表明:光滑表面试样和打印表面试样纵向室温拉伸性能差异很小,表面状态对拉伸性能没有显著影响;与光滑表面试样相比,打印表面试样的应变疲劳寿命略低,而应力疲劳寿命显著降低,为光滑表面试样的 2%~8%;光滑表面试样裂纹源区裂纹呈放射状,扩展区呈脉状,瞬断区有大量韧窝;打印表面试样没有明显的放射状裂纹,为多源开裂,断口为解理断裂。

关键词:增材制造;GH3536 合金;拉伸性能;疲劳性能

中图分类号:V235.13;V263.3

文献标志码:A

文章编号:1000-3738(2023)10-0079-06

Influence of Surface State on Mechanical Properties of Selective Laser Melting GH3536 Alloy

LI Ying, HOU Huipeng, ZHANG Ting, CHAI Xianghai

(AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: GH3536 alloy longitudinal and transverse samples were prepared by selective laser melting. After heat treatment and hot isostatic pressing treatment, some samples were machined into smooth-surface samples. The influence of surface state on tensile and fatigue properties was studied by comparing with build-surface samples. The results show that there was little difference in the longitudinal room temperature tensile properties between smooth-surface samples and build-surface samples, so the surface state had no significant effect on the tensile properties. Compared with that of smooth-surface samples, the strain fatigue life of build-surface samples was slightly lower, and the stress fatigue life of build-surface samples was significantly reduced, which was 2%—8% of smooth-surface samples. The cracks in the crack source region of the smooth-surface samples were radially shaped, those in the propagation region were vein-like, and there were a lot of dimples in the instantaneous fracture region. There were no obvious radial cracks in the build-surface samples, which was multi-source cracking, and the fracture was cleavage fracture.

Key words: additive manufacturing; GH3536 alloy; tensile property; fatigue property

0 引 言

GH3536 合金是一种固溶强化镍基高温合金,主要强化元素为铬和钼。该合金具有良好的抗氧化和耐腐蚀性能以及中等的持久性能,适用于制造航空发动机燃烧室部件及其他高温部件^[1]。航空发动

机燃烧室部件一般具有较多的内流道及薄壁结构,结构复杂,性能及精度要求较高,采用传统加工工艺(如锻造、铸造后铣削加工)很难满足制造需求,只能分别加工出不同的部件并组合而成。激光选区熔化(SLM)是一种采用激光逐层熔化金属粉末的增材制造技术,可直接成形出经过拓扑优化的复杂结构,解决传统减材和等材工艺难加工或无法加工的问题,特别适用于航空、航天、医疗等领域中复杂结构零件的精密快速制造。例如,GE 公司将原本由 20 多个零件组合成的燃油喷嘴进行一体化设计与 SLM 成形,并将其应用到 LEAP 发动机上,不仅

收稿日期:2021-05-28;修订日期:2023-08-12

基金项目:上海科委科研计划项目(17DZ2281200,17DZ1120000);国家重点研发计划项目(SQ2018YFB110268)

作者简介:李颖(1976—),男,湖北十堰人,高级工程师,硕士

改善了喷油嘴容易过热和积碳的问题,还将其服役寿命提高了 5 倍^[2-3]。

目前,关于 SLM 技术的研究主要集中在工艺参数优化、打印件缺陷控制、组织演变和力学性能评估等方面^[4-7],对于 SLM 成形的燃油喷嘴等具有内部空心结构的构件,其内壁打印表面难以再作进一步处理,而这种原始打印表面质量对构件力学性能的影响还鲜有报道。为此,作者采用 SLM 技术制备了 GH3536 合金试样,一组保留原始打印表面形貌,一组通过机加工使表面光滑,通过对比研究了原始打印表面对试样室温拉伸和疲劳性能的影响,拟为 SLM 成形 GH3536 合金在航空发动机燃烧室中的应用提供技术支撑。

1 试样制备与试验方法

打印用粉末为 GH3536 镍基高温合金粉末,由普莱克斯提供,粉末粒径在 15~45 μm 。采用 EOSINT

M280 型直接金属激光烧结系统进行 GH3536 合金试样的纵向(试样长度方向平行于沉积方向)和横向(试样长度方向垂直于沉积方向)SLM 成形,成形时的激光功率为 200 W,扫描速度为 1 100 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,扫描间距为 0.09 mm,铺粉层厚度为 20 μm ,层间扫描转角为 67°。整个成形过程在氩气保护气氛中进行。

通过 SLM 直接成形出圆柱体试样和如图 1 所示的拉伸和疲劳试样,采用统一的热处理+热等静压工艺来消除试样中的残余应力和内部缺陷。热处理工艺为 1 000~1 200 $^{\circ}\text{C}$ 下保温 1~5 h,空冷;热等静压工艺为在 1 000~1 200 $^{\circ}\text{C}$ 、100~200 MPa 下保温保压 1~5 h,炉冷。分别切取横向和纵向金相试样,经研磨、抛光,用王水腐蚀后,采用 ZEISS Axio Imager M2m 型光学显微镜和 TESCAN-VEGA3 型扫描电子显微镜(SEM)观察显微组织。

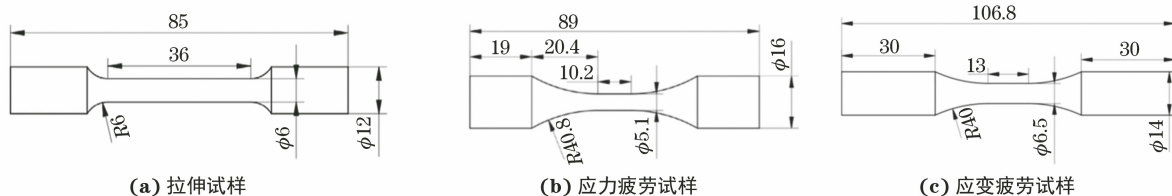


图 1 拉伸试样、应力疲劳试样和应变疲劳试样的形状和尺寸

Fig.1 Shape and size of tensile specimen (a), stress fatigue specimen (b) and strain fatigue specimen (c)

将圆柱状试样机加工成与直接成形试样相同的形状和尺寸,并进行纵向抛光,使表面粗糙度 R_a 不高于 0.2 μm 。将机加工得到的试样简称为光滑表面试样,直接成形保留原始表面状态的试样简称为打印表面试样。采用 Mitutoyo SJ-410 型粗糙度仪测定表面粗糙度,打印表面试样 R_a 约为 25.3 μm ,光滑表面试样 R_a 小于 0.2 μm 。根据 ASTM E8,采用 Zwick/Roll Z400E 型电子万能试验机进行室温拉伸试验,引伸计标距为 30 mm,拉伸速度为 5 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。根据 ASTM E606,采用 MTS Landmark Servohydraulic Test system 100KN 型疲劳试验机进行应变控制疲劳试验,应变比为 0.1,正弦波,在应变控制循环数大于 2×10^4 周次后,切换至应力控制,此时的应力控制参数与循环稳定时相同。根据 ASTM E466,采用 Zwick Vibrophore100 型疲劳试验机进行应力控制疲劳试验,应力比为 0.1,三角波。采用 TESCAN-VEGA3 型扫描电子显微镜观察疲劳断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图 2 可以看出:沉积态合金试样的截面上明显有金属粉末逐层熔化、凝固而形成的熔池形貌。横截面保留了激光扫描轨迹,不同熔池取向夹角约 69°,与层间转角 67°基本一致;纵截面呈鱼鳞状搭接熔池形貌,熔池深度约为 50 μm ,宽度约为 90 μm 。热处理+热等静压处理未能消除不同方向上显微组织的差异,纵截面保留了定向凝固的特征,晶粒呈柱状,横截面上则为细小的等轴晶粒;热处理+热等静压后合金试样的显微组织由 γ 固溶体相以及 M_{23}C_6 、 M_6C 和 σ 等析出相组成^[8]。

由图 3 可见,热处理+热等静压处理后,SLM 成形合金试样晶内析出的碳化物呈球状弥散分布,晶界析出的碳化物呈块状分布并彼此连接形成网状。相关研究^[9-11]表明,晶界析出的碳化物为 $(\text{Cr},\text{Mo})_{23}\text{C}_6$ 。

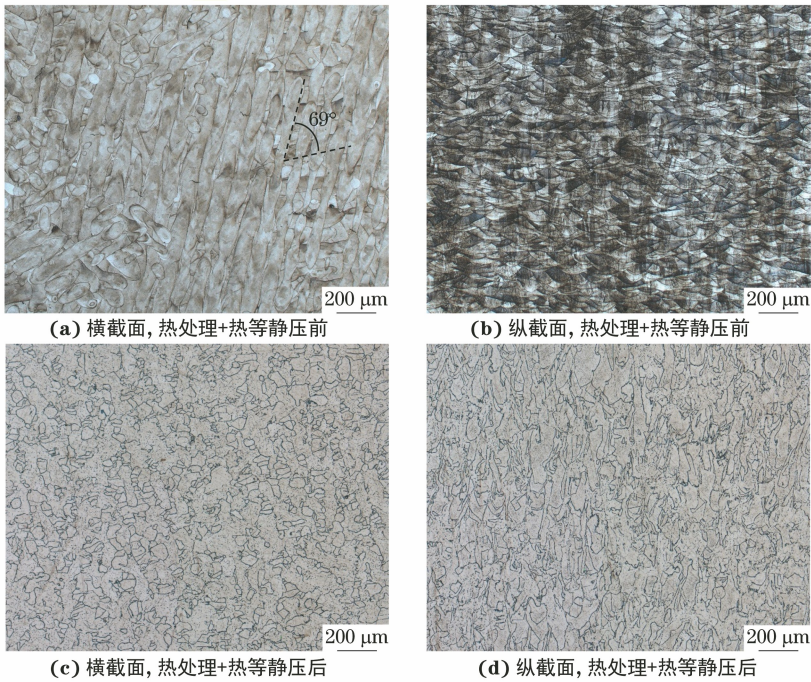


图 2 热处理+热等静压处理前后 SLM 成形 GH3536 合金试样的显微组织

Fig.2 Microstructures of GH3536 alloy specimens formed by SLM before (a—b) and after heat treatment+hot isostatic pressing (c—d) in different directions: (a, c) transverse section and (b, d) longitudinal section

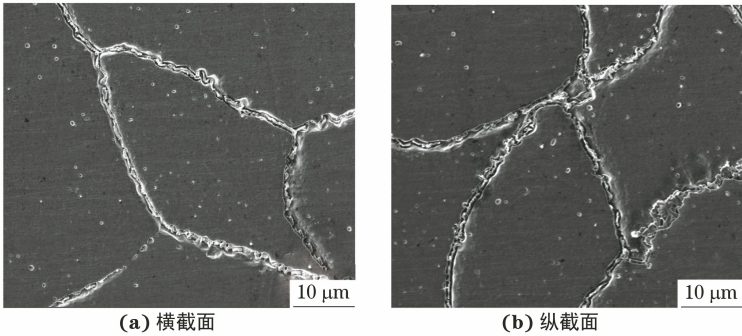


图 3 热处理+热等静压处理后 SLM 成形 GH3536 合金试样的 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphology of GH3536 alloy specimens formed by SLM after heat treatment+hot isostatic pressing: (a) transverse section and (b) longitudinal section

2.2 室温拉伸性能

若无特殊说明,后文所指试样均为热处理+热等静压后的,由表 1 可知,合金纵向打印表面试样的室温拉伸性能与纵向光滑表面试样的室温拉伸性能没有明显的差异。分别对屈服强度、抗拉强度和断后伸长率的数据进行 *t* 检验分析,可以知其 *P* 值均大于 0.05,即二者的性能在统计分析上没有显著差异。这说明表面状态对于室温拉伸性能并没有显著影响。

2.3 室温疲劳性能

由图 4 可见,纵向打印表面试样的应变疲劳寿命比纵向光滑表面试样略低,且随着应变幅的降低,其降低的趋势增大。在半应变幅为 0.315% 的条件下,对 2 种试样的疲劳寿命进行 *F* 检验,其 *p* 值为

表 1 热处理+热等静压处理后 GH3536 合金纵向光滑表面试样与纵向打印表面试样的室温拉伸性能

Table 1 Room temperature tensile properties of longitudinal smooth-surface specimens and longitudinal build-surface specimens of GH3536 alloy after heat treatment+hot isostatic pressing

成形方向	试样	室温拉伸性能		
		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
纵向	光滑表面	306.6±2.2	738.8±13.3	45.1±1.3
	打印表面	308.1±16.7	729.0±0.5	41.9±2.4

0.814,表明该条件下的疲劳寿命方差相等;然后进行 *t* 检验,光滑表面试样和打印表面试样疲劳寿命

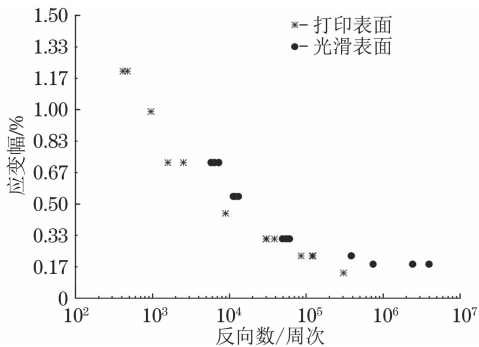


图 4 GH3536 合金纵向光滑表面试样与纵向打印表面试样的应变幅-反向数关系

Fig. 4 Relationship between strain amplitude and inverse number of longitudinal smooth-surface specimens and longitudinal build-surface specimens of GH3536 alloy

差值的 95% 置信区间为 (101 12, 340 16), p 值为 0.007, 小于 0.05 的最大可接受水平, 因此推断二者的疲劳寿命存在差异。这种差异随着应变幅的减小越来越明显。

由图 5 可见: 横向和纵向光滑表面试样的应力疲劳寿命曲线比较接近, 没有表现出显著差异; 纵向打印表面试样的应力疲劳寿命显著降低, 大致为纵向光滑表面试样的 2%~8%, 且曲线斜率更大。

选取了最大应力为 550 MPa 下疲劳断裂的纵

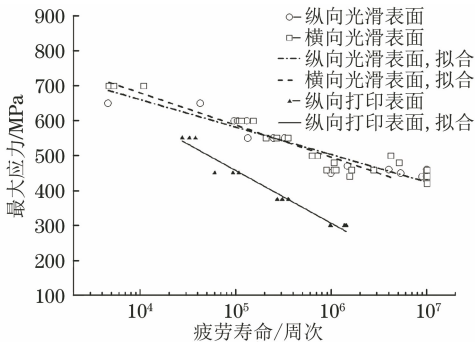


图 5 GH3536 合金光滑表面试样与打印表面试样的疲劳寿命曲线

Fig. 5 Fatigue life curves of smooth-surface and build-surface specimens of GH3536 alloy

向试样进行断口分析, 其中纵向光滑表面试样、纵向打印表面试样的疲劳寿命分别为 247 548 周次和 27 629 周次。由图 6 可见: 光滑表面试样的疲劳断口呈典型脆性断口, 没有宏观塑性变形, 断口宏观上可观察到裂纹源、裂纹扩展区和瞬断区。裂纹起源于试样表面, 裂纹源区裂纹呈明显放射状; 裂纹扩展区面积相对较大, 呈现脉状花样, 出现了大量疲劳裂纹, 扩展区与瞬断区域存在明显界线, 裂纹扩展到分界线后试样很快发生了断裂; 瞬断区呈现韧性断口特征, 表面凹凸不平, 有大量韧窝, 且有多条小裂纹出现。

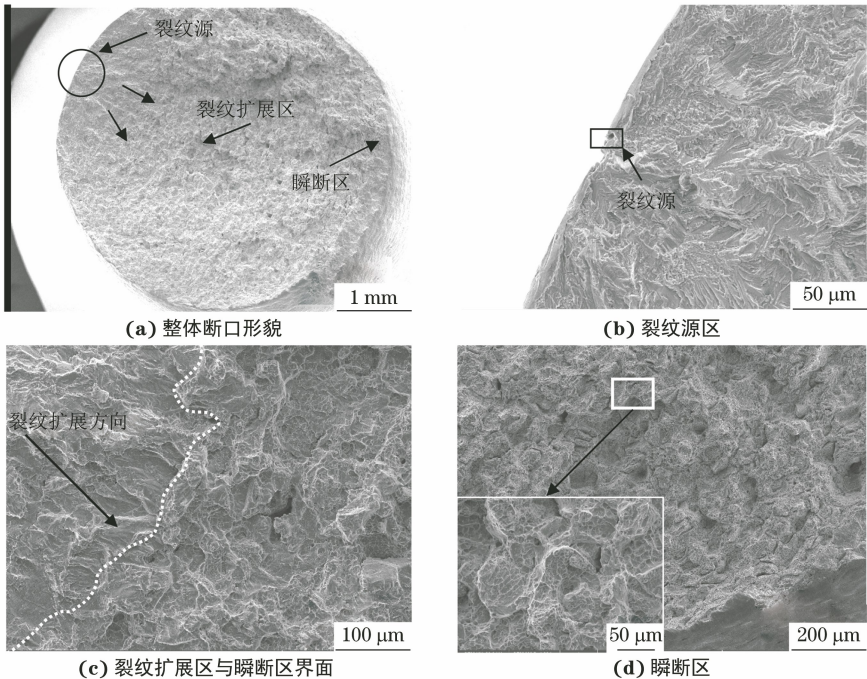


图 6 GH3536 合金纵向光滑表面试样疲劳断口的 SEM 形貌

Fig. 6 SEM morphology of fatigue fracture of longitudinal smooth-surface specimens of GH3536 alloy: (a) overall fracture morphology; (b) crack source region; (c) interface between crack propagation region and instantaneous fracture region and (d) instantaneous fracture region

由图 7 可见:打印表面试样的疲劳断口也呈典型脆性断口,没有宏观塑性变形,但宏观上裂纹源、裂纹扩展区和瞬断区特征不明显;断口表面存在一条主裂纹,但没有明显的放射状花样。由于打印表面粗糙度较大,表面多个位置易产生应力集中,产生多个裂纹源,裂纹源区呈银亮色;裂纹扩展区与瞬断区没有明显的分界线,裂纹扩展时在路径上留下了大量疲劳条纹,同时裂纹既可以沿着片层界面也可以穿过片层进行扩展;断口为解理断裂,表明试样受到外力作用后发生快速断裂。

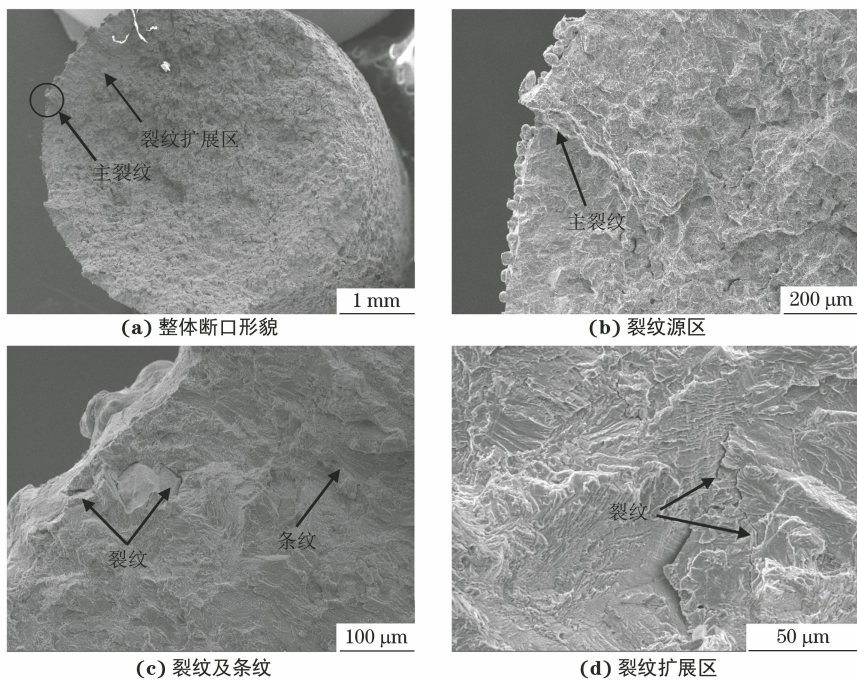


图 7 GH3536 合金纵向打印表面试样疲劳断口 SEM 形貌

Fig.7 SEM morphology of fatigue fracture of longitudinal build-surface specimens of GH3536 alloy: (a) overall fracture morphology; (b) crack source region; (c) cracks and stripes and (d) crack propagation region

3 结 论

(1) 热处理+热等静压后 GH3536 合金光滑表面试样和打印表面试样纵向拉伸性能差异很小,说明表面状态对室温拉伸性能没有显著影响。

(2) 与光滑表面试样相比,打印表面试样的应变疲劳寿命略低,而应力疲劳寿命显著降低,为光滑表面试样的 2%~8%。

(3) 光滑表面试样和打印表面试样的疲劳断口均呈典型脆性断口;光滑表面试样裂纹源区裂纹呈明显放射状,裂纹扩展区呈现脉状花样,与瞬断区存在明显界线,瞬断区有大量韧窝;打印表面试样断口存在一条主裂纹,没有明显的放射状花样,存在多个裂纹源,裂纹既可以沿片层界面也可

在光滑表面试样和打印表面试样的裂纹扩展路径上均能看到大量条纹,表明裂纹的扩展是一个塑性累积的过程;瞬断区均存在大量韧窝,但光滑表面试样的韧窝相对较多。试样在受到疲劳载荷时,疲劳在裂纹起始阶段是一种材料表面现象。试样表面粗糙,会导致应力的非均匀分布,部分位置会出现应力集中,促使裂纹萌生^[12],因此打印表面试样出现多个裂纹源。当微裂纹产生时,微裂纹尖端的应力会导致至少一个滑移系统被激活,从而显著影响试样的疲劳寿命。

以穿过片层扩展,瞬断区韧窝较少,断口为解理断裂。

参考文献:

- [1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2022: 251-252.
China Aviation Materials Manual Editorial Committee. China aviation materials manual[M]. Beijing, China Standards Press, 2022: 251-252.
- [2] 刘伟, 李能, 周标, 等. 复杂结构与高性能材料增材制造技术进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 128-151.
LIU W, LI N, ZHOU B, et al. Progress in additive manufacturing on complex structures and high-performance materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 128-151.
- [3] 侯慧鹏, 梁永朝, 何艳丽, 等. 选区激光熔化 Hastelloy-X 合金

组织演变及拉伸性能[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0202007.

HOU H P, LIANG Y C, HE Y L, et al. Microstructural evolution and tensile property of Hastelloy-X alloys produced by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0202007.

- [4] TOMUS D, TIAN Y, ROMETSCH P A, et al. Influence of post heat treatments on anisotropy of mechanical behaviour and microstructure of Hastelloy-X parts produced by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 667: 42-53.

- [5] WU M W, LAI P H. The positive effect of hot isostatic pressing on improving the anisotropies of bending and impact properties in selective laser melted Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 658: 429-438.

- [6] HAN Q Q, MERTENS R, MONTERO-SISTIAGA M L, et al. Laser powder bed fusion of Hastelloy X; Effects of hot isostatic pressing and the hot cracking mechanism[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 732: 228-239.

- [7] TIAN Y, TOMUS D, ROMETSCH P, et al. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting [J]. Additive Manufacturing, 2017, 13: 103-112.

- [8] ZHAO J C, LARSEN M, RAVIKUMAR V. Phase precipitation and time-temperature-transformation diagram of Hastelloy X[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000,

293(1/2): 112-119.

- [9] 李雅莉, 雷力明, 侯慧鹏, 等. 热工艺对激光选区熔化 Hastelloy X 合金组织及拉伸性能的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(5): 100-106.

LI Y L, LEI L M, HOU H P, et al. Effect of heat processing on microstructure and tensile properties of selective laser melting Hastelloy X alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(5): 100-106.

- [10] 张永志, 侯慧鹏, 彭霜, 等. 激光选区熔化 Hastelloy X 合金的显微组织与拉伸性能的各向异性[J]. 航空材料学报, 2018, 38(6): 50-56.

ZHANG Y Z, HOU H P, PENG S, et al. Anisotropy of microstructure and mechanical properties of Hastelloy X alloy produced by selective laser melting [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(6): 50-56.

- [11] 薛珈琪, 陈晓晖, 雷力明. 激光选区熔化 GH3536 合金组织对力学性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141401. XUE J Q, CHEN X H, LEI L M. Effects of microstructure on mechanical properties of GH3536 alloy fabricated by selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141401.

- [12] 亚伯·斯海维. 结构与材料的疲劳[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014: 10-15.

JAAP S. Fatigue of structure an materials [M]. Beijing: Aviation industry press, 2014: 10-15.



CNKI中国知网
www.cnki.net

万方数据
WANFANG DATA

VIP
维普资讯

全国邮发代号: 14-53

中国连续出版物号:

ISSN 1002-2333

CN23-1196/TH

机械工程师[®]

杂志
月刊

(每月10号出版)

创刊于 1969

MECHANICAL
ENGINEER

中国期刊方阵双效期刊;《中国学术期刊网络出版总库》全文收录;《中国学术期刊综合评价数据库》(CAJ-CDE)来源期刊;《中文科技期刊数据库CSTJ》全文收录;《中国学术期刊数据库CSPD》全文收录;《中国核心期刊(遴选)数据库》全文收录;《中国学术期刊》(光盘版)全文收录;《CAJ-CD规范》执行优秀期刊。

地址: 哈尔滨市香坊区文治头道街30号 邮编: 150040 电话: 0451-82120966 82127726 网址: www.jxgcs.com 电邮: hrbengineer@163.com jixie888@126.com

2024 征订中 邮发代号: 14-53 20元/册 240元/年(12期)