

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180403001

喷丸强化 DD6 单晶合金中温单轴拉伸性能

王欣^{1,2}, 王科昌³, 许春玲^{1,2}, 韩梅^{1,4}, 刘青海³, 汤智慧^{1,2}

(1. 中国航发北京航空材料研究院 第五研究所, 北京 100095; 2. 航空材料先进腐蚀与防护航发重点实验室, 北京 100095; 3. 中国航发南方工业有限公司科技工程部, 株洲 412002; 4. 先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

摘要: 为研究喷丸对单晶合金中温拉伸性能影响, 采用陶瓷弹丸对 DD6 单晶合金 (后简称单晶) 进行喷丸, 研究了 [001]取向单晶原始/喷丸后 600、650 和 850℃ 的单轴拉伸性能。采用显微硬度和透射电镜分析了喷丸单晶表层组织, 并采用扫描电镜观察了拉伸断口。结果表明: 喷丸对单晶中温抗拉、屈服强度及 850℃ 拉伸塑性无影响, 而喷丸后单晶的 600 和 650℃ 拉伸塑性显著下降。650℃ 时, 延长率和断面收缩率分别由 16.1% 和 20.1% 下降到喷丸后的 3.8% 和 6.9%; 600℃ 时, 延长率和断面收缩率分别由 10.5% 和 18.4% 下降到喷丸后的 2.8% 和 7.5%。喷丸单晶表面形成了以 {111} 交叉滑移孪晶面, 与 600 和 650℃ 拉伸主滑移面重合, 孪晶使得拉伸过程进一步表面变形困难, 内部金属变形受到限制, 表现为喷丸单晶 600 和 650℃ 拉伸塑性下降。单晶 850℃ 拉伸过程中, 除开动八面体滑移外, 还开动了六面体滑移, 未出现喷丸孪晶面与拉伸主滑移面重合问题, 故喷丸不影响 850℃ 单晶拉伸塑性。

关键词: 喷丸; 单晶合金; 拉伸性能; 塑形

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)01-0048-05

One-axis Tensile Property of Shot-peened DD6 Single Crystal Superalloy

WANG Xin^{1,2}, WANG Kechang³, XU Chunling^{1,2}, HAN Mei^{1,4}, LIU Qinghai³, TANG Zhihui^{1,2}

(1. Lab.5, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Aviation Key Laboratory of Advanced Corrosion and Protection on Aviation Materials, Beijing 100095, China; 3. Technical Engineering Department, AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China; 4. National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: To research the influence of shot peening on the mechanical property of the single crystal superalloy at the medium temperature, ceramic shot was employed to peen the DD6 single crystal superalloy (SX) to investigate one-axis tensile properties at 600, 650 and 850℃, compared with that of the as-received alloy. Surface integrity of shot-peened SX was characterized using micro-hardness test and TEM, and tensile fractures were observed by SEM. Results show that shot peening has no obvious effect on the tensile strength, yield strength and tensile plasticity at 850℃. However, tensile plasticity at 600 and 650℃ significantly declines after peening. At 650℃, the average elongation and cross-section shrinkage rate after peening fall from 16.1% and 20.1% to 3.8% and 6.9%, respectively, while the two properties at 600℃, go down from 10.5% and 18.4% to 2.8% and 7.5%, respectively. {111} interlaced-line-type twins are formed by shot peening, which is close to the tensile fracture surface, i.e, the glide plane at 600℃ and 650℃. During the tensile process, the twins further make surface metal deformation difficult and also restrict the slippage of the inner metal, which express the phenomena of the 600℃ and 650℃ tensile plastic of peened SX descending. During the process of 850℃ tension, not only octahedron glide but hexahedron glide occurs. Furthermore, there is no coincidence between shot peening twin plane and main glide surface in tension. Therefore, shot peening does not affect the tensile plasticity of SX at 850℃.

Keywords: shot peening; single crystal superalloy; tensile property; plastic surface integrity

收稿日期: 2018-10-04; 修回日期: 2019-02-05

通信作者: 王欣 (1983—), 男 (汉), 高级工程师, 博士; 研究方向: 抗疲劳的表面强化技术; E-mail: rasheed990918@163.com

基金项目: 航空科学基金 (2015ZF21017)

Fund: Supported by Aeronautical Science Foundation (2015ZF21017)

引用格式: 王欣, 王科昌, 许春玲, 等. 喷丸强化 DD6 单晶合金中温单轴拉伸性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(1): 48-52.

WANG X, WANG K C, XU C L, et al. One-axis tensile property of shot-peened DD6 single crystal superalloy[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(1): 48-52.

0 引 言

随发动机推力和推重比提高, 国内外先进航空发动机选用单晶合金作为涡轮叶片的主要材料^[1-2], 以 DD6 为代表的第二代镍基单晶合金以良好的综合性能在我国得到广泛应用^[3-4]。

涡轮叶片一般在中温至高温下服役。缘板以上部位在服役中受到燃气冲击, 处于高温状态(980℃ 以上); 缘板以下的伸根、榫头部位无燃气冲击作用, 一般为中温状态(850℃ 以下)^[5]。目前针对单晶疲劳性能研究多为高温疲劳性能^[6], 中温疲劳性能也得到研究^[7]。单晶表面强化工艺研究^[8-10]说明, 喷丸提高了单晶中温疲劳性能。

拉伸性能是合金基础性能。此前单晶拉伸性能研究更多为单晶成分^[11]、热处理状态^[12]、取向^[13]等影响。在多晶体方面, 经典文献^[14]一般认为喷丸对于多晶合金拉伸性能无影响, 部分文献表明喷丸强化后铸造 TiAl 合金^[15]、2024-T351 铝合金^[16]的拉伸强度和塑性提高, 未见喷丸单晶拉伸性能的研究报道。因此, 有必要研究喷丸对单晶中温拉伸性能的影响及原因, 为叶片喷丸工艺应用提供技术支持。

1 材料与工艺

试验材料为[001]取向的 DD6 单晶合金(后文简称为单晶), 经过完全热处理^[17]。拉伸试样取自合金铸棒, 铸棒取向与[001]夹角不超过 10°。试样如图 1 所示。

喷丸过程符合 HB/Z 26-2011, 采用陶瓷丸 AZB600, 喷丸强度为 0.15 mmA, 试样旋转喷丸, 时间 2 min, 表面覆盖率 200%。

在 MTS 拉伸性能试验机上完成拉伸试验, 测

试了单晶合金 600、650 和 850℃ 下拉伸性能, 符合标准 HB 5195-1996。将试样纵剖、抛光后, 在 Fm-700 数显显微硬度计上测试了硬度梯度, 压力为 200 g。在喷丸试样(7 mm×7 mm×15 mm, 15 mm 方向与[001]方向重合)上进行了截面透射电镜试样制样, 方法如文献^[18], 采用 JEOL 2100F 场发射透射电镜观察了喷丸单晶截面组织。拉伸试验后, 采用 Quanta600 扫描电镜, 对典型断口进行了宏微观观察。

2 试验结果

2.1 拉伸性能

原始和喷丸后单晶的拉伸性能如表 1 所示: ①3 个温度下, 喷丸对单晶抗拉强度和屈服强度无影响; ②650℃ 时, 延长率和断面收缩率分别由 16.1% 和 20.1% 下降到喷丸后的 3.8% 和 6.9%; 600℃ 时, 延长率和断面收缩率分别由 10.5% 和 18.4% 下降到喷丸后的 2.8% 和 7.5%; ③850℃ 时, 喷丸对单晶延长率和断面收缩率无影响。

600 和 650℃ 喷丸单晶拉伸塑形下降; 850℃ 未发生此现象。该结果此前未见报道。现象分析

表 1 原始和喷丸状态 DD6 单晶合金 600、650 和 850℃ 拉伸性能

Table 1 Tensile properties of DD6 single crystalsuperalloy (SX) of as-received (AR) and shot peening (SP) statues at 600, 650 and 850℃

Sample	T /℃	No.	Rm /MPa	ReH /MPa	A /%	Z /%
AR	600	1	1003	960	10.8	13.5
		2	925	892	13.3	26.0
		3	1075	989	7.5	15.7
		4	971	930	3.0	7.8
SP	600	5	948	882	3.9	7.8
		6	1081	994	1.5	7.1
		7	915	880	22.6	27.1
		8	1062	967	11.3	16.8
AR	650	9	1030	943	14.5	16.5
		10	1023	944	3.6	6.3
		11	955	889	4.6	5.1
		12	1096	984	3.3	9.4
AR	850	13	1074	972	32.0	28.4
		14	1050	912	29.8	28.4
		15	1096	969	30.8	27.8
		16	1062	1015	22.8	24.7

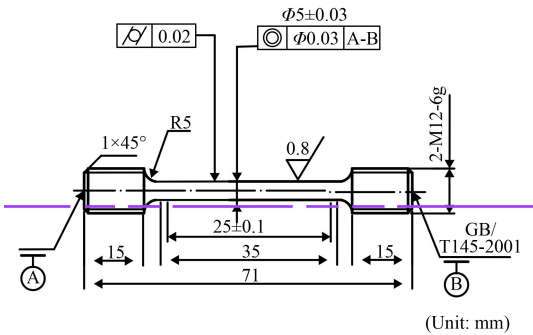


图 1 拉伸试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile sample

认为与喷丸强化层特性和单晶材料拉伸特性有关，通过喷丸组织观察和拉伸断口进一步分析。

2.2 组织状态

喷丸使单晶表层金属产生弹塑性形变，如图 2 所示。喷丸单晶表面观察到不同于基体立方组织的“交错线型”(图 2 红色和绿色标出)。衍射点阵分析可知斜线对应面分别为 $\{111\}$ 晶面族的 $(11\bar{1})$ 面和 $(1\bar{1}1)$ 面。进一步采用高分辨模式观察可知(图 3)，该交错线型面实际上是孪晶面，密勒指数为 $(11\bar{1})$ ，孪晶方向为 $[112]$ 。图 3(b)中，反傅里叶变换得到的条纹部位即为形变孪晶。

喷丸单晶表层硬度显著上升。如图 4 可知，喷丸前单晶基体硬度基本在 450 HV_{0.2}，而喷丸引入深度达到 270 μm 的硬化层，硬化层内最大硬度可达 700 HV_{0.2}。

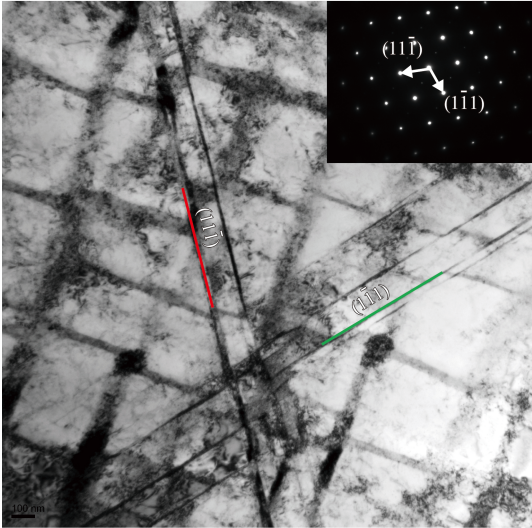


图 2 透射电镜 8000 倍下喷丸 DD6 单晶的交错线型组织
Fig.2 Interlaced-line-type structure of peened DD6 SX by TEM with 8000X

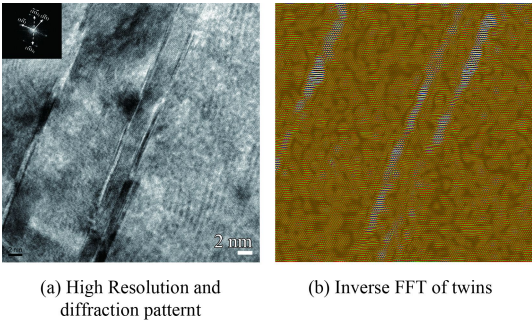


图 3 喷丸 DD6 单晶孪晶截面高分辨组织
Fig.3 Interlaced-line-type cross-section structure of peened DD6 SX by HRTEM

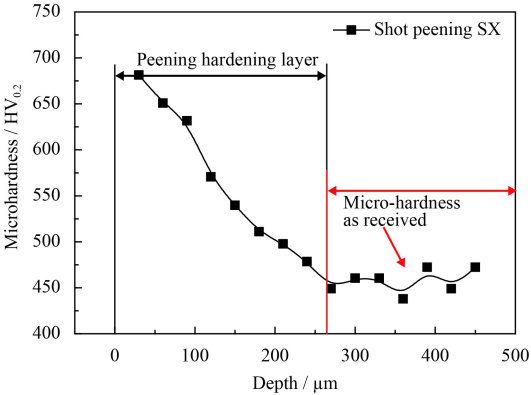


图 4 喷丸后 DD6 单晶合金硬度梯度
Fig.4 Hardness profile of peened DD6 SX

2.3 拉伸断口

通常，单轴拉伸过程中，与拉伸轴成 45°的剪应力使得晶体发生滑移，导致金属塑性形变。

断口截面与拉伸轴夹角上，对 $[001]$ 取向的单晶原始状态，在 600 和 650℃ 下，最大剪应力导致 $\{111\}$ 面发生滑移(八面体滑移)，滑移面(即断面)与拉伸轴呈 50°左右^[19]。拉伸断口宏观断面(图 5)说明，喷丸后单晶 650℃ 断面也与拉伸轴呈 50°左右。

断口截面形状上，原始状态在 650℃ 拉伸屈服后，材料发生均匀地塑性流变，试样截面从圆形变为椭圆形。微观断口平整，观察到明显沿晶体学平面滑移开裂形貌。相比之下，喷丸的弹丸撞击力作为“第一次”拉伸作用在单晶上，产生表面层形变孪晶；当 650℃ 拉伸过程作为“第二次”拉伸作用，达到屈服强度时，表面孪晶层由于应变硬化未发生塑性形变，未被喷丸强化的芯部八面体滑移受到表层孪晶面限制，发生塑性流变更加困难；当拉伸应力继续增大，表面和芯部金属将共同发生塑性形变，直至断裂。从微观断口上看，同样可观察到沿晶体学平面滑移开裂特征，断面相对较圆。总体上，喷丸单晶拉伸过程中协调塑性形变历程短，体现为喷丸后 650℃ 拉伸塑性下降。600℃ 拉伸变形机制与 650℃ 基本一致，因此，也出现喷丸后拉伸塑性下降情况。

850℃ 温度相对较高，在拉伸时，除了开动八面体滑移，还发生了六面体滑移^[19]，宏观断面(图 6)呈多表面状，未出现喷丸孪晶面与拉伸主滑移面重合问题。微观断口起伏不平，能够观察到明显的延性变形断面，故喷丸不影响 850℃ 单晶拉伸塑性。

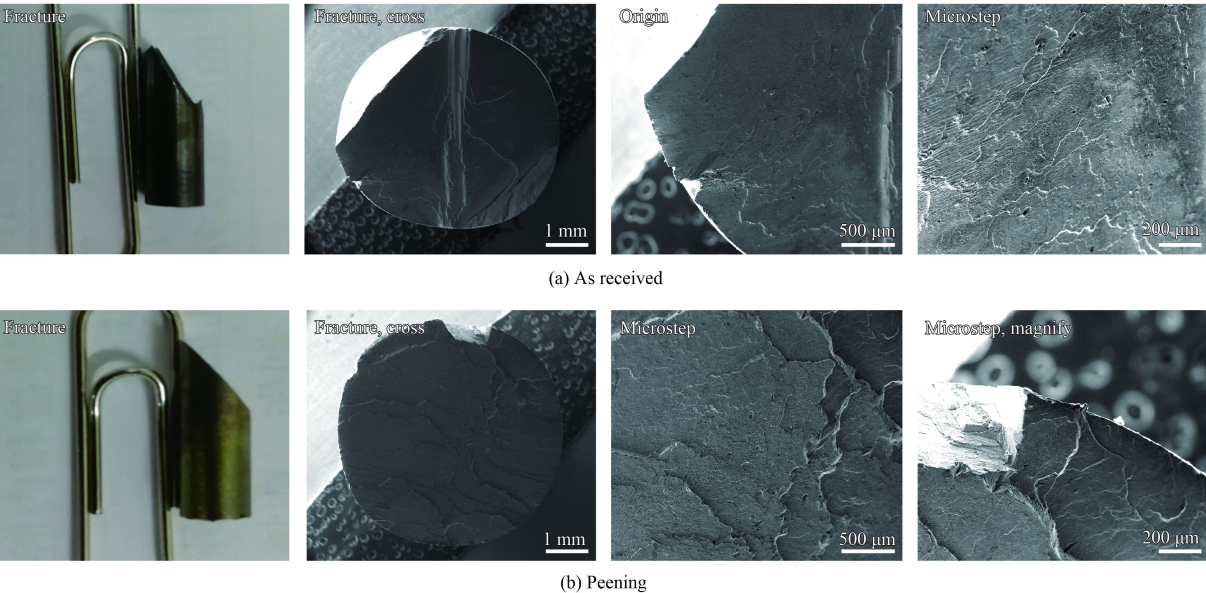


图 5 DD6 单晶合金 650℃ 拉伸宏观微观断面
Fig.5 Tensile macro- and micro-scopic fracture of DD6 SX at 650℃

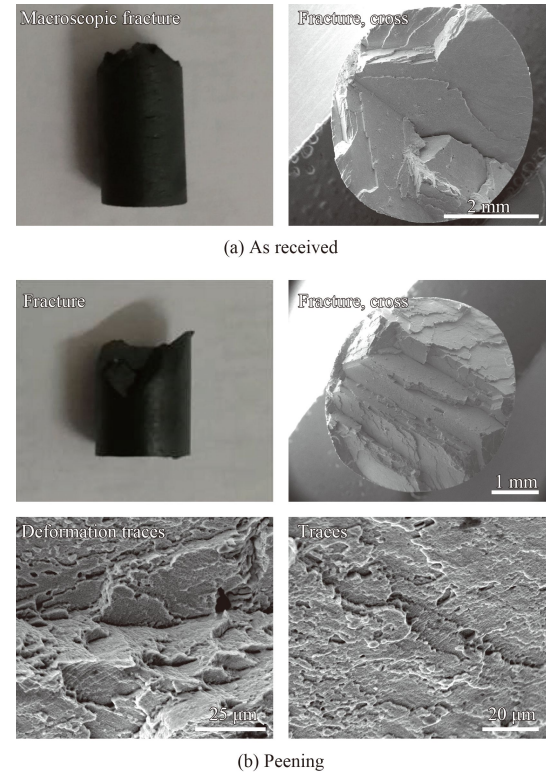


图 6 DD6 单晶 850℃ 拉伸宏观断面
Fig.6 Tensile macroscopic fracture of DD6 SX at 850℃

应该说明的是, 喷丸强化是一个利用表层金属塑性形变产生应变硬化作用, 提高表层金属强度, 从而提高疲劳裂纹萌生和扩展难度的工艺方法^[10]。单晶合金表层 (111) 孪晶层既是产生疲劳强化效果的原因, 也是导致[001]方向镍基单晶在

600 和 650℃ 拉伸塑性下降的原因。在现代发动机设计中, 通常采用疲劳强度设计, 单晶叶片不会在屈服强度上下服役, 而喷丸过程提高了单晶合金的疲劳性能, 将对发动机涡轮叶片强度设计起到良好支持作用。

3 结 论

- (1) 喷丸对于 DD6 单晶合金中温抗拉、屈服强度及 850℃ 拉伸塑性无影响, 而喷丸后单晶的 600 和 650℃ 拉伸塑性显著下降。650℃ 时, 延长率和断面收缩率分别由 16.1% 和 20.1% 下降到喷丸后的 3.8% 和 6.9%; 600℃ 时, 延长率和断面收缩率分别由 10.5% 和 18.4% 下降到喷丸后的 2.8% 和 7.5%。
- (2) 喷丸在单晶表面形成了以{111}交叉滑移孪晶面, 与 600 和 650℃ 拉伸断面方向, 即主滑移面重合。表面层孪晶使得拉伸过程表里协调塑性形变困难, 内部金属变形受到限制, 表现为喷丸单晶 600 和 650℃ 拉伸塑性下降。
- (3) 单晶 850℃ 拉伸过程中, 除开动八面体滑移外, 还开动了六面体滑移, 未出现喷丸孪晶面与拉伸主滑移面重合问题, 故喷丸不影响 850℃ 单晶拉伸塑性。

参考文献

[1] 李嘉荣, 金海鹏, 刘世忠. 第二代单晶高温合金 DD6 在

- 980℃ 长期时效后的显微组织与持久性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(10): 1784-1787.
- LI J R, JIN H P, LIU S Z. Stress rupture properties and microstructures of the second generation single crystal superalloy DD6 after long term aging at 980℃[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(10): 1784-1787(in Chinese).
- [2] GEL M, DUHL D N, GIAMEI A F. The development of single crystal superalloy turbine blades[C]// *Superalloys*, 1980: 205-214.
- [3] LI J R, ZHONG Z G, LIU S Z, et al. A low-cost second generation single crystal superalloy DD6[C]// *Superalloys*, 2000: 777-783.
- [4] RONG P, WANG N, WANG L, et al. The influence of grain boundary angle on the hot cracking of single crystal superalloy DD6[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2016, 676: 181-186.
- [5] 陈亚东, 郑运荣, 冯强. 基于微观组织演变的 DZ125 定向凝固高压涡轮叶片服役温度场的评估方法研究[J]. 金属学报, 2016, 52(12): 1545-1556.
- CHEN Y D, ZHENG Y R, FENG Q. Evaluating service temperature field of high pressure turbine blades made of directionally solidified DZ125 superalloy based on micro-structural evolution[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(12): 1545-1556 (in Chinese).
- [6] MOVERARE J J, JOHANSSON S, REED R C. Deformation and damage mechanisms during thermal-mechanical fatigue of a single-crystal superalloy[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(7): 2266-2276.
- [7] LI S, PING L. Low-cycle fatigue behavior of a nickel base single crystal superalloy at high temperature[J]. *Rare Metal Materials & Engineering*, 2015, 44(2): 288-292.
- [8] 陈艳华. 镍基单晶高温合金喷丸层塑性变形行为及其表征研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- CHEN Y H. Plastic deformation behavior of shot-peening layer of nickel-based superalloy[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014 (in Chinese).
- [9] 王欣, 尤宏德, 赵金乾, 等. 喷丸对 DD6 单晶合金高温疲劳性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2013, 26(3): 21-24.
- WANG X, YOU H D, ZHAO J Q, et al. Influence of shot-peening on the high-temperature fatigue property of DD6 single crystal superalloy[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(3): 21-24 (in Chinese).
- [10] 王欣, 尤宏德, 李嘉荣, 等. 陶瓷弹丸喷丸强化对 DD6 单晶高温合金表面完整性的影响[J]. *材料工程*, 2014, 21(4): 53-57.
- WANG X, YOU H D, LI J R, et al. Influence of ceramic-shot-peening on surface integrity of DD6 single crystal superalloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014, 21(4): 53-57 (in Chinese).
- [11] 喻健, 李嘉荣, 史振学, 等. DD6 单晶高温合金二次 γ' 相的析出[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(8): 1654-1658.
- YU J, LI J R, SHI Z X, et al. Precipitation of secondary γ' phase of DD6 single crystal superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(8): 1654-1658 (in Chinese).
- [12] 水丽, 胡壮麒. 高温长期时效对一种镍基单晶合金拉伸和持久性能的影响[J]. 航空材料学报, 2014, 34(5): 12-16.
- SHUI L, HU Z Q. Effect of high temperature long-term aging on tensile alloy and stress rupture properties of a nickel base single crystal alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(5): 12-16 (in Chinese).
- [13] 李嘉荣, 史振学, 袁海龙, 等. 单晶高温合金 DD6 拉伸性能各向异性[J]. *材料工程*, 2008(12): 6-10.
- LI J R, SHI Z X, YUAN H L, et al. Tensile anisotropy of single crystal superalloy DD6[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2008(12): 6-10 (in Chinese).
- [14] 王仁智. 喷丸强化技术[M]. 国防工业出版社, 1973: 5.
- WANG R Z. Shot peening technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1973: 5 (in Chinese).
- [15] 静永娟, 王新英, 张继, 等. 喷丸处理对 TiAl 合金拉伸性能的影响[J]. *稀有金属*, 2009, 33(5): 750-753.
- JING Y J, WANG X Y, ZHANG J. Effect of shot peening on tensile properties of tial alloys[J]. *Rare Metals*, 2009, 33(5): 750-753 (in Chinese).
- [16] 孙云辉, 周建忠, 盛杰, 等. 深冷激光喷丸强化 2024-T351 铝合金拉伸性能及断口分析[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 107-114.
- SUN Y H, ZHOU J Z, SHENG J, et al. Tensile property and fracture analysis of 2024-T351 aluminum alloys by cryogenic laser peening[J]. *Chinese Laser Press*, 2017, 44(8): 107-114 (in Chinese).
- [17] 孙凤礼, 李嘉荣, 刘世忠, 等. 单晶高温合金 DD6 不同状态下的显微组织和力学性能[J]. *钢铁研究学报*, 2003, 15(z1): 269-271.
- SUN F L, LI J R, LIU S Z, et al. Microstructure and mechanical property of single crystal superalloy dd6 with different states[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2003, 15(z1): 269-271 (in Chinese).
- [18] ALTENBERGER I, SCHOLTES B, MARTIN U, et al. Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 264: 1-16.
- [19] 李嘉荣, 刘世忠, 王开国, 等. 第二代单晶合金 DD6 的拉伸性能[J]. 钢铁研究学报, 2013, 15(7): 272-275.
- LI J R, LIU S Z, WANG K G, et al. The tensile behavior of the second generation single crystal superalloy DD6[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2013, 15(7): 272-275 (in Chinese).