

引用格式: 盖鹏涛, 武赞华, 曹子文, 等. 喷丸强度对 DD6 单晶高温合金表面完整性的影响[J]. 航空材料学报, 2025, 45(1): 53-61.

GAI Pengtao, WU Yunhua, CAO Ziwen, et al. Effect of shot peening intensities on surface integrity of DD6 single crystal superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(1): 53-61.

## 喷丸强度对 DD6 单晶高温合金表面完整性的影响

盖鹏涛<sup>1</sup>, 武赞华<sup>2</sup>, 曹子文<sup>1</sup>, 魏大盛<sup>3</sup>, 付雪松<sup>2\*</sup>

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024; 2. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024; 3. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 单晶涡轮叶片作为航空发动机关键部件, 其服役寿命与表面完整性紧密相关, 通常需要对其表面进行喷丸强化以满足性能需求。基于此, 本工作采用表面轮廓仪、扫描电镜、显微硬度仪和应力测定仪等, 系统研究了喷丸前和不同喷丸强度(0.15、0.2 mmA 和 0.25 mmA)处理对 DD6 单晶高温合金的表面形貌及粗糙度、近表层微观组织、硬度和残余应力等表面完整性指标的影响规律。结果表明: 喷丸强化后的 DD6 单晶高温合金表面原始机加工痕迹减弱, 合金表面粗糙度由 0.15 mmA 试样的 0.507  $\mu\text{m}$  增大到 0.25 mmA 的 0.883  $\mu\text{m}$ ; 在近表面产生了一层梯度塑性变形层, 剧烈变形层深度由 0.15 mmA 试样的 45  $\mu\text{m}$  逐渐增大到 0.25 mmA 的 98  $\mu\text{m}$ ; 表面硬度值由原始机加工试样 490HV 逐渐增大到 0.25 mmA 的 738HV, 硬化层深度也达到 260  $\mu\text{m}$ ; 合金在 0.2 mmA 喷丸强度下表面残余压应力达到最大, 约为-821.2 MPa。

**关键词:** DD6 单晶高温合金; 喷丸强化; 表面完整性; 残余应力; 塑性变形

**doi:** 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000086

中图分类号: V263.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)01-0053-09

### Effect of shot peening intensities on surface integrity of DD6 single crystal superalloy

GAI Pengtao<sup>1</sup>, WU Yunhua<sup>2</sup>, CAO Ziwen<sup>1</sup>, WEI Dasheng<sup>3</sup>, FU Xuesong<sup>2\*</sup>

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The service life of single crystal turbine blades, which serve as pivotal components in aero-engines, is intricately tied to their surface integrity. To fulfill performance standards, these blades typically undergo shot peening to meet for reinforcement. This study meticulously examines the impact of surface morphology and various surface integrity indicators—including roughness, near-surface microstructure, hardness, and residual stress—on DD6 single-crystal superalloy before and after undergoing shot peening treatments of varying intensities (0.15, 0.2 mmA, and 0.25 mmA). Utilizing a surface profilometer, scanning electron microscope, microhardness tester, and stress tester, we comprehensively analyze these factors. The results show that shot peening diminishes the original machining marks on the DD6 superalloy's surface, with surface roughness escalating from 0.507  $\mu\text{m}$  at 0.15 mmA to 0.883  $\mu\text{m}$  at 0.25 mmA. A gradient plastic severe deformation layer emerges near the surface, its depth progressively increasing from 45  $\mu\text{m}$  at 0.15 mmA to 98  $\mu\text{m}$  at 0.25 mmA. Furthermore, the surface hardness value rises steadily, from 490HV in the original specimen to 738HV at 0.25 mmA, with the hardened layer's depth also augmenting, from 50  $\mu\text{m}$  initially to 260  $\mu\text{m}$  at 0.25 mmA. Notably, the alloy attains its peak residual compressive stress of approximately -821.2 MPa on the surface when subjected to a blasting intensity of 0.2 mmA.

**Key words:** DD6 single crystal superalloy; shot peening; surface integrity; residual stress; plastic deformation

镍基单晶高温合金是目前制造先进航空发动机涡轮叶片的首选材料,其高温力学性能、高温稳定性等直接与航空发动机的性能相关<sup>[1]</sup>。单晶涡轮叶片由于长期在高温高压和复杂应力等极端环境中服役,极易在表面萌生裂纹从而加速疲劳失效,危及飞行安全<sup>[2-4]</sup>。因此,对单晶涡轮叶片进行表面强化,改善其表面完整性对于航空发动机的服役可靠性具有重要意义。

为了改善航空发动机部件的表面质量,目前国内外航空工业采用最为广泛的表面强化技术是喷丸强化<sup>[5-6]</sup>。喷丸强化通过向工件表面喷射弹丸,使工件表面产生一层梯度塑性变形层,引起近表层的位错密度增生和晶格畸变,晶粒细化,产生一定厚度的残余压应力,同时提升表面硬度,从而显著改善工件表面质量和抗疲劳性能。目前,喷丸强化技术已在航空发动机用铝合金<sup>[7-9]</sup>、钛合金<sup>[10-12]</sup>以及高温合金<sup>[13-15]</sup>等多晶材料中广泛应用且技术成熟。近年来,采用喷丸强化技术对单晶高温合金进行表面强化也逐渐引起研究学者的关注,并进行相关研究。李明睿等<sup>[16]</sup>研究发现喷丸强化引起DD6单晶高温合金表面粗糙度改变并引入了表层残余压应力,有效提升DD6单晶高温合金的低周疲劳寿命。杨清等<sup>[17]</sup>研究了陶瓷丸和铸钢丸两种喷丸介质对DD5单晶高温合金旋转弯曲疲劳性能的影响,研究发现两种喷丸介质均能提高合金的疲劳寿命,铸钢丸的平均疲劳寿命更高,经陶瓷丸喷丸后疲劳源由未喷丸的表面变为次表面,而铸钢丸喷丸后疲劳源则转移到内部更深的位置,进一步延缓了疲劳裂纹扩展。杨红超等<sup>[18]</sup>发现经喷丸强化后,DD6单晶高温合金的低周缺口疲劳寿命明显提高,其疲劳寿命延长的主要原因是喷丸引起的表层残余压应力以及表层位错密度的增加。Wang等<sup>[19]</sup>研究了喷丸强化DD11单晶高温合金的中温疲劳性能,发现喷丸使单晶合金表层铸造微孔发生闭合或椭圆化形变,减小了铸造微孔带来的应力集中,避免疲劳过程中疲劳源萌生于铸造微孔。上述研究表明喷丸强化可以通过减缓表面应力集中、引入表层残余压应力和优化表层孔隙缺陷等方式抑制表面裂纹萌生,从而有效提高单晶高温合金的疲劳寿命。然而,一些研究表明,当喷丸工艺参数选择不当时,会导致材料表面粗糙度增大,甚至在表面产生微裂纹或开裂,从而会对材料性能产生不利影响<sup>[7,20-21]</sup>。因此,选择合适的喷丸工艺参数对于改善合金表面质量和提升疲劳寿命至关重要。在众多喷丸工艺参数中,喷丸强度是调控喷丸强化效果

最为重要的因素之一。喷丸强度不同引起的材料表面完整性变化将会对构件性能造成很大差异<sup>[22]</sup>。然而,目前针对喷丸强度对材料表面完整性影响的研究主要集中在多晶材料,而对单晶高温合金的相关研究较少。因此,开展喷丸强度对单晶高温合金表面完整性的影响具有十分重要的意义。

基于此,本研究选用我国自主研制的第二代DD6单晶高温合金作为研究对象,对其表面进行不同强度喷丸处理,通过对喷丸前后DD6单晶高温合金的表面形貌、表面粗糙度、表层微观组织演变、硬化层和残余应力等系统表征,探究不同喷丸强度处理对单晶高温合金表面完整性的影响,并进一步分析DD6单晶高温合金的喷丸强化机理。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 材料

实验所用第二代DD6单晶镍基高温合金化学成分见表1。采用螺旋选晶法在真空定向凝固炉中沿[001]取向制备DD6单晶试棒,其主轴方向与[001]取向的偏差角小于15°。标准热处理工艺为:1290℃/1h+1300℃/2h+1315℃/4h/AC(空冷)+1120℃/4h/AC+870℃/32h/AC。经标准热处理后DD6单晶高温合金的微观组织如图1所示。由图1可以看到DD6单晶高温合金微观组织由基体 $\gamma$ 相和强化相 $\gamma'$ 构成,且 $\gamma'$ 呈高度规则的立方态分布在 $\gamma$ 基体相中,其中 $\gamma'$ 相所占体积分数约为66%,其平均宽度大约为0.4 $\mu\text{m}$ 。将热处理后的单晶棒材用线切割制成10mm×10mm×8mm的块状试样,然后对其表面先精铣,后用磨床磨削精加工。然后将加工后的试样浸入酒精中,利用超声波清洗机清洗试样表面的油污和杂质,随后进行喷丸强化。

### 1.2 表面喷丸强化

本研究采用KXS-3500P型数控喷丸机进行表面喷丸强化,喷丸表面法线方向为[100],选用的弹丸材质为0.3mm的S110铸钢丸,喷丸强度分别为0.15、0.2mmA和0.25mmA。由Almen试片来确定,喷丸表面覆盖率为200%。

表1 DD6单晶高温合金的主要化学成分(质量分数/%)  
Table 1 Main chemical compositions of DD6 single crystal superalloys (mass fraction/%)

Co	Cr	Mo	Ta	W	Nb	Al	Re	Hf	C	Ni
9	4.3	2	7.2	8	0.5	6	2.2	0.1	0.01	Bal.

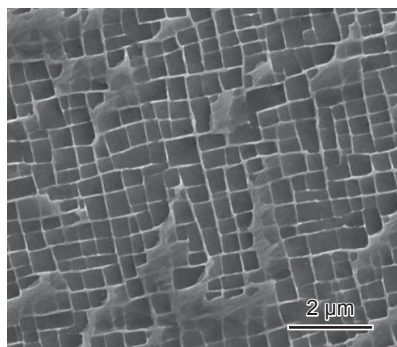


图 1 DD6 单晶高温合金标准热处理后的微观组织

Fig. 1 Microstructure of DD6 single crystal superalloy after standard heat treatment

### 1.3 实验方法

采用 Zygo 900 光学轮廓仪测量单晶高温合金试样喷丸前后的表面轮廓形貌和表面粗糙度。为了避免局部测量偶然性,对每个样品均测量不同位置的粗糙度 3 次并取平均值。采用 SU5000 场发射扫描电镜(SEM)对试样喷丸前后单晶表面形貌进行观测。对单晶高温合金试样横截面进行打磨抛光后,采用 JSM-IT800-SHL 高分辨场发射扫描电子显微镜观察喷丸前后合金的横截面微观形貌,并用电子背散射衍射(EBSD)探头,观测喷丸前后 DD6 单晶高温合金表层塑性变形层的变化情况。采用华银显微硬度计测试喷丸前后试样的横截面从表面到基体内部不同深度的显微硬度分布。测试载荷大小为 1.96 N,保载时间为 15 s,对同一层深的硬度值进行 5 次测量并求平均值。由于单晶

高温合金喷丸后表面呈多晶化状态,因此采用 XL-640 型 X 射线应力测定仪测试喷丸前后 DD6 单晶高温合金表面残余应力,参数为: Mn 靶,电压 20 kV,电流 5 mA,侧倾法测试,衍射晶面为(311)。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面形貌及粗糙度

图 2 为原始态和不同喷丸强度处理后 DD6 单晶高温合金表面的 SEM 形貌。可以看出,在未喷丸原始试样表面存在着密集的、平行的沟槽,这是明显的机加工刀痕(图 2(a))。经过喷丸处理后,试样表面由许多大小不一的弹坑覆盖,这表明合金表面发生了不同程度的塑性变形。随着喷丸强度的增加,试样表面原始机加工痕迹逐渐减弱。从图 2(b)可以看到 0.15 mmA 喷丸试样表面弹坑痕迹较浅,原始机加工痕迹减弱,但由于喷丸强度较小,在试样表面仍存在大量较深的机加工刀痕。当喷丸强度增大到 0.2 mmA 时,如图 2(c-1)所示,试样表面的原始机加工痕迹显著减少,表面也变得更加平滑。进一步放大后(图 2(c-2))可以看到 0.2 mmA 喷丸试样表面存在一些局部褶皱和折叠,这是弹丸对原始机加工痕迹的撞击和挤压造成的。当喷丸强度进一步增大到 0.25 mmA 时,如图 2(d-1)所示,试样表面机加工痕迹几乎完全消除,表面弹坑覆盖痕迹明显,弹坑深度增大,这意味着此时合金表面的塑性变形程度显著增加。进一步在高倍下观察

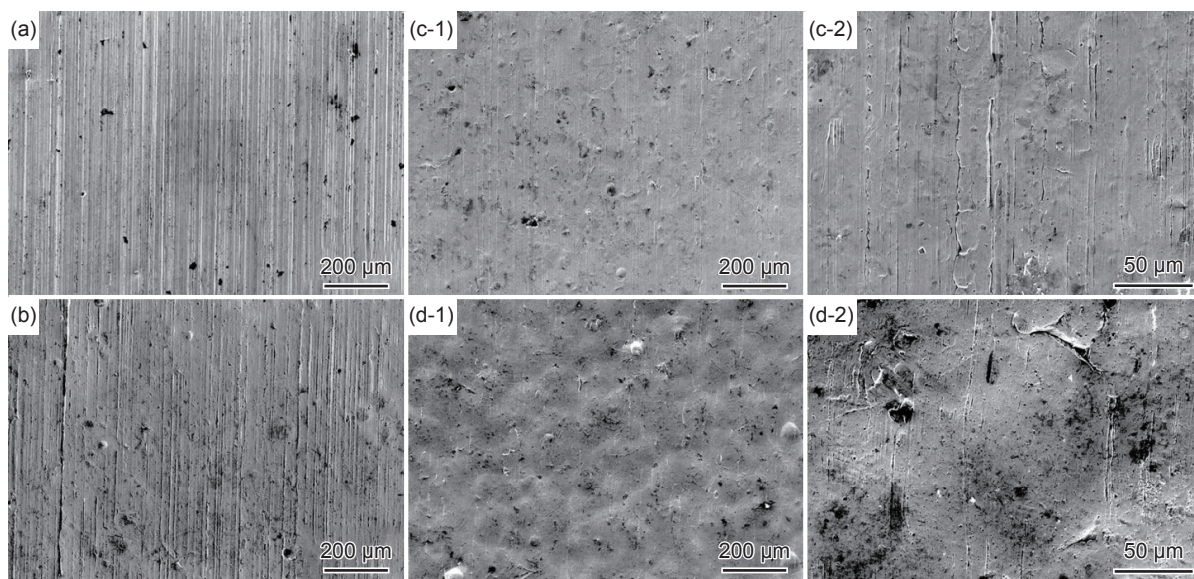


图 2 DD6 单晶高温合金喷丸前后表面形貌图 (a)原始态; (b)0.15 mmA; (c)0.2 mmA; (d)0.25 mmA; (1)低倍; (2)高倍

Fig. 2 Surface morphology of DD6 single crystal superalloy before and after shot peening (a) original machined state; (b) 0.15 mmA; (c) 0.2 mmA; (d) 0.25 mmA; (1) low magnification; (2) high magnification

(图2(d-2))0.25 mmA 喷丸试样表面,可以看到在合金表面存在一些微裂纹,这表明由于喷丸强度过大,致使合金表面发生了损伤,可能会对合金疲劳性能产生不利影响。

对 DD6 单晶高温合金喷丸前后的三维表面轮廓形貌进行观测,如图3所示。可以看到原始机加态样品表面存在大量连续、平行排列的机加工刀痕。试样经过不同强度喷丸处理后,表面均分布着

许多弹坑,这是由大量高能弹丸撞击表面后发生了塑性变形导致的。此外,随着喷丸强度的增大,可以看到试样表面的原始机加工痕迹减弱,在表面产生的弹坑尺寸和深度均呈增大趋势,对应着图3(b)~(d)中较深的蓝色弹坑区域面积逐渐增加,这是由于弹丸动能随喷丸强度增加而增大,从而增加了弹丸撞击原始机加工表面产生的挤压和变形程度。

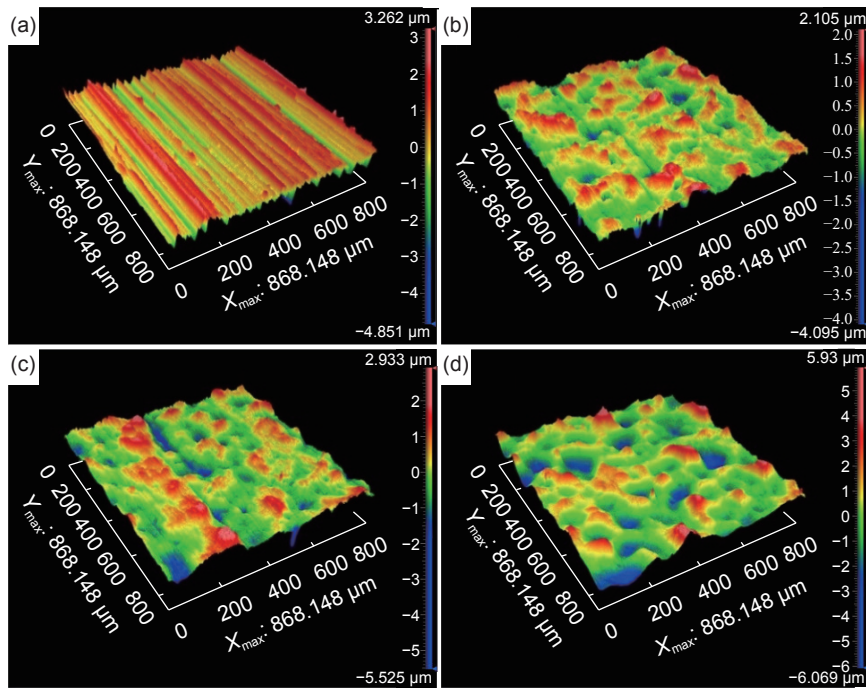


图3 DD6 单晶高温合金喷丸前后的表面3D轮廓 (a)原始态; (b)0.15 mmA; (c)0.2 mmA; (d)0.25 mmA

Fig. 3 3D surface profiles of DD6 single crystal superalloy before and after shot peening (a)original machined state; (b)0.15 mmA; (c)0.2 mmA; (d)0.25 mmA

进一步测量 DD6 单晶高温合金喷丸前后的二维表面线轮廓及表面粗糙度,如图4和表2所示。可以发现原始机加态样品表面由密集的上下波动状曲线构成,且曲线的峰谷处较为尖锐,其 $R_z$ (算术平均粗糙度)和 $R_a$ (十点平均粗糙度)值分别为 $6.245 \mu\text{m}$ 和 $0.817 \mu\text{m}$ 。经 $0.15 \text{ mmA}$ 喷丸处理后,试样表面的轮廓曲线上下波动幅度较为平缓,波峰与波谷之间的距离变大,其 $R_z$ 和 $R_a$ 值分别下降为 $2.169 \mu\text{m}$ 和 $0.507 \mu\text{m}$ 。随着喷丸强度的增加,试样表面轮廓曲线波动幅度增大,这是弹丸动能增加表面弹坑深度增大导致的。 $0.2 \text{ mmA}$ 和 $0.25 \text{ mmA}$ 喷丸强度下的 $R_z$ 分别变为 $2.604 \mu\text{m}$ 和 $4.088 \mu\text{m}$ , $R_a$ 分别增大到 $0.532 \mu\text{m}$ 和 $0.883 \mu\text{m}$ 。与原始样品相比,喷丸试样的 $R_z$ 值减小,说明轮廓曲线波动程度减缓,这是由于试样原始表面的机加工尖锐凸起痕迹经过弹丸撞击后被挤压和折叠,导致喷丸后表

面变得较为平滑,这与图2形貌一致。此外,在图4中可以看到 $0.15 \text{ mmA}$ 和 $0.2 \text{ mmA}$ 喷丸试样表面曲线整体呈现小幅度的上下起伏,说明原始机加工痕迹大幅减弱,而当喷丸强度增大到 $0.25 \text{ mmA}$ 时,表面轮廓曲线整体较为光滑,未发现小幅度的细小起伏,这进一步证明 $0.25 \text{ mmA}$ 喷丸试样表面原始机加工痕迹完全消除。此外,通过测量合金不同区域的表面粗糙度,可以发现原始机加工试样 $R_a$ 的变化范围很小,这是由于表面进行精铣后,表面的机加刀痕呈平行、均匀分布。而喷丸后合金 $R_a$ 的波动范围增大,这可能由两方面因素共同导致:(1)表面不同区域的弹坑深度不同导致局部塑性变形不均匀;(2)试样表面的局部褶皱、折叠或微裂纹导致的局部粗糙度突变。

为了进一步评估喷丸对 DD6 单晶高温合金表面质量的影响,对喷丸前后试样的表面应力集中系

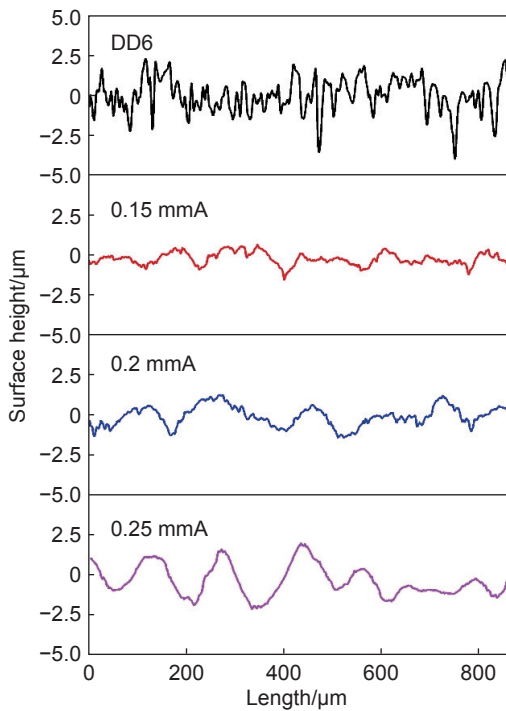


图 4 DD6 单晶高温合金喷丸前后表面二维轮廓曲线  
Fig. 4 2D profile curves of the surface of DD6 single superalloy before and after shot peening

数  $K_{st}$  进行计算, 计算公式见式(1)<sup>[23]</sup>:

$$K_{st} = 1 + 2.1(R_z/S) \quad (1)$$

式中,  $S$  为两个相邻波峰的半宽。经计算, 原始态样品的表面应力集中系数  $K_{st}$  为 2.51。经 0.15、0.2 mmA 和 0.25 mmA 喷丸强化后样品的  $K_{st}$  分别为 1.87、1.99 和 1.17。喷丸后的 DD6 单晶高温合金表面相对平滑的弹坑逐渐代替了原始机加态试样表面上尖锐、密集的机加工刀痕, 同时降低了波峰和波谷之间的高度差  $R_z$  并增大了相邻波峰  $S$  之间的宽度, 进而降低了应力集中系数。这表明经喷

表 2 喷丸前后 DD6 单晶高温合金的表面粗糙度测量值  
Table 2 Measured surface roughness of DD6 single crystal superalloy before and after shot peening

Sample	Peak-valley roughness $R_z/\mu\text{m}$	Mean roughness $R_a/\mu\text{m}$
Original machined state	6.245	0.817±0.010
0.15 mmA	2.169	0.507±0.033
0.2 mmA	2.604	0.532±0.049
0.25 mmA	4.088	0.883±0.094

丸强化的 DD6 单晶高温合金局部应力集中更小, 可以有效改善合金的表面质量, 从而提高单晶高温合金构件表面的结构稳定性。

### 2.2 近表层塑性变形

对喷丸前后 DD6 单晶高温合金横截面表层微观组织进行观察, 如图 5 所示。从图 5(a-1) 和 (a-2) 可以看到原始机加工试样近表面的  $\gamma$  和  $\gamma'$  相均向同一方向发生偏转和变形, 这是由机加工过程中刀具运动对合金表层的挤压和剪切造成的, 其变形程度随着深度的增加而迅速降低。经过喷丸处理后, 合金近表层的组织发生明显偏转和变形, 其  $\gamma$  和  $\gamma'$  相偏转方向由机加态的单一取向转变为多种偏转, 如图 5(b-1)~(d-1) 所示, 这是由大量弹丸随机撞击表面导致次表面变形程度不一致而造成。进一步观察合金喷丸处理后的局部放大图, 如图 5(b-2)~(d-2) 所示, 可以看到合金近表层  $\gamma$  和  $\gamma'$  相形状均发生严重变形, 不再呈原始的规则立方状排列, 并且在弹坑凹陷区域所对应的近表面  $\gamma$  和  $\gamma'$  相的偏转程度更大, 许多弹坑附近的原始  $\gamma$  和  $\gamma'$  双相结构消失, 表明弹坑底部中心区域的合金亚表层发生了较大的塑性变形, 这与之前报道的其他多晶材

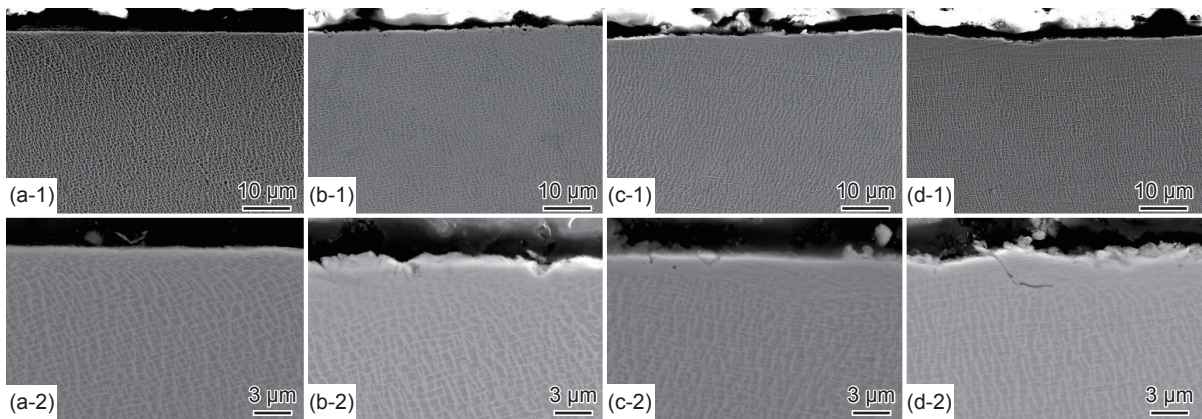


图 5 DD6 单晶高温合金喷丸前后横截面形貌 (a)原始态; (b)0.15 mmA; (c)0.2 mmA; (d)0.25 mmA; (1)低倍; (2)高倍  
Fig. 5 Cross-sectional morphology of DD6 single crystal superalloy before and after shot peening (a)original machined state; (b)0.15 mmA; (c)0.2 mmA; (d)0.25 mmA; (1)low magnification; (2)high magnification

料喷丸强化的研究结果类似<sup>[24-25]</sup>。此外,可以看到图5(d-2)中0.25 mmA喷丸试样的表面起伏明显增大,且存在表面微裂纹,这与上述2.1节的分析结果相对应。

原始态和不同喷丸强度 DD6 单晶高温合金的 EBSD 测量结果如图6所示。IPF图可以看出喷丸前后单晶合金近表面的取向分布变化。从图6(a-1)中可以看出,原始机加态的 IPF图呈现单一红色,表明其具有单一的 [001] 取向,这与其铸件生长方向相对应<sup>[26]</sup>。经过喷丸处理后,合金近表面的 IPF图不再呈现单一红色,如图6(b-1)~(d-1)所示,这表明经过喷丸处理后 DD6 单晶高温合金近表层由于塑性变形导致取向发生偏转,不再呈现单一的 [001] 取向。随着喷丸强度的增加,合金表层的塑性变形程度增加,当喷丸强度增大到 0.25 mmA 时,合金近表层发生严重塑性变形,导致 EBSD 图像采集信号较差。为了进一步观测合金近表面的塑性变形程度,对原始态和不同喷丸强度合金近表面进行了 KAM 分析。从图6(a-2)可以看到原始

态合金近表面的塑性变形程度较小,仅在接近表面约 5  $\mu\text{m}$  深度处存在一层塑性变形层,这与图5(a-1)中的挤压和剪切层相对应。而经过喷丸处理后合金表层的局部取向差明显增大,这意味着合金发生了更严重的塑性变形,且塑性变形程度随着喷丸强度的增加而增大。经测量,0.15、0.2 mmA 和 0.25 mmA 试样的塑性变形层深度分别约为 45、58  $\mu\text{m}$  和 98  $\mu\text{m}$ ,这与图6(b-1)~(d-1)的 IPF图的取向偏差区域的深度一致。这表明随着喷丸强度的增加,DD6 单晶高温合金近表面的晶格扭转程度增大,导致位错密度的增加,从而表层塑性变形程度和层深均增大<sup>[27-28]</sup>。

图7为不同喷丸强度处理后 DD6 单晶高温合金的近表面 EBSD 晶界图。可以看到 DD6 单晶高温合金经喷丸处理后在近表层均分布着许多小角晶界 ( $2^\circ\sim 10^\circ$ )。0.15 mmA 喷丸试样的小角晶界在最表面分布较密集,在距表面约 20  $\mu\text{m}$  深度范围内分布着少量沿同一方向的小角晶界,这与之前的相关研究结果相似<sup>[29]</sup>,即小角晶界沿近表层滑移带

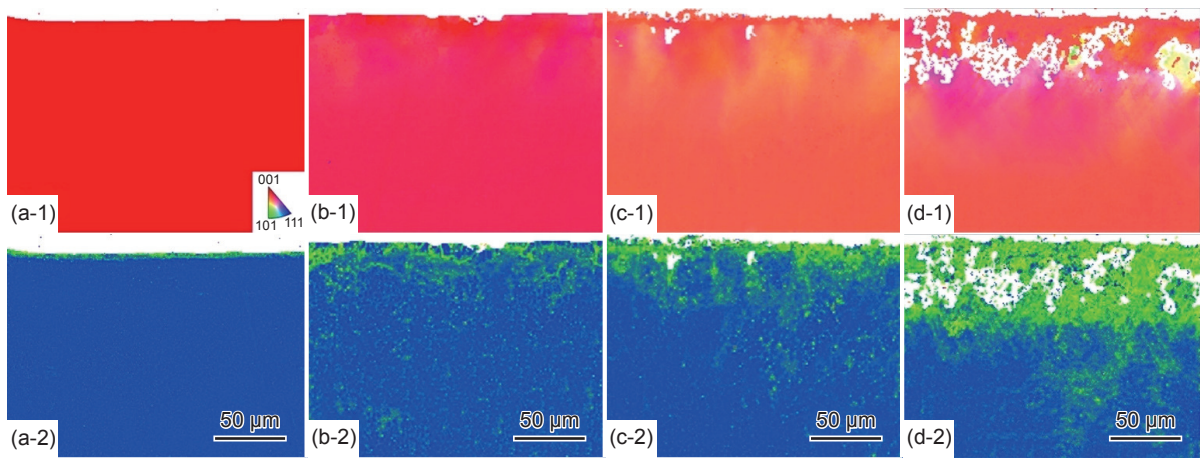


图6 DD6 单晶高温合金喷丸前后试样近表面的 EBSD-IPF(1)和 KAM(2)图 (a)原始机加态; (b)0.15 mmA; (c)0.2 mmA; (d)0.25 mmA

Fig. 6 EBSD-IPF(1) and KAM(2) images of the near-surface of DD6 single-crystal superalloy specimens before and after shot peening (a) original machined state; (b)0.15 mmA; (c)0.2 mmA; (d)0.25 mmA

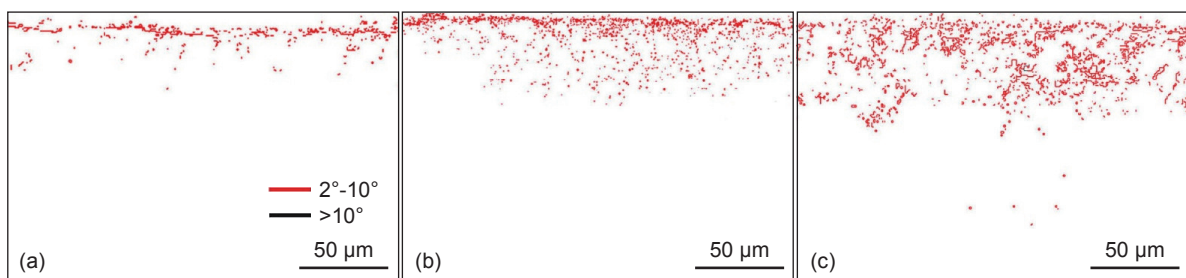


图7 DD6 单晶高温合金喷丸后近表面的 EBSD 晶界图 (a)0.15 mmA; (b)0.2 mmA; (c)0.25 mmA

Fig. 7 EBSD grain boundaries near the surface of DD6 single-crystal high-temperature alloy after shot peening (a)0.15 mmA; (b)0.2 mmA; (c)0.25 mmA

产生。当喷丸强度增加到 0.2 mmA 时, 试样近表层小角晶界分布增多, 其分布深度约 45  $\mu\text{m}$ , 且沿多个方向分布, 说明喷丸强度的增加导致了表层多个滑移系的开动。当喷丸强度进一步增大到 0.25 mmA 时, 合金小角晶界数量和分布深度都显著增加, 在距表面大约 65  $\mu\text{m}$  深度附近仍有较多的小角晶界分布。由于小角晶界大多由位错缠结、交互作用产生<sup>[30]</sup>, 因此说明随着喷丸强度的增加, DD6 单晶高温合金的表层位错堆积程度增加, 位错密度增大。此外, 从图 7 可以看到, 尽管在喷丸强度增大到 0.25 mmA, 即表面位错密度最大时, 在 DD6 单晶高温合金也未观察到大角度晶界 ( $> 10^\circ$ )。这说明尽管在 IPF 图中观察到喷丸强化 DD6 单晶高温合金的表层取向发生较大偏转, 但是在本研究所选取的喷丸强度工艺范围内, 并没有造成表层再结晶缺陷。然而, 表面小角度晶界的存在会导致单晶高温合金构件在实际服役环境中逐渐演变成大角度晶界, 从而使合金性能发生恶化。因此, 在实际加工过程中可以通过调控喷丸强度来控制单晶高温合金小角度晶界的数量和分布, 以最大限度满足其性能需求。

### 2.3 表层显微硬度分布

图 8 为喷丸前后 DD6 单晶高温合金表层沿深度方向维氏显微硬度分布曲线。可以看到, DD6 单晶高温合金基体硬度值约为 440HV。原始机加工样品的表面硬度值相对较高, 约为 490HV, 且随着深度进一步增加迅速降低, 在约 50  $\mu\text{m}$  深度处降到基体硬度值后保持不变。经 0.15、0.2 mmA 和 0.25 mmA 喷丸处理后试样表面硬度分别为达到 573、635HV 和 738HV, 与原始合金表面硬度相比, 分别增加了 16.9%、29.6% 和 50.6%, 表面硬化层深

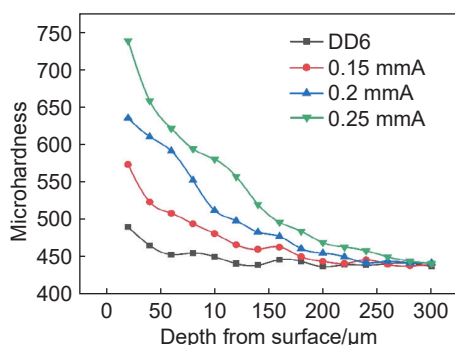


图 8 DD6 单晶高温合金喷丸前后试样距表面不同深度的显微硬度分布

Fig. 8 Distribution of microhardness at different depths from the surface of DD6 single crystal superalloy specimens before and after shot peening

度分别约为 180、240  $\mu\text{m}$  和 260  $\mu\text{m}$ 。这表明随着喷丸强度增大, DD6 单晶高温合金表面硬化程度逐渐增大, 且硬化层深度也呈增加趋势。

### 2.4 表面残余应力

图 9 为原始态和不同喷丸强度下 DD6 单晶高温合金的表面残余应力值。可以看到, 原始机加工试样和不同喷丸强度下试样表面应力状态均为压应力。原始未喷丸试样表面残余应力值约为 -303.5 MPa。经过喷丸强化后, 试样表面残余压应力均增大。随着喷丸强度的增加, 试样表面残余压应力值呈先增大后减小的趋势。喷丸强度 0.15 mmA 时表面残余应力约为 -775.2 MPa。当喷丸强度为 0.2 mmA 时, 合金表面残余应力值增加到 -821.2 MPa。当喷丸强度增加到 0.25 mmA 时, 表面残余应力值约为 -798.4 MPa, 这可能是由于 0.25 mmA 喷丸强度较大导致合金表面微裂纹增多 (见图 2 和图 5), 从而释放了部分表面残余应力。此外, 从图 7(c) 中看到 0.25 mmA 试样近表层小角晶界分布增多, 这可能导致位错发生重排, 并伴随着近表层应力发生释放和重新分布, 从而表面应力出现一定程度的降低。

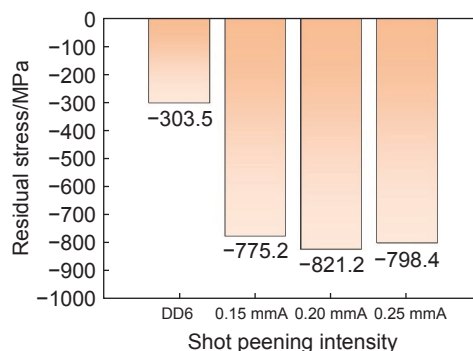


图 9 DD6 单晶高温合金喷丸前后试样的表面残余应力值  
Fig. 9 Surface residual stress values of specimens before and after shot peening of DD6 single crystal superalloy

## 3 结论

(1) 相比于原始试样, 喷丸强化后 DD6 单晶高温合金表面更加平滑, 表面粗糙度和应力集中系数均降低。随着喷丸强度增加, 合金表面粗糙度由 0.15 mmA 的 0.507  $\mu\text{m}$  增至 0.25 mmA 的 0.883  $\mu\text{m}$ 。当喷丸强度达到 0.25 mmA 时, 合金表面机加工痕迹完全消除, 表面应力集中系数  $K_{st}$  最低, 约为 1.17, 但表面出现了微裂纹。

(2) 喷丸强化 DD6 单晶高温合金表层发生晶

格偏转,不再呈现喷丸前的原始单一取向,且近表面塑性变形程度由表面到基体内部逐渐减小。随着喷丸强度增加,合金近表面塑性变形程度增大,变形层深由 0.15 mmA 喷丸强度试样的 45  $\mu\text{m}$  增加到 0.25 mmA 的 98  $\mu\text{m}$ ,且并未在表面发生再结晶。

(3)喷丸强化后 DD6 单晶高温合金表层产生一层梯度分布的硬化层。随着喷丸强度增加,试样表面硬度值增大,由原始机加工试样 490HV 逐渐增大到 0.25 mmA 的 738HV。硬化层深度由原始试样的 50  $\mu\text{m}$  逐渐增加到 0.25 mmA 试样的 260  $\mu\text{m}$ 。

(4)相比于原始试样,喷丸强化后 DD6 单晶高温合金表面残余压应力大幅增加。当喷丸强度为 0.2 mmA 时,合金表面残余压应力值可达到 -821.2 MPa。当喷丸强度为 0.25 mmA 时,试样表面微裂纹等损伤的增加导致表面残余应力有所降低,约 -798.4 MPa。

#### 参考文献:

- [1] LONG H B, MAO S S, LIU Y N, et al. Microstructural and compositional design of Ni-based single crystalline superalloys—a review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 743: 203-220.
- [2] LI P, JIN X C, ZHAO J C, et al. Oxidation behaviors and compressive strength evolution of DD6 Ni-based single-crystal superalloy at 1100  $^{\circ}\text{C}$ [J]. *Corrosion Science*, 2022: 110684.
- [3] MOVERARE J, JOHANSSON S, REED R. Deformation and damage mechanisms during thermal-mechanical fatigue of a single-crystal superalloy[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(7): 2266-2276.
- [4] 张健,王莉,王栋,等.镍基单晶高温合金的研发进展[J].*金属学报*,2023,59(9):1109-1124.  
ZHANG J, WANG L, WANG D, et al. recent progress in research and development of nickel-based single crystal superalloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2023, 59(9): 1109-1124.
- [5] 孙一帆,胡国杰,刘梦金,等.喷丸强化对 2024 铝合金/钛合金铆接件微动疲劳性能的影响[J].*表面技术*,2023,52(1):381-393.  
SUN Y F, HU G J, LIU M J, et al. Effect of shot peening on fretting fatigue resistance of 2024 aluminum alloy/titanium alloy riveted joint[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(1): 381-393.
- [6] BAGHERIFARD S. Enhancing the structural performance of lightweight metals by shot peening[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21: 1801140.
- [7] 贺柏涵,周文龙,程旭,等.7A65 铝合金喷丸强化表面完整性及疲劳性能[J].*精密成形工程*,2023,15(6):1-10.  
HE B H, ZHOU W L, CHENG X, et al. Surface integrity and fatigue properties of shot peening strengthened 7A65 aluminum alloy[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(6): 1-10.
- [8] GAO Y K. Improvement of fatigue property in 7050-T7451 aluminum alloy by laser peening and shot peening[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528: 3823-3828.
- [9] HOU H, DONG R F, TAN Y X, et al. Microstructural characteristics and enhanced mechanical properties of 2024 aluminum alloy resulting from shot-peening treatment[J]. *Materials Characterization*, 2023, 206: 113412.
- [10] 高玉魁.喷丸强化对 TC4 钛合金组织结构的影响[J].*稀有金属材料与工程*,2010,39(9):1536-1539.  
GAO Y K. Effect of shot-peening on microstructure of TC4 titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(9): 1536-1539.
- [11] 万银根,罗峰,谢兰生,等.喷丸强度对 TA15 钛合金型材表面完整性影响的数值和实验研究[J].*稀有金属材料与工程*,2022,51(6):1979-1985.  
WAN Y G, LUO F, XIE L S, et al. Numerical and experimental investigations on the effect of shot peening intensity on the surface integrity of TA15 titanium alloy profiles[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(6): 1979-1985.
- [12] ZHANG X H, LIU D X. Effect of shot peening on fretting fatigue of Ti811 alloy at elevated temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(5): 889-893.
- [13] COCKINGS H L, COCKINGS B J, HARRISON W, et al. The effect of near-surface plastic deformation on the hot corrosion and high temperature corrosion-fatigue response of a nickel-based superalloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 832: 154889.
- [14] 罗学昆,吴小燕,王科昌,等.表面完整性对 FGH95 合金高温疲劳性能的影响[J].*航空材料学报*,2020,40(2):53-60.  
LUO X K, WU X Y, WANG K C, et al. Effect of surface integrity evolution on high-temperature fatigue property of FGH95 alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(2): 53-60.
- [15] QIN Z, LI B, CHEN R, et al. Effect of shot peening on high cycle and very high cycle fatigue properties of Ni-based superalloys[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 168: 107429.
- [16] 李明睿,王荣桥,田腾跃,等.喷丸强化 DD6 单晶合金低周疲劳寿命预测[J].*表面技术*,2022,51(10):1-9.  
LI M R, WANG R Q, TIAN Y T, et al. Low cycle fatigue life prediction of DD6 single crystal superalloy by shot

- peening[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(10): 1-9.
- [17] 杨清, 何杉, 孟震威. 喷丸强化对 DD5 单晶材料疲劳性能的影响[J]. *金属加工: 热加工*, 2014, 23: 89-90.  
YANG Q, HE S, MENG Z W. Effect of shot peening on the fatigue properties of DD5 single crystal materials[J]. *Metal Processing: Hot Work*, 2014, 23: 89-90.
- [18] 杨红超, 于洋, 刘德林, 等. 喷丸对 DD6 单晶合金表层状态及低周疲劳性能的影响[J]. *失效分析与预防*, 2021, 16(3): 155-160.  
YANG H C, YU Y, LIU D L, et al. Influence of shot peening on surface state and low-cycle fatigue performance of DD6 single crystal superalloy[J]. *Failure Analysis & Prevention*, 2021, 16(3): 155-160.
- [19] WANG X, XU C L, ZHAI A S, et al. Effect of surface stress concentration control and surface material strengthening on the fatigue performance of shot-peened single-crystal superalloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 933: 167796.
- [20] 卜嘉利, 吕扬, 刘博志, 等. 不同喷丸强度对 TC17 钛合金抗疲劳性能影响[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(6): 1225-1233.  
BU J L, LV Y, LIU B Z, et al. Effect of different shot peening intensities on fatigue resistance of TC17 titanium alloy[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(6): 1225-1233.
- [21] 朱立华, 肖磊, 郭建政, 等. 喷丸强度对 FGH4113A 高温合金微观组织的影响及定量表征[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(7): 2415-2423.  
ZHU L H, XIAO L, GUO J Z, et al. Effect of shot peening intensity on FGH4113A superalloy microstructure and quantitative characterization[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(7): 2415-2423.
- [22] 赵辛雨, 田凯, 罗学昆, 等. 喷丸表面完整性对 K4169 合金高温疲劳性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2023, 43(3): 42-48.  
ZHAO X Y, TIAN K, LUO X K, et al. Effect of surface integrity induced by shot peening on high-temperature fatigue property of K4169 alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2023, 43(3): 42-48.
- [23] XU C L, WANG X, GENG Y X, et al. Effect of shot peening on the surface integrity and fatigue property of gear steel 16Cr3NiWMoVNB E at room temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 172: 107668.
- [24] 胡俊, 廖凯, 罗鹏博, 等. 喷丸弹坑应力场演变的相似性实验与仿真模拟[J]. *材料热处理学报*, 2023, 44(11): 62-70.  
HU J, LIAO K, LUO P B, et al. Similarity experiment and simulation of stress field evolution in shot peening craters[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2023, 44(11): 62-70.
- [25] BAGHERIFARD S, GHELICHI R, GUAGLIANO M. Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(18): 6831-6840.
- [26] XU Y C, GONG Y D, ZHANG W J, et al. Microstructure evolution and dynamic recrystallization mechanism induced by grinding of Ni-based single crystal superalloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 310: 117784.
- [27] IVAN B, KEVIN M K, GRANT J G. Electron backscattered diffraction analysis of cold work in a shot peened single crystal nickel superalloy[J]. *Materialia*, 2020, 14: 100860.
- [28] YUAN T Y, DOU M, LIU L, et al. Improving high temperature fretting fatigue performance of nickel-based single crystal superalloy by shot peening[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 171: 107563.
- [29] 湛江涛, 罗庸生, 李一飞, 等. 超声喷丸对不同取向单晶高温合金组织与表面性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2023, 36(1): 67-76.  
CHEN J T, LUO Y S, LI Y F, et al. Effect of ultrasonic shot peening on microstructure and surface properties of a single crystal superalloy with different orientations[J]. *China Surface Engineering*, 2023, 36(1): 67-76.
- [30] TAO N R, WU X L, SUI M L, et al. Grain refinement at the nanoscale via mechanical twinning and dislocation interaction in a nickel-based alloy[J]. *Journal of Materials Research*, 2004, 19(6): 1623-1629.

收稿日期: 2024-05-27; 录用日期: 2024-07-08

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-IV-0012-0080)

通讯作者: 付雪松(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为喷丸强化与微动损伤和防护, 联系地址: 辽宁省大连市甘井子区凌水街道大连理工大学铸造工程国家研究中心(116024), E-mail: xsfu@dlut.edu.cn

(本文责编: 王俊丽)