

引文格式: 林鑫, 盖鹏涛, 周文龙, 等. 喷丸处理对高强韧 $\beta$ 钛合金疲劳性能影响[J]. 航空制造技术, 2025, 68(19): 128–135.

LIN Xin, GAI Pengtao, ZHOU Wenlong, et al. Effect of shot peening on fatigue properties of high-strength and high-toughness  $\beta$ -titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(19): 128–135.

## 喷丸处理对高强韧 $\beta$ 钛合金疲劳性能影响\*

林鑫<sup>1</sup>, 盖鹏涛<sup>2</sup>, 周文龙<sup>1</sup>, 陈国清<sup>1</sup>, 李春艳<sup>1</sup>, 付雪松<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学, 大连 116024;

2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 本文以高强韧 $\beta$ 钛合金为研究对象, 研究了喷丸强度、弹丸介质(铸钢丸和陶瓷丸)及复合喷丸对靶材疲劳性能的影响。采用扫描电镜、X射线衍射仪等设备表征, 分析了喷丸工艺对试样表面完整性及疲劳断裂的影响。试验表明, 喷丸处理能有效改变靶材表面机加工轮廓, 随着喷丸强度增加(最大至 0.25 mmA), 表面粗糙度升高, 但没有出现脱层或微裂纹缺陷, 表明靶材塑韧性好。然而, 靶材表面对覆盖率较为敏感, 复合喷丸处理(覆盖率 400%)表面局部出现脱层和褶皱缺陷。喷丸在靶材表面引入深约 280  $\mu\text{m}$  的残余压应力层, 随喷丸强度增加, 残余应力值整体增加, 但喷丸强度达到 0.22 mmA 时, 近表层(50  $\mu\text{m}$  厚)出现应力松弛。喷丸强化后疲劳性能提升显著, 在铸钢丸条件下疲劳寿命较原始态可提高 145.4 倍, 个别试样疲劳寿命达到  $10^7$  次。相同喷丸强度下陶瓷喷丸疲劳性能提升更显著。单一弹丸介质喷丸处理后裂纹源均转移至次表层。复合喷丸平均疲劳寿命大幅降低, 部分裂纹源出现在表面, 归因于表面损伤和残余应力松弛。高强韧 $\beta$ 钛合金喷丸强化效果较好, 对喷丸强度敏感性低、不易出现脱层或微裂纹缺陷, 但对喷丸覆盖率较为敏感, 不适用于复合喷丸或长时间喷丸处理。

关键词: 高强韧钛合金; 弹丸介质; 残余应力; 疲劳寿命; 疲劳断口

中图分类号: V25; TG146

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.19.128

### Effect of Shot Peening on Fatigue Properties of High-Strength and High-Toughness $\beta$ -Titanium Alloy

LIN Xin<sup>1</sup>, GAI Pengtao<sup>2</sup>, ZHOU Wenlong<sup>1</sup>, CHEN Guoqing<sup>1</sup>, LI Chunyan<sup>1</sup>, FU Xuesong<sup>1</sup>

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] This study investigates the effects of shot peening intensity, shot medium (cast steel shot and ceramic shot), and composite shot peening on the fatigue properties of high-strength and high-toughness  $\beta$ -titanium alloy. Characterization techniques, including scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffractometry (XRD), were employed to analyze the influence of shot peening processes on the surface integrity and fatigue fracture behavior of target materials. Experimental results show that shot peening effectively modifies the machined surface profile of target materials. With the increase of shot peening intensity (up to 0.25 mmA), surface roughness increases, yet no delamination or micro-crack defects are observed, indicating excellent plasticity toughness of the target materials. However, the surface of target materials is sensitive to coverage: Local delamination and wrinkling defects occur on the surface after composite shot peening with 400% coverage. Shot peening introduces a residual compressive stress layer approximately 280  $\mu\text{m}$  in depth on the surface of target materials. The residual stress value generally increases with shot peening intensity, but stress relaxation occurs in the near-surface layer (50  $\mu\text{m}$  thickness) when the intensity reaches 0.22 mmA. Shot peening significantly enhances fatigue performance: Under cast steel shot peening conditions, the fatigue life increases by 145.4

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51975084); 辽宁省自然科学基金(2022-YKLH-04); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902084); 中央高校基本科研业务费专项(DUT19LAB16)。

times compared to the as-received state, with individual specimens reaching  $1 \times 10^7$  cycles. Ceramic shot peening demonstrates more pronounced fatigue improvement at the same intensity. For peening with a single-shot medium, crack initiation sites shift to the subsurface layer, whereas composite shot peening reduces the average fatigue life significantly, with some crack sources appearing on the surface, attributed to surface damage and residual stress relaxation. In conclusion, high-strength and high-toughness  $\beta$ -titanium alloy exhibits favorable shot peening performance, low sensitivity to shot peening intensity (resistant to delamination or microcrack), but high sensitivity to shot peening coverage, making it unsuitable for composite or extended shot peening treatments.

**Keywords:** High-strength and high-toughness titanium alloy; Shot medium; Residual stress; Fatigue life; Fatigue fracture

钛合金具有高强度、低密度、耐腐蚀及良好的疲劳性能等综合优异性能,已被广泛应用于航空航天等高端装备。例如,在美国 F-22 第四代主力战机中,钛合金的质量占比为 41%<sup>[1-3]</sup>。Ti-6Al-4V (TC4) 作为中等强度的钛合金(强度 900 MPa),是目前工程应用中最广泛的钛合金材料,其用量约占钛合金总应用量的 65%<sup>[4]</sup>。随着航空航天事业的迅速发展,飞行器用结构材料对高强度钛合金提出了明确需求。然而,与结构钢等金属材料相比,钛合金具有较高的缺口应力集中敏感性,容易发生疲劳裂纹萌生,最终导致疲劳断裂失效<sup>[5]</sup>。高强度钛合金缺口敏感性更大,其断裂韧度与抗裂纹扩展性能通常随着强度的升高而下降。因此,高强钛合金需要满足强度与韧性的匹配,才能在应用中提高飞机零件的结构效率,实现更大的减重效果。与等强度的  $\alpha$  或  $\alpha/\beta$  钛合金相比,  $\beta$  钛合金有优良的断裂韧性和抗疲劳性能<sup>[6]</sup>。因此,  $\beta$  钛合金在航空航天领域的应用日益广泛,在军/民用飞机结构中扮演着愈发重要的角色<sup>[7]</sup>。

喷丸强化是一种表面塑性变形技术,能够高效提升金属材料疲劳极限,广泛应用于金属承载结构件的生产制造,如钛合金发动机叶片、铝合金壁板蒙皮、合金钢齿轮等<sup>[8]</sup>。关于钛合金喷丸强化,  $\alpha+\beta$  双相钛合金的研究报道较多,尤其是 TC4 钛合金( $\alpha+\beta$  双相合金  $\alpha$  相为主)。Chen 等<sup>[9]</sup>采用湿喷丸对 TC4 钛合金进行强化处理,使其拉-拉疲劳极限比初始试样提高了 12.4%。喷丸处理能改善金属材料的疲劳性能,这是由于弹丸撞击使材料表面完整性发生改变,所引入的残余压应力和表层组织变形有助于抑制裂纹的萌生与早期扩展。Zhu 等<sup>[10]</sup>采用喷丸工艺在 TC4 表面形成残余压应力层,降低了裂纹尖端的有效应力强度因子范围,使疲劳裂纹扩展寿命提高了 52.6%~78.9%。喷丸强化效果与喷丸工艺密切相关,若喷丸强度太高或处理时间太长,会造成材料损伤或出现过喷丸现象。卜嘉利等<sup>[11]</sup>研究发现,  $\alpha+\beta$  双相 TC17 钛合金的表面损伤敏感性较高,当喷丸强度超过 0.35 mmN (约 0.1 mmA) 时,靶材表面出现脱层及

微裂纹损伤,疲劳强化效果下降。徐松超等<sup>[12]</sup>对 TC17 钛合金进行喷丸处理,当强度增加到 0.50 mmN 时,靶材表层出现过喷丸现象,近表层的残余应力发生松弛,硬度值降低,微观组织观察发现  $\alpha$  相内小角度晶界比例减少。近年来,随着  $\beta$  钛合金工程化应用,相应的表面强化研究受到行业人员关注。高玉魁<sup>[4]</sup>研究表明, Ti-10V-2Fe-3Al 近  $\beta$  钛合金缺口试样经喷丸强化后,拉-拉疲劳强度从 313 MPa 提升至 403 MPa,强化效果显著。材料疲劳性能的提升,归因于喷丸处理消除了工件表面机加工刀痕等不利因素,并引入了有利的残余压应力<sup>[13]</sup>。罗学昆等<sup>[14]</sup>的研究表明,喷丸强度对 TB6 钛合金的疲劳性能影响显著,并发现喷丸强度过高时材料的表面粗糙度增加,导致  $\beta$  高强钛合金疲劳性能强化效果降低。因此,每种材料的喷丸强化表面完整性演变规律不同,需要根据自身特征制定相应的喷丸技术及工艺参数,以获得更佳的抗疲劳强化效果。

本文以抗拉强度达 1355 MPa 的高强韧  $\beta$  钛合金为研究对象,系统探究了喷丸强度、弹丸介质及复合喷丸等工艺参数对其拉-拉疲劳寿命的影响,并通过喷丸强化前、后的表面完整性分析,揭示了试验件疲劳性能的改善机理与断裂失效模式。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料为高强韧  $\beta$  钛合金,屈服强度为 1251 MPa,抗拉强度为 1355 MPa,断后伸长率为 6%,冲击韧性为 26~30 J/cm<sup>2</sup>。使用 X 射线荧光光谱仪(日本岛津公司)检测钛合金化学成分,如表 1 所示。

表 1 高强韧钛合金的化学成分(质量分数)  
Table 1 Chemical composition of high-strength and high-toughness titanium alloy (mass fraction) %

Al	Cr	Mo	V	Nb	Ti
4.431	5.620	4.200	6.692	0.798	78.259

采用铸钢丸和陶瓷丸两种弹丸介质对高强韧钛合金试样进行喷丸强化处理。弹丸型号分别为陶瓷丸 AZB425 和铸钢丸 ASH230, 复合喷丸工艺: 先采用铸钢丸进行表面强化, 后续采用陶瓷喷丸进行表面强化, 具体工艺参数如表 2~4 所示。

1.2 测试分析

测试表面完整性使用的试样尺寸为 50 mm × 40 mm × 3 mm。在测试疲劳性能前对疲劳试样统一进行倒角处理, 倒角半径 R=1 mm, 疲劳试样尺寸见图 1。

采用激光共聚焦显微镜(中国奥林巴斯公司)测量喷丸强化前、后试样的表面粗糙度。采用 AutoMATE·II 型 X 射线应力仪(日本理学公司)测试喷丸引起的残余

应力。使用侧倾法测试, 具体的试验参数: 衍射峰 142°、扫描范围 136°~146°、扫描步距 0.05°、管电压 40 kV、管电流 40 mA、衍射晶面 (213)。采用腐蚀法对试样逐层测试残余应力, 腐蚀剂配比为 V (HF) : V (HNO<sub>3</sub>) : V (H<sub>2</sub>O)=1 : 2 : 47。

采用 QBG-300 高周疲劳试验机(长春仟邦测试设备有限公司)测试钛合金试件的拉-拉疲劳性能, 最大载荷为 780 MPa, 应力比为 0.06。使用 SU5000 场发射扫描电镜(中国普赛斯科技有限公司)进行断口分析, 确定断口性质及疲劳起源位置。

2 结果与讨论

2.1 喷丸对表面完整性的影响

图 2 为未喷丸试样的表面形貌和表面二维轮廓曲线。从图 2 (a) 可以看到, 未喷丸试样表面存在机加工处理后留下的平行刀痕, 而且存在一些大的尖角, 这些尖角容易引起局部应力集中, 促使疲劳裂纹萌生, 对试样的抗疲劳性能造成不利影响。从图 2 (b) 中可见, 表面二维轮廓曲线起伏剧烈。图 3 为不同喷丸强度的铸钢喷丸试样表面形貌, 铸钢喷丸处理后平板试样表面机加工刀痕基本消除, 随着喷丸强度的增加, 表面弹坑深度和尺寸增大, 但未观察到喷丸强度过大而产生的微裂纹和脱层等缺陷, 表明靶材具有良好的塑韧性。

图 4 为陶瓷喷丸试样的表面形貌。0.06 mmA 强度下喷丸表面机加工痕迹仍较重, 喷丸强度增加到 0.15 mmA 时, 机加工痕迹基本消除, 但表面存在较多的粘着颗粒。经能谱分析, 颗粒为陶瓷丸碎屑, 因为陶瓷丸较铸钢丸脆性大, 喷丸后更容易破碎。图 5 为复合喷丸后

表 2 铸钢喷丸工艺参数

Table 2 Shot peening process parameters for cast steel shot

样品编号	喷丸强度/mmA	覆盖率/%
S1	0.11	200
S2	0.15	200
S3	0.22	200
S4	0.25	200

表 3 陶瓷喷丸工艺参数

Table 3 Shot peening process parameters for ceramic shot

样品编号	喷丸强度/mmA	覆盖率/%
Z1	0.06	200
Z2	0.15	200

表 4 复合喷丸工艺参数

Table 4 Process parameters for composite shot peening

样品编号	喷丸强度/mmA		覆盖率/%
	铸钢	陶瓷	
SZ1	0.15+0.06		400
SZ2	0.15+0.15		400

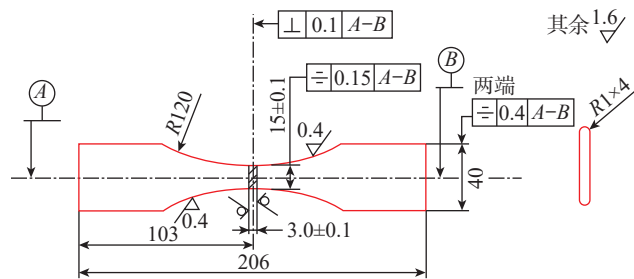
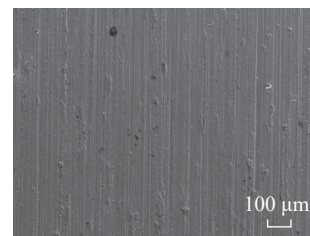
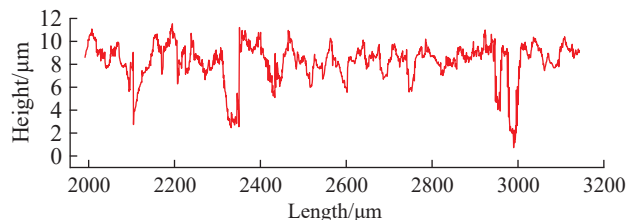


图 1 疲劳试样尺寸 (mm)

Fig.1 Dimensions of fatigue specimen (mm)



(a) 表面形貌



(b) 表面二维轮廓曲线

图 2 未喷丸试样的表面形貌和表面二维轮廓曲线

Fig.2 Surface morphology and 2D surface profile curve of non-shot-peened specimen

试样表面形貌。表面的机加工痕迹基本消除,但表面局部出现了脱层和褶皱现象,这是因为复合喷丸处理中,靶材先承受了覆盖率 200% 的铸钢丸冲击,随后又经历了覆盖率 200% 的陶瓷丸撞击,长时间的弹丸冲击累积导致表面损伤。

### 2.2 喷丸对粗糙度的影响

图 6 为铸钢喷丸处理前、后的表面粗糙度。相比于原始试样,经喷丸处理后,试样表面粗糙度随着喷丸强度的增加先降低后升高。原始试样粗糙度  $R_a=0.933 \mu\text{m}$ ,经 0.11 mmA 强度铸钢喷丸作用后,  $R_a=0.713 \mu\text{m}$ ,

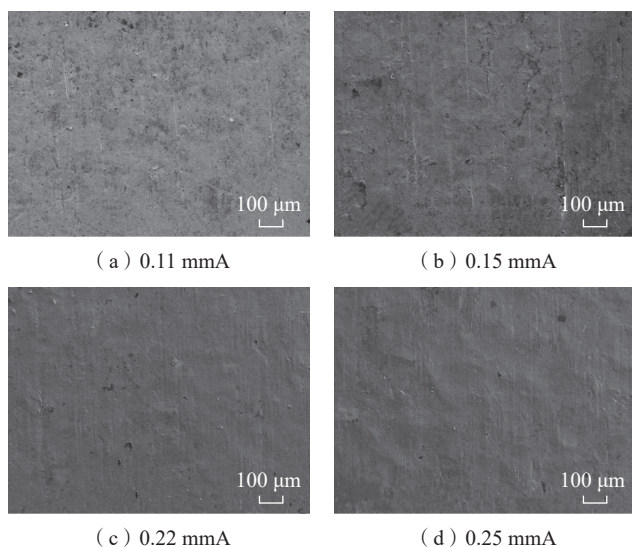


图 3 铸钢喷丸试样的表面形貌

Fig.3 Surface morphology of cast steel shot-peened specimens

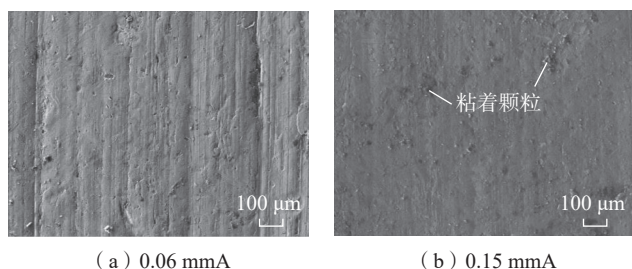


图 4 陶瓷喷丸试样表面形貌

Fig.4 Surface morphology of ceramic shot-peened specimens

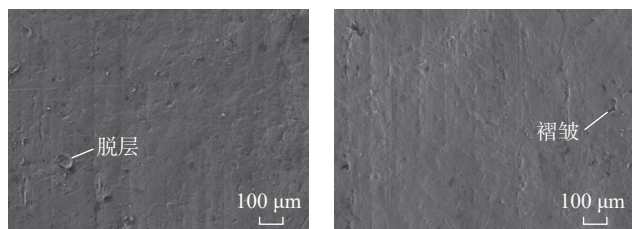


图 5 复合喷丸试样表面形貌

Fig.5 Surface morphology of composite shot-peened specimens

在弹丸的冲击下,试样表面产生了塑性流变,弹丸将大部分加工条纹打磨平整。随着喷丸强度增大,弹丸对于试样表面的冲击越强烈,弹坑尺寸增大,使得粗糙度也增大。在 0.22 mmA 喷丸强度下,  $R_a=0.935 \mu\text{m}$ ,超过原始试样,0.25 mmA 强度下的表面粗糙度  $R_a$  增加到 1.224  $\mu\text{m}$ 。粗糙度较高的试样表面更易产生应力集中,诱发疲劳裂纹萌生,喷丸强度过大会对试样抗疲劳性能产生不利影响<sup>[15-16]</sup>。

图 7 为铸钢喷丸、陶瓷喷丸和复合喷丸试样的表面粗糙度值对比图。在相同喷丸强度下(0.15 mmA),陶瓷喷丸试样的表面粗糙度比铸钢丸喷丸低,因为陶瓷丸密度较小、冲击能量低,对靶材表面撞击力小。与单次铸钢喷丸相比,复合喷丸后的表面粗糙度值降低。铸钢喷丸在 0.15 mmA 喷丸强度下,表面粗糙度为 0.864  $\mu\text{m}$ 。进

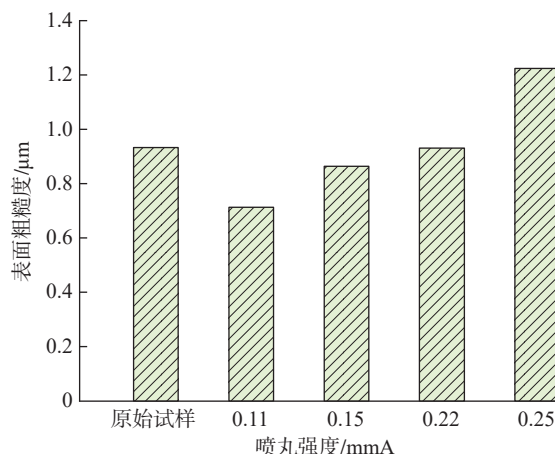
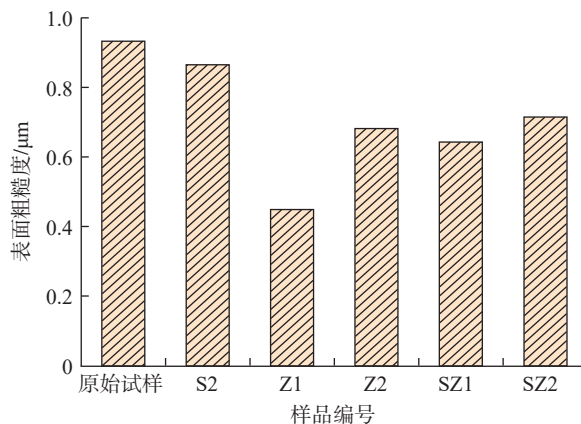


图 6 不同强度铸钢喷丸试样的表面粗糙度

Fig.6 Surface roughness of shot-peened specimens with cast steel shot at different intensities



注: S2表示铸钢0.15 mmA; Z1表示陶瓷0.06 mmA; Z2表示陶瓷0.15 mmA; SZ1表示铸钢0.15 mmA+陶瓷0.06 mmA; SZ2表示铸钢0.15 mmA+陶瓷0.15 mmA。

图 7 铸钢喷丸、陶瓷喷丸、复合喷丸试样的表面粗糙度

Fig.7 Surface roughness of specimens subjected to cast steel shot peening, ceramic shot peening, and composite shot peening

行后续陶瓷弹丸复合处理后,表面粗糙度降为  $0.642 \mu\text{m}$  (SZ1)、 $0.712 \mu\text{m}$  (SZ2)。这是因为二次喷丸使用的陶瓷弹丸粒径较小,对铸钢喷丸处理后试样表面存在的凸起部分起到打磨的作用,使试样表面平整化,表面粗糙度降低。

### 2.3 喷丸对残余应力场的影响

图 8 为铸钢喷丸强化后平板试样的残余应力值曲线。残余应力沿深度方向呈典型的对钩状分布,随着喷丸强度增加,残余应力曲线向右下移动,残余应力场深度为  $250\sim 280 \mu\text{m}$ 。当喷丸强度较低,为  $0.11 \text{ mmA}$  时,钛合金试件表面残余应力值为  $-591.1 \text{ MPa}$ ,距离表面  $25 \mu\text{m}$  处为残余应力最大值,为  $-809.4 \text{ MPa}$ ,随着深度增加残余应力值不断降低,在  $300 \mu\text{m}$  处变为残余拉应力,为  $91.2 \text{ MPa}$ 。喷丸强度为  $0.15 \text{ mmA}$  时,表面残余压应力升高,为  $-829.9 \text{ MPa}$ ,最大应力值提高到  $-1017.6 \text{ MPa}$ 。喷丸强度增加至  $0.22 \text{ mmA}$  时,表面残余压应力降低为  $-526.9 \text{ MPa}$ ,最大应力值降低至  $-824.4 \text{ MPa}$ ,近表层残余应力发生松弛。

图 9 (a) 为单次  $0.15 \text{ mmA}$  铸钢喷丸和陶瓷喷丸试样的残余应力分布曲线。与喷丸强度为  $0.15 \text{ mmA}$  铸钢喷丸相比,陶瓷喷丸引入的残余应力值小,这是由于铸钢丸密度和弹丸直径更大,喷丸携带的能量高,能够在材料表面形成较深且不均匀的塑性形变。图 9 (b) 为复合喷丸后试样残余应力分布图,与单次铸钢喷丸表层残余应力相比,复合喷丸后残余应力整体发生松弛,表面残余应力和最大残余应力均降低。相比 S2,试样 SZ1 的表面残余应力由  $-829.9 \text{ MPa}$  (单次铸钢) 降至  $-703.1 \text{ MPa}$ ,最大残余应力由  $-1017.6 \text{ MPa}$  (单次铸钢) 降至  $-852.4 \text{ MPa}$ 。

### 2.4 喷丸对显微组织的影响

图 10 为铸钢  $0.15 \text{ mmA}$  强度喷丸后试样的显微组

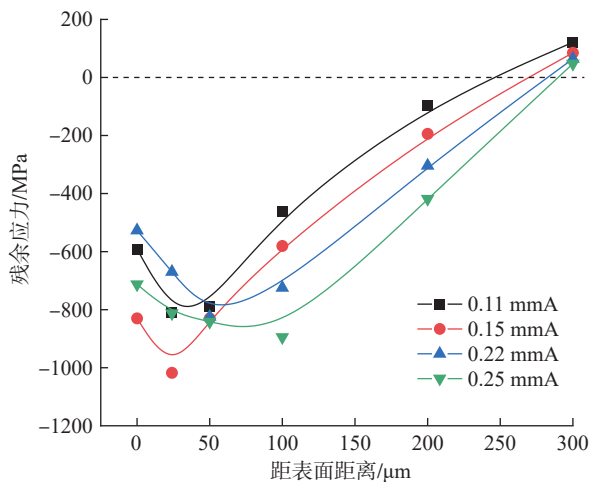


图 8 铸钢喷丸工艺下试样残余应力分布图

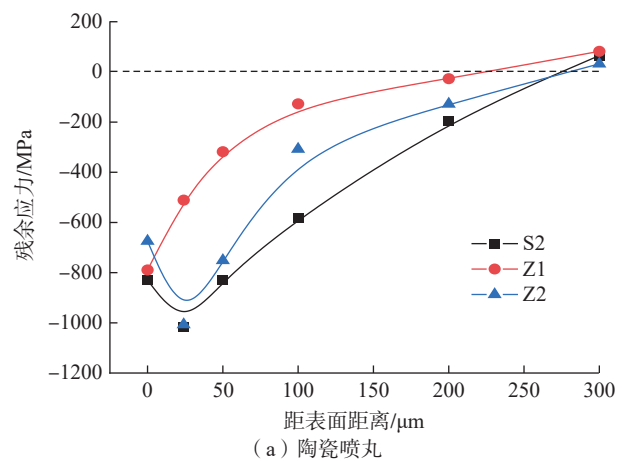
Fig.8 Distribution of residual stress in shot-peened cast steel specimens

织图。从图 10 (a) 可以发现,该合金组织由等轴晶粒组成,晶粒的尺寸在  $300\sim 500 \mu\text{m}$  之间,没有观察到表层晶粒细化现象。图 10 (b) 为 KAM 图,反映材料塑性变形程度,喷丸处理后在材料表层的 KAM 值没有升高。图 10 (c) 中表层小角度晶界(绿色)随机分布,喷丸表层无小角度晶界聚集现象,这说明喷丸处理后钛合金组织内部小角度晶界没有明显增加。高强韧  $\beta$  钛合金为体心立方结构,具有较高的层错能<sup>[12]</sup>,喷丸后位错之间不易发生相互作用,所以喷丸后小角度晶界分布没有显著变化。

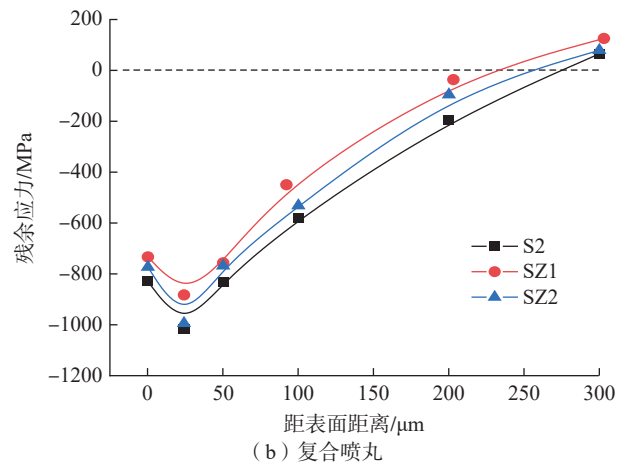
### 2.5 喷丸对疲劳性能的影响

#### 2.5.1 疲劳寿命结果分析

图 11 为铸钢喷丸试验件的拉-拉疲劳试验结果,疲劳试验最大载荷为  $780 \text{ MPa}$ ,应力比为  $0.06$ 。原始态未喷丸试验件的平均寿命为  $2.49 \times 10^4$  次。随着喷丸强度的增加平均疲劳寿命先增加后下降,喷丸强度为  $0.15 \text{ mmA}$  时,强化效果最好,平均疲劳寿命为  $3.62 \times 10^6$  次,比未喷丸试样提升了约  $145.4$  倍,个别试样疲劳寿命达到  $10^7$  次。此强度下,近表层残余应力达到最大,同时基本消除了机加工造成的划痕,表面粗糙度也较原始试



(a) 陶瓷喷丸



(b) 复合喷丸

图 9 陶瓷喷丸、复合喷丸工艺下试样残余应力分布图

Fig.9 Distribution of residual stress in specimens treated by ceramic shot peening and composite shot peening

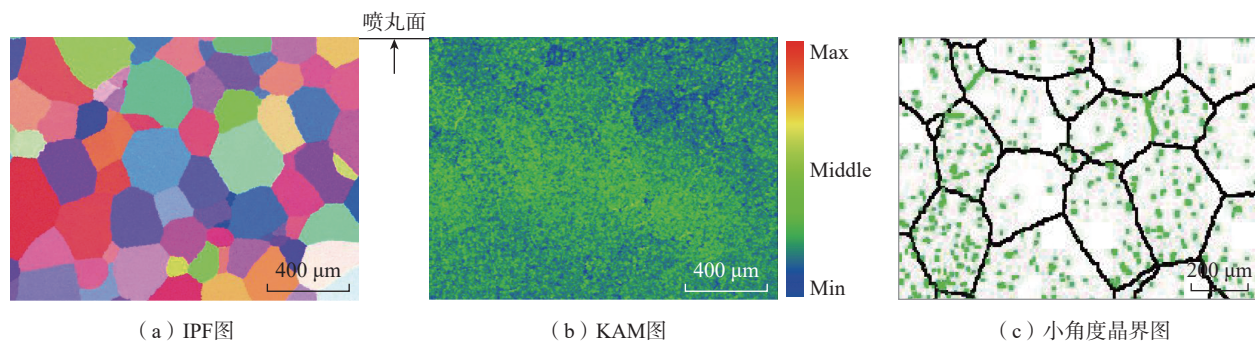


图 10 铸钢 0.15 mmA 强度喷丸后试样的显微组织图

Fig.10 Microstructure of cast steel specimens after shot peening with 0.15 mmA intensity

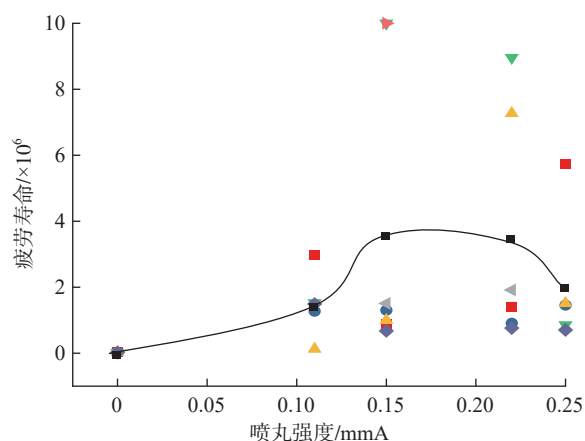
样低,因此强化效果最佳。喷丸强度增高至 0.25 mmA 时,强化效果减弱,平均疲劳寿命降低,但仍远高于原始态,较原始态提高约 81.5 倍。疲劳强化效果减弱是由于近表层残余应力较 0.15 mmA 强度发生松弛(图 8)。同时喷丸强度过大导致表面粗糙度急速增加,产生应力集中,促进疲劳裂纹萌生,抗疲劳性能降低。

图 12 为 0.15 mmA 铸钢喷丸和陶瓷喷丸试样的平均疲劳寿命对比。Z1 试件陶瓷喷丸在 0.06 mmA 强度下,与 0.15 mmA 强度下的 S2 试件的平均寿命相近,疲劳寿命为  $3.62 \times 10^6$  次。这是由于虽然 0.06 mmA 强度低,引入残余压应力值较小,但可以显著降低表面粗糙度。同等喷丸强度下(0.15 mmA),Z2 试件陶瓷喷丸疲劳寿命为  $4.85 \times 10^6$  次,较铸钢喷丸高,这是由于虽然陶瓷的引入残余压应力略低,但表面粗糙度显著降低(铸钢丸  $R_a=0.864 \mu\text{m}$ ,陶瓷丸  $R_a=0.705 \mu\text{m}$ ),表面粗糙度起到更重要作用。

图 13 为 0.15 mmA 铸钢喷丸与复合喷丸处理后的疲劳寿命分布。复合喷丸工艺为在铸钢 0.15 mmA 强度预喷丸后进行陶瓷喷丸。与单独铸钢喷丸相比,复合喷丸件的疲劳性能降低,随着后续复合喷丸的强度增加,疲劳寿命上升。当复合喷丸工艺为铸钢 0.15 mmA+陶瓷 0.06 mmA 时(SZ1),平均疲劳寿命为  $10.0 \times 10^5$  次,较未喷丸试样提升 40.2 倍,铸钢 0.15 mmA+陶瓷 0.15 mmA 工艺下(SZ2)平均疲劳寿命为  $2.6 \times 10^6$  次,但均低于单独铸钢喷丸强化效果(疲劳寿命  $3.62 \times 10^6$  次)。这是因为虽然在首次铸钢喷丸后进行陶瓷喷丸可以使表面平整化,降低试样粗糙度,但复合喷丸后覆盖率增加,在表面局部造成脱层和褶皱缺陷,容易诱发裂纹萌生,同时复合喷丸还使残余应力场整体发生松弛(图 9(b)),对裂纹萌生和短裂纹的扩展抑制作用降低,因此复合喷丸较单一铸钢喷丸强化效果弱。

### 2.5.2 疲劳断口结果分析

图 14 为未喷丸试验件的断口宏观形貌。低倍率下



注:不同颜色点表示同一喷丸强度下不同试样的疲劳寿命,彩色数据点为测试寿命值,黑色数据点为平均寿命值。

图 11 不同喷丸强度下铸钢喷丸试件的疲劳寿命分布图

Fig.11 Fatigue life distribution of cast steel shot-peened specimens under different shot peening intensities

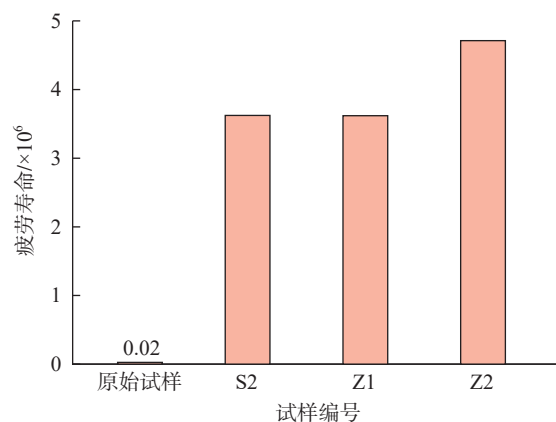


图 12 铸钢喷丸 0.15 mmA 与陶瓷喷丸试样的平均疲劳寿命对比  
Fig.12 Comparison of average fatigue life of cast steel specimens after 0.15 mmA shot peening and ceramic shot peening

可以看到疲劳源萌生于试样的棱角处。高倍率下可见疲劳起源于基体表面,疲劳源区存在一个光滑平台。未喷丸试样表面存在较深的机加工刀痕,易引起应力集中,

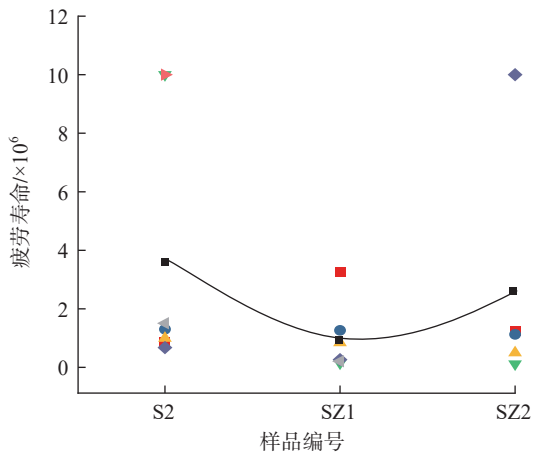


图 13 0.15 mmA 铸钢喷丸与复合喷丸工艺强化后疲劳寿命  
Fig.13 Fatigue life of cast steel after shot peening with 0.15 mmA and composite shot peening

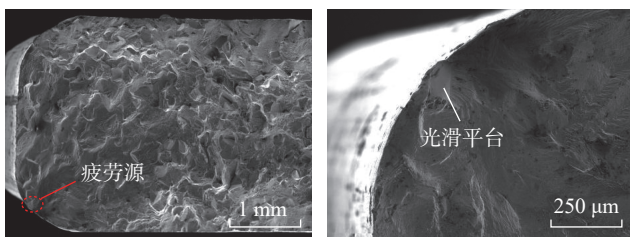


图 14 未喷丸试样断口疲劳源形貌图  
Fig.14 Morphologies of fatigue source in fracture of unpeened specimen

使裂纹萌生于表面。图 15 为铸钢喷丸处理试样拉-拉疲劳断口的形貌图。喷丸强度分别为 0.11 mmA、0.15 mmA、0.22 mmA、0.25 mmA 时,裂纹源均位于试样的亚表面处,疲劳源距表面距离随喷丸强度增加而增大,分别约为 416 μm、750 μm、1116 μm、1140 μm,对应试样疲劳寿命分别为  $1.52 \times 10^6$ 、 $1.50 \times 10^6$ 、 $1.91 \times 10^6$ 、 $1.51 \times 10^6$  次,疲劳测试数据显示疲劳寿命与裂纹源位置无相关性。

图 16 为陶瓷喷丸处理试样拉-拉疲劳断口的形貌图。陶瓷丸强化试样裂纹源均位于试样的亚表面处,0.06 mmA、0.15 mmA 强度下疲劳源到表面的距离分别为 217 μm、333 μm。图 17 为复合喷丸处理试样拉-拉疲劳断口的形貌图,在铸钢 0.15 mmA+陶瓷 0.06 mmA 复合喷丸工艺下,部分试件疲劳裂纹源萌生于表面。在疲劳源附近发现喷丸引起的脱层损伤,疲劳测试数据显示寿命很低 ( $1.5 \times 10^5$  次);部分试件疲劳裂纹源萌生于次表层,对应的疲劳寿命较高 ( $8.5 \times 10^5$  次)。在铸钢 0.15 mmA+陶瓷 0.15 mmA 复合喷丸工艺下,疲劳源均出现在次表层(图 17 (b)),与 SZ1 复合喷丸相比疲劳寿命提高。

### 3 结论

(1) 喷丸强化后高强韧 β 钛合金疲劳性能提升显

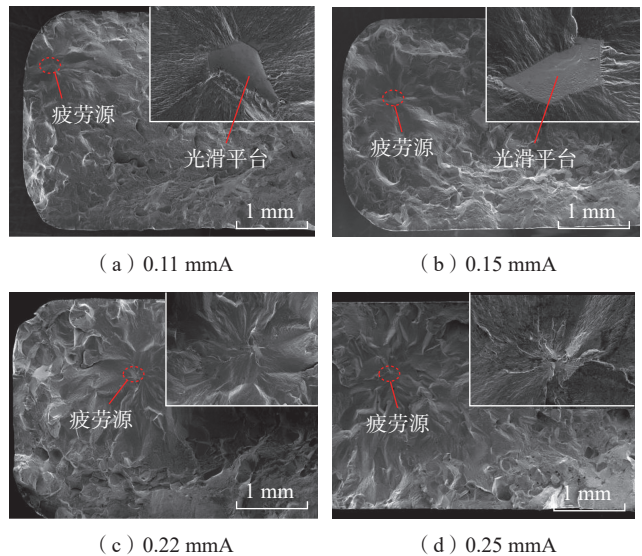


图 15 铸钢喷丸试样断口的疲劳源形貌图  
Fig.15 Morphology of fatigue source in fracture of shot-peened cast steel specimen

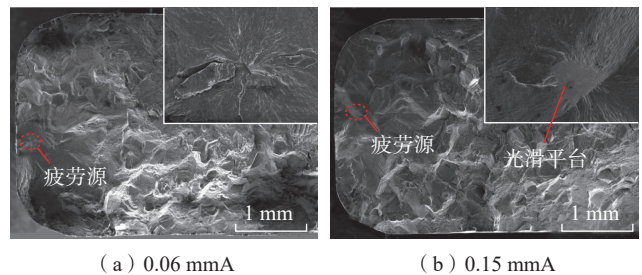


图 16 陶瓷喷丸试样断口的疲劳源形貌图  
Fig.16 Morphology of fatigue source in fracture of ceramic shot-peened specimen

著,强化效果与喷丸介质和喷丸工艺相关。对于铸钢丸介质,随喷丸强度的增加疲劳寿命呈现先增大后降低的规律,在 0.15 mmA 喷丸强度下疲劳强化效果最佳,较未喷丸状态疲劳寿命提升 145.4 倍,个别试样疲劳寿命达到  $10^7$  次。在相同喷丸强度下,陶瓷喷丸疲劳性能提升更显著。

(2) 复合喷丸处理后钛合金抗疲劳强化效果大幅降低。在铸钢 0.15 mmA+陶瓷 0.06 mmA 复合喷丸条件下,平均疲劳寿命为  $10.0 \times 10^5$  次,比原始态提升 40.2 倍,但比单独喷丸处理(铸钢或陶瓷)的强化效果低。这是因为复合喷丸后材料表面损伤和残余应力松弛,部分裂纹源出现在表面。

(3) 喷丸强化可以消除机加刀痕,改善试样表面形貌。复合喷丸处理后覆盖率增加至 400%,导致表面出现褶皱脱层等损伤缺陷。铸钢喷丸、陶瓷喷丸、复合喷丸 3 种工艺试样的表面粗糙度均随喷丸强度增加而增大。

(4) 喷丸处理后在表面引入深度约为 280 μm 残余压应力,随着喷丸强度增大残余应力值整体增加。铸钢喷丸

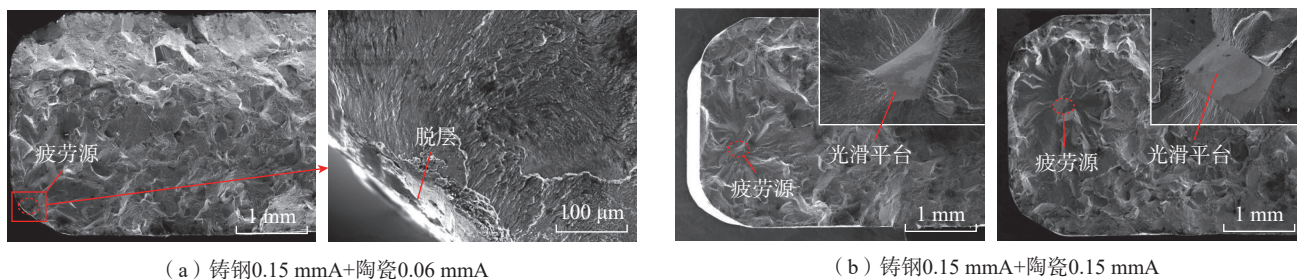


图 17 复合喷丸试样断口的疲劳源形貌图

Fig.17 Morphology of fatigue source in fracture of composite shot-peened specimen

试样近表层(50 μm厚)表面和最大残余应力呈波动性变化,均在0.15 mmA时达到最大,喷丸强度达到0.22 mmA时出现应力松弛。相同喷丸强度下陶瓷喷丸引入压应力数值小于铸钢喷丸。复合喷丸与单次铸钢喷丸相比,残余应力发生松弛,表面残余应力和最大残余应力均降低。

(5)采用单一铸钢丸和陶瓷丸强化后,试样裂纹源均萌生于次表面,疲劳寿命与疲劳源位置无相关性。

### 参考文献

[1] ADAMUS J. Applications of titanium sheets in modern building construction[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1020: 477–481.

[2] YU H J. Research development of the laser surface modification to improve the corrosion-resistance of titanium and titanium alloys[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 748: 184–187.

[3] 金和喜,魏克湘,李建明,等.航空用钛合金研究进展[J].*中国有色金属学报*, 2015, 25(2): 280–292.

JIN Hexi, WEI Kexiang, LI Jianming, et al. Research development of titanium alloy in aerospace industry[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(2): 280–292.

[4] 高玉魁.喷丸对Ti-10V-2Fe-3Al钛合金拉-拉疲劳性能的影响[J].*中国有色金属学报*, 2004, 14(1): 60–63.

GAO Yukui. Influence of shot peening on tension-tension fatigue properties in Ti-10V-2Fe-3Al titanium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(1): 60–63.

[5] 李世平,刘道新,李瑞鸿,等.喷丸强化与表面完整性对TC21钛合金疲劳性能的影响[J].*机械科学与技术*, 2012, 31(12): 1921–1926.

LI Shiping, LIU Daoxin, LI Ruihong, et al. Influence of shot peening and surface integrity on fatigue properties of TC21 titanium alloy[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(12): 1921–1926.

[6] 辛社伟,周伟,李倩,等.1500 MPa级新型超高强中韧钛合金[J].*中国材料进展*, 2021, 40(6): 441–445.

XIN Shewei, ZHOU Wei, LI Qian, et al. A new type extra-high strength and medium toughness titanium alloy of Ti-1500[J]. *Materials China*, 2021, 40(6): 441–445.

[7] 赵永庆.我国钛合金的研制与发展[J].*新材料产业*, 2007(10): 28–32.

ZHAO Yongqing. Research and development of titanium alloys in China[J]. *Advanced Materials Industry*, 2007(10): 28–32.

[8] 张吉银,姚倡锋,谭靓,等.喷丸强化残余应力对疲劳性能和变形控制影响研究进展[J].*机械工程学报*, 2023, 59(6): 46–60.

ZHANG Jiyin, YAO Changfeng, TAN Liang, et al. Research progress of the effect of shot peening residual stress on fatigue performance and deformation control[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(6): 46–60.

[9] CHEN G Q, JIAO Y, TIAN T Y, et al. Effect of wet shot peening on Ti-6Al-4V alloy treated by ceramic beads[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(3): 690–696.

[10] ZHU W G, MA C, ZHANG C H, et al. Fatigue crack propagation behavior in Ti-6Al-4V alloy with surface gradient structure fabricated by high-energy shot peening[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, 33(10): 3003–3016.

[11] 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 Jiali, LÜ Yang, LIU Bozhi, 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.

[12] 徐松超,盖鹏涛,付雪松,等.干、湿喷丸强化对TC17钛合金喷丸强化层的影响[J].*表面技术*, 2021, 50(9): 91–98, 107.

XU Songchao, GAI Pengtao, FU Xuesong, et al. Influences of dry and wet shot peening process on strengthening layer of TC17 titanium alloy[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(9): 91–98, 107.

[13] 罗学昆,赵春玲,查小辉,等.激光冲击、喷丸及其复合强化对TB6钛合金表面完整性及轴向疲劳性能的影响[J].*科技导报*, 2021, 39(9): 48–55.

LUO Xuekun, ZHAO Chunling, ZHA Xiaohui, et al. Effect of laser shock peening, shot peening and their combination treatment on surface integrity and axial fatigue property of TB6 titanium alloy[J]. *Science & Technology Review*, 2021, 39(9): 48–55.

[14] 罗学昆,艾莹璐,王欣,等.喷丸强化对TB6钛合金疲劳性能和表面完整性的影响[J].*钛工业进展*, 2017, 34(4): 33–38.

LUO Xuekun, AI Yingjun, WANG Xin, et al. Effect of shot peening on fatigue property and surface integrity of TB6 titanium alloy[J]. *Titanium Industry Progress*, 2017, 34(4): 33–38.

[15] MAIYA P S. Geometrical characterization of surface roughness and its application to fatigue crack initiation[J]. *Materials Science and Engineering*, 1975, 21: 57–62.

[16] YAO C F, WU D X, MA L F, et al. Surface integrity evolution and fatigue evaluation after milling mode, shot-peening and polishing mode for TB6 titanium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 387: 1257–1264.

通信作者:付雪松,副教授,博士,研究方向为材料塑性加工与成形控制、使役环境损伤与表面防护。

(责编 七七)