

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170731003

复合强化对渗铝 K403 合金组织和力学性能的影响

谢孟芸, 汪 诚, 张佩宇, 柴 艳, 戴鹏里, 李秋良

(空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 西安 710038)

摘 要: 针对航空发动机涡轮叶片榫头渗铝污染后产生的尺寸偏大和力学性能下降的问题, 采用水吹砂+振动光饰和水吹砂+喷丸强化+振动光饰两种复合方法对渗铝后的 K403 合金试样进行处理, 研究复合方法对 K403 渗铝试样微观组织和力学性能的影响。对两种方法处理后试样的微观组织、渗铝层元素分布、物相组成、残余应力和疲劳寿命进行测试。结果表明: 渗铝后, 试样表面存在残余拉应力, 渗铝层厚度约 $27.3\ \mu\text{m}$, 主要相为 $\beta\text{-NiAl}$ 和 $\alpha\text{-Cr}$; 水吹砂+振动光饰处理后, 试样表面产生了 $360\ \text{MPa}$ 的残余压应力, 试样的疲劳寿命提高了 1.49 倍; 水吹砂+喷丸强化+振动光饰方法处理后, 试样表层产生了较大的残余压应力, 距离表面 $0.04\ \text{mm}$ 处残余压应力值最大, 约为 $686\ \text{MPa}$, 应力影响深度约 $0.2\ \text{mm}$, 试样的疲劳寿命提高了 3.44 倍。

关键词: 复合强化; 渗铝层; K403 合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)01-0026-06

Effects of Composite Strengthening on Microstructure and Mechanical Property of K403 Aluminized Alloy

XIE Meng-yun, WANG Cheng, ZHANG Pei-yu, CHAI Yan, DAI Peng-li, LI Qiu-liang

(Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038)

Abstract: Aiming at the problems of increasing in dimension and reducing in mechanical properties caused by the aluminized pollution of the turbine blade tenon, two composite methods: water grit-blasting + vibration adorn polish and water grit-blasting + shot peening + vibration adorn polish, were put forward to handle the samples. The effects of the two composite methods on the microstructure and mechanical properties of K403 aluminized samples were studied. The microstructure, element distribution, phase composition, residual stress and the fatigue life of the samples handled by the two methods were tested, respectively. The testing results show that residual tensile stress exists on the surface of the samples after aluminizing. The thickness of the aluminizing layer is about $27.3\ \mu\text{m}$, and the main phases of the aluminized layer surface are $\beta\text{-NiAl}$ and $\alpha\text{-Cr}$. After water grit-blasting + vibration adorn polish method, a residual compressive stress of about $360\ \text{MPa}$ is introduced to the surface, and the fatigue life increases by 1.49 times. After water grit-blasting + shot peening + vibration adorn polish method, a large residual compressive stress is introduced to the surface. The residual compressive stress at the distance of $0.04\ \text{mm}$ from the modified surface is the largest, about $686\ \text{MPa}$, with the stress depth of about $0.2\ \text{mm}$. The fatigue life of the treated samples increases by 3.44 times.

Keywords: composite strengthening; aluminized layer; K403 alloy; microstructure; mechanical property

收稿日期: 2017-07-31; 修回日期: 2018-01-02

网络出版日期: 2018-01-05 14:49; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180105.1448.038.html>

通讯作者: 汪诚(1974—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 金属表面强化; E-mail: warrant_74@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51305456)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(51305456)

引文格式: 谢孟芸, 汪诚, 张佩宇, 等. 复合强化对渗铝 K403 合金组织和力学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 26-31.

XIE M Y, WANG C, ZHANG P Y, et al. Effects of composite strengthening on microstructure and mechanical property of K403 aluminized alloy[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(1): 26-31.

0 引 言

航空发动机涡轮叶片工作环境是发动机各部件中最恶劣之一, 在使用过程中长期经受高温燃气的冲击和侵蚀, 因此一般都会在叶片表面采用高温涂层进行防护。渗铝作为一种传统的高温防护层制备工艺, 具有工艺简单、成本低廉以及抗高温氧化性能优异等优点^[1]。

发动机涡轮叶片的叶盆和叶背是渗铝部位, 叶片榫头是非渗铝部位。一旦榫头处存在渗铝层, 这一方面会影响其尺寸大小, 造成嵌套部位过盈配合, 导致微动磨损加剧, 从而降低部件的疲劳寿命; 另一方面, 渗铝层表面偏脆硬, 受应力集中容易发生脆断, 严重影响发动机的安全性和可靠性。

工业生产中 对叶片进行渗铝时常采用 Al₂O₃ 细砂或镍箔对榫头部位进行遮蔽保护以防止被渗铝污染。但是国内工厂在叶片渗铝过程对榫头部位保护不到位, 导致这种渗铝污染问题比较严重。在此之前, 国内对该问题的重视程度不够、研究较少, 因此涡轮叶片榫头渗铝污染的问题一直未得到解决。Farrahi 等^[2]研究了喷丸强化对弹簧钢残余应力和疲劳寿命的影响; 国内张莉^[3]等人提出了湿吹砂法去除高导叶片渗层的方法, 未对叶片榫头部位进行研究; 北京航材院(六

二一所)^[4]X 光结构分析组利用喷丸强化技术提高了涡轮叶片榫头部位的疲劳性能, 并未涉及渗铝污染的问题; 周磊^[5]等人利用激光冲击强化技术提高渗铝 K417 合金以提高涡轮叶片的疲劳性能, 但只是对叶片的叶身渗铝部位进行强化, 而对于解决叶片榫头渗铝污染问题的方法尚未见报导。

文中结合实际工程应用中出现的涡轮叶片榫头渗铝污染造成的尺寸过大和力学性能下降的问题, 提出如下解决方法: 首先采用水吹砂去除表面一定厚度的渗层, 减小榫头尺寸, 从而减弱因过盈配合带来的微动磨损。然后在此基础上采用振动光饰和喷丸+振动光饰两种后续处理工艺提高其力学性能。为优选出最佳修理方法, 文中在平板试样上研究了这两种方法对渗铝 K403 合金试样微观组织和力学性能的影响, 为后续修复渗铝污染叶片提供试验数据和方法指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

K403 合金是镍基高温铸造合金, 合金中 Cr 含量较低, 抗氧化和抗热腐蚀性能较差, 所以 K403 合金叶片需采用防护层。K403 合金的主要化学成分如表 1 所示^[6]。

表 1 K403 合金的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of K403 alloy										(w/%)
Element	Ni	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Fe	B
Content	Bal.	0.11~0.18	10.0~12.0	4.5~6.0	4.8~5.5	3.8~4.5	5.3~5.9	2.3~2.9	<2.0	0.012~0.022
Element	Ce	Zr	Bi	Si	P	S	Pb	Sb	Mn	Sn
Content	0.01	0.03~0.08	<0.000 1	<0.5	<0.02	<0.01	<0.001	<0.001	<0.5	<0.002

1.2 试验方案

为了研究不同复合方法对 K403 镍基高温铸造合金组织和疲劳性能的影响, 文中试验采用 3 种工艺进行对比研究(见表 2), 每组试样 6 件, 其中

初始渗铝层的厚度均为 30 μm 左右, 第 3 组试样的喷丸强度为 0.10~0.15 A, 每组中随机抽取 1 个试样进行 XRD、残余应力以及微观组织测试, 剩余样件进行疲劳试验。

表 2 不同试验方法分组

Table 2 Sample grouping of different treatment method	
Group	Treatment method
1	Aluminizing
2	Aluminizing+Water grit-blasting+Vibration adorn polish (Process 1)
3	Aluminizing+Water grit-blasting+Shot peening+Vibration adorn polish (Process 2)

1.3 测试方法

采用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪进行 X 射线衍射测试, 测试参数: 电压为 20 kV, 电流为 5 mA, 扫描角度为 $20^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。

采用 X-350A 型 X 射线衍射仪测试不同复合方法试样表面及深度上的残余应力测试, 测量方法为侧倾固定 ψ 法, 定峰方法为交相关法。

采用 ZEISS SUPRA55 型扫描电镜观察复合处理前后试样截面显微组织。配合扫描电镜, 采用 EDAX GENESIS 型能谱仪分析表层元素组成。

高周疲劳试验在 ES-10-240 型振动台上完成。试验在给定 420 MPa 峰值应力条件下, 采用共振驻留方式进行, 当一弯共振频率下降 1% 或修理处理试样疲劳寿命明显高于无渗层试样时, 终止试验。K403 标准试样的形状、尺寸及处理区域见图 1。

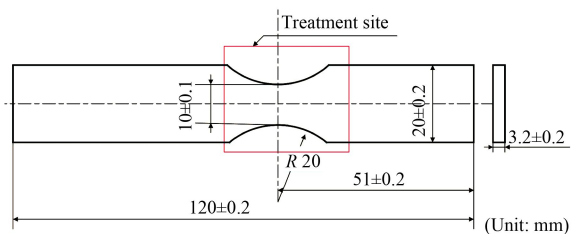


图 1 振动疲劳试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of vibration fatigue specimen

2 结果与讨论

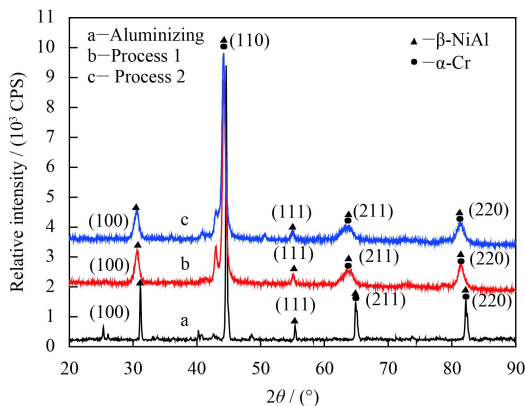
2.1 XRD 分析

图 2 为 K403 合金试样经渗铝、渗铝+水吹砂+振动光饰 (Process 1) 和渗铝+水吹砂+喷丸强化+振动光饰 (Process 2) 3 种不同方法处理后表面的 X 射线衍射图。

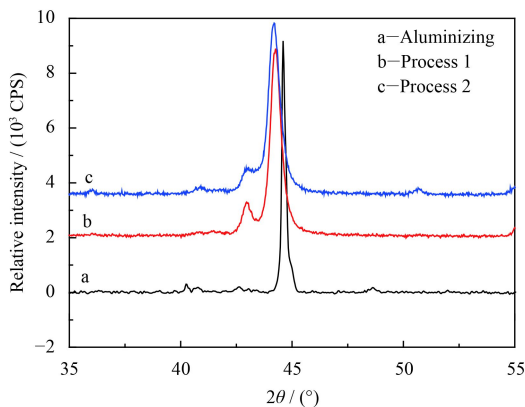
从图中可以看出, 渗铝层相的均为 β -NiAl 和 α -Cr, 成分未发生变化, 没有新的衍射峰出现, 所以没有新相形成; 相比渗铝处理试样的衍射峰, 采用渗铝+水吹砂+振动光饰 (Process 1) 和渗铝+水吹砂+喷丸强化+振动光饰 (Process 2) 处理后, X 射线的衍射峰下降, 半高宽增大, 这与表面的晶粒细化有关, 同时经过这两种方法处理后, X 射线的衍射峰向低角偏移, 这与不同方法处理后表面的应力改变有关。

K403 合金经渗铝+吹砂+振动光饰和渗铝+吹砂+喷丸+振动光饰两种不同复合方法处理后在试

样表面均形成了耐腐蚀的化合物 NiAl, 3 种不同处理方法后没有新的衍射峰出现和新的相形成, 合金表面抗氧化和耐腐蚀性能未受到影响。同时, 两种复合方法处理后衍射峰相对于渗铝试样往低角度方向移动, 说明原子间距发生变化, 由 Bragg 方程可知, 原子间距的变化会引入残余应力。



(a) Diffraction peaks



(b) The strongest peak

图 2 不同复合工艺后渗铝层的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of aluminized layer after different composite processes

2.2 残余应力分析

不同处理方法试样沿深度方向残余应力分布如图 3 所示。从图中可以看出, 经过渗铝后, 在渗铝层表面会引入残余拉应力, 随着距表面深度增加逐渐趋于基体; 经过渗铝+水吹砂+振动光饰 (Process 1) 复合处理的试样表面会引入残余压应力, 为 360 MPa, 影响深度约 0.05 mm, 且随距表面距离增加, 残余压应力减小; 试样经过渗铝+水吹砂+喷丸强化+振动光饰 (Process 2) 复合强化处理后表面残余压应力值约为 502 MPa, 距表面 0.04 mm 左右残余压应力值最大, 约为 686 MPa,

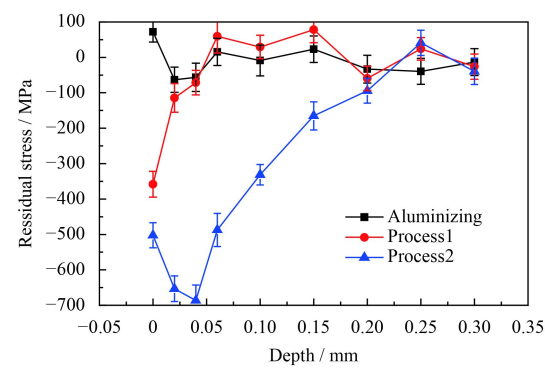


图 3 不同处理工艺试样残余应力分布

Fig.3 Residual stress distribution of specimens in different treatment processes

此后残余压应力值随深度增加而减小，趋于基体状态，影响层深度约为 0.2 mm。

研究表明，喷丸强化过程如同无数小锤的高速弹丸流连续作用于零部件表面，使得金属表层和次表层产生强烈的塑性变形，从而在工件表层和次表层引入明显的残余应力场^[7-10]。喷丸强化过程中试样表面连续受到是高速弹丸流的撞击，造成试样表层和次表层塑性变形而导致冷作硬化，

并在强化层内形成高密度的位错，细化晶粒，从而产生较大的残余压应力。

2.3 微观组织

图 4 为不同方法处理后 K403 合金试样截面的 SEM 形貌。从图 4(a) 可以看出渗铝层厚度约为 27.3 μm ，由内外两层组成，其中内层厚度约为 11 μm ，渗铝+水吹砂+喷丸强化+振动光饰(图 4(c)) 方法处理试样的渗层厚度比渗铝+水吹砂+振动光饰(图 4(b)) 方法处理试样的渗层厚度厚约 4.7 μm ，喷丸强化对渗铝表面有一定的强化作用。

配合扫描电镜(图 5(a)) 采用 EDS 进一步分析渗铝层的元素及可能相组成。通过 EDS 分析，发现其元素组成主要是 C、Al、Ni、Cr、Co、Ti、W、Mo 等。图 5(b) 为渗铝层线扫图，结果表明，渗铝层外层占主导元素的依然是 Ni 元素，质量分数为 53.92%，次表层铝元素含量最高；在渗铝层外层和内层的过渡区，Al、Ni 元素含量稍有减小；在内层区域，Al 元素的含量逐渐降低，Ni 元素含量稍有减小，与渗铝层内层 Cr、Co 元素形成

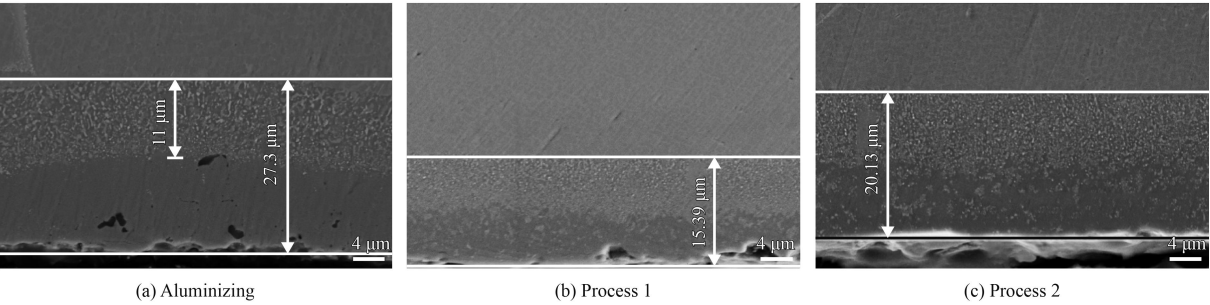


图 4 不同处理工艺试样渗铝层的 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of aluminizing layer with different treatment methods

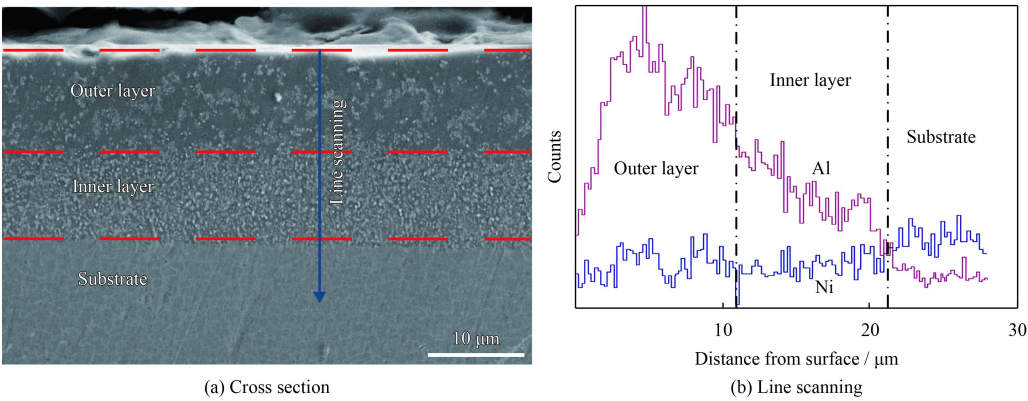


图 5 试样截面渗铝层 EDS 分析

Fig.5 EDS analysis of cross section of the sample

颗粒状的化合物；基体区域 Al 元素含量明显低于渗铝层，质量分数下降到 6.91%，相对渗铝层内层下降约 65%，说明渗铝层与基体之间存在较大的铝元素浓度梯度；Ni 元素整体呈均匀分布。

镍基高温合金靠有序相 γ' 强化，金属元素 Al 是形成 γ' -Ni₃Al 相的基本组成元素，加入高温合金中的 Al，约有 20% 进入 γ 固溶体，起固溶强化作用，而 80% 的 Al 元素与 Ni 元素形成 Ni₃Al，进行沉淀强化。Al 元素对沉淀强化的作用首先是形成 γ' 相，而且随着 Al 元素含量的增加， γ' 相数量增加，从而使各种强化机制都增强。其次，Al 元素的加入改变了 γ' 相中各元素的溶解度，随着 Al 元素含量的增加，Al 元素和 Ni 元素进入 γ' 相的数量增多，也影响其他合金元素如 Ti、W、Mo 等元素进入 γ' 相的数量增加，从而进一步增加 γ' 相的数量，使切割机制的强化效果。第三 Al 含量的增加，改变 γ' 与 γ 之间的错配度，通常是增加错配度的绝对值，引起 γ' 相周围共格

应变增强，从而增强强化效果。

2.4 疲劳试验结果

通过 ANSYS 仿真确定试样应力 $\sigma_{\max}=420\text{ MPa}$ ，测试制定应力条件下得疲劳循环次数，比较两种处理方法试样的疲劳寿命。不同状态下试样振动疲劳寿命如表 3 所示。

从图中可以看出，渗铝试样的疲劳寿命为 3.46×10^5 ，分散度为 0.010 7；渗铝+水吹砂+振动光饰 (Process 1) 复合处理后疲劳寿命提高约 1 倍，分散度为 0.014 0；渗铝+水吹砂+喷丸强化+振动光饰 (Process 2) 复合强化处理试样疲劳寿命为 15.35×10^5 ，较渗铝试样提高约 3.44 倍，分散度为 0.010 4。结果表明，3 种处理工艺的分散度均满足 95% 置信度、误差 5% 的条件，可将均值看作为中值疲劳寿命，即渗铝+水吹砂+喷丸强化+振动光饰复合强化有利于疲劳性能的提高且效果显著。

表 3 不同处理方法试样的疲劳寿命
Table 3 Fatigue life of samples with different treatment methods (Cycle)

Treatment method		Fatigue life/ 10^5				Average/ 10^5	Dispersity
Aluminizing	4.10	2.80	3.47	3.37	3.56	3.46	0.010 7
Process 1	6.31	10.21	9.85	8.24	8.44	8.61	0.014 0
Process 2	14.89	15.13	19.30	14.68	12.79	15.358	0.010 4

这是因为：相比渗铝，渗铝+水吹砂+振动光饰复合方法首先将渗铝后的试样经过吹砂，使得表面渗层减薄，再采用振动光饰处理，试样表面的毛刺以及加工痕迹得到消除，极大地改善试样表面完整性，从而提高试样的疲劳性能；采用渗铝+水吹砂+喷丸强化+振动光饰复合强化方法将渗层经吹砂减薄的样先进行喷丸强化，由于喷丸不仅使得渗铝层晶粒细化起到细晶强化的作用，同时会在工件表层和次表层引入明显的残余压应力场，可以平衡疲劳载荷中的拉应力，提高疲劳性能；再经过光饰去除表面毛刺，使得表面的更加光整，延缓了裂纹的扩展速度，从而显著提高了材料的疲劳性能水平。因此，渗铝+水吹砂+喷丸强化+振动光饰 (Process 2) 复合强化方法对于提高渗铝试样的疲劳寿命更加显著。

3 结 论

研究了水吹砂+振动光饰以及水吹砂+喷丸强

化+振动光饰两种复合方法对渗铝 K403 合金试样微观组织和力学性能的影响，优选出水吹砂+喷丸强化+振动光饰复合强化方法，结论如下：

- (1) 两种方法处理后渗铝层内均为 β -NiAl 和 α -Cr，相成分和相结构未发生变化。
- (2) 渗铝+水吹砂+喷丸强化+振动光饰复合强化方法处理后，会在试样表层及次表层引入残余压应力，0.04 mm 左右残余压应力值最大，为 686 MPa，影响深度层约 0.2 mm。
- (3) 渗铝 30 μm 左右厚度的试样渗铝层分为内外两层，内层厚度约为 11 μm ，渗铝层层内 Al 元素含量明显高于基体。
- (4) 试样经渗铝+水吹砂+喷丸强化+振动光饰复合强化方法处理后，其振动疲劳寿命提高到渗铝 K403 合金试样的 4.44 倍，表层晶粒的细化、位错密度的增加以及残余压应力的引入是造成疲劳寿命提高的主要原因。

参考文献

- [1] 李克, 张莉, 王广生. 航空发动机涡轮叶片气相渗铝工艺[J]. 金属热处理, 2013, 38(9): 42-45.
LI K, ZHANG L, WANG G S. Vapor aluminizing processing of gas-turbine blade for aero-engine[J]. Metal Heat Treatment, 2013, 38(9): 42-45 (in Chinese).
- [2] FARRAHI G H, LEBRIJN J L, COURATIN D. Effect of shot peening on residual stress and fatigue life of a spring steel[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 18(2): 211-220.
- [3] 张莉, 李克. 航空发动机高导叶片修理工艺研究[J]. 金属加工 (冷加工), 2015(23): 53-55.
ZHANG L, LI K. Research on aeroengine high guide blade repair technology[J]. Metal Processing (Cold Processing), 2015(23): 53-55 (in Chinese).
- [4] 六二一所 X 光结构分析组, 六二一所喷丸强化组. 喷丸强化对镍基高温合金及燃气涡轮叶片疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 1979(1): 16-20, 48.
X-ray Structure Analysis Group of 621 Institute, Shot Peening Group of 621 Institute. Effect of shot peening on fatigue performance of Ni-base superalloy and gas turbine blade[J]. Materials Engineering, 1979(1): 16-20, 48 (in Chinese).
- [5] 周磊, 李应红, 汪诚, 等. 激光冲击强化渗铝法提高 K417 合金疲劳性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(6): 1093-1096.
ZHOU L, LI Y H, WANG C, et al. Vibration fatigue performance improvement of K417 alloy by laser shock processing and aluminizing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(6): 1093-1096 (in Chinese).
- [6] 《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册 (第二版)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 9.
Editorial Board of China Aviation Materials Handbook. China aviation materials handbook[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002: 9 (in Chinese).
- [7] 王仁智. 金属材料的喷丸强化原理及其强化机理综述[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 1-9.
WANG R Z. Shot principles and strengthening mechanism of metallic materials review[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(6): 1-9 (in Chinese).
- [8] 高玉魁. 喷丸强化对 TC18 钛合金拉-拉疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(9): 1000-1002.
GAO Y K. Effect of shot-peened to tension fatigue properties of TC18 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(9): 1000-1002 (in Chinese).
- [9] 高玉魁. TC18 超高强度钛合金喷丸残余压应力场的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(11): 1209-1212.
GAO Y K. Residual compressive stress field in TC18 ultra-high strength titanium alloy by shot peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(11): 1209-1212 (in Chinese).
- [10] 王琛. 表面机械处理对 Ti-54M 合金高周疲劳性能的影响[J]. 钛工业进展, 2013, 30(1): 43-44.
WANG C. Impact mechanical surface treatment of Ti54M high-cycle fatigue of the alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2013, 30(1): 43-44 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)