

激光喷丸与渗铝复合工艺提高 K417 合金力学性能研究

焦 阳¹, 何卫锋¹, 孙 岭², 周留成¹, 聂祥樊¹, 罗思海¹, 李 靖¹

- (1. 空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038;
2. 中国人民解放军 94655 部队, 安徽 芜湖 241007)

摘 要: 对渗铝、渗铝后强化、强化后渗铝的 K417 合金试件分别进行振动疲劳试验。试验结果表明, 相对于渗铝处理, 强化后渗铝试样的疲劳强度提高了 50%, 而渗铝后强化试样的疲劳强度提高了 30%, 这说明渗铝与激光喷丸强化复合工艺可以提高材料的疲劳性能, 且强化后渗铝效果更好。采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)分析激光喷丸强化与渗铝复合工艺顺序对材料力学性能的影响, 讨论了疲劳性能的改善机理。结果表明, 激光喷丸强化促进了渗铝过程, 生成大量柱状晶, 渗层厚度增加, 渗层与基体的结合更加紧密, 从而有效提升疲劳性能; 而渗铝后强化主要对渗层表面进行了形变强化, 疲劳性能的提升有限。

关键词: 复合工艺; 激光喷丸强化; 渗铝; K417 合金; 显微硬度

中图分类号: TG156; TG665 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2274-06

Study on compound technology of laser shock peening and aluminizing improve the mechanical properties of K417 alloy

Jiao Yang¹, He Weifeng¹, Sun Ling², Zhou Liucheng¹, Nie Xiangfan¹, Luo Sihai¹, Li Jing¹

- (1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. PLA of 94655, Wuhu 241007, China)

Abstract: Vibration fatigue tests were performed on aluminizing, LSP after aluminizing, aluminizing after LSP K417 alloy specimen respectively. The results showed that, compared with that treated by aluminizing only, the fatigue strength of specimen treated by aluminizing after LSP was improved by 50% and that treated by LSP after aluminizing was improved by 30%. It showed that the composite technology of LSP and aluminizing can improve the fatigue performance, and the composite technology of aluminizing after LSP can improve more effectively. The influence of different technology order to mechanical properties were investigated by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy(SEM) and transmission electron microscopy(TEM). The improvement mechanism of the fatigue performance was discussed. The results indicate that the LSP can promote the process of aluminizing. The combination of aluminizing layer with matrix is more close and a large number of columnar crystals formed in the surface treated by aluminizing after LSP, which lead to the thickness of aluminizing layer increase, and

收稿日期: 2014-12-02; 修订日期: 2015-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(51205406)

作者简介: 焦阳(1991-), 男, 硕士生, 主要从事航空装备损伤修复与表面强化方面的研究。Email: young_joafeu@163.com

通讯作者: 何卫锋(1977-), 男, 副教授, 主要从事航空发动机结构强度和激光冲击强化方面的研究。Email: hehe_coco@163.com

then the fatigue performance improved. But the LSP after aluminizing only affects the surface strengthening, and the improvement of fatigue performance is limited.

Key words: composite technology; laser shock peening; aluminizing; K417 alloy; micro-hardness

0 引言

K417合金是一种镍基铸造高温合金。因其强度高、塑性好、密度低,故主要用于制造航空发动机涡轮叶片^[1]。发动机涡轮叶片工作时,受到离心力等交变载荷和空气激振力,从而引起叶片振动,使得发动机涡轮叶片产生裂纹,导致叶片在设计使用寿命期间发生疲劳断裂,这类问题已严重地阻碍了我国航空涡轮发动机的发展^[2]。激光喷丸强化(LSP)技术是近年来发展较快的一种新型金属材料表面改性技术,已成功地应用于多种航空结构部件、核反应堆焊缝的表面强化,且强化部件的疲劳性能得到显著提高^[3-6]。激光喷丸强化是通过激光与涂覆在试件表面的吸收保护层的相互作用诱导产生高压等离子体冲击波,在冲击波的作用下使金属表面产生高应变率的塑性变形,从而改变材料表面的微观组织并产生高幅值的残余压应力,进而提高材料的抗疲劳、抗磨损、抗应力腐蚀等性能^[7-11]。国内对激光喷丸强化提高K417合金振动疲劳性能已经进行了相关研究^[12-14],证实了激光喷丸强化可以提高K417合金的振动疲劳性能。

镍基高温合金的组织稳定性差,耐热腐蚀性能不好,若长期在高温下使用,需要对其表面采取保护措施。在实际工业生产中,金属构件表面渗铝是常用的提高其高温抗氧化性和高温燃气腐蚀性能的有效方法。渗铝是通过使铝原子渗入基体,并与基体作用产生具有较高抗高温氧化能力和抗腐蚀能力的化合物,从而提高金属构件高温抗氧化性和抗腐蚀性。

将渗铝工艺与激光喷丸强化技术结合起来在镍基高温合金上运用,为同时提高金属构件疲劳性能、抗氧化性、抗腐蚀性能提供了一种新的思路。国内已开展了相关实验研究,笔者的课题组已在K417合金上进行了渗铝与激光喷丸强化复合工艺的相关实验研究,刘海雷等^[15]和周磊等^[16]研究了激光冲击强化后渗铝对K417合金疲劳性能的影响,结果发现激光冲击强化后渗铝可以有效提高K417合金的振动疲

劳寿命。为进一步探究激光喷丸强化与渗铝不同复合工艺顺序对材料疲劳寿命的影响,文中对不同工艺顺序处理的K417合金试件分别进行振动疲劳试验,并利用X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等测试手段,分析了复合工艺顺序对K417合金力学性能的影响,讨论了疲劳性能改善机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

K417材料中的铝和钛含量较高,形成约占合金重量67%的 γ' 强化相,材料中的奥氏体(γ)是以镍元素为基础的间隙固溶体。该材料中含有大量的合金元素,其中,Fe、Ni、Co、Cr、Mo、V等元素具有固溶强化作用;Al、Ti等元素形成的沉淀相 γ' 相起沉淀强化作用;B、C、Zr等元素起晶界强化作用,其主要化学成分见表1,试件是按照HB 5277-84《发动机叶片及材料振动疲劳试验方法》中的标准制备,K417标准试件的形状、尺寸及冲击区域如图1所示。

表1 K417合金的主要化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical component of 12CrNi3A steel
(Mass fraction, %)

Co	Cr	Al	Ti	Mo	Fe
14-16	8.5-9.5	4.8-5.7	4.5-5.7	2.5-3.5	<1
C	V	Zr	Si	Mn	Ni
0.13-0.22	0.6-0.9	0.05-0.09	<0.5	<0.5	Bal.

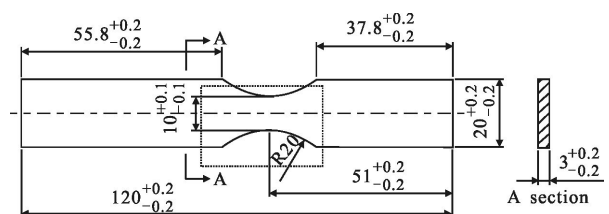


图1 振动疲劳试件

Fig.1 Vibration fatigue specimen

1.2 试验方法

将试件分成三组,分别进行不同的工艺处理:第一组为高温气相渗铝;第二组为试件表面进行激光喷丸强化后,按照与第一组相同的工艺进行气相渗铝处理;第三组,试样按照与第一组相同的工艺进行气相渗铝处理之后,进行与第二组相同参数的激光喷丸强化处理。

激光喷丸强化试验是在空军工程大学与北京镭宝公司联合研制的 SGR-60 型 YAG 激光器(图 2)上完成的。根据镍基高温合金材料的成分和力学性能,利用 Fabbro^[7]冲击波压力峰值计算公式,确定 K417 合金的喷丸强化参数为:激光波长 1 064 nm,激光能量 6 J,脉宽 10 ns,光斑直径 5 mm,功率密度为 3.06 GW/cm²,搭接率 50%,吸收保护层为铝箔,水为约束层。

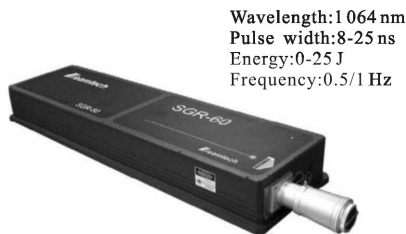


图 2 试验所用 YAG 激光器及其性能参数

Fig.2 Laser device and its performance parameters

渗铝工艺为:在立式真空渗炉中进行高温气相渗铝,(950±10)℃,保温 2 h,空冷。

在 D-300-3 振动试验系统上进行振动疲劳试验。利用 X-350A 型 X 射线衍射仪对不同试样表面冲击区域的残余应力进行测量,测量方法为侧倾固定 Ψ 法,定峰方法为交相关法。采用日本的 MFS-700 型 X 射线衍射仪(XRD)对 K417 试样表层相组成成分进行分析;将不同工艺的试样沿横截面切开,经研磨、抛光和直接采用浸蚀剂(92%蒸馏水、3% HF、5% HNO₃)后采用 Quanta200 扫描电镜(SEM)观察横截面的形貌进行观察;采用牛津仪器的 HKL Channel5, Nordlys Detector(EBSD)测试系统观察试样表层的微观组织变化。

2 疲劳试验结果

经过计算可得 K417 镍基高温合金渗铝后的试件的疲劳强度为 226 MPa,而渗铝后激光喷丸强化的试件的疲劳强度为 294.5 MPa,疲劳强度提高了

30%;激光喷丸强化后渗铝的试件的中值疲劳强度为 339.5 MPa,与单纯渗铝相比提高了 50%,与渗铝后喷丸相比提高了 15%。由此可见,激光喷丸与渗铝不同复合工艺顺序对于 K417 镍基高温合金疲劳强度的影响比较明显,且强化后渗铝工艺处理试件的疲劳强度比渗铝后强化的高,如图 3 所示。

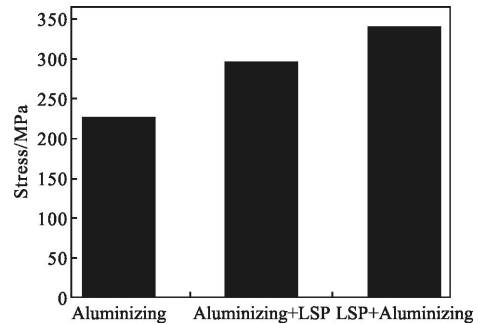


图 3 K417 合金试样不同工艺处理的疲劳强度图

Fig.3 Fatigue intensity of K417 alloy with different samples

3 试验结果分析

3.1 残余应力

已有研究表明,激光喷丸强化在试样表面诱导产生的残余压应力对提高材料的疲劳强度具有重要作用^[12-13]。但在高温渗铝环境下,残余应力会得到释放。为了研究不同工艺处理试样的疲劳强度改善机理,采用 X-350A 型测试仪对试样表面的残余应力进行测试,结果如图 4 所示。

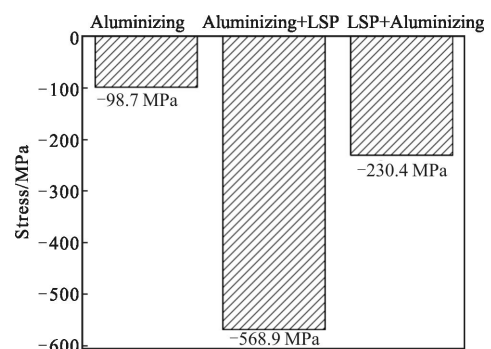


图 4 残余应力测试结果

Fig.4 Results of residual stress

结果表明,虽然强化后渗铝试样的疲劳强度大于渗铝后强化试样,但是强化后渗铝试样的残余压应力数值小于渗铝后强化试样,这就说明强化后渗铝试样中残留的残余压应力并不是强化后渗铝试样

疲劳强度提高的唯一原因,下面从微观组织方面对疲劳强度改善机理进行分析。

3.2 渗层分析

图 5 为 K417 合金不同试样的 X 射线衍射图。图 5(a)对衍射峰进行了相的标定并确定了相应的衍射晶面,图 5(b)为不同试样 X 射线衍射图谱,图 5(c)为不同试样的(110)面衍射峰。从图 5(b)可以看出,强化后渗铝、渗铝后强化与单独渗铝的渗层相的成分未发生变化,均为 NiAl 相。

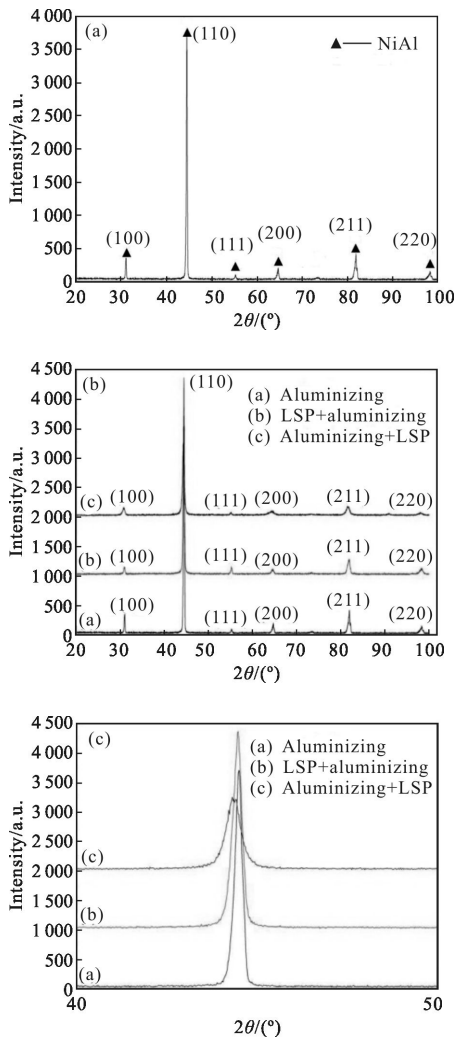


图 5 K417 合金不同试样 X 射线衍射图

Fig.5 XRD patterns of K417 alloy with different samples

K417 合金经渗铝、强化后渗铝和渗铝后强化处理后试样表面均形成了耐腐蚀的 Ni-Al 系化合物 NiAl,渗层表面的化合物发生氧化生成 Al₂O₃ 致密的氧化膜,因此具有良好的抗氧化性^[9],并且 NiAl 化合物具有良好的耐腐蚀性。不同工艺顺序处理后

K417 合金渗层相的组成未发生改变,不影响其良好的抗氧化和耐腐蚀性能。

从图 5(c)可以看出,与渗铝试样相比,强化后渗铝和渗铝后强化试样的衍射峰均发生宽化,且衍射峰向低角度方向移动,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起微应力变化,这与 3.1 节中的残余应力测试结果相对应。

3.3 渗层微观组织

K417 试样渗铝处理、渗铝后强化、强化后渗铝处理的表层 SEM 图如图 6 所示。

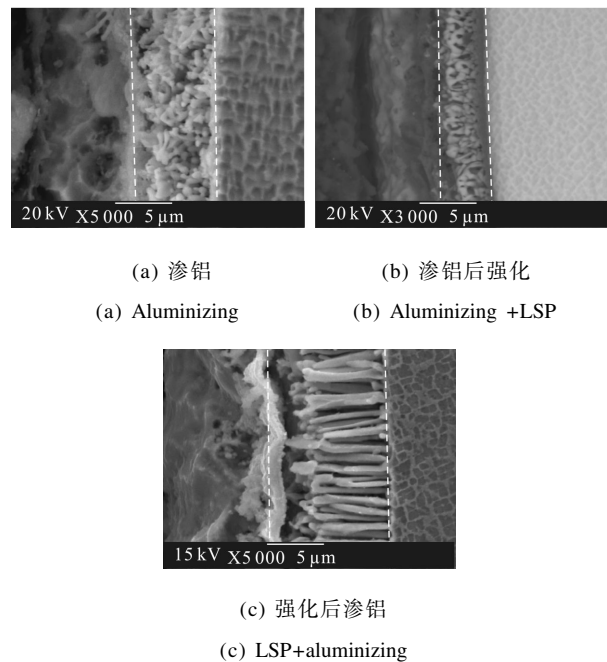


图 6 K417 的 SEM 图

Fig.6 SEM photographs of K417

由图 6(a)可知,渗层厚度约为 16 μm,由内、外两层组成,外层主要为致密的 NiAl 相,厚度约 9 μm;内层为扩散层,厚度约 7 μm。在扩散层中,Ni 往外扩散,Al 往基体内部扩散,形成 NiAl 化合物,呈颗粒状分布。

如图 6(b)所示,渗铝后强化试件的渗层形貌与单独渗铝一致,扩散层呈颗粒状分布。

强化后渗铝试件的渗层组织如图 6(c)所示,在试件的表面形成厚度约为 20 μm 左右的渗铝层,渗层分内、外两层,最外层为渗铝层,厚度约为 11 μm,主要由 NiAl 相组成(XRD 分析结果),内层厚度为 10 μm 左右的柱状晶,该柱状晶由基体表面向外生长,这是由于强化后试样表面产生的择优变形使扩

散层的颗粒状组织向外生长形成的。

3.4 疲劳性能改善机理分析

渗铝后对 K417 合金进行激光喷丸强化处理,相当于对渗铝处理后的渗铝层进行形变强化。由 3.1 节的残余应力测试结果可知,激光喷丸强化在渗铝后的试样表层诱导产生了数值为 -568.9 MPa 的残余压应力,诱导产生的残余压应力是渗铝后强化试样疲劳强度改善的主要原因。

渗铝前对 K417 合金进行喷丸强化处理,虽然残余压应力在渗铝的过程中得到了释放,但渗铝后残留的压应力对改善疲劳强度仍有一定的作用。其次,激光喷丸强化后,K417 合金试样表层产生高密度位错,如图 7 所示,表面能增加,原子的扩散活性得到增强,材料的这些变化为后续的渗铝过程中 Ni 和 Al 元素的扩散提供了能量和通道,使 Al 元素的扩散更加容易进行,Al 元素沉淀形成的 γ' 相起沉淀强化作用,渗层厚度增加了 $5\text{ }\mu\text{m}$,且在基体上形成致密的柱状晶,并与颗粒状晶体结合在一起,与基体的结合性更好,从而有助于改善疲劳性能。综上,在这些因素的共同作用下,强化后渗铝试件的疲劳强度得到了显著的提升。

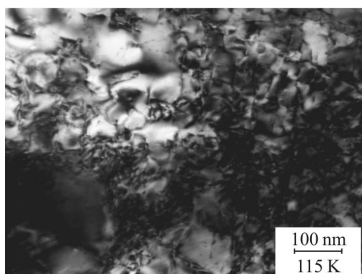


图 7 K417 试样激光喷丸强化后的 TEM 图

Fig.7 TEM photograph of K417 samples after LSP

4 结论

通过上述分析,可以得出以下结论:

(1) K417 合金激光喷丸与渗铝不同工艺顺序处理均可以提升材料的疲劳性能,且强化后渗铝工艺的效果更佳。

(2) 强化后渗铝、渗铝后强化工艺均不改变 K417 合金渗层的相组成。

(3) 激光喷丸强化在渗铝试样表层诱导产生 -568.9 MPa 的残余压应力,这是渗铝后强化试样疲劳强度提高的主要原因。

(4) 与渗铝、渗铝后强化相比,强化后渗铝试样的渗层厚度增加了约 $5\text{ }\mu\text{m}$,基体表面向外生长出致密的柱状晶,增强了渗层与基体的结合,这是提高疲劳性能的主要因素。

参考文献:

- [1] Liu Feng, Wang Yuechen, Zhang Hui, et al. Thermal-mechanical fatigue behavior of Ni-base superalloy K417[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2000(11): 32-37. (in Chinese)
刘峰,王跃臣,张辉,等.镍基高温合金 K417 热机械疲劳行为[J].材料工程,2000(11): 32-37.
- [2] Li Chonghe, Zhu Ming, Wang Ning, et al. Application of Titanium alloy in the plane [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2009, 33(1): 84-91. (in Chinese)
李重河,朱明,王宁,等.钛合金在飞机上的应用[J].稀有金属,2009, 33(1): 84-91.
- [3] Ma Zhuang, Li Yinghong, Ren Xudong, et al. Strengthening of aerial aluminum alloy with laser shock peening [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2007, 31(8): 32-34. (in Chinese)
马壮,李应红,任旭东,等.航空铝合金激光激波强化工艺[J].机械工程材料,2007, 31(8): 32-34.
- [4] Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun, et al. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(2): 316-320. (in Chinese)
曹子文,邹世坤,刘方军,等.激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢[J].中国激光,2008, 35(2): 316-320.
- [5] Zhang Wenwu, Lawrence Yao Y. Micro-scale laser shock processing of metallic components [J]. *J Manufact Sci Engng*, 2002, 124(2): 369-378.
- [6] Sano Yuji, Obata Minoru, Kubo Tatsuya, et al. Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 417: 334-340.
- [7] Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng, et al. Effects of laser shock processing on the fatigue life of nickel-based superalloy [J]. *New Technology & New Process*, 2008(8): 70-72. (in Chinese)
李伟,李应红,何卫锋,等.激光冲击强化对镍基高温合金疲劳寿命的研究[J].新技术新工艺,2008(8): 70-72.
- [8] Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng, et al. Development and application of laser shock processing [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2008(8): 70-72. (in Chinese)

- 李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应
用[J]. 激光与光电子学进展, 2008(8): 70-72.
- [9] Ocan J L, Morales, Molpeceres, et al. Numerical simulation
of surface deformation and residual stresses fields in laser
shock processing experiments [J]. *Applied Surface Science*,
2004, 38: 242-248.
- [10] Fabbro R, Peyre P, Berthe L, et al. Physics and applications
of laser-shock processing[J]. *Laser Apply*, 1998, 10: 265-279.
- [11] Nie Xiangfan, Long Nidong, He Weifeng, et al. The effect
on the surface of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr by laser
shock peening [J]. *Materials Science Forum*, 2011, 694:
946-950.
- [12] Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong, et al. Effects of laser
shock processing on vibration fatigue properties of K417
material[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 35(8): 2197-2201. (in
Chinese)
- 李伟, 何卫锋, 李应红, 等. 激光冲击强化对 K417 材料振
动疲劳性能的影响[J]. 中国激光, 2009, 35(8): 2197-2201.
- [13] Zhou Lei, Xue Dezhi, Chen Keqing, et al. Experimental
research of laser shock processing on K417 alloy [J].
Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(6):
39-42. (in Chinese)
- 周磊, 薛德志, 陈科庆, 等. K417 合金激光冲击强化实验
研究[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(6): 39-42.
- [14] Zhou Lei, Li Yinghong, Wang Cheng, et al. Study of laser
shock processing improve the vibration fatigue properties of
K417 material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38
(S): 408-411. (in Chinese)
- 周磊, 李应红, 汪诚, 等. 激光冲击强化提高 K417 材料振
动疲劳性能实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(S):
408-411.
- [15] Liu Hailei, Long Nidong, He Weifeng, et al. Impact of
aluminizing on effects of K417 material by laser shock
processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(10): 2658-2661.
(in Chinese)
- 刘海雷, 龙霓东, 何卫锋, 等. 渗铝对 K417 激光冲击强化
效果的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2658-2661.
- [16] Zhou Lei, Li Yinghong, Wang Cheng, et al. Vibration
fatigue performance improvement of K417 alloy by laser
shock processing and aluminizing [J]. *Rare Metal Materials
And Engineering*, 2011(11): 1093-1096. (in Chinese)
- 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(11): 1093-
1096.
- [17] Peyre P, Fabbro R. Laser shock processing: a review of the
physics and application [J]. *Opt and Quantum Electron*,
1995, 27(12): 1213-1229.
- [18] Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of Tribology [M].
Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese)
- 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [19] An Taofeng, Sun Xiaofeng, Guan Hengrong, et al. Hot
corrosion behaviors of an aluminide coated nickel base
superalloy [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Metallurgy,
2000.
- 安涛峰, 孙晓峰, 管恒荣, 等. 渗铝镍基高温合金热腐蚀行
为研究[D]. 上海: 中国科学院上海冶金研究所, 2000.