

文章编号: 1004 - 0609(2006)04 - 0599 - 07

# 复合表面改性协同增强 Ti 合金高温微动疲劳抗力<sup>①</sup>

张晓化, 刘道新, 唐长斌, 高广睿  
(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 研究了 Ti 811(Ti8Al11Mo1V) 钛合金表面离子束增强沉积( IBED) 0Cr18Ni9 膜层的膜基界面成分分布、膜基结合强度、膜层硬度和摩擦学行为。利用喷丸形变强化对 IBED 膜层进行后处理, 拟达到联合提高钛合金高温微动疲劳抗力的目的。结果表明: 离子束增强沉积技术可以获得致密度高, 晶粒细化, 孔隙率低, 膜基结合强度高的 0Cr18Ni9 膜层, 从而显著提高了钛合金表面硬度和耐磨性能; 离子束增强沉积 0Cr18Ni9 膜层的耐磨性能与喷丸形变强化引入的表层残余压应力协同作用, 使 Ti 811 合金在 350 °C 高温下的微动疲劳抗力显著提高, 并且高于喷丸强化或 IBED 膜层的单独作用。

**关键词:** 钛合金; 微动疲劳; 复合表面改性; 高温; 喷丸强化; 离子束增强沉积

中图分类号: TG 115

文献标识码: A

## Synergistic improving fretting fatigue resistance of Ti alloy at elevated temperature by duplex surface modification

ZHANG Xiao-hua, LIU Dao-xin, TANG Chang-bin, GAO Guang-rui  
(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The 0Cr18Ni9 film was deposited on Ti 811 titanium alloy surface by ion-beam-enhanced deposition (IBED). The composition distribution, bonding strength, hardness and the wear resistance of the film were investigated. Shot peening was introduced to post treat the modified surface in order to synergistically improve the fretting fatigue resistance of Ti alloy. The results indicate that IBED can prepare 0Cr18Ni9 film with high density, small grain size, low void ratio and high bonding strength. Thus the hardness, wear resistance and fretting fatigue resistance of Ti 811 alloy are increased remarkably. Compared with shot peening treatment or ion-beam-enhanced deposition coating alone, the titanium alloy after IBED 0Cr18Ni9 combined shot peening shows high fretting fatigue resistance at elevated temperature of 350 °C. This is due to the synergistic effect of the high wear resistance of the film surface and the residual compressive stress induced by shot peening.

**Key words:** titanium alloy; fretting fatigue; duplex surface modification; elevated temperature; shot peening; ion beam enhanced deposition

钛合金由于具有高的比强度、优良的耐蚀性和好的热稳定性等特点, 可用于制造航空发动机风扇、压气机轮盘、叶片等零部件。然而, 由于钛合金的耐磨性差, 摩擦系数高, 对微动疲劳损伤十分敏感, 由此构成了航空发动机钛合金压气机盘榫槽和叶片榫头的微动疲劳失效隐患<sup>[1~4]</sup>。因此, 研究

可靠的钛合金微动疲劳防护技术, 成为发展高可靠性、长寿命航空发动机的重要课题之一。

微动疲劳损伤与材料表面的耐磨性能和抗疲劳性能密切相关, 故通过表面涂层和改性技术改善钛合金表面的耐磨和抗疲劳性能, 可达到增强其微动疲劳抗力的目的<sup>[5~8]</sup>。喷丸形变强化已被公认为是

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50171054, 50371060); 航空科学基金资助项目(01H53066)

收稿日期: 2005 - 10 - 19; 修订日期: 2005 - 12 - 23

通讯作者: 刘道新, 教授; 电话: 029 - 88491479; E-mail: liudaox@nwpu.edu.cn

提高钛合金常温条件下微动疲劳抗力最为有效的方法<sup>[8, 9]</sup>。但在高温环境下, 喷丸强化层的残余压应力会发生松弛, 喷丸强化的效果将会降低<sup>[10, 11]</sup>, 因此可考虑将 SP 和其它表面处理技术进行复合来达到协同提高钛合金 FF 抗力的目的。离子束增强沉积技术将离子注入与传统的物理气相沉积技术有机地结合, 在增大材料表面改性层厚度的同时, 显著提高膜基结合强度, 可在不损害基材整体性能的前提下, 达到增强材料表面耐磨性能的目的<sup>[12, 13]</sup>。同时, 由于 IBED 膜层膜基结合强度高, 能够经受住喷丸强化的后处理, 因此十分适合与 SP 复合。Chakravaty 等<sup>[3]</sup> 和 Xue 等<sup>[9]</sup> 曾分别试图将喷丸强化与离子注入、等离子喷涂等技术复合, 拟达到联合提高常温下钛合金 FF 抗力的目的, 但因彼此效果相削, 结果复合处理尚不及单独喷丸强化的效果。本文作者曾将 IBED 膜层与 SP 复合, 达到了联合提高常温下 Ti6Al4V 合金 FF 抗力的目的<sup>[14]</sup>, 然而, 在模拟压气机高温工况环境下, IBED 膜层能否与 SP 有机复合以实现协同提高钛合金 FF 抗力的目的还不明确, 故需加以探讨。

Ti 811 (Ti8Al1Mo1V) 钛合金具有密度低、弹性模量高、振动阻尼性能优良、热稳定性高、焊接性能和成型性能好等诸多优点, 尤其是比刚度是现有工业钛合金中最高的<sup>[15]</sup>, 因而十分适宜于制造先进航空发动机压气机高温端转动部件, 为此我国目前正开发和推广应用该合金材料。作者已对 Ti 811 合金的高温 FF 行为进行了探讨<sup>[16]</sup>, 然而, 该合金微动疲劳防护技术的研究工作尚未见报道, 故本研究选择该合金为研究对象。

## 1 实验

### 1.1 材料

微动疲劳试样和微动桥均由  $d$  16 mm 的 Ti 811 合金棒材制备, Ti 811 为近  $\alpha$  型钛合金, 其化学成分为(质量分数): 7.90% Al, 1.00% Mo, 0.99% V, 0.05% Fe, 0.10% C, 0.01% N, 0.001% H, 0.06% O, 余量为 Ti。Ti 811 合金采用双重退火处理, 即 910 °C 保温 1 h, 空冷+ 580 °C 保温 8 h, 空冷。合金组织为等轴  $\alpha$  相+ 晶间  $\beta$  相, 常温下的力学性能为:  $\sigma_b = 931$  MPa,  $\sigma_{0.2} = 890$  MPa,  $\delta = 23\%$ ,  $\psi = 46\%$ 。

### 1.2 离子束增强沉积膜层的制备

离子束增强沉积技术是在气相沉积的同时, 采用一定能量的离子束进行辅助轰击, 膜基界面形成

共混层(或伪扩散层), 从而获得结晶细致、孔隙率低、结合强度高的金属或化合物膜层。IBED 膜层克服了离子注入层浅和成本高的缺点, 且可在近室温下制备任意化学配比的膜层。

实验用 IBED 设备为 MIB - 850 型多功能溅射镀膜和离子增强沉积系统。溅射靶材为 0Cr18Ni9 合金, 该合金有较好的高温抗氧化性能和强韧综合性能。试样镀膜前均经水砂纸打磨, 机械抛光, 丙酮超声清洗。膜层沉积之前, 首先通入氩气, 采用轰击能量 1 keV、束流 200 mA 的  $Ar^+$  离子束轰击清洗试样表面约 25 min, 同时溅射清洗靶材。膜层界面的制备采用动态反冲工艺, 即在磁控溅射沉积膜层的同时, 以宽束辅助离子源轰击沉积膜。溅射沉积离子源能量为 3 keV、束流为 150 mA。采用逐步降低辅助轰击离子源能量的方法制备膜基界面, 参数分别为: 轰击离子源能量 20 keV、束流为 8 mA, 时间 20 min; 轰击能量 10 keV、束流 6 mA、轰击 10 min; 轰击能量 6 keV、束流 5 mA、轰击 10 min。膜层生长加厚阶段: 轰击能量 4 keV、束流 4 mA, 时间根据预期膜厚确定。

### 1.3 膜层性能评价

利用 HITACHI S - 570 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察分析膜层形貌。利用 GDA750 型辉光放电光谱仪分析膜层及膜基界面元素分布情况。采用 MSF - 2M 型微机辅助 X 射线应力分析仪测定喷丸强化层残余应力分布。用 HV - 1000 型显微硬度计测量膜层的 Knoop 硬度, 载荷 0.25 N, 保载时间 20 s。膜层韧性和膜基结合强度采用多冲疲劳实验评价, 实验条件为冲击次数  $3 \times 10^4$  次, 冲击载荷 800 N, 冲程 0.5 mm。采用球-盘磨损实验机测试膜层的摩擦学性能, 实验时球转动, 盘固定。球摩擦副为  $Si_3N_4$  材料制备, 直径 4.75 mm, 表面粗糙度平均值  $R_a$  0.05  $\mu m$ , 硬度 HRC 80。盘用退火态的 Ti6Al4V 合金制备, 直径 40 mm, 厚度 10 mm, 表面机械抛光, 粗糙度  $R_a$  0.05  $\mu m$ 。

### 1.4 喷丸强化处理

选用 S110 铸钢丸, 弹丸平均直径 0.3 mm; 喷丸强度为 0.17 A; 覆盖率 150%。

### 1.5 微动疲劳实验

高温微动疲劳实验采用自行研制的专用装置, 在 PLG - 100C 高频疲劳实验机上进行, 选择拉-拉疲劳加载方式, 实验装置和试样尺寸参见文献

[16]。微动桥足和微动疲劳试样表面之间采用平面-平面接触方式, 接触区面积为  $2\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 。微动区位移依靠拉-拉疲劳过程中试样相对于微动桥足弹性变形来实现, 调整微动桥的跨距, 即可改变位移幅度。接触区正压力采用应力环法施加。疲劳循环载荷波形为正弦波, 频率  $110\text{ Hz}$ , 应力比  $R\ 0.1$ 。实验温度为  $350\text{ }^\circ\text{C}$ , 最大循环应力为  $530\text{ MPa}$ , FF 寿命取 3 个平行试样的平均值。实验的高温环境利用桶式电阻炉获得, 以智能温控仪监控炉内温度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 离子束增强沉积 0Cr18Ni9 膜层及其性能

离子束增强沉积 0Cr18Ni9 膜层的表面 SEM 形貌如图 1 所示。可见, 所获膜层致密, 孔隙率低, 晶粒细小, 分析表明晶粒尺寸在  $60\sim 100\text{ nm}$  范围。晶粒细化的主要原因在于 IBED 成膜过程中, 辅助离子束的轰击提高了膜层结晶成核率。图 2 所示为膜层元素沿深度分布, 膜层中 Fe 含量约为 77%, Ni 含量约为 7%, Cr 含量约为 13%, 膜层厚度约为  $18\text{ }\mu\text{m}$ 。由于膜基界面制备过程中, 辅助离子源的轰击和混合作用, 导致在膜基界面处膜层元素 Fe、Cr、Ni 与基体元素 Ti、Al、V 产生约  $4\text{ }\mu\text{m}$  的共混层, 这有助于提高膜基结合强度。硬度测试结果表明, 离子束增强沉积制备的 0Cr18Ni9 膜层的硬度约为 HK25 800, 为 Ti 811 合金基体硬度值的 2.1 倍, 为 0Cr18Ni9 靶材的 1.4 倍。0Cr18Ni9 膜层较高的硬度与 IBED 工艺所制膜层的致密度高及膜层中存在一定的压应力有直接关系。多冲疲劳实验表明, IBED 0Cr18Ni9 膜层有很好的韧性和膜基结合强度, 即使将基体材料冲出塌陷坑, 膜层仍然未发生脱落, 同时膜层表面无裂纹出现(如图 3 所示)。

图 4 对比了钛合金表面 IBED 0Cr18Ni9 膜层

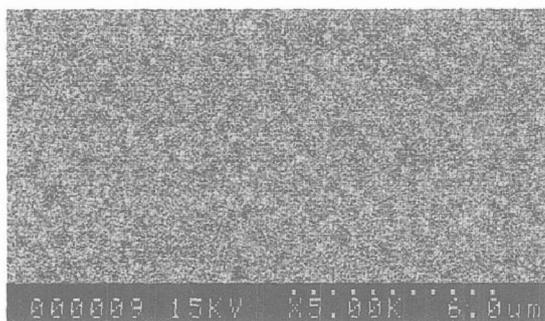


图 1 IBED 膜层的微观形貌

Fig. 1 Micrograph of IBED coating

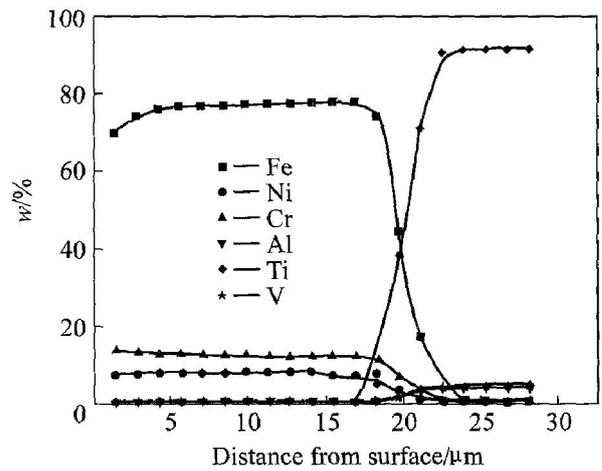


图 2 膜层元素沿深度的分布

Fig. 2 Element distribution on cross section of films

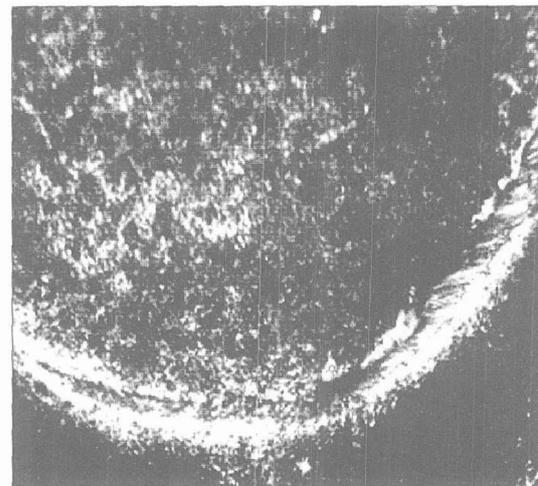


图 3 膜层多冲实验失效形态

Fig. 3 Repeat impact failure micrograph of 0Cr18Ni9 film

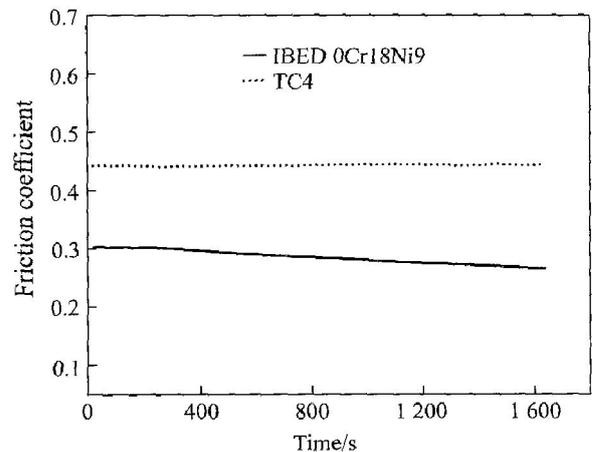


图 4 0Cr18Ni9 膜层与 TC4 基材摩擦因数的比较

Fig. 4 Comparison of friction coefficient of 0Cr18Ni9 film and TC4 base

和钛合金基材的摩擦因数随摩擦行程的变化特征。可以看出, IBED 0Cr18Ni9 膜层使钛合金表面摩擦因数从 0.45 降低到 0.3 左右。同时, 膜层使 Ti6Al4V 合金表面耐磨性能显著提高。其主要原因是由于 IBED 0Cr18Ni9 膜层致密度高、硬度较高、韧性较好, 并处于一定的压应力状态。

## 2.2 微动疲劳抗力

图 5 对比了 Ti 811 合金裸件(用 BM 表示)、IBED 0Cr18Ni9 膜层、喷丸强化(SP)以及 IBED 0Cr18Ni9 膜层+ 喷丸强化后处理(表示为 0Cr18Ni9+ SP) 4 种表面状态试样在 350 °C 高温下的微动疲劳寿命。4 种试样 FF 寿命  $N_f$  比值为  $N_f(0Cr18Ni9+ SP) : N_f(SP) : N_f(IBED 0Cr18Ni9) : N_f(BM) = 6.9 : 3.4 : 1.8 : 1$ , 即先进行离子束增强沉积 0Cr18Ni9, 此后再进行喷丸的复合处理对 Ti 811 合金 FF 抗力的提高最为显著。同时, IBED 0Cr18Ni9 膜层和 SP 也分别使高温下 Ti 811 合金的微动疲劳寿命提高了 0.8 倍和 2.4 倍。IBED 0Cr18Ni9 膜层显著提高了 Ti 811 合金的耐磨性能, 同时膜层硬度适中, 且具有良好的韧性和较低的缺口敏感性, 故表现出较高的 FF 抗力。图 6 对比了 Ti 811 合金及其 IBED 0Cr18Ni9 试样的微动疲劳表面损伤的 SEM 照片。Ti 811 合金 FF 损伤表面呈疲劳脱层特征, 而 IBED 0Cr18Ni9 试样表面仅有较轻的擦痕。喷丸强化使高温下 Ti 811 合金的微动疲劳寿命显著提高的主要原因是由于 SP 引入的残余压应力抑制了 FF 裂纹的早期扩展<sup>[17]</sup>。残余应力测试结果表明, 即使在 350 °C 高温条件下, SP 试样表面 100 μm 层深内仍然保留约 450 MPa 的残余压应力, 如图 7 所示。

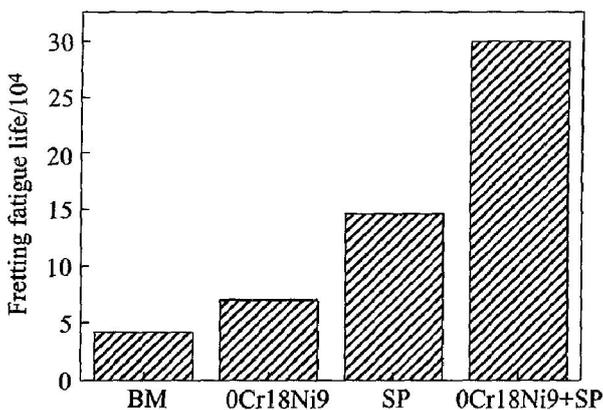


图 5 不同表面处理试样的微动疲劳寿命

Fig. 5 Fretting fatigue lives of Ti 811 alloy with different surface treatments

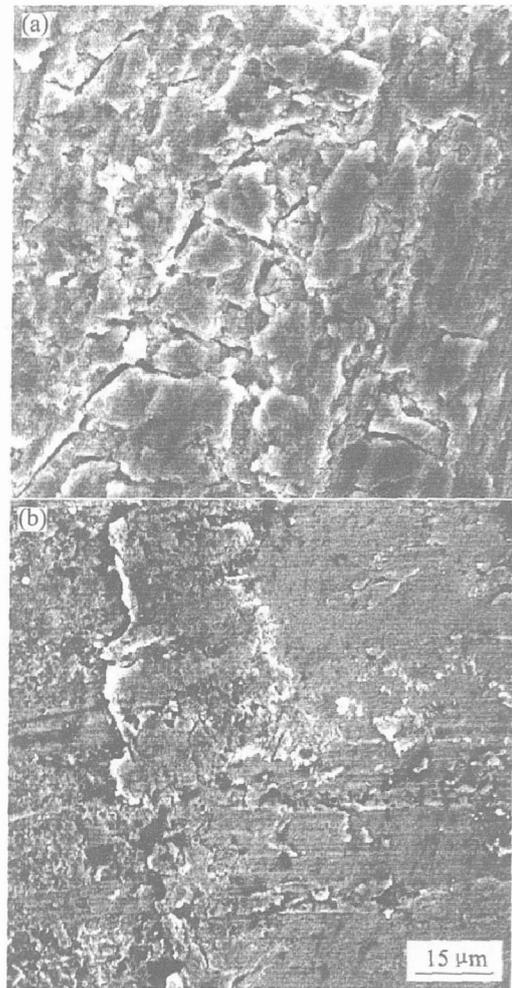


图 6 Ti 811 合金 BM 和 IBED 0Cr18Ni9 状态试样微动疲劳损伤表面的 SEM 照片

Fig. 6 SEM morphologies of fretting fatigue damaged surface of Ti 811 and IBED 0Cr18Ni9 alloy

(a) —BM specimen;

(b) —IBED 0Cr18Ni9 specimen

图中 SP(RT) 表示室温条件, SP(350 °C, 100 h 退火) 则表示 350 °C 下保温 100 h 的模拟发动机压气机工况条件。未经喷丸处理的试样, 裂纹一经萌生就会迅速扩展。喷丸引入的残余压应力一方面通过增大裂纹闭合力而抑制裂纹早期扩展, 另一方面降低了试样承受的疲劳循环载荷的拉应力水平。另外, 由于 SP 引入的表层残余压应力使疲劳主应力方向向垂直于试样表面方向偏移, 残余压应力会对 FF 裂纹早期阶段的扩展路径方向产生影响(图 8)。SP 断口源区有明显的台阶状特征, 这表明喷丸强化使裂纹扩展路径转折, 扩展阻力增大。另外, SP 引入的表层残余压应力既削弱了有效 FF 驱动应力, 同时也减缓了微动磨损作用<sup>[18]</sup>, 因此, 对 FF 裂纹的萌生也有一定的延缓作用。

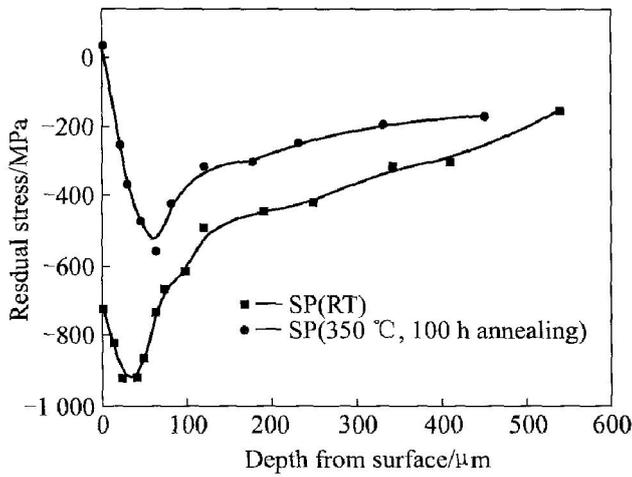


图 7 喷丸试样残余应力的分布

Fig. 7 Residual stress distributions of shot peened Ti 811 specimen

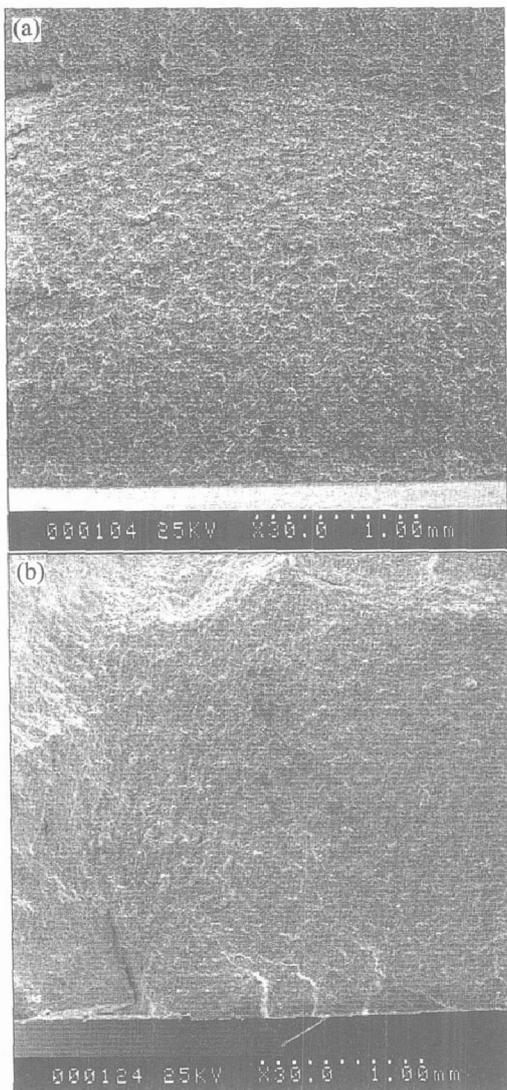


图 8 BM 和 SP 状态 FF 试样的断口形貌  
Fig. 8 Fracture feature of BM and SP specimens  
(a) —BM specimen; (b) —SP specimen

对于 IBED 0Cr18Ni9 膜层+ SP 复合处理, 结合强度高、强韧性好的 IBED 0Cr18Ni9 膜层能够经受住 SP 的后处理, 而且硬度较高的 IBED 0Cr18Ni9 膜层的喷丸强化效果高于钛合金基材, 并能保持较好的表面完整性(如图 9(a)、(b)所示)因而 IBED 膜层与 SP 达到了协同增强钛合金基材 FF 抗力的目的, 复合处理使高温下 Ti 811 合金的微动疲劳寿命提高了近 6 倍。而单独进行喷丸强化的钛合金表面由于硬度相对较低, 表面容易产生塑性变形, 在经受弹丸反复冲击的过程当中, 容易形成疲劳损伤, 由此会造成试样表面产生微裂纹(如图 10 所示)。

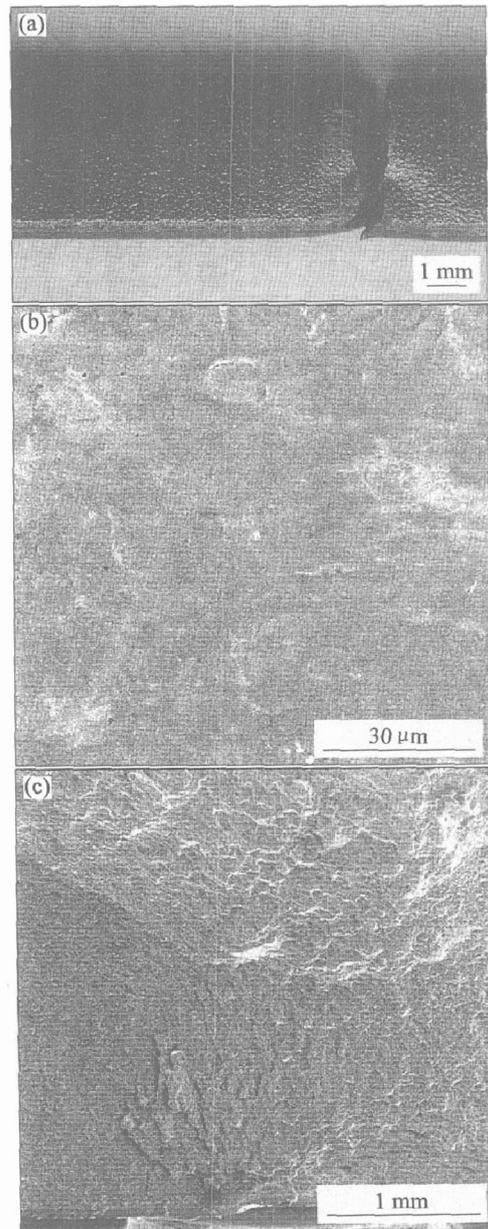


图 9 复合处理 FF 试样微动疲劳损伤特征  
Fig. 9 Morphologies of FF damaged of IBED 0Cr18Ni9+ SP duplex surface treatment  
(a) —Macrograph; (b) —Micrograph; (c) —Fractural surface

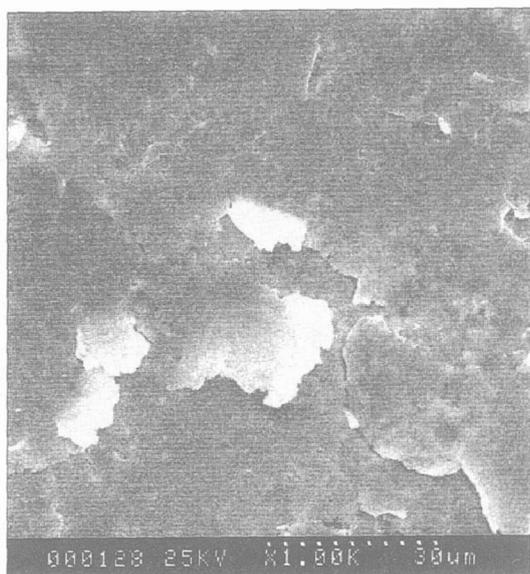


图 10 喷丸试样表面的 SEM 形貌

Fig. 10 SEM micrograph of shot peened specimen

因此,在相同的喷丸强度下,0Cr18Ni9+SP复合处理在FF情况下的裂纹萌生寿命要比单独喷丸强化的裂纹萌生寿命长,故强化效果好。图9(c)所示为IBED 0Cr18Ni9+SP复合处理后的钛合金微动疲劳试样断口形貌特征表明,复合处理后的钛合金与单一喷丸强化处理的试样相比,断口上呈现出较长的裂纹缓慢扩展区,这是其表面存在较大的残余压应力,因而有效地阻止了FF裂纹早期扩展的缘故。

### 3 结论

1) 离子束增强沉积技术可以在Ti 811钛合金表面获得致密度高,晶粒细化,孔隙率低,膜基结合强度高的膜层,并可有效提高钛合金表层硬度和耐磨性能。

2) 离子束增强沉积0Cr18Ni9膜层硬度适中,韧性好,能够有效地改进Ti 811合金350℃高温下的微动疲劳抗力。

3) 离子束增强沉积0Cr18Ni9膜层与喷丸强化有机地复合,可使Ti 811合金350℃下的FF抗力提高近6倍,其效果优于喷丸处理或离子束增强沉积0Cr18Ni9膜层的单独作用。

### REFERENCES

[1] Sahan O. Fretting Fatigue Behavior of a Titanium Al-

loy Ti6Al4V at Elevated Temperature [R]. ADA401275, WPAFB: AFIT/EN, 2002.

- [2] Bhaumik S K, Rangaraju R, Venkataswamy M A. Fatigue fracture of crankshaft of an aircraft engine[J]. Engineering Failure Analysis, 2002, 9(3): 255 - 263.
- [3] Chakravarty S, Koul A K. The effect of surface modification on fretting fatigue in Ti alloy turbine components[J]. Journal of Metals, 1995, 47(3): 31 - 37.
- [4] 刘道新, 何家文. 微动疲劳影响因素及钛合金微动疲劳行为[J]. 航空学报, 2001, 22(5): 454 - 457.  
LIU Dao-xin, HE Jia-wen. Review of factors that influence fretting fatigue and investigation on FF behavior of Ti alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(5): 454 - 457.
- [5] WU Ling-ling, Holloway B C. Analysis of diamond-like carbon and Ti/MoS<sub>2</sub> coatings on Ti6Al4V substrates for applicability to turbine engine applications [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 130(2): 207 - 213.
- [6] Ren W J, Shankar M, Jeffrey H. Evaluation of coatings on Ti6Al4V substrate under fretting fatigue[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 192(3): 177 - 188.
- [7] Hutson A L, Niinomi M, Nicholas T, et al. Effect of various surface conditions on fretting fatigue behavior of Ti6Al4V [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(12): 1223 - 1234.
- [8] Chakravarty S, Dyer J P, Conway J C. Influence of surface treatments on fretting fatigue of Ti6242 at elevated temperature[A]. ASTM STP1367[C]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2000. 491 - 505.
- [9] Xue L, Koul A K, Bibby M. A survey of surface treatments to improve the fretting fatigue resistance of Ti6Al4V[A]. Proc of Conf on Computer Methods and Experimental Measurement for Surface Treatment Effect[C]. Milan: Computational Mechanics Pub, 1995. 265 - 272.
- [10] Hyukjae L, Shankar M. Stress relaxation behavior of shot peening Ti6Al4V under fretting fatigue at elevated temperature [J]. Mater Sci Eng A, 2004, A366: 412 - 420.
- [11] Hyukjae L, Shankar M, Shamachary S. Investigation into effects of re-shot-peening on fretting fatigue behavior of Ti6Al4V[J]. Mater Sci Eng A, 2005, 390(1): 227 - 232.
- [12] Wang X H, Liu X H, Wang X. Mechanical properties of titanium oxide film deposited on LTF-carbon by IBED[J]. Surface and Coatings Technology, 2002,

- 158 - 159: 563 - 567.
- [13] Tang B, Zhu X D, Hu N S. Study on the structure and tribological properties of CrN coating by IBED [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 131 (3): 391 - 394.
- [14] Liu D X, He J W, Celis J P. Improvement of the fretting fatigue wear of Ti6Al4V by duplex surface modification [J]. *Surface and Coating Technology*, 1999, 116 - 119: 234 - 238.
- [15] 赵永庆, 刘炳南. 合金成分对 Ti 811 合金棒材性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 1994, 23(3): 59 - 65.
- ZHAO Yong-qing, LIU Bing-nan. Effect of alloying composition on the mechanical properties of Ti 811 alloy rods [J]. *Rare Metals and Engineering*, 1994, 23 (3): 59 - 65.
- [16] 高广睿, 刘道新, 张晓化. Ti 811 钛合金的高温微动疲劳行为研究 [J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15 (1): 38 - 43.
- GAO Guang-rui LIU Dao-xin ZHANG Xiao-hua. Investigation on fretting fatigue behaviors of Ti 811 alloy at elevated temperature [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(1): 38 - 43.
- [17] 刘道新, 何家文. 喷丸强化因素对 Ti 合金微动疲劳抗力的作用 [J]. *金属学报*, 2001, 37(2): 156 - 160.
- LIU Dao-xin, HE Jia-wen. Effect of shot peening factors on fretting fatigue resistance of titanium alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(2): 156 - 160.
- [18] Fridrici V, Fouvry S, Kapsa P. Effect of shot peening on the fretting wear of Ti6Al4V [J]. *Wear*, 2001, 250: 642 - 649.

(编辑 陈爱华)