

Mo 电极电火花强化与喷丸复合提高 Ti 合金微动疲劳抗力

任 亮¹, 刘道新¹, 张晓化¹, 田林海², 唐 宾²

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072;

2. 太原理工大学 表面工程研究所, 太原 030024)

摘 要: 采用 Mo 电极分别在空气和硅油中对 Ti811 钛合金表面进行电火花强化处理(ESS), 探讨消除强化层中裂纹缺陷的途径。将 ESS 与喷丸强化复合, 拟使 Ti 合金微动疲劳(FF)抗力得到显著改善。结果表明: Mo 电极在空气中电火花强化处理 Ti811 钛合金表面后, 强化层出现明显的微裂纹缺陷, 由此导致其微动疲劳抗力降低。在硅油中用 Mo 电极电火花处理 Ti811 合金不仅消除了表面裂纹缺陷, 而且使钛合金表面具有良好的减摩润滑作用, 显著改善了钛合金基材的耐磨性能; 再经喷丸强化处理, 使钛合金基材的微动疲劳抗力显著提高。

关键词: 钛合金; 微动疲劳; 电火花表面强化; 喷丸; 摩擦磨损

中图分类号: TG 115

文献标识码: A

Electrospark surface strengthening by Mo electrode and shot peening on improving fretting fatigue resistance of Ti alloy

REN Liang¹, LIU Dao-xin¹, ZHANG Xiao-hua¹, TIAN Lin-hai², TANG Bin²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Research Institute of Surface Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The surface of Ti811 alloy was treated by electrospark surface strengthening (ESS) with Mo electrode in the air and in the silicone oil environment to explore ways to eliminate the strengthening layer cracks and flaws. ESS was combined shot peening in order to synergistically improve the fretting fatigue (FF) resistance of Ti alloy. The results show that the Ti811 alloy treated by ESS in the air induces the Ti alloy surface cracking, which leads to its fretting fatigue resistance decreasing. The Ti811 alloy treated by ESS in the silicone oil not only eliminates the surface micro cracks, but also significantly improves the wear resistance of Ti alloy due to the better lubrication. The fretting fatigue resistance of Ti alloy is also improved synergistically by ESS in the silicone oil combined shot peening post treatment.

Key words: titanium alloy; fretting fatigue; electrospark surface strengthening; shot peening; friction and wear

微动疲劳(FF)失效是影响航空、航天、核工业、交通运输等工业部门机械装备安全性的重要隐患^[1-2]。钛合金因比强度高、耐腐蚀性能优异、热稳定性好等特点, 在航空、航天等领域得到了广泛应用, 但是该材料对微动疲劳损伤十分敏感^[3-4]。尽管在利用表面涂层与改性技术改善钛合金微动疲劳性能方面已经开展了诸多有益的研究工作^[5-7], 但是, 在兼顾抗磨性能

和抗微动疲劳性能的表面处理技术研究方面至今尚未取得令人满意的结果, 根本原因是抗磨与抗疲劳的措施常常是矛盾的^[8]。

电火花表面强化(ESS)技术是利用瞬间高频释放的电能使电极材料融渗到工件表面, 从而在金属材料表面形成硬度高、耐磨性能好、抗腐蚀性能优越的合金强化层^[9]。ESS 强化层与基体之间为冶金结合, 不

存在膜基结合薄弱的问题^[10],故进行喷丸强化后处理可望达到联合提高钛合金 FF 抗力和耐磨性能的目的。然而,0Cr18Ni9 电极电火花强化 Ti811 钛合金使其 FF 抗力降低,利用喷丸后处理也只能使该合金的 FF 抗力恢复到未处理试件的水平^[11],主要原因是 ESS 处理层存在难以避免的微裂纹^[10-11]。能否寻找到合适的电极材料和 ESS 工艺,使电火花处理层消除掉微裂纹,则是实现电火花强化与喷丸强化复合,以达到既能提高钛合金抗磨性能,同时又能显著改善其抗微动疲劳性能的目的的关键。本文作者根据 Mo 元素与 Ti 无限固溶的特点,以及在硅油中电火花瞬间放电形成的熔融层凝固速度较空气中低,残余应力可能也会低的推断,以 Mo 电极电火花强化钛合金表面,拟实现消除强化层表面微裂纹缺陷,达到与 SP 联合提高钛合金抗磨和抗微动疲劳的目的。

1 实验

1.1 材料与表面强化工艺

电极为纯度 99%、直径 3 mm 的 Mo 棒。由 Mo-Ti 二元相图可知,Mo 和 Ti 为无限固溶体,不形成脆性相^[12],故 Mo-Ti 的平衡组织相的内应力小,不易产生裂纹。电火花处理用工作液为 A 牌号硅油,分子式中主要元素包括 C、H、Si、O 等。该硅油为无色透明液体,具有抗氧化、抗水性和良好的热稳定性。

实验材料为近 α 型 Ti811 钛合金,微动疲劳试样和微动桥均由 d 16 mm 的 Ti811 合金棒材制备,双重退火处理,力学性能为: $\sigma_b=931$ MPa, $\sigma_{0.2}=890$ MPa, $\delta=23\%$, $\psi=46\%$ 。

优选的电火花强化工艺为:电源电容 180 μ F,电压 60 V,频率 50 Hz。喷丸强化工艺选用 S110 铸钢丸,喷丸强度为 0.20 A,覆盖率 150%。

1.2 微观分析与硬度测试

利用 HITACHI S-570 型扫描电子显微镜(SEM)观察分析强化层的形貌和摩擦磨损、微动疲劳失效形态特征。利用 GDA750 型辉光放电光谱仪分析强化层元素沿层深分布情况。用 HV-1000 型显微硬度计测量强化层的努氏硬度,载荷取 0.245 N,保载时间 20 s。

1.3 球-盘磨损实验

球-盘磨损实验采用干摩擦方式,载荷为 4.90 N,转速为 110 r/min。摩擦副为 d 4.75 mm 的 GCr15 钢球,硬度为 HRC62,表面粗糙度 $R_a=0.05$ μ m,运动轨迹半径 $r=10$ mm。摩擦力用计算机辅助应变仪采集。采用

精度 0.1 mg 的光学分析天平测定试样的磨损质量。

1.4 微动疲劳实验

微动疲劳实验采用自行研制的专用装置,在 AMSLER 5100 型疲劳实验机上进行,选择拉-拉疲劳加载方式。微动桥足与试样表面之间采用平面-平面接触方式,接触区面积为 2 mm \times 6 mm。接触区正压力采用应力环法施加。疲劳载荷波形为正弦波,频率 70 Hz,应力比 $R=0.1$ 。室温下实验,最大循环应力为 530 MPa,FF 寿命取 3 个平行试样的平均值。

2 结果与讨论

2.1 强化层的形貌与成分分布

图 1 所示分别为空气中 Mo 电极电火花强化(ESS)处理(EAIR)、硅油中 ESS 处理(EOIL),先喷丸再硅油中 ESS 处理(SP+EOIL)、先硅油中 ESS 处理再喷丸(EOIL+SP)的钛合金表面形貌。图 2 所示为 EAIR 和 EOIL+SP 两种强化试样剖面金相形貌。

由图 1 可见,空气中电火花强化层是由许多重叠的熔池组成,熔池呈明显的溅射状,由熔池中心射向四周。尽管 Mo 与 Ti 固相无限互溶,但是由于 ESS 处理熔池的聚冷凝固过程造成较高的残余张应力以及 ESS 合金化层的低韧性的原因,空气中 ESS 强化层仍然有一定的裂纹缺陷(图 1(a)和图 2(a))。硅油中 ESS 处理得到的强化层表面则是由许多类似“莲蓬”状的熔池重叠而成(图 1(b))。形成这一形貌的原因主要是由硅油良好的保温性能减缓了凝固过程,以及硅油较高的粘度阻止了 ESS 熔滴向四周扩展和飞溅的缘故,这也使 ESS 层的残余张应力降低,因而表面微裂纹缺陷被消除(图 1(b)和图 2(b))。在喷丸处理的试样上进行硅油中电火花强化处理后,强化层形貌也为“莲蓬”状,与单独硅油环境电火花强化试样无明显差异(图 1(c))。将经硅油中电火花处理的试样再进行喷丸强化处理,“莲蓬”状花样的 ESS 形貌特征消失,而呈现喷丸强化的脱层状特征^[13],但是未发现明显裂纹存在(图 1(d))。

图 2 所示金相剖面形貌表明,合金强化层与钛合金基体为冶金结合,无分离界面。

图 3 所示为强化层元素沿层深的分布特征,可以看到,空气中 Mo 电极电火花强化在 Ti811 合金表面形成了约 15 μ m 厚的合金强化层,强化层中除了电极 Mo 元素和基材 Ti 元素外还有少量 O、N、C 元素,这主要是在空气中处理时大气中 O₂、N₂、C 的化合物等的影响。在相同处理时间内,Mo 电极在硅油中 ESS

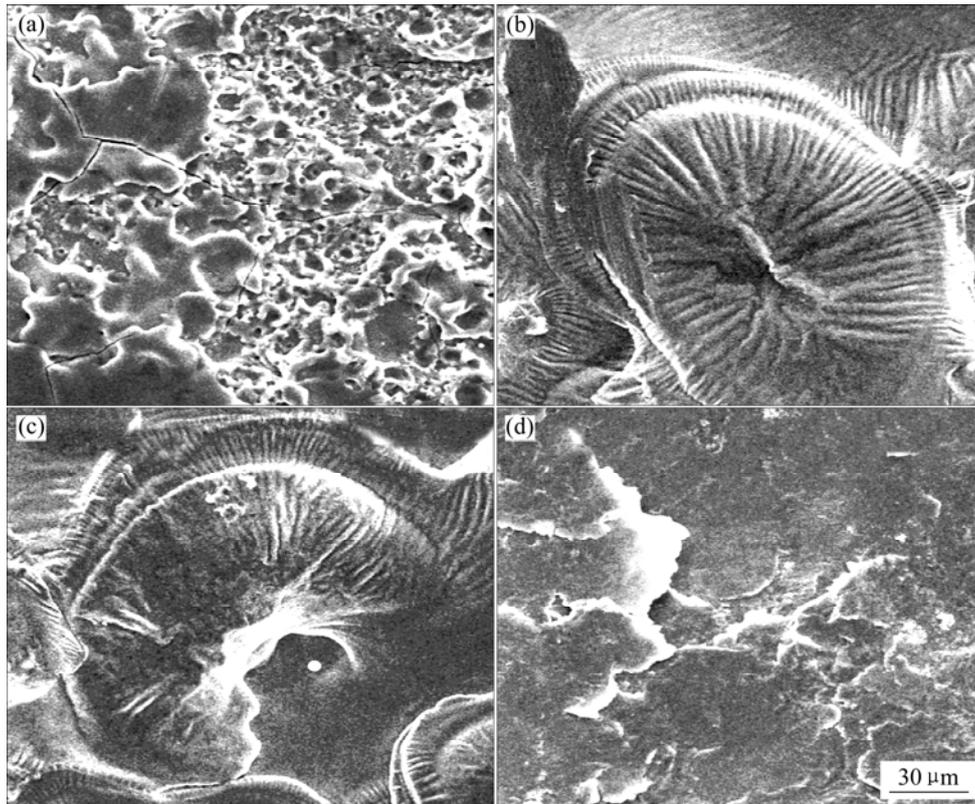


图 1 Mo 强化层的表面形貌

Fig.1 Surface morphologies of Mo alloying layer: (a) EAIR; (b) EOIL; (c) SP+EOIL; (d) EOIL+SP

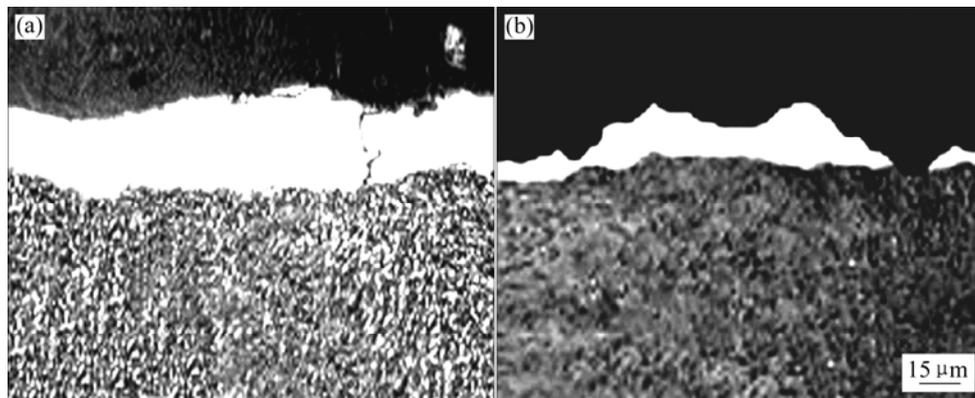


图 2 Mo 强化层的剖面形貌

Fig.2 Section morphologies of Mo alloying layer: (a) EAIR; (b) EOIL+SP

处理钛合金表面可得到约 20 μm 更厚的合金化层, 强化层中除电极 Mo 元素和基材 Ti 元素外, 还含有硅油中的 O、Si、C 等元素, Mo、Ti 元素沿层深的分布特征与空气环境中 ESS 处理层相近, 只是 Mo 含量稍高。

2.2 强化层的硬度与摩擦磨损性能

强化层硬度沿层深分布测试结果如图 4 所示, 可以看到, 空气与硅油中电火花处理得到的强化层极表面的

硬度十分接近, 约较钛合金基材提高 HK 200, 但是硅油中电火花强化层硬度沿层深降低较缓慢, 高硬度层深较大, 这与成分沿层深的分布分析结果一致(图 3)。但是硬化层深度比合金化层大, 原因是基材在 ESS 处理过程中, 表面有一定的淬火硬化作用的影响。

图 5 所示为空气中 ESS 层、硅油中 ESS 层和钛合金基材的摩擦因数随摩擦行程的变化特征。可以看到, 空气中 ESS 层摩擦因数从 0.33 逐渐升高到钛合金基材

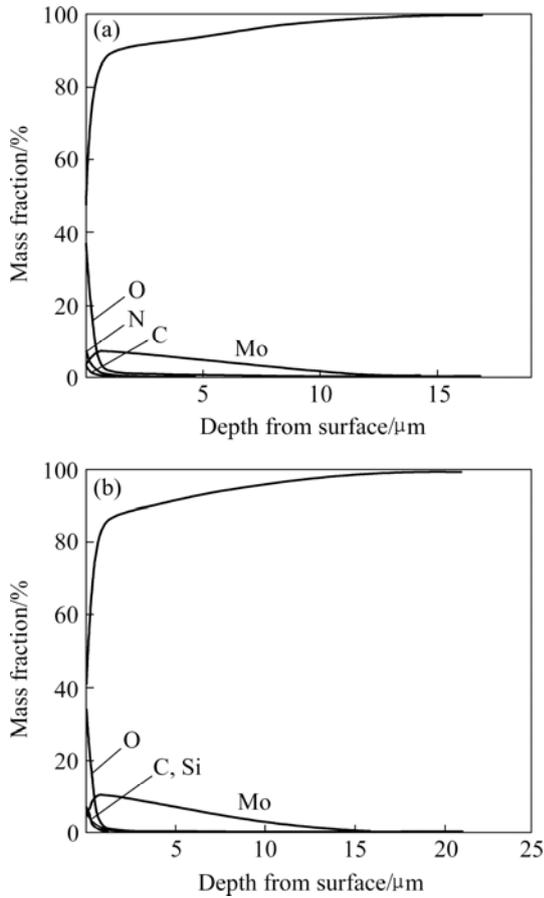


图3 强化层元素沿深度分布曲线
Fig.3 Element distributions on cross-section of alloying layer: (a) EAIR; (b) EOIL

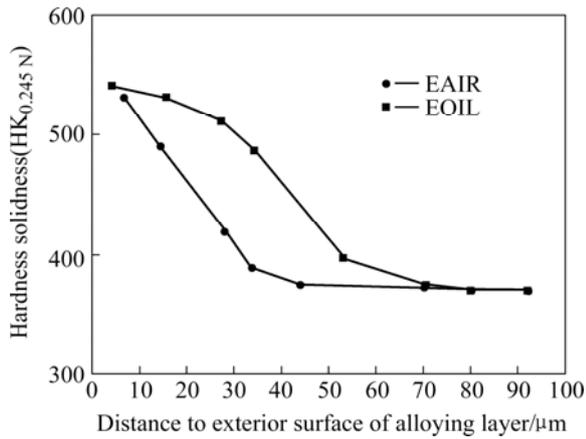


图4 ESS处理试样硬度分布
Fig.4 Hardness profile on ESS Ti811

的0.45数值,即表明表面强化层随着时间的延长不断被磨去,最后接近基材,磨损形态观察也证明了这一点。然而,硅油中ESS层的摩擦因数在1800s的实验时间内,一致保持较低的数值(0.27左右),即该强化层

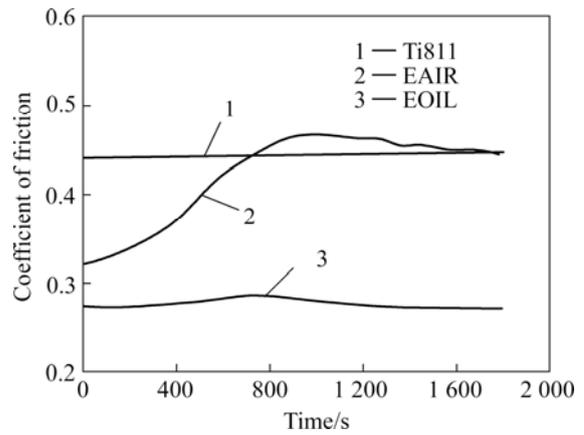


图5 Mo强化层与Ti811合金摩擦因数
Fig.5 Friction coefficients of Mo alloying layer and Ti811 alloy

不仅具有良好的减摩润滑作用,而且耐磨寿命较长。由于强化层较高的硬度,抗犁削磨损能力强,因而表面疲劳脱层特征轻微。磨损机制为粘着磨损和磨粒磨损。Ti811基体则以犁削和疲劳脱层为主要磨损失效形式。硅油中富含的碳元素在放电时高温分解熔融到钛合金表面合金化层中,则起到了良好的润滑作用。

图6所示为不同表面状态试样的磨损量的对比。可以看到,硅油中ESS处理试样的磨损量是钛合金基材(BM)的1/15,是空气中ESS处理试样(EAIR)的1/10。即空气和硅油中电火花放电形成的强化层均提高了钛合金基材的抗磨损能力,但是硅油中电火花放电形成的强化层耐磨能力更强,这显然是由该强化层表面良好的润滑减摩作用以及强化层厚度大决定的。

2.3 微动疲劳抗力

图7所示为Ti811基材和4种表面处理状态试样

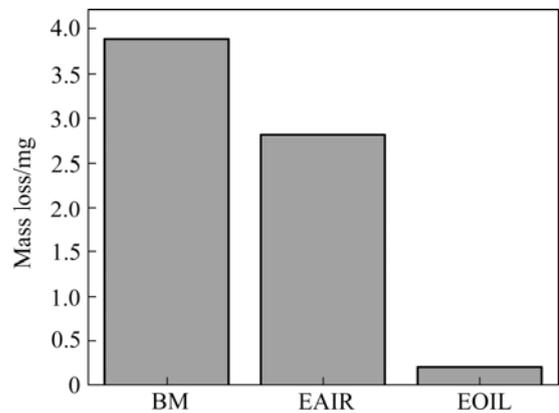


图6 球盘磨损实验磨损量对比
Fig.6 Comparison of mass loss in ball on disk wear test

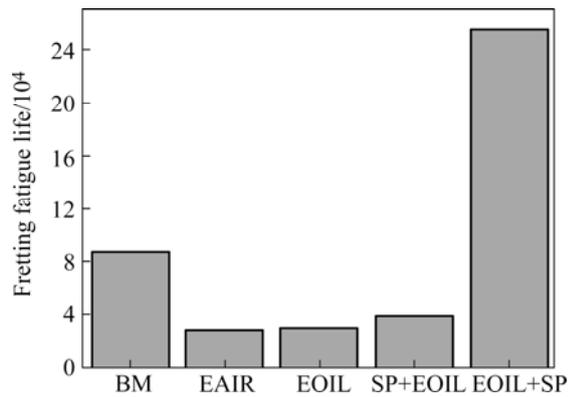


图 7 不同表面处理试样的微动疲劳寿命

Fig.7 Fretting fatigue lives of Ti811 alloy with different surface treatments

的微动疲劳寿命。可以看到, Ti811 钛合金经硅油中电火花沉积 Mo 强化层, 再进行喷丸强化处理后, 其微动疲劳寿命是未处理试样(BM)的 2.9 倍。然而, 空气中 ESS、硅油中 ESS、喷丸+硅油中后 ESS 处理则分别使钛合金基材的 FF 寿命降低 68%、66%和 56%。

空气中处理试样 FF 寿命降低的原因是强化层硬度大、韧性低, ESS 中的快速冷却导致强化层表面产生微裂纹。硅油中处理虽然消除了强化层中的表面裂纹, 但却没有从根本上解决强化层韧性低的问题, 试样 FF 寿命仍较低。先喷丸后硅油中电火花处理则基本上消除了喷丸强化的影响, 试样 FF 寿命同样不高。FF 的特点是既有接触条件下微动磨损作用, 又承受疲劳载荷。抗磨的硬质层脆性大, 韧性低, 缺口敏感性高, 裂纹扩展阻力小, 抗疲劳性能差, 从而呈现低的 FF 抗力。强化层表面若有微裂纹存在则促进 FF 裂纹的萌生。图 8 所示为各试样 FF 断口区表面损伤形态特征。可以看到, 空气中 ESS 强化试样表面磨损不显著, 但是微裂纹多, 且 FF 裂纹源与 ESS 试样表面原始微裂纹有关, FF 裂纹较为容易萌生。硅油中 ESS、喷丸+硅油中后 ESS 处理试样的 FF 损伤区特征较为接近, 虽然表面磨损不显著, 但是裂纹仍然较容易萌生, 表现出韧性较低的材料磨损行为。然而, 先硅油中 ESS 处理, 再进行 SP 后处理的 FF 试样表面磨损较为明显, 次生裂纹较少, 表明该试样裂纹萌生与扩展均较难, 同时由于其 FF 寿命长, 试样表面经受较长时间的微动磨损作用, 故表面存在明显的磨损特征, 裂纹萌生在磨损严重区(图 8(d))。

对于硅油中电火花处理后再进行喷丸强化处理(EOIL+SP)的试样, 其抗 FF 性能显著改善, 主要原因是喷丸引入的表面残余压应力通过增大裂纹闭合合力而

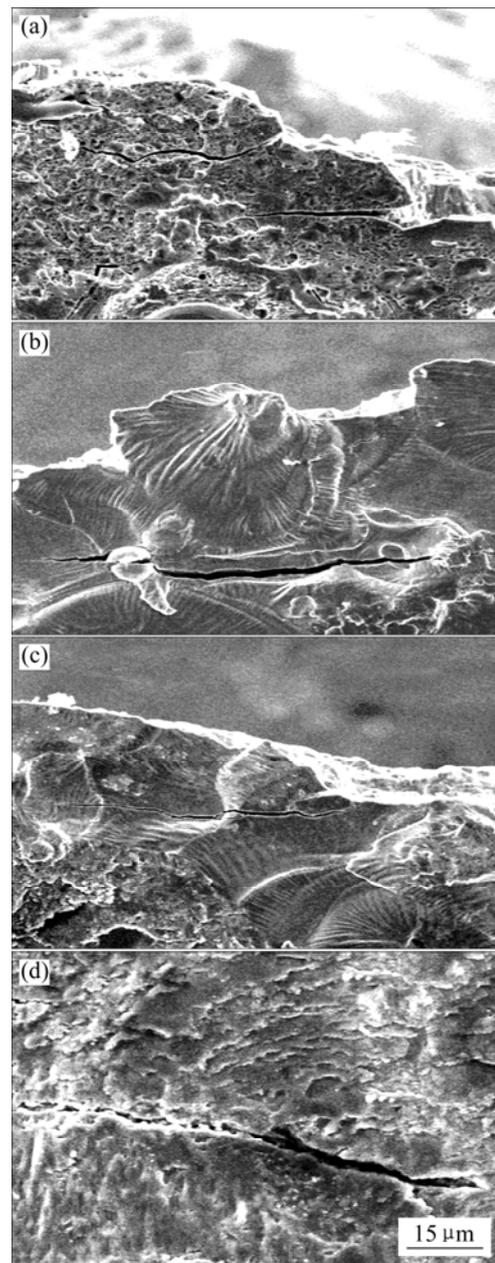


图 8 Mo 强化层 FF 损伤 SEM 形貌

Fig.8 SEM morphologies of FF damaged surface of Mo alloying layer: (a) EAIR; (b) EOIL; (c) SP+EOIL; (d) EOIL+SP

抑制了 FF 裂纹的早期扩展^[14]。SP 引入的表层残余压应力使疲劳主应力方向沿垂直于试样表面方向偏移, 导致 FF 裂纹早期阶段的扩展路径方向发生转折(图 9)。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的作用^[15], 同时硅油中 ESS 层有较好的减摩作用, 因此对 FF 裂纹的萌生有一定的延缓作用。

综上所述, 先硅油中 ESS 处理再喷丸处理的复合

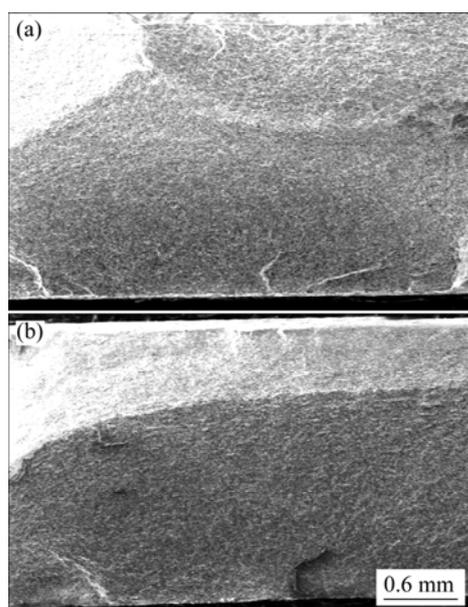


图9 FF试样的断口形貌

Fig.9 Fracture morphologies of FF specimens

工艺不仅使钛合金的FF抗力显著提高,而且能够使钛合金表面保持良好的耐磨性能。

3 结论

1) Mo电极在硅油中对Ti811钛合金表面进行电火花强化,消除了空气环境中电火花强化层的微裂纹缺陷,并显著提高了钛合金表层的耐磨性能。

2) 电火花强化层硬度高、韧性差,导致钛合金微动疲劳抗力降低。先硅油中Mo电极电火花处理钛合金,再进行喷丸强化,能够显著提高Ti811合金的微动疲劳抗力。

REFERENCES

- [1] Ray A K, Das G, Ranganath V R. Failure of connecting pins of a compressor disc in an aero engine[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2004, 11: 613-617.
- [2] Hoepfner D, Adibnazari S, Moesser M W. Literature review and preliminary studies of fretting and fretting fatigue including special application to aircraft joints[R]. AD-A280310, 1994.
- [3] Dyer J P, Conway J C. Influence of surface treatments on fretting fatigue of Ti-6242 at elevated temperatures[C]//ASTM STP 1367. 2000.491-505.
- [4] Sahan O. Fretting fatigue behavior of a titanium alloy Ti-6AL-4V at elevated temperature[R]. AD-A401275, WPAFB: AFIT/EN, 2002.
- [5] Wei R, Shankar M, Jeffrey H. Evaluation of coatings on Ti-6Al-4V substrate under fretting fatigue[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 192(2): 177-188.
- [6] 刘道新, 唐 宾, 何家文. 钛合金表面离子束增强沉积 MoS₂ 基膜层及其性能[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(3): 454-460. LIU Dao-xin, TANG Bin, HE Jia-wen. MoS₂ composite films on Ti alloy prepared by ion-beam-enhanced deposition[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(3): 454-460.
- [7] WU L, Holloway B C. Analysis of diamond-like carbon and Ti/MoS₂ coatings on Ti6Al4V substrate for applicability to turbine engine applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 130(2): 207-213.
- [8] 张晓化, 刘道新, 唐长斌, 等. 复合表面改性协同增强钛合金高温微动疲劳抗力[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(4): 599-606. ZHANG Xiao-hua, LIU Dao-xin, TAN Chang-bin, et al. Synergistic improving fretting fatigue resistance of Ti alloy at elevated temperature by duplex surface modification[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(4): 599-606.
- [9] 朱世根, 狄 平, 顾伟生. 电火花表面强化层组织结构和性能的研究[J]. *材料科学与工艺*, 2003, 11(3): 315-317. ZHU Shi-gen, DI Ping, GU Wei-sheng. Study on EDM surface structure and properties of the alloying layer[J]. *Materials Science and Technology*, 2003, 11(3): 315-317.
- [10] Stachowiak G W, Batchelor A W. Surface hardening and deposition of coatings on metals by a mobile source of localized electrical resistive heating[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 57: 288-297.
- [11] 张晓化, 刘道新. 电火花表面强化与喷丸复合处理对Ti811合金微动疲劳性能的影响[J]. *材料工程*, 2006(9): 31-41. ZHANG Xiao-hua, LIU Dao-xin. Effects of electrospark surface strengthening and shot peening on fretting fatigue of Ti811 alloy at elevated temperature[J]. *Materials Engineering*, 2006(9): 31-41.
- [12] 唐长斌, 刘道新, 朱晓东. 钛合金表面离子束增强沉积 Cr 和 CrMo 合金膜层及其性能[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(3): 471-477. TANG Chang-bin, LIU Dao-xin, ZHU Xiao-dong. Cr and Cr-Mo coatings on titanium alloy surface prepared by ion-beam enhanced deposition[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(3): 471-477.
- [13] Hyukjae L, Shankar M, Shamachary S. Investigation into effects of re-shot-peening on fretting fatigue behavior of Ti-6Al-4V[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, A390: 227-232.
- [14] 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.
- [15] Fridrici V, Fouvry S, Kapsa P. Effect of shot peening on the fretting wear of Ti6Al4V[J]. *Wear*, 2001, 250: 642-649.

(编辑 何学锋)