

高速微粒轰击对微弧氧化铝合金疲劳性能的影响

李占明, 王红美, 孙晓峰, 邱 骥

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘 要: 以获取高性能微弧氧化陶瓷膜, 且不降低基体铝合金的抗疲劳性能为目标, 采用高速微粒轰击处理工艺和微弧氧化处理工艺制备了未处理、高速微粒轰击处理、微弧氧化处理、高速微粒轰击+微弧氧化处理复合处理 4 种状态的试样, 通过疲劳试验机对其疲劳寿命进行了测试; 同时, 采用 TEM 和 XRD 残余应力测试仪等分析方法对试样的表层微观组织结构和残余应力进行了观察与测试。结果表明: 加载载荷较高时, 4 种试样疲劳寿命基本相同, 寿命较短; 加载载荷较低时, 微弧氧化处理铝合金的疲劳寿命明显低于未处理试样, 高速微粒轰击处理导致的微观组织结构细化和形成的残余压应力可以有效抑制疲劳裂纹的萌生和扩展, 使未处理和微弧氧化铝合金的疲劳寿命均得到有效提高, 这 2 种高速颗粒轰击处理过的试样的疲劳寿命均高于未处理试样, 这表明高速颗粒轰击强化处理可有效提高低应力水平时微弧氧化铝合金的疲劳寿命。

关键词: 铝合金; 高速微粒轰击; 微弧氧化; 疲劳性能

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)07-2179-06

微弧氧化(Micro-arc Oxidation, MAO)是一种高效、环保的表面改性技术, 它利用 Al、Mg、Ti 等有色金属在电解液中的氧化反应, 在金属及其合金表面原位生长陶瓷膜, 该陶瓷膜具有耐腐蚀、抗磨损、绝缘、隔热等良好性能, 且可根据使用环境和条件的需要, 通过改变电解液组成和工艺参数调整陶瓷膜的厚度和特性, 因此该技术在材料领域受到了广泛关注^[1-3]。虽然铝合金微弧氧化技术在耐磨损、耐腐蚀、耐高温等服役条件下具有一系列的优点, 但也存在因陶瓷膜的微观结构、内应力和厚度等因素导致的基体疲劳性能降低, 陶瓷膜生长速率差等问题。因此, 如何充分发挥铝合金微弧氧化技术在耐磨损、耐腐蚀方面所具有的优势的同时, 改善铝合金基体的抗疲劳性能, 延长微弧氧化铝合金零部件在交变载荷下的使用寿命, 已成为保证微弧氧化技术有效性和可靠性的关键问题之一^[4-7]。高速微粒轰击(High-speed Particles Bombarding, HSPB)技术是一种新型的表面强化处理技术, 该技术将工件表面晶粒细化到纳米尺寸, 可极大地改善表面结构以及物理化学性能, 由于表面纳米化使基体自身表层形成了纳米晶结构和较强的压应力, 使零件表面的硬度、抗接触疲劳性能大幅提升, 进而大幅度提高零件基体表面的耐磨性能, 减少疲劳裂纹的产生^[8-10]。本研究以获取高性能微弧氧化陶瓷

膜, 不降低基体铝合金的抗疲劳性能并揭示其机理为目标, 采用高速微粒轰击技术对 7A52 高强度铝合金疲劳试样进行了表面强化预处理, 而后采用微弧氧化技术制备陶瓷膜, 将传统的表面强化处理技术与先进的表面膜层制备技术相结合, 利用表面纳米晶优异的综合性能, 解决传统微弧氧化技术存在的问题, 保留其原有性能优势的同时提高其综合服役能力, 得到一种质量更高、稳定性更好、可靠性更强的新型复合处理技术。

1 实 验

试验使用的材料为 10 mm 厚的 Al-Zn-Mg-Cu 系的 7A52 高强度铝合金板材, 化学成分(质量分数, %)为 Si 0.25, Fe 0.3, Cu 0.05-0.2, Mn 0.2-0.5, Mg 2.0-2.8, Zn 4.0-4.8, Cr 0.15-0.25, Zr 0.05-0.15, Al 余量。首先根据国标 GB/T4337-2008, 通过线切割和打磨设备制备 20 支标准疲劳试样, 试样如图 1 所示, 其次通过丙酮对制备的疲劳试样进行超声波清洗, 除去表面油污。

使用自制的自动化高速微粒轰击设备对其中 10 支疲劳试样进行强化处理, 轰击介质为铸钢丸, 平均直径为 0.5 mm, 空气压力 0.7 MPa, 轰击频率为来回处理 2 次, 覆盖率超过 100%, 轰击时间 150 s。

收稿日期: 2017-07-15

基金项目: 军队科研项目

作者简介: 李占明, 男, 1976 年生, 博士, 助理研究员, 装甲兵工程学院装备维修与再制造工程系, 北京 100072, 电话: 010-66718872, E-mail: 18911582505@163.com

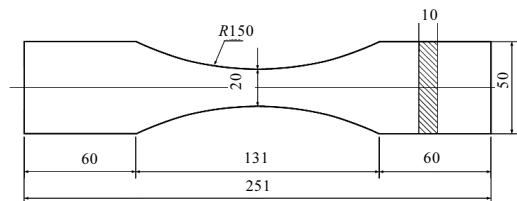


图 1 铝合金疲劳试样尺寸

Fig.1 Diagram of aluminium alloy fatigue samples

将未处理和高速微粒轰击处理的铝合金疲劳试样各 5 支沉浸在电解液中, 控制电流密度在 10 A/dm^2 , 微弧氧化电压保持 550 V 恒定不变, 进行 0.5 h 的处理, 频率为 500 Hz , 占空比为 10% 。所用的电解液是浓度为 25 g/L 的硅酸钠水溶液, 其处理过程如图 2 所示。

7A52 高强度铝合金属于 Al-Zn-Mg 系列合金, 经轧制、淬火和人工时效处理后, 具有较好的强度、焊接性和工艺性。经切割、打磨、抛光后制备金相试样, 采用体积分数为 $\text{HF:HCl:HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:1.5:2.5:95$ 的混合液侵蚀约 5 s 后在 OLYMPUS 型光学显微镜下观察显微组织。

采用数控线切割技术切下厚 0.5 mm 左右的高速微粒轰击 7A52 铝合金试样表面, 利用电解抛光去掉相应的表面层, 从基体侧研磨至厚 $30 \mu\text{m}$ 制成直径为 3 mm 的透射电镜样品, 通过离子减薄仪从基体侧单侧减薄至穿孔, 利用 JEOL-2100 型透射电镜观察试样表面的微观结构特征、晶粒尺寸及形貌。

2 结果与分析

2.1 试验结果

微弧氧化处理和高速颗粒轰击强化处理是 2 种不同类型的表面改性手段, 对基体的影响除了疲劳寿命之外外, 还包括表面组织结构、界面结构以及表面残余应力状态的改变。

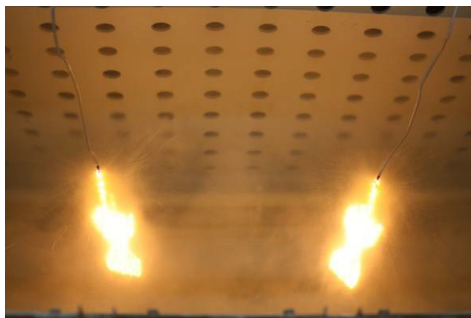


图 2 铝合金疲劳试样微弧氧化过程

Fig.2 Micro-arc oxidation process of aluminium alloy fatigue samples

2.1.1 疲劳性能

疲劳试验在室温下进行, 使用设备为电液伺服疲劳试验机, 载荷为等幅谱, 加载波形为 Sine 波, 加载方向为轴向, 加载频率为 10 Hz , 在应力比 R 为 -1 的条件下, 对未处理、高速微粒轰击处理(HSPB)、微弧氧化处理(MAO)、高速微粒轰击+微弧氧化复合处理(HSPB+MAO) 4 种 7A52 铝合金试样的疲劳寿命进行测试。图 3 是铝合金试样疲劳试验测试结果。从疲劳寿命测试结果可以看出: 当载荷较高时, 高速微粒轰击、微弧氧化及复合处理 7A52 铝合金试样的疲劳性能与未处理试样基本相同, 疲劳寿命较短, 这说明在较高应力状态时, 高速微粒轰击处理、微弧氧化等表面技术对试样疲劳寿命影响较小; 而载荷较低时, 4 种试样的疲劳寿命具有较大区别, 例如当应力幅值为 60 MPa 时, 未处理试样的寿命为 2.3358×10^4 周, 微弧氧化处理试样的寿命为 2.0362×10^4 周, 高速微粒轰击处理试样的疲劳寿命为 2.9577×10^4 周, 高速微粒轰击与微弧氧化复合处理试样寿命为 2.4524×10^4 周, 这表明微弧氧化处理会降低高强度铝合金低应力水平时的疲劳寿命, 与未处理试样相比, 疲劳寿命降低 12.8% ; 高速微粒轰击处理使未处理和微弧氧化铝合金的疲劳寿命均得到有效提高, 使微弧氧化铝合金疲劳寿命提高了 5% , 未微弧氧化铝合金疲劳寿命提高了 26.6% 。由此可知, 当零件在较低应力水平工作时, 微弧氧化处理降低了其疲劳寿命, 而高速微粒轰击可消除微弧氧化对试样疲劳寿命的不良影响, 使其疲劳寿命得到有效提高。

2.1.2 试样表层微观组织结构

图 4 为 7A52 铝合金组织形貌。观察表明该合金组织为典型加工态组织, 由 α 相 Al 和亚稳态强化相 MgZn_2 构成的组织, 其强化相弥散分布在 α 相之中, 多数晶粒的尺寸为微米量级, 大小在 $80 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间。

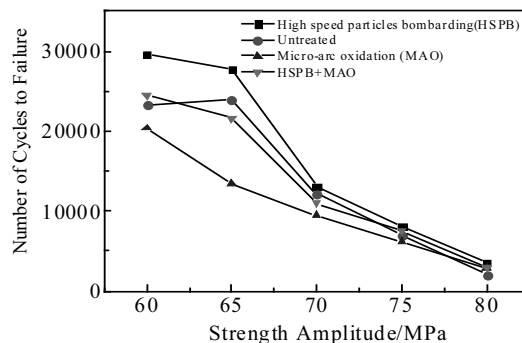


图 3 铝合金试样疲劳试验结果

Fig.3 Fatigue test results of aluminium alloy

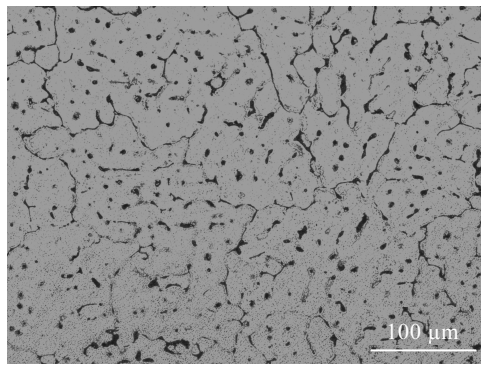


图 4 7A52 铝合金试样 OM 照片

Fig.4 OM image of 7A52 aluminium alloy

图 5 是高速微粒轰击处理的铝合金试样表层 TEM 照片以及相对应的选区电子衍射花样。可以看出，与未处理试样相比，表面晶粒明显细化，其对应的选区电子衍射谱为连续完整的多晶环，这说明选区内存在大量的具有随机取向分布的细小晶粒。从进一步提高放大倍数的 TEM 照片能够看出晶粒尺寸为小于 200 nm 的等轴晶（如图 5b 所示），这说明高速微粒轰击处理使铝合金试样表面接近纳米化的程度。

2.1.3 表面残余应力

残余应力是表征零件表面完整性的重要参数之一，对机械零件的加工精度、力学性能等都有很大的

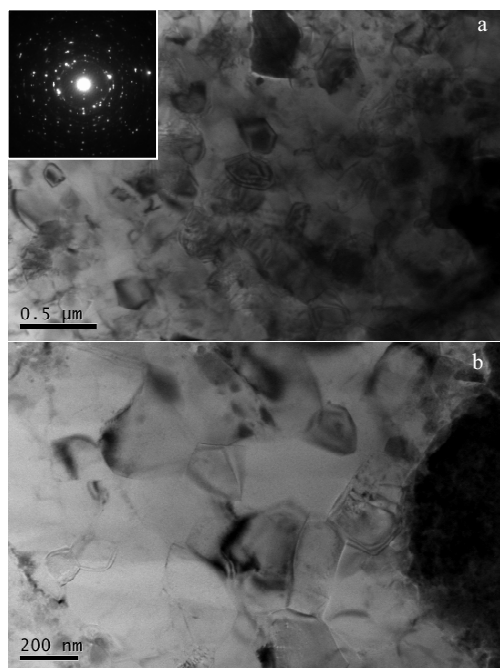


图 5 高速微粒轰击铝合金表面 TEM 照片及选区电子衍射花样

Fig.5 TEM image and SAED pattern of aluminium alloy by high-speed fine particles bombarding (a) and its magnification (b)

影响，制造加工过程中残留的拉应力是零件产生开裂与变形的最主要原因；使用过程中零件中残留的拉应力不仅会影响工件形状尺寸的稳定性，还会降低工件的静强度、疲劳强度和抗应力腐蚀能力等等。采用 XRD 残余应力测试仪对高速微粒轰击处理与未处理 7A52 铝合金试样表面残余应力进行了测试，试验结果如图 6 所示。可以发现，高速微粒轰击处理后试样表面均由残余拉应力变为残余压应力，计算得到 4 个试样的平均残余应力值由处理前的 95 MPa 降低到 -93 MPa，这说明高速微粒轰击处理能够在铝合金表面产生残余压应力。表面残余压应力的引入可以降低疲劳载荷谱，即减小了平均应力，当结构零部件承受外加交变载荷时，表面残余压应力的存在可以降低工件的实际工作疲劳载荷谱，有利于改善零件疲劳强度，延长疲劳寿命，增加零件的服役年限。

2.2 分析与讨论

疲劳断裂过程包括疲劳裂纹的萌生、扩展和断裂 3 个阶段，通常疲劳裂纹首先出现在应力最高、强度最弱的薄弱部位，因表面晶粒外侧不受约束，位错运动仅受材料内侧晶粒制约，阻力相对较小，所以疲劳裂纹常常萌生于表面。除自身组织结构和第二相性质之外，表面缺陷、非金属夹杂造成的应力集中，表面残余应力状态是影响材料疲劳寿命的主要因素。

2.2.1 微弧氧化对铝合金疲劳性能影响机理

图 7 是应力为 60 MPa 时未处理和微弧氧化处理 7A52 高强度铝合金试样疲劳断口形貌。从图 7a 中可以发现，未处理的试样的疲劳裂纹萌生于试样表面的较大刀痕、夹杂等缺陷处（箭头所指）。微弧氧化铝合金试样疲劳裂纹源位于陶瓷膜过度生长在其表面形成夹杂、微裂纹等缺陷处，如图 7b 所示。

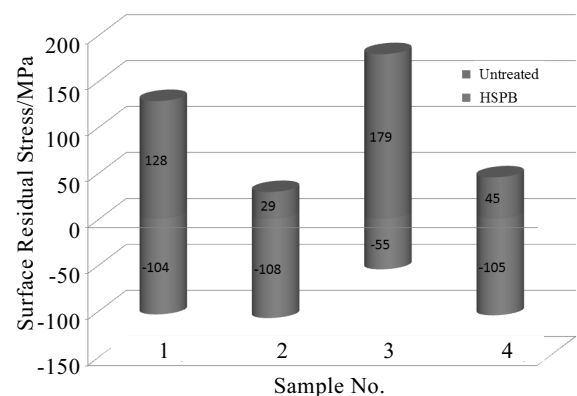


图 6 高速微粒轰击前后铝合金表面残余应力

Fig.6 Surface residual stress of aluminum alloy before and after high-speed fine particles bombarding

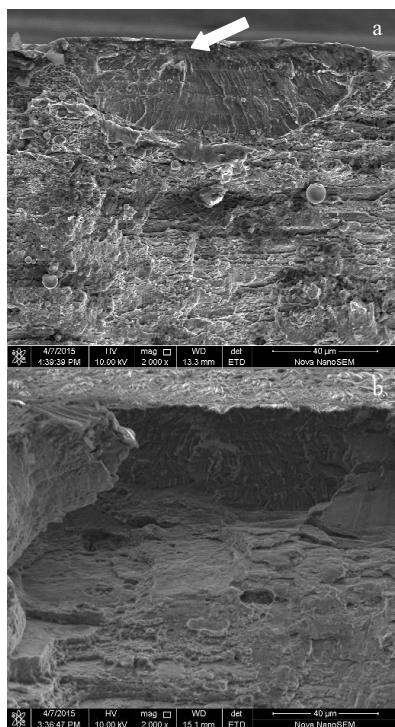


图 7 未处理及微弧氧化铝合金疲劳断口形貌

Fig.7 Fatigue fracture morphologies of untreated (a) and micro-arc oxidation (b) aluminum alloy

铝合金微弧氧化陶瓷膜的生长过程是一种以击穿放电为主导的电化学反应, 击穿放电过程中会产生瞬时高温, 并在放电通道内发生强烈的等离子化学反应, 反应生成的氧化产物融合烧结在一起形成微弧氧化陶瓷膜。微弧氧化过程中, 击穿放电过程在试样表面此起彼伏, 新老放电通道彼此交叠, 其生长过程会消耗铝合金基体。图 8 是 7A52 铝合金表面微弧氧化陶瓷膜截面组织照片。由图可见, 微弧氧化陶瓷膜是从基体表面原位生长出来的, 依靠微弧放电作用将基体转化为陶瓷相, 其结果会导致微弧氧化膜层向基体过度生长, 形成深入基体的缺陷区, 类似于表面切口试样, 在其尖端会出现严重的应力集中, 该部位容易产生疲劳裂纹, 一旦产生裂纹, 将转变为宏观裂纹并沿着最大正应力的方向迅速扩展, 大大缩短了裂纹萌生和扩展时间。而未微弧氧化处理试样疲劳断裂过程中, 裂纹萌生、扩展在总寿命中占有相当大的比重, 微弧氧化工艺导致的疲劳裂纹萌生和扩展 2 个阶段的消失是 7A52 铝合金疲劳寿命下降的主要原因。

此外, 铝合金微弧氧化陶瓷膜层具有陶瓷特性, 脆性较大, 随着膜层厚度增加, 其内部的压应力会逐渐增大, 将对界面处基体产生拉应力, 其拉应力大小

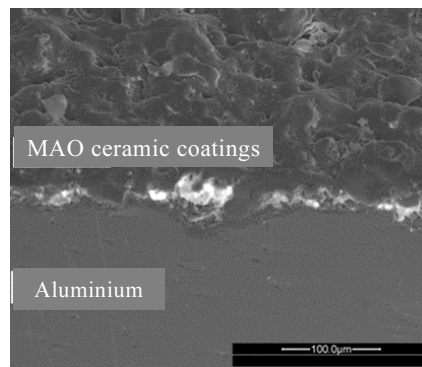


图 8 微弧氧化铝合金截面组织照片

Fig.8 Section microstructure of aluminium alloy by micro-arc oxidation

也会随膜层厚度的增大而增大, 拉应力相当于增加了平均应力水平, 利于疲劳裂纹的萌生, 基体拉应力的增大是铝合金疲劳寿命降低的另一个主要原因。由此可知, 微弧氧化铝合金疲劳性能降低的原因在于膜层向局部基体过度生长, 引起局部区域的应力集中和基体近界面处产生的残余拉应力共同作用的结果。

2.2.2 高速颗粒轰击对铝合金疲劳性能影响机理

图 9 为应力为 60 MPa 时高速颗粒轰击处理和高速颗粒轰击+微弧氧化复合处理 7A52 高强度铝合金试样疲劳断口形貌。从图中可以看出, 高速微粒轰击处理的铝合金试样疲劳裂纹萌生于试样的次表面, 裂纹源较少, 如图 9a 中箭头所示。从图中还可以看出试样外表面存在一厚度为 30~40 μm 的强化层; 复合处理试样同样也存在由于高速颗粒轰击导致的强化层, 见图 9b 箭头所指。该强化层的存在能有效延缓或阻止滑移在表面的形成, 使疲劳裂纹源下移, 从而延长试样的疲劳裂纹萌生寿命。而表面高速微粒轰击处理后再微弧氧化, 由于改变了界面处的应力状态, 由原来的拉应力变为压应力, 同样可有效阻止疲劳裂纹的产生, 使疲劳寿命大幅提高。可以推断, 在基体表面引入残余压应力再进行微弧氧化, 预处理产生的压应力会对后续因微弧氧化导致的拉应力进行缓解或抵消, 使基体表面产生的拉应力由于残余压应力的存在而弱化, 从而在一定程度上抑制微弧氧化产生的拉应力对疲劳寿命的不利作用。因此, 表面残余压应力的存在是高速颗粒轰击提高微弧氧化铝合金疲劳寿命的一个主要原因; 高速颗粒轰击能够消除试样表面的残余拉应力、形成残余压应力, 使零件的最大拉应力从最表面移向内部的次表层, 这样疲劳裂纹就很难在工件的表面形成, 而是在该层以下的某一个拉应力区内产生; 而当疲劳裂纹产生之后, 残余压应力的存在还会降低

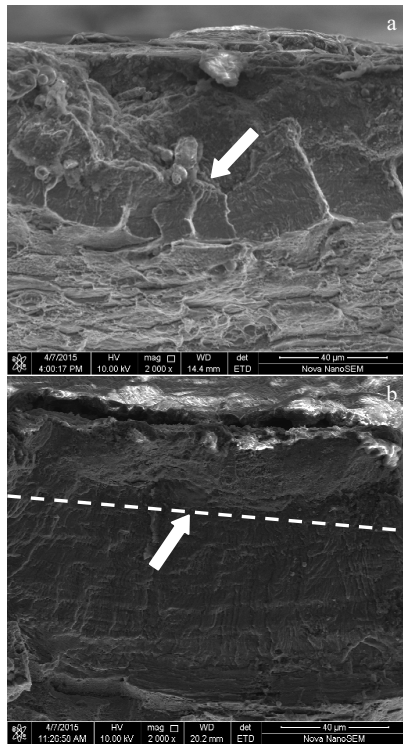


图9 高速颗粒轰击铝合金疲劳断口形貌

Fig.9 Fatigue fracture morphologies of aluminium alloy by HSPB (a) and HSPB+MAO (b)

裂纹尖端应力强度因子范围 ΔK_{th} , 形成裂纹尖端的闭合效应而提高疲劳裂纹扩张的临界应力, 从而降低了疲劳裂纹的扩展速率 da/dN , 延长了零件的疲劳裂纹扩展寿命^[11]。

另外, 高速颗粒轰击处理使铝合金表面晶粒明显细化, 由微米量级细化至纳米量级, 同样有利于其疲劳寿命提高。在同样的外加载荷下, 晶粒尺寸越小, 材料的疲劳寿命越高。晶粒越多、晶粒尺寸越小, 晶体材料总的表面能就越大, 裂纹在材料中扩张时所需要克服的表面能随之提高, 晶界对它的阻碍作用也随之增强, 这就会降低裂纹在该材料中的扩展速度, 也就能够提高零件的疲劳寿命。对同一种多晶体金属材料来说, 在同样的外部条件下, 晶粒尺寸越小, 裂纹在其中扩展时所遇到晶界的数量会更多, 晶界对其阻碍作用也就越大, 疲劳寿命也就越长, 反之越短。

3 结 论

1) 加载载荷较高, 应力幅值在 70~80 MPa 之间时, 高速微粒轰击、微弧氧化及复合处理高强度铝合金试样的疲劳寿命与未处理试样基本相同, 变化幅度不大。

2) 加载载荷较低时, 微弧氧化处理会降低高强度

铝合金低应力水平时的疲劳寿命, 与未处理试样相比, 应力幅值为 60 MPa 时, 疲劳寿命降低 12.8%, 分析认为微弧氧化陶瓷膜局部过度生长, 产生的缺口效应导致了严重的应力集中, 在循环载荷作用下, 促使疲劳裂纹快速形成, 使其疲劳寿命明显降低。

3) 高速微粒轰击处理导致的微观组织结构细化和形成的残余压应力可以有效抑制疲劳裂纹的萌生和扩展, 使未处理和微弧氧化铝合金的疲劳寿命均得到有效提高, 这 2 种高速颗粒轰击处理过的试样的疲劳寿命均高于未处理试样, 这表明高速颗粒轰击强化处理可有效提高低应力水平时微弧氧化铝合金的疲劳寿命。

参考文献 References

- [1] Li Shuhua(李淑华), Shen Dawei(沈大为), Zu Yuanyuan(祖媛媛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43 (1): 154
- [2] Suo Xiangbo(索相波), Qiu Ji(邱 骥), Zhu Haiyan(朱海燕). *Materials Science & Technology*(材料科学与工程)[J], 2013, 4(2): 50
- [3] Li Zhanming(李占明), Qiu Ji(邱 骥), Sun Xiaofeng(孙晓峰) *et al. Journal of Academy of Armored Force Engineering*(装甲兵工程学院学报)[J], 2013, 27(3): 82
- [4] Liang Yi(梁 戈), Zhang Yajuan(张亚娟), Lin Min(林 敏). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2014, 31(2): 154
- [5] Wen Lei(文 磊), Wang Yaming(王亚明), Zhou Yu(周 玉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(S2): 154
- [6] Sundararajan G, Wasekar N P, Ravi N. *Transactions of the Indian Institute of Metals*[J], 2010, 63(2-3): 131
- [7] Wasekar N P, Ravi N, Babu P S *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2010, 41(1): 255
- [8] Ba Dema (巴德玛), Ma Shining(马世宁). *Journal of Academy of Armored Force Engineering*(装甲兵工程学院学报)[J], 2011, 25 (1): 92
- [9] Ma Shining(马世宁), Wang Xiang(王 翔), Wang Xiaoming(王晓明). *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2011, 24(5): 22
- [10] Ma Shining(马世宁), Wang Xiang(王 翔), Wang Xiaoming(王晓明). *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2012, 25(1): 28
- [11] Li Zhanming(李占明), Zhu Youli(朱有利), Huang Yuanlin(黄元林) *et al. China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2012, 25 (5): 85

Effect of High-speed Particles Bombarding Pre-treatment on the Fatigue Properties of Micro-arc Oxidation Aluminum Alloy

Li Zhanming, Wang Hongmei, Sun Xiaofeng, Qiu Ji

(Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to obtain high performance micro arc oxidation ceramic coatings but not to reduce the fatigue properties of aluminum alloy, 4 kinds aluminum alloy samples were prepared, which were untreated, high-speed particles bombarding (HSPB) treated, micro-arc oxidation (MAO) treated, and HSPB+MAO treated, and the fatigue lives of these samples were tested by a universal fatigue test machine. At the same time, the surface layer microstructure and surface residual stress of the samples were analyzed by TEM and XRD residual stress tester, respectively. Results show that the 4 kinds of samples have short fatigue life at high loads, which are similar to each other, but the fatigue life of the MAO treated sample is the shortest among all the samples at low loads, which is even significantly shorter than that of the untreated sample. The microstructure refinement and residual compressive stress caused by HSPB treatment can effectively suppress the initiation and propagation of fatigue cracks, so the fatigue life of the untreated sample and the MAO treated sample is improved after HSPB treatment, which shows that HSPB strengthening treatment can markedly improve the fatigue life of micro-arc oxidation aluminum alloy at low stress level.

Key words: aluminum alloy; high-speed fine particles bombarding; micro-arc oxidation; fatigue performance

Corresponding author: Li Zhanming, Ph. D., Assistant Researcher, Faculty of Remanufacturing Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, P. R. China, Tel: 0086-10-66718872, E-mail: 18911582505@163.com