

涂层疲劳损伤声发射特征参数及损伤机理

Fatigue Damage Acoustic Emission Characteristic Parameters and Mechanism for Coating

李国禄¹, 张志强^{1,2}, 王海斗², 徐滨士², 朴钟宇²

(1 河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300130

2 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

LI Guo-lu¹, ZHANG Zhi-qiang^{1,2}, WANG Hai-dou²,

XU Bin-shi², PIAO Zhong-yu²

(1 School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2 National Key Lab for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

摘要: 使用超音速等离子喷涂设备在 1045 钢基体上制备了铁基合金涂层。以球盘式接触疲劳试验机为平台, 研究了涂层接触疲劳损伤过程中声发射特征参数的变化规律, 并分析了涂层的接触疲劳损伤机理。结果表明, 在转速为 2500r/min 和应力水平为 1.58GPa 实验条件下, 点蚀是涂层的主要失效形式, 表现为在涂层磨痕轨迹范围内出现大量的点蚀坑, 点蚀坑深度为 20~30 μm 。涂层表面粗糙的微凸体与轴承球滚压接触产生黏着磨损, 以及涂层、磨粒、滚动轴承三者形成三体磨料磨损是点蚀失效产生的主要原因。声发射幅值、有效值(Root Mean Square, RMS)、能量、计数和平均频率对涂层表面粗糙微凸体去除、弹塑性变形、裂纹萌生、裂纹稳定扩展和失稳扩展过程比较敏感, 并且在不同的疲劳损伤阶段具有不同的信号反馈特点。

关键词: 铁基合金涂层; 接触疲劳; 损伤机理; 声发射特征参数

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.06.009

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)06-0045-05

Abstract: Fe-based alloy coating was deposited on 1045 steel by a supersonic plasma spraying device. The variation regularities of acoustic emission characteristic parameters in the process of contact fatigue damage were researched using a ball-disk contact fatigue tester, and the contact fatigue damage mechanism of as-sprayed coating was analyzed. The results show that pitting is main failure mode of the coating under the experimental conditions of the 1.58GPa contact press and 2500r/min. Many pitting pits were observed on the wear track, and depth of the pitting pits was in the range from 20 μm to 30 μm . The pitting failure was closely associated with adhesive wear caused by rolling contact between rough salient on coating surface and bearing balls, and three-body abrasive wear among the coating, abrasives and rolling bearings within the contact region. Acoustic emission characteristic parameters, such as amplitude, root mean square (RMS), energy, count and average frequency are sensitive for rough salient removal on coating surface, elastic and plastic deformation, crack initiation, crack stable growth and unstable growth, and which are different during different fatigue damage stages.

Key words: Fe-based alloy coating; contact fatigue; damage mechanism; acoustic emission characteristic parameter

齿轮、轴承等滚动零部件是大型旋转机械的核心部件, 接触疲劳是这些滚动零部件的主要失效形式^[1]。等离子喷涂技术是以等离子弧为热源的热喷涂技术, 已被广泛应用于修复疲劳失效表面并延长其使用寿命

命^[2-4]。声发射技术是近几年快速发展起来的高灵敏度的无损检测手段, 其在接触疲劳失效检测中具有独特的优势^[5,6]。近几年, 国内外研究学者对块体零件的接触疲劳损伤过程中声发射信号幅值、能量

等特征参数以及疲劳损伤机理进行了深入研究,并取得了长足的进步^[7-9]。但对于涂层这类非均质材料体系的接触疲劳损伤过程中声发射信号的研究还很少,借助声发射信号揭示接触疲劳损伤机理的研究仍处于起步阶段^[10-12]。

本工作采用超音速等离子喷涂技术制备铁基自溶性合金涂层,以球盘式接触疲劳试验机为平台研究涂层接触疲劳损伤过程中声发射特征参数幅值、RMS、能量、计数以及平均频率的变化规律,旨在揭示涂层的接触疲劳损伤机理。

1 涂层的制备及实验方法

1.1 涂层的制备

本工作采用 HEPJet 型高效能超音速等离子喷涂装置制备涂层,该装置利用非转移型等离子弧与高速气流相混合时出现的“扩展弧”来加热并加速喷涂粒子获得超音速等离子束流,充分熔融的粒子快速沉积到基体表面、铺展并迅速凝固形成涂层。实验用基体材料选用调质 1045 钢,外径、内径及高度分别为 60, 30, 25mm 的圆环试样,端面磨光处理。喷涂前先对基体进行丙酮清洗,端面进行棕刚玉喷砂粗化。工作层为 Fe 基自熔性合金,成分(质量分数,下同)为:Cr = 13.6%, B = 1.6%, Si = 1.1%, C = 0.15%, Fe = 83.55%。该合金具有良好的去氧、除气和自润湿能力,常温下具有良好的耐磨、耐疲劳性。打底层为 AlSiNi 合金,成分为:Al = 85%, Si = 10%, Ni = 5%。AlSiNi 合金具有良好的放热效应,可以减少基体与工作层热失配造成的残余应力,显著的提高涂层的结合强度。涂层截面的微观结构形貌如图 1 所示,经过磨削加工后工作层厚度为 200~250 μm ,打底层厚度为 50~100 μm ,涂层比较致密,涂层内部存在少量的孔隙、微裂纹和未熔粒子,这些微缺陷的存在将严重影响涂层的抗接触疲劳性能。

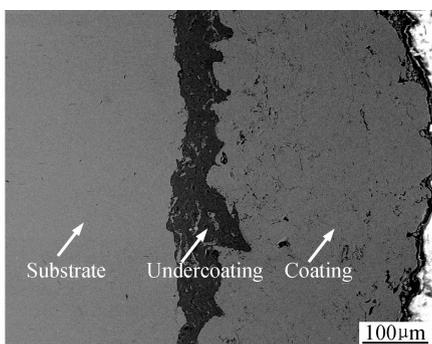


图 1 Fe 基金属涂层表面微观结构形貌

Fig. 1 Microstructure morphology of Fe-based alloy coating

1.2 接触疲劳实验

采用 YS-1 型球盘式接触疲劳试验机对涂层进行接触疲劳实验,该试验机主要模拟推力轴承的接触副形式来考察涂层等硬质薄膜材料的接触疲劳性能^[9]。试验机采用杠杆加载,载荷由载荷传感器在线监测。采用 11 球轴承(GCr15)作为配对摩擦副,转速受驱动电机控制,由速度传感器实时监测。使用美国物理声学公司(PAC)生产的 PCI-2 声发射检测系统对涂层接触疲劳损伤过程进行实时监测,为了尽可能获得原始的、低衰减的疲劳损伤声发射信号,声发射传感器直接安装到涂层试样的侧面。声发射传感器频响范围 125~750kHz,谐振频率为 140kHz,信号采样率为 2MSPS,前置放大器放大额度为 40dB,经放大器放大的信号经带通滤波(50~500kHz),阈值设定为 40dB。本次实验转速为 2500r/min,通过赫兹公式计算本次实验的最大接触应力为 1.58GPa。声发射幅值、RMS、能量、计数和平均频率是常用来分析疲劳损伤特征的重要特征参数。幅值是指一次撞击中声发射振幅的最大值,其与损伤程度有直接的关系。RMS 是一次撞击中声发射振幅平方的平均值的平方根,其对阈值、工作频率和传播特性不甚敏感,可以很好地反映涂层的疲劳损伤程度。能量是指一次撞击中声发射幅值对持续时间的积分值,反映的是事件的相对能量或强度,可以有效地分析复杂背景噪声条件下的声发射信号,较好的去除白噪声的干扰,也可用于复杂声发射信号活动性评价。计数是指一次撞击中信号越过阈值的个数,其对裂纹的扩展比较敏感,可用于波源的类型鉴别。平均频率是一次事件中声发射频率的平均值。

2 实验结果及分析

2.1 疲劳损伤过程中声发射幅值的变化规律

转速为 2500r/min,最大接触应力为 1.58GPa 的实验工况条件下进行 10 组平行水平实验,其中 9 个试样发生点蚀失效,1 个试样发生剥落失效,所以点蚀是该工况条件下的主要失效模式。

涂层接触疲劳损伤过程中声发射幅值的变化规律如图 2 所示,可以看出涂层点蚀失效可大致分为涂层表面粗糙微凸体去除、弹性变形、裂纹萌生、裂纹稳定扩展和裂纹失稳扩展五个阶段。实验开始阶段,幅值高达 70dB 以上,之后急剧降低到 58~60dB,持续时间极短,只持续 5~10s,如图 2 中 1# 箭头所示。这主要是由表面磨削加工造成的粗糙凸起的尖峰在剪切应力的作用下快速去除而引起的。该阶段涂层疲劳损伤

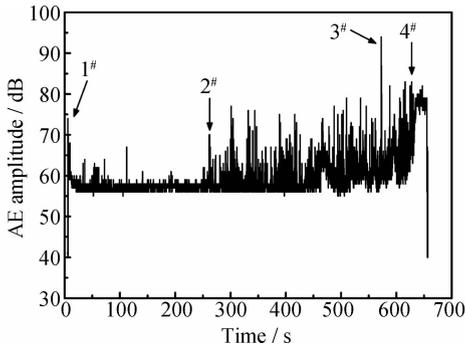


图2 声发射幅值的变化规律

Fig. 2 Variation regularity of AE amplitude

形貌如图3所示,可以看出在非滚动接触区存在非常明显的粗糙磨削加工痕迹,而滚动接触区域粗糙的磨削加工痕迹已被去除。之后幅值进入一个比较稳定的阶段即弹塑性变形阶段,如图2中1#,2#箭头之间,幅值维持在55~60dB之间,这是由于滚动接触区域内的涂层材料在循环应力的作用下发生弹塑性变形连续释放能量而产生声发射信号。裂纹萌生阶段即图2中2#,3#箭头之间,幅值呈不连续的急剧突变,突变值高达78dB。这主要是在循环交变应力的作用下微裂纹的萌生和一定程度的扩展释放能量而产生声发射信号,萌生的微裂纹扩展过程中遇到扩展障碍后将处于稳定,但这种稳定只是暂时的,随着损伤的加剧,裂纹尖端的应力集中也越来越严重。裂纹萌生阶段涂层接触疲劳损伤形貌如图4所示,可以看出在滚动接触区域存在较多的环形、Z形、蠕虫状等微观裂纹,这些微裂纹主要分布在涂层粒子界面处和孔隙的尖角处。图2中3#,4#箭头之间时处于裂纹稳定扩展阶段,该阶段幅值继续呈现不连续的突变,突变值高达80dB,这主要是由萌生的微裂纹越过扩展障碍呈稳定且不连续的扩展导致材料产生微断裂而释放较强的声发射信号。微断裂材料边缘同时又伴随有新的裂纹萌生,总之,裂纹稳定扩展引起更多的裂纹萌生促使产生强度

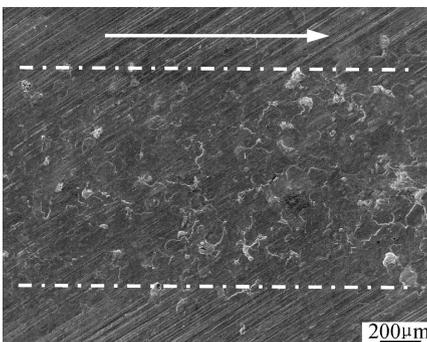


图3 实验开始阶段疲劳损伤形貌

Fig. 3 Damage morphology at the start of test

较大的声发射信号。裂纹稳定扩展阶段涂层接触疲劳损伤形貌如图5所示,可以看出涂层表面接触区域产生较宽且深的裂纹,这些宽又深的裂纹主要分布于涂层粒子界面处。当处于稳定阶段的裂纹积蓄的能量高于越过扩展障碍所需的能量时,裂纹将继续扩展,裂纹继续扩展时将瞬间释放极高的能量,幅值高达93dB。图2中4#箭头之后是裂纹失稳扩展阶段,声发射幅值连续达到80dB,该阶段裂纹快速扩展、连接、闭合导致涂层材料的最终去除并形成原始点蚀坑,如图6所示。点蚀坑周围的涂层粒子结构变得不稳定而极易剥离,直到在涂层表面形成大量的点蚀坑,如图7(a)所示。点蚀坑深度较浅,只有20~

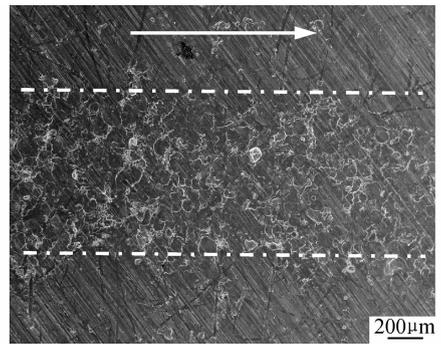


图4 裂纹萌生阶段疲劳损伤形貌

Fig. 4 Damage morphology during crack initiation stage

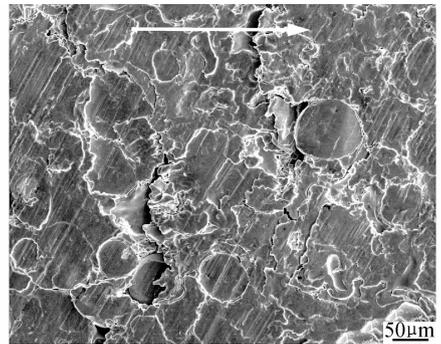


图5 裂纹稳定扩展阶段损伤形貌

Fig. 5 Damage morphology during crack stable growth stage

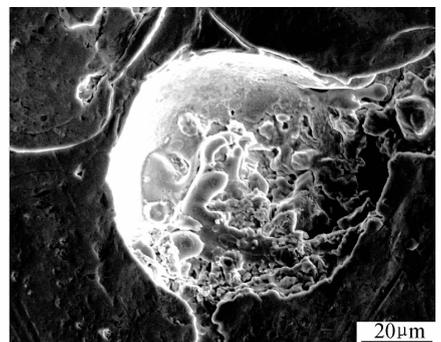


图6 原始点蚀坑形貌

Fig. 6 Morphology of original pitting pit

$30\mu\text{m}$ 。涂层点蚀失效主要是由于粗糙的涂层表面微凸体与轴承球滚压接触时,微凸体发生强烈的塑性变形,并在滚动接触区域形成黏着磨损而产生较大的剪切应力,微凸体在剪切应力的作用下而被去除,

去除的微凸体会充当磨粒,在润滑油的作用下挤入滚动接触区域,这时涂层、磨粒、滚动轴承三者形成三体磨料磨损。图 7(b)为涂层点蚀失效高倍放大形貌,可以看出涂层粒子被剥离的痕迹和微裂纹扩展

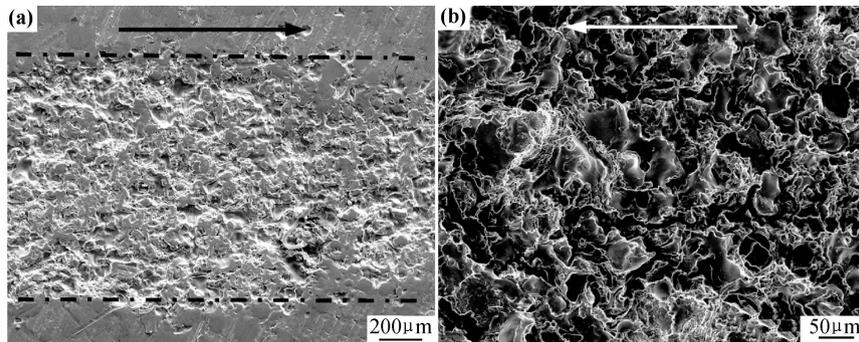


图 7 涂层点蚀失效形貌 (a)失效轨迹全貌;(b)高倍放大形貌

Fig. 7 Pitting failure morphology of the coating (a)overall morphology on the failure track;(b)higher magnification morphology

的轨迹,点蚀坑底部极为不平整。

2.2 疲劳损伤过程中声发射 RMS 和能量的变化规律

涂层接触疲劳损伤过程中声发射 RMS 和能量的变化规律分别如图 8 和图 9 所示。声发射 RMS 和能量变化趋势相似,实验开始阶段,RMS 和能量维持在比较高的水平,RMS 值高达 0.022V ,能量高达 $2750\mu\text{V}$,分别如图 8 和图 9 中 1# 箭头所指。这主要是由于涂层表面粗糙微凸体在剪切应力的作用下快速去除而产生较强的声发射信号。之后 RMS 和能量都急剧降低,RMS 降低到 0.016V 左右,能量降低到 $2000\mu\text{V}$ 以下。与幅值变化不同的是,弹塑性变形阶段即图 8 和图 9 中 1#,2# 箭头之间,RMS 和能量呈缓慢上升,这主要是由涂层材料弹塑性变形释放能量产生弹性波而引起的,同时这也说明在循环应力作用下涂层材料的弹塑性变形是个累积的过程,RMS 和能量上升的速率可以反映弹塑性变形的快慢。裂纹萌生阶段即图 8 和图 9 中 2#,3# 箭头之间,RMS 和能量并没有像幅值一样发生急剧的突变,而是变化平稳,但间断发生多次脉冲越阶,这有可能是裂纹的萌生和增殖引起的,同时也说明 RMS 和能量对裂纹的萌生和增殖都比较敏感。裂纹稳定扩展阶段即图 8 和图 9 中 2#,3# 之箭头间,RMS 和能量越阶的次数和额度都明显地增加,RMS 越阶额度最高达到 0.037V ,能量突变值分布在 $2000\sim 2700\mu\text{V}$ 较大的范围内。这是因为裂纹稳定扩展释放较强的声发射信号引起的,RMS 和能量突变额度的大小可以反映裂纹扩展的程度。图 8 中和图 9 中 4# 箭头之后,RMS 和能量突然增加到很高的水平,RMS 值高达 $0.056\sim 0.073\text{V}$,而能量突增至 $4000\sim 5900\mu\text{V}$,分别如图 8 和图 9 中 3# 箭头所指。

这主要是因为裂纹失稳扩展和涂层材料的去除引起能量快速释放产生了强烈的声发射信号。

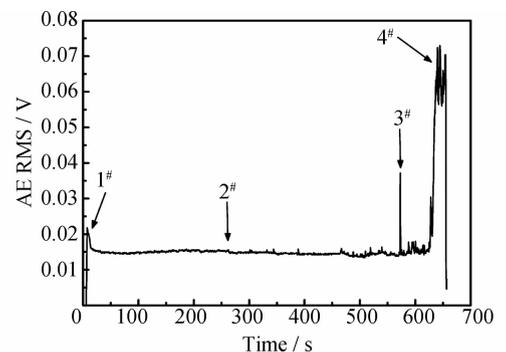


图 8 声发射 RMS 的变化规律

Fig. 8 Variation regularity of AE RMS

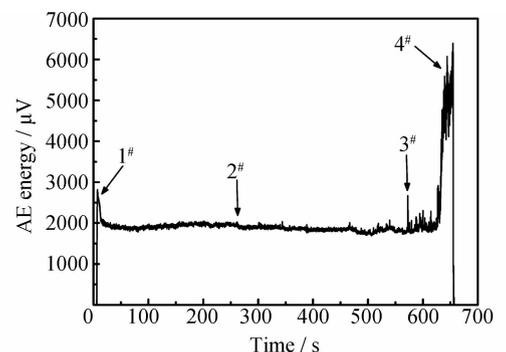


图 9 声发射能量的变化规律

Fig. 9 Variation regularity of AE energy

2.3 疲劳损伤过程中声发射计数和平均频率的变化规律

涂层接触疲劳损伤过程中声发射计数和平均频率的变化规律分别如图 10 和图 11 所示,可以看出计数

和平均频率的变化趋势极为相似。实验开始阶段,声发射计数和平均频率额度比较高,之后快速降低,这与幅值、RMS 和能量的变化趋势相似,分别如图 10 和图 11 中 1[#] 箭头所指。这主要是因为涂层表面微凸体去除产生的声发射信号以连续型为主,信号频率高、衰减慢,越过门槛值的次数相对较多。弹塑性变形阶段即图 10 和图 11 中 1[#], 2[#] 箭头之间,计数和平均频率呈缓慢上升,上升的速率同样可以反映弹塑性变形快慢,这与 RMS 和能量的变化趋势相似,主要是由涂层材料弹塑性变形累积释放强度越来越大的连续型声发射信号造成的。裂纹萌生阶段即图 10 和图 11 中 2[#], 3[#] 箭头之间,计数和平均频率总体呈平稳的上升,这主要是裂纹的萌生和增殖引起的。但需要说明的是,期间计数和平均频率发生了突然的降低,如图 10 和图 11 中 a[#] 箭头所指,这是因为涂层表面不可避免地存在未熔粒子、孔隙等微缺陷,微缺陷处材料结构不稳定,微裂纹易于在这些缺陷处萌生和扩展,致使涂层粒子被剥离,在涂层表面形成点蚀坑,尤其是如果涂层表面存在未熔粒子时,其与周围涂层粒子的结合强度较低,极易在裂纹萌生的初期被剥离。点蚀坑的存在使得轴承球与涂层的实际接触面积减少,造成越过门槛值的声发射信号数量减少,计数和平均频率瞬间降低。裂纹失稳扩展阶段即图 10 和图 11 中 3[#], 4[#] 箭头之间,计数和平均频率总体呈锯齿状上升,这主要因为裂纹稳定扩展释放混合型声发射信号引起的。裂纹失稳扩展阶段即图 10 和图 11 中 4[#] 箭头之后,计数和平均频率呈下降的趋势,这与幅值和 RMS 完全不同。造成计数和平均频率降低的主要原因是因为滚动区域内裂纹失稳扩展、连接、闭合造成涂层材料的去除,使得轴承球与涂层的接触面积减少,造成越过门槛值的声发射信号数量减少,计数和平均频率降低。还有可能是因为裂纹失稳扩展释放幅值高、频率高、衰减极快的突发性声发射信号,使越过门槛值的声发射数量相对减少

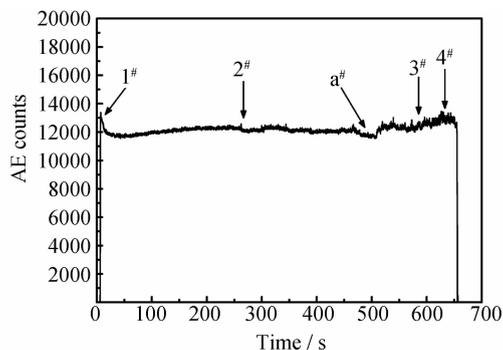


图 10 声发射计数的变化规律

Fig. 10 Variation regularity of AE energy

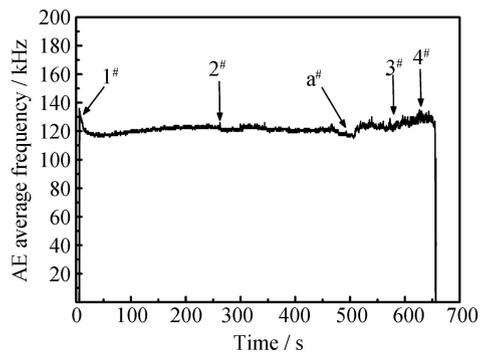


图 11 声发射平均频率的变化规律

Fig. 11 Variation regularity of AE average frequency

而造成的。

3 结论

(1) 转速为 2500r/min 和应力水平为 1.58GPa 实验条件下,点蚀是涂层的主要失效形式。涂层粗糙的表面微凸体与轴承球滚压接触产生黏着磨损,以及涂层、磨粒、滚动轴承三者形成三体磨料磨损是点蚀失效形成的主要原因。

(2) 声发射幅值、RMS、能量、计数和平均频率对涂层表面粗糙微凸体材料去除、弹塑性变形、裂纹萌生、裂纹稳定扩展和失稳扩展过程比较敏感,并在不同疲劳损伤的阶段具有不同的信号反馈特点。

(3) 疲劳损伤开始阶段,粗糙微凸体材料快速去除使得声发射幅值、RMS、能量、计数和平均频率都维持在比较高的水平;弹塑性变形阶段,幅值比较稳定,RMS、能量、计数和平均频率呈缓慢上升;裂纹萌生阶段,幅值呈不连续的急剧突变,RMS、能量、计数和平均频率总体变化平稳,但间断发生多次脉冲越阶;裂纹稳定扩展阶段,幅值呈不连续的急剧突变,RMS 和能量越阶的频率和额度明显的提高,计数和平均频率呈锯齿状上升;裂纹失稳扩展阶段,幅值、RMS 和能量连续增加到很高的水平,计数和平均频率呈下降的趋势。

参考文献

- [1] 徐滨士. 再制造工程基础及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [2] 王韶云, 李国禄, 王海斗. 微缺陷对热喷涂涂层接触疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 2012, (2): 72-76.

WANG Shao-yun, LI Guo-lu, WANG Hai-dou, et al. Influence of microdefect of rolling contact fatigue performance of thermal spraying coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (2): 72-76.

(下转第 71 页)

- HE Chun-xia, LU Qin, ZHANG Jing, et al. Friction and wear properties of PTEE filled with three kinds of nanostructured carbon materials[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2010, 28(2): 186-188.
- [9] 邢志国. 改性树脂粘结 SiC 颗粒复合材料制备及其性能研究[D]. 西安:西安理工大学博士学位论文, 2010.
- [10] 张玉萍, 周永欣, 吕振林, 等. 射流式冲蚀磨损实验机的研制[J]. 铸造设备研究, 2006, 8(4): 9-11.
- ZHANG Yu-ping, ZHOU Yong-xin, LV Zhen-lin, et al. Design and manufacture of multi-function slurry test rig[J]. Research Studies on Foundry Equipment, 2006, 8(4): 9-11.
- [11] 邢志国, 吕振林, 谢辉. SiC/环氧树脂复合材料冲蚀磨损性能的研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3): 291-295.
- XING Zhi-guo, LV Zhen-lin, XIE Hui. Erosion wear behaviors of SiC/epoxy resin composite[J]. Tribology, 2010, 30(3): 291-295.
- [12] 卢德宏, 黎清宁, 蒋业华, 等. Al₂O₃ 颗粒增强聚氨酯基复合材料耐磨性研究[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(3): 351-354.
- LU De-hong, LI Qing-ning, JIANG Ye-hua, et al. Erosion wear resistance of polyurethane matrix composites reinforced with aluminum oxide particle[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2004, 22(3): 351-354.
- [13] 邢志国, 吕振林, 魏鑫, 等. 偶联剂 KH-550 对改性酚醛树脂胶粘 SiC 耐磨涂层性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(3): 27-29.
- XING Zhi-guo, LV Zhen-lin, WEI Xin, et al. Effects of coupling agent KH-550 on the properties of SiC wear resistant coating adhered by modified phenol formaldehyde resin[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009, 32(3): 27-29.
- [14] LIVINGSTONE I, WIGGS G F S, WEAVER C M. Geomorphology of desert sand dunes: a review of recent progress[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 80 (3/4): 239-257.
- [15] XUAN J. Turbulence factors for threshold velocity and emission rate of atmospheric mineral dust[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(12): 1777-1783.
- [16] SCHONFELDT H J, VON LOWIS S. Turbulence-driven saltation in the atmospheric surface layer [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2003, 12(5): 257-268.
- 基金项目: 国家 973 计划(2011CB134003)
- 收稿日期: 2012-03-27; 修订日期: 2013-04-18
- 作者简介: 邢志国(1979-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为表面摩擦学, 联系地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号再制造技术国防科技重点实验室(100072), E-mail: xingzg2011@163.com
- *****
- (上接第 49 页)
- [3] ZHU S, XU B S, YAO J K. High quality ceramic coatings sprayed by high efficiency hypersonic plasma spraying gun[J]. Material Science Forum, 2005, 475-479: 3981-3984.
- [4] 朴钟宇, 徐滨士, 王海斗, 等. 等离子喷涂铁基涂层的接触疲劳失效机理研究[J]. 材料工程, 2009, (11): 69-73.
- PIAO Zhong-yu, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Investigation of contact fatigue mechanism of plasma spraying Fe-based coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2009, (11): 69-73.
- [5] TAN C K, MBA D. Identification of the acoustic emission source during a comparative study on diagnosis of a spur gearbox[J]. Tribology International, 2005, 38(5): 469-80.
- [6] MERIAUX J, BOINET M. Identification of fretting fatigue crack propagation mechanisms using acoustic emission[J]. Tribology International, 2010, 43(11): 2166-2174.
- [7] MBA D. Development of acoustic emission technology for condition monitoring and diagnosis of rotating machines; bearings, pumps, gearboxes, engines and rotating structures[J]. Shock Vib Dig, 2006, 38(1): 3-16.
- [8] KHAMIS R, BALUSHI A L, ADDALI A. Energy index technique for detection of acoustic emissions associated with incipient bearing failures[J]. Applied Acoustics, 2010, 71(9): 812-821.
- [9] WARREN A W, GUO Y B. Acoustic emission monitoring for rolling contact fatigue of superfinished ground surfaces[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(4): 603-614.
- [10] PIAO Z Y, XU B S, WANG H D, et al. Investigation of fatigue prediction of Fe-Cr alloy coatings under rolling contact based on acoustic emission technique[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(7): 2581-2586.
- [11] ZHANG Z Q, LI G L, WANG H D, et al. Investigation of rolling contact fatigue damage process of the coating by acoustics emission and vibration signals[J]. Tribology International, 2012, 47: 25-31.
- [12] MIGUEL J M, GUILLEMANY J M, MELLOR B G. Acoustic emission study on WC-Co thermal sprayed coatings[J]. Materials Science and Engineering; A, 2003, 352(1-2): 55-63.
- 基金项目: 国家杰出青年科学基金(51125023); 国家 973 计划(2011CB013405); 国家自然科学基金面上项目(50975285)
- 收稿日期: 2012-05-15; 修订日期: 2012-09-09
- 作者简介: 李国禄(1966-), 男, 教授, 现从事材料成形技术、摩擦学与表面工程研究, 联系地址: 天津市红桥区丁字沽河北工业大学南院材料加工楼 205 室(300130), E-mail: liguolu@hebut.edu.cn
- 通讯作者: 王海斗(1969-), 男, 教授, 现从事表面工程、再制造的寿命预测研究, 联系地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室(100072), E-mail: wanghaidou@yahoo.com.cn