

滚动接触条件下铁基涂层的疲劳磨损寿命实验研究

Experimental Investigation of Fatigue Wear Life of Fe-based Coating Under Rolling Contact

朴钟宇^{1,2}, 徐滨士¹, 王海斗¹, 濮春欢¹

(1 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;

2 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

PIAO Zhong-yu^{1,2}, XU Bin-shi¹, WANG Hai-dou¹, PU Chun-huan¹

(1 National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China; 2 College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

摘要: 利用超音速等离子喷涂技术在 45 钢表面制备了铁基合金涂层, 利用球盘式疲劳磨损试验机评价了铁基涂层在两种载荷条件下的疲劳磨损性能, 利用两参数 Weibull 分布表征了涂层的疲劳寿命, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 分析了涂层的微观结构和失效形貌, 利用有限元方法研究了涂层内部应力分布。实验结果表明, 载荷条件可以显著地影响涂层的寿命和失效形貌, 高载下涂层的寿命明显降低; 随着载荷的增加, 主要失效形式由表面磨损失效转换成剥层失效, 其中表面磨损是由于粗糙接触引起, 而剥层则与应力分布机制有关。

关键词: 超音速等离子喷涂; 铁基涂层; 疲劳磨损寿命; Weibull; 有限元方法

中图分类号: TG174 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)06-0050-04

Abstract: Fe-based alloy coatings were deposited on the AISI1045 steel by using supersonic plasma spraying device. A ball-on-disc fatigue wear tester was employed to evaluate the fatigue wear performance of Fe-based coating under two types of loading conditions. Two-parameter Weibull distribution was introduced to characterize the fatigue lives. The Scanning Electron Microscopy (SEM) was used to analyze the coating microstructure and worn surface. The Finite Element Method (FEM) was employed to investigate the stress distribution within the coating. Results showed that loading condition play an important role on the fatigue wear lives and failure modes of coatings, the life obviously decreased under high load. The key failure mode changed from abrasion failure to delamination failure, as the load increased. The abrasion failure was associated with asperity contact, whereas the delamination failure had much to do with the stress distribution within the coating.

Key words: supersonic plasma spray; Fe-based coating; fatigue wear life; Weibull; finite element method

疲劳磨损(也称接触疲劳)是材料磨损失效的六种主要形式(磨料磨损、黏着磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、冲蚀磨损、微动磨损)之一, 是一种循环交变载荷作用下产生的表面失效形式, 一般发生在呈滚动或滑动接触的摩擦副表面, 滚动轴承、齿轮、车轮、轧辊等零件都是由于此种原因造成失效^[1,2]。发生在表面的疲劳磨损失效往往导致整个机械设备服役寿命的丧失, 造成严重的经济损失。近年来, 采用热喷涂等技术手段制备表面耐磨涂层成为了解决此类问题的有效手段^[3-5]。

通过热喷涂技术制备表面涂层不但可以恢复零件的表面尺寸, 还可以通过合理的材料和载荷容限设计实现功能的升级, 提高表面服役性能。国内外学者对此展开广泛的研究, Ahmed R^[6-8] 等多种喷涂技术制备的 W-G-Co 的疲劳磨损性能进行了研究; Zhang X C 等^[9-11] 对 NiCr-CrC 涂层的失效机理进行了研究; Fujii M 等^[12,13] 就结合强度对 Al₂O₃ 涂层疲劳磨损行为的影响进行了分析。然而以往的研究主要是针对不同材料在接触载荷下的疲劳失效行为和机理展开的, 属于基于材料研究性能的范畴, 尚未开展系统的寿命

研究。本工作在大样本空间的前提下, 研究了不同载荷条件下等离子喷涂铁基涂层的疲劳磨损寿命分布特点, 并采用有限元方法分析了涂层内部的剪切应力机制, 探讨了失效机理。

1 实验材料和方法

1.1 涂层的制备和表征

采用装备再制造技术国防科技重点实验室自制的高效超音速等离子喷涂设备制备喷涂层, 该设备可以在低能耗的前提下实现超音速等离子喷涂, 制备的涂层性能良好^[14]。表层耐疲劳材料使用铁基自熔剂合金(质量分数%, 下同: Cr-13.6, B-1.6, Si-1.1, C-0.16, Fe余量), 其在常温下具有较好的耐磨性能^[15, 16]。采用镍铝合金(Ni-90, Al-10)作为黏结底层, 其由于镍铝在喷涂熔融态的放热效应可以显著地提高涂层与基体的结合强度^[17]。基体材料选择调质 45 钢, 调质处理后基体具有良好的力学性能。喷涂前用丙酮清洗喷涂表面, 并对清洁表面进行棕刚玉喷砂处理, 形成清洁的粗糙表面, 以增强涂层与基体的结合强度。喷涂过程中, 主气为氩气, 次气为氢气, 送粉气为氮气。喷涂后涂层厚度为 600 μm 左右, 通过研磨得到总厚度为 200 μm 的涂层, 其中镍铝黏结底层厚度约为 50 μm , 在严格控制厚度的同时控制涂层表面的粗糙度在 $R_a=0.5\mu\text{m}$ 。表面涂层和黏结底层的喷涂参数如表 1 所示。

表 1 超音速等离子喷涂参数

Table 1 Supersonic plasma spraying parameter

Spraying parameter		
Spraying material	FeCrBSi	Ni/Al
Flow of Ar gas/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	3.4	3.4
Flow of H ₂ gas/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.3	0.3
Flow of N ₂ gas/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.6	0.6
Spraying current/A	380	320
Spraying voltage/V	150	140
Spraying distance/mm	110	150
Powder feed rate/($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	30	30

使用扫描电子显微镜(SEM)表征的铁基涂层的微观结构如图 1 所示, 可见涂层中几乎没有黑色氧化物存在, 说明此粉末的脱氧造渣能力很好, 存在少量的孔隙, 无明显的未熔颗粒、层状结构和层间裂纹等微观缺陷的存在, 结构比较致密。界面处无明显的微裂纹, 这说明镍铝放热反应形成的微熔池效应有效地改善了涂层与基体的结合状态, 提高了结合强度。使用显微硬度计测试表层铁基涂层的显微硬度, 压入载荷为 100g, 压入时间为 15s。最终测得铁基涂层的平均显

微硬度 HV 为 780。

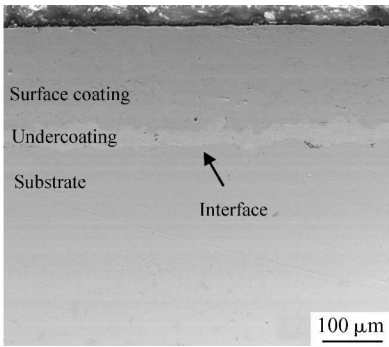


图 1 铁基表面涂层的截面形貌

Fig. 1 Cross sectional microstructure of Fe based alloy coating

1.2 疲劳磨损实验方法

采用球盘式疲劳磨损试验机进行涂层的疲劳磨损实验。该试验机主要模拟精确的点接触状态, 用于考察硬质涂层的疲劳磨损性能, 并通过传感器和特有的记录软件, 实现发生疲劳磨损失效时自动停机并且记录试样疲劳磨损寿命的功能。经过磨削加工, 满足试验机平行度要求的实验试样置于推力轴承上滚道的位置, 11 球轴承球(半径为 5.5mm)、下滚道在转轴的驱动下与光滑的喷涂层平面形成滚动接触副, 在充分油润滑的条件下, 考察涂层的疲劳磨损寿命, 示意图如图 2 所示, 润滑油为 46[#] 机油。本次实验在两种载荷条件下进行即外加载荷分别为 50, 300N, 由于接触条件均已知(如轴承球直径、各材料的弹性模量等), 采用 Hertz 公式^[18] 计算了两种载荷条件下的最大接触应力分别为 1.7114, 2.6841GPa 和接触半径分别为 133.2, 208.9 μm 。通过振动和扭矩双信号判断涂层失效的发生, 两种载荷条件下, 涂层各进行了 10 次重复实验, 每次实验结束后更换轴承球, 以保证不会因为轴承球的失效而导致信号采集失真。

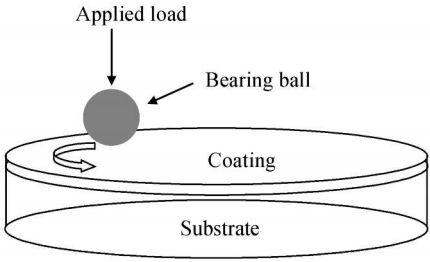


图 2 球盘式试验机摩擦副部分简图

Fig. 2 Schematic plan of the ball-and-disc tester

1.3 有限元分析模型

涂层内部的应力分布与疲劳寿命有着紧密的联系, 由于实验测量的困难性和理论计算的复杂性, 采用

通用有限元分析软件 ANSYS 对涂层内部应力状态进行了有限元分析。为减少计算时间建立了基于轴对称的有限元模型如图 3 所示,在靠近接触区域的位置划分了较细的网格以获得更加精确的计算结果,对模型的三个非接触边设置了如图所示边界约束条件。图中接触应力 $P(x)$ 可由 Johnson 公式^[19] 计算得到:

$$P(x) = P_0 \sqrt{1 - (\frac{x}{a})^2} \quad (0 \leq x \leq a)$$

其中: P_0 为最大接触应力; a 为接触半径; x 为距接触中心的位移。由于本研究模拟工作建立在直接将接触应力加载到涂层表面的基础之上,因此润滑油膜在施载过程中对接触应力的影响忽略不计。

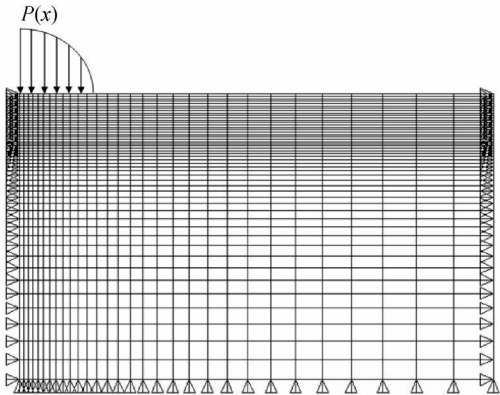


图 3 有限元分析模型
Fig. 3 Schematic of finite element model

2 结果分析与讨论

2.1 疲劳磨损寿命表征

铁基涂层两种载荷条件下的疲劳实验结果如表 2 所示,可见不同的载荷条件对涂层的疲劳磨损寿命(以

循环次数计)有着显著的影响。由于本实验的接触条件与摩擦工况与滚动轴承十分相似,所以采用适于处理滚动轴承疲劳寿命的两参数 Weibull 分布对涂层的疲劳磨损寿命进行表征。两参数 Weibull 分布函数如下式:

$$F(N) = 1 - e^{-(\frac{N}{N_a})^\beta}$$

其中: $F(N)$ 为 N 次循环时的失效概率; N_a 为特征寿命; β 为 Weibull 失效概率曲线的斜率。 N_a 和 β 为 Weibull 分布的两个参数,其可以在已得到数据的基础之上通过极大似然估计法获得,由于计算过程繁琐,本研究采用了通用计算软件 MATLAB 对两种载荷条件下的 Weibull 参数进行了估计,并分别计算了高负载下涂层的疲劳磨损寿命参数,即 N_{10} , N_{50} , N_{90} , Weibull 参数和寿命参数的计算结果如表 3 所示。通过数据拟合得到了不同载荷下涂层的 Weibull 失效概率曲线图,如图 4 所示。

表 2 涂层的疲劳磨损实验结果

Table 2 Fatigue wear experimental results of coatings

$P_0 = 1.7114\text{GPa}$		$P_0 = 2.6841\text{GPa}$	
$N / 10^6 \text{ cycle}$	Failure mode	$N / 10^6 \text{ cycle}$	Failure mode
0.91	Spalling	0.28	Delamination
1.36	Spalling	0.29	Delamination
1.54	Abrasion	0.36	Delamination
1.71	Abrasion	0.37	Delamination
1.95	Spalling	0.44	Delamination
2.13	Abrasion	0.46	Delamination
2.35	Abrasion	0.48	Delamination
2.54	Abrasion	0.51	Delamination
3.21	Abrasion	0.61	Delamination
4.05	Abrasion	0.70	Delamination

表 3 Weibull 及疲劳磨损寿命参数计算结果

Table 3 Calculation results of parameters of Weibull and fatigue wear life

Load/kg	Contact stress/GPa	Contact radius/ μm	β	$N_{10} / 10^6 \text{ cycle}$	$N_{50} / 10^6 \text{ cycle}$	$N_a / 10^6 \text{ cycle}$	$N_{90} / 10^6 \text{ cycle}$
5	1.7114	133.2	2.6524	1.0501	2.1363	2.4529	3.3592
30	2.6841	208.9	3.8009	0.2766	0.4541	0.5001	0.6228

可见,载荷的增大显著地降低了涂层的整体寿命和各寿命参数,同时高载下 Weibull 失效概率曲线的斜率 β 较大,这说明高载下涂层疲劳磨损寿命分散度较小,其寿命更易于评估。

2.2 失效机理分析

实验结果表明,在低载荷的条件下,涂层主要发生表面磨损失效;而在高载荷的条件下,剥层成为了主要的失效机制。可见不同的载荷可以显著地影响铁基等离子喷涂层的疲劳磨损失效形式。低载下的表面磨损

失效形貌如图 5 所示,涂层表面出现大片的麻点,麻点浅且多分布在接触磨痕的范围之内。它的产生的原因主要是对摩擦表面微凸体之间形成直接接触,造成了犁削和微观剪切,导致了微凸体的塑性变形和微观断裂,从而形成了表面磨损。有研究表明^[20] 由于微观断裂,在实验开始后不久就会在接触区域出现磨屑,由于磨屑始终存在于接触区域内,与涂层、对磨体形成了三体磨损从而加速了表面磨损的进程。所以这种直接的磨损可能是由于实验开始时,润滑油进入接触区域初

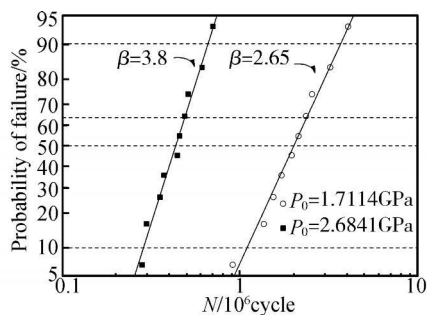


图 4 不同载荷下涂层寿命的 Weibull 失效概率曲线图
Fig. 4 Weibull plots of coating fatigue lives under different loading condition

期没有形成充分的润滑油膜, 接触副的微凸体之间相互剪切和个别较高的微凸体的犁削作用造成的。当形成油膜后, 一些磨屑在滚动体和涂层之间形成了磨粒的作用, 最终导致了表面磨损的发生。

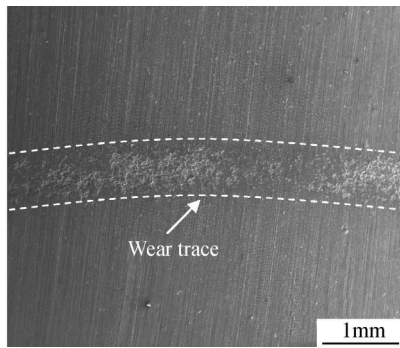


图 5 低载下表面磨损失效形貌
Fig. 5 Morphology of abrasion failure under low load

高载条件下的整层剥层失效形貌如图 6 所示, 可见涂层由于交变载荷的作用直接剥离, 材料去除的面积大于接触磨痕, 部分基体暴露。以往的研究^[21]表明这种严重的失效形式与涂层内部的剪切应力分布机制有关。基于有限元分析的两种载荷条件下涂层内部剪切应力的分布图如图 7 所示, 可见虽然高载荷条件下涂层承受着几乎两倍于低载的最大剪切应力, 但在高载还是低载的条件下, 最大剪切应力均出现在涂层的内部。当载荷较高时, 在最大剪切应力处的孔隙、未熔颗粒等微缺陷形成了强烈的应力集中, 从而导致这些微缺陷被诱导成为疲劳主裂纹, 其不断扩展并与周围枝状裂纹联合最终形成了层内剥层失效。同时, 虽然最大剪切应力存在于涂层内部, 但涂层与基体的结合界面上仍然存在着较大的界面应力, 由于等离子喷涂涂层成形的特殊性, 结合强度较弱是其固有的主要缺陷, 当界面剪切应力大时, 界面上的微缺陷在交变载荷的作用下形成了主裂纹并快速发生失稳扩展, 最终与其

他裂纹连接向表面生长, 在接触区域边缘拉应力的作用下导致了涂层部分剥离。

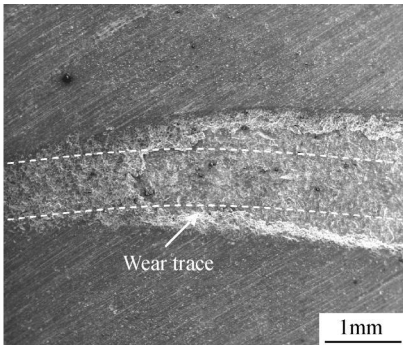


图 6 高载下剥层失效形貌
Fig. 6 Morphology of delamination failure under high load

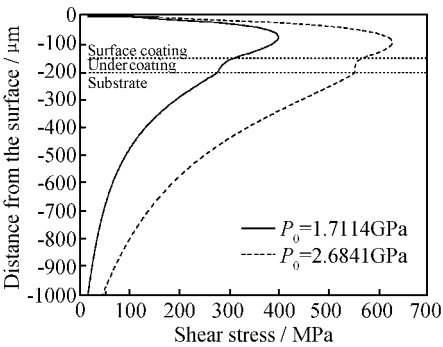


图 7 不同载荷下涂层内部的剪切应力分布
Fig. 7 Shear stress distribution within the coating under different loading conditions

综上所述, 涂层在轻载时, 其内部的剪切应力值较小, 涂层在较长的时间内由于表面粗糙接触而失效; 而重载时, 在强烈剪切应力的驱使下, 涂层内部的缺陷被快速诱发并失稳扩展形成了短时间的剥层失效。

3 结论

- (1) 利用超音速等离子喷涂技术制备了铁基自熔剂合金表面涂层和镍铝合金黏结底层, 得到的表面涂层微观缺陷少、结构致密, 黏结底层与基体结合状态良好。
- (2) 采用两参数 Weibull 分布对两种载荷条件下涂层的疲劳磨损寿命进行表征, 表明载荷条件可以显著地影响涂层的疲劳寿命, 高载下涂层整体寿命和各寿命参数都明显降低。
- (3) 载荷条件可以显著影响涂层的疲劳磨损失效形式, 低载下以表面磨损失效为主, 其主要是接触副粗

material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 2(1): 39–64.

- [3] 马保国, 塞守卫, 金磊, 等. 无机/相变定型储能材料的制备研究进展[J]. *材料导报*, 2008, 22(12): 36–43.
- [4] ZHANG Y P, LIN K P, YANG R, et al. Preparation, thermal performance and application of shape stabilized PCM in energy efficient buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(10): 1262–1269.
- [5] AHMET S. Eutectic mixtures of some fatty acids for latent heat storage: Thermal properties and thermal reliability with respect to thermal cycling [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(9–10): 1207–1221.
- [6] 张东, 周剑敏, 吴科如. 颗粒型相变储能复合材料[J]. *复合材料*

学报, 2004, 21(5): 103–107.

- [7] SCARPA F, MILANO G. The role of adsorption and phase change phenomena in the thermophysical characterization of moist porous materials[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2002, 23(4): 1033–1046.

基金项目: 山东省科技计划资助项目(2006GG2203027); 山东省教育厅科技计划资助项目(J06106)

收稿日期: 2009-08-02; 修订日期: 2010-03-10

作者简介: 马烽(1967—), 男, 副教授, 博士, 从事多相传热与化工新材料方面研究工作, 联系地址: 山东省济南市西部新城大学科技园山东轻工学院化学工程学院(250353), E-mail: fengmachen@sina.com

(上接第 53 页)

糙接触造成的; 高载下以剥层失效为主, 其主要与交变载荷作用下涂层内部和涂层/基体界面较大的剪切应力有关。

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] 刘家浚. 材料磨损原理及耐磨性[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [3] 关耀辉, 徐杨, 郑仲瑜, 等. 等离子喷涂纳米 FeS 涂层的摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(4): 320–324.
- [4] 姚舜晖, 苏演良, 高文显, 等. 纳米碳化钨增强镍基合金热喷涂涂层的摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2008, 28(1): 33–38.
- [5] YOSHIDA A, FUJII M. Influence of soft surface modification on rolling contact fatigue strength of machine element [J]. *Tribology International*, 2002, 35(12): 837–847.
- [6] AHMED R. Contact fatigue failure modes of HVOF coatings[J]. *Wear*, 2002, 253(3): 473–487.
- [7] AHMED R, HADFIELD M. Rolling contact fatigue performance of detonation gun coated elements [J]. *Tribology International*, 1997, 30: 129–137.
- [8] AHMED R, HADFIELD M. Failure modes of plasma sprayed W-15% Co coated rolling elements [J]. *Wear*, 1999, 230: 39–55.
- [9] ZHANG X C, XU B S, XU AN F Z, et al. Rolling contact fatigue behavior of plasma-sprayed CrG-NiCr cermet coatings [J]. *Wear*, 2008, 265: 1875–1883.
- [10] ZHANG X C, XU B S, XU AN F Z, et al. Fatigue resistance and failure mechanisms of plasma-sprayed CrG-NiCr cermet coatings in rolling contact [J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31: 906–915.
- [11] ZHANG X C, XU B S, XU AN F Z, et al. Fatigue resistance of plasma-sprayed CrG-NiCr cermet coatings in rolling contact [J].

Applied Surface Science, 2008, 254: 3734–3744.

- [12] FUJII M, YOSHIDA A, MA J B, et al. Rolling contact fatigue of alumina ceramics sprayed on steel roller under pure rolling contact condition [J]. *Tribology International*, 2006, 39(9): 856–862.
- [13] FUJII M, MA J B, YOSHIDA A, et al. Influence of coating thickness on rolling contact fatigue of alumina ceramics thermally sprayed on steel roller [J]. *Tribology International*, 2006, 39(11): 1447–1453.
- [14] 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.
- [15] 吴子健. 热喷涂技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [16] 张平. 热喷涂材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [17] 楚建新. 热喷涂镍铝放热反应[J]. *粉末冶金技术*, 1987, 5(3): 147–151.
- [18] HERTZ H. On the contact of elastic solids [J]. *J Reine Angew Math*, 1882, 92: 156–171.
- [19] JOHNSON K L. *Contact Mechanics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [20] HOLMBERG K, MATTHEWS A, RONKAINEN H. Coatings tribology- contact mechanisms and surface design [J]. *Tribology International*, 1998, 31(1–3): 107–120.
- [21] SUH N P. Overview of delamination theory of wear [J]. *Wear*, 1977, 44: 1–16.

基金项目: 国家 863 课题 (2007AA04Z408); 国家自然科学基金 (50975285, 50735006); 国家科技支撑计划 (2008BAK42B03)

收稿日期: 2009-04-03; 修订日期: 2009-12-20

作者简介: 朴钟宇 (1982—), 男, 博士研究生, 现从事装备再制造寿命预测研究, 联系地址: 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: piaozhy@yahoo.com.cn