

微缺陷对热喷涂涂层接触疲劳性能的影响

Influence of Microdefect on Rolling Contact Fatigue Performance of Thermal Spraying Coating

王韶云^{1,2}, 李国禄¹, 王海斗², 刘金海¹, 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)

WANG Shao-yun^{1,2}, LI Guo-lu¹, WANG Hai-dou², LIU Jin-hai¹,

XU Bin-shi², PIAO Zhong-yu²

(1 School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology,

Tianjin 300130, China; 2 National Key Laboratory for Remanufacturing,

Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

摘要: 采用超音速等离子喷涂设备在 45 号钢基体上制备了三种含有不同微缺陷的 NiCrBSi 合金涂层。使用球盘式接触疲劳实验机对涂层的接触疲劳性能进行了测试, 建立了 Weibull 失效概率图; 使用扫描电子显微镜对涂层的微观结构和失效形貌进行了表征; 比较了三种涂层的接触疲劳寿命及涂层的主要疲劳失效模式。结果表明, 涂层内的微缺陷主要由微孔隙和微裂纹构成, 涂层接触疲劳寿命的长短与这些微缺陷含量的多少成反比, 涂层的孔隙率为 2.5%, 1.3% 和 2.1%, 对应的接触疲劳寿命分别为 7.77×10^5 , 8.99×10^5 , 7.81×10^5 周次。同时, 涂层微缺陷含量较少时涂层的失效模式主要以剥落失效为主; 涂层微缺陷含量较多、结合强度较差时主要以分层失效为主; 涂层内存在较大的孔隙可致使涂层的提早失效, 同时涂层表面磨损失效的概率增加。

关键词: 等离子喷涂; 微缺陷; 失效模式; 接触疲劳寿命; Weibull 分布

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)02-0072-05

Abstract: Three kinds of NiCrBSi alloy coatings with different micro-defect types were sprayed on 1045 steel. Rolling contact fatigue (RCF) life of the coating was investigated using a ball-on-disc tester and the map of Weibull distribution failure probability was plotted. SEM was adopted to observe the microstructure and fatigue trace of the coatings. In addition, the contact fatigue life and main failure mode of different coatings were compared and the failure mechanism was investigated as well. The results showed that micro-defects in the coating were mainly composed of micro-pores and micro-cracks. Contact fatigue life of the coating was in inverse proportion to the content of micro-defects. Contact fatigue life of coating were 7.77×10^5 , 8.99×10^5 , 7.81×10^5 cycle, with the porosity of the coatings 2.5%, 1.3% and 2.1%, respectively. It also can be seen that, when the content of micro-defects was low, the main failure mode of the coating was spalling failure while with the increasing of micro-defects and the decreasing of combined strength the main failure mode changed into the interfacial delimitation failure. The large pores existing in the coatings may result in the early failure of the coating, at the same time increase the wear failure probability.

Key words: plasma spraying; microdefect; failure mode; contact fatigue life; Weibull distribution

接触疲劳是指工件在交变接触压应力长期作用下, 接触表面局部区域产生小片或小块状剥落而使工件失效的现象^[1,2]。轴承、齿轮、轮轨等都是在长期交变的滑动或滚动接触应力作用下发生接触疲劳而失效的, 由于疲劳失效没有明显的征兆, 因此极大地威胁了

生产安全^[3,4]。研究表明, 热喷涂技术可以改善工件表面的综合性能, 可以有效提高工件的接触疲劳寿命^[5-7]。热喷涂涂层是由高温熔滴撞击基体或已形成的涂层表面, 之后经过扁平变形、冷却凝固而成的, 这一过程致使涂层内部不可避免地存在有微孔隙、微裂

纹等缺陷^[8,9]。这些微裂纹的数量和形态对涂层的接触疲劳寿命有何影响,国内外学者研究甚少。本工作旨在研究微缺陷对热喷涂涂层接触疲劳寿命及失效模式的影响。在接触疲劳实验基础上,建立了 Weibull 失效概率曲线图,比较了含有不同微缺陷涂层的接触疲劳寿命及主要的疲劳失效模式,为涂层的接触疲劳寿命预测提供了一条新思路。

1 涂层制备及表征和接触疲劳实验

1.1 涂层制备

采用超音速等离子喷涂设备制备样品涂层,喷涂材料为 NiCrBSi 合金粉末,成分(质量分数/% ,下同)为: C 0.79, Cr 15.8, B 3.07, Si 4.53, Fe 5, 余下为 Ni。基体选用调质 45 号钢圆环,内径、外径、高度分别为 30, 60, 25mm, 内、外孔处 45°倒角, 两端面及内孔均磨光处理。喷涂前用丙酮清洗基体表面, 然后喷砂处理以提高基体表面粗糙度和表面活性。根据需要, 在进行 NiCrBSi 材料的喷涂时, 通过改变功率的大小和送粉量的大小来制备含不同微缺陷的涂层——A[#], B[#] 和 C[#], 喷涂工艺参数见表 1。为防止基体过热, 每喷涂约 100μm 后, 暂停喷涂, 使用压缩空气对基体进行冷却, 喷涂过程重复进行 5 次。喷涂结束后, 涂层厚度约为 450~500μm。然后对涂层表面进行磨削处理, 处理后涂层厚度约为 350μm, 表面粗糙度约为 0.2μm。

表 1 喷涂工艺参数

Table 1 Plasma spraying parameter

Number of coating	A [#]	B [#]	C [#]
Spraying voltage/V	120	140	140
Spraying current/A	360	360	360
Argon gas flow/(m ³ · h ⁻¹)	3.6	3.6	3.6
Hydrogen gas flow/(m ³ · h ⁻¹)	0.25	0.25	0.25
Nitrogen gas flow/(m ³ · h ⁻¹)	0.6	0.6	0.6
Powder feed rate/(g · min ⁻¹)	35	35	45
Spraying distance/mm	120	120	120

1.2 涂层表征

图 1(a)~(c)分别为不同喷涂工艺条件下, 涂层 A[#], B[#], C[#] 的截面形貌。在喷涂功率较低, 送粉量适中的情况下得到 A[#] 涂层, 涂层层状结构明显, 孔隙率较高, 层状结构之间存有一定的微观裂纹。这主要是由于喷涂功率较低时涂层内存在大量的未熔和半熔颗粒, 这些颗粒在撞击基体发生扁平化时被反弹或被夹杂在涂层中所致。在喷涂功率和送粉量都适中的情况下得到 B[#] 涂层, 涂层无明显层状结构, 孔隙率和微观裂纹含量较低, 结构较为致密。图中可以发现一些

较大的孔隙这是由于空气的卷入形成的, 较小的孔隙是由于熔滴的飞溅形成的。在送粉量较高, 喷涂功率适中的情况下得到 C[#] 涂层, 涂层层状结构不明显, 无明显的微观裂纹, 但孔隙率较高, 并且孔隙尺寸较大, 这是由于单位时间粉末喷射较多, 一些粉末会发生团聚, 致使粉末颗粒变大, 在撞击基体发生扁平化时, 颗粒未熔化部分动量较大, 直接被反弹, 或被包裹到涂层中, 导致空气卷入严重, 形成较大的孔隙。

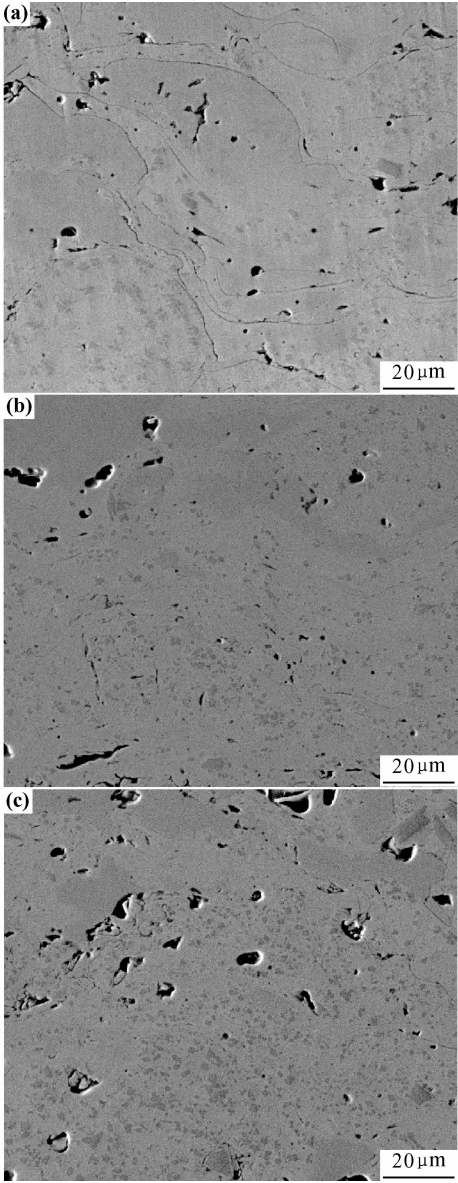


图 1 涂层截面微观形貌 (a) A[#]; (b) B[#]; (c) C[#]
Fig. 1 Cross-section microstructure of sample
(a) A[#]; (b) B[#]; (c) C[#]

涂层内的微孔隙和微裂纹是构成涂层微缺陷的主体, 喷涂功率和送粉量均对涂层的微缺陷有一定的影响。当喷涂功率较低时, 涂层内的微孔隙和微裂纹含量较高, 当送粉量较大时, 涂层内的微孔隙含量较高,

并且孔隙较大。基于涂层截面 1000 倍放大的 SEM 图像,采用灰度法^[10]测得涂层 A[#],B[#],C[#] 的孔隙率分别为 2.5%,1.3%,2.1%。

1.3 接触疲劳寿命实验

采用 YS-1 型球盘式接触疲劳实验机,对涂层的抗接触疲劳性能进行测试。配对接触副为 GCr15 钢轴承球,直径为 11mm,表面粗糙度为 0.012μm,硬度

为 HRC60。所有实验均在载荷为 100N,转速为 1500r/min 的油润滑条件下完成。

每种涂层进行 10 次平行实验,以减少实验随机性带来的影响。接触疲劳实验结果如表 2 所示,其中:表面磨损失效表示为:SA(Surface Abrasion),剥落失效表示为:SP(Spalling),分层失效表示为:ID(Interfacial Delamination)。

表 2 接触疲劳寿命和失效模式

Table 2 Results of contact fatigue lives and failure mode

Code	Fatigue life/10 ⁶ cycle	Failure mode	Code	Fatigue life/10 ⁶ cycle	Failure mode	Code	Fatigue life/10 ⁶ cycle	Failure mode
A1	0.5297	ID	B1	0.5880	SP	C1	0.4969	ID
A2	0.5536	ID	B2	0.5816	SA	C2	0.5431	SA
A3	0.6320	SA	B3	0.7651	SA	C3	0.5948	ID
A4	0.6383	ID	B4	0.8440	SP	C4	0.6573	SA
A5	0.6831	ID	B5	0.8599	SP	C5	0.6622	SA
A6	0.7645	SP	B6	0.8676	ID	C6	0.7274	ID
A7	0.7893	ID	B7	0.9026	SP	C7	0.7843	SA
A8	0.8363	ID	B8	0.9644	SP	C8	0.8698	SA
A9	0.8764	SP	B9	0.9658	SP	C9	0.9053	SP
A10	0.9246	SP	B10	1.0247	SP	C10	0.9647	SP

Note: SA: Surface abrasion; SP: Spalling; ID: Interfacial delamination

2 涂层接触疲劳寿命及失效模式

2.1 涂层接触疲劳寿命表征

采用两参数 Weibull 分布对涂层的接触疲劳寿命数据进行处理,其分布函数公式如(1)所示^[11]:

$$F(t) = 1 - \exp(-(t/\eta)^\beta) \tag{1}$$

式中: $F(t)$ 为 t 次循环的失效概率; β 是形状参数,即失效概率曲线的斜率; η 是位置参数,即涂层接触疲劳的特征寿命。

采用极大似然估计法来估计两个参数的值,如式(2)和(3)所示^[12]:

$$\sum_{i=1}^n [1/\beta + \ln(t_i) - \ln\eta - (t_i/\eta)^\beta \ln(t_i/\eta)] = 0 \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^n [-\beta/\eta + (\beta/\eta)(t_i/\eta)^\beta] = 0 \tag{3}$$

式中, n 为不同载荷条件下平行实验次数。

对上述两个公式进行计算,得到 A[#],B[#],C[#] 三种涂层的 β 值分别为 5.948,5.915 和 5.118, η 值分别为 7.77×10^5 , 8.99×10^5 , 7.81×10^5 周次。

在此基础之上,根据公式(1)可以得到 A[#],B[#],C[#] 三种涂层接触疲劳寿命的双参数 Weibull 失效概率曲线,如图 2 所示,横坐标为循环周次,纵坐标为失效概率。可以发现,涂层内原始微缺陷的含量严重影响涂层的接触疲劳寿命。从图中可以看出 A[#] 和 C[#] 涂层的接触疲劳寿命明显低于 B[#] 涂层的疲劳寿命。 β

为 Weibull 曲线的斜率,作为形状参数的 β 不仅反映涂层的失效机理,而且表征了涂层疲劳寿命的分散程度。 β 值越小,表示寿命的分散程度越大;反之 β 值越大,表示寿命的分散程度越小,测量越准确^[13]。A[#],B[#],C[#] 三种涂层的 β 值分别为 5.948,5.915 和 5.118,总体差别不大,但 C[#] 涂层的 β 值略小,这反映了送粉量对涂层寿命的分散性影响较大。C[#] 涂层的 β 值小是由于该涂层内部孔隙多并且较大,但微观裂纹少造成的。在接触应力循环作用下,涂层内的孔隙周围形成应力集中,进而形成裂纹并扩展,形成失效,甚至在孔隙较大处直接形成失效点坑,导致涂层的失效,但涂层内部的微观裂纹少,有利于涂层的耐疲劳性能。

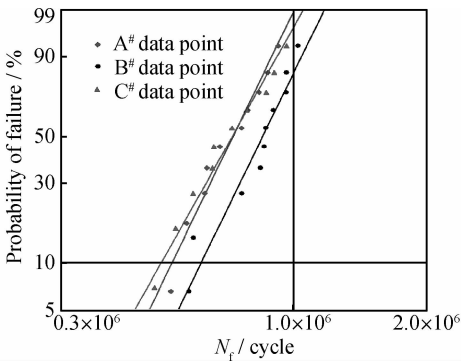


图 2 A[#],B[#],C[#] 涂层接触疲劳寿命的 Weibull 分布曲线
Fig. 2 Weibull comparison of RCF lives of A[#], B[#] and C[#] coating

C[#] 涂层的疲劳寿命与 B[#] 涂层相比呈现了两级化趋势,即一部分涂层试样寿命很低,另一部分试样寿命较高,这种两极化的趋势不仅增加了疲劳寿命的预测难度,而且使得工件在工程应用中存在了极高的安全隐患。

2.2 涂层的失效模式

涂层的失效模式主要包括表面磨损、剥落失效和分层失效三种。

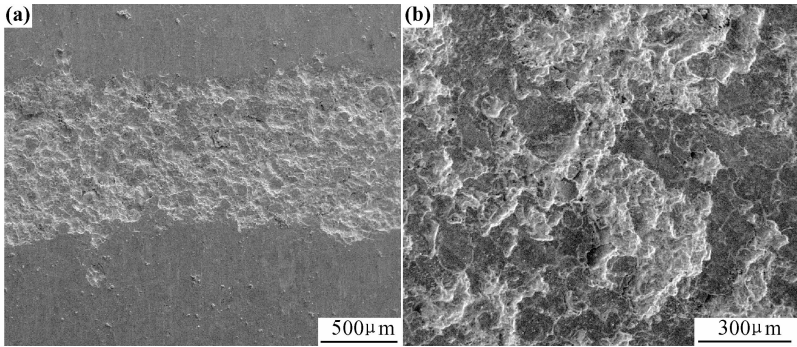


图 3 表面磨损失效形貌
Fig. 3 SEM micrographs showing morphology of abrasion

2.2.2 剥落失效

剥落失效是一种典型的涂层疲劳失效形式^[15],如图 4 所示,表现为涂层磨痕轨迹范围内出现圆形或椭圆形

2.2.1 表面磨损

表面磨损是一种常见的涂层接触疲劳失效形式之一^[14],如图 3 所示,表现为涂层磨痕轨迹范围内出现涂层麻点式脱落。其显著特点是涂层表面出现大量的麻坑,麻坑较浅并相互搭接连通,周边存在沿着磨痕轨迹方向的裂纹,随着接触疲劳时间的延长,这种失效形式很可能演变成剥落失效甚至是分层失效。

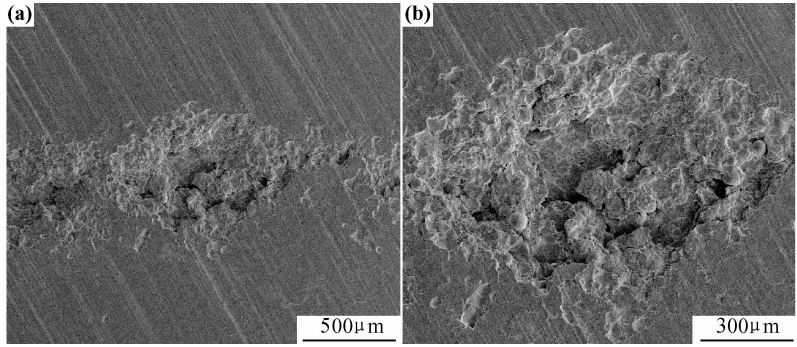


图 4 剥落失效形貌
Fig. 4 SEM micrographs showing morphology of spalling

圆形的剥落坑。其显著特点是剥落坑的尺寸较大,直径接近磨痕轨迹的宽度,剥落坑中心深度较深,周围呈阶梯片层状,这种台阶结构致使剥落坑深度由里到外

逐渐变浅。

2.2.3 分层失效

分层失效也是一种典型的涂层疲劳失效形式^[16],如图 5 所示,表现为磨痕轨迹范围内涂层整体脱落,露出基体表面,其显著特点是脱落宽度一般大于磨痕宽度,且脱落处存在有陡峭的边缘。可以看到,分层失效是最为严重的失效形式。

定量的微孔隙等缺陷造成的;C[#] 涂层的失效模式较为分散,表面磨损失效、剥落和分层失效的概率均等,涂层中所含孔隙较多并且孔隙的尺寸较大是导致涂层表面磨损失效的主要原因。

3 结论

(1)热喷涂涂层中的微缺陷主要由微孔隙和微裂纹等构成。喷涂功率和送粉量对涂层的微缺陷有一定的影响,当喷涂功率较低时,涂层内的微孔隙和微裂纹含量较高,层状结构明显;当送粉量较大时,涂层内的微孔隙含量较高,并且孔隙的尺寸较大,但微裂纹含量

疲劳实验结果表明,A[#] 涂层的主要失效模式为分层失效,涂层中未熔颗粒、微孔隙、微裂纹等缺陷较多导致涂层之间及涂层和基体之间的结合强度不足是造成该失效模式的主要原因;B[#] 涂层的主要失效模式为剥落失效,这主要是由于涂层表层及亚表层含有的一

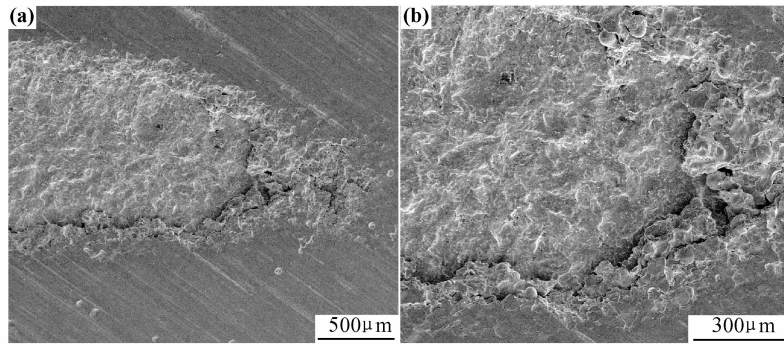


图 5 分层失效形貌

Fig. 5 SEM micrographs showing morphology of interfacial delamination

较少,层状结构不明显。

(2)采用球盘式接触疲劳实验机对三种含有不同微缺陷的涂层进行接触疲劳实验,建立了疲劳寿命的 Weibull 概率曲线图。结果表明,涂层内的原始微缺陷对涂层的疲劳寿命有着较大的影响,A[#],B[#],C[#] 三种涂层的孔隙率为 2.5%,1.3% 和 2.1%,对应的接触疲劳寿命分别为 7.77×10^5 , 8.99×10^5 , 7.81×10^5 周次。可见涂层的接触疲劳寿命与涂层内微缺陷的含量成反比关系。

(3)A[#],B[#],C[#] 三种涂层疲劳寿命的 Weibull 概率曲线图的 β 值分别为 5.948,5.915 和 5.118。C[#] 涂层的 β 值略小,表明送粉量是影响 β 值的主要因素,即送粉量对涂层寿命的分散性影响最大。

(4)涂层内微缺陷的数量和形式对涂层的疲劳失效模式有一定的影响。涂层微缺陷含量较少时主要以剥落失效为主;涂层微缺陷含量较多、结合强度较差时主要以分层失效为主;涂层孔隙较大时提高了涂层表面磨损失效的概率。

参考文献

- [1] 徐滨士,朱绍华.表面工程的理论与技术[M].2版.北京:国防工业出版社,2010.
- [2] STEWART S, AHMED R, ITSUKAICHI T. Contact fatigue failure evaluation of post-treated WC-NiCrBSi functionally graded thermal spray coatings[J]. Wear, 2004, 257(9-10): 962-983.
- [3] 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.
- [4] 束德林.工程材料力学性能[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [5] STEWART S, AHMED R. Rolling contact fatigue of surface coatings-A review[J]. Wear, 2002, 253(11-12): 1132-1144.
- [6] SARIKAYA O. Effect of some parameters on micro-structure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 190(2-3): 388-393.
- [7] 李长久,徐滨士.中国材料工程大典(16卷)——材料表面工程(上)

[M].北京:化学工业出版社,2006.

- [8] 吴子健.热喷涂技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [9] IWASZKO J. Surface remelting treatment of plasma-sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3 + 13 \text{ wt}\% \text{ TiO}_2$ coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 3443-3451.
- [10] ZHANG X C, XU B S, XUAN F Z, et al. Statistical analyses of porosity variations in plasma-sprayed Ni-based coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 467(1-2): 501-508.
- [11] CHEONG Y S, REYNOLDS G K, SALMAN A D, et al. Modelling fragment size distribution using two-parameter Weibull equation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 74(Suppl):227-237.
- [12] SMAIL M, FAHIM A. Exploring generalized probability weighted moments, generalized moments and maximum likelihood estimating methods in two-parameter Weibull model[J]. Journal of Hydrology, 2004, 285(1-4):62-75.
- [13] ZHANG X C, XU B S, XUAN F Z, et al. Rolling contact fatigue behavior of plasma-sprayed CrC-NiCr cermet coatings[J]. Wear, 2008, 265(11-12): 1875-1883.
- [14] PIAO Z Y, XU B S, WANG H D, et al. Influence of undercoating on rolling contact fatigue performance of Fe-based coating[J]. Tribology International, 2010, 43(1-2): 252-258.
- [15] 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.
- [16] ZHANG X C, XU B S, XUAN F Z, et al. Failure mode and fatigue mechanism of laser-remelted plasma-sprayed Ni alloy coatings in rolling contact[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(10): 3119-3127.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875075,50975285);国家杰出青年科学基金(51125023);国家973计划(2011CB 013405)

收稿日期:2011-02-15;修订日期:2011-11-21

作者简介:王韶云(1984—),男,硕士研究生,主要从事涂层接触疲劳寿命预测等方面研究,联系地址:天津市红桥区河北工业大学南院材料加工楼(300130),E-mail:wangshaoyun@hotmail.com

通讯作者:李国禄(1966—),男,教授,主要从事表面工程等方面研究,联系地址:天津市红桥区河北工业大学南院材料加工楼(300130),E-mail:liguolu@hebut.edu.cn