表面失效及防护

基体表面异质材料滚动接触疲劳性能与失效机理的研究进展

林丽[1]，李国禄[1]，王海斗[2]，康嘉杰[3]

（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 装备再制造技术国家重点实验室，北京 100072；
3. 中国地质大学（北京）工程技术学院，北京 100083）

摘　要：滚动接触疲劳性能是评价膜层性能的重要指标之一。影响零件滚动接触疲劳性能的因素主要分为膜层自身结构完整性和服役条件两大类。膜层自身结构完整性又受制于涂覆工艺、材料体系、后处理方式等因素。在服役工况确定的情况下，膜层自身结构完整性对零件的接触疲劳性能起决定性的作用。不同的涂覆工艺、材料体系、后处理方式对零件的滚动接触疲劳性能及失效机理的影响不尽相同。本文综述了涂覆工艺、材料体系、后处理方式对基体表面异质材料滚动接触疲劳性能与失效机理的影响，发现对滚动疲劳失效机理也存在作用。最后，总结了目前关于膜层滚动接触疲劳研究中存在的问题，探讨了解决问题的方法，以期为基体表面膜层的接触疲劳寿命预测奠定良好的基础。

关键词：滚动接触疲劳；涂覆工艺；材料体系；后处理工艺

中图分类号：TG174；O346.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-3660(2015)05-0111-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.05.021

Investigation of RCF Properties and Failure Mechanism of Heterogeneous Materials Covered on the Substrate: A Review

LIN Li[1], *LI Guo-lu*[1], *WANG Hai-dou*[2], *KANG Jia-jie*[3]

(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;
3. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The rolling contact fatigue performance is one of the important indexes of evaluating the membrane layer perform-

收稿日期：2014-12-01；**修订日期：**2015-02-01

Received：2014-12-01；**Revised**：2015-02-01

基金项目：国家自然科学基金(51275151)；国家 973 计划(2011CB013405)；国家杰出青年科学基金(51125023)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51275151), 973 Project (2011CB013405) and Distinguished Young Scholars of NSFC (51125023)

作者简介：林丽(1991—)，女，硕士研究生，主要从事表面工程研究。

Biography: LIN Li(1991—), Female, Master graduate student, Research focus: surface engineering.

通讯作者：李国禄(1966—)，男，博士，教授，主要从事表面工程和摩擦学研究。

Corresponding author: LI Guo-lu(1966—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface engineering and tribology.

ance. The factors affecting the rolling contact fatigue performance of parts are mainly divided into the structural integrity of the membrane layer itself and the service conditions. The structural integrity of the layer itself is subjected to the factors of diverse coating process, material system and post-processing method, and so on. When the service condition is fixed, the structural integrity of the layer itself plays a decisive role in contact fatigue performance. Diverse coating process, material system and post-processing method have different influence on the rolling contact fatigue performance and failure mechanism of the parts. The influences of the coating process, material system and post-processing method on the rolling contact fatigue performance of heterogeneous material on the substrate surface were summarized in this paper. It could be found that the factors of coating process, material system, post-processing mode also had an effect on the rolling fatigue failure mechanisms. Finally, the existing problems of current research about the rolling contact fatigue of membrane layer were summarized, as well as the solve methods, in order to build good foundation for predicting contact fatigue life of substrate surface membrane layer.

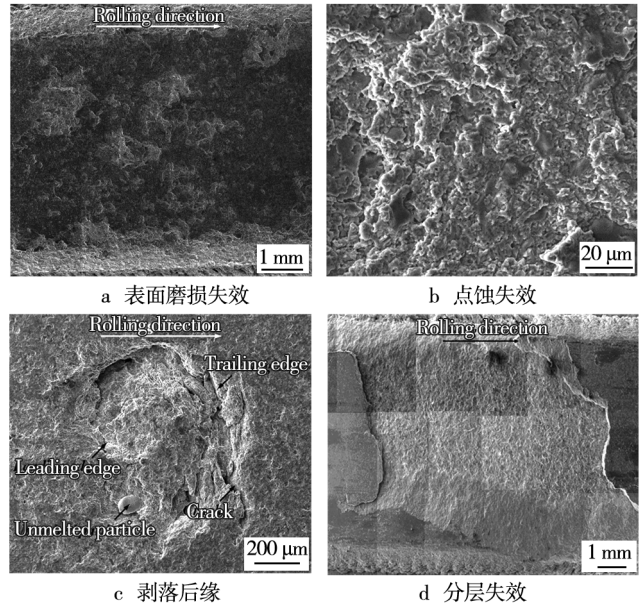
KEY WORDS: rolling contact fatigue; coating process; material system; post-processing method

疲劳、腐蚀和磨损是工程构件和机械零件最主要的破坏形式[1],疲劳破坏往往因其低应力、无宏观变化等特征,造成重大损失,甚至导致灾难性的事故[2—3]。零件在交变循环应力作用下,接触表面或次表面易产生麻点、浅层或深层剥落,导致零件的接触疲劳失效[4—5],所以提高材料的表面性能,对于预防和减缓表面失效意义重大。表面工程技术,即通过在基材表面制备一层薄膜或涂层,或通过表面改性等技术手段赋予材料特殊的性能[6—8],显著提高了零件的使用性能。研究表明,热喷涂、电镀、电刷镀、气相沉积等手段均能有效提升零件接触区域内的抗疲劳磨损性能,延长其使用寿命,降低制造成本,拓宽基材的使用范围[9—12]。

随着表面涂覆技术的不断发展和应用,研究人员围绕材料接触疲劳性能范畴的失效行为和失效机理对膜层(包括热喷涂层、镀层、薄膜等)展开了大量实验探究。但是,由于膜层成型过程的不确定性和与基体结合机理的复杂性,其寿命预测一直以来是一个比较棘手的难题。近年来,有学者开始对基体表面异质材料滚动接触疲劳性能和失效机理进行研究,并且取得了一系列成果。本文重点归纳基体表面涂覆工艺、材料体系以及后处理工艺对膜层滚动接触疲劳性能与失效机理的影响,分析目前关于膜层滚动接触疲劳研究存在的问题,探讨解决问题的方案,以期为再制造表面覆层的接触疲劳寿命预测提供一定的理论支持和技术指导。

1 涂覆工艺对滚动接触疲劳性能和失效机理的影响

表面涂覆是在基质表面形成一种膜层,以改善材料表面性能的技术[13]。目前,最常用的表面涂覆技术包括热喷涂、气相沉积、熔覆、化学沉积、堆焊等[12]。采用不同涂覆工艺制备的膜层,内部组织结构和应力分布状态不尽相同,导致其滚动接触疲劳失效形式多种多样,主要有:表面磨损、点蚀、剥落、分层[14—16],形貌如图 1 所示。研究证实[8],不同的涂覆工艺是导致膜层疲劳寿命和失效机制存在差别的一个主要原因。



a 表面磨损失效 b 点蚀失效

c 剥落后缘 d 分层失效

图 1 涂层的 4 种失效形式[16]

Fig. 1 The four failure modes of the coating[16]: a) surface failure; b) patting failure; c) spalling failure; d) delamination failure

Nieminen 等[17]采用两轮试验机对普通等离子喷涂(APS)和超音速火焰喷涂(HVOF)技术制备的 WC-Co 涂层进行了滚动接触疲劳性能研究。结果发现,HVOF 技术制备的 WC-Co 膜层具有较高的抗接触疲劳性能。Sheng 等[18]通过研究也证实了涂层微观结构致密度在很大程度上决定着涂层耐接触疲劳性能,

致密度越高,涂层的接触疲劳性能越优良。

在对 WC-Co 涂层的另一项研究中发现,采用超音速等离子喷涂(SPS)制备的涂层组织均匀致密、粒子间的界面明显,涂层质量、结合强度明显高于普通等离子喷涂层,综合性能优良[19]。这与许多研究结果相一致[20—22],分析认为,超音速等离子喷涂粒子速度快,粒子在射流中停留的时间缩短,熔融或半熔融粒子撞击基体时的动量变大且能量转换效率高,熔滴铺展充分,增加了涂层的沉积效率,从而提高了涂层的内聚强度、致密性和基体的结合强度,降低了孔隙率,使得零件的疲劳性能和服役寿命大幅度提升。

综上所述,相比于 APS,SPS 和 HVOF 都是通过大幅度提高喷涂粒子的速度来获得高质量的涂层,以达到增强零件的滚动接触疲劳性能的目的[23—24]。王海军等[23]通过实验得出,SPS 和 HVOF 制得的 WC-Co 涂层与粉末的相结构类似,都没有明显的失碳、氧化现象。但相对而言,SPS 制得的涂层孔隙率低于 HVOF,结合强度、表面和截面的显微硬度略高于 HVOF,SPS 制备的 WC-Co 涂层综合性能优良[24]。分析认为, SPS 射流参数调节范围宽,射流温度比 HVOF 高,WC-Co 粉末熔融状态好,粒子平铺效果较为理想。

近年来,与热喷涂层相媲美的 DLC,TiN 薄膜因其高硬度、高耐磨性在机械、电子、化学、军事和航空航天等领域得到了广泛的应用[25—26]。目前,制备 TiN,DLC 薄膜的工艺有化学气相沉积、物理气相沉积、等离子体浸没离子注入与沉积[27—29]等。制备工艺不同,得到的薄膜结构和滚动接触疲劳寿命存在差别,见表 1。

表 1　不同涂覆工艺下的膜层服役寿命

Tab. 1 The service life of membrane layer with different coating processes

材料	涂覆工艺	接触方式	循环周次/($\times10^6$)
TiN	PVD	点接触	10 ~ 33
	PIIID	点接触	164
DLC	PVD	点接触	10
	PIIID	点接触	100

涂覆工艺除影响膜层的接触疲劳性能外,还影响其滚动疲劳失效机制。以热喷涂层为例,涂层成型过程中,内部会产生微孔隙、微裂纹等微观缺陷,这些微观缺陷在持续的循环应力下将变成疲劳裂纹源[30],相比于 APS,SPS 和 HVOF 工艺制备的涂层减少了孔隙率和微裂纹的产生,降低了裂纹源存在的概率,从而使得涂层获得了优异的微观结构,提升了涂层的滚动接触疲劳性能,有效避免了界面分层失效的发生[31]。

对零件而言,先进的涂覆工艺在一定程度上会极大地提高零件的服役寿命,但在实际的生产过程中,需要综合考虑基材的属性,原始表面的状态,生产成本以及现场施工条件等因素,选择合适的涂覆工艺,将生产效益最大化。

2　不同材料体系对滚动接触疲劳性能和失效机理的影响

在各种新型、优质涂覆工艺不断涌现和飞速发展的情况下,膜层材料已成为制约涂覆技术应用和发展的瓶颈。涂覆工艺不同,材料本身的属性差异以及膜层中微观缺陷的存在,都极大影响了膜层的抗滚动接触疲劳性能,导致膜层多种疲劳失效模式和错综复杂的失效机理,使其接触疲劳寿命的分散程度增大[32—33]。

Tobe 等[34]采用两轮测试试验机对两种陶瓷涂层和一种金属涂层的滚动接触疲劳性能进行了比较,研究发现,金属涂层比陶瓷涂层具有更高的抗接触疲劳性能。这主要是由于接触疲劳实验后,金属涂层内部的残余压应力明显高于陶瓷涂层作用的结果。在随后的研究中,Kuroda 等[35]用曲率法分析了这一现象的内在原因:热喷涂过程中,随着基材温度的升高,陶瓷、金属涂层的淬火应力均随之增加;当基材温度再升高时,由于材料自身的蠕变和塑性屈服,金属涂层的淬火应力开始下降,陶瓷涂层未出现下降的趋势[35]。热喷涂层中淬火应力始终是拉应力[36],拉应力的产生导致了涂层硬度的变化,拉应力越大,涂层的硬度越低,在一定程度上使得涂层的抗滚动接触疲劳性能降低[37],所以金属涂层比陶瓷涂层具有更高的抗接触疲劳性能。

Ahmed 等[38]使用四轮试验机比较了 WC-Co 金属陶瓷涂层和 Al_2O_3 纯陶瓷涂层抗接触疲劳性能。实验结果表明,金属陶瓷涂层的滚动接触疲劳性能优于陶瓷涂层。RCF 实验测试后,陶瓷涂层表现为界面分层失效,金属陶瓷涂层为层内分层失效。分析认为,陶瓷涂层的界面结合强度低于金属涂层,所以在外加应力作用下,陶瓷涂层易出现界面分层失效,金属陶瓷涂层表现为层内分层失效。Piao 等[39]证实结合强度高的涂层拥有更高的接触疲劳寿命。

一般而言,陶瓷涂层耐疲劳性能较差,通常为 10^4

次循环,合金涂层耐滚动接触疲劳性能较好,通常为 10^6 转,而金属陶瓷涂层兼具金属的高韧性以及陶瓷高硬度等的特点,滚动接触疲劳寿命通常为 10^5 转[40—42]。另外,相比于合金、金属陶瓷材料,陶瓷材料与基体的导热系数、热膨胀系数、弹性模量等参量差别较大,使得陶瓷涂层在界面处易产生应力集中,导致开裂或微损伤,在外加载荷的作用下,发生界面的分层失效[43]。

对于镀层、薄膜类材料而言,同种制备工艺下的不同材料体系的滚动接触疲劳性能也不尽相同。董世运等[44]利用电刷镀技术在 30CrMnSi 基体上制得了纯镍镀层和 n-Al_2O_3/Ni 纳米颗粒复合电刷镀层。在 JP-52 接触疲劳试验机上进行测试,结果表明,在交变应力作用过程中,与纯镍镀层相比,n-Al_2O_3/Ni 复合镀层在镀态下的接触疲劳寿命超过 10^6 周次,明显高于纯镍镀层。分析认为,纯镍镀层硬度低,易萌生早期疲劳裂纹,寿命低。纳米复合镀层起到了阻碍镀层亚表层晶粒中位错滑移的作用,从而提高了复合镀层的抗塑性变形能力,延缓其疲劳裂纹的萌生和扩展,增加了复合镀层的接触疲劳寿命。

刘洪喜等[26,45]采用等离子体浸没注入与沉积(PIII&D)技术在 AISI52100 轴承钢表面合成了 Ti-C 薄膜和类金刚石薄膜(DLC 薄膜),在 Hertz 接触应力为 5.10 GPa,90% 置信区间条件下,DLC 薄膜试样的最大滚动疲劳寿命参数 L_{10},L_{50},特征寿命 L_a 和平均寿命 L 比 Ti-C 薄膜分别延长 2.4,1.5,1.2,1.3 倍。

各国学者对不同材料体系膜层的滚动接触疲劳失效机制的研究取得了一定的成功。但由于膜层的滚动接触疲劳性能和其失效机理受制于膜层和基材的整体性能[46],对不同材料体系的膜层而言,其失效机制不能一概而论,还需要进一步系统的研究。

3 后处理工艺对滚动接触疲劳性能和失效机理的影响

迄今为止,国内外已经有很多研究人员将后处理工艺成功的应用到改善膜层微观结构和提高膜层服役性能上来。火焰重熔、激光重熔、真空炉加热及热等静压技术都是后处理工艺的典型代表。Mateos J 等[47]用普通等离子喷涂技术在 AISI 1043 钢辊上制备涂层,经激光重熔处理后,涂层的微观组织变得均匀,孔隙率由 9.2% 几乎降低到 0;显微硬度从重熔前的 561HV 增加到了 655HV,提高了 17%。Junji Morimoto 等[48]也证实涂层重熔处理后显微硬度明显增加。Zhang[49],Stewart[50—51]等通过激光重熔和热等静压工艺对涂层进行处理,涂层接触疲劳寿命大幅度提升。一些学者也探究了经后处理的覆层的滚动接触疲劳性能和失效机制。

王韶云等[52]在 YS-1 型滚动接触疲劳试验机上对重熔处理后的 NiCrBSi 涂层进行了滚动接触疲劳实验,比较了重熔处理前后涂层的主要疲劳失效模式,得出了接触疲劳寿命演变规律。重熔处理后涂层的滚动接触疲劳寿命明显高于重熔处理前,超过了 1.0×10^6 周次,如图 2 和图 3 所示。经 SEM 观察分析,重熔前涂层大面积剥落,属分层失效;重熔处理后,失效形式轻微,表现为剥落失效。可见,重熔处理能使涂层致密度和涂层与基体的结合强度大幅度提

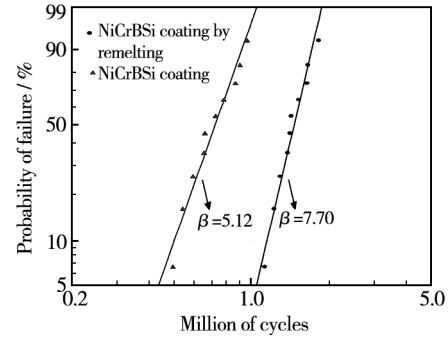
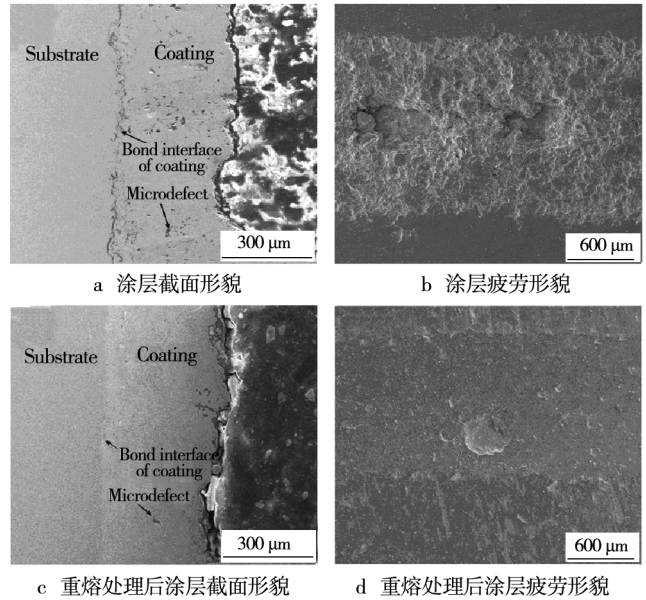


图 2 涂层接触疲劳寿命的 Weibull 失效概率[52]

Fig. 2 P-N curves of rolling contact fatigue (RCF) of the coatings[52]



a 涂层截面形貌 b 涂层疲劳形貌

c 重熔处理后涂层截面形貌 d 重熔处理后涂层疲劳形貌

图 3 NiCrBSi 涂层截面与疲劳形貌[52]

Fig. 3 Cross-section and fatigue microstructure of NiCrBSi[53]: a) Cross-section microstructure; b) fatigue microstructure; c) cross-section microstructure after remelting treatment; d) fatigue microstructure after remelting treatment

升,涂层的接触疲劳寿命显著提高,涂层寿命的分散度程度降低,并且使涂层的失效模式由分层失效转变为剥落失效。

张晓东等[53]采用活化屏等离子体氮化处理技术对 Fe314 激光熔覆层进行后处理。实验结果表明,经过后处理的 Fe314 覆层表面硬度由原来的 540HV 提高到了 927HV。在 760 MPa 接触应力下,Fe314 覆层的滚动接触疲劳寿命由处理前的 2.42×10^5 提高到了 4.94×10^5, Fe314 的抗疲劳接触寿命得到明显提升。活化屏等离子体氮化处理前,Fe314 覆层失效模式以点蚀和剥落为主;氮化处理后,覆层表面只发生轻微的点蚀失效。分析认为一方面可能是等离子注入所产生的高损伤缺陷,阻止了位错移动,提高了材料的承载能力,同时也降低了裂纹的成核机率;另一方面,氮化处理后,Fe314 覆层表面形成了残余压应力,有效的阻止了表面裂纹的萌生和扩展。

Stewart 和 Ahmed 等[41]系统地研究了热等静压后处理工艺及其温度参数变化对 WC-12% Co 涂层滚动接触疲劳性能和失效机理的影响。结果表明:经热等静压后处理的涂层抗接触疲劳性能明显提升,随着后处理温度的增加,涂层的循环应力周次由 2.7×10^7 提升至 7.0×10^7,且涂层间的剥落程度也变得很轻微,甚至到 7.0×10^7 时还未发生失效。分析原因认为,随着后处理温度的升高,涂层结构更为致密,表面的显微裂纹减少,层间的孔隙度消失,并且原来的球状气孔转变成了不足 1 μm 的微孔。另外,在高温高压作用下界面处晶体层状结构消失,柱状晶生长并伴随再结晶现象的发生,从而提高了基体与涂层的界面结合强度。这两方面的综合作用提高了涂层的滚动接触疲劳性能,改变了涂层的失效机制。

综上所述,无论重熔、表面渗氮、热等静压还是其他后处理工艺都是通过改善覆层组织结构、减少覆层微观缺陷、增强覆层与基体的结合强度,来提高覆层的滚动接触疲劳性能和使用寿命[54—55]。针对不同的材料体系,同一种后处理工艺参数的选择是不尽相同的,并且零件服役环境往往是复杂多变的,因此后处理工艺参数的选取以及其对覆层接触疲劳寿命分散程度的影响机制尚需进一步的探究。

4　存在问题及展望

各国学者对表面膜层的接触疲劳性能及失效机理进行了研究,取得了一定的进展,但总体上对膜层这种多孔类、多缺陷结构的接触疲劳研究仍处于初级阶段,还有一些问题亟待解决。

1) 在涂覆过程中,由于膜层的成型过程的复杂性和不确定性,做到准确预测膜层的服役寿命存在一定的困难,一般的实验仅对一个或几个试样进行实验研究,导致滚动接触疲劳试验的结果往往有很大的分散性和随机性,所以在外加条件相同的情况下,应当进行大量的试验,才能得到科学可靠的结果。另外,还缺少统一判别失效模式的标准。

2) 对于不同的材料体系,对应的后处理工艺不尽相同;对于相同的材料体系,不同的研究人员选择的后处理参数也存在一定的差异,这就对实验结果造成了一定的影响,应针对不同的材料体系,分门别类的统计出最优后处理工艺参数,建立庞大的数据库,以实现效益最大化。

3) 涂覆工艺、材料体系、后处理方式对覆层的滚动接触疲劳性能和失效机理有很大的影响。但除这些因素外,接触方式(点接触、线接触)、润滑条件、转速、接触应力等外因也会影响膜层的服役寿命。以往的研究往往忽视了膜层自身参数的变化或外界工况的变化,在以后的实验中,应综合考虑内外因的影响,以便更加精确的预测覆层的服役寿命。

参考文献

[1] BEHESHTI A, KHOMSARI M M. On the Prediction of Fatigue Crack Initiation in Rolling/Sliding Contacts with Provision for Loading Sequence Effect[J]. Tribology International, 2011, 44(1): 1620—1628.

[2] 李旭东,张仕朝,庞长涛. 材料滚动接触疲劳试验研究[J]. 航空精密制造技术,2011,47(3):5—7.
LI Xu-dong, ZHANG Shi-chao, PANG Chang-tao. Research on Testing of Materials Rolling Contact Fatigue[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2011, 47(3): 5—7.

[3] DONG S Y. Sliding Wear Behavior of the Supersonic Plasma Sprayed WC-Co Coating in Oil Containing Sand[J]. 2008(202): 3709—3714.

[4] 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.
XU Bin-shi. Foundation and Application of Remanufacturing Engineering [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005.

[5] 王海斗,康嘉杰,濮春欢,等. 表面涂层加速寿命试验技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2011.

WANG Hai-dou, KANG Jia-jie, PU Chun-huan, et al. Accelerated Life Test on Coatings[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011.

[6] 池来俊, 樊自拴, 肖旭东, 等. 热喷涂高温抗氧化耐磨损涂层的研究[J]. 表面技术, 2009, 38(2): 37—41.
CHI Lai-jun, FAN Zi-shuan, XIAO Xu-dong, et al. Study on Thermal Coating with High-temperature Oxidation Resistance and Wear Resistance[J]. Surface Technology, 2009, 38(2): 37—41.

[7] JURENKA J, ŠPANIEL M. Advanced FE Model for Simulation of Pitting Crack Growth[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 72: 218—225.

[8] 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.

[9] WANG H D, XU B S, LIU J J, et al. Characterization and Anti-friction on the Solid Lubrication MoS_2 Film Prepared by Chemical Reaction Technique[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2005(6): 535—539.

[10] MASAHIRO FI, AKIRA Y A. Rolling Contact Fatigue of Alumina Ceramics Sprayed on Steel Roller under Pure Rolling Contact Condition[J]. Tribology International, 2006(39): 856—862.

[11] ZHANG Z Y, LU X C, LUO J B. Tribological Properties of Rare Earth Oxide Added Cr_3C_2-NiCr Coatings[J]. Applied Surface Science, 2007(253): 4377—4385.

[12] 安家财. 等离子喷涂 40% ZrO_2-Al_2O_3-13% TiO_2 陶瓷涂层及其摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 4—7.
AN Jia-cai. Study on Plasma Sprayed 40% ZrO_2-Al_2O_3-13% TiO_2 Ceramic Coatings and Tribological Properties[J]. Surface Technology, 2011, 40(2): 4—7.

[13] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
XU Bin-shi, ZHU Shao-hua. Surface Engineering Theory and Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[14] MASAHIRO F I, AKIRA Y A. Rolling Contact Fatigue of Alumina Ceramics Sprayed on Steel Roller under Pure Rolling Contact Condition [J]. Tribology International, 2006, 39: 856—862.

[15] 王海斗. 等离子喷涂层接触疲劳失效模式及失效机理的研究[J]. 摩擦学学报. 2012, 32(3): 251—257.
WANG Hai-dou. Investigation of Contact Fatigue Failure Mode and Mechanism of Plasma Spraying Coating[J]. Tribology, 32(3): 251—257.

[16] KANG J J. Competing Failure Mechanism and Life Prediction of Plasma Sprayed Composite Ceramic Coating in Rolling-sliding Contact Condition [J]. Tribology International, 2014(73): 128—137.

[17] NIEMINEN R, VUORISTO P, NIEMI K, et al. Rolling Contact Fatigue Failure Mechanisms in Plasma and HVOF Sprayed WC-Co Coatings[J]. Wear, 1997(212): 66—77.

[18] SHENG X Y, YU S Y. Performance in Resistance to Surface Fatigue for Cr_3C_2-25% NiCr Coatings by Plasma Spray and CDS Spray[J]. Tribology Letters, 2004, 16(3): 173—180.

[19] 王海军. 超音速等离子与普通等离子喷涂 WC-Co 涂层性能的比较[C]//全国荷电粒子源、粒子束学术会议论文集, 2004.
WANG Hai-jun. Comparison of Properties of WC/Co Coating Prepared by SPS and APS[C]//The Charged Particle Source, Particle Beam Conference Proceedings, 2004.

[20] 鲍君峰. 三种热喷涂工艺制备 WC/Co 涂层性能比较[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2006(4): 46—49.
BAO Jun-feng. Comparison of Properties of WC/Co Coating Prepared by Three Kinds of Thermal Spraying Process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2006(4): 46—49.

[21] GIOVANNID G, LUCINAO P, GIOVANNI P, et al. Tribological Characterization of WC-Co Plasma Sprayed Coatings [J]. Journal of the American Cerican Society, 2009, 92 (5): 1118—1124.

[22] 韩志海. 超音速等离子喷涂制备细密柱晶结构热障涂层研究进展[J]. 热喷涂技术, 2011, 3(2): 1—15.
HAN Zhi-hai. Development of Thermal Barrier Coating with Fine Columnar Crystal Structure Fabricated by Supersonic Atmospheric Plasma Sprayed[J]. Thermal Spray Technology, 2011, 3(2): 1—15.

[23] 王海军. 超音速等离子与 HVOF 喷涂 WC-Co 涂层的冲蚀磨损性能研究[J]. 材料工程, 2005(4): 50—54.
WANG Hai-jun. Study on Erosion Wear of WC-Co Coatings Prepared by Supersonic Plasma Spray and HVOF Spray [J]. Journal of Materials Engineering, 2005(4): 50—54.

[24] 张显程. 面向再制造的等离子喷涂层结构完整性及寿命预测基础研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
ZHANG Xian-cheng. Basic Researches on the Structural Integrity and Life Prediction of Plasma-sprayed Coating-based Systems Aiming for Remanufacturing[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.

[25] 阎兴斌, 徐洮, 杨生荣, 等. 电化学沉积 DLC 薄膜的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(3): 169—173.
YAN Xing-bin, XU Tiao, YANG Sheng-rong, et al. Tribological Properties of Diamong-like Carbon Films by Electro-

chemical Deposition[J]. Tribology, 2003, 23(3): 169—173.

[26] 刘洪喜,王浪平,王小峰,等. TiC 薄膜对轴承钢表面滚动接触疲劳寿命和力学性能的影响[J]. 金属学报,2006,42(11):1197—1201.
LIU Hong-xi, WANG Lang-ping, WANG Xiao-feng, et al. Effects of TiC Films on the Rolling Contact Fatigue Life and Mechanical Properties of Bearing Steel[J]. Acta metallurgica Sinica,2006,42(11):1197—1201.

[27] MOTTE P,PROUST M,TORRES J,et al. TiN-CVD Process Optimization for Integration with Cu-CVD[J]. Microelectoonic Engineering,2000(50):369—374.

[28] CLONY K L. Chemical Vapour Deposition of Coatings[J]. Progress in Materials Science,2003(48):157—170.

[29] 刘洪喜,苏海青,蒋业华,等. 航空轴承表面合成 DLC 薄膜的结构特征和滚动接触疲劳物理模型[J]. 航空学报,2009,30(9):1669—1775.
LIU Hong-xi, SU Hai-qing, JIANG Ye-hua. Characteristics and Rolling Contact Fatigue Model of Diamond-like Carbon Films on Aerospace Bearing Surfaces[J]. Acta Aeronautica Etastronautica Sinica,2009,30(9):1669—1775.

[30] FAJDIGA G, GLODEZ S, KRAMAR J. Pitting Formation due to Surface and Subsurface Initiated Fatigue Crack Growth in Contacting Mechanical Elements[J]. Wear,2007(262):1217—1224.

[31] 朴钟宇,徐滨士,王海斗,等. 涂层厚度对喷涂层疲劳磨损寿命的影响[J]. 摩擦学学报,2010,30(5):448—452.
PIAO Zhong-yu, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Experimental Investigation of Influence of Thickness on Contact Fatigue Lifetime of Sprayed Coating[M]. Tribology, 2010, 30(5):448—452.

[32] 金国,徐滨士,王海斗,等. 电热爆炸喷涂 3Cr13 涂层的微观结构和微观力学性能[J]. 材料热处理学报,2006,27(1):71—74.
JIN Guo, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Microstructure and Micro-mechanical Properties of 3Cr13 Coating Sprayed Directionally by Electro-thermal Explosion[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2006,27(1):71—74.

[33] 胡传炘. 涂层技术原理及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2000.
HU Chuan-xin. The Principle and Application of Coating [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2000.

[34] TOBE S, KODAMA S, MISAWA H. Rolling Contact Behavior of Plasma Sprayed Coating on Aluminium Alloy[C]// Proceedings of the National Thermal Spray Conference, 1990.

[35] KURODA S, CLYNE T W. The Quenching Stress in Thermally Sprayed Coatings[J]. Thin Solid Films, 1991(200): 49—66.

[36] ZHANG X C, XU B S, WANG H D, et al. Thermo-mechanical Integrity of Coatings with Residual Stresses[J]. Fracture Mechanics and Applications, 2004(78): 225—240.

[37] SIMES T R, MELLOR S G, HILLS D A. A Note on the Influence of Residual Stress on Measured Hardness[J]. Journal of Strain Analysis, 1984, 19(2): 135—137.

[38] AHMED R, HADFIELD M. Rolling Contact Fatigue Performance of Detonation Gun Coated Elements[J]. Tribology International, 1997, 30(2): 129—137.

[39] 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.

[40] PIAO Z Y, XU B S, WANG H D, et al. Investigation of RCF Failure Prewarning of Fe-based Coating by Online Monitoring[J]. Tribology International, 2014(72): 156—160.

[41] AHMED R. Contact Fatigue Modes of HVOF Coatings[J]. Wear, 2002(253): 473—487.

[42] STEWART S, AHMED R. Contact Fatigue Failure Modes in Hot Isostatically Pressed WC-12% Co Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2003(172): 204—216.

[43] 吴臣武,黄晨光,陈光南. 局部热载荷诱导热障涂层界面分层断裂问题[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(1):49—54.
WU Chen-wu, HUANG Chen-guang, CHEN Guang-nan. Interface Delamination of the Thermal Barrier Coating Subjected to Local Heating[J]. Science China: Technology Science, 2011, 41(1): 49—54.

[44] 董世运,徐滨士,胡振峰. n-Al_2O_3/Ni 复合电刷镀层的接触疲劳行为[J]. 材料科学与工艺,2005,13(5):477—480.
DONG Shi-yun, XU Bin-shi, HU Zhen-feng. Contact Fatigue Behaviors of Brush Electroplated n-Al_2O_3/Ni Composite Coating[J]. Materials Science & Technology, 2005, 13(5): 477—480.

[45] 刘洪喜,蒋业华,周荣,等. 类金刚石薄膜对轴承钢表面机械性能和滚动接触疲劳寿命的影响[J]. 材料研究学报,2009,23(1):43—48.
LIU Hong-xi, JIANG Ye-hua, ZHOU Rong, et al. Effect of Diamond-like Carbon Films on the Steel Surface Mechanical Properties and Rolling Contact Fatigue Life[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2009, 23(1): 43—48.

[46] RINGSBERG J W, BERGKVIST A. On Propagation of Short Rolling Contact Fatigue Cracks[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2003, 26(10): 969—983.

(下转第 128 页)

劳研究[J]. 中国铁道科学,2014,35(4):80—87.
WU Na,ZHENG Jing. Investigation into Wheel-rail Contact Geometry Relationship and Wheel Wear Fatigue of High-speed Vehicle[J]. China Railway Science,2014,35(4):80—87.

[8] 肖乾,王成国,周新建,等. 不同摩擦系数条件下的轮轨滚动接触特性分析[J]. 中国铁道科学,2011,32(4):66—71.
XIAO Qian,WANG Cheng-guo,ZHOU Xin-jian,et al. Analysis on the Characteristics of Wheel/Rail Rolling Contact under Different Friction Coefficient[J]. China Railway Science,2011,32(4):66—71.

[9] AKAMA M. Development of Finite Element Model for Analysis of Rolling Contact Fatigue Cracks in Wheel/Rail Systems[J]. Quarterly Report of RTRL,2007,48(7):8—14.

[10] 胡军,赵运磊,陈珏. 基于 ANASYS 的轮轨滚动接触疲劳裂纹萌生研究[J]. 机械设计与制造,2013,(4):153—155.
HU Jun,ZHAO Yun-lei,CHEN Jue. Study on Fatigue Initiation for Wheel-rail Rolling Contact Based on ANSYS[J]. Machinery Design & Manufacture,2013,(4):153—155.

[11] 王文健,刘启跃. 轮轨滚动接触疲劳与磨损耦合关系及预防措施研究[J]. 中国铁道科学,2009,30(4):137—139.
WANG Wen-jian,LIU Qi-yue. Study on the Coupling Relationship between the Rolling Contact Fatigue and the Wear of Wheel-rail and Prevention Measures[J]. China Railway Science,2009,30(4):137—139.

[12] 孙效杰,周文祥. 踏面磨耗及其对轮轨接触几何关系的影响[J]. 铁道车辆,2010,48(7):1—4.
SUN Xiao-jie,ZHOU Wen-xiang. Tread Wear and Its Effect on Wheel-Rail Contact Geometry[J]. Rolling Stock,2010,48(7):1—4.

[13] 曹世豪,江晓禹,文良华. 轴重和摩擦力对轮轨接触疲劳的影响[J]. 表面技术,2013,42(6):10—14.
CAO Shi-hao,JIANG Xiao-yu,WEN Liang-hua. Influence of Axle load and Friction on the Fatigue of Wheel/Rail Contact [J]. Surface Technology,2013,42(6):10—14.

[14] LANGUEH A M G,BRUNEL J F,CHARKALUK E,et al. Effects of Sliding on Rolling Contact Fatigue of Railway Wheels[J]. Fatigue Fract Eng Mater Struct,2012,36(6):515—525.

[15] 马昌红,史生良,吴亚平. 轮轨接触应力的有限元分析[J]. 石家庄铁道学院学报,2006,19(3):32—35.
MA Chang-hong,SHI Sheng-liang,WU Ya-ping. The FEM Analysis of the Wheel-rail Contact Stress[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute,2006,19(3):32—35.

(上接第 117 页)

[47] MATEOS J,CUETOS J M,VIGANDE R,et al. Tribological Properties of Plasma Sprayed and Laser Remelted 75/25 Cr_3C_2/NiCr Coatings [J]. Tribology International, 2001 (34):345—351.

[48] JUNJI M,SASAK Y,EUKUHARA S I,et al. Surface Modification of Cr_3C_2-NiCr Cermet Coatings by Directdiode Laser [J]. Technical Note,2006(80):1400—1405.

[49] ZHANG X C,XU B S,XUAN F Z,et al. Rolling Contact Fatigue Mechanism of a Plasma-sprayed and Laser-remelted Ni Alloy Coating[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure,2009,32(2):84—96.

[50] STEWART S,AHMED R,ITUSKAICHI T. Contact Fatigue Failure Evaluation of Post-treated WC-NiCrBSi Functionally Graded Thermal Spray Coatings [J]. Wear, 2004 (257): 962—983.

[51] STEWART S,AHMED R,ITUSKAICHI T. Rolling Contact Fatigue of Post-treated WC-NiCrBSi Thermal Spray Coatings [J]. Surface Coating Technology,2005(190):171—189.

[52] 王韶云,李国禄,王海斗,等. 重熔处理对 NiCrBSi 涂层接触疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报,2011,32(11):135—139.
WANG Shao-yun,LI Guo-lu,WANG Hai-dou,et al. Influence of Remelting Treatment on Rolling Contact Fatigue Performance of NiCrBSi Coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2011,32(11):135—139.

[53] 张晓东,董世运,徐滨士. 激光熔覆和活化屏等离子体氮化复合涂层组织与接触疲劳性能[J]. 中国激光,2011,38(6):1—5.
ZHANG Xiao-dong, DONG Shi-yun, XU Bin-shi. Microstructure and Contact Fatigue Property of Laser Cladding and Active Screen Plasma Duplex Treated Coating[J]. Chinese Journal of Lasers,2011,38(6):1—5.

[54] 安树春. 热喷涂涂层的重熔后处理工艺研究进展[J]. 表面技术,2009,38(2):73—77.
AN Shu-chun. Progress of Post-remelting Technology for Hot Sprayed Coating [J]. Surface Technology, 2009, 38 (2): 73—77.

[550] GARRIDO M A. Influence of the Deposition Techniques on the Mechanical Properties and Microstructure of NiCrBSi Coatings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008(204):304—312.