

等离子喷涂层磨损/接触疲劳失效行为研究现状

许中林^{1,2}, 李国禄¹, 董天顺¹, 刘金海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 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072;

3. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 综述了国内外学者对等离子喷涂层磨损/接触疲劳失效行为研究的现状,指出单一地研究接触疲劳失效或摩擦磨损失效存在一定的局限性,滚动/滑动竞争性失效研究对工程实践具有持久性的指导作用,是未来等离子喷涂层磨损/接触疲劳失效行为研究的重要方向。

关键词: 等离子喷涂; 磨损失效; 接触疲劳失效; 滚动/滑动; 竞争性失效

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)02-0126-08

Research on Wear/Fatigue Failure Behavior of Plasma Spray Coating: a Review

XU Zhong-lin^{1,2}, LI Guo-lu¹, Dong Tian-shun¹, LIU Jin-hai¹, WANG Hai-dou², KANG Jia-jie³

(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: Nowadays, the wear/contact fatigue failure behavior research on plasma sprayed coating mainly focus on the following aspects: wear failure and contact fatigue failure. In this paper the achievements both at home and abroad were reviewed. Studies on only one of the failures (contact fatigue failure or wear friction failure) have their shortcomings, as pointed out in this paper. The research on rolling/sliding competition failure gives a persistent guide on engineering practice and is the orientation of fatigue/wear failure research in the future.

KEY WORDS: plasma spray; wear failure; contact fatigue failure; rolling/sliding; competing failure

等离子喷涂是以等离子弧为热源的热喷涂技术^[1-4],其火焰温度高(>10 000 ℃),可喷涂包括陶瓷在内的所有耐磨材料;粒子飞行速度快(200 ~ 600 m/s),可以获得结合强度高、孔隙率低的高质量涂层;气氛可控,可利用惰性或还原性气体作工作介质,

有效改善材料的氧化现象。该技术已被广泛应用于耐磨涂层的制备^[5-7]。目前可以通过等离子喷涂获得的耐磨涂层种类较多,主要包括金属涂层、陶瓷涂层以及金属陶瓷复合涂层,如 FeCrBSi, NiCrBSi, NiCr-Cr₃C₂, WC-Co, TiO₂, BN 等。但是涂层形成过程具有

收稿日期: 2013-11-29; 修订日期: 2013-12-20

Received: 2013-11-29; Revised: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(51275151);国家重点基础研究发展计划(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), the National Basic Research Program of China (973 Project, 2011CB013405), the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (51125023)

作者简介: 许中林(1989—),男,四川德阳人,硕士研究生,主要研究方向为表面工程。

Biography: XU Zhong-lin(1989—), Male, from Deyang, Sichuan, Master, Research focus: surface engineering.

复杂性与特殊性,喷涂层内部不可避免地存在微空隙、微裂纹等微观缺陷^[8-11]。在服役过程中,这些缺陷成为涂层失效的早期萌生源,影响失效模式和服役寿命。因此系统地研究等离子喷涂层的疲劳/磨损失效模式以及失效机理,对评估等离子喷涂修复零件的使用寿命及修复质量有着重要意义。

零部件的失效一般都是从表面开始,而零件表面失效模式多种多样,不同的工作环境下,零件表面的主要失效模式不同。常见的轴类、齿类、轮轨等长期承受交变载荷的作用,失效模式主要为接触疲劳失效,有时也会发生磨损失效^[12]。气缸内壁、柱塞等零部件长期受到其他零件的往复摩擦运动作用,其失效模式主要表现为磨损失效,分析其失效形式,也会发现分层、剥落等疲劳失效模式。实际工况条件下,虽然涂层最终失效表现为接触疲劳失效或摩擦磨损失效,但其失效模式往往是两种失效竞争的结果。

1 等离子喷涂层磨损失效行为

摩擦磨损是相互接触并做相对运动的物体由于机械、物理和化学等作用而造成的表面材料移位的现象,是零部件失效的重要形式之一^[13]。磨损本身非常复杂,存在着很多类型,而且随着材料、工况、摩擦表面性质的变化,磨损类型会发生改变,从而影响磨损失效特征以及失效机制。

1.1 材料类型及结构对磨损失效行为的影响机制

等离子喷涂技术可喷涂的材料种类广泛,包括高韧性的合金材料、高耐磨的陶瓷材料、综合性能好的金属陶瓷,还包括塑料材料以及由两种或多种材料混合而成的复合材料^[14-16]。不仅能喷涂微米级材料,也能喷涂纳米尺度下的纳米团聚材料。由于不同材料的结构和物理性质存在差异,其磨损失效行为不同,为此许多学者对不同类型和结构的喷涂涂层的耐磨性进行了探索^[7-10]。

1.1.1 材料结构

赵晓琴等人^[17]考察了纳米 WC-Co 涂层和常规 WC-Co 涂层的摩擦学性能,结果表明无论在水环境下,还是在干摩擦条件下,纳米 WC-Co 涂层的摩擦性能都较好。分析认为,这种差异是由于两种喷涂层的显微硬度不同引起的。纳米粉末由于其较大的比表面积,在喷涂过程中容易吸收热量,熔融状态较好,因此获得的纳米结构涂层微缺陷较少,硬度值高。但是

两种材料的磨损机制差异不大,主要是粘着磨损、剥落和磨粒磨损。

Tian 等人^[18-19]考察了等离子喷涂传统结构与纳米结构 $\text{Al}_2\text{O}_3/13\% \text{TiO}_2$ (AT13) 涂层在不同服役条件下的磨损失效行为。发现在不同条件下,两种结构的 AT13 失效机理均不相同,在三体磨损过程中,纳米结构涂层主要以微断裂失效为主,而传统涂层主要失效模式为层间断裂。在微动磨损过程中,微动裂纹在传统涂层中沿层片边界扩展,而在纳米结构中,其扩展方向是随机的。图 1 为等离子喷涂传统结构与纳米结构 AT13 涂层磨损失效表面的微观形貌^[19]。分析认为,纳米尺度的涂层具有更好耐磨性能的主要原因是没有层片状结构和无定形相以及硬度较高。

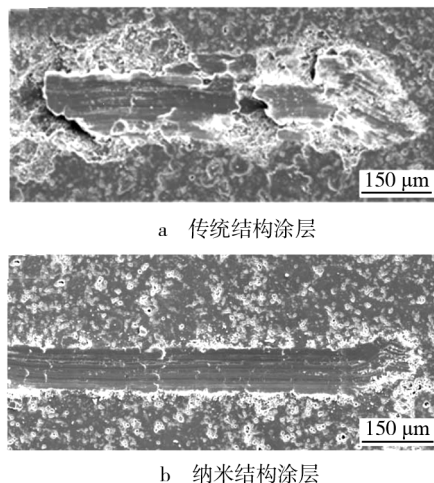


图1 等离子喷涂传统与纳米结构 AT13 涂层磨损失效表面的微观形貌

Fig.1 AT13 failure morphology of conventional coating and nanostructured coating

1.1.2 材料类型

TAO^[20]对比了 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 两种等离子喷涂陶瓷涂层与铜合金对磨时的摩擦性能,结果表明, Al_2O_3 的耐磨性能更好,两者的磨损失效形式也不同。分析认为,上述结果是由 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 两种材料性能不同导致的。 Al_2O_3 涂层有较好的散热性能,能有效地散发摩擦过程中产生的热量,避免了因摩擦热聚集产生的硬度下降。 Al_2O_3 的磨损失效形式主要表现为因沿摩擦方向的塑性变形而产生的微磨痕,而 Cr_2O_3 涂层主要为剥落失效。

1.2 服役条件对磨损失效机制的影响

获得不同服役条件下的高寿命涂层是涂层设计与制备的主要任务,也是材料保护与零件修复的目标

之一。研究不同条件下的涂层失效模式,对涂层的设计及制备有重要的指导意义。为此,许多学者展开了与涂层服役条件相关的耐磨性研究^[16,21-23]。

李晓亮等^[21]研究了 TiN/AlN 涂层在润滑条件下的摩擦磨损性能,结果表明,油润滑条件下,涂层磨损体积显著降低。由于润滑油的作用,在轻载的情况下摩擦副之间能形成一定厚度的油膜,涂层摩擦系数以及磨损体积都明显下降,其失效行为主要表现为疲劳失效;在重载条件下,油膜不能稳定形成,涂层以脆性剥落失效和磨粒磨损失效为主。

叶辉、安家财等^[22-23]研究了载荷和滑动速度对 AT13 涂层失效行为的影响,发现在低载荷和低滑动速度的条件下,涂层的失效以塑性变形为主,而在中速中载的条件下,磨损失效机制主要为轻微断裂和颗粒剥落;在高速高载条件下,主要磨损失效机制为涂层的断裂和剥落。载荷和滑动速度对 AT13 涂层在干摩擦条件下磨损率的影响如图 2 所示^[22]。

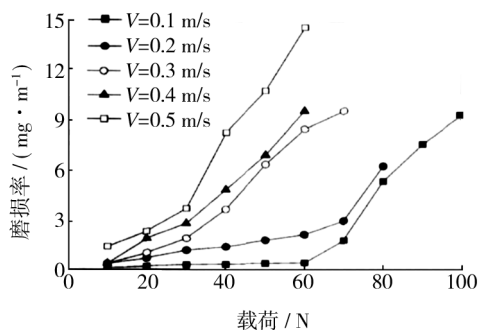


图2 载荷和滑动速度对 AT13 涂层磨损率的影响

Fig.2 Influence of load and sliding speed on the wear rate of AT13coating under dry sliding

Du^[16]通过向润滑油中添加不同尺寸的磨粒,研究了 WC-12wt.% Co 涂层的摩擦磨损失效行为,同时与相同条件下灰铸铁的摩擦磨损行为进行了对比。研究发现,随着润滑油中磨粒尺寸的增加,涂层、灰铸铁的摩擦系数和磨损体积都增加,但是涂层表现出更高的耐磨性。对比两种材料的磨损机制发现,涂层失效以微剪切失效为主,同时伴随着 WC 颗粒的脱落,而灰铸铁的失效以微剪切和塑性变形为主。分析认为,涂层较高的硬度以及微空隙的存在使得涂层对润滑油中的磨粒有更好的适应性。

Li 等^[24]考察了等离子喷涂和超音速火焰喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层在冲蚀条件下的摩擦磨损性能。发现 NiCr-Cr₃C₂ 涂层的冲蚀磨损失效主要表现为塑性变形和剥落。分析认为,在较高的应力作用下,涂层

容易在微缺陷处产生横向和纵向微裂纹,裂纹扩展相聚,导致涂层剥落。超音速火焰喷涂涂层由于具有致密的结构,孔隙率较低,微观裂纹较少,因此在相同冲蚀条件下具有更好的耐磨性。

1.3 小结

等离子喷涂层的磨损失效与喷涂材料和结构有关,同时也与服役工况有关。在相同磨损条件下,纳米材料涂层的耐磨性比传统材料好。同种材料在不同服役工况下的失效机制不同,载荷越低,润滑条件越好,涂层耐磨性就越高。对于磨损失效而言,涂层主要发生磨粒磨损、粘着磨损等典型的摩擦磨损失效形式,同时也伴随着剥落等接触疲劳失效。

2 等离子喷涂层的接触疲劳失效行为

零部件接触疲劳失效的主要原因是亚表层裂纹扩展与融合^[25-26],是旋转类零件的主要失效模式之一。涂层作为保护材料或修复零件的表层,是零部件接触疲劳失效的主要部位,其质量的好坏决定了零部件的疲劳寿命^[27-29]。接触疲劳失效不仅与零部件的工作条件相关,更与涂层的表面完整性有着密切的联系。

2.1 结构完整性对涂层接触疲劳失效行为的影响机制

表面完整性是指经过加工后的材料表面或近表面的力学和形状特性,通常包括表面硬度、残余应力、表面粗糙度等参数^[30-32]。对于涂层而言,表面完整性还包括涂层厚度和结合强度^[33]。

2.1.1 结合强度

涂层的结合强度包括涂层/基体的结合强度以及涂层的内聚强度,等离子喷涂层与基体的结合强度往往低于涂层的内聚强度,是影响涂层服役的重要指标^[34]。提高涂层结合强度的最常用方法是制备粘接底层,PIAO, MASAHIRO 等^[35-36]对比考察了有底涂层与无粘接底层的疲劳失效,发现有底涂层的寿命高于无底涂层。无底涂层的失效模式以快速严重的分层失效为主,而有底涂层主要发生表面磨损和剥落失效。

2.1.2 涂层厚度

PIAO, NAKAJIMA 等^[37-39]研究了涂层厚度与接触疲劳寿命之间的关系,结果表明,较薄涂层的失效

模式不定,即各种失效模式均有出现,但是出现分层失效的概率较大,而较厚涂层的失效模式主要为剥落和表面磨损。一定厚度范围内,随着厚度的增加,涂层寿命也随之增加。因此通过增加涂层的厚度来延长涂层的工作寿命,在一定范围内可行。但是随着厚度的增加,涂层的残余内应力也加大,涂层的失效模式随之发生变化,超过一定厚度时,寿命降低,因此不能为获取高寿命涂层,盲目增加涂层厚度。

2.1.3 涂层表面粗糙度

涂层表面粗糙度是指涂层工作状态下的接触表面的光滑程度,常用表面轮廓的算术平均偏差 Ra 和轮廓最大高度 Rz 等参数表征^[40],是评价涂层耐磨性、耐疲劳性、耐蚀性的指标之一。表面粗糙度在接触疲劳磨损过程中,影响着涂层表面的润滑状态^[41—43]。PIAO 等人考察了粗糙度对涂层寿命和失效模式的影响,图 3 为不同粗糙度的 Fe 基涂层接触疲劳寿命表征 Weibull 曲线^[43]。可以看出,粗糙度较高的涂层接触疲劳寿命较低,反之寿命较高。分析认为,在相同的润滑条件下,粗糙度较大时,由于涂层润滑不充分,表面微凸体相互挫伤,形成局部裂纹,裂纹扩展最终导致磨削后涂层中出现表面磨损、剥落等近表层失效,涂层寿命短;粗糙度较小时,涂层润滑条件良好,对磨削分离充分,表面未受到直接冲击,近表面未发生磨损和剥落现象,涂层的接触疲劳寿命提高,失效形式以分层失效为主。

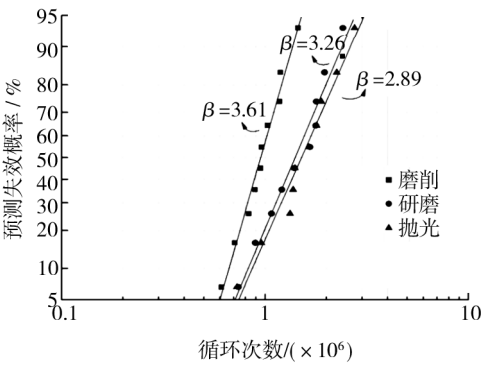


图 3 不同表面粗糙度涂层的接触疲劳寿命表征

Fig. 3 RCF lifetime characterization of coatings with different surface roughness

2.1.4 涂层微观缺陷

ZHANG、王韶云等^[44—46]研究了涂层微观缺陷对涂层接触疲劳寿命的影响,认为孔隙率越大的涂层,其接触疲劳寿命越短,反之越长。微观缺陷,如微孔、微裂纹以及未熔颗粒等较少时,涂层的接触疲劳主要

失效形式是剥落失效,而缺陷含量较多时以分层失效为主。分析认为,涂层微观缺陷越多,在涂层内部的应力分布越不均匀,缺陷处的应力集中,在外力作用下,微观缺陷处容易产生早期的裂纹,裂纹扩展到涂层表面,就导致涂层失效。

2.2 服役条件对涂层接触疲劳失效行为的影响机制

对于同一种材料制备的等离子喷涂层,其失效模式不仅与涂层的结构完整性相关,还与涂层的服役条件有着密切的关系。

2.2.1 接触应力

杨效田等^[47]研究了边界润滑条件下的等离子喷涂铝铜合金的摩擦特性,结果表明,涂层的摩擦系数随着负载的增加而减小,即涂层的摩擦性能与外载荷有关,载荷越大,其抗摩擦性越优越。载荷变化失效模式也随之发生变化。王海斗,PIAO 等^[48—49]利用 YS-1 滚动接触疲劳试验机对等离子喷涂层的接触疲劳失效模式及失效机理进行了研究,发现在较低接触应力作用下易产生点蚀失效,表现为在深度 20 ~ 30 μm 的表面出现大量的点蚀坑,且都在磨痕范围以内,失效形貌见图 4a;在较高接触应力作用下,涂层以剥落失效为主,表现为在磨痕区域出现不规则形状的剥落坑,其深度较点蚀坑深,其失效形貌见图 4b;在更高应力作用下,涂层主要发生界面失效和分层失效,失效区域面积大于接触范围,部分基体暴露,其失效

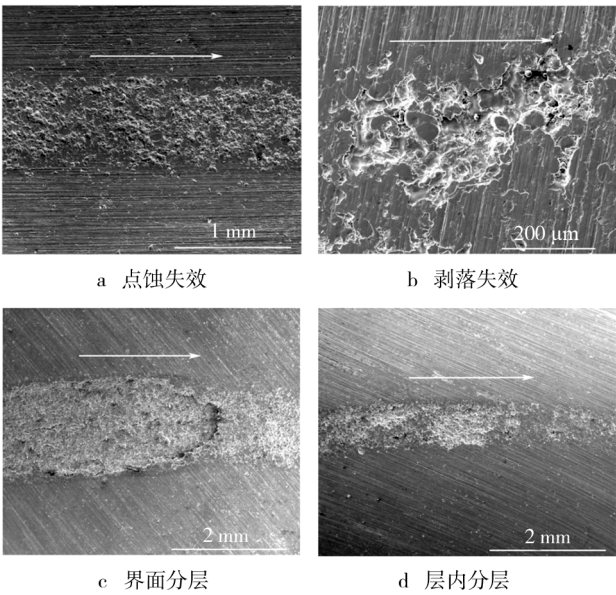


图 4 不同接触应力下涂层失效形貌

Fig. 4 Failure morphology of different contact stress

形貌见图4c,d^[49]。分析认为,接触应力导致的涂层内部剪切应力变化是涂层产生上述失效的主要原因。低接触应力条件下,涂层内部和界面处的剪切应力较小,无法有效地破坏涂层的内聚或涂层与基体的结合,主要发生轻微的表面点蚀或剥落等近表层失效;高接触应力条件下,涂层与基体界面上的剪切应力增大,过大的界面剪切应力使涂层界面上的缺陷在较短的时间内萌生为疲劳裂纹,并快速扩展到表面,形成涂层的整层分层失效。

2.2.2 转速

朴钟宇等^[50]考察了等离子喷涂 FeCrBSi 涂层在相同润滑条件和相同接触应力下,不同转速对涂层失效机理的作用,发现转速对涂层的失效行为有着重要的影响。在较低转速时,涂层以表面磨损失效和剥落失效模式为主,同时伴随着分层失效;在转速中等的条件下,涂层的失效形式呈现多元化;在较高转速的条件下,涂层主要以分层失效为主,且比低转速条件下深很多。分析认为,不同转速条件下涂层失效行为体现出的差异与累计损伤程度有关。图5为不同转速下单位时间内涂层内部剪切应力交变情况^[50]。在较低转速时,涂层内部剪切应力循环较少;随着转速的增加,涂层内部交变剪切应力增多,甚至出现叠加的现象,增大了涂层内部缺陷诱发疲劳裂纹的可能。

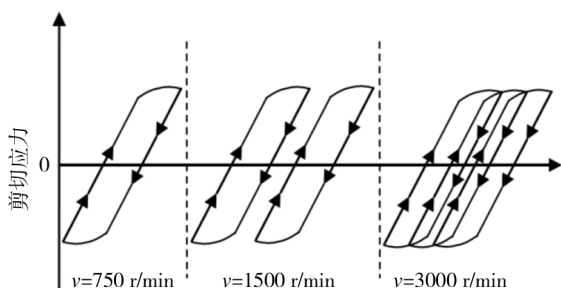


图5 不同转速下单位时间内涂层内部剪切应力交变示意
Fig.5 Schematic of altering shear stress during unit time under different rotational speed

2.3 小结

等离子喷涂层接触疲劳失效模式的影响因素既包括与涂层结构完整性相关的内因,如涂层的结合强度、涂层厚度、涂层微观缺陷,也包括与服役条件相关的外因,如接触应力和转速。在一定范围内,涂层的厚度越大,结合强度越高,微观缺陷越少,表面粗糙度越小,其失效模式就以磨损和剥落失效为主;反之,涂层的失效模式主要表现为分层失效。在高的接触应

力以及高的转速条件下,涂层主要以分层失效为主;而低接触应力和低转速时,涂层以点蚀和剥落失效为主,同时伴随着表面磨损失效。

3 结语

等离子喷涂层的疲劳/磨损失效研究主要集中在磨损失效和接触疲劳失效两方面。与涂层服役的“滚动+滑动”实际工况不同,磨损失效和接触疲劳失效分别是基于“纯滑动”和“纯滚动”条件下的失效行为研究。通过对失效研究分析发现,磨损失效过程中伴随着疲劳失效,接触疲劳失效过程中也伴随着磨损失效。从涂层服役的实际工况考虑,单一地研究接触疲劳失效或磨损失效存在一定的局限性,接近零件实际服役工况的滚动/滑动竞争性失效研究,对工程实践具有持久性的指导作用,是未来等离子喷涂层疲劳/磨损失效行为研究的重要方向。

目前对等离子喷涂层滚动/滑动竞争性失效的研究较少。康嘉杰^[51]研制了能够对滑差率大范围精确控制的滚滑试验机,为滚动/滑动竞争性失效行为研究提供了实验平台;A. Nakajima 等^[52]探索性研究了滑差率对失效行为的影响,为滚动/滑动竞争性失效行为研究提供了一定指导思想。但是对滚动/滑动竞争性失效研究还存在一些亟待解决的问题,如涂层失效行为的在线监测、涂层寿命预测、实验机的自动化控制等。这些问题的解决依赖于机械制造技术、电子技术、计算机处理技术以及人工智能等多方面综合应用,因而必将得到更多的关注和研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ZHU S, XU B S, YAO J K. High Quality Ceramic Coating Sprayed by High Efficiency Hypersonic Plasma Spraying Gun[J]. Material Science Forum, 2005, 475—479 (5): 3981—3984.
- [3] 张燕,张行,刘朝辉,等. 热喷涂技术与热喷涂材料的发展现状[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 59—62.
ZHANG Yan, ZHANG Xing, LIU Zhao-hui, et al. Development Status of Thermal Spray Technology and Thermal Spray Materials[J]. Equipment Environmental Engineering,

- 2013, 10(3): 59—62.
- [4] 王海军. 热喷涂实用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
WANG Hai-jun. Practical Technology of Thermal Spray [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
 - [5] 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.
 - [6] CHAO W, LI W C, LEI F, et al. Fabrication and Properties of Supersonic Plasma Sprayed Al_2O_3 Coating on Porous Si_3N_4 Substrate[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 559: 725—730.
 - [7] ZHANG Z Y, LU X C, LUO J B. Tribological Properties of Rare Earth Oxide Added Cr_3C_2 -NiCr Coating[J]. Applied Surface Science, 2007, 253: 4377—4385.
 - [8] 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.
 - [9] ZHANG X C, XU B S, TU S T, et al. Effect of Spraying Power on the Microstructure and Mechanical Properties of Supersonic Plasma-sprayed Ni-based Alloy Coatings[J]. Applied Surface Science, 2008, 254: 6318—6326.
 - [10] ZHANG X C, XU B S, WU Y X, et al. Porosity, Mechanical Properties, Residual Stresses of Supersonic Plasma-sprayed Ni-based Alloy Coating Prepared at Different Powder Feed Rates[J]. Applied Surface Science, 2008, 254: 3879—3889.
 - [11] 邹群, 水中和, 徐昌盛, 等. 表面处理技术提高混凝土内置钢筋耐久性的研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 19—23.
ZOU Qun, SHUI Zhong-he, XU Chang-sheng, et al. Effect of Surface Treatment on Corrosion of Rebar Embedded in Concrete[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 19—23.
 - [12] STEWART S, HMED R, ITSUKAICHI T. Rolling Contact Fatigue of Post-treated WC-NiCrBSi Thermal Spray Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 190: 171—189.
 - [13] 王海军. 热喷涂材料及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
WANG Hai-jun. Application of Thermal Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
 - [14] PIAO Z Y, XU B S, WANG H D, et al. Investigation of Fatigue Failure Prediction of Fe-Cr Alloy Coating under Rolling Contact Based on Acoustic Emission Technique[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 2581—2586.
 - [15] HIROKAZU T, YASUTAKA A. Study of Titanium Nitride Deposition by Supersonic Plasma Spraying[J]. Vacuum, 2009, 83: 98—101.
 - [16] DU L Z, XU B S, DONG S Y, et al. Sliding Wear Behavior of the Supersonic Plasma Sprayed WC-Co Coating in Oil Containing Sand[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202: 3709—3714.
 - [17] 赵晓琴, 周惠娣, 陈建敏. 等离子喷涂纳米和常规喂料 WC-Co 涂层在干摩擦和水环境中的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(3): 208—213.
ZHAO Xiao-qin, ZHOU Hui-di, CHEN Jian-min. Friction and Wear Behavior of WC-Co Coating Sprayed by Nanoscale and Conventional[M]. Tribology, 2006, 36(3): 208—213.
 - [18] TIAN W, WANG Y, YANG Y. Fretting Wear Behavior of Conventional and Nanostructured Al_2O_3 -13wt% TiO_2 Coating Fabricated by Plasma Spray[J]. Wear, 2008, 265: 1700—1707.
 - [19] TIAN W, WANG Y, YANG Y. Three Body Abrasive Wear Characteristics of Plasma Sprayed Conventional and Nanostructured Al_2O_3 -13% TiO_2 Coating[J]. Tribology International, 2010, 43: 876—881.
 - [20] TAO S, YIN Z, ZHOU X, et al. Sliding Wear Characteristics of Plasma-sprayed Al_2O_3 and Cr_2O_3 Coatings Against Copper Alloy under Severe Conditions[J]. Tribology International, 2010, 43: 69—75.
 - [21] 李晓亮, 阎殿然, 何继宁, 等. 反应等离子喷涂 TiN/AlN 涂层在润滑状态下摩擦磨损性能的研究[J]. 热加工工艺, 2006, 35(11): 52—54.
LI Xiao-liang, YAN Dian-ran, HE Ji-ning, et al. Study on Friction and Wear Behaviors of TiN/AlN Coating Prepared Reactive Plasma Spray with Oil Lubrication[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(11): 52—54.
 - [22] 叶辉, 李强, 魏振毅, 等. 等离子喷涂 Al_2O_3 -13wt.% TiO_2 涂层在干摩擦条件下的磨损机制转变图[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(3): 246—250.
YE Hui, LI Qiang, WEI Zhen-yi, et al. The Wear Mechanisms Transition Map of Plasma Sprayed Al_2O_3 -13wt.% TiO_2 Coating under Dry Sliding[J]. Tribology, 2009, 29(3): 246—250.
 - [23] 安家财, 杜三明, 肖家滨. 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, DU San-ming, XIAO Jia-bin. 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.
- [24] LI X M, YANG Y Y, SHAO T M, et al. Impact Wear Performances of Cr_3C_2 -NiCr Coatings by Plasma and HVOF Spraying[J]. Wear, 1997, 202: 208—214.
- [25] PEICHL A, BECK T. Behavior of an EBPVD Thermal Barrier Coating System under Thermal Mechanical Fatigue Loading[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 162 (5): 113—118.
- [26] 毕继鑫, 孙宏飞, 倪立勇, 等. Fe/Cr 涂层抗高温氧化性能研究[J]. 失效分析与预防, 2007 (3): 12—15.
- BI Ji-xin, SUN Hong-fei, NI Li-yong, et al. Study on High-temperature Oxidation Resistance Property of Fe/Cr Coating [J]. Failure Analysis and Prevention, 2007 (3): 12—15.
- [27] STEWART S, AHMED R, ITSUKAICHI T. Contact Fatigue Failure Evaluation of Post-treated WC-NiCrBSi Functionally Graded Thermal Spray Coatings [J]. Wear, 2004, 257: 962—983.
- [28] 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 Figue Mechanism of Plasma Spraying Fe-based Coating [M]. Journal of Materials Engineering, 2009 (11): 69—73.
- [29] 安树春, 程汉池, 栗卓新, 等. 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, CHENG Han-chi, LI Zhuo-xin, et al. Progress of Post-remelting Technology for Hot Sprayed Coating[J]. Surface Technology, 2009, 38 (2): 73—77.
- [30] TAN Y F, MARTIN P, LESCALIER C, et al. Study on the Ground Surface Quality of Cr_2O_3 Coatings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 441—445.
- [31] STEPHENSON D J, HEDGE J, CORBETT J. Surface Finishing of Ni-Cr-B-Si Composite Coatings by Precision Grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 357—363.
- [32] KLEIN M, EIFLER D. Influences of the Manufacturing Processes on the Surface Integrity and the Resulting Fatigue Behavior of Quenched and Tempered SAE4140 [J]. Procedia Engineering, 2010, 2 (1): 2239—2247.
- [33] 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: 252—258.
- [34] STEWART S, AHMED R. Rolling Contact Fatigue of Surface Coating: A Review[J]. Wear, 2002, 253: 1132—1144.
- [35] 宋亚南, 徐滨士, 王海斗, 等. 喷涂层结合强度测量方法的研究现状[J]. 工程与试验, 2011, 51 (4): 1—8.
- SONG Ya-nan, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Research Status on Measurement Method for Spraying Coating Bonding Strength [J]. Engineering & Test, 2011, 51 (4): 1—8.
- [36] MASAHIRO Fujii, JIABIN Ma, AKIRA Yoshida, et al. Influence of Coating Thickness on Rolling Contact Fatigue of Alumina Ceramics Thermally Sprayed on Steel Roller [J]. Tribology International, 2006, 39: 1447—1453.
- [37] PIAO Z Y, XU B S, WANG H D, et al. Effects of Thickness and Elastic Modulus on Stress Condition of Fatigue-resistant Coating under Rolling Contact [J]. J Cent South Univ Technol, 2010, 17: 899—905.
- [38] 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 [J]. Tribology, 2010, 30 (5): 448—452.
- [39] NAKAJIMA A, MAWATARI T, YOSHIDA M, et al. Effects of Coating Thickness and Slip Ratio on Durability of Thermally Sprayed WC Ceramic Coating in Rolling/Sliding Contact [J]. Wear, 2000, 241: 166—173.
- [40] 邢闽芳. 互换性与技术测量 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- XING Min-fang. Interchangeability and Measurement Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [41] HADFIELD M, STOLARSKI T A. The Effect of the Test Machine on the Failure Mode in Lubricated Rolling Contact of Silicon Nitride [J]. Tribology International, 1995, 28 (6): 377—382.
- [42] AHMED R, HADFIELD M. Wear of High Velocity Oxy-fuel (HVOF)-coated Cones in Rolling Contact [J]. Wear, 1997, 203: 98—106.
- [43] PIAO Z Y, XU B S, WANG H D, et al. Influence of Surface Roughness on Rolling Contact Fatigue Behavior of Fe-Cr Alloy Coatings [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22 (3): 767—773.
- [44] ZHANG X C, XU B S, XUAN F Z, et al. Porosity and Effective Mechanical Properties of Plasma-sprayed Ni-based Alloy Coatings [J]. Applied Surface Science, 2009, 255: 4362—4371.
- [45] 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: 501—508.
- [46] 王韶云, 李国禄, 王海斗, 等. 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 on Rolling Coating Fatigue Performance of Thermal Spraying Coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(2): 72—76.
- [47] 杨效田, 王智平, 路阳, 等. 高铝铜合金粗粉超音速等离子喷涂层的边界润滑摩擦特性[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 3100—3106.
- YANG Xiao-tian, WANG Zhi-ping, LU Yang, et al. Boundary Lubrication Tribological Property of High-aluminium Copper Alloy Coarse Powders Coating Made by Supersonic Plasma Spraying[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3100—3106.
- [48] 王海斗, 张志强, 李国禄, 等. 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, ZHANG Zhi-qiang, LI Guo-lu, et al. Investigation of Contact Fatigue Failure Mode and Mechanism of Plasma Spraying Coating[J]. Tribology, 2012, 32(3): 251—257.
- [49] PIAO Z Y, XU B S, WANG H D, et al. Investigation of Rolling Contact Fatigue Lives of Fe-Cr Alloy Coatings under Different Loading Conditions[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204: 1405—1411.
- [50] 朴钟宇. 面向再制造的等离子喷涂层接触疲劳失效机理及寿命评估[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
- PIAO Zhong-yu. Investigation of Mechanism and Life Evaluation of Rolling Contact Fatigue of Plasma Sprayed Coating for Remanufacturing[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2010.
- [51] 康嘉杰. 等离子喷涂层的竞争性失效行为和寿命预测[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- KANG Jia-jie. Research on Competing Failure Behavior and Life Prediction of Plasma Spraying Coating[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [52] NAKAJIMA A, MAWATARI T, YOSHIDA M, et al. Effects of Coating Thickness and Slip Ratio on Durability of Thermally Sprayed WC Cermets Coating in Rolling/Sliding Contact[J]. Wear, 2000, 241: 166—173.
-
- (上接第113页)
- WANG Jing, WU Lin, SONG Shi-hong, et al. Corrosion Resistance of Chromate-free Passivation Coating for Galvanized Steel[J]. Materials Protection, 2008, 41(11): 28—30.
- [5] 叶鹏飞, 徐丽萍, 张振海, 等. 镀锌板水性环氧树脂复合钝化膜的耐蚀性能[J]. 材料保护, 2012, 45(11): 6—9.
- YE Peng-fei, XU Li-ping, ZHANG Zhen-hai, et al. Corrosion Resistance of Waterborne Epoxy Resin Composite Passivation Coating on Galvanized Steel Sheet[J]. Materials Protection, 2012, 45(11): 6—9.
- [6] KONG G, LIU L Y. Study on Lanthanum Salt Conversion Coating Modified with Citric Acid on Hot Dip Galvanized Steel[J]. Journal of Rare Earths, 2010, 28(3): 461—465.
- [7] TSAI C Y, LIU J S. Roll Coating Tungstate Passivation Treatment for Hot-dip Galvanized Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(21/22): 5124—5129.
- [8] TANG F, WANG X Y. Phytic Acid Doped Nanoparticles for Green Anticorrosion Coating[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem and Aspects, 2010, 369(1/2/3): 101—105.
- [9] 于元春, 李宁, 胡会利, 等. 无铬钝化与三价铬钝化的研究进展[J]. 表面技术, 2005, 34(5): 6—9.
- YU Yuan-chun, LI Ning, HU Hui-li, et al. Research Development of Non-chromate and Tri-chromium Passivation[J]. Surface Technology, 2005, 34(5): 6—9.
- [10] 王雷, 张东. 镀锌层三价铬钝化研究进展[J]. 电镀与精饰, 2008, 30(5): 15—19.
- WANG Lei, ZHANG Dong. Research Advances of Trivalent Chromium Passivation for Zinc Coating[J]. Plating and Finishing, 2008, 30(5): 15—19.
- [11] 叶金堆. 新型三价铬钝化技术[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(7): 40—43.
- YE Jin-dui. A New Trivalent Chromium Passivation Technique[J]. Electroplating & Finishing, 2006, 25(7): 40—43.
- [12] 曹楚南. 腐蚀电化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- CAO Chu-nan. Corrosion Electrochemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [13] SONG Y K, MANSFELD F. Corrosion Protection of Electro-galvanized Steel by a Cerium-based Conversion Coating[J]. Corrosion, 2006, 62(12): 1067—1073.
- [14] 林恒. 镀锌层三价铬彩色钝化的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- LIN Heng. The Research of Trivalent Chromium Passivation on Zinc Coating[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.