

研究与探索

双涂层界面接触应力分析

谢华, 陈东, 黄健萌

(福州大学, 福州 350002)

摘要: 目的 研究在接触应力作用下, 双涂层的总厚度及厚度比对其界面应力的影响规律。方法 采用有限元方法研究两个界面, 即涂层与基底界面和涂层间界面的 Mises 应力突变量和界面最大剪应力。结果 总厚度一定时, 涂层厚度比变化对涂层/基底界面应力的影响较小, 而对涂层间界面应力的影响明显。对于薄涂层, 涂层间界面 Mises 应力突变量和最大剪应力随着中间层厚度比例的增大而减小; 对于厚涂层, 涂层间界面 Mises 应力突变量和最大剪应力随着中间层厚度比例的增大而减小。涂层厚度比一定时, 随着涂层总厚度增加, 涂层间界面 Mises 应力突变量和最大剪应力先增大, 后减小。结论 双涂层的总厚度及厚度比对其界面应力有显著影响。

关键词: 双涂层; 界面应力; 有限元法

中图分类号: TG174.45; O34

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)02-0001-05

Analysis of the Contact Stress at Interface of Double Coatings

XIE Hua, CHEN Dong, HUANG Jian-meng

(Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the influences of the coating thickness and interlayer-to-top layer coating thickness ratio $t_{\text{int}}:t_{\text{top}}$ on the interface stress in the TiN-interlayer coating/substrate under contact stress. **Methods** Using Finite element method, the Mises stress gradient and the maximum shear stress at one interface between the coating and the base and the other between the top layer coating and the interlayer coating were studied. **Results** The coating thickness t and the interlayer-to-top layer coating thickness ratio $t_{\text{int}}:t_{\text{top}}$ had little influence on the interface stress between the coating and the base, however, they showed obvious influence on the interface stress between the top layer and the interlayer coating. For the thin coating, the Mises stress gradient and the maximum shear stress at the interface between the top layer and the interlayer were decreased when the interlayer-to-top layer coating thickness ratio $t_{\text{int}}:t_{\text{top}}$ increased, while for the thick coating, the Mises stress gradient and the maximum shear stress at the interface between the top layer and the interlayer were increased when the interlayer-to-top layer coating thickness ratio $t_{\text{int}}:t_{\text{top}}$ decreased. For the same interlayer-to-top layer coating thickness ratio $t_{\text{int}}:t_{\text{top}}$, the Mises stress gradient and the maximum shear stress were first increased and then decreased when the coating thickness increased. **Conclusion** The coating thickness and the thickness ratio showed distinct influences on the interface stress of a double coating system.

KEY WORDS: double coating; interface stress; finite element method

收稿日期: 2013-10-24; 修订日期: 2013-12-02

Received: 2013-10-24; Revised: 2013-12-02

基金项目: 国家杰出青年基金项目(51205062)

Fund: Supported by the China National Funds for Distinguished Young Scientists(51205062)

作者简介: 谢华(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为摩擦磨损及接触力学。

Biography: XIE Hua(1972—), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: friction, wear and contact mechanics.

表面腐蚀、磨损是造成机械设备失效的重要原因,通过表面处理可以提高工件表面抵抗腐蚀和磨损的能力^[1-5]。硬质 TiN 涂层常被用作工件的耐磨防护层^[6-9],但是由于 TiN 涂层薄,与基体的结合强度低,在受到载荷作用时,涂层/基体界面处裂纹的产生和扩展易导致涂层与基体分离脱落而失效。为了解决这一问题,人们引入中间涂层,以减小涂层与基底间的弹性模量差,从而增强界面结合,减小界面应力突变,这成为了近年来表面沉积技术的一个发展方向^[10-12]。但引入双涂层的同时,还引入了一个新的界面,即表面涂层与中间涂层间的界面,这一界面同样存在应力突变等问题。文中采用 ABAQUS 有限元软件分析了 TiN 双涂层系统在接触应力作用下,总厚度及厚度比对两个界面的 Mises 应力突变量和最大剪应力的影响规律。

1 球压头接触有限元模型及验证

有限元模型见图 1,计算借助有限元分析软件 ABAQUS,计算模型全部采用 CAX4I(4 节点四边形非协调轴对称单元),整个计算模型包含 32761 个单元。双涂层接触应力有限元分析过程中,假定 TiN 涂层、中间层与基体相互之间均完美结合。TiN 涂层弹性模量(E_c)为 420 GPa,基体高速钢弹性模量(E_s)为 210 GPa,中间层弹性模量为 315 GPa($E_c/2+E_s/2$),三者泊松比均为 0.3。半径 R 为 0.1 mm 的球压头压在总厚度为 t 的涂层上,压头为解析刚体。球压头作用下的涂层/基体系统具有轴对称的几何形状,分析时在 A 点(压头参考点)施加的法向静载 P 为 0.05 N,可算得无涂层时的接触半径 $a=2.54\text{ }\mu\text{m}$ 。当半空

间体宽度和厚度分别取大于 $20a$ 时,接触面积上载荷对系统应力分布的影响可以忽略,有限元分析过程中,半空间体(基体)的宽度和厚度均取 0.1 mm。

将有限元模型的分析结果与解析解的结果相比较,如图 2 所示。a 图为球压头静载作用下无涂层时,模型表面接触压力理论解与数值解的比较;b 图为球压头静载作用下无涂层时,模型沿 z 轴方向应力的理论解与数值解的比较。由图可知,建立的有限元模型的分析结果与解析解的结果相一致,从而验证了该有限元模型的可信度。

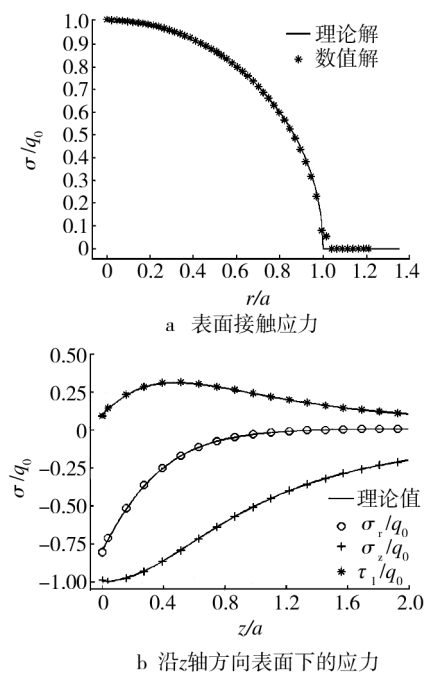


图 2 球压头作用下理论解与数值解的比较

Fig. 2 Comparison between theoretical solution and numerical solution under a ball indenter

2 球压头作用下双涂层界面接触应力分析

2.1 涂层总厚度及厚度比对界面 Mises 应力突变量的影响

涂层由表层工作层 TiN 和中间层组成,总厚度 t 分别为 0.6,1.2,2.4,3.6,4.8,6.0 μm ,中间层与表面层的厚度比 $t_{\text{int}}:t_{\text{top}}$ 分别取 1:3,1:2,1:1,2:1 和 3:1。图 3 为 $t=3.6\text{ }\mu\text{m}$, $t_{\text{int}}:t_{\text{top}}=1:1$ 时的 z 轴 Mises 应力分布图,可以看出,随着距离表面的深度 $|z|$ 增加,沿 z 轴,Mises 应力先增加后减小。对无涂层半无限体的研究表明,最大 Mises 总是出现在距离表

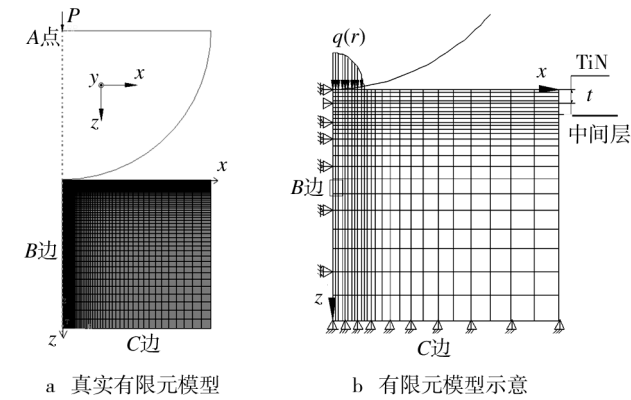


图 1 球压头法向静载下的轴对称有限元模型

Fig. 1 The axial symmetry finite element model with normal static ball indenter

面 $0.39a \sim 0.47a$ (约 $1.0 \sim 1.2 \mu\text{m}$) 处,这也就是所谓的易出现破坏的亚表层^[13]。由图 3 可见,无论是涂层间界面,还是涂层/基底间界面,均会引起 Mises 应力集中,由于界面两侧材料性能不一致,在界面处产生 Mises 应力突变,而涂层间和涂/基间的应力突变易导致涂层失效^[14]。

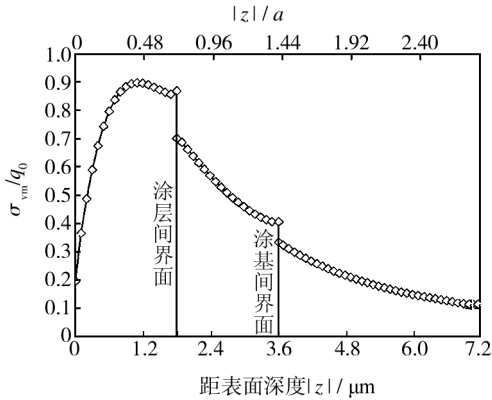


图 3 z 轴 Mises 应力分布

Fig.3 The distribution curve of the Mises stress along the z axis

图 4 为总厚度相同、厚度比不同的各种双涂层涂基界面处应力突变量的平均值与单涂层应力突变量的比较。可以看出,单涂层的 Mises 应力突变量是双涂层的 2~3 倍。双涂层由于中间层的存在,弱化了涂基间应力的不连续性,大大减小了涂基界面处的应力突变。不过实际上,双涂层又引入了一个涂层间的界面,图 3 表明,涂层间界面同样存在突变问题,而且由于这个界面所处位置独特,其界面应力受双涂层厚度比的影响较为显著。

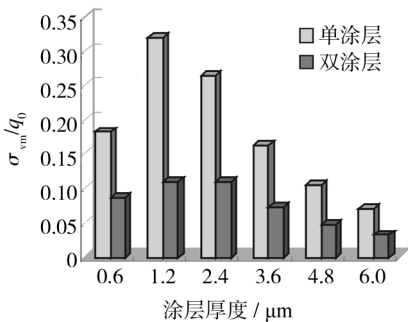


图 4 单、双涂层涂基界面处 Mises 应力突变量比较

Fig.4 The comarison map of the stress sudden change at the interface of single and double coatings

图 5 为不同厚度的涂层层间界面处 Mises 应力突变量随涂层厚度比的变化。可以看出,当涂层较薄 ($t \leq 1.2 \mu\text{m}$, 即 $t/a \leq 0.47$) 时,随着中间层厚度比例

的增加, Mises 应力突变量减小;而当涂层较厚 ($t \geq 3.6 \mu\text{m}$, 即 $t/a \geq 1.41$) 时,随着中间层厚度比例的增加, Mises 应力突变量增大。

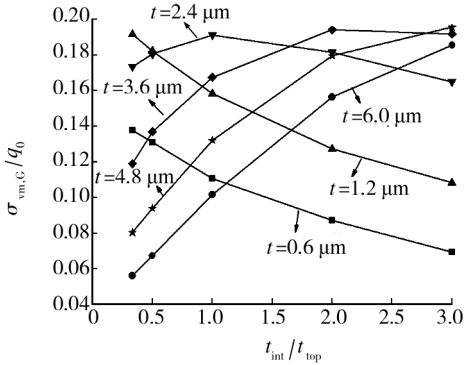


图 5 涂层层间界面处 Mises 应力突变量的变化

Fig.5 Variations in sudden change of the Mises stress a the interface between two coatings

涂层厚度或涂层厚度比变化时,涂层间界面和涂层/基底界面的位置随之变化。由表 1 数据可知,当涂层薄,中间层厚度比例大时,涂层间界面距离亚表层远,所以此时涂层间应力突变量小;当涂层厚度大时,中间层厚度比例越大,涂层间界面距离亚表层就越近,所以应力突变量越大。对比图 5 中相同厚度比下的数据点可以看出,随着涂层总厚度增加,涂层间界面处的 Mises 应力突变量总是先增大,后减小。随着涂层总厚度发生变化,当涂层间界面距离亚表层最近时,界面处的应力突变量最大,例如如果 $t_{\text{int}} : t_{\text{top}} = 1 : 3$, 则是涂层厚度为 $1.2 \mu\text{m}$ ($t/a = 0.47$) 时涂层间界面距离亚表层最近,其涂层间应力突变量最大。总的来说,当涂层厚度 t 和厚度比 $t_{\text{int}} : t_{\text{top}}$ 变化时,涂层间界面距离亚表层越近,其应力突变量就越大。值得注意的是中等厚度 ($t = 2.4 \mu\text{m}$) 的涂层,由于在本文选定的厚度比范围内,涂层间界面距离亚表层均不远,所以总体上涂层间界面应力突变量比较大。

表 1 涂层层间界面距离表面的深度值

Tab.1 The depth of interfaces between two coatings away from the surface

$t_{\text{int}} : t_{\text{top}}$	界面深度/ μm					
	$t=0.6$	$t=1.2$	$t=2.4$	$t=3.6$	$t=4.8$	$t=6.0$
1 : 3	0.45	0.90	1.80	2.70	3.60	4.50
1 : 2	0.40	0.80	1.60	2.40	3.20	4.00
1 : 1	0.30	0.60	1.20	1.80	2.40	3.00
2 : 1	0.20	0.40	0.80	1.20	1.60	2.00
3 : 1	0.15	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50

图 6 为不同厚度涂层的涂层/基体界面处 Mises 应力突变量随涂层厚度比的变化。可以看出,当涂层总厚度一定时,涂基界面距离亚表层的位置也就确定了,此时涂层厚度比 $t_{\text{int}} : t_{\text{top}}$ 变化对涂基界面 Mises 应力突变量的影响较小。涂层总厚度变化时,涂基界面处的应力突变量也会发生变化,即随着涂层厚度增加,应力突变量先增大,后减小。当涂层薄 ($t = 0.6 \mu\text{m}$, 即 $t/a = 0.235$) 时,涂基界面距离亚表层远(表 2),应力突变量小;随着涂层厚度的增加, $t = 1.2 \mu\text{m}$ ($t/a = 0.47$) 时,涂基界面距离亚表层近,应力突变量大;涂层厚度继续增加,涂基界面距离亚表层则越来越远,涂基界面两侧应力突变量也就变小。

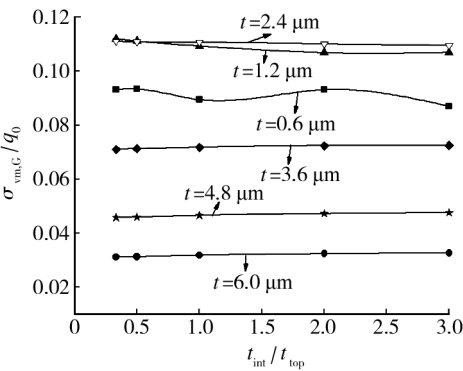


图 6 涂层/基体界面处 Mises 应力突变量的变化
Fig. 6 Variations in sudden change of the Mises stresses at the interface between the coating and the base

表 2 涂层/基体界面距离表面的深度值
Tab. 2 The depth of interfaces between coatings and the base away from the surface

$t_{\text{int}} : t_{\text{top}}$	界面深度/ μm					
	$t = 0.6$	$t = 1.2$	$t = 2.4$	$t = 3.6$	$t = 4.8$	$t = 6.0$
1 : 3	0.6	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0
1 : 2	0.6	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0
1 : 1	0.6	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0
2 : 1	0.6	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0
3 : 1	0.6	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0

无论是涂层间的应力突变,还是涂基间的应力突变,都易导致涂层失效,所以在涂层工程设计中,应选择合适的涂层厚度匹配和涂层总厚度,以最大限度降低界面处的应力突变,从而提高涂层的使用效果。综合图 5 和图 6,选用厚涂层可以使涂层/基底界面避开亚表层位置,减小涂基界面应力突变,但涂层厚度大,涂层/基底的结合力会降低;也可以选择薄的涂层(如 $t = 0.6 \mu\text{m}$)。不过,薄涂层的中间层应较厚,厚涂层

的中间层应较薄,使涂层间界面避开亚表层位置,减小涂层间界面的应力突变。

2.2 涂层总厚度和厚度比对界面最大剪应力的影响

图 7 为涂层总厚度和厚度比变化时,涂层间界面处最大剪应力的变化图。可以看出,涂层厚度比对涂层间界面处剪应力峰值影响较大。涂层薄 ($t \leq 1.2 \mu\text{m}$, 即 $t/a \leq 0.47$) 时,涂层间界面处的最大剪应力随 $t_{\text{int}}/t_{\text{top}}$ 增大而减小。涂层厚度 $t \geq 2.4 \mu\text{m}$ ($t/a \geq 0.94$) 时,随着 $t_{\text{int}}/t_{\text{top}}$ 的增大,涂层间界面处的剪应力峰值也相应增大,这与涂层/基体系统剪应力的分布状况有关。无论是涂层总厚度变化,还是厚度比变化,涂层基体系统的剪应力分布形式是相似的,最大剪应力均出现在距离表面 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ ($|z|/a$ 约为 $0.157 \sim 0.314$) 处,即剪应力亚表层。当涂层薄 ($t \leq 1.2 \mu\text{m}$) 时, $t_{\text{int}}/t_{\text{top}}$ 越大,涂层间界面距离表面越近(见表 1),而距离剪应力亚表层越远,所以涂层间界面处的最大剪应力就相应减小;当涂层总厚度 $t \geq 2.4 \mu\text{m}$ 时, $t_{\text{int}}/t_{\text{top}}$ 越大,涂层间界面距离最大剪应力亚表层越近(表 1),涂层间界面处的最大剪应力就相应增大。对比图 7 中相同厚度比下的数据点可以看出,随着涂层厚度增加,涂层间界面处的最大剪应力总是先增大,后减小。随着涂层厚度发生变化,当涂层间界面距离剪应力亚表层最近时,界面处的最大剪应力最大,如当 $t_{\text{int}} : t_{\text{top}} = 1 : 3$ 时,厚度 $1.2 \mu\text{m}$ ($t/a = 0.47$) 的涂层层间界面距离亚表层最近(表 1),其涂层间界面的最大剪应力最大。值得注意的是中等厚度 ($t = 2.4 \mu\text{m}$) 的涂层,其涂层间界面的应力突变量总体较大。

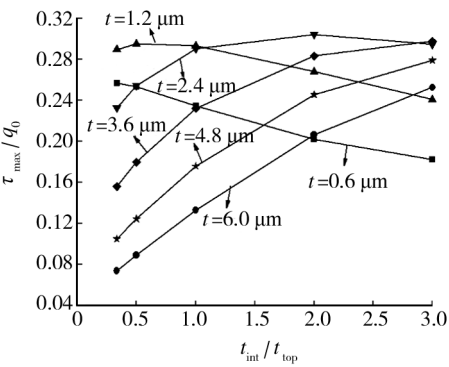


图 7 涂层间界面处最大剪应力的变化
Fig. 7 The maximum shear stress at the interface between two coatings

图 8 为涂层厚度和厚度比变化时,涂层/基体间

界面处最大剪应力的变化图。可以看出,涂层总厚度一定时,涂基界面距离系统最大剪应力值的位置也就确定了,涂层厚度比变化对涂基界面处最大剪应力的影响不大。当涂层厚度为 $0.6\text{ }\mu\text{m}$ ($t/a=0.235$), $1.2\text{ }\mu\text{m}$ ($t/a\leq 0.47$) 时,涂层/基体界面离最大剪应力处 ($|z|/a$ 约为 $0.157\sim 0.314$) 近,界面处的最大剪应力大;随着涂层厚度增加,涂基界面距离系统最大剪应力处越远,涂基界面处的剪应力越小,从而涂层就越不容易剥离。但是在实际的制备工艺中,考虑到涂层越厚,结合强度越差,即使涂基界面处的剪应力小,也有可能由于界面处剪应力的作用导致涂层剥离、脱落。结合图 7 和图 8 可知,若选用较薄涂层 ($t\leq 1.2\text{ }\mu\text{m}$),涂基界面最大剪应力较大;若选用较厚涂层,可以降低涂基界面的最大剪应力,但需注意应采用较薄的中间层,以降低涂层间界面的最大剪应力。考虑到厚涂层的涂基结合力降低,太厚的涂层也是不宜采用的^[15]。

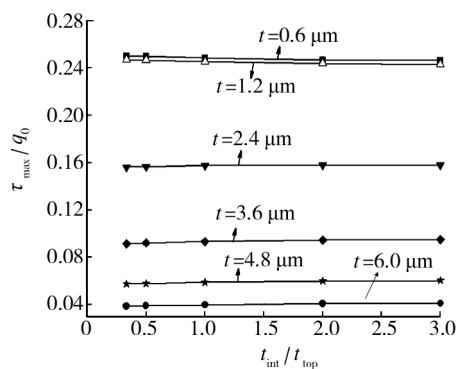


图 8 涂层/基体间界面处最大剪应力的变化

Fig. 8 The maximum shear stress at the interface between the coating and the base

3 结论

1) 单涂层涂基界面的 Mises 应力突变量是双涂层的 2~3 倍。

2) 在文中选定的双涂层总厚度与厚度比范围内,总厚度一定时,厚度比变化对涂层/基底界面的 Mises 应力突变量和界面最大剪应力影响较小。

3) 双涂层总厚度 $t\leq 1.2\text{ }\mu\text{m}$ ($t/a\leq 0.47$) 时,随着中间层厚度比例的增大,涂层间界面 Mises 应力突变量和最大剪应力减小; $t\geq 3.6\text{ }\mu\text{m}$ ($t/a\geq 1.41$) 时,涂层间界面 Mises 应力突变量随中间层厚度比例的增大而增大; $t\geq 2.4\text{ }\mu\text{m}$ ($t/a\geq 0.94$) 时,涂层间界面的剪应力峰值随中间层厚度比例的增大而增大。

4) 双涂层的厚度比一定时,随着涂层总厚度增

加,涂层间界面 Mises 应力突变量和最大剪应力先增大,后减小。

5) 应采用较厚涂层 ($t>3.6\text{ }\mu\text{m}$) 以同时降低涂层与基底界面以及涂层间界面应力,但应注意,此时应采用较薄的中间层 ($t_{\text{int}}/t_{\text{top}}$ 小),以降低涂层间界面 Mises 应力突变和最大剪应力。

参考文献

- [1] HOGMARK S, JACOBSON S, LARSSON M. Design and Evaluation of Tribological Coatings[J]. Wear, 2000, 246 (1/2): 20—23.
- [2] 徐滨士, 刘世参. 表面工程技术手册(上)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
XU Bin-shi, LIU Shi-can. Surface Engineering Technology Manual (Volume 1) [M]. Beijing: Chemical Engineering Press, 2009.
- [3] ZHOU Z F, LI K Y, BELLO I, et al. Study of Tribological Performance of ECR-CVD Diamond-like Carbon Coatings on Steel Substrates: Part 2. The Analysis of Wear Mechanism [J]. Wear, 2005, 258 (10): 1589—1599.
- [4] 徐心洁, 贺毅, 马东林, 等. 等离子喷涂 Al_2O_3 -13% TiO_2 复合陶瓷涂层的组织及热氧化性能的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(1): 15—19.
XU Xin-jie, HE Yi, MA Dong-lin, et al. Study on the Structure and Thermal Oxidization Properties of Plasma-sprayed Al_2O_3 -13% TiO_2 Composite Ceramic Coatings [J]. Surface Technology, 2010, 39(1): 15—19.
- [5] 宿辉, 张兆国, 尹志娟. 镍基纳米 (SiC)_p 化学复合镀层的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(2): 55—57.
SU Hui, ZHANG Zhao-guo, YIN Zhi-juan. Study on Electroless Nickel-based Nano- (SiC)_p Composite Coating [J]. Surface Technology, 2010, 39(2): 55—57.
- [6] BIENK E J, REITZ H, MIKKELSEN N J. Wear and Friction Properties of Hard PVD Coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 76/77 (2): 475—480.
- [7] 宋贵宏, 李峰, 陈立佳, 等. 铝和镁合金上电弧离子镀 (Ti, Al)N 梯度涂层的比较[J]. 表面技术, 2008, 37(1): 14—16.
SONG Gui-hong, LI Feng, CHEN Li-jia. Comparison of the (Ti, Al)N Coatings on Al and Mg Alloy Substrate by AIP [J]. Surface Technology, 2008, 37(1): 14—16.
- [8] 付海龙, 戴光, 邹龙庆, 等. 金属橡胶表面沉积镍基纳米 TiN 复合镀层的研究[J]. 表面技术, 2011, 40(1): 90—92.
FU Hai-long, DAI Guang, ZOU Long-qing, et al. Study on Ni-TiN Nanocomposite Coatings on the Metal Mubber [J]. Surface Technology, 2011, 40(1): 90—92.

(下转第 17 页)

- NING Xing-long. Titanium Materials for Naval Ships in Russia[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(6): 28—31.
- [3] 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. 稀有金属, 2000, 24(3): 218—223.
- QIAN Jiu-hong. Application and Development of New Titanium Alloys for Aerospace[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2000, 24(3): 218—223.
- [4] HEIMANN R B, VU T A. Low-pressure Plasma-sprayed (LPPS) Bioceramic Coatings with Improved Adhesion Strength and Resorption Resistance[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1997, 6(2): 145—149.
- [5] STOLTENHOFF T, KREYE H, RICHTER H J. An Analysis of the Cold Spray Process and Its Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2002, 11(4): 542—550.
- [6] 江礼, 王汉功, 侯根良, 等. 低温超音速火焰喷涂铜涂层性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(2): 48—50.
- JIANG Li, WANG Han-gong, HOU Gen-liang, et al. Preparation and Properties of Copper Coating by Low Temperature HVO/AF[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(2): 48—50.
- [7] KURODA S, WATANABE M, KIM K H, et al. Current Status and Future Prospects of Warm Spray Technology[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(4): 653—676.
- [8] 周克崧, 邓春明, 邓畅光, 等. Ti-Ni 低温超音速火焰喷涂层及激光处理后的特征[J]. 材料保护, 2009, 42(8): 62—64.
- ZHOU Ke-song, DENG Chun-ming, DENG Chang-guang. Microstructure and Phase Composition of Ti-Ni Coating Prepared by Low-temperature High Velocity Oxygen Fuel Spraying and of the Same Coating After Laser Treatment[J]. Materials Protection, 2009, 42(8): 62—64.
- [9] LIU M, DENG C M, DENG C G, et al. Densification of Low Temperature HVOF Ti Coating[C]//Proceeding of International Thermal Spray Conference, 2011. (余不详)
- [10] DENG C M, DENG C G, LIU M, et al. Corrosion of Ti Coating Prepared by Modified HVOF Process[C]//Proceeding of International Thermal Spray Conference, 2010. (余不详)
- [11] KAWAKITA J, KURODA S, KREBS S, et al. In-situ Densification of Ti Coatings by the Warm Spray (Two-stage HVOF) Process[J]. Materials Transactions, 2006, 47(7): 1631—1637.
- [12] KAWAKITA J, KURODA S, FUKUSHIMA T, et al. Dense Titanium Coatings by Modified HVOF Spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3): 1250—1255.
- [13] KURODA S, KAWAKITA J, WATANABE M, et al. Warm Spraying—A Novel Coating Process Based on High-velocity Impact of Solid Particles[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2008, 9(3): 1—17.
- [14] GULIZIAA S, TIGANIS B, JAHEDI M Z, et al. Effects of Cold Spray Process Gas Temperature on CP Titanium Structure[C]//Proceeding of International Thermal Spray Conference, 2009. (余不详)
- [15] WONG W, IRISSOU E, RYABININ A N, et al. Influence of Helium and Nitrogen Gases on the Properties of Cold Gas Dynamic Sprayed Pure Titanium Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(1/2): 213—226.
- (上接第5页)
- [9] 莫超超, 李长生, 晋跃, 等. 磁控溅射制备 TiWN/MoS₂ 膜及其微观结构和摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(3): 48—51.
- MO Chao-chao, LI Chang-sheng, JIN Yue, et al. Preparation of TiWN/MoS₂ Film by Magnetron Sputterin and Its Microstructure and Tribological Properties[J]. Surface Technology, 2011, 40(3): 48—51.
- [10] CHEN K, LIU C, WHALLEY D C, et al. A Comparative Study of the Interfacial Reaction between Electroless Ni-P Coatings and Molten Tin[J]. Acta Materialia, 2008, 56(19): 5668—5676.
- [11] MICHAEL Bromark, MATS Larsson, PER Hedenqvist, et al. Wear of PVD TiN/Ti Multilayer Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 90(3): 217—223.
- [12] 龚海飞, 邵天敏. TiN/Ti 多层膜韧性对摩擦学性能的影响[J]. 材料工程, 2009(10): 26—31.
- GONG Hai-fei, SHAO Tian-min. Influence of the Ductility of TiN/Ti Multilayer on the Tribology Property[J]. Journal of Material Engineering, 2009(10): 26—31.
- [13] ABDALLAH A E. Effect of Friction on Subsurface Stresses in Sliding Line Contact of Multilayered Elastic Solids[J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(26): 3903—3915.
- [14] 陈东, 谢华, 陈小文. TiN 涂层/基体接触应力有限元分析[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(3): 192—198.
- CHEN Dong, XIE Hua, CHEN Xiao-wen. Study on the Contact Stress of TiN Coating/Base[J]. Materials Research and Application, 2010, 4(3): 192—198.
- [15] 马占吉, 武生虎, 肖更竭. 电弧离子镀多层 Ti/TiN 厚膜组织和力学性能研究[J]. 中国表面工程, 2008, 21(3): 26—29.
- MA Zhan-ji, WU Sheng-hu, XIAO Geng-jie. Study on the Structure and Mechanical Properties of Arc Ion Plating Ti/TiN Thick Multilayers[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(3): 26—29.