

Zn-Al 伪合金涂层的耐蚀性能研究

黄钰¹, 程西云², 彭美华², 周彪²

(1. 汕头职业技术学院, 广东 汕头 515041; 2. 汕头大学 工学院, 广东 汕头 515063)

摘要: **目的** 提高电弧喷涂锌铝合金涂层中 Al 的含量。**方法** 用纯铝丝和 Zn80Al20 合金丝在 Q235 钢表面制备 Zn-Al 伪合金涂层,通过中性盐雾试验和电化学试验,与纯铝涂层和 Zn-Al 合金涂层进行对比,分析比较三种涂层在氯离子存在环境中的腐蚀行为。**结果** Zn-Al 伪合金涂层表现出了较高的活化能力和较低的腐蚀速度。**结论** Zn-Al 伪合金涂层的耐蚀性能优于纯铝涂层和 Zn-Al 合金涂层。

关键词: 电弧喷涂; 耐蚀性; 伪合金; 电化学腐蚀; 中性盐雾试验

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)01-0035-05

Corrosion Resistance Properties of Arc Sprayed Zn-Al Pseudo-alloy Coating

HUANG Yu¹, CHENG Xi-yun², PENG Mei-hua², ZHOU Biao²

(1. Shantou Polytechnic, Shantou 515041, China;

2. Engineering College, Shantou University, Shantou 515063, China)

ABSTRACT: **Objective** To enhance the Al content in the Zn-Al pseudo-alloy coating. **Methods** Zn-Al pseudo-alloy coating was prepared using aluminum and Zn80Al20 alloy by arc spraying on Q235 steel substrates. Salt spray test and electrochemical experiments were employed to compare the corrosion resistance behavior of the Zn-Al pseudo-alloy coating with the pure Al coating and Zn-Al alloy coating in chloride environments. **Results** The Zn-Al pseudo-alloy coating showed high activation capability and low corrosion rate. **Conclusion** The Zn-Al pseudo-alloy coating had higher corrosion resistance than the pure Al coating and Zn-Al alloy coating.

KEY WORDS: arc spraying; corrosion resistance; pseudo alloy; electrochemical corrosion; neutral salt spray test

国内外学者对 Zn-Al 合金涂层的防腐机理进行了大量研究,多数分析认为,Al 在大气中能够生成致密的氧化物表面膜,具有屏蔽腐蚀介质、保护基体的作用。在大量氯离子存在的环境中,氯离子会破坏氧化膜,形成孔蚀,当孔蚀不断“深挖”,腐蚀介质渗入涂层/基体界面时,涂层和基体组成电偶电池,涂层作为牺牲阳极对基体起保护作用,但涂层中 Al 生成的氧

化膜会削弱这种保护作用,而 Zn 的存在可以促进 Al 活化溶解,使涂层更好地发挥这种保护作用^[1-3]。一般认为,Zn-Al 合金涂层中 Al 的质量分数达到 30% 时,可取得较好的防腐效果,但这种合金由于锌铝比重相差悬殊,生产难度大,目前还没有问世^[4]。

为了提高 Zn-Al 合金涂层中 Al 的含量,文中尝试以纯铝丝和 Zn80Al20 合金丝为原材料,在 Q235 钢表

收稿日期: 2013-08-22; 修订日期: 2013-09-16

Received: 2013-08-22; Revised: 2013-09-16

基金项目: 广东省高等学校人才培养项目(20111408184002)

Fund: The Project of High Level Talents in Colleges of Guangdong Province(20111408184002)

作者简介: 黄钰(1978—),女,硕士,讲师,主要研究方向为金属热喷涂。

Biography: HUANG Yu(1978—), Female, Master; Lecturer, Research focus: metal hot spraying.

面制备 Zn-Al 伪合金涂层,并研究其耐蚀性能,拟为提高海洋环境中钢结构的防护效果提供技术依据。

1 试验

1.1 涂层制备

基体 Q235 钢的厚度约为 3 mm。所用纯铝丝和 Zn80Al20 合金丝 (Zn, Al 质量分数分别为 80% 和 20%) 直径均为 2 mm。

用改进的 SX-600 型高速电弧喷涂设备制备纯铝、Zn-Al 合金和 Zn-Al 伪合金涂层。喷涂前,基体试样经除油去污、喷砂预处理,喷砂采用 QF-6050A 型干喷砂机。电弧喷涂工艺经多次试验后,确定优化的参数:送丝电压 12 V,喷涂电流 100 A,喷涂电压 27 V,喷涂距离 150 mm,喷涂角度 90°,喷涂气压 0.4 MPa,走丝速度 100 mm/s。制备的三种涂层见表 1。

表 1 电弧喷涂涂层
Tab.1 Arc spraying coatings

| 试样 | 喷涂丝材 | 涂层 | Zn 质量 分数/% | 涂层厚 度/mm |
|----------------|----------------------|-----------------|---------------|-------------|
| 1 [#] | 纯铝丝 | Al | 0 | 0.2~0.3 |
| 2 [#] | Zn80Al20 合金丝 | Zn-Al 合金 | 80 | 0.2~0.3 |
| 3 [#] | 纯铝丝+ Zn80Al20 合金丝 | Zn-Al 伪合 金涂层 | 40 | 0.2~0.3 |

1.2 表征及检测

1) 采用 JEOLJSM-6360LA 型扫描电镜 (SEM) 观察涂层试样横截面的显微组织形貌。

2) 电化学试验。采用德国 Zahner IM6ex 电化学工作站,在 3% (质量分数) NaCl 中性溶液中进行电化学极化。电解池采用三电极体系:参比电极为饱和甘汞电极 (SCE),辅助电极为铂电极,工作电极为待测试样。溶液用去离子水配制,扫描速度为 2 mV/s,扫描范围为 -2000 ~ 1500 mV,试验温度为 26 ~ 27 ℃。试验结束后,用 D8 ADVANC 型 X 射线衍射仪检测分析涂层的腐蚀产物。

3) 中性盐雾试验。在 JK-60A 盐雾试验机上,用 5% (质量分数) NaCl 中性溶液对三种涂层试样、基体 Q235 钢和涂覆油漆的 Q235 钢进行连续喷雾试验。设置试验参数为:温度 35 ℃,压缩空气压力 0.1 MPa, pH 值 6.5。试验过程中分 5 次取样,5 次取样对应的连续喷雾时间分别为 24,72,240,312,360 h。

2 结果与分析

2.1 Zn-Al 伪合金涂层的显微组织

Zn-Al 伪合金涂层横截面的 SEM 形貌如图 1 所示。涂层为典型的层片状组织结构,存在比较多的孔隙。通过背散射图可以看出,涂层为两种不同金属的混合。

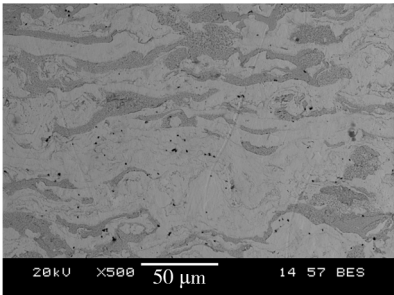


图 1 Zn-Al 伪合金涂层/基体界面 SEM 形貌
Fig.1 SEM morphology of the Zn-Al pseudo alloy coating

2.2 涂层的耐蚀性能

2.2.1 电化学极化曲线分析

三种涂层试样和基体 Q235 钢试样的极化曲线如图 2 所示,表 2 为根据极化曲线得到的电化学参数。

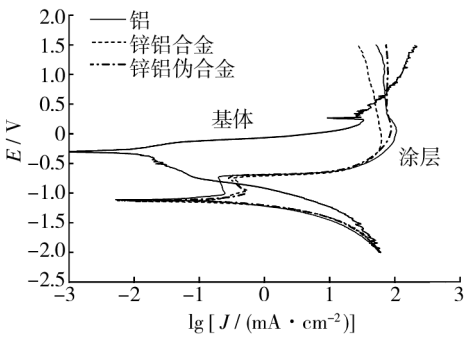


图 2 极化曲线
Fig.2 Polarization curves

表 2 相应的电化学参数
Tab.2 Electrochemical parameters

| 试样 | E_{corr}/V | E_p/V | E_D/V | $J_{corr} / (mA \cdot cm^{-2})$ |
|------------|--------------|---------|---------|---------------------------------|
| 纯铝涂层 | -1.103 | -0.985 | -0.715 | -1.606 |
| Zn-Al 合金涂层 | -1.135 | -0.950 | -0.740 | -1.486 |
| Zn-A 伪合金涂层 | -1.127 | -0.975 | -0.720 | -1.552 |
| 基体 Q235 钢 | -0.307 | | | -2.956 |

结合图 2 及表 2 可以看出,基体的自腐蚀电位 (E_{corr}) 最高,三种涂层的 E_{corr} 很接近,但是都比基体小很多,电位差在 0.8 V 左右。基体没有明显的钝化过程,腐蚀电流密度随着电位的增大而急剧增大;三种涂层则都有明显的钝化区间,纯铝涂层的钝化区间最宽(−0.985 ~ −0.715 V),Zn-Al 伪合金涂层次之(−0.975 ~ −0.720 V),Zn-Al 合金涂层的钝化区间最窄(−0.950 ~ −0.740 V),说明 Zn 元素可以促进 Al 的活化溶解,使活化电位 E_0 负移,也就是说涂层的钝化倾向随着含锌量的增加而降低。三种涂层的活化能力由大到小依次为:Zn-Al 合金涂层>Zn-Al 伪合金涂层>纯铝涂层。当电位超过活化(孔蚀)电位 E_0 ,涂层的电流密度急剧增大,这时涂层进入孔蚀阶段,腐蚀速度加快。材料的腐蚀电流密度 J_{corr} 与其腐蚀速率成正比,三种涂层中,腐蚀电流密度最低的是纯铝涂层,Zn-Al 伪合金涂层次之,最高的是 Zn-Al 合金涂层,因此腐蚀速度由大到小依次为:Zn-Al 合金涂层>Zn-Al 伪合金涂层>纯铝涂层,可见 Zn 对涂层的活化作用也使得涂层的腐蚀速度增大。综合考虑,纯铝涂层虽然具有较好的耐腐蚀性能,但其钝化倾向过大,活化能力低,不适合做牺牲阳极;而 Zn-Al 合金涂层虽然具有较高的活化能力,但较快的腐蚀速度会降低其使用寿命;因此相对而言,Zn-Al 伪合金涂层最适宜作为牺牲阳极对涂层起保护作用。

三种涂层腐蚀产物的 XRD 检测结果显示:纯铝涂层的腐蚀产物主要含有 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$;Zn-Al 合金和 Zn-Al 伪合金涂层的腐蚀产物以 $\text{Zn}(\text{OH})_2$, ZnO , $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 为主。Zn-Al 伪合金涂层的 XRD 分析结果如图 3 所示。

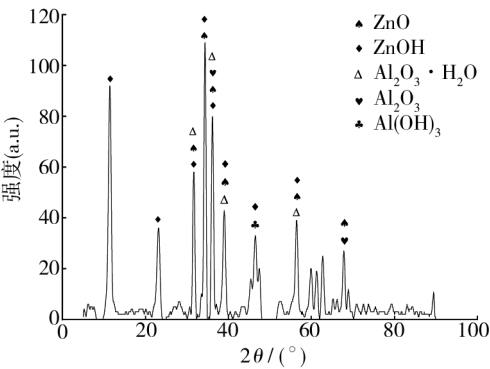


图 3 Zn-Al 伪合金涂层腐蚀产物的 XRD 图

Fig.3 X-ray diffraction pattern of the corrosion products of the composite coating

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 是一种致密且具有较高极化电阻的含水氧化膜,覆盖在涂层表面对涂层有一种封闭作

用。 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 脱水也会生成 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 表面膜。 ZnO 比较疏松,易溶。 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 的附着力比较强,能够沉积在涂层表面,限制腐蚀介质的渗入,降低涂层的腐蚀速率。Zn-Al 合金涂层和 Zn-Al 伪合金涂层作为牺牲阳极溶解的电化学反应式是: $\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + \text{H}_2 \uparrow$, $\text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2 + \text{H}_2 \uparrow$ 。在 Zn-Al 合金和 Zn-Al 伪合金涂层中,由于 Zn 在 Al 中的最大溶解度仅 2%,因此当锌含量较高时,富锌成分沿晶间偏析,晶界出现伪共晶组织,Al 和 Zn 形成宽广的 α 固溶体区域。 α 固溶体内的 Zn 相对于 Al 是阳极性组分,富锌成分相对于 α 固溶体也是阳极性组分,在与电解质接触的界面处,由于电偶腐蚀的作用,Zn 原子和富锌成分优先溶解,在涂层表面形成点蚀孔,破坏表面氧化膜的完整性和致密性,促使涂层表面均匀溶解,主要生成 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉积, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 脱水又生成高电阻 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 表面膜覆盖于涂层表面。与此同时,还原反应析出的 H_2 对 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 表面膜有剥离破坏作用,从而暴露出新鲜的涂层表面,促使点蚀孔进一步扩大,活化溶解继续进行。整个过程中,表面膜不断被破坏,又不断地修补,一定量富锌相的存在会使表面膜修补速度小于破坏速度,促使涂层均匀溶解,因此随着 Zn 含量的增加,涂层的自封闭效果变差^[5-7]。

2.2.2 中性盐雾试验结果分析

中性盐雾试验考察了 5 种试样的耐蚀性。连续喷雾 24 h 时,只有 Q235 钢基体发生了腐蚀,表面出现黄锈,三种金属涂层表面颜色发暗,油漆试样没有发生变化;连续喷雾 72 h,三种金属涂层表面都发生了腐蚀,涂层局部表面覆盖有白锈,油漆试样边缘出现黄锈;连续喷雾 240 h,三种金属涂层表面全部被白锈覆盖,油漆试样表面遍布黄锈;连续喷雾 312 h,纯铝涂层和 Zn-Al 合金涂层表面都出现了少量的黄锈,纯铝涂层的黄锈相对更多一些,Zn-Al 伪合金涂层表面的白锈无明显变化;连续喷雾 360 h,纯铝涂层和 Zn-Al 合金涂层表面黄锈明显增多,Zn-Al 伪合金涂层表面才开始出现黄锈。

盐雾试验结果说明:在含 Cl^- 的盐雾介质中,Q235 钢基体抗腐蚀能力很差;油漆对基体的防护作用至多维持 24 h;三种金属涂层对基体的防护作用都在 214 h 以上,其中 Zn-Al 伪合金涂层甚至达到 312 h 以上,防腐效果优于另外两种涂层。纯铝涂层表面出现的白锈主要成分是致密且附着力很强的 Al_2O_3 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ ^[6-9],Zn-Al 合金涂层和 Zn-Al 伪合金涂层表

面的白锈以组织较为疏松的 ZnO 和 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 为主,也含有少量致密的 Al_2O_3 和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ [10-11]。三种金属涂层表面的白锈在一定程度上封闭了涂层中的孔隙,对涂层起到了屏蔽保护作用 [12-13]。

试验中用扫描电镜观察了三种金属涂层试样经盐雾试验 240 h 后的表面形貌和断面形貌, Zn-Al 伪合金涂层的形貌见图 4。可以看出, Zn-Al 伪合金涂层表面堆积了一层白色的致密腐蚀产物,阻止了腐蚀介质向涂层内部渗透,涂层覆盖下的基体没有发生腐蚀 [14-16]。

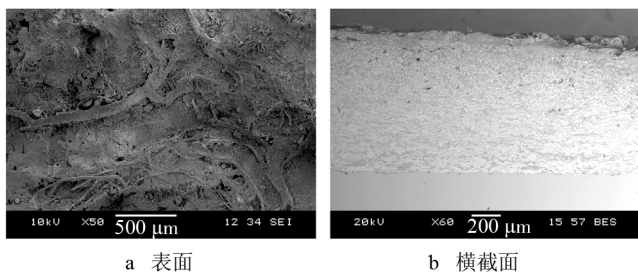


图 4 Zn-Al 伪合金涂层的 SEM 形貌

Fig. 4 SEM morphology of the composite coating

3 结论

1) Zn-Al 伪合金涂层在腐蚀的过程中生成了 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 钝化膜,与 ZnO 和 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 等腐蚀产物一起沉积,在腐蚀初期对基体起到一种屏蔽保护作用,但这种屏蔽作用是有时间限制的。

2) 腐蚀后期,腐蚀介质渗入到涂层/基体界面,涂层的屏蔽作用消失,此时涂层作为牺牲阳极对基体起保护作用。 Zn-Al 伪合金涂层的钝化倾向低于纯铝涂层,同时也表现出优于 Zn-Al 合金涂层的耐腐蚀性能,是三种涂层中最适宜作为牺牲阳极的材料。

参考文献

[1] 秦熊浦. 设备腐蚀与防护[M]. 西安:西北工业大学出版社,1995:20—23.
QIN Xiong-pu. Corrosion and Protection of Equipment[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1995: 20—23.

[2] 徐滨士,马世宁,刘世参,等. 电弧喷涂技术在防腐工程中的应用及进展[J]. 装甲兵工程学院学报,1999,13(1):1—5.
XU Bin-shi, MA Shi-ning, LIU Shi-can, et al. Application and Development of Arc Spraying Technology in Anti Corro-

sion Engineering [J]. Journal of the Academy of Armored Forces Engineering, 1999, 13 (1): 1—5.

[3] PRENGER Frank, SPRIESTERSBACH Jochen, 张康. 锌及锌铝合金热喷涂涂层的腐蚀防护研究[J]. 热喷涂技术, 2012, 4(3): 71—75.
PRENGER Frank, SPRIESTERSBACH Jochen, ZHANG Kang. Study on Corrosion of Zinc and Zinc Aluminum Alloy Thermal Spraying Coating [J]. Thermal Spray Technology, 2012, 4(3): 71—75.

[4] 信绍广,朱伟,李军. 钢铁热喷涂金属涂层耐蚀性能的研究进展[J]. 金属世界,2012(1):16—19.
XIN Shao-guang, ZHU Wei, LI Jun. Development of Corrosion Resistance of Steel with Thermal Spraying Metal Coating [J]. Metal World, 2012(1): 16—19.

[5] 朱子新,徐滨士,陈永雄. Al 含量对 Zn-Al 合金涂层电化学腐蚀行为的影响[J]. 中国表面工程,2011,24(6): 58—61.
ZHU Zi-xin, XU Bin-shi, CHEN Yong-xiong. Effect of Al Content on Electrochemical Corrosion Behavior of Arc Sprayed Zn-Al Coatings [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(6): 58—61.

[6] 徐荣正,宋刚,刘黎明. 铝合金表面电弧喷涂铝涂层工艺与性能[J]. 焊接学报,2008,29(6):109—112.
XU Rong-zheng, SONG Gang, LIU Li-ming. Microstructure and Properties of Arc Sprayed Aluminum Coating on Al Alloy Surface [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 109—112.

[7] 郝小军,宋诗哲. 铝锌合金在 3% NaCl 溶液中的电化行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,2005,25(4):213—217.
HAO Xiao-jun, SONG Shi-zhe. EIS Study of Activation Mechanism of Zinc in Aluminum Zinc Alloy [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005, 25(4): 213—217.

[8] 屈庆,严川伟,白玮,等. NaCl 在 A3 钢大气腐蚀中的作用[J]. 中国腐蚀与防护学报,2003,23(3):160—163.
QU Qing, YAN Chuang-wei, BAI Wei, et al. Role of NaCl in the Atmospheric Corrosion of A3 Steel [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2003, 23(3): 160—163.

[9] 王真,宋刚,刘黎明. 铝合金电弧喷涂纯铝涂层的耐蚀性能[J]. 材料保护,2008,41(7):61—65.
WANG Zhen, SONG Gang, LIU Li-ming. Corrosion Resistance of Arc-sprayed Aluminum Coating on Aluminum Alloy [J]. Materials Protection, 2008, 41(7): 61—65.

[10] 刘燕,朱子新,马洁,等. 基于电化学阻抗谱的 Zn 及 Zn-Al 涂层的自封闭机理研究[J]. 中国表面工程,2005(2):27—30.
LIU Yan, ZHU Zi-xin, MA Jie, et al. Study on Self-sealing

- Mechanism of Zn and Zn-Al Coating Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. China Surface Engineering, 2005(2):27—30.
- [11] 刘毅,魏世丞,徐滨士. Zn-Al 涂层腐蚀电化学行为研究[J]. 功能材料, 2011(增刊 II):226—229.
- LIU Yi, WEI Shi-cheng, XU Bin-shi. Electrochemical Behavior of Zn-Al Coating in CASS[J]. Journal of Functional Materials, 2011(Supplementary Issue II):226—229.
- [12] 王成虎,吴洵. 高速公路隔离栅热浸镀锌和铝铝合金镀层的对比分析[J]. 表面技术, 2009, 38(6):94—96.
- WANG Cheng-hu, WU Xun. Comparative Analysis of Zinc Coat and Zn-Al Alloy Coat in Highway Fence[J]. Surface Technology, 2009, 38(6):94—96.
- [13] 陈长江,李秉忠. 电弧喷涂 Zn-Al 伪合金涂层电化学腐蚀性能研究[J]. 航海工程, 2009, 38(6):102—104.
- CHEN Chang-jiang, LI Bing-zhong. Study on the Electrochemical Corrosion Properties of Arc-sprayed Pseudo Zn-Al Alloy Coating[J]. Ship & Ocean Engineering, 2009, 38(6):102—104.
- [14] 李秉忠,王昌辉,董志红,等. 电弧喷涂 Zn/Al 伪合金涂层耐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2008(4):31—32.
- LI Bing-zhong, WANG Chang-hui, DONG Zhi-hong, et al. Corrosion Resistance of Arc-sprayed Pseudo Zn-Al Alloy Coating[J]. Materials Protection, 2008(4):31—32.
- [15] 付东兴,徐滨士,李庆芬,等. 高速电弧喷涂技术在防腐工程领域的研究现状[J]. 材料导报, 2007, 21(3):94—100.
- FU Dong-xing, XU Bin-shi, LI Qing-fen, et al. Research Status of High Velocity Arc Spraying Technology in Anti-corrosion Engineering Field[J]. Materials Review, 2007, 21(3):94—100.
- [16] 徐小平,马世宁,胡军志. Al 及 Al-Re 高速电弧喷涂层性能的研究[J]. 表面技术, 2005, 34(3):25—26, 29.
- XU Xiao-ping, MA Shi-ning, HU Jun-zhi. Progress in Applying HVAS Technology to Maintenance & Remanufacture Engineering[J]. Surface Technology, 2005, 34(3):25—26, 29.
- (上接第6页)
- [23] MATTOX D M. Particle Bombardment Effects on Thin-film Deposition: A Review[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1989, 7(3):1105—1114.
- [24] PALDEY S, DEEVI S C, ALFORD T L. Cathodic Arc Deposited Thin Film Coatings Based on TiAl Intermetallics[J]. Intermetallics, 2004, 12(7/8/9):985—991.
- [25] PALDEY S, DEEVI S C. Single Layer and Multilayer Wear Resistant Coatings of (Ti, Al)N: A Review[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 342(1/2):58—79.
- [26] LIANG C L, CHENG G A, ZHENG R T, et al. Fabrication and Performance of TiN/TiAlN Nanometer Modulated Coatings[J]. Thin Solid Films, 2011, 520(2):813—817.
- [27] TSUTOMU I, HIROSHI S. Phase Formation and Characterization of Hard Coatings in the Ti-Al-N System Prepared by the Cathodic Arc Ion Plating Method[J]. Thin Solid Films, 1991, 195(1/2):99—110.
- [28] MENDIBIDE C, STEYER P, FONTAINE J, et al. Improvement of the Tribological Behaviour of PVD Nanostratified TiN/CrN Coatings—An Explanation[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(7):4119—4124.
- [29] KNOTSSON A, JOHANSSON M P, KARLSSON L, et al. Thermally Enhanced Mechanical Properties of Arc Evaporated $\text{Ti}_{0.34}\text{Al}_{0.66}\text{N}$ /TiN Multilayer Coatings[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(4):044312-1—7.
- [30] MEI F, SHAO N, WEI L, et al. Coherent Epitaxial Growth and Superhardness Effects of c-TiN/h-TiB₂ Nanomultilayers[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(1):011906-1—3.
- [31] YUE J, LI G Y. Microstructure and Mechanical Properties of TiAlN/Si₃N₄ Nano-multilayers Synthesized by Reactive Magnetron Sputtering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 481(1/2):710—713.
- [32] ESPINOZA-BELTRAN F J, CHE-SOBERANIS O, GARCIA-GONZALEZ L, et al. Effect of the Substrate Bias Potential on Crystalline Grain Size, Intrinsic Stress and Hardness of Vacuum Arc Evaporated TiN/c-Si Coatings[J]. Thin Solid Films, 2003, 437(1/2):170—175.
- [33] CHU X, BARNETT S A. Model of Superlattice Yield Stress and Hardness Enhancements[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 77(9):4403—4411.
- [34] SHINN M, BARNETT S A. Effect of Superlattice Layer Elastic Moduli on Hardness[J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(1):61—63.
- [35] MIRKARIMI P B, HULTMAN L, BARNETT S A. Enhanced Hardness in Lattice-matched Single-crystal TiN/V_{0.6}Nb_{0.4}N Superlattices[J]. Applied Physics Letters, 1990, 57(25):2654—2656.
- [36] 程东. Cu/Ni 纳米多层膜微观强化机理及微摩擦学特性的分子动力学模拟[D]. 大连:大连海事大学, 2005.
- CHENG Dong. Research on Strengthening Micromechanisms and Tribological Behaviour of Cu/Ni Multilayers with Molecular Dynamic Simulations[D]. Dalian:Dalian Maritime University, 2005.