doi：10.11933/j.issn.1007-9289.2015.04.014

Cr-Ti-N 系多层膜成分及周期对抗冲蚀性能的影响 *

金 杰[1]，黄晓林[1]，孟祥宇[1]，陈蕴博[2]，高克玮[3]

(1. 北京机械工业自动化研究所 电器物理设备与应用工程技术中心，北京 100120；2. 机械科学研究总院先进制造技术研究中心 先进成形技术与装备国家重点实验室，北京 100083；3. 北京科技大学 材料科学与工程学院，北京 100083)

摘 要： 苛刻环境下发动机组件存在严重的固体颗粒(SPE)冲蚀，导致其可靠性降低。为研究多层膜成分及调制周期对膜层冲蚀性能的影响，利用金属蒸发真空弧离子源(MEVVA)和磁过滤阴极真空弧复合离子束沉积技术在 AM355 基材表面制备交替周期分别为 5、13 和 26 的 3 组 $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$、$TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 多层膜。采用微粒喷浆冲蚀试验机、场发射扫描电子显微镜(FESEM)、X 射线衍射仪(XRD)等对膜层冲蚀性能、形貌及物相结构进行测试表征。结果表明：采用该技术制备的 $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$、$TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 多层膜结构致密、交替层变化明显。随着交替周期的增加，两体系多层膜的晶面间距减小，抗冲蚀性能得到提高，分别提高了 8 倍和 20 倍以上。

关键词： 磁过滤阴极真空弧；多层膜；交替周期；冲蚀性能

中图分类号： TG174.444 **文献标志码：** A **文章编号：** 1007-9289(2015)04-0105-08

Influence of Cr-Ti-N Multilayers with Different Periods and Constituents on Erosion Resistance Performance

JIN Jie[1], HUANG Xiao-lin[1], MENG Xiang-yu[1], CHEN Yun-bo[2], GAO Ke-wei[3]

(1. Engineering Research Center for Electrophysical Apparatus and Application Technology, Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry, Beijing 100120; 2. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Advanced Manufacture Technology Center, China Academy of Machinery Science & Technology, Beijing 100083; 3. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: Under harsh environments, the components in aircraft operating often endure decreasing reliability caused by solid particle erosion (SPE) degradation. In order to study the influences of different periodic multilayers on erosion performance, the 5, 13 and 26 periodic multilayers of $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ and $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ were prepared on AM355 substrates. Erosion resistance, surface characteristics and phase structure of different periodic multilayers were studied by employing solid particle impact machine (slurry jet), field emission scanning electron microscope (FESEM) and X-ray diffraction. The results show that the films are compacted with distinctly alternated layers. With the increase of the period, the crystal plane spacing becomes smaller, and the films exhibit great erosion resistance with 8 and 20 times improvement, respectively.

Keywords: magnetic filter cathodic vacuum arc; multilayers; alternating period; erosion resistance

0 引 言

AM355 为半奥氏体沉淀硬化钢，其旋转弯曲疲劳强度可以达到 620 MPa 以上，同时具有优良的抗蠕变、耐腐蚀性能，因此被广泛应用在发

收稿日期： 2015-03-03；**修回日期：** 2015-06-17；**基金项目：** *北京机械工业自动化研究所所基金(10211169032)

通讯作者： 金杰(1980－)，男(汉)，高级工程师，博士；**研究方向：** 离子束表面改性、腐蚀及摩擦学；**Tel：** (010) 8228 5250；**E-mail：** ion_techonlogy@163.com

网络出版日期： 2015-06-23 17：12；**网络出版地址：** http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150623.1712.008.html

引文格式： 金杰，黄晓林，孟祥宇，等. Cr-Ti-N 系多层膜成分及周期对抗冲蚀性能的影响 [J]. 中国表面工程，2015，28(4)：105-112. Jin J，Huang X L，Meng X Y，et al. Influence of Cr-Ti-N multilayers with different periods and constituents on erosion resistance performance [J]. China Surface Engineering，2015，28(4)：105-112.

动机压气机的叶片及叶片盘上，保证了压气机在复杂工作环境下的稳定气动性传输。但是，工作过程中压气机叶片不可避免地要受到固体颗粒的冲蚀而发生尺寸变形，甚至产生断裂失效。为了提高叶片的强度，延长其使用寿命，国内外除了开发新型叶片材料及其制备技术外，还进行了涂层表面的强化研究[1]。相比于新材料的制备，涂层的表面强化具有成本低、技术难度小以及性能提升可观等优点。

国际上已有应用于压气机叶片强化涂层的商业化生产机构[2]，国内也有相关单位开展了强化涂层的商业化研究。抗冲蚀性能的涂层研究主要集中在多元涂层体系的开发（如掺杂不同元素实现三元、四元等体系[3]）、涂层结构的设计（如多层交替周期涂层[4]、纳米晶/非晶复合涂层[5]）及相关强化机理[6]与计算[7]、表征技术研究[8-10]等方面。

在交替周期涂层研究中，不同组分的复合所带来的抗冲蚀性能差异具有明显地不同，Y Iwai[11]研究指出 TiN 与 CrN 复合的 TiN/CrN 涂层抗冲蚀性能反而比 TiN 涂层的差；而 TiN/TiAlN 复合的抗冲蚀性能则明显比 TiN 的提高。对于同一体系的交替层，P. Wieciński 的研究指出在总厚度一致下，交替层 Cr/CrN 的厚度占比对其抗冲蚀性能存在较大影响，并指出 $Q_{Cr/CrN}=0.81$ 是最佳抗冲蚀性能占比[12]。

文中基于以上涂层研究规律以及前期钛合金基体上不同体系膜层的抗冲蚀性能表现[13]，在三元 Ti-Cr-N 膜层体系基础上，进一步复合 Cr-N 和 Ti-N，形成不同交替周期的 $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 和 $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 复合膜，在统一总厚度参数条件下，就多层膜组分及其交替周期数对其抗冲蚀性能的影响进行了更进一步地研究。

1 材料与方法

1.1 试验设备

试验设备为北京机械工业自动化研究所自行研制的离子束复合镀膜设备（型号 MEVVA-1510&FAD-90+0）[11]，该设备可实现镀膜与注入的复合工艺。镀膜采用磁过滤阴极真空弧放电沉积系统，阴极靶为纯铬靶和纯钛靶；CrN_x 或 TiN_y 沉积过程只开启单一弧源，通氮气；CrTiN 沉积过程开启双弧源，通氮气。采用金属蒸气真空弧放电离子源进行 Cr^+（或 Ti^+）的注入。

1.2 样品制备

基材为 AM355 钢，主要化学成分见表 1。合金棒材经线切割成 Φ 20 mm×8 mm 的圆柱盘。镀膜面采用碳化硅砂纸逐级打磨至 2 000 号，然后研磨膏抛光。再依次采用丙酮、乙醇超声清洗，真空烘干。

表 1 AM355 的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of the AM355

(w/%)

Elements	C	Cr	Ni	Mo
Content	0.1-0.15	15.0-16.0	4.0-5.0	2.5-3.25
Elements	Mn	Si	P	Fe
Content	0.5-1.25	≤0.50	≤0.04	Bal.

基材在膜层沉积之前先采用 5 kV 低能溅射清洗 10 min，之后进行 Cr^+（或 Ti^+）注入，注入能量 28 kV，注入时间 20 min，束流为 12～15 mA。经离子注入实现预过渡区后，沉积一层约 100 nm 厚 Cr 或 Ti 的金属过渡层。

利用双弧源及工装定位系统实现 CrN_x 或 TiN_y 与 $Ti_mCr_{1-m}N$ 的交替沉积，制备 $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 与 $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 两种体系。其中氮气流量 80 cm^3/min，真空度为 4.0×10^{-2} Pa（CrN/TiN）与 3.0×10^{-2} Pa（$Ti_mCr_{1-m}N$）。膜层生长负偏压－150 V。为减弱离子镀过程的温升及大颗粒影响，制膜过程中选取较大靶基距，稳定控制沉积靶流，沉积温度维持在 200～250 ℃。

$CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 制备过程的靶流变化见图 1。可知：CrN_x 沉积过程的靶流约为(550±60) mA，$Ti_mCr_{1-m}N$ 沉积过程的靶流约为(850±60) mA，靶流控制相对稳定，$TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 沉积靶流变化行为基本同上。交替层变化周期设置为 5、13 和 26，即交替层数为 10 层、26 层和 52 层。交替膜中 CrN_x/TiN_y 与 $Ti_mCr_{1-m}N$ 沉积时间比为 1∶1，即 $t(CrN_x/TiN_y):t(Ti_mCr_{1-m}N)=1:1$。总沉积时间 274 min。

1.3 形貌观察

表面形貌采用 Hitachi S4800 场发射扫描电子显微镜进行观察，膜层成分信息采用能谱检测。

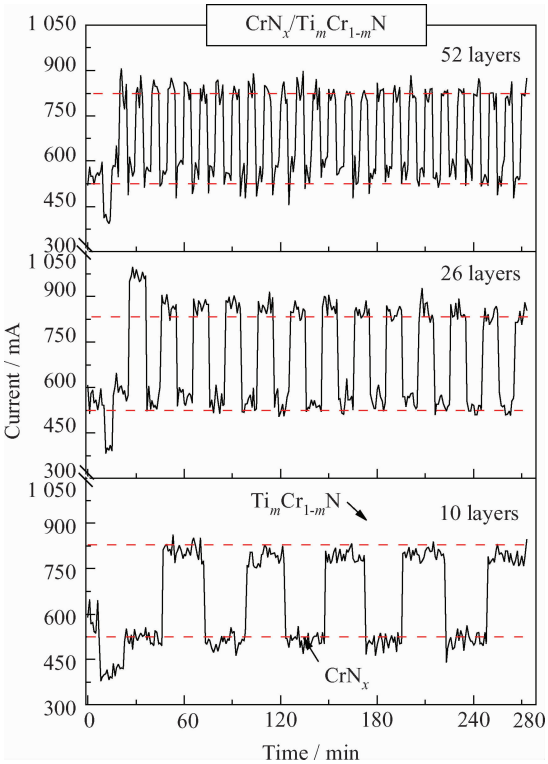


图 1　$CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 多层膜沉积过程的靶流变化

Fig. 1　Target current changes of the $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ alternative multilayers during deposition process

对冲蚀样品进行电母粉镶样，打磨，用以观察冲蚀斑及其附近膜层的截面形貌。同时根据划痕测试样品，沿垂直结合力测试方向制备截面样品，观察不同压应力划痕下膜层的截面形貌。

1.4　冲蚀性能测试

采用 MSE Tester S201 微粒喷浆冲蚀试验机[11]和 BMT Mini Profiler 触针式轮廓仪进行膜层的抗冲蚀性能评价。冲蚀介质为气液固三相介质流，冲蚀粒子为 Al_2O_3，平均粒径为 1.2 μm，冲蚀浆体的质量分数为 3%，标准磨损力测试下浆体流速为 125 mL/min，喷射角度为 90°，冲蚀面积 1 mm^2。为保证试验参数的统一性，冲蚀力选取标准值，每次控制冲蚀粒子质量 2 g，定位冲蚀斑位置处，检测每次冲蚀后样品的表面轮廓，记录样品的磨损深度。以单位冲蚀粒子质量的冲蚀深度评价膜层抗冲蚀性能。

1.5　物相检测

利用 X 射线衍射仪表征膜层物相结构，X 射线管为 Cu 靶阴极，加速电压 40 kV，电流 30 mA。连续扫描模式，角度扫描范围 10°～80°，扫描速度 2 °/min，取样间隔 0.02°。

1.6　截面样品制备

对冲蚀样品进行电母粉镶样，打磨，用以观察冲蚀斑及其附近膜层的截面形貌。同时根据划痕测试样品，沿垂直结合力测试方向制备截面样品，观察不同压应力划痕下膜层的截面形貌。

2　结果与讨论

2.1　膜层的形貌

图 2 为 $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 与 $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$

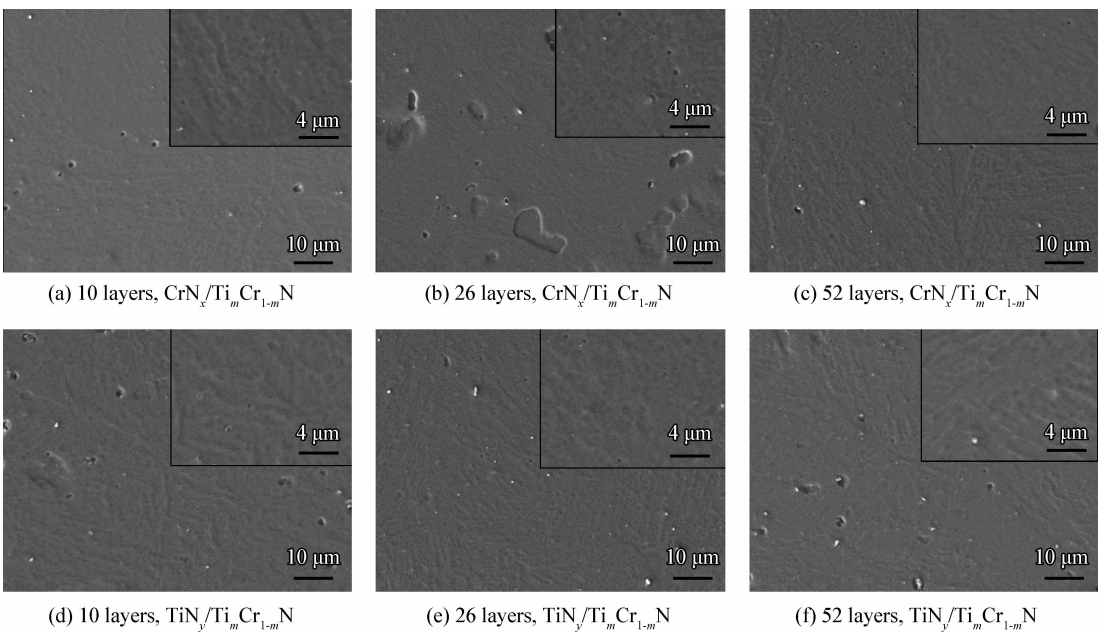


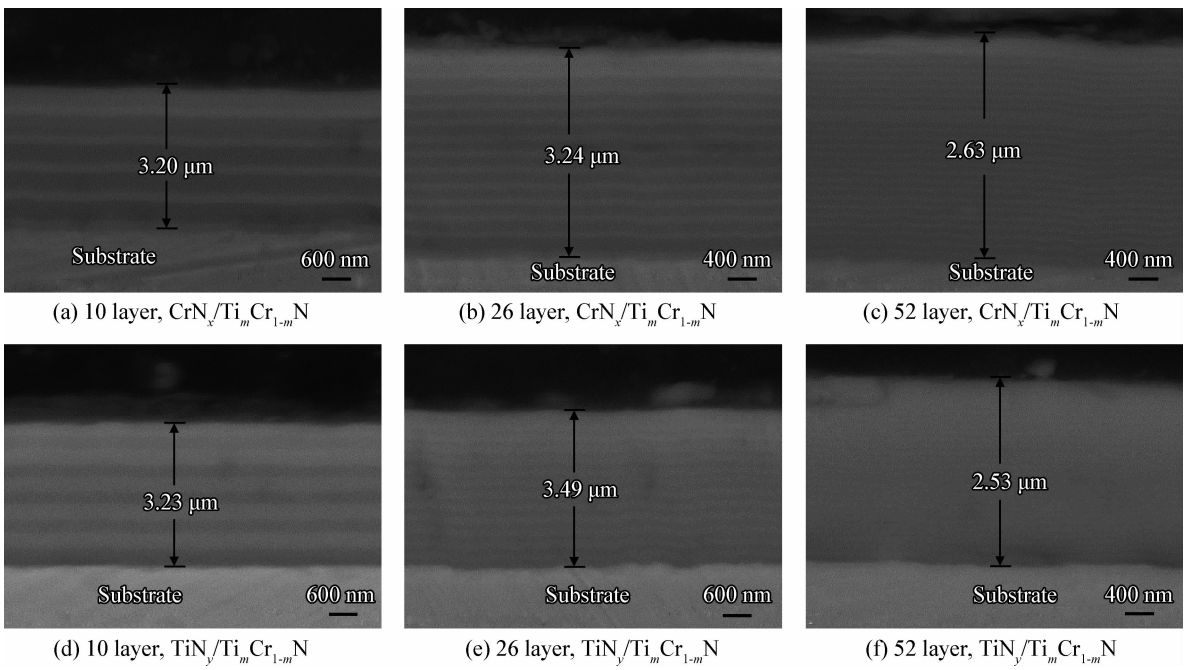
图 2　$CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 和 $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 多层膜的表面形貌

Fig. 2　Surface morphologies of the $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ and $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ multilayers

两种膜层的表面形貌。由图 2 可知：膜层表面致密、无孔洞，存在少量的大颗粒留下的缺陷点（大部分大颗粒粒径在 3 μm 以下）。

进一步放大观察图 2，可见膜层表面非常光滑。在控制膜层生长条件的情况下，两种体系的膜层生长均匀致密，交替层阻碍了晶粒生长过快而形成的柱状晶组织。

图 3 为 $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 和 $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 两种膜层的截面形貌。两种体系膜层的交替层非常明显，交替层中 CrN_x 与 $Ti_mCr_{1-m}N$、TiN_y 与 $Ti_mCr_{1-m}N$ 的厚度比基本控制在 1∶1。同时可看出膜层生长均匀，交替层在微小表面起伏中仍能保持相同厚度分布。膜层总厚度在（3 000±500）nm 左右，减小了后续冲蚀性能测试中膜层厚度的影响行为。且后文冲蚀磨损率曲线可验证膜层厚度基本控制在 3 μm。



(a) 10 layer, $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$　(b) 26 layer, $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$　(c) 52 layer, $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$

(d) 10 layer, $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$　(e) 26 layer, $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$　(f) 52 layer, $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$

图 3　$CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 和 $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 多层膜的截面形貌

Fig. 3　Cross section morphologies of the $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ and $TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ multilayers

2.2　膜层的成分与物相

采用能谱测试两种膜层的成分，结果显示 $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 膜层中 Cr∶Ti∶N（原子比）≈20∶30∶50，$TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 膜层中 Cr∶Ti∶N≈10∶40∶50。各膜层中 N 原子占比达到 50%，金属 Cr、Ti 总占比达到 50%，在不同体系中 Cr、Ti 占比存在一定差异。从成分判断，膜层主要组成为 Ti-N，实现了不同占比的 Cr 掺杂。

进一步对膜层进行物相测试，如图 4 所示。由图可知：多层膜物相主要为 TiN、CrN，且尚未形成明显的 $Ti_mCr_{1-m}N$，膜层沉积中 Ti^+、Cr^+ 各自与 N 的化合相对两金属离子与 N 共同化合更容易，CrN 的形成一般需要经历 Cr_2N 等中间产物的生成过程。$Ti_mCr_{1-m}N$ 的中间反应历程可能更加复杂，以至在未形成 $Ti_mCr_{1-m}N$ 之前便可能以 TiN、CrN 的中间反应物作为最终的产物呈现。

因此若要形成 $Ti_mCr_{1-m}N$ 则需要在反应历程中实施一定的干预，如改变反应温度、气压等。试验中的沉积温度约为 220～250 ℃，不同于 $Ti_{0.83}Cr_{0.17}N$ 等一系列 $Ti_mCr_{1-m}N$ 膜层的沉积温度（300 ℃）[14]，因此所制备的 Cr-Ti-N 系膜的物相为 NaCl 型的 TiN 和 CrN，无 $Ti_mCr_{1-m}N$ 的复合物。

XRD 图谱进一步显示交替层中两物相具有不同的择优取向生长，其中最强峰来自 TiN（111），分布角度约在 34°～36°，其次 TiN（222）衍射峰，分布角度在 75°～77°；CrN（200）分布在 42°～44°。比较衍射峰位置变化，可见各体系随着交替周期的增加，衍射峰向大角度的方向移动，根据布拉格方程：

$$2d \cdot \sin\theta = \lambda \tag{1}$$

其中，λ 为 X 射线波长，d 为晶面间距，θ 为衍

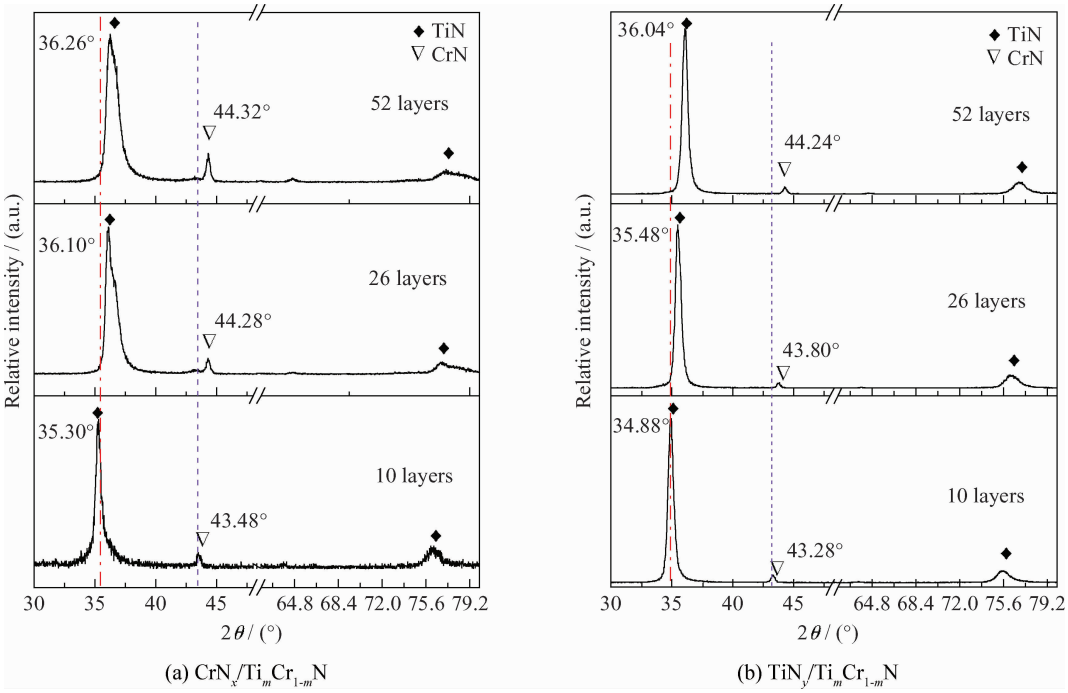


图 4　CrN$_x$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N 和 TiN$_y$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N 多层膜的 XRD 图谱

Fig. 4　XRD patterns of the CrN$_x$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N and TiN$_y$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N multilayers

射角。可知：随交替周期的增加，衍射角 θ 不断增大（见图 4），因此多层膜的晶面间距不断减小。

另在 75°～77°范围处存在宽化的衍射峰，表明膜层中含有一定的弱晶或者非晶 TiN(222)。文献[15]研究发现非晶带出现在界面处，如薄膜与过渡层、过渡层与基体，因此分析认为该弱晶或者非晶层可能存在于交替层的界面处。

2.3　多层膜的冲蚀性能

多层膜的冲蚀性能测试结果如图 5 和表 2 所示。基体冲蚀磨损率较为一致，从表 2 统计的各

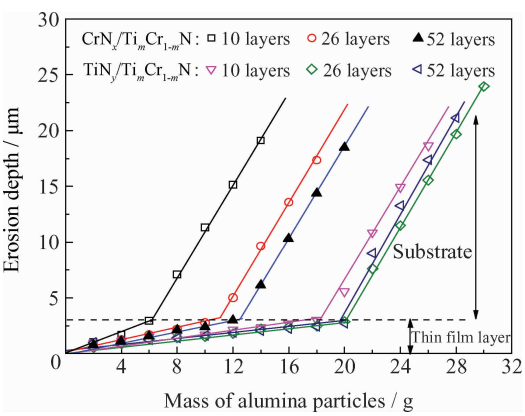


图 5　冲蚀深度随冲蚀粒子质量的变化曲线

Fig. 5　Variation curves of the erosion depth depend on the erosion particle mass

表 2　CrN$_x$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N 和 TiN$_y$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N 多层膜的冲蚀磨损率

Table 2　Erosion wear rates of the CrN$_x$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N and TiN$_y$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N multilayers

Wear rates/ (μm · g^{-1})	CrN$_x$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N			TiN$_y$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N		
	10	26	52	10	26	52
Coatings	0.347	0.261	0.237	0.123	0.102	0.097
Substrate	2.046	2.068	2.049	2.063	2.078	2.027
Improve multiple	5.90	7.92	8.65	16.77	20.37	20.90

膜层冲蚀磨损率中亦可看出基体冲蚀磨损率基本在 2.03～2.08 μm/g 之间，重现性好。

不同膜层具有不同的冲蚀磨损率。TiN$_y$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N 膜层比 CrN$_x$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N 膜层具有更优良的抗冲蚀性，各自最高可分别提升 20 倍和 8 倍。从表 2 还可以看出：CrN$_x$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N 膜层随交替周期的增加提升强度从 5.90 倍增加到 8.65 倍；而 TiN$_y$/Ti$_m$Cr$_{1-m}$N 则从 16.77 倍增加到 20.90 倍，两种体系膜层的抗冲蚀性能皆随交替周期的增加而提高。从冲蚀磨损率看，膜层的成分体系相比交替周期对膜层抗冲蚀性能影响效果更明显。

图 6 为不同质量冲蚀粒子作用下 CrN$_x$/

$Ti_mCr_{1-m}N$ 多层膜的冲蚀斑中心轮廓曲线，图中纵坐标值的绝对值表示冲蚀斑距离薄膜表面的深度，原始位置为薄膜表面，设定为零。由图 6 可以发现一旦多层膜被冲蚀掉（约消耗 10 g 冲蚀粒子），继续控制冲蚀粒子流量对基体进行冲蚀，其冲蚀深度的增加速率明显增大，表现出膜层对基体良好的冲蚀保护作用。

图 7(a)为冲蚀斑边缘膜层的减薄行为，膜层厚度随冲蚀作用加强（沿冲蚀斑方向）在不断减薄，但在冲蚀挤压-薄片剥落的磨损过程中，膜层内部未出现明显的开裂裂纹，或其裂纹很小，而只达到单个交替薄层厚度的尺度。图 7(b)显示部分区域的膜层在冲蚀减薄过程中，存在未完全磨耗而提前失效的情况，导致该膜层下基体因失去保护作用而被迅速冲蚀磨耗。

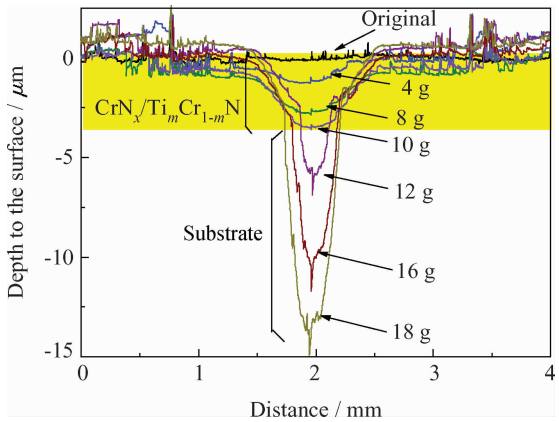


图 6 不同质量冲蚀粒子作用下 $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 多层膜的冲蚀斑中心轮廓曲线

Fig. 6 Surface profiles along the center-line of the square jet scar of the $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ multilayers

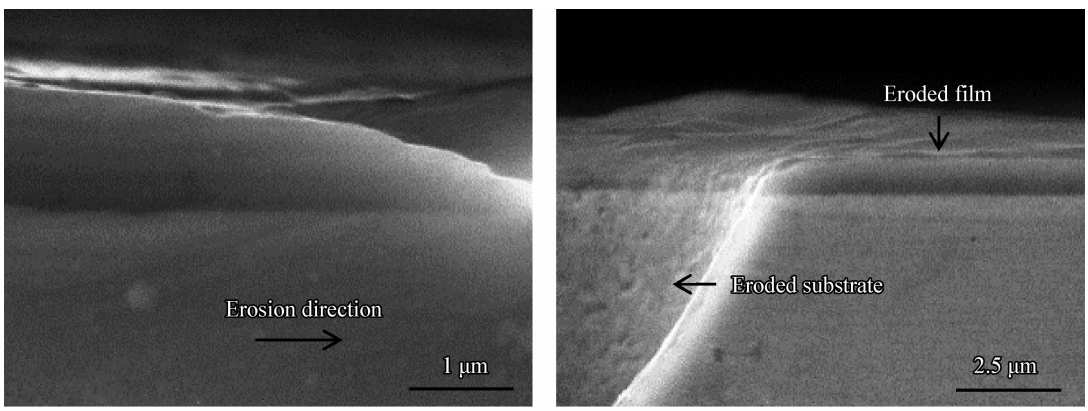


图 7 冲蚀斑边缘多层膜的截面形貌

Fig. 7 Cross section morphologies of the multilayers around erosion scars

为与多层膜在不断冲击的动态变化过程对比，同时对多层膜进行一次压应力作用下的划痕测试。图 8 为划痕下膜层的截面形貌，可见膜层仍能粘附于基体上，并同基体一起变形。进一步沿压应力增大的方向观察多层膜破裂的截面形貌，见图 9。可见随着压应力的增大，多层膜破裂的裂纹在不断向基体内部延伸扩展。多层膜的破裂主要呈现层间破裂失效，裂纹穿过一定厚度的交替层之后，开始横向发展，纵向发展裂纹受到抑制。在作用载荷进一步增加并达到一定程度后，纵向裂纹在新的位置萌生并扩展，在其达到交替膜的某一厚度时，发展为横向裂纹。多层膜延长裂纹的扩展路径，使裂纹有更长的时间行走在多层膜之间，延长失效过程，当外界压应力达到一定程度后，膜层的裂纹才呈现出一定角度的扩展，而非发生纵向式穿越。

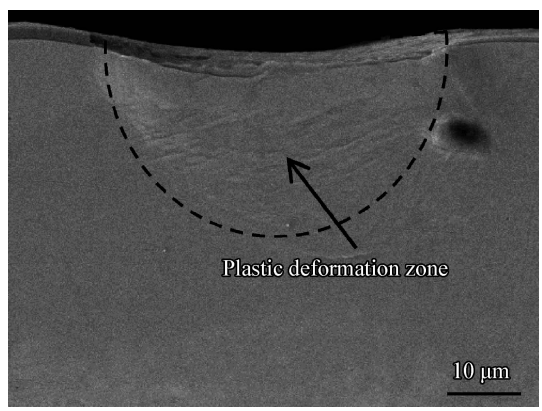


图 8 划痕下膜层的截面形貌

Fig. 8 Cross section morphology of the multilayers under the scratch

陶瓷膜在冲蚀粒子作用下，可引发表层纵向裂纹及表层下某一深度位置处的横向裂纹萌生与发展，导致材料的磨耗[12]。试验制备多层交替膜中 TiN 与 CrN 具有不同的弹性模量，表现为韧性层与硬质层的交替（一般 $E_{TiN}>E_{CrN}$，$E_{TiN}\approx$ 483 MPa，$E_{CrN}\approx$360 MPa[16]）。裂纹引发的应力场可使位错集中发展至多层膜中的韧性层，并在韧性层中发生裂纹尖端钝化，导致尖端处的拉伸应力降低，阻碍其进一步地扩展[17]。多层膜中交替布局的韧性层可有效地阻碍裂纹在硬质层中的纵向扩展，并实现微裂纹的尖端钝化及纵向裂纹向横向裂纹的转换，从而延长裂纹扩展路径。同时，晶面间距的降低表明原子层间存在着较大的压应力，这对抑制裂纹的拉伸应力是有利的。

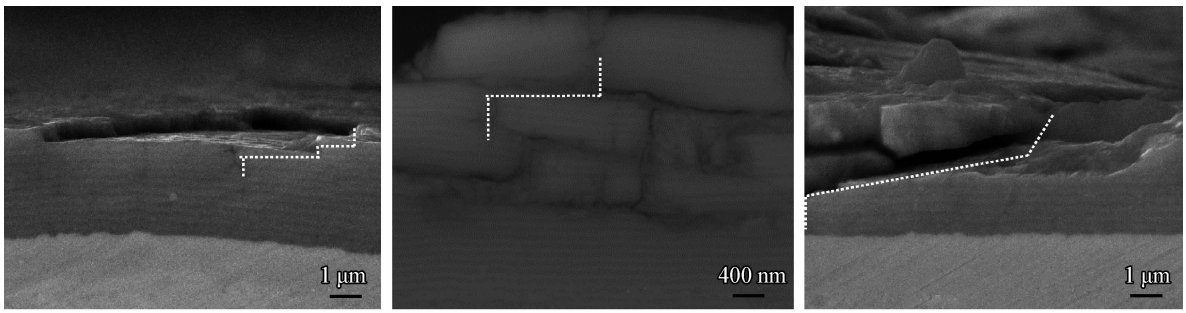


图 9　不同压应力划痕下破裂膜层的截面形貌

Fig. 9　Cross section morphologies of the crack multilayers under different scratch forces

综上，多层膜在动态冲击作用下以磨损减薄失效为主，膜层之间无明显裂纹的穿越发展，但当处于静态压应力作用时，多层膜之间出现明显的裂纹，且裂纹扩展路径随压力增加而发生一定的改变。另外，在压应力划痕测试中，多层膜裂纹在交替层中更普遍向软层做横向扩展或趋向在硬层中做纵向扩展，这将是日后的一个研究方向。作者认为该研究对交替层中软/硬层厚度占比的结构设计将起到良好的促进作用，这方面国际上对不同调制比复合的 Cr/CrN 涂层在冲蚀过程的裂纹扩展研究[12]将为研究者提供新的研究思路。

3　结　论

（1）采用 MEVVA 离子源和磁过滤阴极真空弧复合离子束沉积设备在 AM355 基体上实现了不同交替周期的 $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$、$TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 多层膜制备，其结构致密、交替层变化明显，并都具有优良的抗冲蚀性能。

（2）两体系多层膜随交替周期的增加，晶面间距减小，耐冲蚀性能提高。膜层的成分体系相比交替周期对膜层抗冲蚀性能影响效果明显。

（3）$TiN_y/Ti_mCr_{1-m}N$ 多层膜相比 $CrN_x/Ti_mCr_{1-m}N$ 具有更优的抗冲蚀性能，各自最高可提升 20 倍和 8 倍。冲蚀下多层膜层以磨损减薄失效为主，无明显破裂裂纹的穿越发展。

参考文献

[1] Makhlouf A S H. Protective coatings for automotive, aerospace and military applications: current prospects and future trends [J]. Handbook of Smart Coatings for Materials Protection, 2014: 121-131.

[2] Borawski B, Todd J A, Singh J, et al. The influence of ductile interlayer material on the particle erosion resistance of multilayered TiN based coatings [J]. Wear, 2011, 271 (11/12): 2890-8.

[3] El-Rahman A M, Wei R. Effect of ion bombardment on structural, mechanical, erosion and corrosion properties of Ti-Si-C-N nanocomposite coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 258(15): 320-328.

[4] Yang Q, McKellar R. Nanolayered CrAlTiN and multilayered CrAlTiN - AlTiN coatings for solid particle erosion protection [J]. Tribology International, 2015, 83: 12-20.

[5] Du J, Zhu X, Zhang P, et al. Microstructure and erosion resistance performance of ZrAlN/Cu coating [J]. Physics Procedia, 2012, 32(23): 757-765.

[6] Bousser E, Martinu L, Klemberg-Sapieha J E. Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 257(25): 165-181.

[7] Hassani S, Bielawski M, Beres W, et al. Impact stress absorption and load spreading in multi-layered erosion-resistant coatings [J]. Wear, 2010, 268(5/6): 770-776.

[8] Bousser E, Martinu L, Klemberg-Sapieha J E. In situ real

-time solid particle erosion testing methodology for hard protective coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 237(12): 313-319.

[9] Iwai Y, Matsubara T, Hirai Y, et al. Development of a new type micro slurry-jet erosion (MSE) tester for evaluation of wear properties of hard thin coatings [J]. Lubrication Science, 2009, 21(6): 213-226.

[10] 李诗卓，柴黎明. 利用冲蚀法评价硬质膜与底材结合强度的试验研究 [J]. 固体润滑，1990，10(4)：276-285.
Li S Z, Chai L M. Study on evaluating the bind strength between hard film and substrate by erosion method [J]. Journal of solid lubrication, 1990, 10(4): 276-285 (in Chinese).

[11] Iwai Y, Honda T, Yamada H, et al. Evaluation of wear resistance of thin hard coatings by a new solid particle impact test [J]. Wear, 2001, 251(4): 861-867.

[12] Wieciński P, Smolik J, Garbacz H, et al. Erosion resistance of the nanostructured Cr/CrN multilayer coatings on Ti6Al4V alloy [J]. Vacuum, 2014, 107(18): 277-283.

[13] 金杰，王丽叶，黄晓林，等. 复合离子束制备氮化物多层膜的抗冲蚀性能 [J]. 中国表面工程，2014，27(5)：32-38.
Jin J, Wang L Y, Huang X L, et al. Erosion resistance performance of different nitride films deposited by composite ion beam [J]. China surface engineering, 2014, 27(5): 32-38 (in Chinese).

[14] 刘燕燕，张庆瑜，林国强，等. 电弧离子镀制备(Ti,Cr)N薄膜的微观结构及性能 [J]. 真空科学与技术，2002，22(4)：229-302.
Liu Y Y, Zhang Q Y, Lin G Q. Microstructures and properties of (TiCr)N coatings synthesized by arc Ion plating [J]. Vacuum science and technology (China), 2002, 22(4): 299-302 (in Chinese).

[15] Pang X, Gao K, Yang H, et al. Interfacial microstructure of chromium oxide coatings [J]. Advanced Engineering Materials, 2007, 9(7): 594-599.

[16] Deng J, Wu F, Lian Y, et al. Erosion wear of CrN, TiN, CrAlN, and TiAlN PVD nitride coatings [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2012, 35: 10-16.

[17] Zhang J Y, Zhang X, Wang R H, et al. Length-scale-dependent deformation and fracture behavior of Cu/X (X=Nb, Zr) multilayers: the constraining effects of the ductile phase on the brittle phase [J]. Acta Materialia, 2011, 59(19): 7368-79.

（责任编辑：黄艳斐）

·本刊副理事长单位介绍·

大连海事大学董氏镀铁有限公司

大连海事大学董氏镀铁有限公司是应用“铁基合金镀铁再制造技术”修复内燃机车曲轴、船舶柴油机曲轴、直轴以及其它机械设备零件为主导产品的高新技术企业。公司成立于1992年，是辽宁省镀铁工程技术中心的依托单位，下属有深圳海安船舶工程有限公司、上海董世机修有限公司、辽宁省镀铁工程技术中心及天津办事处。

公司具有先进完善的镀铁、加工、检测、试验设备和科学合理的管理体系。拥有4条镀铁自动控制生产线，5米、4米、3米曲轴磨床，最大可修复长达8米，重10吨的曲轴、精密龙门铣床、曲轴整体磁粉探伤机、动平衡机、一级检测平台、激光直准仪、大型金相显微镜、疲劳试验机、万能力学试验机、原子火焰光谱监测仪等生产、检测和实验设备。

大连海事大学董氏镀铁有限公司1994年获中国船级社工厂认可、铁道部认证，2000年获英国劳氏船级社工厂认可，2007年获俄罗斯船级社工厂认可。1999年获ISO9000质量管理体系认证，2003年获ISO14000环境管理体系认证。

大连海事大学董氏镀铁有限公司成立十几年来，在深圳、上海、鞍山等地建立了分公司，服务的客户遍及国内外，已累计修复船舶曲轴4 000多根，已修复内燃机车曲轴近2 000多根，并利用自身的技术优势，陆续开发了柴油机连杆、机体、缸套、阀杆等贵重零部件的修理业务，迄今为止已为国内外船舶修复柴油机连杆、机体等机器零件上万件，为用户节约资金近20亿余元。

公司核心技术是在“董氏无刻蚀低温镀铁修复技术”基础上发展的“铁基合金镀铁再制造技术”。此技术拥有两项国家专利，获得交通部科技进步一等奖、辽宁省科技进步三等奖、联合国技术信息促进系统中国分部“发明创新科学技术之星”等诸多荣誉。