doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160923001

# Cr基及其化合物过渡层对TiCN涂层性能的影响

李方正,王昆仑,赵继凤,郑小燕,辛艳青,杨田林 (山东大学(威海) 空间科学与物理学院,山东威海 264209)

摘 要:为研究过渡层材料及结构对TiCN涂层性能的影响,设计3种Cr基及其化合物过渡层,利用多弧离子镀技术制备TiCN涂层。膜系分别为Cr/TiCN、Cr/CrN/TiCN和Cr/CrN/CrCN/TiCN。利用SEM、XRD、纳米压痕仪、划痕仪、摩擦磨损试验机和球磨仪对涂层的微观结构和性能进行表征。结果表明:随着过渡层由单层Cr依次加入CrN和CrCN,涂层原有的柱状晶生长被抑制并最终消除。与具有Ti过渡层的TiCN相比,涂层不再具有明显择优取向,(111)峰强度大大减弱而(200)峰发生宽化。具有CrN和CrCN过渡层的样品硬度和附着力明显高于以单层Cr为过渡层的样品,Cr/CrN/CrCN/TiCN 膜系硬度和附着力最高,分别为(30.11±0.34)GPa和(37.21±0.46)N。摩擦磨损试验结果表明:CrCN过渡层的引入显著提升了涂层耐磨性,其对应样品摩擦因数最低,达到0.111,并在球磨测试中表现稳定,而其它膜系均出现不同程度的磨损形貌。

关键词: 过渡层; TiCN涂层; 硬度; 附着力; 耐磨性 中图分类号: TG174.444 文献标志码: A

文章编号:1007-9289(2017)02-0056-07

## Effects of Interlayers Based on Cr and Its Compound on Properties of TiCN Coatings

LI Fang-zheng, WANG Kun-lun, ZHAO Ji-feng, ZHENG Xiao-yan, XIN Yan-qing, YANG Tian-lin (School of Space Science and Physics, Shandong University at Weihai, Weihai 264209, Shandong)

**Abstract:** In order to study the effects of interlayers and their structure on the properties of TiCN coatings, TiCN coatings with interlayers of Cr, Cr/CrN and Cr/CrN/CrCN were deposited by multi-arc ion plating. Three coatings, Cr/TiCN, Cr/CrN/TiCN and Cr/CrN/CrCN/TiCN, were designed, respectively. Microstructure and properties of the coatings were systematically investigated by XRD, SEM, nano-indentation, scratch tester, attrition testing machine and ball mill tester. The results show that the structures of TiCN coatings with different interlayers of Cr, CrN and CrCN are various. Columnar crystal is restrained and then eliminated, and the preferred orientation of TiCN coatings is not obvious, strength of peak (111) decreases and peak (200) broadens comparing with that of using interlayer of Ti. Hardness and adhesion of TiCN coatings with interlayer of CrN and CrCN are higher than that with single interlayer of Cr. The Cr/CrN/CrCN/TiCN coatings with interlayer of CrN have the lowest friction coefficient, 0.111, and it is stable during the ball mill test, while the coatings with other interlayer present varying degrees of wear.

Keywords: interlayer; TiCN coating; hardness; adhesion; wear resistance

收稿日期: 2016-09-23; 修回日期: 2017-03-02

网络出版日期: 2017-03-10 08:26; 网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170310.0826.014.html

通讯作者:杨田林(1960—),男(汉),教授,博士;研究方向:超硬薄膜材料; Email: ytlin@sdu.edu.en

基金项目: 山东省科技发展计划(2014GGX102022)

Fund: Supported by Naturnal Science Foundation of Shandong Province (2014GGX102022)

引文格式: 李方正, 王昆仑, 赵继凤, 等. Cr基及其化合物过渡层对TiCN涂层性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(2): 56-62. LI F Z, WANG K L, ZHAO J F, et al. Effects of interlayers based on Cr and its compound on properties of TiCN coatings[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 56-62.

## 0 引 言

TiN是第一代广泛应用的硬质涂层材料。然 而,随着现代机械加工水平的快速发展,传统 TiN涂层已不能满足高速切削的要求。人们在 TiN中加入金属或非金属元素以形成三元或多元的 化合物硬质涂层,显著改善了其性能,TiCN就是 其中的典型代表。

与传统TiN相比,TiCN的硬度和韧性更高, 摩擦因数更小<sup>[1-4]</sup>,因此在近年来得到广泛研究。 Tillmann<sup>[5]</sup>和Cheng<sup>[6]</sup>分别改变反应气体C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>的流量,研究了C含量对TiCN涂层性能的影 响。Lackner<sup>[7]</sup>和Li<sup>[8]</sup>在对TiCN渗Al的研究中发现, 在适量的Al含量条件下,TiAlCN多元复合涂层的 摩擦因数明显降低。Park G W<sup>[9]</sup>和Caicedo<sup>[10]</sup>等人 通过采用TiCN与其它涂层材料交替沉积,制备出 了力学性能更佳的纳米多层膜。

过渡层是在涂层与基体之间沉积的缓和应力、 提高膜基结合力的膜层,其材料与结构的选择对 涂层性能有重要的意义。人们在对TiCN的研究 中,习惯于沉积一层Ti作为过渡层<sup>[11-12]</sup>,或在此基 础上增加TiN层<sup>[13]</sup>或者TiC层<sup>[14]</sup>以形成多层过渡层 结构,但很少有人具体地关注过渡层材料或膜系 变化对TiCN涂层的影响。D. Li<sup>[15]</sup>曾发现引入Cr过 渡层后,TiN系列涂层的耐腐蚀性和附着力普遍有 所提升,但对具有Cr过渡层的TiCN涂层,对其力学 性能和摩擦磨损性能仍缺少全面的测试和分析。

文中采用多弧离子镀技术,选用Cr基及其化 合物材料作为TiCN涂层的过渡层,设计了3种过 渡层结构,研究涂层的微观结构、力学性能和摩擦 磨损性能,并分析了其内在关系。

1 试验与方法

#### 1.1 试验设计

试验设备为TG-18型多弧离子镀设备,腔体中 对向放置两个Ti靶和Cr靶,纯度为99.99%,弧电 流为65 A。通入N<sub>2</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>气体作为反应气体,气 体流量均为100 mL/min。基体材料选用单面抛光 的Si片进行涂层的形貌、结构和力学性能测试,选 用45钢试环进行摩擦磨损特性测试,其热处理状 态为淬火,硬度为44~46 HRC。基体依次经过 10 min丙酮和酒精溶液超声清洗,烘干后放入腔 体。试验时,先将腔体真空度抽至1.5×10<sup>-2</sup> Pa,加 热到300 ℃。镀膜之前通入高纯Ar,在-600 V负 偏压下对基体进行离子清洗。对每组样品都预先 沉积一层Cr金属层,以保障涂层与基体的结合 力,涂层沉积过程中脉冲偏压保持在-200 V,占 空比为40%。试验设计了3种Cr基及其化合物过渡 层,在不同的沉积时间控制下,分别制备2种厚度 的过渡层样品,最后在最外层沉积40 min的 TiCN涂层,具体膜系和沉积时间如表1所示。

表1 TiCN涂层的膜系设计和沉积时间

Table	e 1 Design and depositing time of TiCN coatings
No.	Coating design and depositing time
1-1	5 min Cr+40 min TiCN
1-2	10 min Cr+40 min TiCN
2-1	5 min Cr+5 min CrN+40 min TiCN
2-2	5 min Cr+10 min CrN+40 min TiCN
3-1	5 min Cr+5 min CrN+5 min CrCN+40 min TiCN
3-2	5 min Cr+5 min CrN+10 min CrCN+40 min TiCN

此外,在相同工艺下制备了具有Ti过渡层的 TiCN样品,测试其微观形貌和结构特性,以进行 比较研究,具体工艺为:沉积温度300℃,脉冲 偏压-200 V(40%),沉积时间10 min Ti+40 min TiCN,反应气体N<sub>2</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>流量均设为100 mL/min。

#### 1.2 涂层表征与测试

采用FEI公司的Nova Nano SEM 450场发射扫 描电子显微镜表征涂层的截面形貌,电子束加速 电压5 kV,在TLD高倍模式下将截面放大100 000 倍;采用日本Rigaku D/MAX 2500V/PC X射线衍 射仪测试涂层结构特性,射线源为Cu-Kα1,波长 为0.151 4 nm,加载电压20 kV,电流2 mA,扫描 范围2θ为20°~80°。

采用瑞士安东帕公司的TTX-NHT2型纳米压 痕仪测试涂层硬度,压头为Berkovich三棱锥,加 载载荷10 mN,加载速率2 000 nm/min,将压入深 度控制在涂层厚度的10%,测量5个点取平均值。 采用WS-2005涂层附着力自动划痕仪测试涂层结 合强度,加载载荷40 N,加载速率40 N/min, 划痕长度5 mm,通过检测金刚石划针将涂层划破 时的声信号测得涂层附着力。

采用MMW-1型摩擦磨损试验机测试涂层摩擦 磨损性能,选用销盘摩擦副,用嵌入转盘的3根 40Cr圆柱销与45钢试环对磨,圆柱销尺寸均为 Φ5 mm×13 mm,涂层试样环尺寸为Φ53.5 mm× 38 mm×10 mm,加载载荷50 N,转速1 200 r/min, 在室温下工作1 200 s,得到摩擦因数及其变化曲 线;采用CAT2球磨仪表征涂层磨损形貌,用旋转 钢球对样品表面造成磨损,转速300 r/m,时间 1 min,在光学显微镜下放大800倍,并观察表面 磨损状况。

# 2 结果与讨论

## 2.1 微观形貌

采用单层Ti过渡层沉积TiCN的截面形貌如图1 所示,涂层结构呈现典型的柱状晶形貌,且柱状 晶的连续性较好。柱状晶的取向具有明显的一致 性,体现出TiCN涂层较强的择优生长趋势。



图 1 采用Ti过渡层沉积TiCN涂层的截面形貌 Fig.1 Cross section morphology of TiCN coating with interlayer of Ti

采用Cr基及其化合物过渡层制备的TiCN截面 形貌如图2所示。所沉积的涂层厚度约1.2 µm,与 沉积Ti过渡层的TiCN涂层厚度相近,在TiCN与基 体之间可见清晰的过渡层结构。图2(a)(b)所示是 采用单层Cr过渡层的样品1-1与1-2截面,过渡层厚 度在100~200 nm之间,涂层内原有的大块柱状晶 开始向片状条形晶转变,但仍具有较好的一致 性,此结构中晶界变得模糊,晶体排布更加紧 密、表明TiCN涂层开始呈现不同于典型柱状晶的 组织结构: 图2(c)(d)为具有Cr+CrN过渡层的样品 截面,涂层呈现多层膜结构,涂层中条形晶体进 一步变短;图2(e)(f)为Cr+CrN+CrCN过渡层的样 品截面,涂层结构发生显著改变,片状条形晶体 完全消失,涂层由紧密排布的纳米晶粒构成,这 种结构能有效地抑制裂纹的形成和扩散,涂层的 力学性能可能会因此得到改善。

由于Cr基及其化合物过渡层与Ti系涂层具有 一定的晶格错配,使得TiCN原有的柱状晶生长被 抑制,特别是CrCN加入后,完全消除了采用传统 Ti过渡层时的大块柱状晶。据报道<sup>[16]</sup>,CrCN本身 比CrN具有更加致密的网格状结构,根据薄膜生长 的Wullf理论<sup>[17]</sup>,CrCN能量最低的晶面会显露于外 表面,对TiCN的生长产生影响,TiCN会更趋向于 垂直该晶面生长,从而逐渐降低TiCN的表面能,最 终呈现细小且致密的纳米晶粒的组织形貌特点。



#### 图 2 不同Cr基及其化合物过渡层结构的TiCN涂层截面形貌

Fig.2 Cross section morphologies of TiCN coatings with different interlayers based on Cr and its compound

# 2.2 结构特性

图3是不同过渡层结构的TiCN涂层的XRD图 谱。观察采用Ti过渡层制备的TiCN图谱,发现其 存在(111)择优取向,呈现面心NaCl结构,这是涂 层中柱状晶的形成标志。与沉积Ti过渡层相比, 沉积Cr基及其化合物过渡层的TiCN图谱中的 (111)峰强度降低,(200)峰强度增高,TiCN涂层的 (111)择优取向不再明显,表明该方向的柱状晶生 长被抑制。





比较3种膜系,随着过渡层由单层Cr依次加入 CrN和CrCN,2个主峰的强度有逐渐接近的趋势, 同时TiCN(200)峰发生明显的宽化,表明由柱状晶 转变为片状条形晶体后,结晶状况仍在逐渐失去 一致性,过渡层与TiCN的晶格错配导致TiCN涂层 的晶体取向产生改变,细小晶粒开始出现并最终 成为涂层内部主要组织。这种改变与样品截面的 微观形貌变化趋势基本一致。总之,由过渡层结 构变化引起TiCN中纳米晶的出现,打乱了涂层的 常规生长,使得XRD图谱失去明显的择优取向, 峰的尖锐程度发生改变,反映了具有生长一致性 的柱形或条形晶体的逐渐消失,并被小尺度等轴 晶粒结构取代。

#### 2.3 力学性能

图4和图5为TiCN涂层的硬度和附着力。其 中,样品1-1和1-2,2-1和2-2,3-1和3-2之间的区 别是由不同沉积时间控制的过渡层厚度不同,每 种涂层结构中过渡层厚度较小的样品序号在前, 详见表1。

在测试涂层硬度时,对每个样品选择5个点进



图 4 不同Cr基及其化合物过渡层结构的TiCN涂层硬度

Fig.4 Hardness of TiCN coatings with different interlayers based on Cr and its compound



图 5 不同Cr基及其化合物过渡层结构的TiCN涂层附着力 Fig.5 Adhesion of TiCN coatings with different interlayers based on Cr and its compound

行压痕试验,硬度取其平均值。由图4可见,膜系 相同而过渡层厚度不同的TiCN涂层硬度差异并不 明显。比较3种不同膜系,相比于沉积单层Cr过渡 层、依次加入CrN、CrCN后形成的多层膜结构硬 度有明显提高,其主要原因是过渡层由单层Cr加 入CrN与CrCN层后, 它们与TiCN之间的弹性模量 更为相近,且作为中间硬化层沉积,使界面之间 残余应力形成梯度,能提升结合强度,对涂层提 供更大的支撑作用。测试发现, 仅沉积Cr过渡层 制备的样品1-2硬度最低,为(20.34±0.18) GPa, 具有Cr/CrN/CrCN/TiCN多层膜体系的样品3-2硬度 最高,为(30.11±0.34)GPa。而样品3-2的XRD图谱 显示膜系Cr/CrN/CrCN/TiCN的(111)峰弱化且择优 取向不明显。此结论与Guo C T等人<sup>[18]</sup>关于TiCN涂 层的试验报道不一致,他们的试验结果表明, TiCN涂层具有明显的(111)择优取向, 且随着 (111)强度增加,涂层硬度提高。出现试验结果差 异的原因是文中TiCN(111)峰强度的减弱并非来自 工艺参数的改变,而是由过渡层的材料改变引 起,Cr基及其化合物形成的多层过渡结构对TiCN 的生长产生模板效应,使其发生晶格畸变。电镜 结果表明CrN与CrCN依次加入后,抑制了涂层柱 状晶体的生长,涂层结构更加致密,是硬度提高 的重要原因。

在涂层附着力测试时,对每个样品选取5个区 域进行划痕试验,样品附着力取其平均值。由图5 可知,对于同种膜系,具有较厚过渡层的TiCN涂 层附着力更大,最高达到(37.21±0.46) N。由于过 渡层可以缓和涂层与基体之间应力的不连续程 度, 使膜基结合效果更好, 避免剥落现象, 而在 镀膜过程中,过渡层的厚度往往比人们希望制备 的涂层厚度要小很多,适当地增大过渡层厚度可 以一定程度上增加其缓冲作用,从而提升涂层附 着力。对比3种膜系可知, Cr/CrN/TiCN和Cr/CrN/ CrCN/TiCN的多层膜结构比采用单层Cr过渡层的 TiCN附着力更高。由扫描电镜截面形貌可见,引 入CrN与CrCN不仅打破了TiCN的生长取向和结 构,还在过渡层与TiCN界面之间形成了二者混合 生长的膜层,这种具有过渡状态多相混合生长的 方式减弱了膜层间的滑移与分离现象、是附着力 提高的重要原因。

#### 2.4 摩擦磨损性能

图6为不同过渡层结构的TiCN涂层摩擦因数 曲线,各样品的平均摩擦因数见表2。由图6可 见,基体45钢的摩擦因数曲线波动很大,平均摩 擦因数为0.462。沉积Cr基及其化合物过渡层的 TiCN涂层后,其稳定性大大提高,摩擦因数均降 至0.4以下。比较3组样品发现:采用同一膜系、不 同厚度的过渡层,摩擦因数仅相差0.2%左右,但 过渡层材料却对摩擦因数有显著影响。在过渡层 由单层Cr依次加入CrN、CrCN后,摩擦因数大幅 减小,依次为0.336、0.195和0.111。在1 200 s摩擦 磨损过程中,具有Cr/CrN/CrCN/TiCN膜系的样品 3-1、3-2曲线始终保持稳定,其他样品曲线均在 1 000 s之后出现较大程度波动,说明CrCN过渡层 的存在是涂层耐磨性提升的主要原因。

图7所示是3组TiCN涂层样品在相同条件下球 磨后的磨损形貌。球面磨损后的凹坑从俯瞰角度 呈圆形,中心出现光亮区域表示涂层完全被磨透



图 6 不同过渡层结构的TiCN涂层的摩擦因数

Fig.6 Friction coefficient of TiCN coatings with different interlayers

表 2 不同过渡层结构的TiCN涂层的平均摩擦因数

Table 2 Average friction coefficient of TiCN coatings with different interlayers

No.	Friction coefficient
Substrate	0.462
1-1	0.356
1-2	0.336
2-1	0.195
2-2	0.200
3-1	0.136
3-2	0.111

并暴露出基体,随着磨损程度的增加,理论上会 从圆心出现微小亮区直至扩散为一个亮圆。由图7 可见,具有Cr/TiCN膜系的样品1-1磨损程度最 大,涂层已被完全磨透;具有Cr/CrN/CrCN/TiCN 膜系的样品3-1和3-2磨损程度最小,表面均未出现 光亮痕迹;具有Cr/CrN/TiCN膜系的样品2-2表面 在小面积条状区域出现光亮,说明刚刚暴露出基 体,而具有相同膜层结构、厚度较小的样品2-1则 处于部分被磨透的状态。

综上所述,相比于沉积Cr和CrN过渡层, CrCN过渡层的引入对TiCN涂层耐磨性带来了显著



图 7 不同Cr基及其化合物过渡层结构的TiCN涂层球磨后的表面形貌

Fig.7 Ball-milling surface morphologies of TiCN coatings with different interlayers based on Cr and its compound

提升。据报道<sup>[19]</sup>, CrCN因C的掺入而引入大量的 sp<sup>3</sup> C—C键和sp<sup>2</sup> C—C键,改变了CrN原有的组织 结构,涂层内部更加致密,以细小晶粒为主,而 作为过渡层沉积时,这种变化便体现在对TiCN生 长的影响中。由图1、图2可见,样品3-1与3-2的组 织形貌明显不同于其他所有样品,说明CrCN过渡 层的多晶晶粒结构产生更大的晶格畸变,彻底消 除TiCN原有的择优生长的柱状晶,使其内部形成 等轴纳米晶,膜系整体更加致密,缺陷减少,从 而大大提升了耐磨性。

## 3 结 论

采用多弧离子镀技术,制备3种具有不同Cr基 及其化合物过渡层结构的TiCN涂层,膜系依次为 Cr/TiCN、Cr/CrN/TiCN和Cr/CrN/CrCN/TiCN。对 涂层的形貌结构、力学性能和耐磨性进行表征,结 果如下:

(1) 与采用Ti过渡层相比,随着过渡层由单层 Cr依次引入CrN和CrCN,TiCN涂层中的柱状晶生 长逐渐被抑制,最终柱状晶完全消除,涂层呈纳 米晶粒组织结构,此变化与XRD图谱中TiCN的 (111)峰弱化、(200)峰宽化和择优取向不再明显的 现象相一致。

(2) 具有CrN和CrCN过渡层的涂层硬度和附着 力均高于采用单层Cr过渡层的涂层,由于CrN与 CrCN的弹性模量更接近TiCN,在膜基之间形成更 好的应力梯度,涂层结构更加致密。过渡层厚度 对涂层的硬度影响不明显,附着力则随过渡层厚 度的增大而有所提升。综合来看,Cr/CrN/CrCN/TiCN 膜系力学性能最佳,硬度为(30.11±0.34) GPa,附 着力为(37.21±0.46) N。

(3) 基体45钢的摩擦因数为0.462,随着过渡层 依次加入Cr、CrN和CrCN,摩擦因数逐渐降低, 依次为0.336、0.195和0.111。比较3组样品发现, CrCN过渡层的引入大大提高了TiCN涂层耐磨性, 在1 200 s摩擦磨损试验中保持稳定,球磨后无磨 透痕迹,明显优于另外两种膜系。这是由于 CrCN的多晶晶粒结构使其对TiCN生长的影响更加 明显,涂层呈现致密的等轴纳米晶结构,显著提 升了耐磨性。

# 参考文献

- [1] 覃正海,鲜广,赵海波,等.切削刀具表面TiCN涂层的研究现状与发展[J].表面技术,2016,45(6):125-133.
  QIN Z H, XIAN G, ZHAO H B, et al. Research status and future development of TiCN coatings deposited on cutting tools[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 125-133 (in Chinese).
- [2] LI J, ZHANG S, LI M. Influence of the C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> flow rate on gradient TiCN films deposited by multi-arc ion plating[J].
   Applied Surface Science, 2013, 283(14): 134-144.
- [3] 折洁,张程煌,张贝贝,等. 真空多弧离子镀制备Ti(CN)涂 层及其性能研究[J]. 材料导报B, 2013, 27(2): 12-16.
  SHE J, ZHANG C H, ZHANG B B, et al. Preparation of Ti(CN) coating by vacuum arc ion plating and its properties[J]. Materials Review B, 2013, 27(2): 12-16 (in Chinese).
- [4] 汪晓. TiN单层和TiN/Ti(C, N)多层涂层的结构和性能研究
   [J]. 硬质合金, 2010, 27(1): 5-8.
   WANG X. Research on microstructure and properties of TiN single layer and TiN/Ti(C, N) multilayer coatings[J]. Cemented Carbide, 2010, 27(1): 5-8 (in Chinese).
- [5] TILLMANN W, MOMENI S. Tribological development of TiCN coatings by adjusting the flowing rate of reactive gases[J]. Journal of Physics & Chemistry of Solids, 2015, 90: 45-53.

- [6] CHENG Y H, MELETIS E I, BROWNE T, et al. Influence of the C content on the mechanical and tribological properties of the TiCN coatings deposited by LAFAD technique[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(16): 4024-4029.
- [7] LACKNER J M, WALDHAUSER W, EBNER R, et al. Room temperature deposition of (Ti, Al)N and (Ti, Al)(C, N) coatings by pulsed laser deposition for tribological applications[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 177: 447-452.
- [8] LI F, LIN Y, CHEN W, et al. Influence of Al/Ti atomic ratio on hard Al-TiCN films[J]. Surface Engineering, 2014, 31(12): 919-922.
- [9] PARK G W, KWON H S. Structural and mechanical properties of multilayered CVD TiC/TiCN coatings with variations of multilayer period[C]. Materials Science Forum, 2007, 534-536: 1233-1236.
- [10] CAICEDO J C, AMAYA C, YATE L, et al. TiCN/TiNbCN multilayer coatings with enhanced mechanical properties[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(20): 5898-5904.
- [11] SUN Y, LU C, YU H, et al. Nanomechanical properties of TiCN and TiCN/Ti coatings on Ti prepared by Filtered Arc Deposition[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 625: 56-64.
- [12] WANG Q, ZHOU F, CHEN K, et al. Friction and wear properties of TiCN coatings sliding against SiC and steel balls in air and water[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(15): 4830-4841.
- [13] 周颐辛, 祝新发, 张晶晶, 等. 离子镀TiCN和TiN工具涂层 的微结构与切削性能[J]. 工具技术, 2010, 44(11): 18-21.
   ZHOU Y X, ZHU X F, ZHANG J J, et al. Microstructure and cutting performance of TiCN and TiN tooling coatings

prepared by ion plating[J]. Tool Engineering, 2010, 44(11): 18-21 (in Chinese).

 [14] 张海军,刘小萍,葛培林,等.不同温度下多层结构 TiCN/TiC/TiN镀层的摩擦学行为[J]. 机械工程材料, 2012, 36(1): 41-44.
 ZHANG H J, LIU X P, GE P L, et al. Tribological beha-

viour of TiCN/TiC/TiN coating with multilayer structure at different temperatures[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(1): 41-44 (in Chinese).

- [15] LI D, GURUVENKET S, HASSNAI S, et al. Effect of Cr interlayer on the adhesion and corrosion enhancement of nanocomposite TiN-based coatings deposited on stainless steel 410[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(10): 3128-3134.
- [16] 陈颢, 叶育伟, 王永欣, 等. 多弧离子镀制备的CrCN涂层组
   织及摩擦磨损性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2):
   423-429.

CHEN H, YE Y W, WANG Y X, et al. Microstructure and tribological properties of CrCN coating prepared by arc ion plating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 423-429 (in Chinese).

- [17] 田民波. 薄膜技术与薄膜材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 139-140.
  TIAN M B. Thin film technologies and materials[M].
  Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 139-140 (in Chinese).
- [18] GUO C T, LEE D, CHEN P, et al. Deposition of TiSiN coatings by arc ion plating process[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(10): 3130-3136.
- [19] HU P, JIANG B. Study on tribological property of CrCN coating based on magnetron sputtering plating technique[J]. Vacuum, 2011, 85(11): 994-998.

(责任编辑: 黄艳斐)