

PVD 涂层刀具高速铣削 CoCrMo 合金的性能研究

张而耕, 王琴雪, 张锁怀

(上海应用技术大学 机械工程学院, 上海 201418)

摘要: **目的** 为了提高涂层硬质合金刀具的切削性能, 研究了物理气相沉积 PVD 法制备的涂层硬质合金铣刀在高速干式环境下的切削性能。**方法** 采用阴极电弧技术制备了 TiN、TiAlN 以及 TiAlSiN 涂层硬质合金铣刀刀头, 通过一同沉积涂层的硬质合金圆片, 间接测量得出涂层的显微硬度、厚度和平均摩擦系数, 并以 CoCrMo 合金为切削对象, 进行了 PVD 涂层与无涂层刀具高速铣削下的对比试验。**结果** TiAlSiN 显微硬度最高达 3800HV, 摩擦系数达 0.3, TiAlN 涂层平均膜厚为 2 μm , 间接测得 TiN、TiAlN 以及 TiAlSiN 涂层的结合力依次为 60、58、42 N。在三者的切削性能中, TiAlSiN 涂层的切削性能比 TiAlN 和 TiN 涂层的好, 同等切削参数时, TiN 刀具的高速铣削时间最短, TiAlSiN 涂层的平均磨损值为 0.1895, TiN 的平均磨损值为 0.3047。**结论** 涂层中添加 Al、Si, 极大地提高了刀具的使用性能, 改善了刀具切削过程中的耐磨性、红硬性, 极大地延长了刀具的使用寿命。TiAlSiN 涂层的硬度高, 耐磨损性好, 切削性能好, 适合高速铣削加工。

关键词: 高速铣削; 阴极电弧; 涂层刀具; TiAlSiN 涂层; 红硬性; 切削磨损

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)03-0262-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.03.039

Performance of PVD-coated Tool in High Speed Milling of CoCrMo Alloy

ZHANG Er-geng, WANG Qin-xue, ZHANG Suo-huai

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

ABSTRACT: The work aims to improve cutting performance of coated carbide-tipped alloy cutters by studying milling performance of physical vapor deposition (PVD) coated carbide-tipped alloy cutters in at high speed and dry environment. TiN, TiAlN and TiAlSiN coated carbide-tipped alloy cutter heads were prepared on surfaces of carbide substrates by cathode arc plasma method. Microhardness, thickness and average friction coefficient were determined by indirect measurement of the cemented carbide disks deposited together with the coating system. A comparative test was performed to CoCrMo alloy at high-speed milling between PVD coatings and uncoated tools. The mechanical properties of the coating obtained were as follows, TiAlSiN micro hardness was up to 3800HV, friction coefficient 0.3, average thickness of TiAlN coating 2 μm , and adhesive force of TiN, TiAlN and TiAlSiN coatings indirectly measured 60, 58 and 42 N. TiAlSiN coating exhibited better cutting performance than that of TiN and TiAlN coatings, the high-speed cutting duration of TiN tool was the shortest provided with the same cutting parameters. The average attrition value of TiAlSiN was 0.1895, and TiN 0.3047. The addition of Al and Si to the coating greatly increases the usability of cutters, enhances wear resistance and red hardness during milling, greatly extends the their service life, which provides higher application value for high-speed cutting environment and cutters selection. TiAlSiN coatings of high hardness, good abrasion resistance and the best cutting performance are applicable to high-speed milling.

KEY WORDS: high-speed milling; cathode arc; coating tools; TiAlSiN coating; red hardness; cutting wear

金属切削工艺的发展, 特别是高速切削、干切削和微润滑切削工艺的出现, 对金属切削刀具提出了越

来越严格的技术要求。数控加工中心的日益先进, 使得人们对刀具的耐用度及切削效率提出了更高的要

收稿日期: 2016-11-07; 修订日期: 2017-01-11

Received: 2016-11-07; Revised: 2017-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51475311)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51475311)

作者简介: 张而耕 (1973—), 男, 博士后, 副教授, 主要研究方向为超硬纳米微米 PVD 涂层、机械制造、材料失效分析。

Biography: ZHANG Er-geng (1973—), Male, Postdoctor, Associate professor, Research focus: superhard nano-micron PVD coating, machinery manufacturing, failure analysis of materials.

求。对于难切削材料, 刀具在切削加工过程中需要的切削力以及加工产生的切削热明显提高, 这就对加工刀具的力学性能以及寿命提出了很高的要求。在硬质合金刀具基体上, 采用物理气相沉积 (PVD) 技术制备多种涂层^[1], 能够显著提高刀具的加工效率以及工件表面的加工质量, 改善了刀具切削过程中的耐磨性、红硬性, 增加了刀具基体的抗变形能力, 极大地延长了刀具的使用寿命。据统计, 发达国家 80% 以上的刀具都经过涂层处理, 刀具寿命提高 3~5 倍以上, 切削速度提高 20%~70%, 加工精度提高 0.5~1 级, 刀具消耗费用降低 20%~50%^[2]。

TiN 涂层刀具是第一种产业化并得到广泛应用的硬质涂层刀具, 作为主流涂层, 也是制备及研究其他高性能涂层的基础^[3-4]。TiAlN 涂层的耐热及抗高温氧化温度分别为 500~600 ℃、800~900 ℃, 超过上述温度, 涂层会快速氧化失效。对于难切削加工的金属材料, 如加工硬化不锈钢、高锰钢、镍基合金、淬火钢及钛合金, 切削温度达 1000 ℃ 以上。TiAlSiN 涂层掺杂少量的 Si 元素, 通过引起晶格畸变可起到固溶强化的作用。随着 Si 元素含量的增多, 涂层中逐渐出现非晶相 Si₃N₄, 并形成 α-Si₃N₄ 包覆 nc-TiAlN 复合结构, 迫使 fcc-TiAlN 晶粒细化^[5-7]。此外, α-Si₃N₄ 可以阻碍氧元素沿晶界扩散, 起到良好的氧化抵制作用。由于晶粒细化及 α-Si₃N₄ 相增多, 使得 TiAlSiN 涂层也具有有良好的抗腐蚀性能^[8-12]。本文探讨了 TiN、TiAlN、TiAlSiN 涂层的制备工艺和涂层性能, 对比分析 TiN 涂层、TiAlN 涂层以及 TiAlSiN 涂层刀具在高速铣削时的磨损性能。

1 试验

1.1 涂层制备

采用瑞士进口物理气相沉积设备 (ICS PIFC-04 ARC PRO) 制备涂层, 利用阴极电弧离子镀技术, 在硬质合金微细刀具及硬质合金试样上制备了 TiN、TiAlN、TiAlSiN 涂层。硬质合金基体的成分及性能指标见表 1。试样尺寸为 $\phi 16\text{ mm}\times 3\text{ mm}$, 粗糙度要求 $Ra\leq 0.05$, 目的是用来测量各涂层的厚度、摩擦系数和硬度等。在未放入转炉架进行涂层制备之前, 进行抛光与超声波清洗预处理, 保证涂层与基体的结合力。离子镀法以制备 TiAlSiN 涂层为例, 所选靶材分别为 Ti 靶 (99.8%)、AlTi 靶 (以原子数分数计, 67% Ti, 33% Al)、TiSi 靶 (以原子数分数计, 80% Ti, 20% Si)。

预处理后的具体操作步骤: 1) 工件装夹及装炉; 2) 炉腔抽真空, 压强范围 $p<0.8\text{ Pa}$; 3) 炉腔加热至 450 ℃, 加热时间为 1.5 h; 4) 靶材及工件的刻蚀与清洗, 向炉腔中通入 Ar 气 (99.999%), 在 Ar 气环境中调节基体偏压为 750 V, 进行等离子刻蚀清洗,

表 1 硬质合金测试片的规格
Tab.1 The specifications of cemented carbide test pieces

WC/ wt. %	Co/ wt. %	Density /(g·cm ⁻³)	Hardness (HRA)	Bend strength/ MPa	Impact toughness/ (J·cm ⁻³)
90	10	14.5~14.9	91.5~92.5	1500	2.5

清洗时间为 40 min; 5) TiAlSiN 涂层的制备, 调整偏压为 60~100 V, 关闭氩气 Ar, 通入反应气体氮气, 其是构成 TiAlSiN 涂层中 N 元素的来源, 靶材相继通电, 其中 1 号靶和 3 号靶为 AlTi 靶, 2 号靶为 TiSi 靶, 4 号靶为 Ti 靶, 位置如图 1, 控制真空度范围为 0.5~5 Pa, 氮气的流量为 $8.4\times 10^{-3}\sim 1.2\times 10^{-2}\text{ m}^3/\text{h}$; 6) 工件在真空下随炉冷却至 180 ℃, 时间为 2 h。

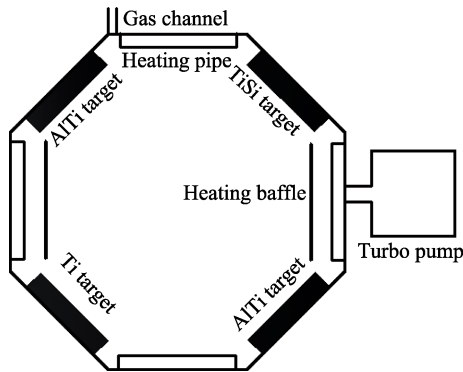


图 1 设备各靶材的位置
Fig.1 The station of each target in equipment

1.2 高速铣削试验

试验机床型号为 Fanuc series 18i-MB 数控立铣升降台铣床, 切削主轴转速根据刀具可加工的实际情况调节。切削方式为干式切削, 被加工材料为 CoCrMo 合金, 屈服强度为 1565~1585 MPa, 极限强度可达 1790 MPa。试验在被加工材料实体上铣削平面。刀具分为涂层圆柱立铣刀和无涂层圆柱立铣刀, 直径 $d=6\text{ mm}$ (4 刃), 采用端面铣削。高速切削主轴的转速分别为 1500、3500、7000 r/min, 每齿进给量 $f=0.02\text{ mm/r}$, 铣削深度 $n=0.5\text{ mm}$ 。CNC 设定的最长走刀路径为 2 m。在三种转速的试验方案中, 以无涂层铣刀的磨损状况为对比条件, 当无涂层铣刀发出尖锐的噪音并且火花四溅时, 停止切削, 检验发现侧刃后刀面磨损带 $VB\geq 0.5\text{ mm}$ 时, 刃口钝化或者崩刃, 则认为该铣刀已经达到刀具寿命极限。

1.3 性能测试及组织分析

对同炉沉积的涂层试样进行各性能测试。厚度采用 X-ray 无损检测设备 (型号 XUL-XYM 130004663, 误差 0.1 μm) 进行测量。膜层硬度测试设备为带有 Berkovich diamond tip 的 MTS Nano Indenter XP, 施加载荷为 20 mN, 最大压痕深度限制在涂层厚度的 1/10 以内, 取 6 个点的平均硬度作为涂层的显微硬度

值。摩擦性能通过传统的球-盘圆周式摩擦磨损设备在室温的条件下测量,摩擦副材料为6 mm的 Al_2O_3 陶瓷,施加载荷为4 N,摩擦线速度为5 m/min,测试时间为30 min。采用压痕法测量膜基结合力,将洛氏硬度计的圆锥形金刚石压头(圆锥夹角为 120° ,尖顶半径为0.2 mm)在一定的测试压力下压入被测涂层表面,在显微镜下观察涂层的压痕及其边缘特征。采用刀具涂层检测仪(型号QBAQ GSX-500)、SEM及EDAX(型号QUANTA 200F)对试样的表面形貌以及断口组织进行观测。放大倍率可达到30 000 \times 。对3种涂层刀具与无涂层刀具进行现场切削实验,采用图像处理万能显微镜(JX13C)对比分析了其磨损状况。

2 结果与分析

2.1 涂层性能

利用圆片试样与刀具一同在设备中进行涂层的制备,目的是获取涂层的性能参数及分析其切削性能。表2是3种涂层通过测量得出的性能参数,从表2中可看出,TiAlSiN涂层的硬度最高,同时涂层的厚度也相对较厚。采用物理气相沉积工艺制备涂层的沉积温度低,3种涂层的沉积温度都低于 450°C ,不会造成基体的退火软化,保证了涂层的结合力。

图2为3种涂层试样的表面形貌,靶材成分不同,故而颜色不同,涂层表面致密均匀,少量细小

颗粒的附着应是离子轰击导致液滴脱落而留下的痕迹。以TiAlSiN涂层为例,图3为其表面形貌和断面形貌。

表2 试验制备的3种涂层的参数
Tab.2 The parameters of the 3 coatings prepared by test

Coating	Thick- ness/ μm	Hardness ($\text{HV}_{0.05}$)	Friction factor	Adhesion- strength/N
TiN	3	2800	0.35	60
AlTiN	2	3400	0.3	58
TiAl- SiN	3.2	3800	0.3	42

由于刀具在高速切削时因高温产生扩散磨损和氧化磨损,涂层的抗氧化性非常重要。在箱式电阻炉(设备型号SXL-1200)中进行抗氧化性能试验,各涂层的抗氧化性能不同,TiN涂层在 800°C 时已经失效。图4为涂层TiN(600°C)、TiAlN(800°C)以及TiAlSiN(800°C)EDS能谱分析的结果,分析各元素原子的能谱分布,少量O富集在涂层表面,可以看出,TiAlSiN涂层在氧化过程中出现上层富Al、下层富Ti的结构,使涂层表面优先生成致密的 Al_2O_3 氧化层,阻止涂层进一步氧化。Ti元素不时有波峰出现,这与涂层的沉积参数有关,O富集处出现少量Si元素,表明TiAlSiN涂层抗氧化性能与Si元素的存在有关。Wang、Chen等人^[6,16]的研究也表明,Si元素的增加,涂层晶粒结构 $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ 的变化,使涂层的抗氧化性增加,切削性能更好。

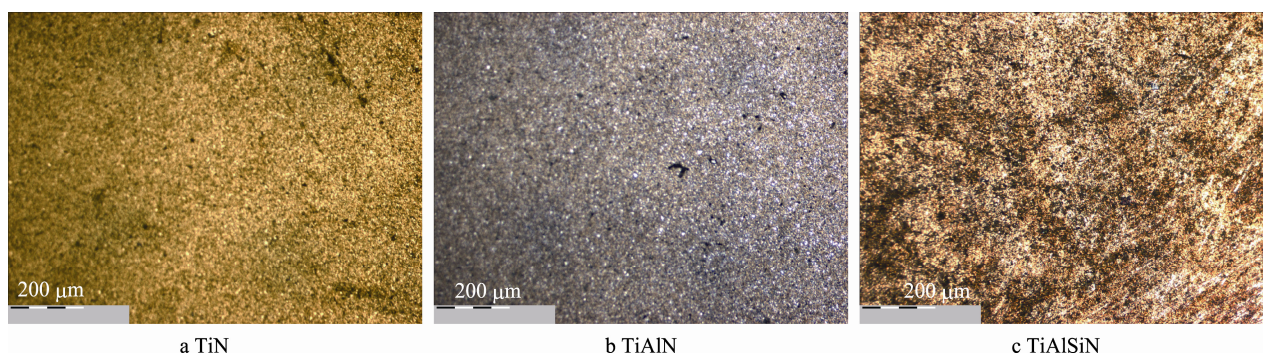


图2 3种涂层在常温下的表面形貌
Fig.2 Surface images of TiN/TiAlN/TiAlSiN coatings at RT

2.2 切削性能

表3为4种铣刀刀头切削时间,也表明了三种涂层在高速切削时的状态。无涂层铣刀以及TiN涂层、TiAlN涂层,维持时间较短,且机床发出嘶鸣声,切削处火花四溅,切削过程相对困难,而TiAlSiN涂层切削时机床也相对平稳,直至后来慢慢出现火花。TiAlSiN涂层铣刀的寿命大约是无涂层铣刀寿命的10

倍。速度更高之后,TiN涂层刀具基本无法使用。涂层硬质合金铣刀要在适当的切削速度中才能更好地发挥刀具的使用寿命。表4为同等失效状态下的磨损值,TiAlN涂层以及TiAlSiN涂层的耐磨损性能优于TiN涂层,无涂层刀具的磨损值最大,TiAlSiN涂层刀具的磨损值最小。通过涂层检测仪、EDX能谱分析的结果可以看出,实验制备的涂层均匀、致密,与基体的结合良好。TiN涂层在切削过程中的热稳定性

不如 TiAlN 涂层和 TiAlSiN 涂层,原因是涂层在高温下很容易发生氧化反应,由于内部压应力的形成,裂纹严重时导致涂层剥落。加入 Al、Si 元素后,不仅在硬度和耐磨性等方面优于前者,也大大提高了涂层的耐高温性能。

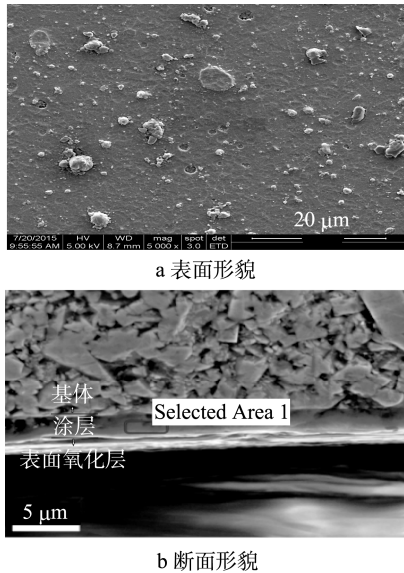


图 3 扫描电镜下 TiAlSiN 涂层试样的表面形貌以及断面形貌
Fig.3 SEM surface image and cross-section of TiAlSiN coatings

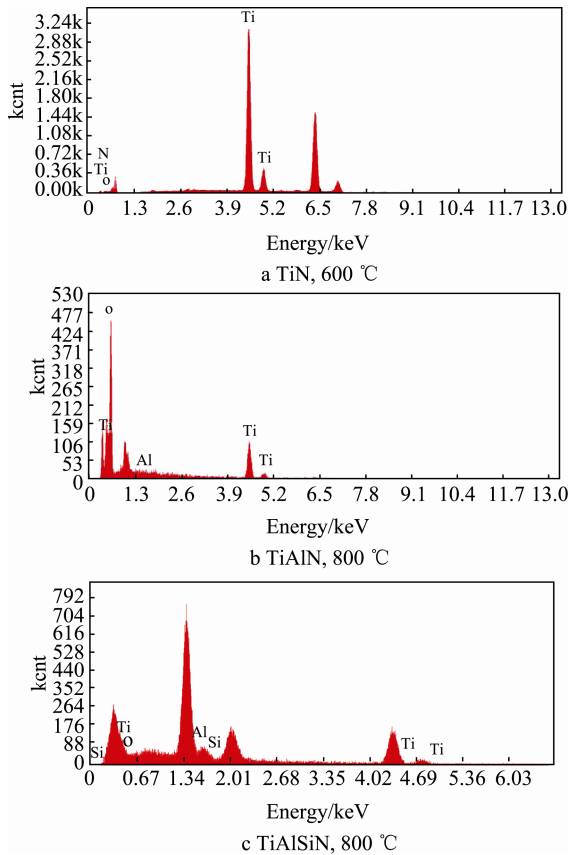


图 4 3 种涂层 EDAX 能谱分析
Fig.4 EDAX pattern of the three coatings

表 3 4 种铣刀平面铣削的时间结果
Tab.3 Time results of the four milling-tools planar milling

Spindle /(r·min ⁻¹)	Time/min			
	No coating	TiN	TiAlN	TiAlSiN
3500	2	4.5	4.5	19.1
7000			2.1	2.5

表 4 4 种铣刀平面铣削的磨损值
Tab.4 The value of the four milling-tools planar milling
mm

Tool type	Abrasion breadth (1st)	Abrasion breadth (2nd)	Average
No coating	0.3538	0.2482	0.301
TiN	0.3226	0.2868	0.3047
TiAlN	0.2324	0.242	0.2372
TiAlSiN	0.1746	0.2044	0.1895

高速切削刀具主要是磨粒磨损、热磨损和氧化磨损^[13]。高温使材料软化,塑性增强,使刀屑接触状态趋于稳定,但铣刀切入切出的温差以及刀体内的温度梯度较高,因热应力疲劳引起粘结磨损和剥落磨损。高温使排屑不畅,致使刀具崩刃和烧刀,高温还加剧了扩散磨损和氧化磨损。如图 5 所示, TiN 在高速切削状态下的崩刃失效表现最差, TiAlSiN 涂层刀具在高速干式切削状态下发生粘结磨损、氧化磨损。高温条件下,在 TiAlN 涂层表面能形成致密、完整、连续的 Al₂O₃ 保护膜,提高了涂层的抗高温氧化性^[14—15]。用 TiAlN 涂层刀片与 TiAlSiN 涂层刀片切削不锈钢材料时发现,当切削速度为 160 m/min 和 200 m/min 时, TiAlSiN 涂层刀片的寿命分别提高了 17.6%和 24.0%^[17]。

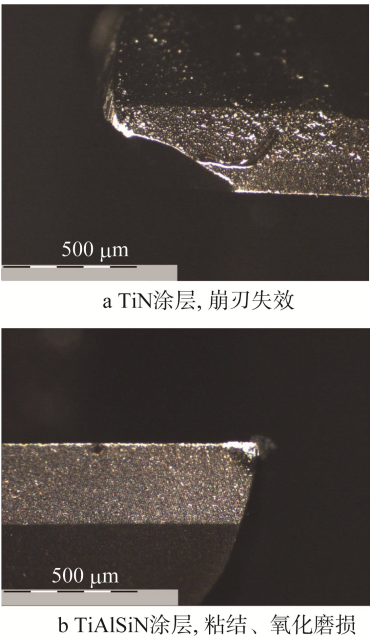


图 5 实验结果
Fig.5 Test result: 1) TiN, Tipping failure, 2) TiAlSiN, adhesive and oxidation wear

TiAlN 涂层的抗氧化性好,但是 Al 元素的含量较多,会导致切削过程中产生极高的热量,容易在摩擦表面产生粘附现象,导致刀刃断裂失效。因此不合理的涂层处理也会降低刀具的切削性能。切削试验数据表明,涂层刀具中, TiAlSiN 涂层的切削性能最好,热稳定性最好; TiN 涂层的热稳定性差,且不耐磨损。涂层刀具能减少工具表面的摩擦系数,降低刀刃切削部位的温度,提高工具的加工速度和工件的表面质量,且显著提高了刀具的使用寿命,满足了难加工材料和高速切削的工况条件。

3 结语

1) 利用物理气相沉积技术在刀具表面制备了 TiN、TiAlN、TiAlSiN 三种涂层,采用低温等离子体沉积,合理的涂层工艺参数是获得高性能涂层的前提。检测结果显示, TiAlSiN 显微硬度最高达 3800HV,摩擦系数低,这也是切削性能良好的原因之一。TiN 硬度低,耐磨性最差。试验制备的膜层厚度低于 3 μm ,适当的涂层厚度不仅有利于刀尖热量与大气的交换,而且使切屑带走大部分的切削热,有效降低切削温度。

2) 对比 3 种涂层刀具与无涂层刀具的切削性能,结果表明, TiAlSiN 涂层的综合使用性能最好,使用寿命最长,在高转速条件下对比无涂层刀具的切削时间,其相对寿命是无涂层刀具的 9~10 倍,能够最大程度地满足难加工材料和高速切削的工况条件。TiN 涂层的相对寿命也可以达到无涂层刀具的 2~3 倍。

3) 在干式切削的条件下,三种涂层刀具相对于无涂层刀具而言,切削时 TiAlSiN 涂层的有效切削时长最长,切削平稳性好,切削阻力较小。但主轴转速过高(达到 7000 r/min),无涂层刀具无法使用,而 TiN 涂层因过快发生剧烈噪音及大量火花溅射而失效。在满足切削条件的情况下,只有硬度高、摩擦系数低、热稳定性好、结合力好的涂层才能满足更高难度的工业加工要求。

参考文献

- [1] 张而耕, 朱州, 张体波. 超硬纳微米 PVD 涂层技术在刀具领域的应用及研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 89—95.
- [2] ZHANG Er-geng, ZHU Zhou, ZHANG Ti-bo. Research Progress and Application of Superhard Nano-micron PVD Coating Technology in the Cutting Manufacturing Area[J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 89—95.
- [3] 马忠臣. 刀具涂层技术与设备的最新发展与应用[J]. 机械工程师, 2012(4): 13—16.
- [4] MA Zhong-chen. The New Development and Application of Coating Tool Technology and Equipment[J]. Mechanical Engineer, 2012(4): 13—16.
- [5] 赵海波. 国内外切削刀具涂层技术发展综述[J]. 工具技术, 2002, 36(2): 3—7.
- [6] ZHAO Hai-bo. Summary of Development of Cutting Tool Coating Technology at Home and Abroad[J]. Coating Technology, 2002, 36(2): 3—7.
- [7] 张而耕, 吴雁. 现代 PVD 表面工程及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [8] ZHANG Er-geng, WU Yan. Modern PVD Surface Engineering and the Application[M]. Beijing: Science Publisher, 2013.
- [9] CHEN Tian, XIE Zhi-wen, GONG Feng, et al. Correlation between Microstructure Evolution and High Temperature Properties of TiAlSiN Hard Coatings with Different Si and Al Content[J]. Applied Surface Science, 2014, 314: 735—745.
- [10] WANG She-qin, CHEN Li, YANG Bing, et al. Effect of Si Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-Al-N Coating[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2010, 28(5): 593—596.
- [11] DERFLINGER V H, SCHÜTZ A, ANTE M. Mechanical and Structure Properties of Various Alloyed TiAlN-based Hard Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(16/17): 4693—4700.
- [12] WANG Geng-zhu, XIE Zhi-wen, CHEN Tian, et al. Electrochemical Behavior of TiAlSiN Hard Coatings Synthesized by a Multi-plasma Immersion Ion Implantation and Deposition Technique[J]. Thin Solid Films, 2015, 584: 222—227.
- [13] WILLIAM G, EZHIL S, HARISH C B, et al. Effect of Electroless Nickel Interlayer on the Electrochemical Behavior of Single Layer CrN, TiN, TiAlN Coatings and Nanolayered TiAlN/CrN Multilayer Coatings Prepared by Reactive Dcmagnetron Sputtering[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(17): 3461—3468.
- [14] SUN K K, LEE V V. Cathodic Arc Plasma Deposited TiAlSiN Thin Films Using an Al-15at. % Si Cathode[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(24): 7483—7486.
- [15] XIE Zhi-wen, WANG Lang-ping, WANG Xiao-feng, et al. Influence of Si Content on Structure and Mechanical Properties of TiAlSiN Coatings Deposited by Multi-plasma Immersion Ion Implantation and Deposition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 476—482.
- [16] HARISH C, BARSHILIA, MOUMITA G, et al. Deposition and Characterization of TiAlSiN Nanocomposite Coatings Prepared by Reactive Pulsed Direct Current Unbalanced Magnetron Sputtering[J]. Applied Surface Science, 2010, 256: 6420—6426.
- [17] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 195—205.
- [18] SHU De-lin. Metal Mechanical Property[M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 195—205.
- [19] 朱志鹏, 朱颖, 李刘合, 等. TiAlSiN 涂层刀具的发展与应用[J]. 新技术新工艺, 2014(5): 105—110.
- [20] ZHU Zhi-peng, ZHU Ying, LI Liu-he, et al. Development and Application of TiAlSiN Coated Tools[J]. New Technology & New Process, 2014(5): 105—110.
- [21] 谢宏, 萧逸锋, 何跃辉, 等. 硬质合金涂层刀具研究的新进展[J]. 中国钨业, 2006, 21(2): 33—36.
- [22] XIE Hong, XIAO Yi-feng, HE Yue-hui. Advances in Coated Cemented Carbide Tools[J]. China Tungsten Industry, 2006, 21(2): 33—36.
- [23] WANG She-qin, CHEN Li, YANG Bing, et al. Effect of Al and Si Additions on Microstructure and Mechanical Properties of TiN Coatings[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18: 310—313.
- [24] MATTHEW T T, EWERING M. Microstructural Effects on Indentation Failure Mechanisms in TiN Coatings: Finite Element Simulations[J]. Acta Materialia, 2007, 55: 2489—2501.