

## 现代刀具涂层制备技术的研究现状

康勃, 马瑞新, 吴中亮, 王目孔, 林炜

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**[摘要]** 刀具涂层是一种机床工具行业的重要材料, 其性能直接影响数控机床的机械加工精度。概述了刀具涂层材料的特点、要求及涂层制备技术的发展, 分析了化学气相沉积法、物理气相沉积法、等离子体增强化学气相沉积法及溶胶-凝胶法等几种涂层制备方法的优缺点。结合国内外刀具涂层的研究现状及发展趋势, 指出在大力发展化学气相沉积涂层和物理气相沉积涂层技术的同时, 开发两者相结合的新型工艺, 推动国内刀具涂层技术的快速发展。

**[关键词]** 刀具涂层; 化学气相沉积; 物理气相沉积; 溶胶-凝胶

**[中图分类号]** TG174.44; TG71

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2008)02-0071-04

## Research Status in Preparation of Modern Cutting Tool Coatings

KANG Bo, MA Rui-xin, WU Zhong-liang, WANG Mu-kong, LIN Wei

(School of Metallurgical and Ecological Engineering,

Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**[Abstract]** Cutting tool coating is a kind of important material in machine tool & tools industry and its performance will determine the machining accuracy of CNC machines. The coating material characteristic, the request and the coating technology development of the cutting tool were briefly introduced. The good and bad points of CVD, PVD, PECVD and the Sol-Gel method were analyzed specifically. Unifying the present situation and the trend of the development of the cutting tool coating at home and abroad, it pointed out a new craft should be developed in which both CVD and PVD are unified while vigorously developing any one solely. By this way the domestic coating market will be impelled with a fast development.

**[Key words]** Cutting tool coatings; CVD; PVD; Sol-Gel Method

## 0 引言

进入 21 世纪以来, 全球经济蓬勃发展, 处在一个根本性的变革时期。在微电子技术、信息技术、材料科学等高新技术的发展以及制造技术包括数控机床、刀具材料、涂层技术等全面进步的基础上, 切削技术进入了崭新阶段, 开发了高速、高效、柔性、复合、智能、环保的切削加工新技术, 使切削加工水平上升到一个新的高度。现代化的金属切削加工要求刀具具有高切削速度、高进给速度(可增至原切削速度的 2~3 倍)<sup>[1]</sup>、高可靠性、长寿命、高精度和良好的切削控制性。因此, 高水平、稳定的刀具涂层技术越来越受到机械加工企业的青睐。涂层技术是提高切削效率, 降低加工成本的有效途径。刀具基体与硬质薄膜表层相结合, 由于基体保持了良好的韧性和较高的强度, 硬质薄膜表层又具有高耐磨性和低摩擦因数, 从而使刀具的性能显著提高, 而且, 随着涂层技术设备的日趋集成化、模块化和智能化, 涂层费用已比初期下降 1/2~2/3, 涂层刀具在刀具总量中所占的比例将会越来越大<sup>[2]</sup>。

**[收稿日期]** 2007-09-24

**[作者简介]** 康勃(1983-), 女, 陕西西安人, 硕士, 研究方向为功能薄膜材料。

## 1 涂层材料的发展现状与趋势

### 1.1 涂层材料的特点

涂层的特点是涂层薄膜与刀具基体相结合, 提高刀具的耐磨性而不降低基体的韧性, 从而降低刀具与工件的摩擦因数, 延长刀具的使用寿命。此外, 由于涂层自身的热传导系数比刀具基体和加工材料低得多, 可以有效减少摩擦所产生的热量, 形成热屏蔽, 改变热量的散失途径, 从而降低刀具与工件、刀具与切屑之间的热冲击和力冲击, 有效地改善了刀具的使用性能<sup>[3]</sup>。

刀具磨损机理研究表明, 在高速切削时, 刀刃温度最高可达 900℃, 此时刀具磨损不仅是机械摩擦磨损(刀具后面磨损的主要形式), 还有粘结磨损、扩散磨损、摩擦氧化磨损(刀具刀刃磨损及月牙洼磨损的主要形式)和疲劳破损, 这 5 种磨损直接影响刀具的使用寿命。而刀具涂层所起的作用表现为: 1) 在刀具与被切削材料之间形成隔离层; 2) 通过抑制从切削区到刀片的热传导来降低热冲击; 3) 有效减少摩擦力及摩擦热。刀具通过涂层处理, 实现固体润滑, 减少摩擦和粘结, 使刀具吸收热量减少, 从而可承受较高的切削温度<sup>[4]</sup>。

### 1.2 涂层材料的要求

刀具表面的硬质薄膜要求: 1) 硬度高, 耐磨性能好; 2) 化学

性能稳定,不与工件材料发生化学反应;3)耐热耐氧化,摩擦因数低,与基体附着牢固等。单一涂层材料很难全部达到上述技术要求。例如,碳化钛(TiC)是一种高硬度耐磨化合物,有着良好的抗摩擦磨损性能;氮化钛(TiN)的硬度稍低,但却有较高的化学稳定性,且能大大减少刀具与被加工工件之间的摩擦因数。但两者的单一涂层均很难满足高速切削对刀具涂层的综合要求,故往往制成多元复合涂层,配制成较理想的刀具涂层材料。如:TiCN兼具TiC和TiN的综合性能,其硬度高于TiC和TiN,可降低涂层的内应力,提高涂层的韧性,增加涂层的厚度,阻止裂纹的扩散,减少刀具崩刃,显著提高了刀具的使用寿命。单一涂层向多元复合涂层的发展把不同的涂层材料所具有的优良特性结合起来,这些特性包括:由中间层提供高的热稳定性,由最上层提供高硬度,或者由软的或固态自润滑层的最上层提供低的摩擦因数。

### 1.3 涂层材料的发展

目前,由于单一涂层材料难以满足提高刀具综合机械性能的要求,涂层技术已由单层薄膜向多层、梯度、纳米及纳米复合结构薄膜涂层发展。复合涂层发展的重点是根据被加工材料的性质和加工特点来设计涂层成分、厚度及与之相匹配的基体材料,获得最佳组成和最佳涂覆效果。纳米涂层在极大程度上发展了涂层技术,一种多层结构TiAlN薄膜的最新技术可达上百层,适用于高速钢和硬质合金材料,用于钻削、车削或干式切削的高速加工。纳米复合薄膜兼有硬涂层和软涂层的优势,以瑞士platit涂层公司的(nc-Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N)/(α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)纳米复合相结构薄膜为例,在强等离子体作用下,纳米TiAlN晶体被镶嵌在非晶态的Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>体内,使其薄膜硬度可达50GPa,且高温硬度更为突出<sup>[5]</sup>。韩荣第等人的切削实验证明:涂层刀具比未涂层刀具的切削力要小,而复合涂层比单一涂层的切削力更小<sup>[6]</sup>。TiC、TiN、TiAlN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和金刚石等材料被广泛用作涂层材料。

## 2 刀具涂层技术综述

涂层成分能否在涂层刀具上发挥应有的性能,除了涂层与基体的结合强度、涂层及界面组织结构、择优取向、各单层厚度及总厚度等决定涂层刀具性能的重要因素外,在很大程度上还取决于涂层工艺的技术水平,因为刀具材料表面的物理、化学、力学性能严重影响现代切削加工的顺利进行。因此,涂层制备工艺至关重要。常用的刀具涂层工艺一般分为化学气相沉积(CVD)、中温化学气相沉积(MTCVD)、物理气相沉积(PVD)、离子辅助沉积技术(IBAD)、等离子增强化学气相沉积技术(PECVD)以及溶胶-凝胶法(Sol-Gel Method)。

### 2.1 化学气相沉积涂层

化学气相沉积涂层(CVD)是使挥发性化合物气体发生分解或化学反应,并在被镀工件上沉积成膜的方法。其基本原理是沉积物以原子、离子、分子等原子尺度的形态在材料表面沉积,形成金属或化合物的涂层。这一涂层的沉积必须在一定的能量激活条件下进行,经过物料气化,扩散到基体表面并在基体表面发生反应形成覆盖层<sup>[7]</sup>。

高温化学气相沉积涂层的优点显著:1)其所需涂层源的制

备相对容易;2)可实现TiC、TiN、TiCN、TiB、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等单层及多元复合涂层;3)涂层与基体之间具有很高的结合强度,薄膜厚度可达7~9μm;4)涂层具有良好的耐磨性能。但该技术也有其不可避免的缺点:1)涂层是在1000℃以上的温度下沉积而成,由于涂覆温度高,使涂层与基体之间容易产生一层脆性的脱碳层(η相),导致刀具脆性破裂,抗弯强度大大下降;2)涂层内部为拉应力状态,使用时容易产生微裂纹,影响刀具性能;3)CVD工艺在涂层过程中排放的废气、废液会造成环境污染,与国家所提倡的绿色制造、绿色工业相左,从20世纪90年代中后期以来,高温气相沉积技术的发展和受到了一定的制约<sup>[8]</sup>。

目前,顺应时代潮流,发展中低温的化学气相沉积涂层(MTCVD),其机理与高温化学气相沉积涂层的机理相同,只是前者的涂层比后者的涂覆温度低一些,仅为700~900℃,趋于向低温、高真空的方向发展。中温化学气相沉积涂层有以下优点:1)沉积速度快;2)涂层厚且均匀;3)涂层附着力高;4)内部残余应力小<sup>[9]</sup>。采用MTCVD技术获得的致密纤维状结晶形态结构的涂层具有极高的耐磨性、抗热震性及韧性,例如用MTCVD技术沉积TiCN,可得到较厚的细晶纤维状结构,涂层厚度可达CVD技术涂层厚度的1.5倍,且为半粘结状态,有效地改善了刀具在连续切削条件下的抗崩刃性。而且,MTCVD技术沉积形成的单相α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>显微晶相结构,一改传统氧化铝涂层(α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的混合相结构)表面不光滑、热稳定性差的弊端,表面光滑,热稳定性好,抗扩散磨损好。但是,MTCVD技术依旧存在环境污染问题,而且涂层内部为拉应力状态,使用时易产生微裂纹<sup>[10]</sup>。

CVD技术具有涂层密实、涂层与基体结合强度高、附着力强、均匀性好等优点,即便是形状复杂的工件也能得到良好的镀层,且薄膜厚度可达5~12μm,具有很好的耐磨性,目前广泛应用于各类硬质合金刀具。其涂层工艺的主要发展阶段及应用领域见表1<sup>[11]</sup>。

表1 CVD涂层技术的主要发展阶段及应用领域  
Table 1 Main development phases and application  
of cutting tool coatings prepared by CVD

时间	涂层成分	涂层方法	主要应用领域
1968年	TiN、TiC	CVD	硬质合金刀具、 模具涂层
1973年	TiCN、TiC + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CVD	硬质合金刀具、 模具涂层
1981年	TiC + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiN、 Al-O-N	CVD	硬质合金刀具涂层
1982年	TiCN	MTCVD	硬质合金刀具涂层
1986年	金刚石、CBN	CVD、PVD	硬质合金刀具涂层
1990年	TiN、TiCN、TiC	PCVD	模具、螺纹刀具、 铣刀等
1993年	TiN + TiCN(CVD) + TiN(PVD)	CVD + PVD	硬质合金铣削类 刀具涂层
1993年	厚膜纤维状TiCN	MTCVD	硬质合金车削类 刀具涂层(用于 粗、半粗加工)

在各类CVD涂层方法中使用最多的是真空离子轰击法和磁控离子反应喷涂法。目前,CVD涂覆技术已成功开发了可控制涂层结晶形态的新工艺,称为第4代CVD涂覆技术,利用这种技术可使刀片的耐磨性、抗崩刃性和通用性均得到提高<sup>[12]</sup>。

## 2.2 物理气相沉积涂层

物理气相沉积法(PVD)是通过气相反应过程使蒸发或溅射出来的金属原子发生气相反应,从而在刀具表面沉积出所要求的化合物。其机理是在真空条件下,用物理的方法(蒸发或溅射等物理形式)将涂层材料汽化成原子、分子或电离成离子,通过气相过程在硬质合金的表面沉积成涂层。可细分为以下几个步骤:1)使涂层材料通过蒸发、升华和分解等成为涂层源材料的汽化过程;2)涂层材料中的原子、分子或离子迁移到硬质合金表面的迁移过程,这一过程伴随着一系列复杂的变化过程,如原子、分子或离子之间可能发生碰撞产生离化、复合、反应以及能量和运动方向的改变;3)原子、分子或离子在硬质合金表面的吸附、堆集、形核和长大以至最终形成涂层<sup>[13]</sup>。PVD 涂层技术能制备氮化钛、碳氮化钛、铝钛氮化合物以及各种难熔金属的碳化物和氮化物等涂层。

物理气相沉积涂层具有如下优点:1)涂层沉积温度低,一般在 600℃ 以下,对刀具材料的抗弯强度影响很小;2)涂层内部的应力状态是压应力,更适应于硬质合金精密复杂刀具的涂层;3)对环境不造成污染,符合目前绿色工艺、绿色制造的发展动向;4)随着纳米涂层的出现,PVD 涂层刀具质量显著提高,不仅具有结合强度高、硬度高和抗氧化性能好等优点,还能有效地控制精密刀具刀口形状及精度。虽然物理气相沉积涂层具有以上优点,但还是存在如下一些缺陷:1)涂层设备复杂、工艺要求高、涂层时间长,使得刀具的成本增加;2)生产的刀具抗冲击性能、硬度和均匀性比 CVD 技术生产的刀具差,使用寿命也比 CVD 技术生产的刀具短;3)涂层的刀具几何形状单一,使用领域受限;4)易产生内应力和微裂纹,原因是涂层与基体在冷却时收缩率不同<sup>[14-15]</sup>。

物理气相沉积涂层(PVD)包括真空蒸发、离子镀 2 种方法,因其均在真空条件下进行,故又被称为真空镀膜法。而实际用于刀具上的真空离子镀包括溅射离子镀、空心阴极离子镀、多弧离子镀和热阴极离子镀。真空蒸发简单便捷,但附着力和均匀性较差,常用于装饰镀。真空离子镀膜层均匀致密,工件温度低,适于刀具镀膜。

离子束辅助沉积技术(IBAD)是一种新兴的 PVD 涂层技术。离子辅助气相沉积技术是指在冷相沉积涂层的同时,用具有一定能量的离子束轰击不断沉积的物质,使沉积原子与基体原子不断混合,界面处原子相互渗透溶为一体,从而大大改善涂层与基体的结合强度。它具有气相沉积和离子注入的优点,使沉积温度可以降低到 200 ~ 500℃,因而可以在较低温度下制备 C、N、B 化合物、立方氮化硼和金刚石超硬涂层,可用于因结合力欠佳而难以涂层的硬质合金<sup>[16]</sup>。

与 CVD 涂层技术相比较,PVD 涂层技术有一个显著的优势,就是其工艺处理温度可以控制在 500℃ 以下,因此,其应用范围就更加广泛。PVD 涂层技术的主要发展阶段及应用范围见表 2。

## 2.3 等离子体化学气相沉积涂层

由于 CVD 涂层技术与 PVD 涂层技术均有其不可克服的缺点,等离子体化学气相沉积法(PECVD)应运而生,它是将 CVD 技术与 PVD 技术相结合所开发研制的一种新型低温涂层工艺。

表 2 PVD 涂层技术的主要发展阶段及应用领域  
Table 2 Main development phases and application of cutting tool coatings prepared by PVD

时间	涂层成分	涂层方法	主要应用领域
1979 年	TiN	PVD	高速钢刀具涂层
1984 年	TiCN	PVD	硬质合金、高速钢铣刀、钻头类刀具涂层
1989 年	TiAlN	PVD	硬质合金铣刀类涂层(用于钢、铸铁加工)
1991 年	TiAlN + CrC	PVD	车、铣削钛合金
1993 年	CrN	PVD	钛合金、铜合金加工
1994 年	MoS <sub>2</sub>	PVD	高速钢复杂刀具涂层
1995 年	TiN-AlN	PVD	硬质合金铣刀涂层
1996 年	CN <sub>x</sub>	PVD	高速钢刀具涂层
2000 年	TiAlCN	PVD	硬质合金刀片涂层

PECVD 技术的机理是通过电极放电产生高能电子使气体电离成为等离子体,或者将高频微波导入含碳化合物气体产生高频高能等离子体,由其中的活性碳原子基团在硬质合金的表面沉积涂层<sup>[17]</sup>。由于它直接利用等离子体来促进反应发生,故优点显著:1)可将涂覆温度控制在 600℃ 以下(目前涂覆温度已降至 180 ~ 200℃);2)低的涂覆温度使硬质合金基体与涂层材料之间不会发生扩散、相变或交换反应,从而基体保持了原有的强韧性。所涂刀具在加工普通钢、合金钢、铣削时显示出比采用普通化学气相沉积技术涂层的刀具具有更为优异的性能。此外,因其低温工艺不影响焊接部位的刀具性能,还可用于涂覆焊接硬质合金刀具,大大提高了刀具使用寿命,显示出了良好的使用性能。但 PECVD 技术也有其自身缺点:1)设备投资大,成本高,对气体的纯度要求高;2)涂层过程中所产生的剧烈噪音、强光辐射、有害气体、金属蒸汽粉尘等对人体产生危害;3)对小孔径内表面难以涂覆等。这些问题还亟待解决<sup>[18]</sup>。

CVD 涂层技术和 PVD 涂层技术各有优势。PVD 涂层技术工艺温度低,不影响硬质合金刀具自身的强度且刀片刃部可磨得十分锋利,也可进行除 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 外的多种涂层;CVD 涂层技术使得涂层与基体具有更好的结合强度,且膜厚易于控制,一般车削刀片的 CVD 涂层性能要高于 PVD 涂层。因此 2 种涂层技术各显其能,在刀具涂层市场中占有各自的份额。一般来说,大部分硬质合金刀具均采用 CVD 涂层技术,而价格昂贵不可重磨的高速钢等钢制刀具、精密锋利的硬质合金精加工刀片和形状复杂的硬质合金整体棒状刀具均采用 PVD 涂层技术。总之,我们应该在了解其工艺原理及优缺点之后,将 CVD 工艺与 PVD 工艺相互比较,相互结合,取长补短,充分发挥各自优势,互相利用,互相补充,寻找更为合适的涂层技术,使其在刀具应用上发挥最大的能力。

## 2.4 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法(Sol-Gel Method)是材料湿法制备中新兴的一种方法,是以金属有机化合物(主要是金属醇盐)和部分无机盐为前驱体,首先将前驱体溶解(水或者有机溶剂都可)形成均匀的溶液,接着溶质在溶剂中发生水解(或醇解),水解产物缩合聚集成 1nm 左右的溶胶粒子,溶胶粒子进一步聚集成溶胶。其主要过程首先是将原料分散在溶剂中,然后经过水解反应生成活性单体,活性单体进行聚合,开始成为溶胶,进而生成具有一

定空间结构的凝胶,经过干燥和热处理制备出纳米粒子和所需材料。溶胶-凝胶法镀膜生产成本相对较低,制品均匀度高、纯度高。烧结方法比传统方法低约 400 ~ 600℃,反应易于控制,尤其易于控制涂层的化学反应等。但其也存在某些问题:1)原料价格比较昂贵,有些原料为有机物,对健康有害;2)过程所需时间较长,常需要几天或几周;3)凝胶中存在大量微孔,在干燥过程中又将会逸出许多气体及有机物,并产生收缩<sup>[19]</sup>。

溶胶-凝胶法可以通过 2 种途径制作涂层工具:一是在刀具表面直接涂层,即将刀具在制备好的溶胶中浸渍提拉进行涂覆;二是采用粉末材料进行涂覆,再烧结。试验表明,用该法制得的刀具不但使用寿命大大提高,而且也显示出了很高的切削性能,有着很好的应用前景。此外,溶胶-凝胶法还可以制备复合涂层和非氧化物陶瓷涂层<sup>[20-21]</sup>。

### 3 国内外刀具涂层的现状及发展趋势

#### 3.1 国外刀具涂层的发展

欧洲刀具涂层技术自 20 世纪 80 年代中期以来得到了广泛的发展,尤其是物理涂层技术,代表了当前世界的最高水平。目前,欧洲物理涂层设备制造厂有十余家,主要采用阴极电弧及磁控溅射技术。如:Balzers 公司自 20 世纪 70 年代开始从事物理涂层技术的研发,以工具精密零件涂层为主,1980 年推出了热阴极离子镀膜机 BAI-830,成功地应用于高速钢刀具涂层并达到了工业化生产水平。可以看出,在工业发达国家,人们对涂层技术的发展越来越重视,物理涂层技术更是倍受青睐,PVD 处于高速发展阶段。

#### 3.2 国内刀具涂层的发展

我国刀具涂层技术经过多年发展,目前正处于关键时期,即原有技术已不能满足切削加工日益提高的要求,国内各大工具厂的涂层设备也到了必须更新换代的时期。我们应充分了解国内外刀具涂层的现状及发展趋势,学习国外先进的水平,有计划、有步骤地发展刀具涂层技术(尤其是 PVD)。自 2000 年起,在国家大力推进节能、环保制造模式的影响下,国内刀具涂层技术掀起了以发展 PVD 技术为重点的热潮。大专院校以设计、表征超硬薄膜为主要研究方向,国内刀具涂层业得到发展。目前,国内 PVD 技术归纳起来有以下几种类型:1)阴极电弧技术;2)磁控溅射技术;3)空心阴极技术<sup>[22]</sup>。

### 4 结 语

随着切削加工要求的不断提高和被加工材料的升级,以及全球绿色环保的发展趋势,现代刀具涂层和涂层技术得到了极大的发展。当前,世界涂层技术的发展具有以下趋势:1)涂层种类不断更新,由于单一涂层材料难以满足提高刀具综合机械性能的要求,因此涂层成分将趋于多元化和复合化,以获取高耐磨、低摩擦因数、热稳定性好和抗氧化能力强等良好的综合性能;2)涂层工艺不断改进,日趋复杂化和多样化,逐渐向低温涂层、物理(PVD)-化学(CVD)复合涂层工艺发展,与之相适应的涂层工艺设备也日趋集成化、模块化和智能化,但 PVD、MTCVD

工艺仍为刀具涂层制备的主流技术。欧洲 PVD 涂层技术对我国市场影响很大,我们应当在吸取先进技术的基础上发展自主知识产权的工业化涂层应用技术,参照欧洲企业的发展模式,院校与企业有机地结合起来,大力发展国内涂层企业。

#### [参 考 文 献]

- [1] 吴大维,刘传胜. 刀具涂层技术的新进展[J]. 中国机械工程, 2000, 11(5): 574-576
- [2] 吴玉广,徐新乐. 影响刀具涂层质量因素的研究[J]. 表面技术, 1997, 26(5): 22-23
- [3] Klocke F, Krieg T. Coated tools for metal cutting-features and applications [J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 1999, 48(2): 515-525
- [4] 陈维喜. 刀具涂层技术的现状与展望[J]. 工程技术, 2000, 34(3): 3-5
- [5] 赵海波,高见,周彤. 欧洲刀具涂层最新状况及发展模式[J]. 工程技术, 2005, 39(4): 3-9
- [6] 韩荣第,胡广义,韩滨. 刀具涂层技术及涂层刀具切削性能的试验研究[J]. 制造技术与机床, 2004, (10): 17-19
- [7] 阎洪. 金属表面处理新技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 1996. 127-160
- [8] Takayasu S. Plasma carbonitriding of cemented carbide substrate as an effective pretreatment process for diamond CVD [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 112(1-3): 189-193
- [9] 叶伟昌,谷勇霞. 涂层刀具的发展与应用[J]. 机械制造, 1997, (5): 4-6
- [10] 李学芳. 国外刀具材料的发展近况[J]. 工具技术, 1999, 33(3): 3-7
- [11] 周彤. 刀具涂层技术的应用[J]. 机械工人(冷加工), 2002, (9): 22-25
- [12] 廖先富. 最新涂层材料及其涂覆技术[J]. 工具技术, 1996, 30(7): 36-38
- [13] 胡传烯,宋幼慧. 涂层技术原理及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2000. 3-10
- [14] 宋洁冰,李雪飞. 涂层硬质合金刀具及其在切削加工中的应用[J]. 光电对抗与无源干扰, 2002, (3): 43-46
- [15] 张荆门. 硬质合金工业的进展(2)[J]. 粉末冶金技术, 2002, 20(4): 228-233
- [16] 傅小明,吴晓东. 硬质合金刀具涂层技术的研究进展[J]. 江西冶金, 2004, 24(2): 32-36
- [17] 龙中俊,唐其环. 实用的 PCVD 工艺技术[J]. 表面技术, 1992, 21(5): 235-238
- [18] Evans A G. Perspective on the development of high-toughness ceramics [J]. Journal of American Ceramic Society, 1999, 73(2): 187-191
- [19] 方斌,黄传真,许崇海,等. 涂层刀具的研究现状[J]. 机械工程师, 2005, (10): 21-24
- [20] 韦奇,王大伟,张术根. 溶胶-凝胶法制备  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  复合膜的微观结构分析[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(4): 392-396
- [21] 丘泰,何旭初,徐洁,等. 碳热合成  $\text{Si}_3\text{N}_4$  粉工艺中的热力学初探[J]. 硅酸盐学报, 1995, 23(5): 22-25
- [22] 赵海波. 我国刀具涂层技术现状及展望[J]. 表面工程资讯, 2006, 6(2): 5-8