

超硬纳微米 PVD 涂层技术在刀具领域的应用及研究进展

张而耕, 朱州, 张体波

(上海应用技术学院 机械工程学院, 上海 201418)

摘要: 介绍了物理气相沉积(PVD)技术的原理、特点和真空蒸镀、溅射镀和离子镀之间的优缺点,从二元涂层、多元涂层、多层涂层和纳米多层复合涂层等4种类别上介绍了PVD涂层技术在切削刀具上的广泛应用。在查阅和整理大量文献资料的基础上,也结合笔者多年从事PVD技术的研究与应用心得,从提高切削刀具的寿命这一重要角度出发,阐述了国内外超硬纳微米PVD涂层技术在切削刀具应用领域研究进展,并对多元涂层、多层涂层及涂层的纳米化也进行了较为详细地论述。切削刀具表面采用物理气相沉积涂层技术能使刀具获得优异的综合性能,从而显著提高切削刀具的使用寿命,降低生产成本,大幅提高机械加工效率。最后展望了物理气相沉积涂层技术未来将在超硬切削(包括模具钢、淬硬钢等硬度超过HRC55以上的铣削加工)、难加工材料切削(包括高温合金、钛合金、不锈钢等)、石墨和碳纤维等复合材料加工和有色金属的高速切削加工(包括铝合金、铜合金、镍等)的广泛应用。

关键词: 物理气相沉积; 二元涂层; 多元涂层; 单层梯度涂层; 纳米多层涂层; 切削刀具

中图分类号: TG174.444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)04-0089-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.04.016

Research Progress and Application of Superhard Nano-Micron PVD Coating Technology in the Cutting Manufacturing Area

ZHANG Er-geng, ZHU Zhou, ZHANG Ti-bo

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

ABSTRACT: The paper introduced the principle, characteristics, and advantages and disadvantages of three methods of vacuum evaporation, sputtering and ion plating in physical vapor deposition (PVD) technology, and introduced the PVD coating technology that is widely used in cutting tools by four categories of binary, multiple coatings, multilayer coatings and nano multilayer composite coating. Based on a large amount of literature, combined with the author's experience in the research and application of PVD technology for many years, the paper reviewed the research progress of superhard nano-micron PVD coating technology in the field of application of cutting tool from the most important perspective of improving the cutting tool life, and further discussed the multiple

收稿日期: 2014-10-23; 修订日期: 2014-11-19

Received: 2014-10-23; Revised: 2014-11-19

基金项目: 上海市教委创新基金(12YZ160); 上海市联盟计划(L201203, L201308)

Fund: Supported by Shanghai Municipal Education Commission Innovation Fund(12YZ160) and Shanghai Affiliate Programs(L201203, L201308)

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

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

coating, multilayer coating and nanometer coating in details. Cutting tool surface with application of physical vapor deposition coating technology enabled the tool to obtain excellent overall performance, which significantly improved the life of cutting tools, reduced production costs, and increased the machining efficiency substantially. Finally, the paper forecasted the wide application of physical vapor deposition coating technology in composite superhard cutting (including milling of mold steel, hardened steel whose hardness over HRC55), cutting hard processing materials (including high-temperature alloys, titanium alloy, stainless steel, etc.), machining and processing composite materials of graphite and carbon fiber, etc. and high-speedily machining non-ferrous metals (including aluminum, copper alloys, nickel, etc.) in the future.

KEY WORDS: physical vapor deposition; two element coatings; multi-element coatings; single gradient coating; nano multilayer coating; cutting tool

随着现代机械加工工业朝着高精度、高速、干式切削、环保以及低成本等方向发展,对刀具性能提出了更高的要求。高速钢或硬质合金作为传统的刀具材料,越来越难以满足现代机加工工业的发展需要。超硬纳米物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)涂层由于具有高硬度、耐磨损、抗氧化、低摩擦等优良性能,因此是刀具表面理想的耐磨保护层,可以大大提高金属切削刀具的使用寿命。

物理气相沉积技术出现于 20 世纪 70 年代末,其工艺处理温度低,在 600 ℃ 以下对刀具材料的强度无影响,并可作为最终的处理工序。在不改变力学性能和尺寸精度的情况下,制备的超硬薄膜具有高硬度、低摩擦系数、高耐磨性和化学稳定性等优点。薄膜内部应力状态为压应力,更适合于硬质合金等精密复杂刀具的表面涂层。PVD 工艺在真空条件下沉积涂层基本不产生有害废气和氧化问题,机加工过程可减少切削液的使用,符合现代绿色制造的发展方向^[1-2]。当前 PVD 涂层技术已普遍应用于硬质合金立铣刀、钻头、油孔钻、阶梯钻、丝锥、铰刀、可转位铣刀片、车刀片、异形刀具、焊接刀具等表面。

1 PVD 技术的原理

PVD 基本原理是在真空条件下,采用物理方法将靶材原料气化为原子、分子或电离成离子,再通过气相过程在基体表面沉积具有某种特殊功能的涂层。薄膜沉积时间、制备技术、参数、基体在真空室中的位置等都会影响涂层的性能^[3]。刀具表面选用 PVD 涂层是因为它具有处理温度低,涂层内部的应力为压应力,抵抗裂纹扩展的能力强,镀膜材料广泛,绿色环保无污染等特点。经过几十年的发展,PVD 技术逐渐形成了真空蒸镀、溅射镀和离子镀三种方法,不同种沉积方法的主要特点见表 1。

表 1 真空蒸镀、溅射镀、离子镀的比较
Tab. 1 Comparison of vacuum, sputtering and ion plating

比较项目	真空蒸镀	溅射镀	离子镀
绕射性	一般	较好	好
薄膜致密性	低	高	高
膜基结合力	一般	较好	很好
薄膜中的气孔	低温时较多	少	少

2 PVD 技术的发展

PVD 发展至今,技术如闭合场非平衡磁控溅射、电子束物理气相沉积、离子束增强沉积等层出不穷,应用范围宽广。涂层现已有氮化物、碳化物、氧化物和硼化物涂层等。元素组成从二元发展到了多元涂层,层数也从单层发展到多层乃至上千层,涂层结构也从晶体结构发展到非晶态、超晶态结构。非晶和超晶涂层具有更加优异的耐磨性、抗腐蚀性、高硬度、高强度、耐疲劳抗力以及超导特性等。涂层厚度已经从微米级发展到亚微米级、纳米级。纳米多层涂层与单层梯度涂层相比无柱状晶结构,故具有优异的力学性能。其膜基结合强度更高,高硬度、抗高温氧化性以及极强的耐磨、耐蚀性等。

刀具系统是整个加工体系中非常重要的一环,现代化的金属切削加工,对刀具的要求是高切削速度、高进给速度、高可靠性、高精度、长寿命和良好的切削控制性。涂层刀具的出现,使刀具切削性能有了重大突破,它将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系数,从而使刀具的性能大大提高。某涂层厂家推出的满足不同加工要求的涂层产品见表 2。

表 2 某厂家推出的刀具系列涂层

Tab. 2 A series of coatings introduced by some manufacturer

被加工材料	TiN	TiAlN	金刚石	氧化铝	TiAlN+DLC
高合金钢	▲	■	●	—	◇
低合金钢	▲	■	●	—	◇
有色金属	—	—	—	■	●
不锈钢	▲	■	●	—	—
铸铁	—	■	●	—	◇
塑料等	—	■	●	—	—

注:▲良好的适应性;■干式切削;●高速切削;◇高负荷切削

2.1 二元涂层

PVD 涂层出现时,由于工业发展关系,难加工材料不是特别多,二元碳化物、氮化物涂层如 TiN,TiC 涂层应用于刀具的研究最多,多用于丝锥、钻头、铣刀等,涂层刀具的寿命与未涂层刀具相比能提高 2~10 倍^[4-6]。与未涂层刀具相比,TiN 涂层刀具切削 20CrMo 钢时的主切削力可减小 20%~40%,刀具耐磨性能约提高 45%,寿命提高 2 倍左右,加工表面质量也明显提高(TiN 涂层刀具如图 1 所示)。此外,对于 TiN 涂层结合力弱的问题,研究发现 C 离子的注入可有效提高 TiN 涂层的膜基结合强度^[7]。

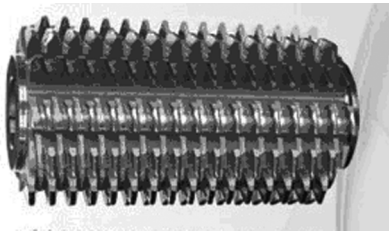


图 1 TiN 涂层刀具
Fig. 1 TiN coated cutting tool

CrN 涂层可显著提高高速钢刀具的切削性能,减小刀具磨损,延长刀具寿命,其钻削性能优于 TiN,TiAlN 涂层,更是明显优于未涂层。有研究发现,经工艺优化后的 CrN 涂层钻头平均寿命约为未涂层钻头的 5 倍^[8]。

ZrN 涂层本身良好的热稳定性和热硬度,使其高温下抗热冲击和抗磨、减磨性能高于一般的 TiN 涂层^[9],它更适用于不锈钢的加工。国内外的研究表明,ZrN 在 800℃时仍可保持 60%的室温硬度值,在 538℃时,ZrN 膜层的磨蚀速度为 TiN 涂层的 60%。

C₃N₄ 涂层具有硬度高、耐磨性好等优点,使用寿命高于 TiN,TiC 涂层刀具,是较理想的干式切削和以车代磨刀具表面优先选用的涂层。研究发现^[10],C₃N₄ 涂层刀具干式切削淬火钢时比未涂层的 YT15 刀具的寿命提高 2 倍多,且切削速度对氮化碳涂层刀具的寿命影响最大。对于其他碳涂层如类金刚石涂层 DLC 也有大量研究^[11-13],如在 AlSi 铸铁合金上进行钻孔试验,发现刀具涂覆 ta-C(DLC 涂层的一种)涂层后,进给力减弱了大约 20%。含氢碳源气体的加入会提高类金刚石薄膜的沉积速率,改善表面平整度等。

二元氧化物涂层如 ZrO₂,Al₂O₃,TiO₂ 等涂层也在积极研究中,其中 Al₂O₃ 涂层研究最多。该类涂层具有高温稳定性、化学稳定性和低热导率等优良性能,应用于硬质合金刀片上比 AlTiN 涂层刀片具有更好的抗热破裂性能和极佳的耐磨性能^[14]。

2.2 多元涂层

随着难加工材料对刀具性能愈加苛刻的要求,二元涂层刀具由于涂层与基体间的硬度、热膨胀系数和弹性模量不匹配等原因,会增加残余应力,导致膜基结合力降低。因此引入第三元素或者更多元素形成多元涂层,以提高它们的力学性能是发展所趋。如二元涂层中加 Al,Cr 会提高涂层的抗氧化性;加入 Zr,V,Hf 会提高耐磨性;加入 Si 会提高硬度、耐磨性、抗化学扩散或细化晶粒尺寸,含有高硅的 PVD 涂层铣刀如图 2 所示;加入某些稀土元素可增强涂层与基体的结合强度并提高涂层的致密性。



图 2 富含高 Si 的涂层铣刀
Fig. 2 Rich in high Si in TiAlN coated milling cutter

多元涂层中研究最多的就是氮化物涂层,TiAlN 涂层是刀具切削加工中使用最多的“隔热”涂层。莫继良等^[15]在高速钢麻花钻上沉积 TiAlN 涂层,干态钻削不锈钢时发现,TiAlN 涂层降低了钻头的振动和噪音,其寿命也提高了 3 倍以上。在同 TiN 涂层比较

中发现^[16],TiAlN涂层对刀具的切削效率和使用寿命提高得更加明显。杨锴^[17]通过切削试验发现,湿式状态下不同速度的TiAlN涂层滚刀寿命是TiN涂层滚刀寿命的2~5倍。此外,合金元素Al和Si的加入对TiAlN切削性能有巨大的影响。研究发现^[18],Al的加入提高了TiAlN涂层的抗氧化性能,Si的加入进一步提高了TiAlN的硬度和抗氧化性能。TiAlN涂层与基体的结合强度非常好,在高速和低速下切削性能优异,而加入Si形成的TiAlSiN涂层与基体的结合强度较差,低速切削性能最差,在高速下却优于AlTiN涂层。也有研究发现^[19],当Si原子数分数在4.78%时,TiAlSiN涂层刀具铣削淬火钢后刀面磨损量最低,与TiAlN涂层相比,铣削距离增加了20%。

TiCN是在单一TiN晶格中,由碳原子占据氮原子点阵中的位置而形成的复合化合物,有较好的耐磨性和低摩擦系数,但TiCN薄膜的摩擦磨损性能随温度升高而急剧降低,当高于400℃时薄膜失效^[20-21]。经采用电弧离子镀技术在硬质合金铣刀和钻头上沉积TiCN和TiN涂层进行高速切削试验表明,TiCN涂层的硬度远高于TiN涂层。在高速铣削下,TiCN涂层铣刀的后刀面磨损速率仅约为TiN涂层铣刀的1/3,TiCN涂层钻头在钻孔数为TiN涂层钻头2倍时的磨损量仍低于TiN涂层钻头^[22]。

AlCrN涂层是以AlN为基础发展起来的综合性能更强的涂层,也称无钛涂层,硬度在30~36 GPa,具有优异的耐磨损性能。与TiN,TiCN,TiAlN相比,AlCrN具有更高的红硬性及抗氧化性能,使用温度可达到1000℃。有研究表明:在Si₃N₄陶瓷刀具上沉积的AlCrN涂层在铣削铸铁和镍基高温合金时能显著提高刀具的耐磨损性能^[23];在硬质合金刀具上沉积AlCrN和TiN涂层,在湿式状态下进行高速高进给量切削试验时发现,AlCrN涂层的寿命比TiN涂层高出70%^[24];干切削镍基高温合金GH4169,AlCrN涂层的性能优于当前主流的TiAlN涂层刀具^[25];对通过多弧离子镀技术制备的CrN,AlCrN,AlTiN涂层进行磨损试验,结果为AlCrN涂层的冲击性能和耐磨性最好,CrN涂层相比三元涂层其塑性变形比较严重,耐磨性最差^[26]。

对更多元素涂层的研究,如在M2高速钢基体上采用闭合场非平衡磁控溅射离子镀复合技术,制备CrAlTiN多元复合涂层纵车45钢,结果涂层刀具的切削力仅为未涂层刀具的78%~85%^[27]。对带有CrAlTiN涂层的钻头钻削45钢和30CrMnSiA钢研究

发现^[28],钻头平均寿命分别比未涂层钻头提高约17倍和18倍。也有加入Ni元素以考察不同Ni靶电流和不同基体硬度对CrNiTiAlN五元涂层组织结构及各项性能的影响^[29]。

2.3 多层涂层

多层涂层的出现促进了涂层技术质的飞跃,刀具表面涂覆多层涂层后可获得具有多种材料综合的物理性能。如底层可起到缓冲、增强膜基结合力、改善涂层结构、抑制粗大晶粒组织的生长等作用,顶层完全发挥出高硬度、耐磨损、低摩擦系数、抗高温氧化等特性。

多层涂层大体可分为3类:低单层数涂层、非同种结构单层组成的多层涂层、同种结构组成的超点阵涂层。研究最多的就是2~7层的多层复合涂层。如在硬质合金基体钻头上分别沉积三种涂层:AlTiN+Si₃N₄,AlTiN(Al/Ti原子比为67:33),AlTiN+WC/C。试验外加冷却液钻削SKD61模具钢发现^[30]:AlTiN+Si₃N₄刀具在高温、高应力下连续加工后,刀尖圆弧处涂层发生扩散和氧化,最终脱落。AlTiN涂层刀具因涂层中铝含量较多,易形成厚的致密的Al₂O₃保护膜,可起到抗高温氧化、隔热作用,又因Al₂O₃的高温硬度和稳定性能,使涂层的耐磨性增强。AlTiN+WC/C刀具很适合摩擦和润滑情况比较恶劣的场合,较另两种涂层有着明显的优势,刀具摩擦系数很低,使得使切削力和温度都较低,极大地提高了钻头的寿命和表面加工质量。另外,对在TiAlN体系中加入稀土元素Ta形成的TiAlN/Ta多层涂层刀具切削试验发现^[31],它的三向力、摩擦系数明显小于加入Si元素形成的TiAlSiN涂层刀具,而且被加工件的表面粗糙度更小。

对于难加工的材料加工,多层涂层的研究颇多,如TiAlN/TiSiN多层涂层比TiN/TiAlN多层涂层在干式高速下铣削AISI 304奥氏体不锈钢时具有更好的性能和低的切削力^[32]。采用TiAlN/TiN多层涂层高速铣削镍基高温合金Inconel 718时刀具磨损形式主要是涂层剥离、热裂纹、振纹和破损等^[33]。也有研究TiAlN/AlCrN多层涂层刀具在干式、高速、不同切削速度和切深下铣削AISI D2淬火钢的刀具的失效形式和磨损机理^[34]。

除了对金属加工外,也有对非金属的加工。A. Gilewicz等^[35-36]在高速钢基体上沉积CrN/CrCN多层涂层以干式铣削松木,其加工表面质量要比单层的

CrN、CrCN 和未涂层的好,具有非常好的耐磨性能,其磨损率只有 TiAlN/TiN 多层涂层的 1/10 左右,刀具切削刃涂覆该两种多层涂层后使用寿命比未涂层要高出 23 倍多。此外他们又采用 $\text{Cr}_2\text{N}/\text{CrN}$ 多层涂层,可提高刀具寿命 2 倍^[37]。

也有通过有限元分析(FEM)涂层刀具内部应力状态的研究, Yang hong 等^[38]通过 FEM 分析单层 TiBN 和多层 TiBN/TiN 涂层在高速铣削 AISI H13 热作工具钢的应力分布问题,结果为涂层刀具与未涂层相比因摩擦学性能提高能显著降低应力。特别在高速铣削时,温度很高,扩散磨损作为主要磨损机理下,多层涂层能显著抵抗扩散磨损。也有在 ZrN 系列涂层中通过 FEM 分析得出 Zr 作为过渡层能降低涂层的应力梯度和应力,增强涂层与基体的附着力^[39]。

此外,相同的涂层采用不同的制备方法表现出的刀具切削性能差异很大,如利用非平衡磁控溅射制备的单层 TiN、双层 TiN+TiCN 涂层和电弧离子镀制备的 TiN、TiN+TiCN 和 TiAlN 涂层刀具分别高速干式铣削奥氏体不锈钢和钛合金,结果为非平衡磁控溅射制备的 TiN+TiCN 涂层与任一种离子镀涂层相比表面平滑,没有液滴现象且摩擦系数最低达到 0.19,同类金刚石(DLC)相当。该双层涂层中 TiN 起到增加附着力的作用,游离的 C 元素起到到润滑且抑制工件材料和刀具间的粘着作用,切削力、切削温度、磨损量均最低,工件表面加工质量最好^[40]。在采用涂层方法的比较中,如对 PVD 涂层 TiN+TiAlN 硬质合金刀具和 CVD 涂层 $\text{TiN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiCN}$ 硬质合金刀具进行高速铣削 TC6 钛合金,发现 PVD 涂层刀具的后刀面磨损量远小于 CVD 涂层刀具,使用寿命大于 CVD 涂层刀具^[41]。

2.4 纳米多层复合涂层

纳米涂层用于刀具的研究越来越多,大部分的理论研究都集中于涂层的微观结构和结晶度方面,且多处在实验室当中。纳米涂层主要有两种:纳米多层涂层和纳米复合涂层。纳米多层涂层一般由同种结构材料、化学键和原子半径及点阵相近的各单层材料组成,可得到与组成它的各单层涂层的性能差异显著的全新涂层^[42]。纳米复合涂层可分为两大类:晶态/非晶态,如 nc-TiN/a-Si₃N₄;晶态/晶态,如 TiCN/TiNbCN 等。纳米复合膜的晶粒尺寸和形成的膜厚都是纳米级的。

纳米涂层刀具可根据具体的加工条件选择涂层,

多层处理或复合处理既可发挥各单层涂层超硬、耐磨、抗高温氧化、自润滑等的优势,又能提高刀具的使用寿命。如 TiAlN/CrAlN 纳米多层膜兼具 TiAlN 涂层的热稳定性和 CrAlN 涂层的抗氧化性,且它们适应的温度范围很大,所以无论是切削还是铣削,该多层膜性能都很优异^[43]。组合后的多层膜其综合性能基本上都高于原先涂层,如 TiN/AlN 纳米多层膜,其显微硬度明显高于 TiN 或 AlN 单层膜,具有明显的超硬效应。对比试验表明,TiN/AlN 纳米多层膜涂层刀具比 TiN 涂层刀具具有更长的使用寿命^[44]。

纳米多层膜涂层刀具比其他二元、多元涂层、未涂层刀具都有巨大的优势,V. Braic 等^[45]在高速钢钻头上沉积单涂层和纳米涂层分别干式钻削碳素钢板,结果为 TiN、TiAlN、TiAlZrN 涂层是未涂层刀具寿命的 1.5~1.8 倍,而 TiAlN/TiAlZrN 纳米多层膜则是未涂层刀具的 2.1~2.3 倍。在 50 m/min 的低速、溢流式和油雾润滑下,纳米多层膜 TiAlN/AlCrN 铣削改性的 420 不锈钢比 TiAlN 单涂层和未涂层刀具具有非常高的抵抗分层和磨料磨损的性能^[46]。

对于难加工材料,纳米多层膜极高的耐磨性、抗高温氧化性、高温摩擦系数非常低等性能可以充分发挥优势。A. Biksa 等^[47]发现纳米多层膜 AlTiN/Me_xN 非常适合宇航合金的加工,其中 Me 是元素周期表中 V-VI 族的过渡元素,如 AlTiN/VN 适合于钛基 TiAl6V4 合金的加工,AlTiN/MoN 适合于镍基高温合金 Inconel 718 的加工。此外,也有人采用 AlTiN/Cu 纳米多层膜加工镍基高温合金 Inconel 718^[48]。

当在一些形状复杂的刀具、模具或其他零件表面沉积纳米多层膜时,发现各层膜的厚度不易控制,且高温下各层间的元素也会发生相互扩散,最终导致涂层性能的下降,此时最好的方法是采用纳米复合涂层。

通过多弧离子镀制备的纳米复合多层膜 CrAlTiN 和 CrAlTiSiN 经切削试验发现^[49],涂覆 CrAlTiN 涂层的铣刀使用寿命可提高 3 倍,而 CrAlTiSiN 涂层较 CrAlTiN 涂层还会进一步提高刀具使用寿命。通过溅射沉积得到的纳米复合涂层 AlTiN/Cu 在切削 Inconel 718 时的寿命是 AlTiN 单层涂层切削寿命的 2.3 倍^[48]。W. Henderer 等^[50]在硬质合金基体上制备了不同硅含量的 TiSiN+CrC_x/a-C:H 纳米复合涂层以切削硅铝合金,实验中发现 Si 的原子数分数在 5% 时刀具的磨损量最低,且优于 DLC 涂层。

纳米复合涂层和多层涂层二者因使用环境不同而有所差异,如采用磁控溅射技术在硬质合金上制备 AlTiN/TiN 纳米多层膜和 TiAlSiN/TiSiN/TiAlN 纳米复合膜,经干式面铣削 AISI 02 冷作工具钢发现, AlTiN/TiN 多层膜与基体的结合强度最好,耐磨损最强,刀具寿命最长且分别超出上述纳米复合膜和未涂层刀具的 25% 和 2300%^[51]。

同样,相同的纳米涂层通过不同的制备方法切削效果也不一样,如通过高功率脉冲磁控溅射制备的 AlTiCrN 纳米涂层比通过阴极电弧蒸发制备的同涂层具有优越的机械和摩擦性能,切削刀具的寿命高出 40% 左右^[52—53]。

3 结语

笔者认为未来 PVD 涂层将在以下方面获得大量应用:

1) 超硬切削,包括模具钢、淬硬钢(>HRC55)等。传统的模具制造过程都是先粗加工后淬火再磨削,效率很低,而采用高硬度耐磨涂层淬火后直接铣削加工不仅提高生产效率,还降低能源消耗。

2) 难加工材料切削,包括高温合金、钛合金、不锈钢等。由于它们加工硬化明显,切削温度高(超过 800 ℃),只有采用耐高温、抗氧化的涂层才能进行正常的切削。

3) 石墨、碳纤维等复合材料加工,一般硬质合金刀具很难加工这些材料,实践已证明应用金刚石涂层可轻易地进行切削加工。

4) 有色金属的高速切削,包括铝合金、铜合金、镍等。加工软金属会因粘刀形成积屑瘤使已加工表面的粗糙度很高,如采用摩擦系数非常低的 DLC 涂层,能抑制积屑瘤的形成从而得到光滑的加工表面。

未来超硬纳微米 PVD 涂层技术在刀具领域将向多元化、复合化、纳米化等方向发展,今后重点对纳米复合涂层的研究、摩擦系数极低的软涂层的研究、低温 PVD 沉积技术和制定涂层刀具行业标准是涂层刀具研究的大趋势,相信 PVD 涂层技术在刀具行业中的应用将会越来越广泛。

参考文献

- [1] 张而耕,吴雁.现代 PVD 表面工程技术及应用[M].北京:科学出版社,2013.
- [2] ZHANG Er-geng, WU Yan. Modern PVD Surface Engineering Technology and Application [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [3] 王彦峰,李争显,杜继红,等. PVD 技术在镁合金表面防护领域的应用及研究进展[J]. 表面技术, 2010, 39(4): 94—98.
- [4] WANG Yan-feng, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Application and Development Trend of PVD on the Filed of Magnesium Alloy Surface Protection [J]. Surface Technology, 2010, 39(4): 94—98.
- [5] PANJAN P, GSELMAN P, KEK-MERL D, et al. Growth Defect Density in PVD Hard Coatings Prepared by Different Deposition Techniques [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 237: 349—356.
- [6] ASLANTAS K, UCUN I, ÇICEK A. Tool Life and Wear Mechanism of Coated and Uncoated Al₂O₃/TiCN Mixed Ceramic Tools in Turning Hardened Alloy Steel [J]. Wear, 2012, 274: 442—451.
- [7] 韩文强,何辉波,李华英,等. TiN 涂层刀具对 20CrMo 钢的干切削性能的影响及磨损机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 64—70.
- [8] HAN Wen-qiang, HE Hui-bo, LI Hua-ying, et al. Effect of TiN Coated Tools on Machinability and Wear Mechanism in Dry Turning of 20CrMo Steel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(1): 64—70.
- [9] 李祝庆. 高速钢涂层刀具[J]. 职业, 2011(9): 179—180.
- [10] LI Zhu-qing. High-speed Steel Coated Tools [J]. Career, 2011(9): 179—180.
- [11] 余米香,范洪远,熊计. C 离子注入对硬质合金刀具 TiN 涂层性能的影响[J]. 工具技术, 2009, 43(8): 27—29.
- [12] YU Mi-xiang, FAN Hong-yuan, XIONG Ji. Effects of C-ion Implantation on Properties of TiN Coatings on Carbide Tools [J]. Tool Engineering, 2009, 43(8): 27—29.
- [13] 杨娟,陈志谦,聂朝胤. 电弧离子镀 CrN 涂层的制备及性能研究[J]. 金属热处理, 2009(7): 75—79.
- [14] YANG Juan, CHEN Zhi-jian, NIE Chao-yin. Preparation and Properties of CrN Coating by Arc Ion Deposition [J]. Heat Treatment of Metals, 2009(7): 75—79.
- [15] 林松盛,代明江,侯惠君,等. 物理气相沉积(PVD)硬质薄膜及在工模具上的应用[J]. 模具工程, 2006(1): 63—67.
- [16] LIN Song-sheng, DAI Ming-jiang, HOU Hui-jun, et al. The Process of Hard Films on Tools and Dies Deposited by Physical Vapor Deposition Technology [J]. Mould & Die Project, 2006(1): 63—67.
- [17] 刘凯. 氮化碳涂层刀具干式切削研究[J]. 机械工程与自

- 动化,2012(2):207—208.
- LIU Kai. Research on Dry-cutting of Carbon Nitride Coated Tool[J]. Mechanical Engineering & Automation,2012(2):207—208.
- [11] ECKHARD WISSUWA, STEFAN SCHOLZE. 刀具涂层提高加工效率[J]. 现代制造·现代金属加工,2012(4):54—56.
- ECKHARD WISSUWA, STEFAN SCHOLZE. The Cutting Tool Coating to Improve Processing Efficiency[J]. Maschinen Markt·Modern Metal Processing,2012(4):54—56.
- [12] 邱家稳,赵栋才. 电弧离子镀技术及其在硬质薄膜方面的应用[J]. 表面技术,2012,41(2):93—100.
- QIU Jia-wen, ZHAO Dong-cai. A Review of Vacuum Arc Deposition and Its Application in Hardness Films[J]. Surface Technology,2012,41(2):93—100.
- [13] 张艳茹,杭凌侠,郭峰,等. 直流反应磁控溅射制备 a-C:H 薄膜及其表面粗糙度研究[J]. 表面技术,2013,42(2):92—94.
- ZHANG Yan-ru, HANG Ling-xia, GUO Feng, et al. Study on Deposition of a-C:H Film by Reactive DC Magnetron Sputtering and Its Surface Roughness[J]. Surface Technology,2013,42(2):92—94.
- [14] SCHIER V, WALTER A G. 物理气相沉积(PVD)制备氧化铝涂层[J]. 工具技术,2006(1):33.
- SCHIER V, WALTER A G. The Preparation of Alumina Coatings by Physical Vapor Deposition[J]. Tool Engineering,2006(1):33.
- [15] 莫继良,任元,朱旻昊. TiAlN 涂层高速钢刀具的制备及钻削性能研究[J]. 中国表面工程,2010,23(2):26—29.
- MO Ji-liang, REN Yuan, ZHU Min-hao. Preparation and Drilling Properties of TiAlN Coated HSS Twist Drill[J]. China Surface Engineering,2010,23(2):26—29.
- [16] 冉春华. TiN、TiAlN 涂层刀具的切削性能对比研究[D]. 重庆:西南大学,2013.
- RAN Chun-hua. Comparative Study on the Cutting Performance of TiN, TiAlN Coated Tools[D]. Chongqing:Southwest University,2013.
- [17] 杨锴. TiN 涂层与 TiAlN 涂层在滚刀上的比较应用[J]. 金属加工:冷加工,2013(15):47—49.
- YANG Kai. Comparison of TiN Coating and TiAlN Coating on the Hob[J]. Metal Working:Cold Working,2013(15):47—49.
- [18] 徐银超. PVD 涂层硬质合金的组织性能及其刀具切削性能研究[D]. 湖南:中南大学,2011.
- XU Yin-chao. Research of Microstructure and Cutting Performance of PVD Coated Cemented Carbide[D]. Hunan:Central South University,2011.
- [19] YU D, WANG C, CHENG X, et al. Microstructure and Properties of TiAlSiN Coatings Prepared by Hybrid PVD Technology[J]. Thin Solid Films,2009,517(17):4950—4955.
- [20] 曹峻,许俊华,喻利花. TiCN/VCN 多层膜的力学和摩擦磨损性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2013(1):132—138.
- CAO Jun, XU Jun-hua, YU Li-hua. Mechanical and Tribological Performance of TiCN/VCN Multilayer Films[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy,2013(1):132—138.
- [21] ZHANG G, LI B, JIANG B, et al. Microstructure and Tribological Properties of TiN, TiC and Ti(C,N) Thin Films Prepared by Closed-field Unbalanced Magnetron Sputtering Ion Plating[J]. Applied Surface Science,2009,255(21):8788—8793.
- [22] 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 Yi-xi, ZHU Xin-fa, ZHANG Jing-jing. Microstructure and Cutting Performance of TiCN and TiN Tooling Coatings Prepared by Ion Plating[J]. Tool Engineering,2010,44(11):18—21.
- [23] SOUZA J V C, NONO M C A, SILVA O M M, et al. Development and Characterization of Si₃N₄ Coated AlCrN Ceramic Cutting Tool[J]. Materials Science Forum,2010,660:697—700.
- [24] CHANDIRAN A, ANANDAN N, SAKTHIVEL S. Comparative Study on Tool Life and Wear Resistance of Titanium Nitride (TiN) and Aluminium Chromium Nitride (AlCrN) Coated Carbide Inserts[J]. Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces,2012,6(4):160—167.
- [25] 王新永,庞思勤. AlCrN 涂层硬质合金切削高温合金耐用度对比实验[J]. 北京理工大学学报,2012,32(5):450—454.
- WANG Xin-yon, PANG Si-qi. Wear Mechanism Analysis and Endurance Test of AlCrN Coated Carbide Tools in Cutting High-temperature Alloy[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2012,32(5):450—454.
- [26] MO J L, ZHU M H, LEYLAND A, et al. Impact Wear and Abrasion Resistance of CrN, AlCrN and AlTiN PVD Coatings[J]. Surface and Coatings Technology,2013,215:170—177.
- [27] 刘杰. 多元复合涂层高速钢刀具切削性能及磨损机理研究[D]. 西安:西安理工大学,2008.
- LIU Jie. Research on the Cutting Performance and Wear Mechanism of Multicomponent Coated HSS Tools[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2008.
- [28] 钟江泉,周天勇,刘成明. 非平衡磁控溅射技术在刀具涂层上的应用[J]. 技术与市场,2011,18(5):9—10.

- ZHONG Jiang-quan, ZHOU Tian-yong, LIU Cheng-ming. Application of Coated Cutting Tools by Unbalanced Magnetron Sputtering Technology [J]. Technology and Market, 2011, 18(5): 9—10.
- [29] 田正磊. H13 模具钢表面磁控溅射 CrNiTiAlN 涂层的性能研究[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2012.
- TIAN Zheng-lei. Study on Properties of CrNiTiAlN Thin Films on H13 Steel by Unbalanced Magnetron Sputtering [D]. Zhejiang: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [30] 麻秦凡, 李阳, 陈辉, 等. PVD 涂层硬质合金钻头钻削 SKD61 模具钢试验的研究[J]. 新技术新工艺, 2012(7): 74—76.
- MA Qin-fan, LI Yang, CHEN Hui, et al. Experimental Research on PVD-coated Carbide Tool Steel Drill Bit Drilling SKD61 [J]. New Technology & New Process, 2012(7): 74—76.
- [31] 陈政文, 商宏飞, 徐建华, 等. 基于切削力的 PVD 涂层刀具性能研究[J]. 工具技术, 2012, 46(10): 15—17.
- CHEN Zheng-wen, SHANG Hong-fei, XU Jian-hua, et al. Study on Properties of PVD Coated Tools Based on Cutting Force [J]. Tool Engineering, 2012, 46(10): 15—17.
- [32] KULKARNI A P, SARGADE V G. Performance of Multilayered PVD Coated Cemented Carbide Inserts during Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel [J]. Advanced Materials Research, 2013, 794: 248—254.
- [33] SONG X Y, ZHAO J. Failure Mechanisms of Carbide Tool in High Speed Milling of Inconel 718 [J]. Advanced Materials Research, 2010, 97: 1920—1924.
- [34] JASNI N A H, LAJIS M A, KAMDANI K. Tool Wear Performance of TiAlN/AlCrN Multilayer Coated Carbide Tool in Machining of AISI D2 Hardened Steel [J]. Advanced Materials Research, 2012, 488: 462—467.
- [35] GILEWICZ A, WARCHOLINSKI B, MYSLINSKI P, et al. Anti-wear Multilayer Coatings Based on Chromium Nitride for Wood Machining Tools [J]. Wear, 2010, 270(1): 32—38.
- [36] WARCHOLINSKI B, GILEWICZ A. Multilayer Coatings on Tools for Woodworking [J]. Wear, 2011, 271(11): 2812—2820.
- [37] WARCHOLINSKI B, GILEWICZ A, RATAJSKI J. Cr₂N/CrN Multilayer Coatings for Wood Machining Tools [J]. Tribology International, 2011, 44(9): 1076—1082.
- [38] HONG Y, JIANG H, RAJA S. The Stress Distribution and Thermal Behavior of TiBN and TiBN/TiN Coatings in Milling AISI H13 Work Tool Steel [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2005, 20(1): 1—5.
- [39] JIANHUA L, YING L, HAN Z, et al. Structure Design and Coating Performance of ZrN Coated Cutting Tools [C]// Measuring Technology and Mechatronics Automation (IC-MTMA), 2011 Third International Conference on. IEEE, 2011: 369—372.
- [40] HOSOKAWA A, SHIMAMURA K, UEDA T. Cutting Characteristics of PVD-coated Tools Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering method [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 95—98.
- [41] 徐锦洪, 郑小虎, 安庆龙, 等. 高速铣削 TC6 钛合金的刀具磨损机理 [J]. 上海交通大学学报 (自然版), 2012, 46: 1037—1042.
- XU Jin-yang, ZHENG Xiao-hu, AN Qing-long, et al. Wear Mechanism of Tool in High-speed Milling of Titanium Alloy TC6 [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Natural Science), 2012, 46: 1037—1042.
- [42] 白晓明, 郑伟涛, 安涛. 超硬纳米多层膜和复合膜的研究综述. 自然科学进展, 2005, 15(1): 21—28.
- BAI Xiao-ming, ZHENG Wei-tao, AN Tao. Review of Research on Superhard Nano Multilayer Film and Composite Film [J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(1): 21—28.
- [43] LI P, CHEN L, WANG S Q, et al. Microstructure, Mechanical and Thermal Properties of TiAlN/CrAlN Multilayer Coatings [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013, 40: 51—57.
- [44] 潘应君, 邓敏, 陈淑花, 等. 多弧离子镀制备 TiN/AlN 纳米多层膜及其超硬效应 [J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2008, 31(3): 312—315.
- PAN Ying-jun, DENG Min, CHEN Shu-hua, et al. Preparation and Ultra Micro-hardness of TiN/AlN Nano-multilayer Deposited by Multi-arc Ion Plating [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 31(3): 312—315.
- [45] BRAIC V, ZOITA C N, BALACEANU M, et al. TiAlN/TiAlZrN Multilayered Hard Coatings for Enhanced Performance of HSS Drilling Tools [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(12): 1925—1928.
- [46] LIEW W Y H. Low-speed Milling of Stainless Steel with TiAlN Single-layer and TiAlN/AlCrN Nano-multilayer Coated Carbide Tools under Different Lubrication Conditions [J]. Wear, 2010, 269(7): 617—631.
- [47] BIKSA A, YAMAMOTO K, DOSBAEVA G, et al. Wear Behavior of Adaptive Nano-multilayered AlTiN/Me_xN PVD Coatings during Machining of Aerospace Alloys [J]. Tribology International, 2010, 43(8): 1491—1499.
- [48] FOX-RABINOVICH G S, YAMAMOTO K, AGUIRRE M H, et al. Multi-functional Nano-multilayered AlTiN/Cu PVD Coating for Machining of Inconel 718 Superalloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(15): 2465—2471.

- Paints[J]. Industrial Diamond Review, 2004(3):30.
- [4] KOKSHAROV S A. Role of Organic Solvents And Surface-active Agents in the Sol-emulsion-gel Synthesis of Spherical Alumina Powders[J]. Journal of Materials Research, 2000, 15(1):176—185.
- [5] YANG L H, LIU F C. Effects of P/B on the Properties of Anti-corrosive Coatings with Different Particle Size[J]. Progress in Organic Coatings, 2005, 53:91.
- [6] RUSSO D, MCKOWN C. The Influence of Film Composition on the Optical and Thermal Properties of Solar Control Coatings[J]. Thin Solid Films, 2001, 398:65.
- [7] 曹鹏军, 范培耕, 仵海东, 等. 纳米材料 TiO_2 在汽车面漆中的应用探讨[J]. 表面技术, 2002, 31(6):7—11.
CAO Peng-jun, FAN Pei-geng, WU Hai-dong, et al. Feasibility Study on Prolonging Property of Paint Film by Means of Nano Material TiO_2 [J]. Surface Technology, 2002, 31(6):7—11.
- [8] 陈县萍, 王贵友, 徐强, 等. 聚氨酯/ Al_2O_3 纳米复合材料的制备和性能[J]. 功能高分子学报, 2008, 21(2):123—127.
CHEN Xian-ping, WANG Gui-you, XU Qiang, et al. Preparation and Properties of Polyurethane/Alumina Nanocomposites[J]. Journal of Functional Polymers, 2008, 21(2):123—127.
- [9] 薛茹君, 吴玉程. 硅烷偶联剂表面修饰纳米氧化铝[J]. 应用化学, 2007, 24(11):1236—1239.
XUE Ru-Jun, WU Yu-Cheng. Surface Modification of Nano-alumina with Silane Coupling Agent[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2007, 24(11):1236—1239.
- [10] CHEN Guang-shun, TIAN Man-hong, GUO Shao-yun. A Study on the Morphology Mechanical Properties of PVC/ Nano- SiO_2 Composites[J]. Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics, 2006, 45B(5):709.
- [11] 沈远, 刘京雷, 侯峰, 等. 偶联剂对氧化铁红粉体的表面改性[J]. 表面技术, 2014, 43(1):59—62.
SHEN Yuan, LIU Jing-lei, HOU Feng, et al. Surface Modification of Iron Oxide Red Powder Using Coupling Agent[J]. Surface Technology, 2014, 43(1):59—62.
- [12] ROGER Cayton, RICHARD W, MARC Kullberg, et al. Substantially Transparent, Abrasion-resistant Films Containing Surface-treated Nanocrystalline Particles: US, 6896958 B1 [P]. 2005-05-24.
- [13] 郝春静, 湛含辉, 王晓. 硅烷偶联剂链长对纳米 TiO_2 表面改性的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(2):10—13.
HAO Chun-jing, ZHAN Han-hui, WANG Xiao. Effect of Chain Length of Silane Coupling Agent for Surface Modification of Nano- TiO_2 [J]. Surface Technology, 2013, 42(2):10—13.
- [14] 张法碧, 朱景川. 涂层用 Al_2O_3 - ZrO_2 复合浆料的制备[J]. 表面技术, 2010, 39(1):97—100.
ZHANG Fa-bi, ZHU Jing-chuan. Preparation of Al_2O_3 - ZrO_2 Composite Slurry for Coating[J]. Surface Technology, 2010, 39(1):97—100.
- [15] 王永垒, 吾满江·艾力. 室温下硬脂酸改性纳米氧化铝的工艺研究[J]. 无机盐工业, 2010, 42(11):33—35.
WANG Yong-lei, WUMANJIANG · Eli. Surface Modification Process of Nano- Al_2O_3 with Stearic Acid at Room Temperature[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2010, 42(11):33—35.
- [16] ASTM D 3363—05, Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test[S].

(上接第96页)

- [49] 付酮程, 闫少健, 田灿鑫, 等. CrAlTiN 及 CrAlTiSiN 纳米多层复合涂层的制备及性能[J]. 中国表面工程, 2013, 26(1):20—26.
FU Tong-cheng, YAN Shao-jian, TIAN Can-xin, et al. CrAlTiN and CrAlTiSiN Nanocomposite Coatings Deposited by Multi-arc Plasma Deposition [J]. China Surface Engineering, 2013, 26(1):20—26.
- [50] HENDERER W, XU F. Hybrid TiSiN , CrC/C PVD Coatings Applied to Cutting Tools [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 215:381—385.
- [51] ÇALIŞKAN H, KURBANOĞLU C, PANJAN P, et al. Wear Behavior and Cutting Performance of Nanostructured Hard Coatings on Cemented Carbide Cutting Tools in Hard Milling[J]. Tribology International, 2013, 62:215—222.
- [52] KULKARNI A P, JOSHI G G, SARGADE V G. Performance of PVD AlTiCrN Coating during Machining of Austenitic Stainless Steel [J]. Surface Engineering, 2013, 29(5):402—407.
- [53] 张而耕, 孔令超. 焊接刀具 PVD 涂层值得关注的几个问题 [J]. 表面技术, 2010, 39(3):106—108.
ZHANG Er-geng, KONG Ling-chao. Several Notable Problems from Welded Tools with PVD Coating [J]. Surface Technology, 2010, 39(3):106—108.