

先进刀具技术现状分析及发展趋势

Analysis of Present Situation and Developing Trend of Advanced Cutting Tool Technology

中国商飞上海飞机制造有限公司 张烘州 蒋红宇 陈洁
上海交通大学机械与动力工程学院 明伟伟



张烘州

中国商飞上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所先进制造中心工程师。目前主要从事复合材料结构件高效精密制孔及刀具技术、航空材料高速切削加工技术等方面的研究。

进入 21 世纪以来,随着制造技术的全球化趋势,制造业的竞争也越来越激烈。在由机床、刀具、夹具和工件组成的切削加工工艺系统中,刀具是最活跃的因素。因此在高速加工技术广泛应用于生产的今天,高性能

高速切削作为先进制造技术的一项全新的共性基础技术,已经成为现代切削加工技术的重要发展方向。先进刀具在机械加工中起到了越来越重要的作用,选择合适的刀具材料、涂层及几何参数将是实现高效切削加工的关键。因此,刀具作为切削加工工艺系统中最活跃的因素已经成为实现高速切削加工的必要条件。

能刀具越来越受到重视并大量取代传统刀具。虽然高性能刀具与传统刀具相比价格昂贵,甚至是传统刀具的 10 倍,但是使用高性能刀具仍然可以有效地降低生产成本^[1]。

刀具材料、几何参数及其结构是高性能刀具设计制造最重要的关键技术,如图 1 所示。目前,先进刀具发展迅速,各种专用高性能刀具不断推陈出新。在刀具材料方面,超细晶粒硬质合金刀具和超硬材料刀具获得了广泛运用;在涂层方面,多层梯度复合涂层和高强度耐热纳米涂层也得到了长足的发展,并在航空航天、汽车船舶等领域得到应用;在刀具结构方面,将朝可转位、多功能、专用复合刀具和模块式方向发展,如图

2 所示。

刀具材料的最新进展

近年来,世界各工业发达国家都在致力于开发与高速、高效、高质切削加工相匹配的先进切削刀具材料^[2]。刀具材料对刀具寿命、加工效率、加工质量和加工成本等影响很大。刀具切削时要承受高压、高温、摩擦、冲击和振动等作用,因此刀具材料必须具备如下一些基本性能:硬度高,即刀具材料的硬度必须高于被加工材料;高的强度和韧性,刀具切削部分的材料在切削时要受到很大的切削力和冲击力,因此刀具材料必须要有足够的强度和韧性;耐磨性和耐热性好,一般来说,刀具材料

硬度越高,耐磨性也就越好,同时刀具的耐磨性和耐热性有着密切的关系;导热性好,导热性越好,就能降低切削部分的温度,从而减轻刀具磨损;工艺性和经济性好^[3-5]。

(1) 新型高速钢。

高速钢(HSS)是加入了W、Mo、Cr、V等合金元素的高合金工具钢。虽然目前可供使用的刀具材料品种较多,但由于高速钢在强度、韧性、热硬性、工艺性,特别是锋利性(刀尖半径可达 $12\sim 15\mu\text{m}$)等方面具有优良的综合性能,因此在切削某些难加工材料以及在复杂刀具(尤其是切齿刀具、拉刀和立铣刀等)制造中仍占有较大比重^[6]。

(2) 新型细晶粒和超细晶粒硬质合金。

硬质合金是高硬度、难熔的金属化合物(主要是WC, TiC等,又称为高温碳化物)微米级的粉末,用钴或镍等金属做粘结剂烧结成的粉末冶金制品。硬质合金是当前切削领域中应用最广泛的切削刀具材料,切削效率大约为高速钢的5~10倍。全世界硬质合金的产量增长极快,新材料、新牌号的硬质合金刀具不断出现,在全部刀具中的比重越来越大。但其工艺性差,用于复杂刀具尚受到很大的限制。

细晶粒($1\sim 0.5\mu\text{m}$)和超细晶粒(小于 $0.5\mu\text{m}$)硬质合金材料及整体硬质合金刀具的开发,使硬质合金的抗弯强度大大提高,可替代高速钢用于制造小规模钻头、立铣刀、丝锥等量大面广的通用刀具,其切削速度和刀具寿命远超过高速钢。整体硬质合金刀具的使用可使原来采用高速钢的大部分应用领域的切削效率显著提高。为提高硬质合金的韧性,通常采取增加Co含量的方法,由此引起的硬度降低现在可通过细化晶粒得到补偿,并可使硬质合金的抗弯强度提高到4.3GPa,已达到并超过普通高速钢的抗弯强度。细晶粒硬

质合金的另一优点是刀具刃口锋利,尤其适合高速切削粘而韧的材料^[5]。

(3) 超硬刀具。

所谓超硬刀具材料是指人造金刚石和立方氮化硼,以及用这些粉末与结合剂烧结而成的聚金刚石和聚晶立方氮化硼。由于超硬刀具具有比硬质合金更优良的耐磨性,能够适应更高的切削速度,已成为高速切削的主要刀具材料,更为重要的是能够满足难加工材料的切削需要。因此超硬刀具材料已经在整个切削加工领域中起到越来越重要的作用。

金刚石是碳的同素异形体,分为天然金刚石和人造金刚石(PCD)两种。PCD是在高温、高压和催化剂作用下,由石墨转化而成的。金刚石刀具具有极高的硬度和耐磨性,拥有锋利的切削刃和良好的导热性能,同时PCD刀具与有色金属和非金属材料间的亲和力很小,在加工过程中不易在刀尖上产生积屑瘤。目前,PCD刀具主要运用在以下两个方面^[2,5]: a. 难加工有色金属及其合金,如用PCD刀具加工硅铝合金时,刀具寿命可达硬质合金的50~200倍; b. 难加工非金属材料,PCD刀具非常适合于石材、硬质碳、碳纤维增强塑料和人造板材等难加工非金属材料的加工^[6]。因此,可以说金刚石刀具是精

密加工有色金属及其合金、陶瓷、玻璃、木材等非金属材料最佳的刀具。

但是金刚石的热稳定性较低,切削温度超过 $700\sim 800\text{℃}$ 时,就会完全失去其硬度。另外,金刚石中的碳和铁具有很强的亲和力,在高温高压下,铁原子与碳原子发生相互作用,导致金刚石石墨化,从而使刀具极易发生磨损。因此,金刚石刀具一般不用来加工钢铁等材料。

继美国GE公司于1957年首次合成立方氮化硼之后,在高温高压条件下将立方氮化硼聚合在硬质合金上,得到了复合结构的立方氮化硼(CBN)刀片。CBN刀片具有聚晶烧结块和复合刀片两种,能在较高切削速度下加工淬硬钢及铸铁,以车代磨,并可高速切削部分高温合金,加工精度高,表面粗糙度相当低,而且立方氮化硼还适宜加工各种淬硬钢、Ni基、Fe基及其他一些耐磨、耐蚀的热喷涂(焊)件材料,钎钛铸铁、冷硬铸铁等耐磨类铸铁,钛合金材料等^[2]。

(4) 陶瓷材料。

陶瓷刀具具有很高的硬度、耐磨性能及良好的高温力学性能,与金属的亲和力小,不易与金属产生粘结,并且化学稳定性好。因此,陶瓷刀具可以加工传统刀具难以加工或根本不能加工的超硬材料。陶瓷刀具具有

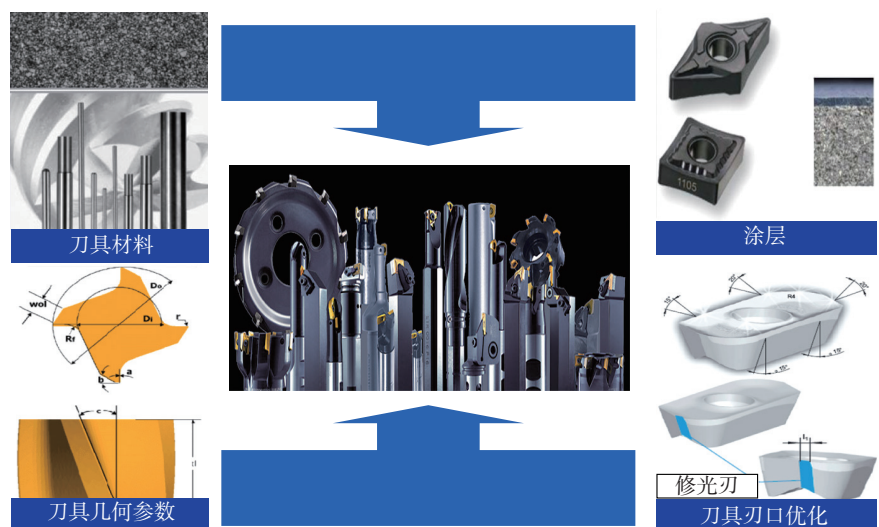


图1 高性能刀具设计制造关键技术

Al₂O₃ 基和 Si₃N₄ 基两大类,加入各种碳化物、氮化物、硼化物和氧化物等可改善其性能,还可通过颗粒、晶须、相变、微裂纹和几种增韧机理的协同作用提高其断裂韧性^[7-9]。

目前,国产的一些晶须增韧陶瓷、梯度功能陶瓷等产品已达到国外同类刀片的性能,有的还优于国外。陶瓷刀具使用的主要原料氧化铝、氧化硅等在地壳中含量丰富,对节省贵重金属也具有重要的意义。陶瓷刀具主要应用于难加工材料的高速加工。国际上已经将陶瓷材料刀具视为进一步提高生产率的最有希望的刀具之一^[10-11]。

刀具涂层的最新进展

在相对较软的刀具基体上涂覆一层或多层硬度高、耐磨性好的金属或非金属化合物薄膜(如 TiAlN、TiC、TiN、Al₂O₃ 等)而形成的涂层刀具,是切削刀具发展的一次革命。涂层刀具与未涂层刀具相比,具有明显的优越性:显著降低摩擦系数,改善刀具表面的摩擦学性能和排屑能力;显著提高耐磨性和抗冲击韧性,改善刀具的切削性能,提高加工效率和刀具寿命;提高刀具表面抗氧化性能,使刀具可以承受更高的切削热,有利于提高切削速度及加工效率,并扩大

了干切削的应用范围。在先进制造业中,80% 以上的硬质合金刀具及高性能高速钢刀具都采用了表面涂层技术,而 CNC 机床上所用的切削刀具 90% 以上是涂层刀具^[2-5]。

刀具涂层技术自从问世以来,对刀具技术的改善和加工技术起到了越来越重要的作用,已经成为现代刀具的标志。涂层刀具是通过在韧性较好的硬质合金基体或高速钢基体上,涂覆一薄层耐磨性高的难熔金属化合物而获得的,使刀具性能发生了巨大的变化。常用的涂层材料有 TiC、TiN、Al₂O₃ 等,其中 TiC 的硬度比 TiN 高,抗磨损性能更好。对硬质合金,一般采用化学气相沉积法(CVD),层积温度为 1000℃;而对高速钢刀具,一般采用物理气相沉积法(PVD),层积温度在 500℃ 左右^[2]。

随着涂层工艺的日益成熟和不断发展,从开始的单一涂层,进入到开发多元、多层、梯度、纳米涂层的新阶段。就目前 PVD 技术的发展状况,涂层薄膜结构大体可以分为单一涂层、复合涂层、梯度涂层、多层涂层、纳米多层涂层、纳米复合结构涂层^[3]。

复合涂层是由各种不同功能或特性的涂层薄膜组成的结构,也称为复合涂层结构膜,其典型涂层为目前的硬涂层加软涂层,每层薄膜各具不

同的特征,从而使涂层具有更好的综合性能^[12-14]。

梯度涂层是指涂层成分沿着薄膜生长方向逐步变化,这种变化可以是化合物各元素比例的变化,如 TiAlCN 中 Ti、Al 含量的变化,也可以由一种化合物逐渐过渡到另一种化合物,如 CrN 逐渐过渡到 CBC 碳基涂层^[15]。

多层涂层由多种性能各异的薄膜叠加而成,每层膜化学组成基本恒定。目前在实际应用中多有 2 种不同膜组成,由于所采用的工艺存在差异,各膜层的尺寸也不尽相同,通常由十几层薄膜组成,每层薄膜尺寸大于几十纳米,最具代表性的有 AlN + TiN、TiAlN + TiN 涂层等。与单层涂层相比,多层涂层可有效改善涂层组织状况,抑制粗大晶粒组织生长^[16]。

纳米多层涂层结构与多层涂层类似,只是各层薄膜的尺寸为纳米数量级,又可称为超显微结构。理论研究证实,在纳米调制周期内(几纳米至几十纳米),与传统的单层膜或普通多层膜相比,此类薄膜具有超硬度、超模量效应,其显微硬度预计可以超过 40GPa,并且在相当高的温度下,薄膜仍可保留非常高的硬度。

正因为涂层刀具既有硬度很高、化学稳定性好、摩擦系数小的表层,不易产生扩散磨损,同时又有基体的韧性,因而切削力、切削温度都较低,能够显著提高刀具的切削性能。因此,涂层刀具已成为现代切削刀具的主流,西方工业发达国家使用的涂层刀具占可转位刀片的比例已由 20 世纪 80 年代的 26% 上升到目前的 90%,新型数控机床所用的刀具中 80% 左右是涂层刀具。瑞典山特维克可乐满和美国肯纳金属公司的涂层刀片的比例已达 85% 以上;美国数控机床使用的硬质合金涂层刀片的比例为 80%;瑞典和德国车削用的涂层刀具都在 70% 以上^[3,15]。我国涂层刀具起步晚,但进步快,其

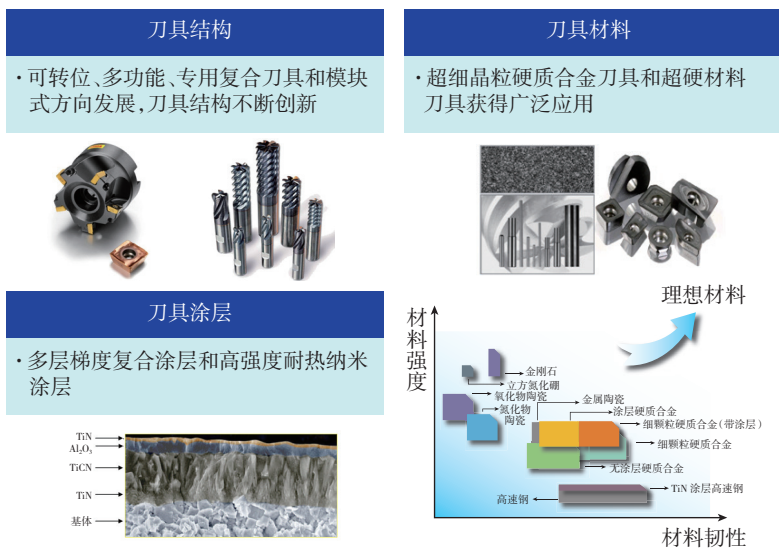


图2 专用高性能刀具主要发展趋势

涂层网点遍布全国。有不少城市都有自己的涂层中心,并承接对外加工业务。我国从1970年代初就开始进行CVD涂层技术研究,80年代中期,我国的CVD涂层技术就已经进入实用化水平,其工艺水平也达到国际水平。总体而言,国内CVD涂层技术水平与国际水平相差不大。但我国1980年初才开始研究PVD涂层技术,目前国外刀具PVD涂层技术已发展到第四代,而国内还处于第二代水平,且仍以单层TiN涂层为主^[16]。

刀具结构的最新进展

当前刀具结构的变革正朝着可转位、多功能、专用复合刀具和模块式方向发展,刀具结构不断创新^[5]。

立铣刀采用变螺旋角的设计或者刀槽采用不等分的设计,能减小精密切削中的振动,提高表面质量;高速钢立铣刀的大前角设计明显降低了切削力,改善了排屑,在精密加工中能改善表面的完整性;硬质合金刀具的整体化使小直径刀具的刚度显著提高,甚至复杂刀具如齿轮、螺纹刀具等也采用整体硬质合金制造;整体硬质合金立铣刀采取端齿中一刀过中心设计,使立铣刀功能扩大,不用预钻孔,在一定深度范围内可实现直接向下切削。

钻头的工作条件比较差,而排屑是人们最关心的问题,所以一直在设法改进。群钻是比较典型的,但是其刃磨比较复杂;德国的Guehring公司研制了RT型钻头,其抛物线形槽增加了芯厚,加大了槽的面积;采用S型钻尖的麻花钻具有很好的定心性,能显著减小钻削轴向力,改善排屑断屑状况。

复合刀具淡化了传统的车、铣、镗、钻和螺纹加工等不同切削工艺的界限,能在一次装夹中对复杂零件进行多工序的集中加工,以减少换刀次数,节省换刀时间,还可减少刀具的数量和库存量,有利于管理

和降低制造成本。较常见复合刀具有多功能车刀、铣刀,还有镗铣刀、钻-铣螺纹-倒角等各种多功能刀具。美国肯纳公司的多功能车刀可完成车外圆、端面 and 镗孔等工作。在CIMT2001上,德国Gun-ther公司展出的车、钻刀可在实心材料上钻平底孔、镗孔、车端面、车外圆,可将工时缩短40%。Emuge公司的螺纹铣刀,一次走刀可完成钻底孔、倒角和铣螺纹工序。日本三菱公司开发的Octacot多功能铣刀可安装八角形刀片或圆刀片,在加工中心上完成铣平面、沟槽、台阶、倒角、轮廓加工和斜面等多种加工^[2,5,17-18]。

可转位刀具发展的一个重要方面是刀片断屑槽型的开发,山特维克可乐满推出的R、M和F等新槽型系列(钢材粗加工、半精加工和精加工相应采用PR、PM和PF槽型;切不锈钢时用MR、MM和MF槽型;切铸件和有色金属用KR、KM和KF的槽型)以及伊斯卡以“霸王刀”为典型的槽型设计都独树一帜。这些刀片大多是三维曲面槽型,断屑范围宽,适应性好。

结束语

随着制造技术的全球化,制造业的竞争也日趋激烈。高速切削作为先进制造技术的一项全新的共性基础技术,已经成为现代切削加工技术的重要发展方向。先进刀具在机械加工中起到了越来越重要的作用,选择合理的刀具材料、涂层及几何参数将是实现高效切削加工的关键。因此,刀具作为切削加工工艺系统中最活跃的因素已经成为实现高速切削加工的必要条件。

参考文献

- [1] 艾兴. 高速切削加工研究新进展. 第九届切削与先进制造技术学术会议论文集, 2007.
- [2] 邓建新, 赵军. 数控刀具材料选用手册. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[3] 艾兴. 高速切削加工技术. 北京: 国防工业出版社, 2003.

[4] 翁世修, 吴振华. 机械制造技术基础. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.

[5] 太原市金属切削刀具协会. 金属切削实用刀具技术. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[6] 白清顺, 姚英学, Zhang G, 等. 聚晶金刚石(PCD)刀具发展综述. 工具技术, 2002, 36(3): 7-10.

[7] 胥锴, 刘徽平, 杨天雪. 陶瓷刀具材料及其发展前景. 稀有金属与硬质合金, 2009(3): 57-60.

[8] 张荣波, 许崇海, 冯曰美, 等. 陶瓷刀具材料近期研究进展. 机械工程师, 2008(3): 55-58.

[9] 张福豹, 谢国如. 陶瓷刀具在高速切削加工中的应用. 机械工程与自动化, 2009(12): 196-197.

[10] 岑向东, 谢国如. 新型陶瓷刀具的研究. 现代机械, 2009(4): 3-5.

[11] 景秀并, 林滨, 张琪, 等. 用金属陶瓷刀具加工淬硬钢薄壁件切削参数优化. 组合机床与自动化加工技术, 2009(4): 30-35.

[12] Fox-Rabinovitch G S, Weatherly G C, Dodonov A I, et al. Nano-crystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications. Surface and Coatings Technology, 2004, 177-178: 800-811.

[13] Ninga L, Veldhuis S C, Yamamoto K. Investigation of wear behavior and chip formation for cutting tools with nano-multilayered TiAlCrN/NbN PVD coating. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48: 656-665.

[14] Yoon S Y, Yoon S Y, Chung W S, et al. Impact-wear behaviors of TiN and Ti-Al-N coatings on AISI D2 steel and WC-Co substrates. Surface and Coatings Technology, 2004, 177-178: 645-650.

[15] 梁伟, 王先. 现代刀具涂层技术及发展趋势. 桂林航天工业高等专科学校学报, 2008(1): 17-19.

[16] 赵晓燕. 对我国刀具涂层技术现状及发展趋势的认识. 科技经济市场, 2009(9): 27-29.

[17] 肖曙红, 张柏霖, 李志英. 高速机床主轴/刀具联结的设计. 机械工艺师, 2000(3): 8-10.

[18] 徐进. 刀具结构创新是实现高效加工的有效途径之一. 广东轻工职业技术学院学报, 2008(7): 7-10.

(责编 良辰)