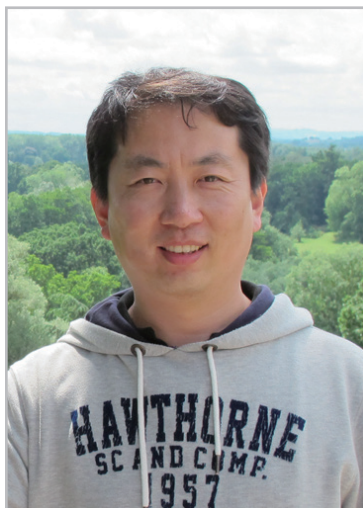


# 先进切削刀具及未来趋势\*

## Advanced Cutting Tool and Future Development Trend

山东大学高效洁净机械教育部重点实验室 万 熠 刘战强 赵 军 李安海  
英国布鲁内尔大学先进制造与企业工程系 程 凯



万 熠

山东大学副教授、硕士生导师,教育部新世纪优秀人才,从事高速高效切削加工技术、难加工材料切削加工技术研究,2012~2013年在英国布鲁内尔大学访学,发表论文 40 余篇。

现在和未来一段时期,切削加工技术在飞机、航空发动机的制造过程当中,仍然是零件成形的主要工艺之一。航空航天零件材料向更高的比强度、耐高温、耐腐蚀等特性发展,高强度钢、钛合金、高温合金、复合材料等难加工材料应用越来越广泛;同时,零件中的薄壁、深腔、复杂曲面等特征越来越复杂,尺寸精度和表面质量要求越来越高;此外,航空制造任

在刀具和切削过程管理过程中,基于 RFID 的刀具出入库管理及刀具使用系统已经逐渐走向商业化。同时,基于零件材料及加工特征的切削专家系统的开发,将为刀具的正确选取和工艺的制订提供解决方案。

务紧、成本压力增大,环境保护法规越来越严格。以上因素将促进切削加工工艺和刀具向更加高效、高精、绿色、智能化、信息化等方向发展。

### 高速切削加工机理进展

难加工材料切削加工刀具的发展离不开切削加工机理研究的突破。难加工材料在高速切削时,工件材料受到高应力、高应变、高应变率 and 高温下的多场耦合强作用,其动态行为发生了很大变化,刘战强等研究了正交切削条件下,以不同切削速度切削 GH4169 高温合金时,切屑形态依次为带状、锯齿形、单元细碎/球形,如图 1 所示,材料变形机制为等温塑性变形、绝热剪切/韧性断裂、脆性断裂,基于移动热源和反求法研究了切削速度对热流量和切削温度的影响规律,得到了切削温度 Salomon 曲线

存在条件:(1)断续切削;(2)切削速度足够高;(3)切削时间与空切时间之比足够小<sup>[1]</sup>。

当高速切削时,即切削速度大于 5000m/min,切屑变成单元细碎状,对于切削加工稳定性是有利的,切削效率高,但刀具寿命非常短,因此要开发出更加耐高温、强度及高温强度高、抗热、力冲击的刀具材料及刀具。

### 先进刀具材料及发展趋势

目前,根据刀具适合加工工件材料的范围、切削方式、刀具几何参数、切削用量和刀具失效机理的不同,高速切削刀具材料主要有金刚石刀具、立方氮化硼刀具、陶瓷刀具、金属陶瓷刀具、硬质合金涂层刀具和超细晶粒硬质合金刀具以及高性能的高速钢刀具等。图 2 为不同刀具材料的韧性、强度和耐磨性或热硬性及其

\* 国家自然科学基金(51175306)资助。

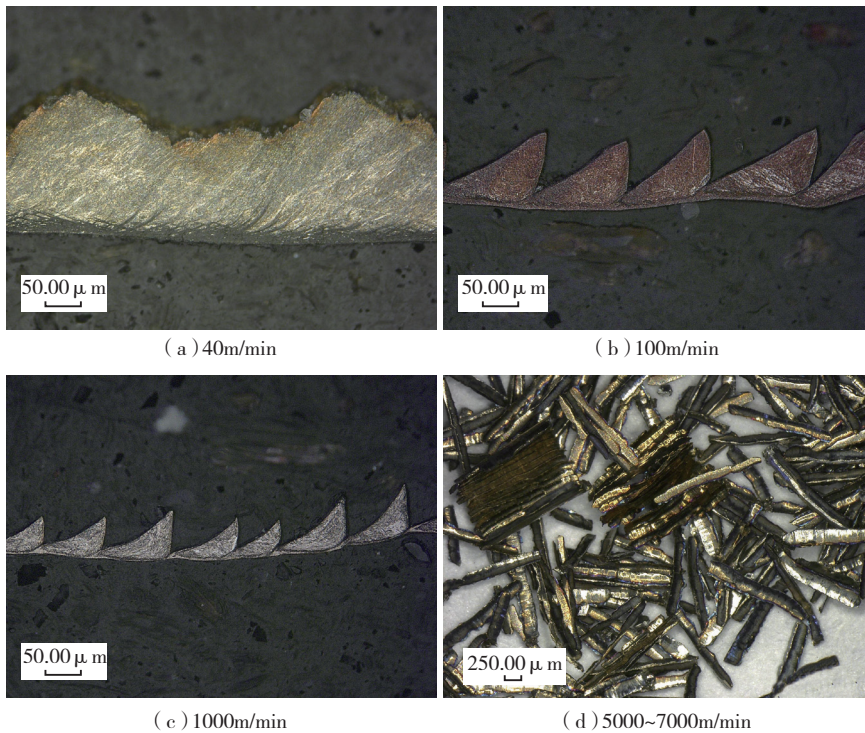


图1 不同切削速度下GH4169切屑形态变化(切宽2mm,切深0.2mm)

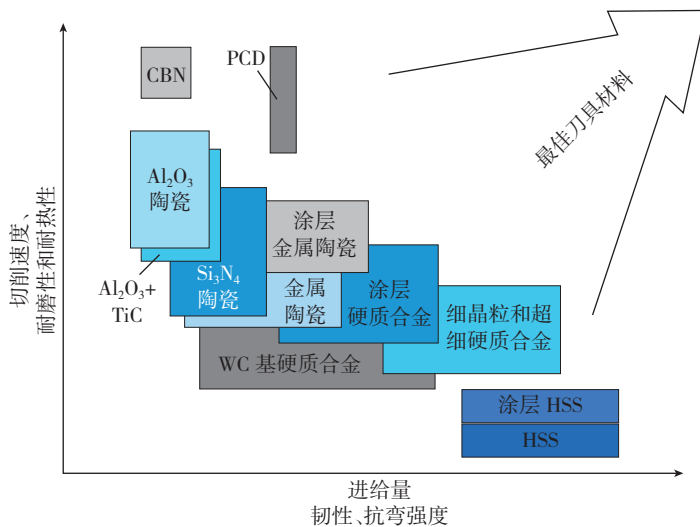


图2 不同刀具材料性能与切削参数关系图<sup>[2]</sup>

所能应用的进给和切削速度的关系图<sup>[2]</sup>。

金刚石的硬度极高、导热性能极好,并且可以刃磨成非常锋利的刀具,能够用来高速加工有色金属和复合材料。目前切削刀具上应用的金刚石刀具主要有天然单晶金刚石刀具、人造单晶金刚石刀具、聚晶金刚石刀具和CVD金刚石刀具(包括金刚石薄膜涂层刀具和金刚石厚膜焊

接刀具)<sup>[3]</sup>。传统条件下,金刚石刀具不能加工钢、铁等黑色金属,但目前有研究表明在超声振动辅助或者干冰气氛下,金刚石刀具可以加工黑色金属材料。

聚晶立方氮化硼(PCBN)的硬度高、导热性好,传统PCBN刀具的切削性能取决于粘结剂的种类和含量<sup>[4]</sup>。粘结剂的种类主要有Co、Ni、TiC、TiN和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等。根据CBN含

量及粘结剂的不同,PCBN刀具可用于某些高温合金的高速加工,并可实现“以车代磨”、“以铣代抛”的高速干切削和硬切削,但PCBN刀具不适用于加工铁素体材料,成本也很高<sup>[5]</sup>。

BCBN(Bondless Cubic Boron Nitride)为不含粘结剂的高纯度聚晶CBN烧结体<sup>[6]</sup>,由于BCBN刀具不含易与钛发生化学反应的粘结剂,在更高的切削速度下可以避免刀具材料与钛合金的化学反应,从而降低切削力、提高加工表面质量并延长刀具寿命。新加坡国立大学采用CBN、BCBN和PCD刀具在高压润滑条件下加工Ti-6Al-4V时发现<sup>[7]</sup>,BCBN刀具在高速切削性能上表现出较大的优势,且随着切削速度的增大,刀具寿命有微小上升的趋势。因此,BCBN将成为新一代的立方氮化硼刀具材料。

陶瓷刀具因其高硬度和耐磨性、高耐热/红硬性、化学稳定性好、摩擦系数低,在切削加工中具有广阔的应用前景。针对陶瓷刀具材料强度、韧性低的缺点,常用的强化方法是通过向陶瓷刀具材料基体中添加ZrO<sub>2</sub>、TiC、(W,Ti)C、Ti(C,N)、TiB<sub>2</sub>、SiC颗粒、SiC晶须等增强相,采用相变增韧、颗粒弥散增韧、晶须增韧以及几种增韧机制的协同增韧等方式来提高刀具材料的性能。目前,陶瓷刀具材料的研究热点主要体现在:梯度功能陶瓷刀具材料<sup>[8]</sup>、微纳米复合陶瓷刀具材料、梯度纳米复合陶瓷刀具材料、自润滑陶瓷刀具材料<sup>[9]</sup>、梯度自润滑陶瓷刀具材料、晶须增韧陶瓷刀具材料等<sup>[10]</sup>。周咏辉等<sup>[11]</sup>通过对纳米复合陶瓷刀具各种材料组分的粒度配比和刀具材料微观结构以及残余热应力分布模式进行分析,提出了微纳米复合协同强韧化机理,包括本征(Intrinsic)强韧化和非本征(Extrinsic)强韧化。本征强韧化主要包括纳米颗粒强化和晶界强化、晶内型结构导致穿晶断

裂强化、位错钉扎强韧化、亚晶界强化、非本征强韧化主要包括裂纹偏转韧化、裂纹分叉韧化、裂纹桥接韧化。

硬质合金是切削加工中应用非常广泛的刀具,但由于其较低的耐热性、硬度和耐磨性,在切削难加工材料时,加工效率及刀具寿命普遍较低,目前的发展重点主要放在超细晶粒硬质合金刀具的研发上。由于晶粒细化(WC平均粒度 $\leq 0.5\mu\text{m}$ ,纳米晶粒硬质合金中WC平均粒度 $\leq 50\text{nm}$ ),可大大提高刀具材料的强度和综合力学性能,超细晶粒硬质合金适合于大多数的钻削和铣削加工中的应用,主要用做整体式刀具,如硬质合金丝攻、立铣刀等。硬质合金材料的力学性能主要取决于微观结构参数,主要包括:Co含量、WC晶粒尺寸(平均晶粒度)、Co相平均自由程、WC邻接度、晶粒取向、晶粒尺寸分布及长径比等。晶粒细化可以提高硬质合金刀具材料的硬度和横向断裂强度,但以降低断裂韧度为代价,高Co含量硬质合金的横向断裂强度和断裂韧度有所提高,但硬度较低<sup>[12]</sup>。因此,应针对特定的工件材料,通过高速切削试验和有限元模拟等手段,优选具有特定微观结构参数的硬质合金刀具材料。

### 先进刀具涂层技术

涂层刀具具有表面硬度高、耐磨性好、化学性能稳定、耐热抗氧化、摩擦因数小和热导率低等特性,切削时可比未涂层刀具提高刀具寿命3~5倍以上,提高切削速度20%~70%,提高加工精度0.5~1级,降低刀具消耗费用20%~50%。刀具涂层技术的发展已成为刀具材料发展的主流。近几年来大量新型涂层材料被采用,涂层装备及工艺技术发展迅速,如新型原子涂层等。高速钢刀具及硬质合金刀具均可通过涂层来提高刀具的使用性能。涂层刀具可明显改善产

品加工质量,提高生产效率并降低刀具使用成本。

目前,涂层技术从单涂层发展到多涂层、纳米涂层以及梯度涂层等,涂层材料从Ti、Ta、Cr、Al、V等元素的碳化物、氮化物、氧化物等简单化合物,发展到复合型化合物和固溶体如Ti(C,N)、TiAlN、CrAlN、TiAlCrN等,还发展了“软”涂层、类金刚石碳涂层DLC、CBN、氮化碳(CN<sub>x</sub>)等超硬涂层及多晶氮化物“超点阵涂层”等,近年来又出现了“软-硬”复合涂层、超硬薄膜涂层以及纳米涂层等。

涂层刀具的基体有:硬质合金(为主)、高速钢、陶瓷、金属陶瓷、PCBN。涂层技术方法分物理沉积PVD和化学沉积CVD两种,其中PVD涂层材料主要为TiN、TiCN、CrN、TiAlN、AlTiN、AlCrN、WC/C、DLC和金刚石等成份,不同的应用领域,需选用不同的涂层材料。涂层的厚度通常只有几个微米,硬度却是钢铁的2~5倍。

常见的涂层有:PVD涂层,如TiAlN/TiN和TiAlN等;CVD涂层,TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN、TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HfN、TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiCN、TiB<sub>2</sub>等;新型复合涂层,如CrSiN、TiSiN、AlCrSiN、TiAlSiN、TiAlCrN和TiBON等;类金刚石涂层DLC,如类金刚石碳涂层、ZrN、TiZrN涂层等;超硬涂层CBN和氮化碳(CN<sub>x</sub>);多晶氮化物超点阵涂层,如TiN/NbN、TiN/VN、TiAlN/VN、CrN/AlTiN等,纳米多层结构等。

按涂层材料可分为硬涂层和软涂层。按涂层结构可分为单层涂层、多层涂层和梯度涂层。硬涂层具有高硬度、高耐磨性;软涂层可用于干式切削,具有低摩擦系数,可明显降低切削力和切削温度。软涂层材料如MoS<sub>2</sub>、WS<sub>2</sub>、TaS<sub>2</sub>及其组合(固体润滑材料)适用于高温、高速、大载荷特殊条件下切削;MoS<sub>2</sub>/Ti涂层刀

具适合于低速断续切削。

### 智能刀具

随着对切削加工过程监测技术的发展,智能刀具(Smart Tool)逐渐成为研究热点。航空零件精度高,对切削过程进行监测并根据不同情况作出决策,具有自适应特征的刀具及刀具系统可以大大提高零件的合格率。智能刀具具有以下特点:自动运行、可以避免和纠正工艺错误、有自学习能力、具有跟其他设备的交互通信能力。

主要实现方式是安装各种传感器,如基于力的压电陶瓷膜(Piezoelectric Ceramic Film)、声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)可以实时监测刀具磨损,如图3所示<sup>[13]</sup>。基于切削温度的监测,如热电偶、红外热像仪等,Brunel University和University of New Hampsgire都做了大量研究;基于快速释放能量并产生瞬态弹性



(a)可测切削力和扭矩的铣刀



(b)可测切削力、切削温度的铣刀

图3 装有各种传感器的智能刀具

波的声发射(Acoustic Emission)监测,可以监测材料在应力作用下的变形与裂纹扩展。

在刀具或刀具系统上可以安装多个传感器,基于传感器融合技术,对复杂切削状态进行监测,并与数控加工系统交互,主动调整加工参数和状态,是未来的发展方向。

## 绿色切削加工刀具及工艺

难加工材料的切削加工过程中,为了提高刀具寿命和表面质量,大部分情况下使用切削液,起到控制切削温度,冷却和润滑作用,但是大部分切削液会挥发且对人体有害。干切削、MQL(Minimum Quantity Lubricant)、冷风切削等切削加工工艺应运而生,英国布鲁内尔大学研究

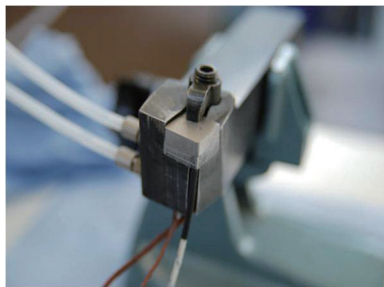
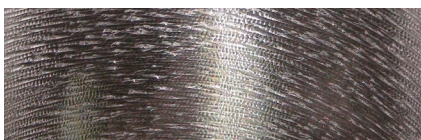


图4 内冷刀具



(a) 约束阻尼型减振镗杆



(b) 普通镗杆和减振镗杆加工效果对比  
图5 减振刀杆和加工效果对比图

了内冷刀具<sup>[14]</sup>,如图4所示。通过加入水循环来强化换热,降低切削温度,提高刀具寿命。

## 其他特殊结构刀具

为了减少切削加工过程中的振动,可以改变铣刀的几何结构设计,如不等齿、不等螺旋整体铣刀或约束阻尼型减振镗杆等,如图5所示,可以在大的悬伸量下得到较高质量的表面在复合材料切削加工中研制了人字形铣刀等,以及复合材料钻孔用的双刃带,八面钻的独特设计,能够更好地满足复合材料加工时的应用。为了起到润滑和减摩作用,近几年刀具带有微织构或者微织构填充固体润滑剂的刀具研究较多。

为了延长切削加工钛合金等难加工材料的刀具寿命,带有高压内冷结构的刀具得到越来越多得应用,高压喷嘴将冷却液精确的喷射到刀片合适的位置,不但利于断屑,更延长了换刀时间。

在刀具和切削过程管理过程中,基于RFID的刀具出入库管理及刀具使用系统已经逐渐走向商业化。同时,基于零件材料及加工特征的切削专家系统的开发,将为刀具的正确选取和工艺的制订提供解决方案。

综上所述,材料的发展、工艺的要求是刀具材料、刀具结构和切削加工工艺不断发展的驱动力,而高效、高精度、智能化、绿色化、信息化是永恒的主题。

## 参考文献

- [1] Jiang F L, Liu Z Q, Wan Y, et al. Analytical modeling and experimental investigation of tool and workpiece temperatures for interrupted cutting 1045 steel by inverse heat conduction method. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013,213(6):887-894.
- [2] Neugebauer R, Bouzakis K D, Denkena B, et al. Velocity effects in metal forming and machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2011, 60(2): 627-650.
- [3] Cook M W, Bossom P K. Trends and

recent developments in the material manufacture and cutting tool application of polycrystalline diamond and polycrystalline cubic boron nitride. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2000, 18(2): 147-152.

[4] Nabhani F. Wear mechanisms of ultra-hard cutting tools materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 115(3): 402-412.

[5] Ai X, Liu Z Q. Developments of tool materials for high speed machining and their applications. *Proceedings of Fifth Int Conf HSM, Metz*,2006:883-894.

[6] Hovsepian P E, Luo Q, Robinson G, et al. TiAlN/VN superlattice structured PVD coatings: a new alternative in machining of aluminum alloys for aerospace and automotive components. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(1): 265-272.

[7] Sumiya H, Uesaka S, Satoh S. Mechanical properties of high purity polycrystalline CBN synthesized by direct conversion sintering method. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(5): 1181-1186.

[8] 赵军. 新型梯度功能陶瓷刀具材料的设计制造及其切削性能研究. 北京: 高等教育出版社, 2005.

[9] 曹同坤. 自润滑陶瓷刀具的设计开发及其自润滑机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.

[10] 刘炳强. 原位生长晶须增韧氧化铝陶瓷刀具及切削性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.

[11] 周咏辉, 艾兴, 赵军, 等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(W,Ti)C 纳米复合陶瓷材料的力学性能与强韧化机理. *山东大学学报(工学版)*, 2008, 38(1): 1-5.

[12] Kl ü nsner T, Marsoner S, Ebner R, et al. Effect of microstructure on fatigue properties of WC-Co hard metals. *Procedia Engineering*, 2010, 2(1): 2001-2010.

[13] Wang C, Cheng K, Minton T, et al. Development of a novel surface acoustic wave (SAW) based smart cutting tool in machining hybrid dissimilar material. *Manufacturing Letters*, 2014(2):21-25.

[14] Sun X Z, Bateman R, Cheng K, et al. Design and analysis of an internally-cooled smart cutting tool for dry cutting. *Proceedings of the IMechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012(226): 585-591.

(责编 深蓝)