高速切削的加工机理及刀具技术

北京理工大学机械与车辆工程学院 （北京 100081） 王西彬 刘志兵

一、前言

高速切削技术以其特有的原理优势和巨大的潜在应用价值，成为了面向21世纪的先进制造技术的重要组成部分，也是当前科技界和工业界竞相研究的热门领域之一。在“国家十五重点领域技术预测研究”和“先进制造领域关键技术的分析论证”中，高速切削技术被列为重大综合型项目和经济与社会发展急需高技术项目中的重要内容。

为了适应高速切削技术迅速发展的需要，国内许多企业先后配置了具有20世纪90年代先进水平的数控机床和加工中心。但由于普遍缺乏必要的工艺技术和刀具技术的支持，导致先进设备的关键作用和自身优势得不到充分发挥，企业的生产效率和对市场的应变能力并没有因为设备的更新而提高，反而造成了设备资源和工艺系统能力的极大浪费。因此，对高速切削条件下加工机理和刀具技术的深入研究是实现高速切削的前提和保证，下面就对这两方面的内容作一简要介绍。

二、高速切削加工机理

1. 高速切削的一般机理

与常规速度下的切削相比，高速切削在切削机理上具有以下主要优点：

（1）高速切削时，随切削速度的提高，金属流动速度大于塑性变形速度，第一变形区后移，使剪切角 φ 增大，刀具前刀面上平均摩擦系数 μ 相应减小，此时金属切削层的变形程度减小，刀具磨损减慢，刀具耐用度下降的幅度趋缓。

（2）对于同样的切削层参数，高速切削时第二变形区的接触长度 L_f 变短，切屑排出速度极高，前刀面受周期载荷的作用，使得高速切削的切削变形减小，切削抗力大幅度下降，有利于提高加工精度。对于大型框架件、薄板件、薄壁槽形件的高精度高效加工，高速铣削是目前唯一有效的方法。

（3）高速切削使传入工件的切削热的比例大幅度减少，加工表面受热时间短、切削温度低，因此热影响区和热影响程度都较小，有利于获得低损伤的表面结构状态和保持良好的表面物理性能及力学性能。

（4）高速切削时，单位功率所切削的切削层材料体积显著增大。由于切除率高、能耗低，工件在制时间短，提高了能源和设备的利用率，降低了切削加工在制造系统资源总量中的比例，因此高速切削符合可持续发展的要求。

（5）高速切削的力值及其变化幅度小，与主轴转速有关的激振频率也远远高于切削工艺系统的高阶固有频率，因此切削振动对加工质量的影响很小。另一方面，高速切削即使采用较小的进给量，仍能获得很高的加工效率，但表面粗糙度却得以极大的改善。

2. 难加工材料高速切削机理

目前高速切削技术的研究和应用还存在着一定的局限性，研究重点大多集中在普通材料的高速切削机理、工艺方法和刀具技术，而对于工程上广泛存在的难加工材料的高速切削加工机理和刀具技术尚缺乏必要的研究，目前所取得的研究成果对于难加工材料的高速加工并不完全适用。这里所说的难加工材料主要包括高强度钢和超高强度合金结构钢、高锰钢、淬硬钢、冷硬铸铁、奥氏体不锈钢、高温合金、钛合金、喷涂材料、稀有难熔金属等工程材料，以上材料难加工的原因主要是：强度高、硬度高、塑性韧性高、塑性低脆性大、导热系数低、含微观硬质点和硬夹杂物、化学性质活泼等。难加工材料的以上特性，一般都使切削过程的切削力增大，切削温度提高，刀具耐用度下降，刀具破损的概率增加，有时还使已加工表面恶化，切屑难以控制，最终导致加工效率和加工质量降低。受刀具材料和切削工艺的限制，加之对难加工材料的高速切削机理认识不足，目前难加工材料的切削加工只能采用很低的切削速度。但从切削机理的角度分析，将高速切削技术引入难加工材料加工领域也是可行的：

（1）高速条件下切削难加工材料，单位时间内产生的切削热多，切削层的瞬间温度高，导致高硬度类难加工材料（如淬硬钢、冷硬铸铁）在切削层

处的硬度下降，起到了加热切削的作用，能减小被加工材料的塑性变形抗力，改善材料的切削加工性，降低材料切削加工的难度。同时还能降低作用在刀具上的接触应力，提高刀具的安全系数，允许增加极限切削厚度与宽度，因此可以大幅度提高切削用量和加工效率。

（2）高速条件下切削难加工材料，材料去除率高，切屑流动快，短时间内产生的热量来不及传入工件和刀具就被切屑带走，切削热对工件表层的影响并不明显，从而可以保证加工表面质量，这对于加工硬化倾向严重的难加工材料（如高锰钢）、化学性质活泼的难加工材料（如镁合金）以及导热系数低的难加工材料（如奥氏体不锈钢和钛合金）的切削加工尤其有利。

（3）与低速切削相比，在高速条件下切削难加工材料，刀具材料与工件材料之间的摩擦系数 μ 降低，剪切角增大，切削变形系数减小，可以充分利用某些刀具材料的自润滑功能，降低切削力，这对于单位切削力大的难加工材料（如高强度钢）的加工比较有利。

（4）由于难加工材料的相对加工系数普遍偏低，该类材料高速切削的绝对切削速度并不高，因此对该类材料的工艺系统并没有特殊要求，大多数生产企业只需对现有的刀具系统和生产工艺进行适当的技术改造即可实现。

3. 国内高速切削机理研究现状

值得一提的是，我国在高速切削机理的研究领域已经取得了一系列的成果。北京理工大学在国防科技预研项目和兵器科学研究基金的支持下较为系统的研究了淬硬钢、钨合金、炮钢、高锰钢、灰铸铁、不锈钢、高比强镁合金、高强度铝合金、高强度装甲钢等典型军用难加工材料的高速切削机理和刀具的磨破损形态机理，进而设计了适合于高速切削的刀具。山东大学对高速铣削状态下刀具的磨损形态及其磨损机理进行了研究，对引起主轴—刀具系统不平衡的影响因素进行了分析并研究了刀具的动平衡技术。上海交通大学研究了高速铣削 2A12 时切削力和切削温度的动态规律，应用有限元法对高速铣削铝合金薄壁件过程中工件与刀具接触面温度、工件内部的温度分布进行了仿真研究，得出在高速切削铝合金过程中，随着切削速度的增加，刀具与工件接触区的温度变化存在二次效应。南京航空航天大学研究了应用陶瓷刀具对淬火钢和镍基合金的高速切削技术。西北工业大学研究了高速铣削钛合金时的刀具适配和参数优化问题，采用红外辐射测温技术对铝合金铣削温度进行了间接测量，发现了铝合金高速铣削过程中的速度临界点。同济大学研究了高速铣削加工技术在汽车模具制造中的应用，分析了高速铣削模具和模型自由表面的策略方针和根据工件材料实施粗精加工的不同方案。

三、高速切削的刀具技术

先进适用的刀具技术是实现高速切削的前提和保证。首先应根据被加工材料在高速条件下的切削加工机理选择与之相匹配的刀具材料，而后应根据具体的切削加工工艺和刀具材料自身特性设计适合于该材料高速切削的刀具几何结构和参数。

1. 高速切削的刀具材料

高速切削技术对刀具材料提出了新的更高要求，即在解决材料切削加工工艺的基础上能够大幅度提高切削速度，具体表现为：刀具材料除了要具备基本的强度、硬度、耐磨性、抗冲击能力和热疲劳特性以外，在红硬性、导热系数、抗氧化及粘结磨损能力、热膨胀系数、与工件材料在高温下的亲和性等方面也要具备较高的综合性能。适合于高速切削的刀具材料主要有：

（1）硬质合金　硬质合金是进行高速切削加工的主要刀具材料：添加钽、铌的硬质合金耐磨性好，抗冲击能力强，抗塑性变形的能力也有所增强，并且使用中的通用性好；添加稀土元素的硬质合金的韧性、抗弯强度与硬度都有所提高，比较适合于高速条件下的重切削；细晶粒硬质合金与超细晶粒硬质合金的晶粒较细，从而提高了硬度和耐磨性；Ti（C，N）基与 TiC 基硬质合金的硬度高，对钢的摩擦系数较小，切削时抗粘结磨损和扩散磨损的能力较强，具有更好的耐磨性；表面涂层的硬质合金具有极高的硬度和耐磨性，允许采用高进给速度和高切削速度，加工效率高，已加工表面质量较好并且刀片的通用性好。在不同类型和牌号的硬质合金中进行合理选择还可实现对不锈钢、耐热材料、高锰钢、高强度合金钢等材料的高效切削加工。

（2）陶瓷　陶瓷比硬质合金更适合于高速切削，陶瓷材料与金属亲和性小，热扩散磨损能力相

应较小。另外，陶瓷的高温硬度优于硬质合金，在1 200℃～1 400℃仍能达到80HRA，相当于硬质合金在400℃以下的硬度。因此适合于在高速条件下加工淬硬钢、高强度钢与高硬度铸铁等材料，切削效果比硬质合金有显著提高。

(3) 立方氮化硼　CBN具有较高的硬度、较好的耐磨性、较高的导热系数、高化学惰性及高温下的热稳定性，因此比较适合于淬硬钢、冷硬铸铁、镍基合金、粉末冶金制品、钛合金等超硬难加工材料的高速切削加工，其切削性能优于陶瓷材料。

(4) 人造金刚石　人造金刚石硬度高，摩擦系数低，耐磨粒磨损能力极强并且具有良好的导热性，特别适合于钛合金和粘结性强的有色金属及合金等难加工材料的高速切削。

2. 高速切削的刀具几何结构设计

随着高速切削技术在不锈钢和高温合金、高强度合金钢、淬硬钢和冷硬铸铁、钛合金等难加工材料加工中的逐步推广应用，以及对刀具切削性能及设计规范要求的提高，刀具的几何结构，尤其是刃区的几何设计显得尤为重要。

(1) 刀具的主要切削角度　高速切削中存在的普遍问题是前刀面切削温度高，前刀面紧靠切削刃处形成月牙洼磨损，致使切削刃的强度和散热能力减弱，易产生各种刃口损伤。显然，若刃口处于前刀面的最低位置或使刀面外凸，就能有效减小月牙洼对刀面造成的不利影响。因此高速切削尤其是断续切削强度、硬度较高的材料时，切削刃的法向前角应取小或负值，法向后角可相应增大一些。但若前角很小或取负值，切削力会上升，因此高速切削的刀具存在一个合理前角，后角也如此。

陶瓷和立方氮化硼材料等硬脆刀具材料的韧性较低，刀具几何参数的选择就显得尤为重要。前角、倒棱前角和刃倾角均应设计为较大的负值（如前角－7°～－10°，倒棱前角－20°～－25°，刃倾角－10°～－12°），而主偏角适当减小（如取45°），这样可以使刀尖和刃口有足够体积的材料和较合理的方式承受切削热和切削力的作用，同时可以减轻冲击及月牙洼扩展对刀具的不利影响，使刀尖和刃口在较长的切削时间里保持足够的结构强度。后角选取较大值是设计刀具的另一要点，它可使刀具刃口具有锲角，同时可减小刀具与已加工表面的接触长度，从而有效降低后刀面破损率。

(2) 刀具刃形结构　切削刃边界的缺口破损和刀尖处的热磨损是高速切削刀具的一大特征。因此，应设计主、副刀刃在刀尖处逐渐过渡，增大刀尖角，加大刀尖区切削刃的长度和刀具材料的体积。刃形设计时应使边界处的切削厚度逐渐变薄，以缓解边界处的应力梯度和温度梯度。高速切削刀具的切削部分应短一些，以提高刀具的刚性和减小刀刃破损的概率，如陶瓷铣刀的切削部分就较短，钻头副刃的倒锥就比较大。对于高塑性高韧性的难加工材料（如不锈钢）的切削加工而言，由于切屑不容易折断，高速切削时对切屑的控制和处理就显得越发重要了，可以将断屑槽后壁设计成内斜式，以便得到稳定的螺旋状切屑。

（收稿日期：20030720）

信息

第一台五轴联动高速铣削柔性单元——米克朗HSM 400U亮相上海

曾荣获2002年欧洲最佳高速加工大奖和MWP & Subcon最佳金属切削机床大奖的米克朗HSM400U 5轴联动高速铣削柔性单元于2003年7月初在位于上海市外高桥的米克朗中国高速铣削应用开发中心亮相。

HSM400U是世界上第一台5轴联动高速铣削加工中心。因为真正的5轴联动高速加工，不仅仅需要机床的三个线性轴达到一定的进给速度，同时也要求第4轴和第5轴的旋转速度要满足高速铣削的进给率要求。因此，米克朗HSM400U除了三个线性进给轴为高速外，其工作台的旋转轴也采用了目前最先进的直接驱动技术，从而使得工作台的回转速度达到250r/min，摆动速度达到150r/min，完全满足了高速铣削对进给速度的要求。该机床可选配30 000r/min和42 000r/min的主轴，此次亮相的机床配备了42 000r/min的高速铣削主轴。

值得注意的是，此次安装在米克朗中国高速铣削应用开发中心的HSM400U不仅具有5轴联动高速铣削的特点，它还配备了工件托盘自动交换系统，从而成为了小型的柔性加工单元。该机床适合于加工小型精密零件及精密电极、模具等。

关于高速铣削加工中心的操作请见本期第36页。

（马艳娣）