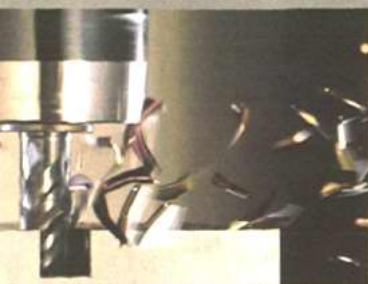


高速切削刀具 新技术

New Technologies of High-Speed Cutting Tool

高速切削已经成为切削加工的主要发展方向。为真正实现切削加工的高速化,不仅要研究开发与高速切削相适应的刀具材料,还要不断改进刀具结构及刀具监控系统。本论坛汇集专家、用户和厂商等多方观点,力求为高速切削刀具的发展和应用提供一些借鉴。



高速切削刀具系统

High-Speed Cutting Tool System

切削技术网 杨晓



杨晓

现任上海科太商务信息咨询有限公司执行董事、经理,切削技术网站首席执行官。兼任中国机械工业金属切削技术刀具协会理事、全国刀具标准化技术委员会委员、九三学社上海市杨浦区第三支社副主任委员、无锡职业技术学院客座教授、中国机械工业金属切削技术刀具协会切削先进技术研究会第七届理事会校企联络与咨询工作委员会委员等职。曾任瓦尔特(无锡)有限公司市场主管、培训主管,肯纳飞硕(上海)有限公司市场拓展部经理等职。

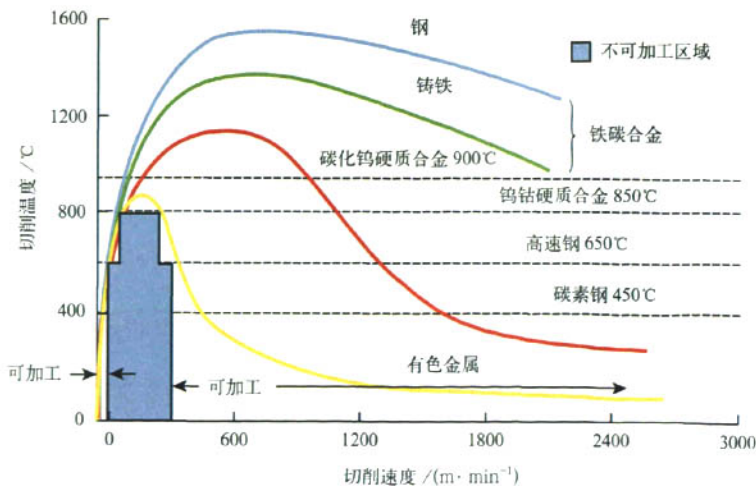
高速切削的研究历史可以追溯到20世纪30年代,德国 Carl Salomon 博士首次提出有关高速切削的概念。Salomon 博士的研究突破了传统切削理论对切削热的认识,认为切削热只是在传统切削速度范围内与切削速度成单调增函数关系。而当切削速度突破一定限度以后,切

德国高速切削研究团队认为,高速切削的速度范围应该是传统切削速度的5~10倍。而实现高速切削可能涉及机床、刀具、工件、工艺参数等诸多方面的问题。

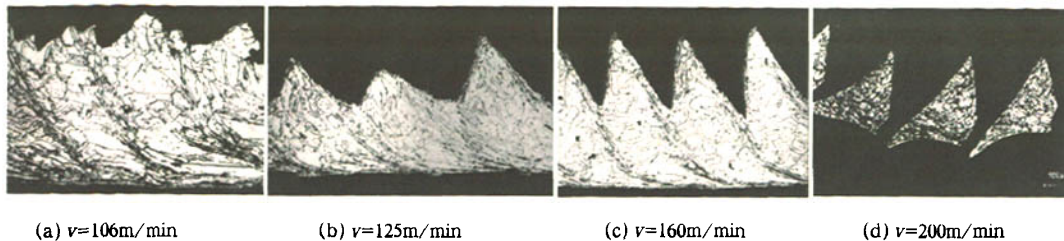
削温度不再随切削速度的增加而增加,反而会随切削速度的增加而降低,即与切削速度在较高速度的范围内成单调减函数。

Salomon 博士的研究因第二次世界大战而中断。50年代后期,与高速切削有关的各种试验又开始进行,高速切削的机理开始被科学家们所认识。1979年,德国政府研究技术部资助、德国 Darmstadt 大学 PTW 研究所牵头,成立了由大学研

究机构、机床制造商、刀具制造商、用户等多方面共同组成的研究团队,对高速切削展开了系统的研究。除了高速切削机理外,研究团队同步研究解决高速切削中机床、刀具、工艺参数等多方面的应用解决方案,使高速切削在加工机理尚未得到完全共识的情况下首先在铝合金加工和硬材料加工等领域得到应用,解决模具、汽车、航空等领域的加工需求,从而取得了巨大的经济效益。



切削温度与切削速度的关系曲线



镍基高温合金不同切削速度下的切削形态

从目前的试验看,随着切削速度的逐步提高,切削时的变形规律发生了一些改变。传统的切削理论,切削变形主要分为3个变形区,即主要发生剪切滑移的第一变形区、与前刀面紧邻的第二变形区及在已加工表面表层的第三变形区。但在高速条件下,切屑中的剪切变形逐渐加剧,剪切区的滑移逐渐加强,即使是塑性材料的切屑形态,也会组建逐渐从带状切屑转变为锯齿状切屑,进而有可能进一步转变为单元状切屑。

由于在高速切削条件下切屑会由带状切屑转变为单元切屑,切屑与前刀面的摩擦将不再是切削力和切削热的主要来源之一,第二变形区的机理变得不那么明显;同样由于切削速度的提高,后刀面处工件材料的弹性变形也将由于变形速度逐渐跟不上切削速度而减少,后刀面的摩擦也因此而减少,第三变形区也同样退到了一个不那么起眼的地位。第二和第三变形区的弱化,对降低切削力和切削热产生有利影响。因此在高速切削时,主要的切削热将由切屑导出,而工件和刀具的温升都非常小,高速切削也被称为“冷态切削”。

德国高速切削研究团队认为,高速切削的速度范围应该是传统切削速度的5~10倍。而实现高速切削可能涉及机床、刀具、工件、工艺参数等诸多方面的问题。例如就加工方法而言,在钢件切削中,铣削的切削速度应该在400m/min以上,而如果换成钻削,200m/min左右的切削速度和1000mm/min以上的进给就

将被认为是高速钻削了。本文主要介绍高速切削的刀具。

刀具与机床的接口

在传统的镗铣加工中,我们通常使用的是各种7:24的刀具接口。这些接口的主轴端面与刀具存在间隙,在主轴高速旋转和切削力的作用下,主轴的大端孔径膨胀,造成刀具轴向和径向定位精度下降。同时锥柄的轴向尺寸和重量都较大,不利于快速换刀和机床的小型化。

对于高速加工,我们通常会推荐一种新的被称为HSK的接口标准。HSK是由德国阿亨大学机床研究所专门为高转速机床开发的新型刀-机接口,并形成了用于自动换刀和手动换刀、中心冷却和端面冷却、普通型和紧凑型等形式。HSK是一种小锥度(1:10)的空心短锥柄,使用时端面和锥面同时接触,从而形成高的接触刚性。经分析研究,尽管HSK连接在高速旋转时主轴也同样会扩张,但仍然能够保持良好的接触,转速对接口的连接刚性影响不大。

除了HSK刀柄,国际上使用较多的还有Sandvik发明的Capto刀柄和Kennametal发明的KM刀柄,这2种刀柄原来分别由2个发明者各自拥有专利,通过专利许可授权一些厂家生产,如Capto在山高刀具被命名为Seco Capto,而在瓦尔特被命名为Novex Capto等。但现在,这2家已先后放弃了专利,这2种刀柄都已成为与HSK并行的高速刀

柄国际标准。

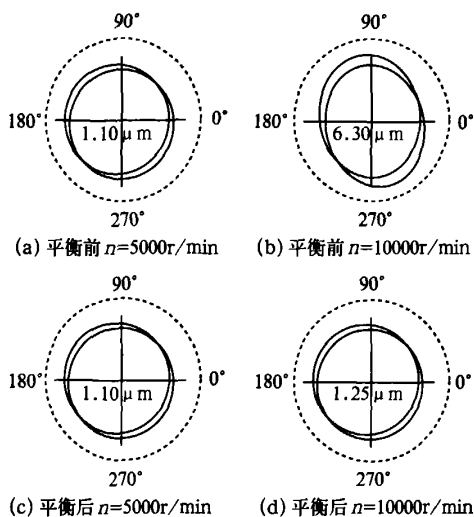
刀具的平衡

物理学的原理表明,旋转中质点的离心力与质点的质量、质点与旋转轴的距离以及旋转的角速度(或者转速)的二次方成正比。也就是说,如果转速增加1倍,离心力将增大到原来的4倍。这就意味着在高的旋转速度下,刀具的加工精度和寿命都可能受到离心力的严重影响。

精密镗刀制造商日本大昭和公司提供了一系列数据,说明了这一问题。他们选择2把镗刀进行试验,其中只有一把精镗刀预先进行过动平衡。这2把镗刀在5000r/min时所加工孔的圆度没有什么差别,都是 $1.1\mu\text{m}$,这些误差我认为主要由于机床工具系统的精度造成;而当转速提高到10000r/min时,情况就明显不同了。经过平衡的镗刀所加工出的孔的圆度比5000r/min时略有增加,为 $1.25\mu\text{m}$,而未经平衡的镗刀所加工出的孔的圆度比5000r/min时增加很多,达到 $6.30\mu\text{m}$,是经过平衡调整的镗刀的5倍多。

同样,在铣削中,不平衡的刀具也会引起切削不稳定,致使铣刀各刀齿的负载不均衡,工件局部过切、工件形状发生变形,表面出现振痕等。

还需要我们引起注意的是,不平衡会导致机床主轴轴承受力增加。分析研究表明,轴承寿命与载荷的三次方成反比。也就是说,如果轴承受力增加一倍,轴承的寿命将减少到原来的1/8。



镗刀动平衡前后加工孔的圆度(大昭和公司)

因此,对于在高速旋转下使用的刀具必须使其保持平衡。

按照平衡理论,回转体的不平衡可以分为3种:

(1) 静不平衡。

静不平衡是只有一个不平衡质量且该不平衡质量位于2个支承的正中间,因此其在旋转中的离心力在2个支承上反作用力的大小和方向均相等。在切削加工中的短悬伸刀具(如盘类刀具)可近似地认为只是静不平衡。

(2) 偶不平衡:

有2个不平衡质量,分布在对称于支承中点180°的位置,因此其在旋转中的离心力在2个支承上反作用力的大小相等方向却相反,形成的是一个力偶。

(3) 动不平衡:

有2个或2个以上的不平衡质

量,分布不符合以上的规律,其在旋转中的离心力在2个支承上反作用力的大小和方向都不一样。可以这样认为,动不平衡是静不平衡和偶不平衡的叠加,杆类刀具大部分都属于此类不平衡。

不平衡的消除有加重、去重和调整3类方法,刀具的出厂预平衡多采用钻孔去重的方法。即在经平衡机测量并计算得到的位置钻一个指定大小和深度的孔,以使刀具在该位置截面上得到静平衡,或者在2个位置上各钻一个孔以实现动平衡。

(1) 平衡调整环。

高速加工中安装整体刀具使用的刀柄主要采用这种方式,通常在刀柄上具有2个平衡调整环。通过分别旋转平衡调整环,可以产生一个合力和一个平衡力矩,从而实现动平衡。

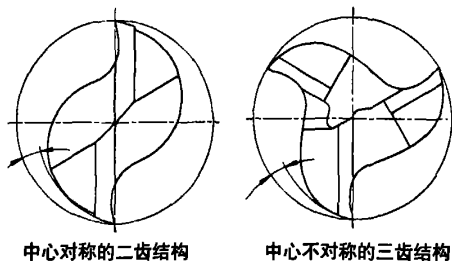
(2) 平衡调整螺钉。盘类刀具可以采用这种方式。这种方法通常通过在1个(或2个)截面对2个螺钉进行径向移动来改变该截面内的质心位置,从而达到平衡调整的目的。

(3) 平衡调整块。大尺寸的单刃刀具(如单刃镗刀)通常会设置一个平衡调整块。该调

整块与单刃刀头处于同一截面,径向可以移动。通过该调整块的移动来达到平衡。

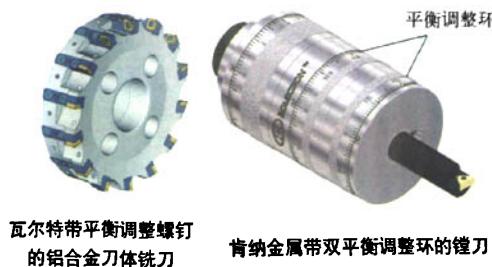
减少刀具不平衡的方法,除了上述平衡方法以外,减少刀具的重量也是一个有效的方法。例如瓦尔特用于铝合金高速切削的刀具。该刀具的刀体采用高强度的铝合金制造。由于铝的密度仅为钢的34.6%,同样制造精度下的离心力也就大大减少了。以直径200mm的铣刀为例,相对于相同直径钢刀体铣刀,刀具的重量由9.8kg减少到3.7kg,允许使用的最高转速也从4200r/min提高到13200r/min。

对于在高速切削条件下使用的刀具,盘类刀具由于轴向尺寸相对较小,一般可以只进行静平衡;而杆类刀具的悬伸较长,其质量轴线与旋转轴线之间可能存在的夹角就不能被忽略,因此必须进行动平衡。必须明确的是,只有在2个或2个以上截面中进行的平衡调整才可能是动平衡,



而在一个截面内进行的平衡都应是静平衡。肯纳金属的ROMICRON镗刀就具有2个调整环,可以方便地在2个不同的截面上进行平衡操作以达到动态平衡的目的。

就一般规律而言,中心对称的结构更适合高速加工。中心不对称的三齿结构,三齿中仅一齿过中心,该刀具一般不合适作为高速切削刀具;中心对称的二齿结构,其2个刀齿均过中心,就比较合适高速切削。同样,带削平的圆柱刀柄由于削平去除了刀具一侧的部分材料,也造成了



刀具的不平衡,对于高速切削也是不利的。加上其通常使用螺钉从侧面压紧,使刀柄上安装孔与刀具柄部的间隙在夹紧过程中变为不对称间隙,安装后的不平衡可能被加剧,更不适用于高速切削。因此在高速切削的刀具选择过程中要充分考虑其结构的影响,避免刀具结构在原理上就不平衡。因为通常通过调整所能去

除的不平衡量相当有限,而原理上的不平衡往往远远超出刀柄调整所能消除的不平衡的范围。

我们认为刀具供应商应对自己提供的刀具能否用于高速切削作出明示。现在,许多欧美刀具商已经在其样本等宣传资料上标明了表示适用于高速切削的符号“HSC”或适用于高速加工的符号“HSM”,因此,一

安全性

般没有标注这类符号的就表示不适合高速切削。

由于高速切削通常会需要较高的转速,由此使刀具在巨大离心力作用下发生破碎、解体的可能性大大增加。

山东大学在使用国内某知名厂

会有如此大的破坏能力呢?我们作了如下的简要分析。如果一个直径40mm的可转位铣刀以40000r/min的转速进行加工,其线速度为5024m/min(即83.7m/s)以刀片重量0.015kg计算,其动量为1.26kg·m/s。这一结果与一著名的微声手枪子弹的出膛动量相当(该手枪子弹弹头重量约为0.005kg,出膛初速度为230m/s,因此动量为1.20kg·m/s)。

刀片式铣刀的结构与安全性有很大关系。山东大学在使用的刀片飞出的铣刀,是国内普遍采用的楔块时夹紧方式。这种夹紧方式完全依靠摩擦力来抵御离心力,刀片比较容易飞出。如果我们对铣刀结构进行改进,如采用螺钉夹紧方式的刀具则需要剪断螺钉(卧装刀片铣刀)或拉断螺钉(立装刀片铣刀)才会导致刀片飞出,安全性大大提高。研究表明,用螺钉夹紧的铣刀随着转速的逐渐提高,螺钉会在离心力的作用下被拉长,刀体也会发生轻微的膨胀。大约在30000~35000r/min时已达临界应力而出现永久性的拉伸变形,而在达到临界速度之前,螺钉已经出现弯曲现象,造成夹紧力下降,刀片也随之发生位移。

因此,我们必须充分注意高速加工刀具的安全性问题,杜绝在高速切削时发生安全事故。德国高速切削工作组就此提出的高速加工刀具安全性技术规范早已被建议成为德国标准和国际标准。该规范规定:对于刀片式的刀具,生产商必须保证在1.6倍于最大使用转速($n_p = 1.6n_{max}$)下试验,刀具的永久变形或零件的位移不超过0.05mm,而在2倍于最大使用转速($n_p = 2n_{max}$)下试验,刀具不发生爆碎;对于整体式刀具,则应在 $n_p = 2n_{max}$ 条件下试验而不发生弯曲或断裂。同时要求刀具生产商必须对可用于高速切削的刀具明示其最大使用转速。在此条

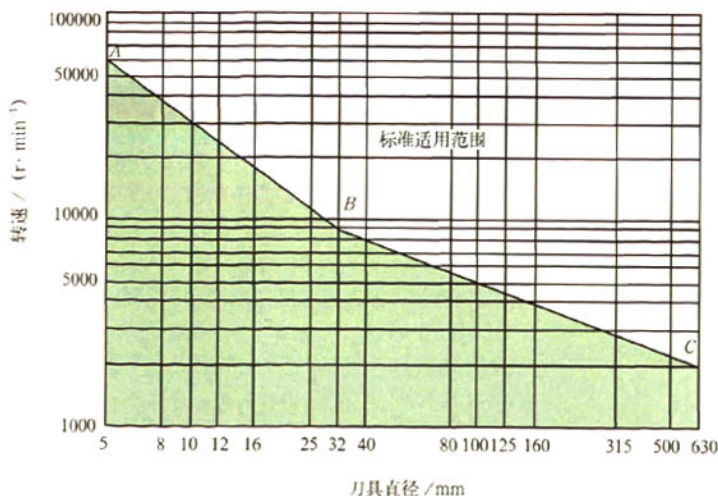


刀片飞脱的可转位铣刀

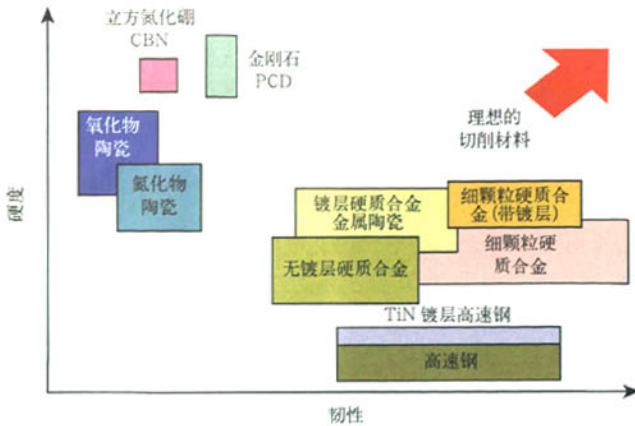
机床的防弹玻璃被击碎

商生产的直径100mm的面铣刀进行切削试验时,在转速增加到5000r/min时,仅有的一个刀片在离心力超过楔块摩擦力的情况下飞离了刀体,击打在机床的防护钢板上。而苏州的一个用户则比较不幸,他们的刀具破碎后碎片击中了机床的防弹玻璃,结果是玻璃被完全击碎。

那么,高速加工的刀具为什么



刀具安全标准的适用范围



刀具材料性能示意

件下使用刀具的安全性将得到充分的安全保证。当然,对于非高速切削刀具(刀具安全标准适用范围图中的绿色部分),则不需要作如此要求。因此我们在选用高速切削刀具时,应严格按照生产商提供的核定最高转速规定内使用。但由于国内尚无高速切削刀具的安全性标准,我们在选用时需要更加慎重。

对于高速切削的刀具,我们应采取一定措施来保证其安全性。比如,瓦尔特要求对高速切削的刀片式刀具,使用原厂刀片锁紧螺钉以保证安全性;刀片安装时保证规定扭矩;同时在刀片更换5次后,使用新的刀片锁紧螺钉以防止螺钉因疲劳造成造成夹紧力下降,影响刀具的安全使用。

同样,刀具生产商也应该采取措施来加强刀具在高速加工中的安全性。国外一些著名的刀具生产商近

年来在刀片式刀具的开发中纷纷采用了技术措施来加强刀具的安全性,刀片与刀体间增加离心力卸载结构就是其中之一。刀体上有一个突起,刀片的相应位置上则有一个凹坑,刀片的离心力可由刀片与刀体间的摩擦力、螺钉的支承力和离心力卸载结构的支承力共同承担,这样抵御刀片飞出的能力得到了加强。

高速切削刀具的材料

虽然我们总是希望得到既有高的硬度以保证刀具的耐磨性,又有高的韧性来防止刀具的碎裂,但目前的技术发展还没有找到如此优越性能的刀具材料,鱼与熊掌无法兼得。因此,我们会在实际中按照需要选用更合适的刀具材料:粗加工时优先考虑刀具材料的韧性;精加工时优先考虑刀具材料的硬度。

近年来镀层技术的发展,使细颗粒硬质合金在保持其较高韧性的同时,提高了其抗高温和抗冲击载荷的能力,为高速切削应用更经济的刀具提供了技术保证。

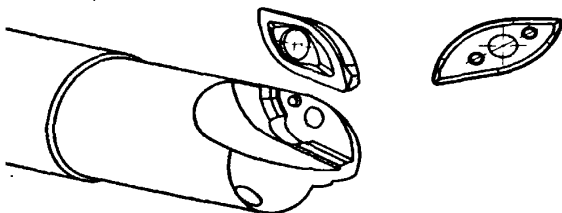
金刚石、立方氮化硼和陶瓷的技术由来已久,他们共同的特点是硬度高,脆性较大,不宜承受较大的冲击。

陶瓷刀具具有很高的硬度和耐磨性,适于加工 50 ~ 65HRC 的高硬度材料,如冷硬铸铁和淬硬钢。陶瓷中的 Al_2O_3 抗氧化能力特别好,即使刀刃处于炽热状态,也能长时间连续使用,适于高速切削。而陶瓷中的氮化硅 (Si_3N_4) 陶瓷强度和断裂韧性较高,热胀系数低,弹性模量也低,故其抗热震性能高,适于加工铸铁。近年来,在提高陶瓷刀具的力学性能上做了大量卓有成效的研究工作,如采用热压和热等静压工艺,加入各种增韧补强相,使陶瓷刀具的弱点得到改善,性能有了很大提高。如南京航空航天大学机电学院在使用肯纳金属的须晶增韧赛龙陶瓷 KY2100 铣削著名的难加工材料 Inconel718 时,切削速度达到了近 1000m/min。用这样的切削速度来加工 Inconel718,在过去是很难想象的。

从组织上看,立方氮化硼(CBN)刀坯大致有两种。一种是 CBN 质量分数 80% ~ 90%,被称为高含量的,据介绍以 CBN 晶粒之间直接结合为主,具有高硬度、高导热性,适于加工镀铬铸铁、粗和半粗断续切削淬硬钢、高速切削铸铁、硬质合金、烧结金属和重合金等。另一种是低 CBN 含量的 PCBN,它是用少量金属或陶瓷粘结相牢固地结合起来的,有较好的强度和韧性,适于精加工 45 ~ 65HRC 的淬硬钢。但 CBN 不宜加工以铁素体和 45HRC 以下的钢及合金钢、合金铸铁、耐热合金,特别不宜于加工 35HRC 以下的工件。

金刚石刀具是目前高速切削(2500 ~ 5000m/min)铝合金较理想的刀具材料,但由于碳对铁的亲和作用,特别是在高温下,金刚石能与铁发生化学反应,因此它不适于切削铁及其合金工件。

(责编 晓棠)



带离心力卸载的铣刀示意