

金属的被削性与刀具材料选择（上）

东华大学（上海 200051） 章宗城

1. 材料的被切削性能

机械零件与结构的材料性能，除其力学性能、化学性能、物理性能等外，尚有自身在制造过程中的有关工艺性能（如铸造性、可锻性、焊接性、热处理性、被切削性等）。材料在切削过程中的难易程度称被切削性（简称被削性）。通常以下面四项指标来判断被削性的好坏，即：①切削工具寿命长短。②消耗切削动力大小（直接表现为切削力的大小，可允许切削速度与切削热的高低）。③加工表面质量好坏。④切屑处理性能良否。当然加工的难易程度除以上材料自身性能外，尚有加工方法、机床与刀具的选用、切削参数等外部条件，这些就不在此讨论了。

与被加工材料自身性能的有关因素与以上四点被切削性能判定指标的关系，可用图1表示：

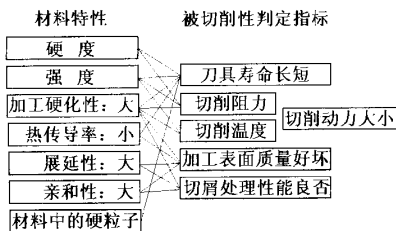


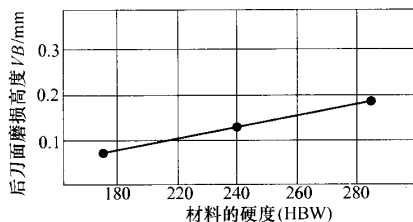
图1 材料自身性能与被削性能判定指标

下面逐个分析以上相关关系：

（1）用刀具寿命长短来判断被削性 刀具寿命长短与被加工材料硬度有关。一般被加工材料硬度愈大、刀具磨损愈快。通常材料硬度在180~280HBW范围内易切削，300 HBW以上时就难切削了，其难切削程度一般正比于硬度大小。如图2所示：可知材料硬度愈高，后刀面的磨损愈多愈快。

刀具寿命与被切削材料的强度有关，强度与硬度一般成正比。通常碳钢、合金钢强度 $\sigma_b \approx 3.25 \sim 3.6\text{HBW}$

（MPa），强度大硬度也高，强度高也使刀具易损伤、寿命短。



被切削材料：45钢 切削条件：

$v_c = 120\text{m/min}$ $f = 0.2\text{mm/r}$ $a_p = 1.0\text{mm}$

工具材料种类：P10, 5min切削

图2 被切削材料的硬度与后刀面磨损

在切削过程中，材料被切削的同时，由于被切削部位受力，产生塑性变形，晶面滑移，滑移面晶格歪扭变形，使持续剪切变形变难，即显示加工部位强化硬化，一般称“加工硬化”。加工硬化提高了材料原有硬度，降低了被切削性。不同材料加工硬化性能不同，易加工硬化材料被切削性能差。

材料的热传导性的大小，对刀具寿命也有影响，热传导性差，切削热不易导出切削区域，使该区温度急剧上升，有可能使刀具硬度下降，造成热磨损，温度高同时也易产生刀具材料的氧化磨损、化学磨损、扩散磨损等，这些磨损急速降低刀具寿命。

另外，某些被加工材料中含有硬质粒子，切削过程中它会像砂轮磨粒一样反过来磨削刀具使刀具很快磨损。

（2）用机床动力消耗大小来判断被削性 切削中需切除切屑，切屑切除过程与材料破坏过程一样，刀具切入工件后，材料经弹性变形、塑性变形直到超过强度极限被切除分离。同时在切削运动中，刀具的前刀面与切屑、后刀面与工件加工表面产生剧烈的摩擦。弹性、塑

性变形与摩擦也需要消耗大量的功,产生大量的热。这些都需要机床有足够动力以满足此消耗,一般被削材料强度愈大,硬度愈高;加工时切削阻力愈大,消耗动力愈大。塑性材料切削时,背吃刀量 a_p 与切削厚度 a_c 之比,称压缩比 $a_p/a_c = \lambda_1$,如图3所示。这是塑性变形的一个指标, λ_1 值愈大表示塑性变形愈激烈,消耗切削力与切削功愈大,愈难切。另外材料的韧性与动力消耗、切削力大小、切削温度高低也有关。韧性以冲击韧性与断裂韧性来表示,工件材料韧性愈高,需切削力愈大,产生切削热愈高,动力消耗愈大,韧性大的材料切屑难断。在切削过程中,切削力的大小、切削热的高低是消耗切削动力的一个标志。材料强度、硬度大,加工硬化严重,也会使切削力增大,切削热提高,动力消耗过大,并可能造成机床动力不足,甚至不能继续切削;过大的切削力与热也可能使刀刃部分软化并产生塑性变形,也无法使刀具继续切削。切削速度高低,直接影响切削热与动力消耗大小。切削速度受工件材料与刀具材料性质影响并受其限制。

(3) 用加工表面质量好坏来判断被削性 加工表面质量指表面粗糙度、表面组织结构、表面应力状态、表面塑性变形及硬化状态等,一般加工中常以直观的表面粗糙度来判断,加工表面毛糙、表面塑性变形不均、有毛刺等均可认为被削性不好。

易产生加工硬化的材料,加工表面质量差,被削性也差;材料热传导率差的材料,表面温度高,易引起塑性变形,使组织结构及其性能发生变化,表面质量差,被削性也差。材料的展延性(展性+延性)(展性指材料可变薄的性能,延性为材料可变细拔长的性能)好的材料切削时,材料易粘接熔接在刀具上,粘接物、熔接物在持续的切削相对运动中被带走,在带走的过程中将与之连在一起的部分刀具材料也带走,造成粘接、熔接磨损或者粘接物、熔接物受到冲击。粘接物、熔接物被冲落过程中带去部分刀具材料,造成粘接熔接缺损、破损。材料的粘接、熔接性能决定于材料间的亲和力,亲和力又与两物体间表面自由能大小有关,著名学者 Rabinowicz 等研究了材料表面能与粘接、熔接间的关系:

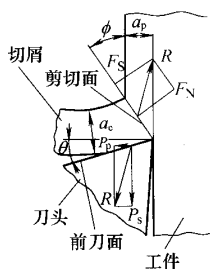


图3 切屑的剪切与压缩比

$$W_{ab} = C (r_a + r_b)$$

式中 W_{ab} ——a、b 两物体间的界面自由能

r_a 、 r_b ——分别为物体 a、b 与大气间的表面自由能

C ——系数, $0 < C < 1$

两种材料间界面自由能的负值越大,材料的亲和性越低,互相越不易产生粘接与熔接。切屑易粘接熔接于刀具表面时,加工表面质量差。

(4) 用切屑处理性能良否判断被削性好坏 加工中若切屑长不易折断,切屑缠绕工件、机床,难以清理;或切屑四处飞散,收集困难,影响人身安全,都称为切屑处理性能差,被削性差。在一定切削条件下,刀片上若选用合适的断屑槽,以它控制切屑,使它以适当长度折断,并使易于收集回收就改善了切屑处理性。

易加工硬化的被切削材料,使刀具磨损增大,切削不锋利,不能顺利切下切屑,控制切屑的流向与长短,若硬化程度随机、不均匀或形成锯齿状、粒状切屑,更会使切削力不断变化,产生振动,断屑槽不能稳定控制切屑,切屑处理就会变差。

另外,展延性大的材料加工时易发生粘接、熔接,使刃部几何形状与切削性能变化,切屑不稳定。加工中难以控制切屑,也不利切屑良好处理。

为了具有良好被削性顺利切削各种工件材料,必须首先选择相应合适的刀具材料。在 20 世纪前半世纪,主要用各类工具钢、高速钢为刀具材料。在 20 世纪后半世纪以硬质合金为主的烧结材料包括金属陶瓷、陶瓷,超高压烧结体的 CBN、PCD 等渐成为刀具材料的主体。下面我们讨论各种材料的被削性也拟从为什么这类刀具材料适于切削某些材料,这些材料切削时的特点,切削这些材料常会产生什么问题,这些问题应通过什么办法去解决,这样来说明。

1958 年 ISO (International Organization for Standardization) 国际组织将以硬质合金为主的烧结材料分为 P、M、K 三类,分别适应切削产生带状、粒状(包括锯齿状)、崩碎状切屑(如图4)的工件材料。进入 21 世纪为了更好地提高各类材料切削效率、适应新材料、难加工材料不断涌现又增加了 N、S、H 三类。下面分别叙述此六类所适切削的金属材料及其相关被削性。

2. P 类刀具材料

P 类刀具材料适合切削产生带状切屑的软钢、碳钢

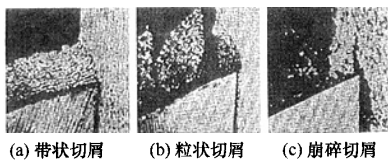


图4 三种基本切屑类型及合金结构钢。

硬质合金的基本组成是 WC + Co，P 类硬质合金成分是 WC + TiC + TaC + Co，其中 Co 是结合相，增加了较多的比例 TiC + TaC 主要为了提高刀具材料的硬度和耐热性，软钢、碳钢与合金结构钢含碳量约在 0.1% ~ 0.6%，（常用的是 10 钢 ~ 50 钢）合金元素约为 0.8% ~ 3%。此类材料切削时，最大特点是形成长的带状切屑，切屑长且不易折断，切屑从刀具前刀面流出，前刀面承受巨大的压力与热量，易产生月牙洼磨损，P 类刀片因硬度高耐热，故成为切削此类大工件材料的基础刀具材料。

这类刀片当切削含碳量大于 0.3%，硬度 180 ~ 280 HBW 钢时，被削性最好。含碳量与硬度低于上值时，切屑易熔结在刀具上，形成积屑瘤，使加工表面质量不佳，此时宜使用以 TiC 和 TiN 为基的硬质合金材料（亦称金属陶瓷）去切削它们，因其抗熔接性好，加工表面质量高，在连续切削时，可高速高效地加工它们。

P 类硬质合金及金属陶瓷表面沉积涂层，可提高刀具的硬度、耐热性、抗熔结性，使刀具大大提高切削速度和耐磨性与寿命。

碳素与合金结构钢的组织结构、力学性能会随合金成分与热处理条件的变化而变化，这种变化造成被削性也发生变化。合金元素的增减对被削性影响见表 1。

表 1 各种合金元素与被切削性的关系

元素	量少	量中	量多	对被削性的影响
Mn 锰	微量良 0.5% ~ 0.8% 最良	0.8% < 渐差	12% Mn < 不好	基体固溶硬化 加工硬化大 易熔附
Si 硅	无影响	0.05% < 多少恶化	5% < 不好	基体固溶硬化 形成硬质粒子 加工硬化大 热传导率不好 易熔附
Cr 铬	无影响	恶化	8% < 不好	形成碳化物 形成硬质粒子 加工硬化大 热传导率不好 易熔附

(续)

元素	量少	量中	量多	对被削性的影响
Ni 镍	0.5% 影响少	恶化	12% < 不好	基体固溶硬化 加工硬化大 易熔附
Mo 钼	0.15% ~ 0.4% 良	0.5% ~ 1% 无影响	1% < 不好	基体固溶硬化 形成碳化物 易熔附
V 钒	良	逐渐恶化	5% < 不好	基体固溶硬化 形成碳化物 加工硬化大
Cu 铜	与 Ni 同	与 Ni 同	与 Ni 同	加工硬化大
W 钨	影响少	5% < 恶化	18% < 不好	基体溶硬化 形成碳化物
S 硫	良	良	好 (到 0.3%)	形成易削性
P 磷	多少良，但 SUS 以外不加			形成易削性
Pb 铅	快削钢大体加到 0.2%			形成易削性
Co 钴	没有好影响	逐渐恶化	不好	高温硬度高 促进 C 与各种碳化物溶入钢的基体中

合金元素除熔炼时进入钢中外，化学热处理渗碳、渗氮、渗铬、渗铝…等也对钢材表面切削性能造成影响。

一般的热处理即退火、正火、淬火、回火在不同热处理条件下（如加热、冷却温度速度、保温时间、冷却介质等）都会对力学性能、切削性能产生影响。表 2 为 45 钢在不同热处理条件下的力学性能变化。

表 2 不同热处理对 45 钢力学性能影响

退火处理	工件轧制，锻造后随炉冷	200 HBW 左右，消除了内应力
正火处理	加热至 840 ~ 860℃ 空冷	229HBW 左右，晶粒细化韧性提高
调质处理	加热 820 ~ 840℃ 水淬，再加热至 560 ~ 620℃（高温回火）	250 HBW
淬火 + 低温回火	加热 820 ~ 840℃ 油淬，160 ~ 220℃ 低温回火	30 ~ 40HRC
淬火 + 低温回火	加热 860 ~ 880℃ 水淬，160 ~ 180℃ 低温回火	54 ~ 60HRC

钛合金在数控车床上的切削加工

中国三江航天集团红林机械厂 (湖北孝感 432006) 邹峰 刘钢

钛合金因其性能的优越性,在航空、航天、石油、化工、汽车等工业生产领域得到了广泛应用,但在数控加工钛合金过程中,存在切削效率低下,刀具耐磨性差,切屑排屑困难等加工难题。为此,笔者通过反复研究和试验,总结出一套加工钛合金的方法,取得了较为理想的切削效果。

1. 钛合金的分类

钛合金是利用钛在不同温度下形成的两种不同组织结构,加入不同种类数量的元素,使其相变温度及相含量逐渐改变而得到的,钛合金主要有以下几类:工业纯钛 TA1,此类材料容易切削; α 钛合金 TA7,此类材料较易切削; β 钛合金 TB1,此类材料很难切削; $\alpha+\beta$ 钛合金 TC11,此类材料较难切削。

2. 钛合金的性能特点

(1) 强度高 钛合金密度小,强度高,其强度大于超高强度钢。

(2) 导热性差 钛合金的导热、导热系数小,仅为铝合金的 1/15,45 钢的 1/5,切削热不宜散发,势必造成切削加工过程中产生较大温差和热应力,导致刀具磨

损加快。

(3) 切削力小 钛合金的切削力虽然只有 45 钢的 1/2~1/3,但其切削与前刀面接触面积小,因此刀刃部位承受的压力远远大于切削 45 钢的压力。

(4) 化学性能活泼 钛合金在高温情况下,与空气中的 N 元素起化学反应,形成 TiN 加工硬化层。

(5) 钛合金摩擦系数大,变形系数小 钛合金切削加工时刀具与工件摩擦系数大,回弹变形大,工件容易受力变形,严重影响工件的加工精度。

3. 钛合金在数控加工中存在的主要技术问题

(1) 加工钛合金时,刀具磨损较快,更换频繁,有时加工一件活就需要换一个刀尖,严重影响产品表面粗糙度和尺寸精度,极易产生废品。

(2) 加工钛合金时变形较大,尺寸不易控制。

(3) 钛合金加工时,易产生带状切屑,易拉伤工件表面。

(4) 由于钛合金本身的材料特点,加工时,易造成刀具折断和损坏,需要加工者时常注意刀具的锋利和磨损程度。

又如 CrWMn 这种材料在退火和正火状态下硬度为 207~255HBW,属易加工材料,但经如下淬火、回火处理后,硬度达到非常高,难以切削。

表 3 不同热处理对 CrWMn 力学性能影响

淬火回火 (1)	加热至 830~850℃油淬, 320~360℃低温回火	54~58 HRC
淬火回火 (2)	加热至 830~850℃油淬, 180~220℃低温回火	60~64 HRC

故大家在制定工艺、选择刀具时,不光要知道是加工什么工件材料,而且要知道材料加工前经过什么热处理、化学热处理,实际合金成分,有否变化、实际已达到硬度为多少,这样才能及时采取相应措施,根据实际硬度才可选择合理刀具材料、相应的刀片几何形状、断

屑槽及切削条件等,目前在一些大的刀具厂商样本中,将碳钢与合金钢类被切削材料按硬度分成软钢 (<180 HBW); 180~280HBW; 280~350HBW; >350HBW; 淬硬钢等五类,分别推荐相应的刀具材料,断屑槽与不同的切削条件。

归纳这类工件材料的被切削性:当为软钢时,切屑易粘接、熔接在刀具上,易生成积屑瘤,加工表面质量不好,此时可用金属陶瓷刀片,因与软钢亲和性差、高速切削加工效果好;180~280HBW 的碳钢,被削性好,为提高寿命,可在刀具上加涂层,也可用金属陶瓷刀具;大于 280HBW 时,也可用涂层刀具,硬度更高或合金成分更多时,属其他类材料,在以后讨论。

(待续) (收稿日期:20070620)