

第一篇

金属切削加工及装备

- 第 1 章 金属切削加工基本知识
- 第 2 章 金属切削过程及其基本规律
- 第 3 章 金属切削加工基本理论的应用
- 第 4 章 典型金属切削加工方法及刀具
- 第 5 章 金属切削机床概论

第 1 章

金属切削加工基本知识

1.1 金属切削加工概述

1.1.1 金属切削加工的概念

一般情况下,通过铸造、锻造、焊接和各种轧制的型材毛坯精度低、表面粗糙度值大,不能满足零件的使用性能要求,必须进行切削加工才能成为零件。

金属切削加工是通过金属切削刀具与工件之间的相对运动,从毛坯上切除多余的金属,使工件达到规定的几何形状、尺寸精度和表面质量,从而获得合格零件的一种机械加工方法。

金属切削加工分为机械加工和钳工加工两大类。机械加工是指通过各种金属切削机床对工件进行切削加工,其基本形式有车削、铣削、钻削、镗削、刨削、拉削、磨削、珩磨、抛光以及各种超精加工等。钳工加工是指使用手工切削工具在钳台上对工件进行加工,其基本形式有划线、錾削、锉削、锯削、刮削、研磨以及钻孔、铰孔、攻螺纹(加工内螺纹)、套螺纹(加工外螺纹)等。此外,机械装配和设备修理也属于钳工工作。

在现代机械制造中,除少数零件采用精密铸造、精密锻造以及粉末冶金或工程塑料压制等方法直接获得零件(有的局部零件仍需切削加工)外,绝大多数零件仍需通过切削加工,以保证加工精度和表面粗糙度的要求。因此,金属切削加工在机械制造中占有十分重要的地位。在切削加工中,选择合理的加工方法,对于保证产品加工质量、提高生产效率和降低成本是非常重要的。

1.1.2 金属切削加工的功能

任何机器或机械装置都是由多个零件组成的。组成机械设备的零件虽然多种多样,但常见的有以下三大类:轴类零件,如传动轴、齿轮轴、螺栓、销等;盘类零件,如齿轮、端盖、挡环、法兰盘等;支架类零件,如连杆、支架、减速箱机体和机盖等。

任何一个零件又都是由若干个基本表面组成的。零件的基本表面(见图 1-1)主要有以下几种。

1. 圆柱面

圆柱面是以直线为母线,以圆为轨迹,且母线垂直于轨迹所在平面作旋转运动所形成的表面(见图 1-1(a))。

2. 圆锥面

圆锥面是以直线为母线,以圆为轨迹,且母线与轨迹所在平面相交成一定角度作旋转运动所形成的表面(见图 1-1(b))。

3. 平面

平面是以直线为母线,以另一直线为轨迹作平移运动所形成的表面(见图 1-1(c))。

4. 成型表面

成型表面是以曲线为母线,以圆为轨迹作旋转运动或以直线为轨迹作平移运动所形成的表面(见图 1-1(d))。

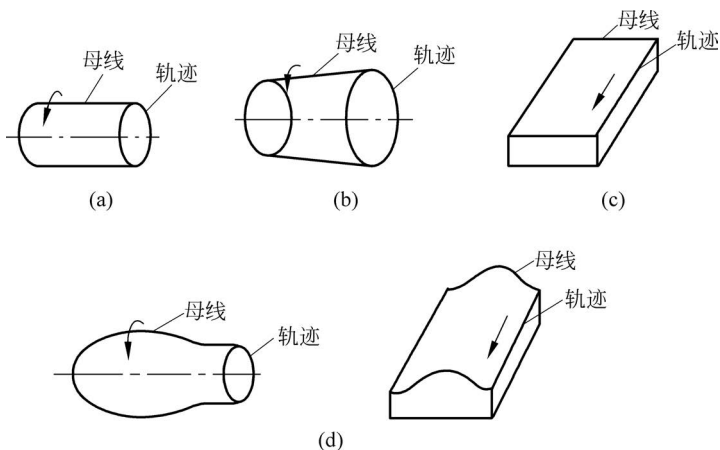


图 1-1 零件的基本表面

机械零件的这些表面大多由切削加工得到。不同的零件表面需要采用不同的加工方法,加工零件必须合理地、按顺序加工出各个表面。

1.2 切削运动和切削要素

1.2.1 切削运动

在金属切削加工中,刀具和工件间必须完成一定的切削运动,才能从工件上切去一部分多余的金属层。切削运动是为了形成工件表面所必需的、刀具与工件之间的相对运动。

各种切削加工的切削运动,都是由直线运动和回转运动这样一些简单的基本运动组合而成的。不同数目的运动单元,按照不同大小的比值、不同的相对位置和方向进行组合,即构成各种切削加工的运动。例如,刨削和拉削等为一个直线运动;圆盘拉刀加工为一个回转运动;车削、铣削、钻削、镗孔、铰孔、车螺纹等为一个回转运动和一个直线运动组合,也是目前应用最广泛的一种组合形式;锯削、仿型刨削为两个直线运动组合;铣削回转体表面为两个回转运动组合;铣螺旋槽、铣螺旋线、磨外圆、磨内圆、滚刀滚齿轮等为两个回转运动和一个直线运动组合,这也是目前应用很广泛的一种运动组合形式;此外还有其他一些运动组合形式及切削加工方法。

切削运动按其作用不同,分为主运动和进给运动,如图 1-2 所示。

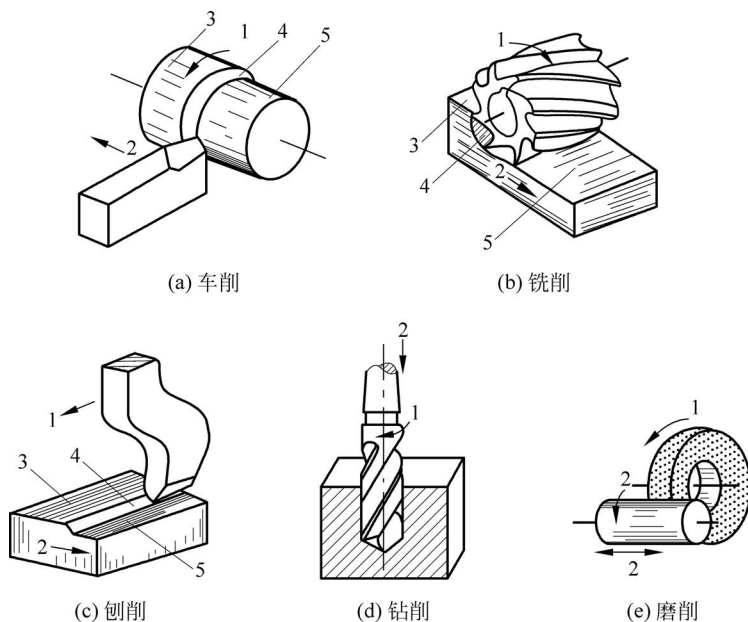


图 1-2 切削运动和加工表面

1—主运动；2—进给运动；3—待加工表面；4—过渡表面；5—已加工表面

1. 主运动

主运动是指直接切除工件上的多余金属层使之成为切屑以形成工件新表面的运动,是切削加工时刀具与工件之间最主要、最基本的相对运动。切削过程中,必须有且只有一个主运动,它的速度最快,消耗的功率最大。主运动可以是直线运动,也可以是旋转运动。车削的主运动是工件的旋转运动;铣削和钻削的主运动是刀具的旋转运动;磨削的主运动是砂轮的旋转运动;刨削的主运动是刀具(牛头刨床)或工件(龙门刨床)的往复直线运动等。

刀具切削刃上选取点相对于工件的主运动的瞬时速度称为切削速度,用矢量 $\vec{v}_c$ 表示。对于回转体工件或旋转类刀具而言,在转速一定时,由于切削刃上各点的回转半径不同,因而切削速度也不同。在计算时,应以最大的切削速度为准。

2. 进给运动

进给运动是指使新的切削层金属不断地投入切削,从而切出整个工件表面的运动。进给运动可以是一个或者多个,切削过程中有时也可以没有单独的进给运动,例如拉削加工。进给运动的速度较小,消耗的功率也较小。进给运动可以是连续运动,也可以是间断运动;可以是直线运动,也可以是旋转运动。车削的进给运动是刀具的移动;铣削的进给运动是工件的移动;钻削的进给运动是钻头沿其轴线方向的移动;内、外圆磨削的进给运动是工件的旋转运动和移动等。

切削刃上选取点相对于工件的进给运动的瞬时速度称为进给速度,用矢量 $\vec{v}_f$ 表示。

切削加工过程中,为了实现机械化和自动化,提高生产效率,一些机床除切削运动外,还需要辅助运动,例如切入运动、空程运动、分度转位运动、送夹料运动以及机床控制运动等。

3. 合成切削运动

主运动和进给运动可以由刀具或工件分别完成,或者由刀具单独完成。主运动和进给运动可以同时进行,如车削、铣削等;也可以交替进行,如刨削、插削等。主运动和进给运动同时进行时,刀具切削刃上某一点相对于工件的合成运动称为合成切削运动。合成切削运动的瞬时速度用矢量 $\vec{v}_e$ 表示, $\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f$ 。切削刃上各点处的合成速度矢量不一定相等。

$\vec{v}_c$ 和 $\vec{v}_f$ 所在的平面称为工作平面,以 P_{fe} 表示。

在工作平面内,同一瞬时主运动方向与合成切削运动方向之间的夹角称为合成切削速度角,以 η 表示,如图 1-3 所示。

由 η 角的定义可知

$$\tan \eta = \frac{v_f}{v_c} = \frac{f}{\pi d} \quad (1-1)$$

式中: d ——切削刃选定点处工件的旋转直径,其随着车刀进给而不断变化;

f ——进给量。

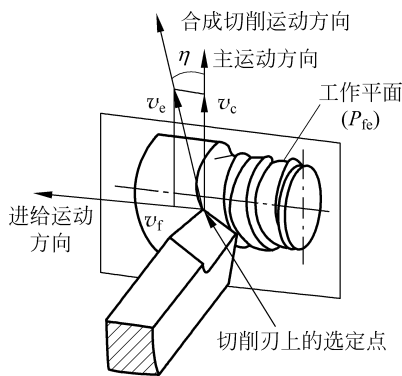


图 1-3 合成切削运动速度角

1.2.2 工件上的表面

在切削运动的作用下,工件上的金属层不断地被刀具切削并转变为切屑,从而加工出所需要的工件新表面。在这一新表面的形成过程中,工件上始终存在着三个不断变化的表面。

(1) 待加工表面: 工件上有待切除金属层的表面。

(2) 已加工表面: 工件上被刀具切除多余金属后形成的新表面。

(3) 过渡表面: 在待加工表面和已加工表面之间,由切削刃正在切削的那个表面。它将在下一次切削过程中被切除。

1.2.3 切削要素

切削要素包括切削用量和切削层横截面。

1. 切削用量

切削用量是指切削加工过程中切削速度、进给量和背吃刀量(切削深度)三个要素的总称。它表示主运动和进给运动量,用于调整机床的工艺参数。

1) 切削速度 v_c

切削速度是指切削刃上选定点相对于工件的主运动的瞬时线速度,单位为 m/s 或 m/min。当主运动为旋转运动时,切削速度的计算公式如下:

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (1-2)$$

式中: d ——完成主运动的刀具或工件的最大直径,单位为 mm;

n ——主运动的转速,单位为 r/s 或 r/min。

在生产中,磨削速度的单位用 m/s,其他加工的切削速度单位习惯用 m/min。

2) 进给量 f

进给量是指工件或刀具的主运动每转或每一行程刀具与工件两者在进给运动方向上的相对位移量,单位是 mm/r。

当主运动为往复直线运动时,进给量为每往复一次的位移量。

进给速度 v_f 是指刀具切削刃上选定点相对于工件进给运动的瞬时速度。进给量 f 与进给速度 v_f 之间的关系为

$$v_f = fn \quad (1-3)$$

式中: n ——主运动的转速,单位为 r/s 或 r/min。

3) 背吃刀量

背吃刀量 a_p 也写作 a_{sp} ,是指工件已加工表面和待加工表面之间的垂直距离,单位是 mm。

2. 切削层横截面

切削层是指在切削过程中刀具的刀刃在一次走刀中所切除的工件材料层。切削层的轴向剖面称为切削层横截面,如图 1-4 所示。

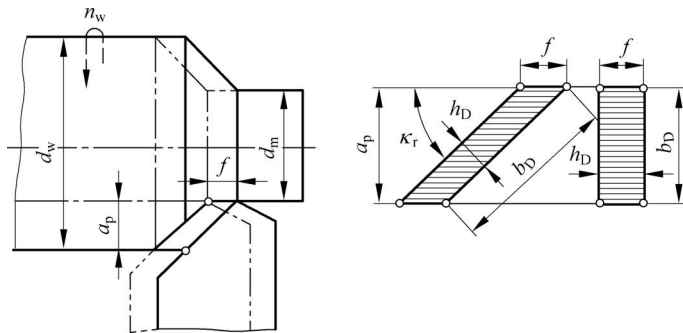


图 1-4 纵车外圆时的切削层要素

切削层的横截面要素是指切削层的横截面尺寸,包括切削层公称宽度 b_D 、切削层公称厚度 h_D 和切削层公称横截面积 A_D 三个要素。

1) 切削层公称宽度 b_D

切削层公称宽度是指刀具主切削刃与工件的接触长度,单位是 mm。

2) 切削层公称厚度 h_D

切削层公称厚度是指刀具或工件每移动一个进给量 f 时,刀具主切削刃相邻的两个位置之间的垂直距离,单位是 mm。

3) 切削层公称横截面积 A_D

切削层公称横截面积即切削层横截面的面积,单位是 mm^2 ,可以表示为

$$A_D \approx b_D \cdot h_D = a_p \cdot f \quad (1-4)$$

1.3 刀具材料

在切削过程中,刀具直接承担切除工件余量和形成已加工表面的任务。刀具切削性能的优劣,取决于构成刀具切削部分的材料、几何形状和刀具结构。然而,无论刀具结构如何先进,几何参数如何合理,如果刀具材料选择不当,都将不能正常工作,刀具材料对刀具的使用寿命、加工质量、加工效率和加工成本影响极大。新型刀具材料的出现和采用,常常使刀

具耐用度成数倍、几十倍地提高,而且使一些难加工材料的切削加工成为可能。因此,应当重视刀具材料的正确选择和合理使用,重视新型材料的研制。

1.3.1 刀具材料应具备的性能

在切削加工时,刀具切削部分与切屑、工件相互接触,承受着很大的压力和强烈的摩擦,刀具在高温下进行切削的同时,还承受着切削力、冲击和振动,因此刀具材料必须满足以下基本要求。

1. 高的硬度和耐磨性

这是满足刀具抵抗机械摩擦磨损的需要。刀具切削部分的硬度,一般应在 60HRC 以上。耐磨性是材料硬度、强度、化学成分、显微组织等的综合效果,组织中碳化物、氮化物等硬质点的硬度越高、颗粒越小、数量越多、弥散状态分布越均匀,则耐磨性越高。

2. 足够的强度和韧性

这是满足刀刃在承受重载荷及机械冲击时不致破损的需要。切削时,刀具切削部分要承受很大的切削力、冲击和振动,为避免崩刃和折断,刀具材料应具有足够的强度和韧性。

3. 高的耐热性

这是满足刀具热稳定性的需要。刀具的耐热性又称为热硬性,即刀具材料在高温下必须能保持高的硬度、耐磨性、强度和韧性,才能完成切削任务。材料的耐热性越好,允许的切削速度也就越高。

4. 良好的导热性和较小的膨胀系数

这是提高加工精度的需要。在其他条件相同的情况下,刀具材料的导热系数越大,则由刀具传出的热量越多,有利于降低切削温度、提高刀具耐用度。线膨胀系数小,则刀具的热变形小,加工误差也小。

5. 稳定的化学性能和良好的抗黏结性能

这是提高刀具抗化学磨损的需要。刀具材料的化学性能稳定,在高温、高压下,才能保持良好的抗扩散、抗氧化的能力。刀具材料与工件材料的亲和力小,则刀具材料的抗黏结性能好,黏结磨损小。

6. 良好的工艺性能和经济性

这是为了便于使用和推广的需要。刀具材料具有良好的工艺性能,可以进行锻、轧、焊接、切削加工和磨削、热处理等,方便制造加工,满足各种加工的需要。同时,刀具材料还应具备良好的综合经济性,即材料价格及刀具制造成本不高,资源丰富,耐用度高,则使分摊到每个工件的刀具成本不高,从而有利于推广应用。

1.3.2 常用刀具材料

常用的刀具材料主要有工具钢(包括碳素工具钢、合金工具钢和高速钢)、硬质合金、陶瓷和超硬刀具材料(金刚石、立方氮化硼)四大类。目前使用量最大的刀具材料是高速钢和硬质合金。碳素工具钢和合金工具钢是早期使用的刀具材料,由于它们的耐热性较差,现在已较少使用,主要用于手工工具或低速切削刀具,如锉刀、拉刀、丝锥和板牙等。

1. 高速钢

高速钢是加入了 W、Mo、Cr、V 等合金元素的高合金工具钢,其合金元素 W、Mo、Cr、V

等与 C 化合形成高硬度的碳化物,使高速钢具有较好的耐磨性。W 和 C 的原子结合力很强,提高了马氏体受热时的分解稳定性,使钢在 550~600℃时仍能保持高硬度,增加了钢的热硬性。Mo 的作用与 W 基本相同,并能细化碳化物晶粒,提高钢中碳化物的均匀性,从而提高钢的韧性。V 与 C 的结合力比 W 的更强,V 使钢的热硬性提高的作用比 W 更强烈。W 和 V 的碳化物在高温时起到有力地阻止晶粒长大的作用。Cr 在高速钢中的主要作用是提高淬透性,也可提高回火稳定性和抑制晶粒长大。

高速钢具有高的强度和高的韧性,具有一定的硬度(热处理硬度在 62~66HRC)和良好的耐磨性,其红硬温度可达 600~660℃。它具有较好的工艺性能,可以制造刃形复杂的刀具,如钻头、丝锥、成型刀具、铣刀、拉刀和齿轮刀具等。刃磨时切削刃锋利,故又名锋钢。

高速钢根据切削性能,可分为普通高速钢和高性能高速钢;根据化学成分,可分为钨系、钨钼系和钼系高速钢;根据制造方法,可分为熔炼高速钢和粉末冶金高速钢。

1) 普通高速钢

普通高速钢工艺性能好,切削性能可满足一般工程材料的常规加工要求。常用的品种有 W18Cr4V 钨系高速钢、W6Mo5Cr4V2 钨钼系高速钢、W9Mo3Cr4V 钨钼系高速钢。

2) 高性能高速钢

高性能高速钢是在普通型高速钢中增加 C、V 元素,并添加 Co、Al 等合金元素的新钢种。其常温硬度可达 67~70HRC,耐磨性和耐热性有显著提高,能用于不锈钢、耐热钢和高强度钢等难加工材料的切削加工。

3) 粉末冶金高速钢

粉末冶金高速钢是把高频感应炉熔炼好的高速钢钢水置于保护气罐中,用高压惰性气体(如氩气)雾化成细小的粉末,然后用高温(1100℃)、高压(100MPa)压制、烧结而成。它克服了一般熔炼方法产生的粗大共晶偏析的缺陷,热处理变形小,韧性、硬度较高,耐磨性好。用它制成的刀具,可切削各种难加工材料。和熔炼高速钢相比,粉末冶金高速钢具有如下优点。

(1) 由于可获得细小而均匀的结晶组织,完全避免了碳化物的偏析,从而提高了钢的硬度和强度。

(2) 由于物理力学性能各向同性,可减少热处理变形与应力,因此可用于制造精密刀具。

(3) 由于钢中的碳化物细小均匀,使磨削加工性得到显著改善。

(4) 粉末冶金高速钢提高了材料的利用率。

粉末冶金高速钢目前应用较少,原因主要在于其成本较高,价格相当于硬质合金,因此主要用来制成各种精密刀具和形状复杂的刀具。

4) 高速钢刀具的表面涂层

高速钢刀具表面涂层处理的目的是在刀具表面形成硬度高、耐磨性好的表面层,以减少刀具磨损,提高刀具的切削性能。高速钢刀具表面涂层的方法有蒸汽处理、低温气体氮碳共渗、辉光离子渗氮等。此外还可采用真空溅射的方法在刀具表面沉积一层 TiC 或 TiN(厚约 10μm),使刀具表面形成一层高硬度的薄膜,以提高刀具的耐用度。这种工艺要求在真空、500℃的环境下进行。

涂层高速钢是一种复合材料,基体是强度高、韧性好的高速钢,而表层是具有高硬度、高耐磨性的其他材料。涂层高速钢刀具的切削力小、切削温度下降约 25%,切削速度、进给量可提高一倍左右,刀具寿命显著提高。

2. 硬质合金

1) 硬质合金的组成与性能

硬质合金是由高硬度、高熔点的金属碳化物和金属黏结剂,经过粉末冶金工艺制成的。硬质合金刀具中常用的碳化物有 WC、TiC、TaC、NbC 等,黏结剂有 Co、Mo、Ni 等。

常用的硬质合金中含有大量的 WC、TiC,因此硬度、耐磨性、耐热性均高于高速钢。常温硬度为 89~94HRA,红硬温度高为 800~1000℃。切削钢时,切削速度约为 220m/min。在合金中加入了熔点更高的 TaC、NbC 后,可使红硬温度提高到 1000~1100℃,切削钢的切削速度进一步提高到 200~300m/min。但是硬质合金的抗弯强度低、韧性差,怕冲击振动,工艺性能较差,不易做成型状复杂的整体刀具。

硬质合金的物理力学性能取决于合金的成分、粉末颗粒的粗细以及合金的烧结工艺。在硬质合金中,金属碳化物所占比例大,则硬质合金的硬度就高,耐磨性就好;反之,若黏结剂的含量高,则硬质合金的硬度就会降低,而抗弯强度和冲击韧性则有所提高。当黏结剂的含量一定时,金属碳化物的晶粒越细,则硬质合金的硬度越高。合金中加入 TaC、NbC 有利于细化晶粒,提高合金的耐热性。

2) 普通硬质合金的分类、牌号及其使用性能

普通硬质合金按其化学成分与使用性能分为四类:钨钴类、钨钴钛类、钨钴钛钽(铌)类和碳化钛基类。

(1) 钨钴类(YG 类)硬质合金。YG 类硬质合金相当于 ISO 标准的 K 类,主要由 WC 和 Co 组成,其常温硬度为 88~91HRA,切削温度为 800~900℃,常用的牌号有 YG3、YG6、YG8 等。YG 类硬质合金的抗弯强度和冲击韧性较好,不易崩刃,适合切削脆性材料,如铸铁。YG 类硬质合金的刃磨性较好,刃口可以磨得较锋利,同时导热系数较大,可以用来加工不锈钢和高温合金钢等难加工材料、有色金属及纤维层压材料。但是,YG 类硬质合金的耐热性和耐磨性较差,因此一般不用于普通碳钢的切削加工。

(2) 钨钴钛类(YT 类)硬质合金。YT 类硬质合金相当于 ISO 标准的 P 类,主要由 WC、TiC 和 Co 组成,其常温硬度为 89~93HRA,切削温度为 800~1000℃,常用的牌号有 YT5、YT15、YT30 等。YT 类硬质合金中加入 TiC,使其硬度、耐热性、抗黏结性和抗氧化能力均有所增强,从而提高了刀具的切削速度和刀具耐用度。YT 类硬质合金的抗弯强度和冲击韧性较差,故主要用于切削一般切屑呈带状的普通碳钢及合金钢等塑性材料。

(3) 钨钴钛钽(铌)类(YW 类)硬质合金。YW 类硬质合金相当于 ISO 标准的 M 类,它是在普通硬质合金中加入了 TaC 或 NbC 等稀有难熔金属碳化物,从而提高了硬质合金的韧性和耐磨性,使其具有较好的综合切削性能。YW 类硬质合金主要用于不锈钢、耐热钢的加工,也适用于普通碳钢和铸铁的切削加工,因此被称为通用型硬质合金。常用的牌号有 YW1、YW2 等。

(4) 碳化钛基类(YN 类)硬质合金。YN 类硬质合金相当于 ISO 标准的 P 类,又称为金属陶瓷。它是以 TiC 为主要成分、以 Ni 和 Mo 为黏结剂的硬质合金。它具有很高的硬度;与工件材料的亲和力较小,不易形成屑瘤;可采用较高的切削速度,切削速度为 300~400m/min;耐热性好,在 1000~1300℃的高温下仍能进行切削。因此,它适用于高速精加工普通钢、工具钢和淬火钢,但其抗塑性变形能力差,抗崩刃性差,只适合连续切削。

3) 其他硬质合金及其使用性能

(1) 超细晶粒硬质合金。普通硬质合金中 WC 的粒度为几微米,超细晶粒硬质合金中 WC 的粒度则在 $1.5\mu\text{m}$ 左右,超细晶粒硬质合金中 WC 的粒度则在 $0.2\sim 1\mu\text{m}$,其中大多数在 $0.5\mu\text{m}$ 以下。这是一种高硬度、高强度兼备的硬质合金,具有硬质合金的高硬度和高速钢的高强度。因此,这类合金可用于间断切削,特别是难加工材料的间断切削。由于其性能稳定可靠,是目前用于自动车床上较理想的刀具材料。

(2) 涂层硬质合金。涂层硬质合金采用韧性较好的基体和硬度、耐磨性极高的表层(TiC 、 TiN 、 Al_2O_3 等,厚度为 $5\sim 13\mu\text{m}$),通过化学气相沉积(CVD)等方法实行表面涂层,是 20 世纪 60 年代的重大技术进展。这类合金较好地解决了刀具的硬度、耐磨性与强度、韧性之间的矛盾,因而具有良好的切削性能。这类合金多用于普通钢材的精加工或半精加工。

涂层材料主要有 TiC 、 TiN 、 Al_2O_3 及其他复合材料。目前,单涂层刀片已很少使用,大多采用 TiC-TiN 复合涂层或 $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$ 三复合涂层。

(3) 钢结硬质合金。钢结硬质合金的代号为 YE。它以 WC、 TiC 作硬质相,以高速钢(或合金钢)作黏结相。其硬度、强度与韧性介于高速钢和硬质合金之间,可以进行锻造、切削、热处理与焊接,可用于制造模具、拉刀、铣刀等形状复杂的刀具。

3. 其他刀具材料

1) 陶瓷

陶瓷具有很高的耐高温硬度和耐磨性,在 1200°C 高温时仍具有较好的切削性能,其化学稳定性好,在高温下不易氧化,与金属亲和力小,不易发生黏结和扩散。有较低的摩擦系数,不易产生积屑瘤。但陶瓷具有抗弯强度低、冲击韧性差、导热性能差、线膨胀系数大的缺点。因此,主要用于冷硬铸铁、淬硬钢、有色金属等材料的精加工和半精加工。

根据化学成分,陶瓷可分为高纯氧化铝陶瓷、复合氧化铝陶瓷和复合氮化硅陶瓷等。

随着陶瓷材料制造工艺的改进,通过添加某些金属碳化物、氧化物,细化 Al_2O_3 晶粒,将有利于提高其抗弯强度和冲击韧性,使得陶瓷刀具的使用范围进一步扩大。

2) 金刚石

金刚石是碳的同素异构体。它的硬度极高,接近于 10000HV (硬质合金仅为 $1300\sim 1800\text{HV}$),是目前已知的最硬材料。金刚石分天然和人造两种,天然金刚石的质量好,但价格昂贵,资源少,用得较少;人造金刚石是在高压高温条件下由石墨转化而成。

金刚石刀具的主要优点如下。

(1) 有极高的硬度与耐磨性,可加工 $65\sim 70\text{HRC}$ 的材料。

(2) 有良好的导热性和较低的热膨胀系数,因此切削加工时不会产生大的热变形,有利于精密加工。

(3) 刃面粗糙度较小,刃口非常锋利,因此能胜任薄层切削,用于超精密加工。

金刚石刀具主要用于对有色金属及其合金进行精密加工、超精加工,还能切削高硬度非金属材料,以及难加工的复合材料的加工。但金刚石与铁的亲和作用大,因此不宜加工钢铁等黑色金属材料。金刚石的热稳定性较差,当切削温度高于 800°C 时,在空气中金刚石即发生碳化,刀具产生急剧磨损,丧失切削能力。

3) 立方氮化硼(CBN)

立方氮化硼是六方氮化硼的同素异构体,是人类已知的硬度仅次于金刚石的物质。