

第 2 章

金属切削原理

金属切削加工的目的：使被加工零件的尺寸精度、形状和位置精度、表面质量达到设计与使用要求。金属切削加工要切除工件上多余的金属，形成已加工表面，必须具备两个基本条件：切削运动（造型运动）和刀具（几何形态）。切削运动（造型运动）的复杂程度将影响机床的结构。刀具的复杂程度将影响刀具刃磨制造的难易程度，同时也会促进刀具材料、刀具制造工艺的发展。而这个过程会产生切削力、切削变形、切削热等物理现象。研究金属切削的基本理论，掌握金属切削的基本规律，对有效控制金属的切削过程、保证加工精度和表面质量、提高切削效率、降低成本、促进切削加工技术的发展等具有十分重要的指导意义。

2.1 切削运动和切削要素

2.1.1 切削运动和加工表面

在金属切削加工中，为了切除工件上多余的金属，获得合乎要求的形状、尺寸精度和表面质量的工件表面，刀具与工件之间必须做相对运动，通常称此相对运动为切削运动。

以最常见的、典型的外圆车削为例，切削运动是由工件的回转运动（切除多余金属以形成工件新表面的基本运动）和刀具的纵向进给运动组成。在这两个运动合成的切削运动作用下，工件表面的一层金属不断地被车刀切下来并转变成切屑，从而加工出所需要的工件表面。在新表面的形成过程中，工件上有三个依次变化着的表面，如图 2-1 所示。

待加工表面：工件上即将被切除多余金属的表面。

已加工表面：工件上被刀具切削过，而形成符合一定技术要求的表面。

过渡表面（加工表面）：工件上由切削刃正在切削着的表面，也就是待加工表面和已加工表面之间的过渡表面。

由此可见，在金属切削加工中，刀具的切削刃相对于工件运动的过程，就是工件表面形成的过程。而在这个过程中，切削刃相对于工件的运动轨迹所形成的表面，就是工件上的加工表面和已加工表面。这里有两个要素：一是切削刃；二是切削运动（图2-2）。不同的形状的切削刃与不同的切削运动组合，即可形成各种工件表面。

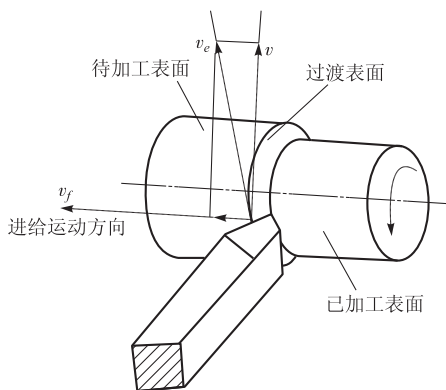


图2-1 车削运动和工件的表面

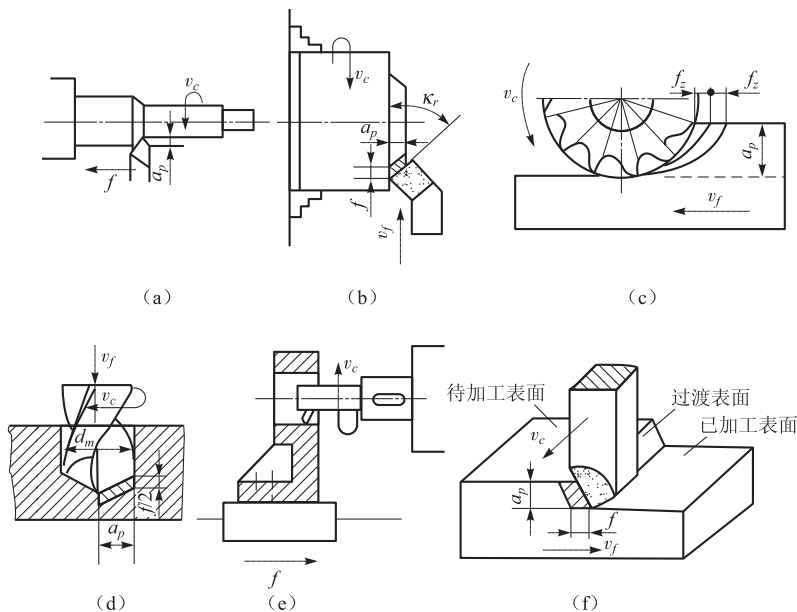


图2-2 各种切削加工的切削运动

(a) 车外圆；(b) 车端面；(c) 铣平面；(d) 钻孔；(e) 镗孔；(f) 刨平面

2.1.2 主运动、进给运动、合成运动与切削用量

在机床上实现工件表面的切削加工时，刀具和工件的相对运动有多种形式，如直线运动或回转运动等。这些运动有的是由刀具单独完成的（如钻孔、拉孔等），

有的是由刀具和工件分别完成的（如车外圆、铣平面等）。但是，按他们在切削过程中起的作用，可分为主运动和进给运动两类。这两类运动向量之和，称为合成切削运动。所有切削运动的速度及其方向都是相对于工件定义的。

1. 主运动

主运动是直接切除工件上多余的金属层，使之转换为切屑，从而形成工件新表面的运动。通常，主运动速度最高、消耗切削功率最大。在切削运动中，主运动只有一个。如图 2-2 所示，车削工件时工件的旋转、钻孔和铣削时刀具的回转、刨削时刀具（或工件）的往复直线运动等都是主运动。

由于刀具切削刃上各点的运动情况不一定相同，研究问题时，应选取切削刃上某一适宜点（称为切削刃选定点）。先将该点的运动研究清楚，再研究整个切削刃就容易了。

切削刃上选定点相对于工件的瞬时运动方向称为主运动方向，主运动的瞬时速度称为切削速度。对于车削，切削速度 v_c 可由下列公式计算：

$$v_c = \frac{\pi dn}{1\,000} \quad (\text{m/min}) \quad (2-1)$$

式中： d ——工件或刀具上某点的回转直径（mm）；

n ——工件或刀具的旋转速度（r/min）。

在转速 n 一定时，切削刃上各点的切削速度不同。考虑到刀具的磨损和已加工表面质量等因素，在计算时，应以最大切削速度为准。

2. 进给运动

进给运动就是不断把切削层投入切削的运动。它配合主运动依次地或连续不断地切除切屑，从而形成具有所需几何特性的已加工表面。进给运动可由刀具完成（如车削），也可由工件完成（如铣削），可以是间歇的（如刨削），也可以是连续的（如车削）。机床上的进给运动可以由一个或数个组成，通常消耗功率少、速度较低。

随着切削加工方法的改变，进给运动的方向也随着变化（图 2-2）对于车削，进给量 f 是工件（车床主轴）每转一转时主切削刃沿进给方向移动的距离，单位是 mm/r。进给速度 v_f 是单位时间的进给量，单位是 mm/min。

显而易见

$$v_f = fn \quad (\text{mm/min}) \quad (2-2)$$

式中： f ——每转进给量（mm/min）；

n ——工件转速（r/min）。

对于多刃刀具，还规定每个刀齿的进给量 a_f ，即后一个刀齿相对前一个刀齿的进给量，单位是 mm/z。

显然

$$v_f = fn = nza_f \quad (2-3)$$

式中： z ——多刃刀具的刀齿数；

a_f ——每齿进给量（mm/z）。

对于主运动为往复直线运动的加工（如刨削等），虽然不规定进给速度，但需要规定间歇进给量，单位为 mm/（d. str）。

3. 合成切削运动与合成切削运动速度

有些切削加工的主运动和进给运动是同时进行的（如车削、铣削等）。因此，刀具切削刃上任意一点与工件表面间的相对切削运动，就是主运动与进给运动的合成切削运动。合成切削运动的速度向量 v_e 应为主运动的速度向量 v 加进给运动的速度向量 v_f 之和，即

$$v_e = v + v_f \quad (2-4)$$

4. 背吃刀量 a_p

对于外圆切削（图2-2（a））和平面刨削（图2-2（f））而言，背吃刀量 a_p 等于已加工表面与待加工表面之间的垂直距离，单位为 mm。它直接影响主切削刃的工作长度，反映了切削负荷的大小。

背吃刀量可由以下公式计算：

车外圆时

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \quad (\text{mm}) \quad (2-5)$$

钻孔时

$$a_p = \frac{d_m}{2} \quad (\text{mm}) \quad (2-6)$$

式中： d_w ——待加工表面直径（mm）；

d_m ——已加工表面直径（mm）。

在生产中，我们把切削速度 v_c 、进给量 f 和背吃刀量 a_p 统称为切削用量三要素。

5. 金属切除率 Z_w

金属切除率 Z_w 是指单位时间内切下工件材料的体积。它是衡量切削效率高低的重要指标之一。它可由下公式计算：

$$Z_w = 1\,000 \, v_c a_p f \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (2-7)$$

由上式可知，切削用量三要素 v_c 、 f 、 a_p 的大小直接影响到金属切除率 Z_w ，从而影响切削加工的生产率。

2.2 刀具切削部分的基本定义

金属切削加工的刀具种类繁多、形式各异，但就刀具切削部分的几何参数而言则可看成是外圆车刀刀头的演变。从各种复杂刀具或多齿刀具中，取一个小刀齿，

它们的几何形状都近似一把外圆车刀的刀头，如图 2-3 所示。

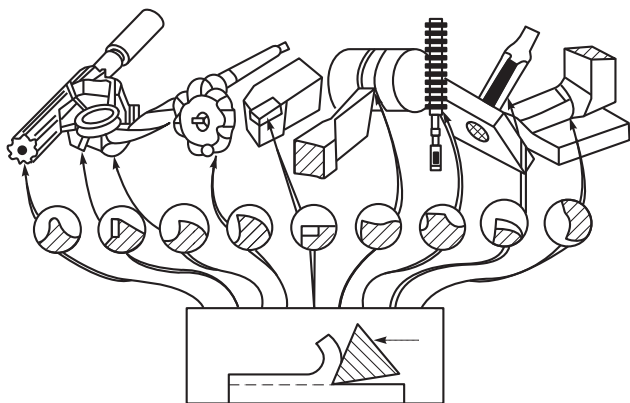


图 2-3 各种刀具切削部分形状

国际标准化组织（ISO）在确定金属切削刀具的工作部分几何形状的一般术语时，以外圆车刀切削部分为基础。而这些基本定义对其他刀具也具有普遍意义。

2.2.1 车刀切削部分的组成

车刀切削部分由前刀面、主后刀面、副后刀面、主切削刃、副切削刃和刀尖组成（图 2-4）。

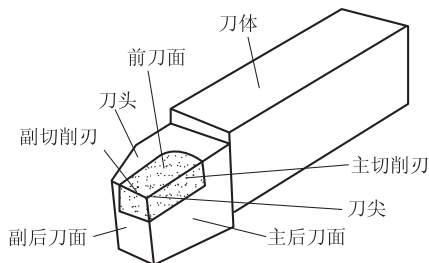


图 2-4 车刀的组成

(1) 前刀面 A_γ 。刀具上切屑流过的表面，称为前刀面。

(2) 主后刀面 A_α 。刀具上与工件上的加工表面相对着并且相互作用的表面，称为主后刀面。

(3) 副后刀面 A'_α 。刀具上与工件上的已加工表面相对着并且相互作用的表面，称为副后刀面。

(4) 主切削刃 s 。刀具上前刀面与主后刀面的交线称为主切削刃。

(5) 副切削刃 s' 。刀具上前刀面与副后刀面的交线称为副切削刃。

(6) 刀尖。主切削刃与副切削刃的交点称为刀尖。刀尖实际是一小段曲线或直线，称修圆刀尖和倒角刀尖。

不同类型的刀具，其刀面、切削刃的数量不完全相同。

2.2.2 定义刀具角度的参考系

刀具角度是为刀具设计、制造、刃磨和测量时所使用的几何参数，它们是确定

刀具切削部分几何形状（各表面空间位置）的重要参数。用以确定刀具几何角度的参考坐标系有两类：一类称为标注参考坐标系（或称静态参考系），它是刀具设计计算、绘图标注、制造刃磨及测量时用来确定刀刃、刀面空间几何角度的定位基准，用它定义的角度称为刀具标准角度（或静态角度）；另一类称为工作参考系（或动态参考系），它是确定刀具切削刃，刀具在切削运动中相对工件的几何位置的基准，用它定义的角度称为刀具的工作角度。

下面以外圆车刀为例来说明标注参考系及刀具标注角度的定义。

1. 标注参考系的假定条件

在建立标注参考系时，须先假定刀具处于某种状态条件下工作，并据以确定刀具标注角度的参考系。假定条件如下：

（1）假定运动条件。假定进给速度很小，即可令 $v_c = v_e$ ，也就是以主运动向量 v_c 代替合成运动向量 v_e 。

（2）假定安装条件。假定刀具的安装基准面垂直于切削速度方向。同时，规定刀杆的中心线同进给方向垂直。

2. 刀具标注角度的参考系

由于多数加工表面都不是平面，而且主切削刃上每点的切削速度各不相同，所以要建立坐标系。坐标系平面用字母 P 和下角标组成复合符号标记。

（1）基面（ P_r ）。通过切削刃选定的点，垂直于主运动 v_c 方向的平面称为基面 P_r 。它应与刀具的定位基准平面平行。因此对车刀来说，基面就是包括切削刃选定点，并与刀杆底部的面平行（图 2-5）。

（2）切削平面（ P_s ）。通过切削刃上选定点，垂直于基面并与主切削刃相切的平面（图 2-5）。基面与切削平面及正交平面组合，构成刀具标注角度参考系。

（3）正交平面及其参考系。正交平面（主剖面） P_o 是通过刀具切削刃选定点并垂直于主切削刃在基面上的投影，即同时垂直于基面 P_r

和切削平面 P_s 的平面。由图 2-5 可见， $P_r - P_s - P_o$ 组成一个正交的参考系，称为正交平面参考系。这是目前生产中最常见的刀具标注角度参考系。其他参考系有

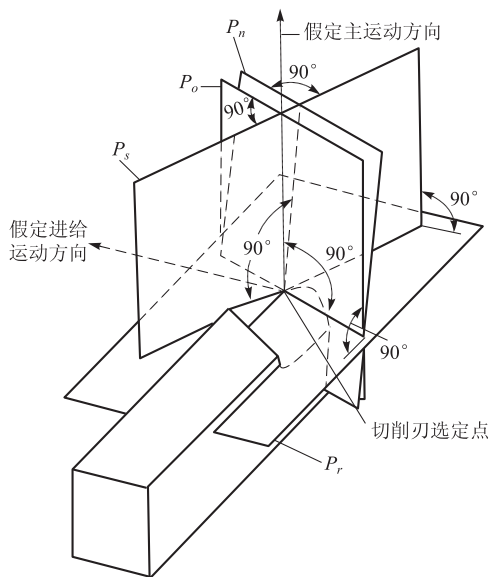


图 2-5 正交平面与法线平面参考系

角对刀具切削性能影响很大。

后角 α_o 是指后刀面与切削平面之间的夹角。刀尖位于后刀面最前点时, 后角为正; 刀尖位于后刀面最后点时, 后角为负。后角的主要作用是减少后刀面与过渡表面之间的摩擦。

楔角 β_o 是前刀面与后刀面之间的夹角。

前角、后角和楔角三者的关系为:

$$\gamma_o + \alpha_o + \beta_o = 90^\circ \quad (2-8)$$

在基面内标注的角度有以下几种。

主偏角 κ_r 为主切削刃在基面内的投影和假定进给方向的夹角。主偏角一般在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

副偏角 κ'_r 为副切削刃在基面上的投影和假定进给方向的夹角。

刀尖角 ε_r 为主切削平面与副切削平面的夹角。

主偏角、副偏角和刀尖角三者之间的关系为

$$\kappa_r + \kappa'_r + \varepsilon_r = 180^\circ \quad (2-9)$$

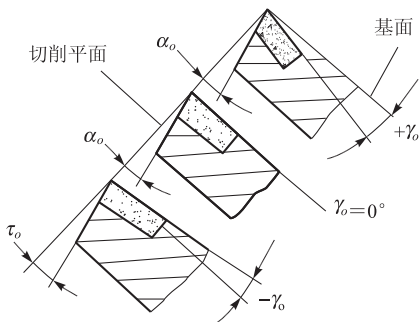


图 2-9 前角的正负

在切削平面内测量的角度是刃倾角 λ_s 。

刃倾角 λ_s 是指主切削刃与基面之间的夹角。切削刃与基面平行时, λ_s 为零; 刀尖位于刀刃最高点时, λ_s 为正; 刀尖位于刀刃最低点时, λ_s 为负。如图 2-10 所示。

在副正交平面内标注的角度有副

后角 α'_o , 是指副后刀面与副切削平面之间的夹角。

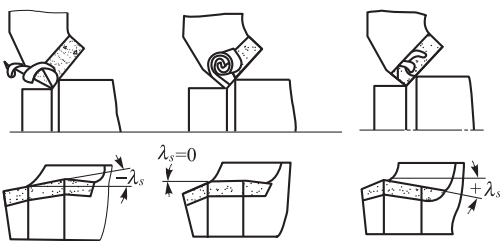


图 2-10 刃倾角的正负

2.2.3 刀具的工作角度

刀具的标注角度是在假定运动条件和假定安装条件下定义得出的。实际上, 在切削加工中, 由于进给运动的影响, 刀具相对于工件安装位置发生变化时, 会使刀具的实际切削角度发生变化。刀具在工作参考系中确定的角度称为刀具工作角度。研究刀具工作角度的变化趋势, 对刀具的设计、改进、革新有重要的指导意义。

1. 刀具工作参考系

与静态系统中正交平面参考系建立的定义和程序相似, 不同点就在于它以合成

切削速度 v_e 或刀具安装位置条件来确定工作参考系的基面 P_{re} 。

由于工作基面的变化, 将带来工作切削平面 P_{se} 的变化, 从而导致工作前角 γ_{oe} 、工作后角 α_{oe} 的变化。

(1) 工作基面 P_{re} 通过切削刃上的参考点, 垂直于合成切削速度方向的平面。

(2) 工作切削平面 P_{se} 通过切削刃上的参考点, 与切削刃相切且垂直于工作基面的平面。

(3) 工作正交平面 P_{oe} 通过切削刃上的参考点, 同时垂直于工作基面、工作切削平面的平面。

在工作正交平面参考系中, 一般考核刀具工作角度 (γ_{oe} 、 α_{oe} 、 κ_{re} 、 κ'_{re} 、 α'_{oe} 、 λ_{se}) 的变化, 对刀具角度设计补偿量以及对切削加工过程的影响情况。

2. 进给运动对工作角度的影响

(1) 横向进给运动对工作前、后角的影响。车端面或切断时, 车刀沿横向进给, 主运动方向与合成运动方向

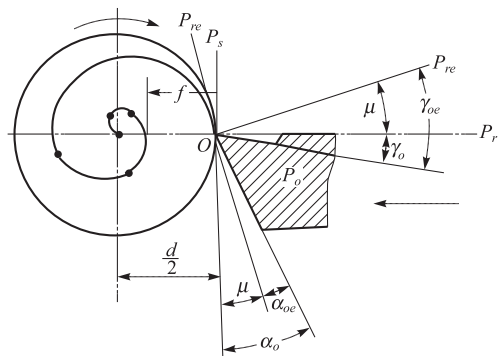


图 2-11 横向进给运动对工作角度的影响

的夹角为 μ ($\tan \mu = \frac{v_f}{v_c} = \frac{f}{\pi d}$), 切削轨迹为阿基米德螺旋线, 如图 2-11 所示。这时工作基面 P_{re} 和工作切削平面 P_{se} 相对于标注坐标系都要偏转一个附加的角度 μ , 使车刀的工作前角 γ_{oe} 增大和工作后角 α_{oe} 减少, 分别为

$$\gamma_{oe} = \gamma_o + \mu; \alpha_{oe} = \alpha_o - \mu \quad (2-10)$$

(2) 纵向进给运动对工作角度的影响。车外圆或车螺纹时, 如图 2-12 所示, 合成运动方向与主运动方向之间的夹角为 μ_f (螺旋升角), 这时工作基面 P_{re} 和工作切削平面 P_{se} 相对于标注坐标系都要偏转一个附加的角度 μ , 使车刀的工作前角 γ_{oe} 增大和工作后角 α_{oe} 减少, 分别为 $\gamma_{oe} = \gamma_o + \mu$, $\alpha_{oe} = \alpha_o - \mu$;

$$\tan \mu = \tan \mu_f \sin \kappa_r = \frac{f \sin \kappa_r}{\pi d} \quad (2-11)$$

一般车削时, 进给量比工件直径小很多, 故角度 μ 很小, 对车刀工作角度的影响很小, 可忽略不计。但在车削 (切断、车螺纹、车丝杠)、镗孔、铣削等加工中, 通常因刀具工作角度的变化, 对工件已加工表面质量或切削性能造成不利影响。车削右旋螺纹时, 车刀左侧刃后角应大些, 右侧刃后角应小些。或者使用可转角度刀架将刀具倾斜一个 μ 角安装, 使左右两侧刃工作前后角相同。

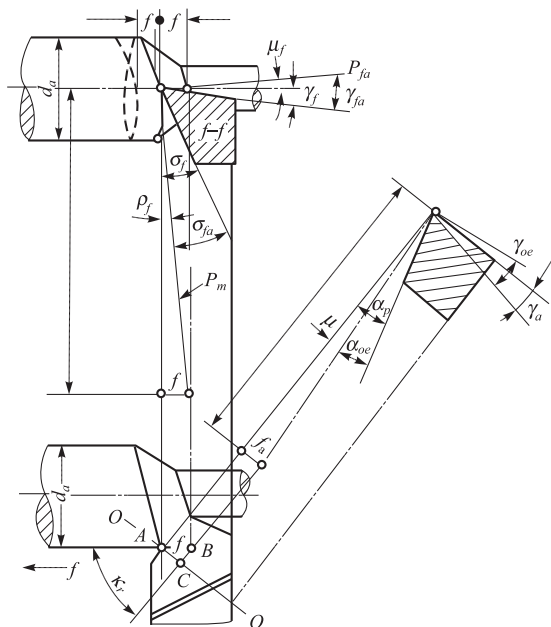


图 2-12 纵向进给运动对工作角度的影响

3. 刀具安装对工作角度的影响

(1) 刀尖安装高低对工作前、后角的影响。用刃倾角 $\lambda_s = 0^\circ$ 车刀车削外圆时，由于车刀的刀尖高于工件中心，使其基面和切削平面的位置发生变化，工作前角 γ_{oe} 增大，而工作后角 α_{oe} 减小。若切削刃低于工件中心，则工作角度的变化情况正好相反。加工内表面时，情况与加工外表面相反。如图 2-13 所示。

(2) 刀杆安装偏斜对工作主、副偏角的影响。当刀杆中心线与进给运动方向不垂直且逆时针转动 θ 角时，工作主偏角将增大，工作副偏角将减小。如图 2-14 所示。

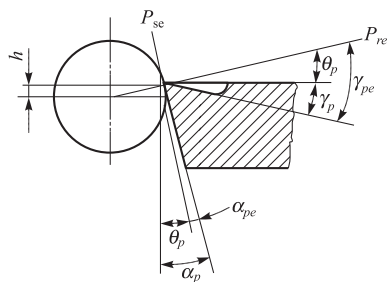


图 2-13 刀杆安装高度对工作角度的影响

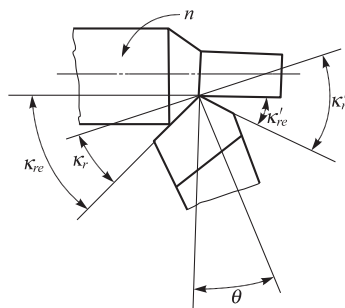


图 2-14 刀杆安装偏斜对工作角度的影响

2.3 切削层的几何参数及切削形式简介

切削层的尺寸和形状直接决定了车刀切削部分所承受的负荷大小及切屑的形状和尺寸。不论何种切削加工，能够说明切削加工机理的，仍是切削层截面的力学性能所决定的真实厚度和宽度，所以必须研究切削层横截面的形状与参数。它们的名称、定义及说明如下。

切削层是指在切削过程中，由刀具在切削部分的一个单一动作（或指切削部分切过工件的一个单程，或指只产生一圈过渡表面的动作）所切除的工件材料层。以车削外圆为例，切削层即工件每转一转，主切削刃沿工件轴线移动 f 距离所切下来的一层金属。如图 2-15 所示。

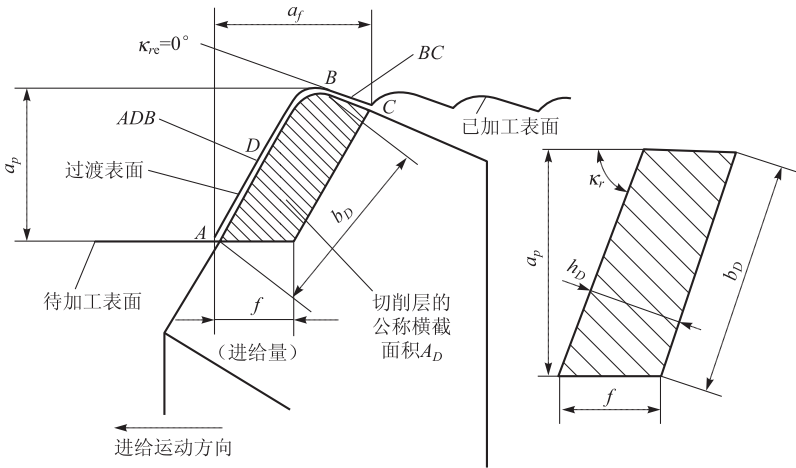


图 2-15 切削层参数

切削层的尺寸称为切削层参数。为了简化计算，切削层参数通常是在基面 p_r 内观察和测量。

2.3.1 切削厚度 h_D

切削厚度 h_D 是指垂直于过渡表面度量的切削层尺寸。 h_D 的大小反映了切削刃单位长度上的工作负荷。由图 2-15 可知。

$$h_D = f \sin \kappa_r \quad (\text{mm}) \quad (2-12)$$

2.3.2 切削宽度 b_D

切削宽度 b_D 即切削层宽度。它是沿着主切削刃在基面上的投影所测量的切削层尺寸。 b_D 的大小反映了切削刃参加切削的长度。 b_D 和 a_p 之间存在下列关系:

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (\text{mm}) \quad (2-13)$$

从式 (2-12) 和式 (2-13) 可知, 影响切削厚度 h_D 的因素是 f 和主偏角 κ_r ; 影响切削宽度 b_D 的因素是切削深度 a_p 和主偏角 κ_r 。当进给量 f 和切削深度 a_p 一定时, 主偏角 κ_r 越大, 切削厚度 h_D 也越大, 但切削宽度 b_D 越小; 当 $\kappa_r = 90^\circ$ 时, $h_D = f$, $b_D = a_p$ 。

曲线形切削刃工作时, 切削层各点的切削厚度是变化的, 越接近刀尖切削厚度越小。

2.3.3 切削面积 A_D

切削面积 A_D 是指在切削层尺寸平面 (基面) 里度量的横截面积。

$$A_D = h_D b_D = a_p f \quad (\text{mm}^2) \quad (2-14)$$

由式子 2-14 可知, 切削面积 A_D 与切削深度 a_p 和进给量 f 有直接的关系。在切削中, 切削参数的选择对工件加工质量、生产率和切削过程有着重要的影响。

2.3.4 切削形式简介

1. 直角切削和斜角切削简介

切削刃与主运动方向垂直的切削称为正切削 (或直角切削)。否则称为斜切削 (或斜角切削)。因此, 刃倾角 λ_s 不等于零的刀具均属于斜角切削。

图 2-16 所示为刨削的正切削 ((a) 图) 和斜切削 ((b) 图)。

2. 自由切削和非自由切削

只有一条直线刃进行切削的情况称为自由切削。如宽刃刨刀和直齿圆柱铣刀加工窄平面, 在车床上进行倒角和纵车管材的端面等均为自由切削。

由非直线形刀刃进行切削 (如刀

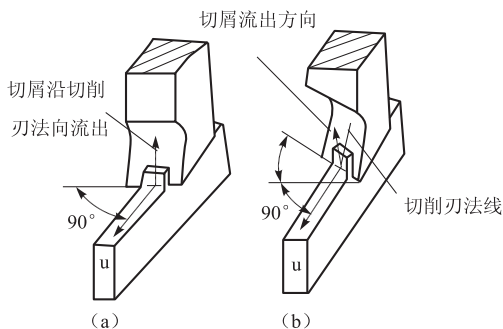


图 2-16 正切削和斜切削

(a) 正切削; (b) 斜切削

刃形状为折线或曲线，主副刀刃同时参加工作）均称为非自由切削。

自由切削时，切削刃上各点切屑流动方向大致相同，切屑变形简单；非自由切削时，切削刃上各点切屑流动方向相互干扰，切屑变形较复杂。实际生产中多为非自由切削，而在实验研究中，为简化起见，通常采用自由切削。

2.4 刀具材料

刀具材料是指刀具切削部分的材料。金属切削过程除了要求刀具具有适当的几何参数外，还要求刀具材料对工件要有良好的切削性能。刀具切削性能的优劣，不仅取决于刀具切削部分的几何参数，还取决于刀具切削部分所选配的刀具材料。金属切削过程中的加工质量、加工效率、加工成本，在很大程度上取决于刀具材料的合理选择。因此，材料、结构和几何形状是构成刀具切削性能评估的三要素。

2.4.1 刀具材料应具备的性能

切削过程中，刀具切削部分是在很大的切削力、较高的切削温度及剧烈摩擦等条件下工作的，同时，由于切削余量和工件材质不均匀或切削时形不成理想切屑，还伴随冲击和振动，因此对刀具切削部分的材料提出了以下基本要求。

(1) 足够的硬度和耐磨性。硬度是刀具材料最基本的性能。刀具材料的硬度必须高于工件材料的硬度，以便刀具切入工件。在常温下刀具材料的硬度应在 60 HRC 以上。耐磨性是刀具材料抵抗磨损的能力，在剧烈的摩擦下刀具磨损要小。一般来说，材料的硬度越高，耐磨性越好。刀具材料含有耐磨的合金碳化物越多、晶粒越细、分布越均匀，则耐磨性越好。

(2) 足够的强度和韧性。切削时刀具要承受较大的切削力、冲击和振动，为了避免崩刃和折断，刀具材料应具有足够的强度和韧性。

(3) 较高的耐热性。耐热性是指刀具材料在高温下保持足够的硬度、耐磨性、强度和韧性的性能（又称红硬性）。通常把材料在高温下仍保持高硬度的能力称为热硬性（高温硬度）。刀具材料的高温硬度越高，耐热性越好，允许的切削速度越高。所以，耐热性是衡量刀具材料性能的主要指标。

(4) 较好的工艺性能。为了便于刀具加工制造，刀具材料要有良好的工艺性能。如热轧、锻造、焊接、热处理、切削和磨削加工等性能。

(5) 较好的传热性。刀具材料的传热系数大，有利于将切削区的热量传出去，降低切削温度。

(6) 经济性。刀具材料的发展立足于本国资源，选用时要注意经济效益，力求价格低廉。

应当指出,上述几项性能之间可能相互矛盾。没有一种刀具材料能具备所有性能最佳指标,而是各有所长。所以对刀具材料应合理选择使用。

2.4.2 常用刀具材料

刀具材料有高速钢、硬质合金、工具钢、陶瓷、立方氮化硼和金刚石等。目前,在生产中所用的刀具材料主要有高速钢和硬质合金两类。碳素工具钢、合金工具钢因耐热性差,仅用于手工或切削速度较低的工具。

1. 高速钢

高速钢又名风钢或锋钢,意思是淬火时即使在空气中冷却也能硬化,并且很锋利。它是一种成分复杂的合金钢,含有钨(W)、钼(Mo)、铬(Cr)、钒(V)等碳化物形成元素。合金元素总量达10%~25%。它在高速切削产生高热情况下(约500℃)仍能保持高的硬度,HRC能在60以上。这就是高速钢最主要的特性——红硬性。而碳素工具钢经淬火和低温回火后,在室温下虽有很高的硬度,但当温度高于200℃时,硬度便急剧下降,在500℃硬度已降到与退火状态相似的程度,完全丧失了切削金属的能力,这就限制了碳素工具钢制作切削工具使用。而高速钢由于红硬性好,弥补了碳素工具钢的致命缺点,可以用来制造切削工具。

高速钢的热处理工艺较为复杂,必须经过退火、淬火、回火等一系列过程。退火的目的是消除应力,降低硬度,使显微组织均匀,便于淬火。退火温度一般为860℃~880℃。淬火时由于它的导热性差一般分两阶段进行。先在800℃~850℃预热(以免引起大的热应力),然后迅速加热到淬火温度1190℃~1290℃(不同牌号实际使用时温度有区别),然后油冷或空冷或充气体冷却。工厂均采用盐炉加热,现真空炉使用也相当广泛。淬火后因内部组织还保留一部分(约30%)残余奥氏体没有转变成马氏体,影响了高速钢的性能。为使残余奥氏体转变,进一步提高硬度和耐磨性,一般要进行2~3次回火,回火温度560℃,每次保温1小时。

(1) 生产制造方法:通常采用电炉生产,近来曾采用粉末冶金方法生产高速钢,使碳化物呈极细小的颗粒均匀地分布在基体上,提高了使用寿命。

(2) 用途:用于制造各种切削工具。如车刀、钻头、滚刀、机用锯条及要求高的模具等。

高速钢按切削性能可分为普通高速钢和高性能高速钢。常见的几种高速钢的力学性能见表2-1。

(1) 普通高速钢是切削硬度在250~280 HBS以下的大部分结构钢和铸铁的基本刀具材料,切削普通钢材时的切削速度一般不高于40~60 m/min。

表 2-1 常用高速钢的性能比较

类型	牌号		淬、回 火硬度 /HRC	抗弯强度 /MPa	冲击韧性 /(MJ·m ⁻²)	600℃下的 硬度/HRC
	中国牌号	相似 ISO 牌号				
普通 高速钢	W18Cr4V	HS18-0-1	62~65	3 430	0.29	50.5
	W6Mo5Cr4V2	HS6-5-2	63~66	3 500~4 000	0.30~0.40	47~48
高性能 高速钢	W6Mo5Cr4V3	HS6-5-3	65~67	3 200	0.25	51.7
	W6Mo5Cr4V2Co5	HS6-5-2-5	65~66	3 000	0.3	54
	W10Mo4Cr4V3Co10	HS10-4-3-10	67~69	2 350		55.5
	W2Mo9Cr4V2Co8	HS2-9-2-8	66~68	2 700~3 800	0.23~0.35	55
	W7Mo4Cr4V2Co5	HS7-4-2-5	66~68	2 500~3 000	0.23~0.35	54
	W12Cr4VCo5	HS12-0-1-5	66~68	3 000	0.25	54
	W6Mo5Cr4V2Al		66~69	3 000~4 100	0.25~0.30	55~56
	W10Mo4Cr4VAl		68~69	3 010	0.2	54.2

(2) 高性能高速钢是在普通高速钢的基础上增加一些含碳量、含钒量并添加钴、铝等合金元素，进一步提高耐热性和耐磨性。这类高速钢刀具约为普通高速钢的 1.5~3 倍，适用于加工不锈钢、耐热钢、钛合金及高强度等难加工材料。

2. 硬质合金

硬质合金是以高硬度难熔金属的碳化物（WC、TiC）微米级粉末为主要成分，以钴（Co）或镍（Ni）、钼（Mo）为黏结剂，在真空炉或氢气还原炉中烧结而成的粉末冶金制品。硬质合金的常温硬度可高达（86~93 HRA，相当于 69~81 HRC）；热硬性好（可达 900℃~1 000℃，保持 60 HRC）；耐磨性好。硬质合金刀具比高速钢切削速度高 4~7 倍，刀具寿命高 5~80 倍。制造模具、量具，寿命比合金工具钢高 20~150 倍。可切削 50 HRC 左右的硬质材料。但硬质合金脆性大，不能进行切削加工，难以制成形状复杂的整体刀具，因而常制成不同形状的刀片，采用焊接、黏接、机械夹持等方法安装在刀体或模具体上使用。ISO 把切削用硬质合金分为三类：K 类、P 类和 M 类。其牌号如表 2-2 所示。

① 钨钴类硬质合金（K 类）。其主要成分是碳化钨（WC）和黏结剂钴（Co）。其牌号是由“YG”（“硬、钴”两字汉语拼音字首）和平均含钴量的百分数组成。例如，YG8，表示平均 Co=8%，其余为碳化钨的钨钴类硬质合金。K 类合金主要用于加工铸铁、有色金属及其合金。

② 钨钛钴类硬质合金（P 类）。其主要成分是碳化钨、碳化钛（TiC）及钴。

其牌号由“YT”（“硬、钛”两字汉语拼音字首）和碳化钛平均含量组成。例如，YT15，表示平均 TiC = 15%，其余为碳化钨和钴含量的钨钛钴类硬质合金。P 类合金主要用于加工钢材。

③ 钨钛钽（钼）类硬质合金（M 类）。其主要成分是碳化钨、碳化钛、碳化钽（或碳化钼）及钴。这类硬质合金又称通用硬质合金或万能硬质合金。其牌号由“YW”（“硬”“万”两字汉语拼音字首）加顺序号组成，如 YW1。这类硬质合金既可以加工铸铁和有色金属，又可以加工钢材，还可以加工高温合金和不锈钢等难加工材料，有通用硬质合金之称。硬质合金的合理选择如表 2-3 所示。

表 2-2 切削用硬质合金的牌号与用途分组代号

用途分组代号	硬质合金牌号	用途分组代号	硬质合金牌号	用途分组代号	硬质合金牌号
P01	YT30、YT10	M10	YW1	K01	YG3X
P10	YT15	M20	YW2	K10	YG6X、YG6A
P20	YT14			K20	YG6、YG3N
P30	YT15			K30	YG8N、YG8

表 2-3 硬质合金刀具的应用范围

合金牌号	相当 ISO	物理机械性能			推荐用途
现用		密度	抗弯强度	硬度	
名称		g/cm ³	不低于	不低于	
			kg/mm ²	HRA	
YT30	P01	9.3 ~ 9.7	90	92.5	适用于碳素钢与合金钢工件的精加工、如精车、精镗、精扩等
YT05	P05	12.5 ~ 12.9	110	92.5	适用于淬火钢、合金钢和高强度钢的精加工和半精加工
YT15	P10	11.0 ~ 11.7	115	91	适用于碳素钢与合金钢，连续切削时的半精车及精车，间断切削时的精车，旋风车丝，连续面的半精铣与精铣，孔的粗扩与精扩

续表

合金牌号	相当 ISO	物理机械性能			推荐用途
		密度	抗弯强度	硬度	
		g/cm ³	不低于	不低于	
			kg/mm ²	HRA	
YT14	P20	11.2 ~ 12.0	120	90.5	适用于在碳素钢与合金钢加工中，不平整断面和连续切削时的粗车，间断切削的半精车与精车，连续断面的粗铣，铸孔的扩钻与粗扩
YT5	P30	12.5 ~ 13.2	140	89.5	适用于碳素钢与合金钢（包括钢锻件，冲压件及铸件的表皮）加工不平整断面与间断切削时的粗车、粗刨、半精刨、非连续面的粗铣及钻孔
YG6X	K10	14.6 ~ 15.0	140	91	经生产使用证明，该合金加工冷硬合金铁可获得良好的效果，也适于普通的精加工
YG6	K20	14.6 ~ 15.0	145	89.5	适用于铸铁、有色金属及其合金与非金属材料连续切削时的半精车、精车、粗车螺纹，旋风车丝、连续断面的半精铣与精铣，孔的粗扩与精扩
YG8	YG30	14.5 ~ 14.9	150	89	适用于铸铁、有色金属及其合金与非金属材料不平整断面和间断切削时的粗车、粗刨、粗铣，一般也用于深孔的钻孔、扩孔

3. 其他刀具材料

1) 陶瓷

用于制作刀具的陶瓷材料主要有两类：氧化铝基陶瓷和氮化硅基陶瓷。陶瓷材料制作的道具硬度可达 90 ~ 95 HRA，耐热温度高达 1 200℃ ~ 1 450℃，能承受的切削速度比硬质合金还要高，但抗弯强度低，冲击韧性差，目前主要用于半精加工

和精加工高硬度、高强度钢及冷硬铸铁等材料。

2) 立方氮化硼

立方氮化硼 (CBN) 是有六方氮化硼经高温高压处理转化而成, 其硬度高达 8 000 HV, 仅次于金刚石。CBN 是一种新型刀具材料, 它可耐 $1\,300^{\circ}\text{C} \sim 1\,500^{\circ}\text{C}$ 的高温, 热稳定性好; 它的化学稳定性也好, 即使高达 $1\,200^{\circ}\text{C} \sim 1\,300^{\circ}\text{C}$ 也不与铁产生化学反应。一般用于高硬度、难加工材料的精加工。

3) 人造金刚石

人造金刚石是在高温高压下由石墨转化而成, 其硬度接近 10 000 HV, 可用于加工硬质合金、陶瓷、高硅铝合金等高硬度、高耐磨材料。

2.5 金属切削过程

在金属切削过程中, 始终存在着刀具切削工件和工件材料抵抗切削的矛盾, 从而产生一系列物理现象, 如切削变形、切削力、切削热与切削温度以及有关刀具的磨损与刀具寿命、卷屑与断屑等。研究、掌握并能灵活应用金属切削基本理论, 对有效控制切削过程、保证加工精度和表面质量, 提高切削效率、降低生产成本, 合理改进、设计刀具几何参数, 减轻工人的劳动强度等有重要的指导意义。

2.5.1 切削变形

切削金属形成切屑的过程是一个类似于金属材料受挤压作用, 产生塑性变形进而产生剪切滑移的变形过程如图 2-17 所示。图 2-17 (a) 为材料正挤压试验的示意图。试验证明, 与作用力 F 大致成 45° 的两个近似平面 CB 、 DA 内剪切应力最大, 因而剪切变形首先沿此两个近似平面发生。随 F 的增大, 平面 CB 、 DA 两侧还会产生一系列滑移面, 其交线分别集中在 C 、 D 两点。当剪切力达到材料的剪切屈服强度时, 试件沿 CB 面或 DA 面滑移。图 2-17 (b) 为切削示意图。试件上只有

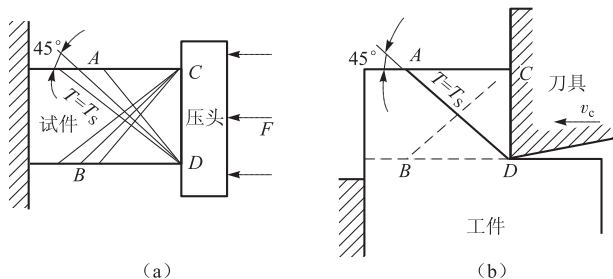


图 2-17 金属的挤压和切削

(a) 挤压; (b) 切削

DA 线以上的金属受到刀具前刀面的挤压。由于母体金属的阻碍,使金属不能沿 CB 面滑移,只能沿 DA 面滑移。

根据切削实验时制作金属切削变形图片,可以绘制如图 2-18 所示的金属切削过程中的滑移线和流线示意图。流线表明被切削金属中的某一点在切削过程中流动的轨迹。切削过程中,切削层金属的变形大致可以划分为三个区域。

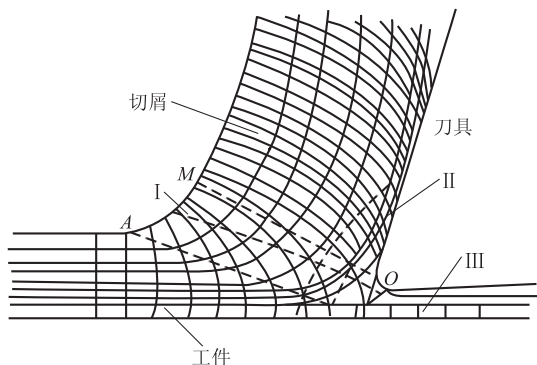


图 2-18 金属切削过程中的滑移线和流线示意图

第一变形区：塑性变形从始滑移面 OA 开始至终滑移面 OM 终束，之间形成 AOM 塑性变形区，由于塑性变形的特点是晶格间的剪切滑移，所以 AOM 叫剪切区，也称为第一变形区（图 2-18 的 I 区）。第一变形区是金属切削变形过程中最大的变形区，在这个区域内，金属将产生大量的切削热，并消耗大部分功率。此区域较窄，宽度仅 $0.02 \sim 0.2 \text{ mm}$ 。

第二变形区：切屑沿刀具前面排出时会进一步受到前刀面的阻碍，在刀具和切屑界面之间存在强烈的挤压和摩擦，使切屑底部靠近前刀面处的金属发生“纤维化”的二次变形。这部分区域称为第二变形区（图 2-18 的 II 区）

第三变形区：在已加工表面上与刀具后面挤压、摩擦形成的变形区域称为第三变形区（图 2-18 的 III 区）。由于刀具刃口不可能绝对锋利，钝圆半径的存在使切削层参数中公称切削厚度不可能完全切除，会有很小一部分被挤压到已加工表面，与刀具后刀面发生摩擦，并进一步产生弹、塑性变形，从而影响已加工表面质量。

2.5.2 积屑瘤的形成及对加工影响

在一定的切削速度和保持连续切削的情况下，加工塑性材料时，在刀具前刀面常常黏结一块剖面呈三角状的硬块，这块金属被称为积屑瘤。

积屑瘤的产生不但与材料的加工硬化有关，而且也与刀具前区的温度和压力有关。一般材料的加工硬化性越强，越容易产生积屑瘤；温度与压力太低不会产生积

屑瘤，温度太高也不会产生积屑瘤。一般在 $300^{\circ}\text{C} \sim 380^{\circ}\text{C}$ 切削碳钢易产生积屑瘤。积屑瘤硬度很高，是工件材料硬度的 $2 \sim 3$ 倍，能同刀具一样对金属进行切削。

它对金属切削过程会产生如下影响。

(1) 实际刀具前角增大。刀具前角增大可减小切削力，对切削过程有积极的作用。而且，切削瘤的高度 H_b 越大，实际刀具前角也越大，切削更容易。

(2) 实际切削厚度增大。

(3) 加工后表面粗糙度增大。

(4) 切削刀具的耐用度降低。

显然，积屑瘤有利有弊。粗加工时，对精度和表面质量要求不高，如果积屑瘤能稳定生长，则可以代替刀具进行切削，保护刀具，同时减少变形。精加工时，则应尽量避免积屑瘤的出现。

根据积屑瘤产生的原因可以知道，积屑瘤是切屑与刀具前刀面摩擦，摩擦温度达到一定程度，切屑与前刀面接触层金属发生加工硬化时产生的，因此可以采取以下几个方面的措施来避免积屑瘤的发生。

① 首先从加工前的热处理工艺阶段解决。通过热处理，提高零件材料的硬度，降低材料的加工硬化。

② 调整刀具角度，增大前角，从而减小切屑对刀具前刀面的压力。

③ 使用适当的切削速度切削。一般切削速度 $v_c < 3 \text{ m/min}$ 和 $v_c > 40 \text{ m/min}$ 时，不易产生积屑瘤。

④ 或采用较高的切削速度，增加切削温度，因为温度高到一定程度，积屑瘤也不会发生。

⑤ 更换切削液，采用润滑性能更好的切削液，减少切削摩擦。

2.5.3 切屑的类型

由于工件材料以及切削条件的不同，切削变形的程度也就不同，因而所产生的切屑形态也就各不相同。其基本类型如图 2-19 所示。

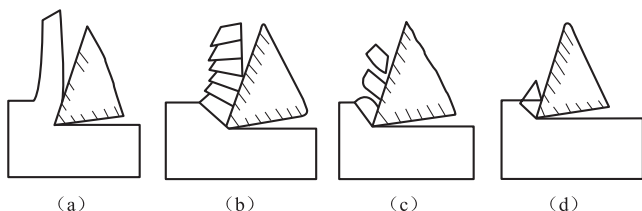


图 2-19 切屑的基本类型

(a) 带状切屑；(b) 挤裂切屑；(c) 单元切屑；(d) 崩碎切屑

1. 带状切屑

带状切屑是一种最常见的切屑。它的内表面是光滑的，外表面是毛茸茸的。形如一条连绵不断的带子。一般加工塑性金属材料，当切削厚度较小、切削速度较高、刀具前角较大时，会得到此类切屑。形成这种切屑时切削过程平稳，切削力波动较小，已加工表面粗糙度较小，但带状切屑容易缠绕在刀具或工件上影响加工过程。

2. 挤裂切屑

挤裂切屑是在加工工程塑性材料时较常见的一种切削。其特征是刀屑接触面有裂纹，外表面是锯齿形。这类切屑之所以呈锯齿形，是由于它的第一变形区较宽，在剪切滑移过程中滑移量较大。大多在低速、大进给、切削厚度较大、刀具前角较小时产生。

3. 单元切屑

单元切屑是在加工塑性材料时较少见的一种切屑。切屑呈粒状。在挤裂（节状）切屑产生的前提下，当进一步降低切削速度，增大进给量，减小前角时则出现单元（粒状）切屑。

4. 崩碎切屑

崩碎切屑是加工脆性材料时较常见的一种切屑。通常呈不规则细粒状的切屑。产生这种切屑会使切削过程不平稳，易损坏刀具，使已加工表面粗糙。工件材料越是脆硬、进给量越大则越容易产生这种切屑。

同一加工件，切屑的类型可以随切削条件不同而改变，在生产中，常根据具体情况采取不同的措施来得到需要的切屑，以保证切削加工的顺利进行。

2.6 切削热与切削温度

2.6.1 切削热的产生和传导

被切削的金属在刀具的作用下，发生弹性和塑性变形而耗功，这是切削热的一个重要来源。此外，切屑与前刀面、工件与后刀面之间的摩擦也要耗功，也产生出大量的热量。因此，切削时共有三个发热区域，即剪切面、切屑与前刀面接触区、后刀面与过渡表面接触区，如图 2-20 所示，三个发热区与三个变形区相对应。所以，切削热的来源就是切屑变形功和前、后刀面的摩擦功。

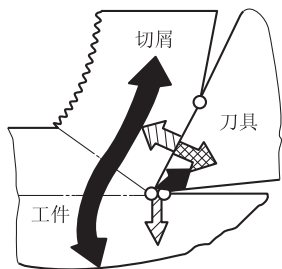


图 2-20 切削热的来源与传导

尽管切削热是切削温度上升的根源，但直接影

响切削过程的却是切削温度，切削温度一般指前刀面与切屑接触区域的平均温度。前刀面的平均温度可近似地认为是剪切面的平均温度和前刀面与切屑接触面摩擦温度之和。

2.6.2 影响切削温度的主要因素

根据理论分析和大量的实验研究得知，切削温度主要受切削用量、刀具几何参数、工件材料、刀具磨损和切削液的影响，以下对这几个主要因素加以分析。

1. 切削用量的影响

分析各因素对切削温度的影响，主要应从这些因素对单位时间内产生的热量和传出的热量的影响入手。如果产生的热量大于传出的热量，则这些因素将使切削温度增高；某些因素使传出的热量增大，则这些因素将使切削温度降低。切削速度对切削温度影响最大，随切削速度的提高，切削温度迅速上升。而背吃力量 a_p 变化时，散热面积和产生的热量亦作相应变化，故 a_p 对切削温度的影响很小。

2. 刀具几何参数的影响

切削温度 θ 随前角 γ_o 的增大而降低。这是因为前角增大时，单位切削力下降，使产生的切削热减少的缘故。但前角大于 $18^\circ \sim 20^\circ$ 后，对切削温度的影响减小，这是因为楔角变小而使散热体积减小的缘故。主偏角 κ_r 减小时，使切削宽度 b_D 增大，切削厚度 h_D 减小，故切削温度下降。负倒棱 b_{γ_1} 在 $(0 \sim 2)f$ 范围内变化，刀尖圆弧半径 r_e 在 $0 \sim 1.5 \text{ mm}$ 范围内变化，基本上不影响切削温度。因为负倒棱宽度及刀尖圆弧半径的增大，会使塑性变形区的塑性变形增大，但另一方面这两者都能使刀具的散热条件有所改善，传出的热量也有所增加，两者趋于平衡，所以对切削温度影响很小。

3. 刀具磨损的影响

在后刀面的磨损值达到一定数值后，对切削温度的影响增大；切削速度越高，影响就越显著。合金钢的强度大，导热系数小，所以切削合金钢时刀具磨损对切削温度的影响，就比切碳素钢时大。

4. 切削液的影响

切削液对切削温度的影响，与切削液的导热性能、比热、流量、浇注方式以及本身的温度有很大的关系。从导热性能来看，油类切削液不如乳化液，乳化液不如水基切削液。

2.6.3 切削温度的分布

切削温度的测量比较常用的是自然电偶法，但自然电偶法只能测量出切削温度的平均温度。实际上，切屑、工件和刀具上各点的温度是不相同的。根据人工电偶法等的测量与计算，车刀前刀面上的温度分布如图 2-21 (b) 所示，切屑、工件、

刀具在主剖面内的温度分布如图 2-21 (a) 所示。

根据对图 2-21 的分析, 以及对切削温度分布研究, 可以归纳出以下一些温度分布的规律:

(1) 剪切面上各点温度几乎相同。由此可以推想, 剪切面上各点的应力应变规律基本是变化不大的。

(2) 前刀面和后刀面上的最高温度都不在刀刃上, 而是在离刀刃有一定距离的地方。这是摩擦热沿着刀面不断增加的缘故。

(3) 在剪切区域中, 垂直剪切面方向上的温度梯度很大。切削速度高时, 因热量来不及传出, 而导致温度梯度增大。

(4) 在切屑靠近前刀面的一层 (简称底层) 上温度梯度很大, 离前刀面 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$, 温度就可能下降一半。这说明前刀面上的摩擦热集中在切屑的底层。

(5) 后刀面的接触长度较小, 因此温度的升降是在极短时间内完成的, 加工表面受到的是一次热冲击。

(6) 工件材料塑性越大, 则前刀面上的接触长度越大, 切削温度的分布也就较均匀些; 反之, 工件材料的脆性越大, 则最高温度所在的点离刀刃越近。

(7) 工件材料的导热系数越低, 则刀具的前、后刀面的温度越高。这是一些高温合金和钛合金的切削加工性低的原因。

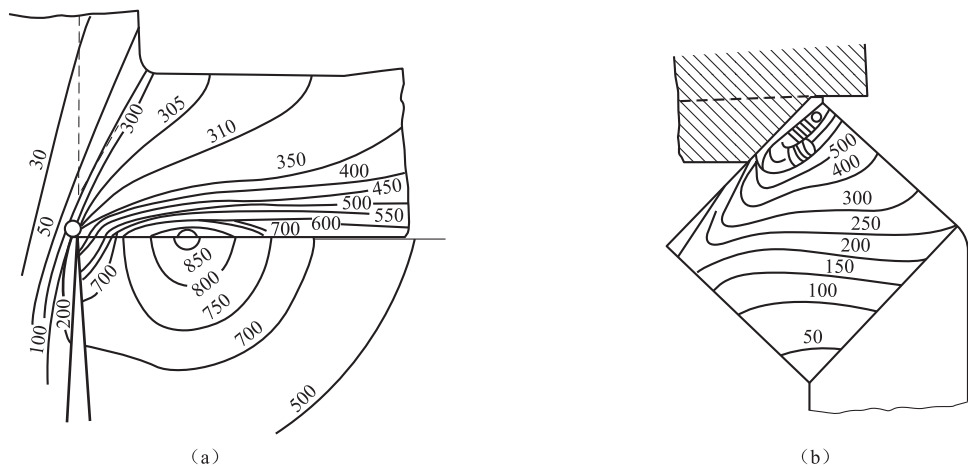


图 2-21

(a) 刀具、切屑和工件的温度分布; (b) 刀具前刀面上的温度分布

(图中数字指温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$)

2.6.4 切削温度对工件、刀具和切削过程的影响

切削温度高是刀具磨损的主要原因，它将限制生产率的提高；切削温度还会使加工精度降低，使已加工表面产生残余应力以及其他缺陷。

(1) 切削温度对工件材料强度和切削力的影响。切削时的温度虽然很高，但是切削温度对工件材料硬度及强度的影响并不很大；剪切区域的应力影响不很明显。

(2) 对刀具材料的影响。适当地提高切削温度，对提高硬质合金的韧性是有利的。

(3) 对工件尺寸精度的影响。特别是加工细长轴、薄壁套以及精密零件时，热变形的影响更要注意。

(4) 利用切削温度自动控制切削速度或进给量。

(5) 利用切削温度与切削力控制刀具磨损。

2.6.5 刀具磨损与刀具耐用度

切削过程中，刀具是在高温高压下工作的。因此，刀具一方面切下切屑，一方面也被磨损。当刀具磨损达到一定值时，工件的表面粗糙度值增大，切屑的形状和颜色发生变化，切削过程发出沉重的声音，并伴有振动。此时，必须对刀具进行修磨或更换新刀。

1. 刀具磨损的形态

刀具磨损是指刀具与工件或切屑的接触面上，刀具材料的微粒被切屑或工件带走的现象。这种磨损现象称为正常磨损。若由于冲击、振动、热效应等原因致使刀具崩刃、碎裂而损坏，称为非正常磨损。刀具的正常磨损形式一般有以下几种：

(1) 前刀面磨损。切削塑性材料时，若切削厚度较大，在刀具前刀面刃口后方会出现月牙洼形的磨损现象（图 2-22），月牙洼处是切削温度最高的地方。随着磨损的加剧，月牙洼逐渐加深加宽，当接近刃口时，会使刃口突然崩去。前刀面磨损量的大小，用月牙洼的宽度 KB 和深度 KT 表示。

(2) 后刀面磨损。后刀面磨损指磨损的部位主要发生在后刀面，后刀面磨损后，形成后角等于零度的小棱面。当切削塑性金属时，若切削厚度较小，或切削脆性金属时，由于前刀面上摩擦较小，温度较低，因此磨损主要发生在后刀面。后刀面磨损量的大小是不均匀的。如图 2-22 所示，在刀尖部分（ C 区），其散热条件和强度较差，磨损较大，该磨损量用 VC 表示；在刀刃靠近工件表面处（ N 区），由于毛坯的硬皮或加工硬化等原因，磨损也较大，该磨损量用 VN 表示；只有在刀刃中间（ B 区）磨损较均匀，此处的磨损量用 VB 表示，其最大磨损量用 $VB_{\max}$ 表示。

(3) 前后刀面同时磨损。当切削塑性金属时, 如果切削厚度适中, 则经常会发生前刀面与后刀面同时磨损的磨损形式。

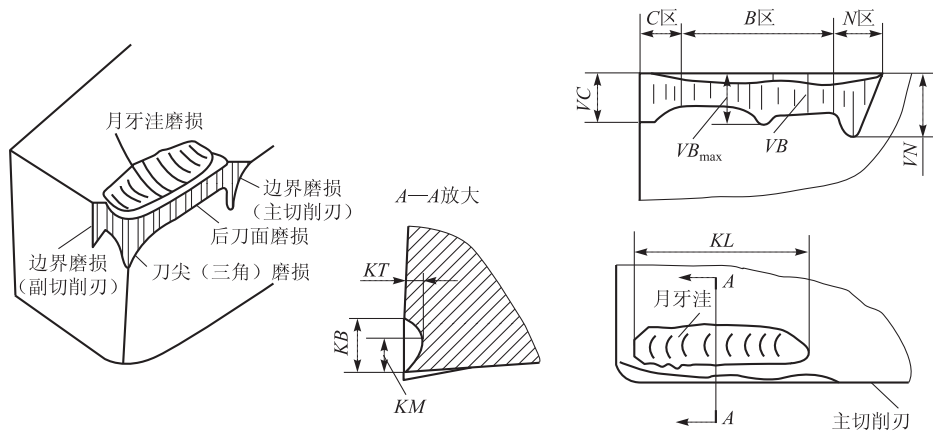


图 2-22 刀具的磨损形态

2. 刀具磨损的过程

正常磨损情况下, 刀具的磨损量随切削时间的增加而逐渐扩大。国际标准 ISO 规定以 1/2 背吃刀量处后刀面的磨损宽度 VB 为刀具的磨损标准, 其典型磨损过程如图 2-23 所示, 大致分为三个阶段。

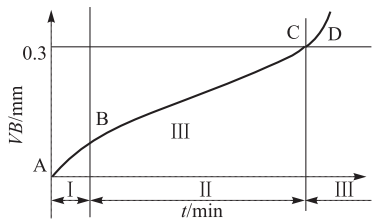


图 2-23 刀具磨损的典型曲线

(1) 初期磨损阶段 (图示 AB 阶段)。

在刀具开始切削的短时间内磨损较快。这是因为刀具在刃磨后, 刀面的表面粗糙度值大, 表层组织不耐磨所致。

(2) 正常磨损阶段 (图示 BC 阶段)。

随着切削时间的增加, 磨损量以较均匀的速度加大。这是由于刀具表面高低不平及不耐磨的表层已被磨去, 形成一个稳定区域, 因而磨损速度较以前缓慢。但磨损量随切削时间而逐渐增加, 这一阶段也是刀具工作的有效阶段。

(3) 急剧磨损阶段 (图示 CD 阶段)。

当刀具磨损量达到一定程度后, 由于刀具很钝, 摩擦过大, 使切削温度迅速升高, 刀具磨损加剧, 以致刀具失去切削能力。生产中为合理使用刀具并保证加工质量, 应在这阶段到来之前就及时重磨刀具或更换新刀。

3. 刀具磨损原因

刀具磨损的原因很复杂, 主要有以下几种常见的形式:

(1) 机械作用的磨损。工件材料中含有比刀具材料硬度高的硬质点或黏附有

积屑瘤碎片，如 TiC，TiN 或 SiO₂ 等，就会在刀具表面上刻划，使刀具磨损。在低速切削时，机械摩擦磨损是造成刀具磨损的主要原因。

(2) 黏结磨损。工件或切屑的表面与刀具表面之间的黏结点，因相对运动，刀具一方的微粒被对方带走而造成磨损。黏结磨损与切削温度有关，也与刀具材料及工件材料两者的化学成分有关。

(3) 氧化磨损。在一定的温度条件下（700℃ ~ 800℃），刀具、工件和切屑的新生成表面会与氧化合而形成一层氧化膜，若刀具上的氧化膜强度较低，会被工件或切屑擦掉而形成磨损，称为氧化磨损。

(4) 扩散磨损。扩散磨损是指刀具材料中的 Ti、W、Co 等元素，在高温（900℃ ~ 1 000℃）时会逐渐扩散到切屑或工件材料中去，工件材料中的 Fe 元素也会扩散到刀具表层里。这样，改变了硬质合金刀具的化学成分，使表层硬度变得脆弱，从而加剧了刀具的磨损。

扩散磨损的速度决定于刀具和工件材料之间是否容易发生化学反应，以及决定于接触面之间的温度。YG 类硬质合金的扩散温度为 850℃ ~ 900℃，YT 类硬质合金的扩散温度为 900℃ ~ 950℃。

用硬质合金刀具进行切削，低温时以机械磨损为主，温度升高时黏结磨损速度加快，温度升的更高时，氧化磨损与扩散磨损加剧。

(5) 相变磨损。刀具材料因切削温度升高达到相变温度时，使金相组织发生变化，刀具材料表面的马氏体组织转化为托氏体或索氏体组织，硬度降低而造成磨损，称为相变磨损。高速钢刀具在 550℃ ~ 600℃ 时发生相变。

高速钢刀具低温时以机械磨损为主，温度升高时发生黏结磨损，达到相变温度时即形成相变磨损，失去切削能力。

综合上述可知，温度越高，刀具磨损越快，所以温度是刀具磨损的主要原因。

4. 刀具耐用度

所谓刀具耐用度是指刃磨后的刀具从开始切削至达到磨钝标准时，所用的切削时间，用 *T* 表示，单位为 s（或 min）。在磨损限度确定后，刀具耐用度和磨损速度有关。磨损速度越慢，耐用度越高。在生产实际中，为更方便、快速、准确地判断刀具的磨损情况，一般是以刀具耐用度来间接地反映刀具的磨钝标准。常用刀具的耐用度如表 2-4 所示。

表 2-4 刀具耐用度 *T* 参考值 min

刀具类型	刀具耐用度 <i>T</i>	刀具类型	刀具耐用度 <i>T</i>
车、刨、镗刀	60	仿形车刀	120 ~ 180
硬质合金可转位车刀	30 ~ 45	组合钻床刀具	200 ~ 300

续表

刀具类型	刀具耐用度 T	刀具类型	刀具耐用度 T
钻头	80 ~ 120	多轴铣床刀具	400 ~ 800
硬质合金铣刀	90 ~ 180	组合机床、自动机床刀具	240 ~ 480
切齿刀具	200 ~ 300		

2.7 切削力与其影响因素

切削加工时，工件材料抵抗刀具切削所产生的阻力称为切削力。它与刀具作用在工件上的力大小相等，方向相反。

2.7.1 切削力的来源

切削时作用在刀具上的力来自两个方面，如图 2-24 所示。

- ① 克服被加工材料对前、后刀面弹性、塑性变形抗力 F_{ny} 、 $F_{n\alpha}$ 。
- ② 克服切屑、工件与前、后刀面间的摩擦力 F_{fy} 、 $F_{f\alpha}$ 。

2.7.2 作用力的分解

作用在刀具上所有的力可合成为合力 F 。为便于分析切削力的作用，测量和计算其大小，将合力 F 分解为相互垂直的 F_c 、 F_f 、 F_p 三个分力（图 2-25）。

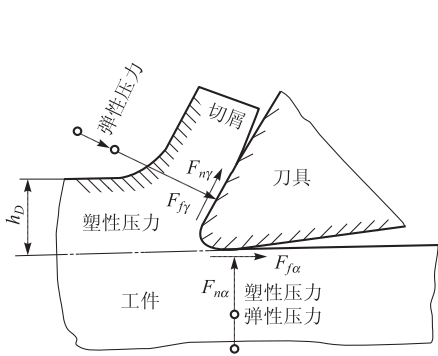


图 2-24 作用力的来源

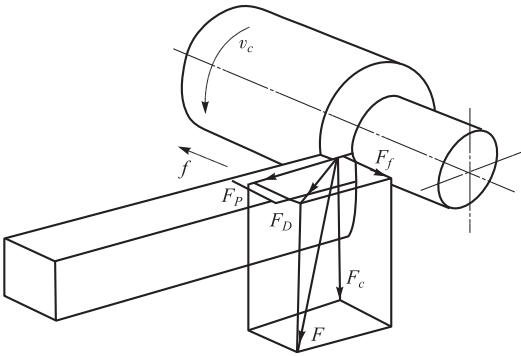


图 2-25 作用力的分解

(1) F_c 为主切削力或切向分力。它切于加工表面并垂直基面。它是计算刀具强度，设计机床零、部件和确定机床功率的依据。 F_c 是最大的分力，消耗功率也最大，占 95% 左右。

(2) F_f 为进给抗力、轴向分力。它处于基面内并平行于工件轴线与走刀方向相反。它是设计走刀机构强度、计算进给功率的依据。

(3) F_p 为切深抗力、径向分力。它处于基面内并与工件轴线垂直。当工艺系统刚性不足时，它是引起振动的主要因素。

由图 2-25 可知，总切削力 F 与三个分力之间的关系为：

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (2-15)$$

2.7.3 切削力、切削功率的计算

(1) 切削力的计算。由于切削过程十分复杂，影响因素较多，生产中常采用经验公式计算，即

$$F_c = \kappa_c A_D = \kappa_c a_p f \quad (2-16)$$

式中： F_c ——切削力 (N)；

κ_c ——切削层单位面积切削力 (N/mm^2)。

κ_c 与材料、热处理、硬度等因素有关系，其数值可查相关切削手册。

(2) 切削功率的计算。切削功率是三个切削力消耗功率的总和。以外圆车削为例。车外圆时背吃刀量方向速度为零，进给力又很小，它们消耗的功率可不计，其切削功率可按以下公式计算

$$P_m = F_c v_c \quad (2-17)$$

式中： v_c ——切削速度 (m/s)。

考虑到机床的传动效率，其机床功率 P_c 为

$$P_c \geq P_m / \eta \quad (2-18)$$

式中： η ——机床传动效率，一般取 0.75 ~ 0.85。

2.7.4 影响切削力的因素

1. 工件材料

工件材料的强度和硬度越高，则抗剪强度越高，切削力就越大。工件材料塑性和韧性越高，切屑越不易卷曲，从而使刀具、切屑接触面间摩擦增大，故切削力增大，如 1Cr18Ni9Ti 不锈钢比 45 钢切削时产生的切削力大得多。切削铸铁和其他脆性材料时，塑性变形小，刀具、切屑接触面间摩擦小，故产生的切削力比钢小。

2. 切削用量

(1) 背吃刀量。背吃刀量增大，切削层公称宽度按比例增大，从而使剪切面面积和切屑与前刀面的接触面积都按比例增大，第 I 变形区和第 II 变形区的变形都按比例增大。因而，当背吃刀量增大 1 倍，切削力也增大 1 倍。

(2) 进给量。进给量增大，切削层公称厚度按比例增大，而切削层公称宽度不变。这时，虽剪切面面积按比例增大，但切屑与前刀面的接触未按比例增大，第

Ⅱ变形区的变形未按比例增加。因而，当进给量增大1倍，切削力增加70%~80%。

(3) 切削速度。切削时，若不形成积屑瘤，当切削速度增大，则切削力减小。若形成积屑瘤，开始时，随着切削速度的增大，逐渐产生与形成积屑瘤，使实际前角逐渐增大，切削力下降。当积屑瘤高度最高时，切削力最小；随着切削速度的增加，切削温度不断升高，积屑瘤逐渐脱落，使前角减小，切削力又逐渐增加。当积屑瘤完全消失，切削力达到最大值。随后切削力又随切削速度的增大而减小。

3. 刀具几何角度

前角增大，刀具、切屑接触面间摩擦减少，切削变形小，故切削力减小。主偏角对 F_p 、 F_f 影响较大，对 F_c 影响较小。刃倾角对主切削力影响很小，但对切深抗力 F_p 和进给抗力 F_f 较大。

此外，刀具棱面、刀尖圆弧半径、刀具磨损等对切削力也有影响。

2.8 刀具合理几何参数与切削用量的选择

合理地选择刀具的几何参数与切削用量，对保证质量、提高生产率、降低加工成本有着非常重要的影响。

2.8.1 刀具几何参数的选择

所谓刀具合理几何参数，是指在保证加工质量的前提下，能够满足较高生产率、较低加工成本的刀具几何参数。

1. 前角的选择

增大前角，可减小切削变形，从而减小切削力、切削热，降低切削功率的消耗，还可以抑制积屑瘤和鳞刺的产生，提高加工质量。但增大前角，会使楔角减小、切削刃与刀头强度降低，容易造成崩刃，还会使刀头的散热面积和容热体积减小，使切削区局部温度上升，易造成刀具的磨损，刀具耐用度下降。

选择合理的前角时，在刀具强度允许的情况下，应尽可能取较大的值，具体选择原则如下：① 加工塑性材料时，为减小切削变形，降低切削力和切削温度，应选较大的前角，加工脆性材料时，为增加刃口强度，应取较小的前角。工件的强度低，硬度低，应选较大的前角，反之，应取较小的前角。用硬质合金刀具切削特硬材料或高强度钢时，应取负前角。② 刀具材料的抗弯强度和冲击韧性较高时，应取较大的前角。如高速钢刀具的前角比硬质合金刀具的前角要大；陶瓷刀具的韧性差，其前角应更小。③ 粗加工、断续切削时，为提高切削刃的强度，应选用较小的前角。精加工时，为使刀具锋利，提高表面加工质量，应选用较大的前角。当机床的功率不足或工艺系统的刚度较低时，应取较大的前角。对于成形刀具和在数控机床、自动线上不宜频繁更换的刀具，为了保证工作的稳定性和刀具耐用度，应

选较小的前角或零度前角。

表 2-5 硬质合金车刀合理前角、后角的参考值

工件材料种类	合理前角参考值 / (°)		合理后角参考值 / (°)	
	粗车	精车	粗车	精车
低碳钢	20 ~ 25	25 ~ 30	8 ~ 10	10 ~ 12
中碳钢	10 ~ 15	15 ~ 20	5 ~ 7	6 ~ 8
合金钢	10 ~ 15	15 ~ 20	5 ~ 7	6 ~ 8
淬火钢	- 15 ~ - 5		8 ~ 10	
不锈钢（奥氏体）	15 ~ 20	20 ~ 25	6 ~ 8	8 ~ 10
灰铸铁	10 ~ 15	5 ~ 10	4 ~ 6	6 ~ 8
铜及铜合金（脆）	10 ~ 15	5 ~ 10	6 ~ 8	6 ~ 8
铝及铝合金	30 ~ 35	35 ~ 40	8 ~ 10	10 ~ 12
钛合金（ $\sigma_b \leq 0.177 \text{ GPa}$ ）	5 ~ 10		10 ~ 15	
注：粗加工用的硬质合金车刀，通常都有负倒棱及负刃倾角。				

2. 后角的选择

增大后角，可减小刀具后刀面与已加工表面间的摩擦，减小磨损，还可使切削刃钝圆半径减小，提高刃口锋利程度，改善表面加工质量。但后角过大，将削弱切削刃的强度，减小散热体积使散热条件恶化，降低刀具耐用度。实验证明，合理的后角主要取决于切削厚度。其选择原则如下：

（1）工件的强度、硬度较高时，为增加切削刃的强度，应选较小后角。工件材料的塑性、韧性较大时，为减小刀具后刀面的摩擦，可取较大的后角。加工脆性材料时，切削力集中在刃口附近，应取较小的后角。

（2）粗加工或断续切削时，为了强化切削刃，应选较小的后角。精加工或连续切削时，刀具的磨损主要发生在刀具后刀面，应选用较大的后角。

（3）当工艺系统刚性较差，容易出现振动时，应适当减小后角。在一般条件下，为了提高刀具耐用度，可增大后角，但为了降低重磨费用，对重磨刀具可适当减小后角。

为了使制造、刃磨方便，一般副后角等于主后角。

表 2-5 为硬质合金车刀合理前角、后角的参考值，高速钢车刀的前角一般比表中的值大 5° ~ 10°。

3. 主偏角与副偏角的选择

1) 主偏角与副偏角的作用

(1) 减小主偏角和副偏角, 可降低残留面积的高度, 减小已加工表面的粗糙度值。

(2) 减小主偏角和副偏角, 可使刀尖强度提高, 散热条件改善, 提高刀具耐用度。

(3) 减小主偏角和副偏角, 均使径向力增大, 容易引起工艺系统的振动, 加大工件的加工误差和表面粗糙度值。

2) 主偏角的选择原则与参考值

工艺系统的刚度较好时, 主偏角可取小值, 如 $\kappa_r = 30^\circ \sim 45^\circ$ 在加工高强度、高硬度的工件时, 可取 $\kappa_r = 10^\circ \sim 30^\circ$, 以增加刀头的强度。当工艺系统的刚度较差或强力切削时, 一般取 $\kappa_r = 60^\circ \sim 75^\circ$ 。车削细长轴时, 为减小径向力, 取 $\kappa_r = 90^\circ \sim 93^\circ$ 。在选择主偏角时, 还要视工件形状及加工条件而定, 如车削阶梯轴时, 可取 $\kappa_r = 90^\circ$, 用一把车刀车削外圆、端面和倒角时, 可取 $\kappa_r = 45^\circ \sim 60^\circ$ 。

3) 副偏角的选择原则与参考值

主要根据工件已加工表面的粗糙度要求和刀具强度来选择, 在不引起振动的情况下, 尽量取小值。精加工时, 取 $\kappa'_r = 5^\circ \sim 10^\circ$; 粗加工时, 取 $\kappa'_r = 10^\circ \sim 15^\circ$ 。当工艺系统刚度较差或从工件中间切入时, 可取 $\kappa'_r = 30^\circ \sim 45^\circ$ 。在精车时, 可在副切削刃上磨出一段 $\kappa'_r = 0^\circ$ 、长度为 $(1.2 \sim 1.5)f$ (进给量) 的修光刃, 以减小已加工表面的粗糙度值。

总之, 对于主、副偏角在一般情况下, 只要工艺系统刚度允许, 应尽量选取较小的值。

4. 刃倾角的选择

1) 刃倾角的作用

(1) 影响切屑的流出方向 (图 2-26)。当 $\lambda_s = 0$ 时, 切屑沿主切削刃垂直方向流出; 当 $\lambda_s > 0$ 时, 切屑流向待加工表面; 当 $\lambda_s < 0$ 时, 切屑流向已加工表面。

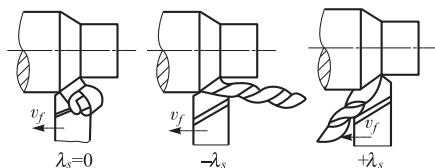


图 2-26 刃倾角对切削流出方向的影响

(2) 影响刀尖强度和散热条件 (如图 2-27 所示)。当 $\lambda_s < 0$ 时, 切削过程中远离刀尖的切削刃处先接触工件, 刀尖可免受冲击, 同时, 切削层公称横截面积在切入时由小到大, 切出时由大到小逐渐变化,

因而切削过程比较平稳, 大大减小了刀具受到的冲击和崩刃的现象。

(3) 影响切削刃的锋利程度。当刃倾角的绝对值增大时, 可使刀具的实际前角增大, 刀口实际钝圆半径减小, 增大切削刃的锋利性。

2) 刃倾角的选择原则与参考值

加工钢件或铸铁件时, 粗车取 $\lambda_s = -5^\circ \sim 0^\circ$, 精车取 $\lambda_s = 0^\circ \sim 5^\circ$; 有冲击负

荷或断续切削取 $\lambda_s = -15^\circ \sim -5^\circ$ 。加工高强度钢、淬硬钢或强力切削时，为提高刀头强度取 $\lambda_s = -30^\circ \sim -10^\circ$ 。微量切削时，为增加切削刃的锋利程度和切薄能力，可取 $\lambda_s = 45^\circ \sim 75^\circ$ 。当工艺系统刚度较差时，一般不宜采用负刃倾角，以避免径向力的增加。

5. 其他几何参数的选择

1) 切削刃区的剖面形式

通常使用的刀具切削刃的刃区形式有锋刃、倒棱、刃带、消振棱和倒圆刃等，如图 2-27 所示。

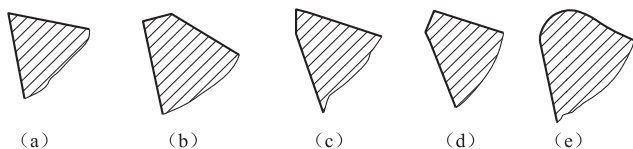


图 2-27 切削刃区的剖面形式

(a) 锋刃；(b) 负倒棱；(c) 刃带；(d) 消振棱；(e) 倒圆刃

刃磨刀具时由前刀面和后刀面直接形成的切削刃，称为锋刃。其特点是刃磨简便、切入阻力小，广泛应用于各种精加工刀具和复杂刀具，但其刃口强度较差。沿切削刃磨出负前角（或零度前角、小的正前角）的窄棱面，称为倒棱。倒棱的作用可增强切削刃，提高刀具耐用度。沿切削刃磨出后角为零度的窄棱面，称为刃带。刃带有支承、导向、稳定和消振作用。对于铰刀、拉刀和铣刀等定尺寸刀具，刃带可使制造、测量方便。沿切削刃磨出负后角的窄棱面，称为消振棱。消振棱可消除切削加工中的低频振动，强化切削刃，提高刀具耐用度。研磨切削刃，使它获得比锋刃的钝圆半径大一些的切削刃钝圆半径，这种刃区形式称为倒圆刃。倒圆刃可提高刀具耐用度，增强切削刃，广泛用于硬质合金可转位刀片。

2) 刀面形式和过渡刃

① 前刀面的形式。常见的刀具前刀面形式有平前刀面、带倒棱的前刀面和带断屑槽的前刀面，如图 2-28 所示。平前刀面的特点是形状简单、制造、刃磨方

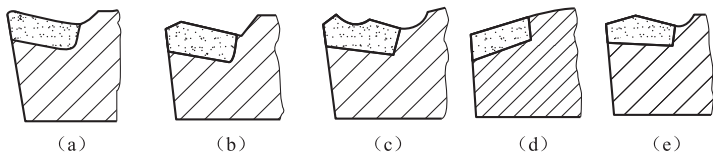


图 2-28 前刀面的形式

(a) 平面形；(b) 带倒棱形；(c) 带断屑槽形；(d) 负前角平面形；(e) 双平面形

便,但不能强制卷屑,多用于成形、复杂和多刃刀具以及精车、加工脆性材料用刀具。由于倒棱可增加刀刃强度,提高刀具耐用度,粗加工刀具常用带倒棱的前刀面。带断屑槽的前刀面是在前刀面上磨有直线或弧形的断屑槽,切屑从前刀面流出时受断屑槽的强制附加变形,能使切屑按要求卷曲折断。前刀面主要用于塑性材料的粗加工及半精加工刀具。

② 后刀面形式。几种常见的后刀面形式如图 2-29 所示。后刀面有平后刀面、带消振棱或刃带的后刀面、双重或三重后刀面。平后刀面形状简单,制造刃磨方便,应用广泛。带消振棱的后刀面用于减小振动;带刃带的后刀面用于定尺寸刀具。双重或三重后刀面主要能增强刀刃强度,减少后刀面的摩擦。刃磨时一般只磨第一后刀面。

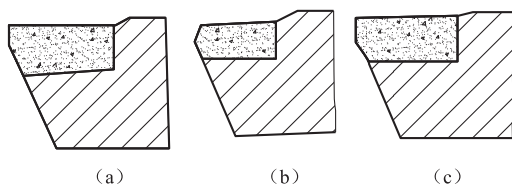


图 2-29 后刀面的形式

(a) 带刃带的后刀面; (b) 带消振棱的后刀面; (c) 双重后刀面

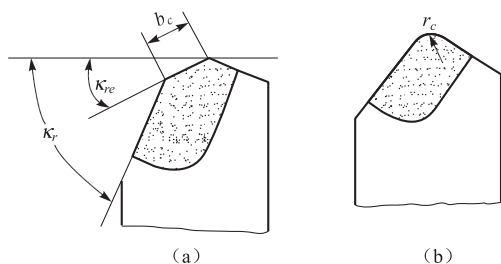


图 2-30 过渡刃

(a) 直线形过渡刃; (b) 圆弧形过渡刃

③ 过渡刃。为增强刀尖强度和散热能力,通常在刀尖处磨出过渡刃。过渡刃的形式主要有两种(图 2-30):直线形过渡刃和圆弧形过渡刃。直线形过渡刃能提高刀尖的强度,改善刀具散热条件,主要用在粗加工刀具上。圆弧形过渡刃不仅可提高刀具耐用度,还能大大减小已加工表面粗糙度,因而常用在精加工刀具。

2.8.2 切削用量的选择

选择合理的切削用量,要综合考虑生产率、加工质量和加工成本。一般地,粗加工时,由于要尽量保证较高的金属切除率和必要的刀具耐用度,应优先选择大的背吃刀量,其次选择较大的进给量。最后根据刀具耐用度,确定合适的切削速度。精加工时,由于要保证工件的加工质量,应选用较小的进给量和背吃刀量,并尽可

能选用较高的切削速度。

1. 背吃刀量的选择

粗加工的背吃刀量应根据工件的加工余量确定，在保留半精加工余量的前提下，应尽量用一次走刀就切除全部粗加工余量；当加工余量过大或工艺系统刚性过差时，可分二次走刀。第一次走刀的背吃刀量，一般为总加工余量的 2/3 ~ 3/4。在加工铸、锻件时，应尽量使背吃刀量大于硬皮层的厚度，以保护刀尖。半精、精加工的切削余量较小，其背吃刀量通常都是一次走刀切除全部余量。

2. 进给量的选择

粗加工时，进给量的选择主要受切削力的限制。在工艺系统刚度和强度良好的情况下，可选用较大的进给量值。表 2-6 为粗车时进给量的参考值。由于进给量对工件的已加工表面粗糙度值影响很大，一般在半精加工和精加工时，进给量取的都较小。通常按照工件加工表面粗糙度值的要求，根据工件材料、刀尖圆弧半径、切削速度等条件来选择合理的进给量。当切削速度提高，刀尖圆弧半径增大，或刀具磨有修光刃时，可以选择较大的进给量，以提高生产率。

表 2-6 硬质合金及高速钢车刀粗车外圆和端面时的进给量

工件材料	车刀刀杆 尺寸 $B \times H$ /mm	工件 直径 /mm	背吃刀量 /mm				
			≤3	>3 ~ 5	>5 ~ 8	>8 ~ 12	>12
			进给量 / ($m \cdot r^{-1}$)				
碳素结构 钢、合金 结构钢	16 × 25	20	0.3 ~ 0.4				
		40	0.4 ~ 0.5	0.3 ~ 0.4			
		60	0.5 ~ 0.7	0.4 ~ 0.6	0.3 ~ 0.5		
		100	0.6 ~ 0.9	0.5 ~ 0.7	0.5 ~ 0.6	0.4 ~ 0.5	
		400	0.8 ~ 1.2	0.7 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.5 ~ 0.6	
	20 × 30	20	0.3 ~ 0.4				
		40	0.4 ~ 0.5	0.3 ~ 0.4			
	25 × 25	60	0.6 ~ 0.7	0.5 ~ 0.7	0.4 ~ 0.6		
		100	0.8 ~ 1.0	0.7 ~ 0.9	0.5 ~ 0.7	0.4 ~ 0.7	
		600	1.2 ~ 1.4	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.9	0.4 ~ 0.6
	25 × 40	60	0.6 ~ 0.9	0.5 ~ 0.8	0.4 ~ 0.7		
		100	0.8 ~ 1.2	0.7 ~ 1.1	0.6 ~ 0.9	0.5 ~ 0.8	
		1 000	1.2 ~ 1.5	1.1 ~ 1.5	0.9 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0	0.7 ~ 0.8

续表

工件材料	车刀刀杆 尺寸 $B \times H$ /mm	工件 直径 /mm	背吃刀量 /mm				
			≤ 3	$> 3 \sim 5$	$> 5 \sim 8$	$> 8 \sim 12$	> 12
			进给量 / ($\text{m} \cdot \text{r}^{-1}$)				
铸铁及 铜合金	16×25	40	0.4 ~ 0.5				
		60	0.6 ~ 0.8	0.5 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6		
		100	0.8 ~ 1.2	0.7 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.5 ~ 0.7	
		400	1.0 ~ 1.4	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	
	25×30	40	0.4 ~ 0.5				
		60	0.6 ~ 0.9	0.5 ~ 0.8	0.4 ~ 0.7		
	25×25	100	0.9 ~ 1.3	0.8 ~ 1.2	0.7 ~ 1.0	0.5 ~ 0.8	
		600	1.2 ~ 1.8	1.2 ~ 1.6	1.0 ~ 1.3	0.9 ~ 1.1	0.7 ~ 0.9
注：1. 加工断续表面及有冲击的加工时，表内的进给量应乘系数 $K = 0.75 \sim 0.85$。 2. 加工耐热钢及其合金时，不采用大于 1.0 mm/r 的进给量。 3. 加工淬硬钢时，表内进给量应乘系数 $K = 0.8$（当材料硬度为 $44 \sim 56 \text{ HRC}$）或 $K = 0.5$（当硬度为 $57 \sim 62 \text{ HRC}$ 时）。							

3. 切削速度的选择

在背吃刀量和进给量选定以后，可在保证刀具合理耐用度的条件下，确定合适的切削速度。粗加工时，背吃刀量和进给量都较大，切削速度受刀具耐用度和机床功率的限制，一般较低。精加工时，背吃刀量和进给量都取得较小，切削速度主要受加工质量和刀具耐用度的限制，一般较高。选择切削速度时，还应考虑工件材料的强度和硬度以及切削加工性等因素。表 2-7 为车削外圆时切削速度的参考值。

表 2-7 硬质合金外圆车刀切削速度参考值

工件材料	热处理状态	$a_p = 0.3 \sim 2 \text{ mm}$	$a_p = 2 \sim 6 \text{ mm}$	$a_p = 6 \sim 10 \text{ mm}$
		$f = 0.08 \sim 0.3 \text{ mm/r}$	$f = 0.3 \sim 0.6 \text{ mm/r}$	$f = 0.6 \sim 1 \text{ mm/r}$
		$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		
低碳钢	热轧	2.33 ~ 3.0	1.67 ~ 2.0	1.17 ~ 1.5
易切削钢				
中碳钢	热轧	2.17 ~ 2.67	1.5 ~ 1.83	1.0 ~ 1.33
	调质	1.67 ~ 2.171	1.17 ~ 1.5	0.83 ~ 1.17

续表

工件材料	热处理状态	$a_p=0.3\sim2\text{ mm}$	$a_p=2\sim6\text{ mm}$	$a_p=6\sim10\text{ mm}$
		$f=0.08\sim0.3\text{ mm/r}$	$f=0.3\sim0.6\text{ mm/r}$	$f=0.6\sim1\text{ mm/r}$
		$v/\text{ (m}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$		
合金结构钢	热轧	1.67~2.17	1.17~1.5	0.83~1.17
	调质	1.33~1.83	0.83~1.17	0.67~1.0
工具钢	退火	1.5~2.0	1.0~1.33	0.83~1.17
不锈钢	1.17~1.33	1.0~1.17	0.83~1.0	
灰铸铁	<190 HBS	1.5~2.0	1.0~1.33	0.83~1.17
	190~225 HBS	1.33~1.85	0.83~1.17	0.67~1.0
高锰钢			0.17~0.33	
铜及铜合金		3.33~4.17	2.0~0.30	1.5~2.0
铝及铝合金		5.1~10.0	3.33~6.67	2.5~5.0
铸铝合金		1.67~3.0	1.33~2.5	1.0~1.67
注：切削钢及灰铸铁时刀具耐用度为 60~90 min。				

2.9 切 削 液

2.9.1 切削液作用

- (1) 冷却作用。切削液能从切削区域带走大量切削热，使切削温度降低。其冷却性能取决于它的热导率、比热容、汽化热、汽化速度、流量和流速等。
- (2) 润滑作用。切削液能渗入到刀具与切屑、加工表面之间形成润滑膜或化学吸附膜，减小摩擦。润滑性能取决于切削液的渗透能力、形成润滑膜的能力和强度。
- (3) 清洗作用。切削液可以冲走切削区域和机床上的细碎切屑和脱落的磨粒，防止划伤已加工表面和导轨。清洗性能取决于切削液的流动性和使用压力。
- (4) 防锈作用。在切削液中加入防锈剂，可在金属表面形成一层保护膜，起到防锈作用。防锈作用的强弱取决于切削液本身的成分和添加剂的作用。

2.9.2 切削液的添加剂

为改善切削液的性能而加入的一些化学物质，称为切削液的添加剂。常用的添加剂有以下几种。

(1) 油性添加剂。它含有极性分子，能与金属表面形成牢固的吸附膜，主要起润滑作用。常用于低速精加工。常用油性添加剂有动物油、植物油、脂肪酸、胺类、醇类和脂类等。

(2) 极压添加剂。它是含有硫、磷、氯、碘等元素的有机化合物，在高温下与金属表面起化学反应，形成耐较高温度和压力的化学吸附膜，能防止金属界面直接接触，减小摩擦。

(3) 表面活性剂（乳化剂）。它是使矿物油和水乳化而形成稳定乳化液的添加剂。表面活性剂是一种有机化合物，由可溶于水的极性基团和可溶于油的非极性基团组成，可定向地排列并吸附在油水两相界面上，极性端向水，非极性端向油，将水和油连接起来，使油以微小颗粒稳定地分散在水中，形成乳化液。表面活性剂还能吸附在金属表面上，形成润滑膜，起油性添加剂的润滑作用。常用的表面活性剂有石油磺酸钠、油酸钠皂等。

(4) 防锈添加剂。它是一种极性很强的化合物，与金属表面有很强的附着力，吸附在金属表面上形成保护膜，或与金属表面化合形成钝化膜，起到防锈作用。常用的防锈添加剂有碳酸钠、三乙醇胺、石油磺酸钡等。

2.9.3 常用切削液的种类与选用

(1) 水溶液。它的主要成分是水，其中加入防锈添加剂，主要起冷却作用。加入乳化剂和油性添加剂，有一定润滑作用，主要用于磨削。

(2) 乳化液。它是将乳化油（由矿物油和表面活性剂配成）用水稀释而成，用途广泛。低浓度的乳化液具有良好的冷却效果，主要用于普通磨削、粗加工等。高浓度的乳化液，润滑效果较好，主要用于精加工等。

(3) 切削油。它主要是矿物油（如机械油、轻柴油、煤油等），少数采用动植物油或复合油。普通车削、攻丝时，可选用机油。精加工有色金属或铸铁时，可选用煤油。加工螺纹时，可选用植物油。在矿物油中加入一定量的油性添加剂和极压添加剂，能提高高温、高压下的润滑性能，可用于精铣、铰孔、攻螺纹及齿轮加工。

常用切削液的种类和选用见表 2-8。

表 2-8 切削液的种类及选用

序号	名称	组成	主要用途
1	水溶液	以硝酸钠、碳酸钠等为主溶于水的溶液，用 100 ~ 200 倍的水稀释而成	磨削
2	乳化液	① 矿物油很少，主要为表面活性剂的乳化油，用 40 ~ 80 倍的水稀释而成，冷却和清洗性能好	车削、钻孔
		② 以矿物油为主，少量表面活性剂的乳化油，用 10 ~ 20 倍的水稀释而成，冷却和润滑性能好	车削、攻螺纹
		③ 在乳化液中加入极压添加剂	高速车削、钻孔
3	切削油	① 矿物油（ L—AN15 或 L—AN32 全损耗系统用油）单独使用	滚齿、插齿
		② 矿物油加植物油或动物油形成混合油，润滑性能好	精密螺纹车削
		③ 矿物油或混合油中加入极压添加剂形成极压油	高速滚齿、插齿、车螺纹等
4	其他	液态的二氧化碳	主要用于冷却
		二硫化钼 + 硬脂酸 + 石蜡—做成蜡笔，涂于刀具表面	攻螺纹

注：切削钢及灰铸铁时刀具耐用度为 60 ~ 90 min。

实 训

一、填空题

1. 刀具材料的种类很多，常用的刀具材料有_____、_____。
2. 刀具的几何角度中，常用的角度有_____、_____、_____、_____、_____和_____六个。
3. 切削用量要素包括_____、_____、_____三个。
4. 由于工件材料和切削条件的不同，所以切屑类型有_____、_____、_____和_____四种。
5. 刀具的磨损有正常磨损的非正常磨损两种。其中正常磨损有_____、_____。

_____和_____三种。

6. 工具钢刀具切削温度超过_____时, 金相组织发生变化, 硬度明显下降, 失去切削能力而使刀具磨损称为_____。

7. 加工脆性材料时, 刀具切削力集中在_____附近, 宜取_____和_____。

8. 刀具切削部分材料的性能, 必须具有_____, _____、_____和_____。

9. 防止积屑瘤形成, 切削速度可采用_____或_____。

二、判断题

1. 钨钴类硬质合金 (YG) 因其韧性、磨削性能和导热性好, 主要用于加工脆性材料, 有色金属及非金属。 ()

2. 刀具寿命的长短、切削效率的高低与刀具材料切削性能的优劣有关。 ()

3. 安装在刀架上的外圆车刀切削刃高于工件中心时, 使切削时的前角增大, 后角减小。 ()

4. 刀具磨钝标准 VB 表中, 高速钢刀具的 VB 值均大于硬质合金刀具的 VB 值, 所以高速钢刀具是耐磨损的。 ()

5. 刀具几何参数、刀具材料和刀具结构是研究金属切削刀具的三项基本内容。 ()

6. 由于硬质合金的抗弯强度较低, 冲击韧性差, 所取前角应小于高速钢刀具的合理前角。 ()

7. 切屑形成过程是金属切削层在刀具作用力的挤压下, 沿着与待加工面近似成 45° 夹角滑移的过程。 ()

8. 积屑瘤的产生在精加工时要设法避免, 但对粗加工有一定的好处。 ()

9. 切屑在形成过程中往往塑性和韧性提高, 脆性降低, 使断屑形成了内在的有利条件。 ()

10. 一般在切削脆性金属材料 and 切削厚度较小的塑性金属材料时, 所发生的磨损往往在刀具的主后刀面上。 ()

11. 刀具主切削刃上磨出分屑槽目的是改善切削条件, 提高刀具寿命, 可以增加切削用量, 提高生产效率。 ()

12. 进给力是纵向进给方向的力, 又称轴向力。 ()

13. 刀具的磨钝出现在切削过程中, 是刀具在高温高压下与工件及切屑产生强烈摩擦, 失去正常切削能力的现象。 ()

14. 所谓前刀面磨损就是形成月牙洼的磨损, 一般在切削速度较高, 切削厚度较大情况下, 加工塑性金属材料时引起的。 ()

15. 刀具材料的硬度越高, 强度和韧性越低。 ()
16. 粗加工磨钝标准是按正常磨损阶段终了时的磨损值来制定的。 ()
17. 切削铸铁等脆性材料时, 切削层首先产生塑性变形, 然后产生崩裂的不规则粒状切屑, 称为崩碎切屑。 ()
18. 立方氮化硼是一种超硬材料, 其硬度略低于人造金刚石, 但不能以正常的切削速度切削淬火等硬度较高的材料。 ()
19. 加工硬化能提高已加工表面的硬度, 强度和耐磨性, 在某些零件中可改善使用性能。 ()
20. 当粗加工、强力切削或承受冲击载荷时, 要使刀具寿命延长, 必须减少刀具摩擦, 所以后角应取大些。 ()

三、选择题

1. 在中等背吃刀量时, 容易形成“C”形切屑的车刀卷屑槽宜采用 ()。
- A. 外斜式 B. 平行式 C. 内斜式
2. 刀具产生积屑瘤的切削速度大致是在 () 范围内。
- A. 低速 B. 中速 C. 高速
3. 切削过程中, 车刀主偏角 κ_r 增大, 切削力 F_c ()。
- A. 增大 B. 不变 C. 减小
4. 高速钢刀具切削温度超过 () 时工具材料发生金相变化, 使刀具迅速磨损, 这种现象称为 () 磨损。
- A. 300 ~ 350 扩散 B. 550 ~ 600 相变 C. 700 ~ 800 氧化
5. 当切屑变形最大时, 切屑与刀具的摩擦也最大, 对刀具来说, 传热不容易的区域是在 (), 其切削温度也最高。
- A. 刀尖附近 B. 前刀面 C. 后刀面
6. 在切削金属材料时, 属于正常磨损中最常见的情况是 () 磨损。
- A. 前刀面 B. 后刀面 C. 前后刀面同时
7. 背吃刀量 a_p 增大一倍时, 切削力 F_c 也增大一倍; 但当进给量 f 增大一倍时, 切削力 F_c 约增大 () 倍。
- A. 0.5 B. 0.8 C. 1.0
8. 切削用量对刀具寿命的影响, 主要是通过切削温度的高低来影响的, 所以影响刀具寿命最大的是 (), 其次是 ()。
- A. 背吃刀量 B. 进给量 C. 切削速度
9. 成形车刀磨损后要刃磨 (), 铲齿铣刀磨损后要刃磨 (), 才能保持其原来要求的廓形精度。
- A. 前刀面 B. 后刀面 C. 前、后刀面
10. 一般在中、低速切削塑性金属材料时, 刀具在切屑与工件接触压力和切削

温度的作用下会发生 () 磨损。

- A. 磨粒 B. 黏结 C. 扩散

11. 车削时切削热主要是通过 () 和 () 进行传导的。

- A. 切屑 B. 工件 C. 刀具 D. 周围介质

12. 刀具磨钝标准通常都按后刀面的磨损值制定 () 值的。

- A. 月牙洼深度 KT B. 后刀面 VB C. 月牙洼深度 KB

13. 刀具磨损过程的三个阶段中, 作为切削加工应用的是 () 阶段。

- A. 初期磨损 B. 正常磨损 C. 急剧磨损

14. 车削细长轴类零件时, 为了减小径向力 F_p 的作用, 主偏角 κ_r , 采用 () 角度为宜。

- A. 小于 30° B. $30^\circ \sim 45^\circ$ C. $45 \sim 50^\circ$ D. 大于 60°

15. 切削塑性较大的金属材料时形成 () 切屑, 切削脆性材料时形成 () 切屑。

- A. 带状 B. 挤裂 C. 粒状 D. 崩碎

四、简答题

1. 简述楔角。
2. 简述刀具寿命。
3. 简述切削用量要素。
4. 简述刀尖角。
5. 后角的功用是什么? 怎样合理选择?

五、计算题

1. 已知工件材料为钢, 需要钻 $\phi 10$ mm 的孔, 选择切削速度 $v_c = 3.14$ m/min, 进给量 f 为 0.1 mm/r。试求 2 分钟后钻孔的深度为多少?

2. 已知工件材料为 HT200 (退火状态), 加工前直径为 $\phi 70$ mm, 用主偏角为 75° 的硬质合金车刀车外圆时, 工件的转速为 6 r/s, 加工后直径为 $\phi 62$ mm, 刀具每秒钟沿工件的轴向移动 2.4 mm, 单位切削力 k_c 为 $2\,000$ N/mm²。求:

- (1) 切削用量三要素;
- (2) 选择合适的刀具材料牌号;
- (3) 计算切削力和切削功率。

第 3 章

金属切削机床与加工方法

3.1 金属切削机床概述

金属切削机床是机械制造业的主要加工设备，它用切削方法将金属毛坯加工成具有一定形状、尺寸和表面质量的机械零件。由于它是制造机器的机器，所以又称为工作母机或工具机，习惯上称为机床。为了满足不同加工的需求，设计制造了许多品种和规格的机床。每种机床在结构、性能及作用方法上都具有各自的特点，但也存在着一些共同之处。

3.1.1 金属切削机床的分类

按其加工性质和所用的刀具进行分类，将机床分为 12 大类，包括车床、铣床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、刨插床、拉床、特种加工机床、锯床以及其他机床。

此外，根据机床的其他特征还可以进一步分类。

(1) 按照机床工艺范围的宽窄（通用性程度）：机床可分为通用机床、专门化机床和专用机床。

通用机床是可以加工多种工件，完成多种工序的使用范围较广的机床，如卧式车床、万能升降台铣床等。通用机床由于功能较多，结构比较复杂，生产率低，因此主要适合单件、小批量生产。

专门化机床是用于加工形状相似而且尺寸不同工件的特定工序机床，如曲轴机床、凸轮机床等。

专用机床是用以加工某些工件的特定工序的机床，如机床主轴箱专用镗床等。它的生产率比较高，机床的自动化程度往往也比较高，所以专用机床通常用于成批及大量生产中。

(2) 按照机床自动化程度的不同：机床可分为手动、机动、半自动和自动机床。

(3) 按照机床重量和尺寸的不同：机床可分为仪表机床、中型机床（一般机床）、大型机床（10 t）、重型机床（大于 30 t）和超重型机床（大于 100 t）。

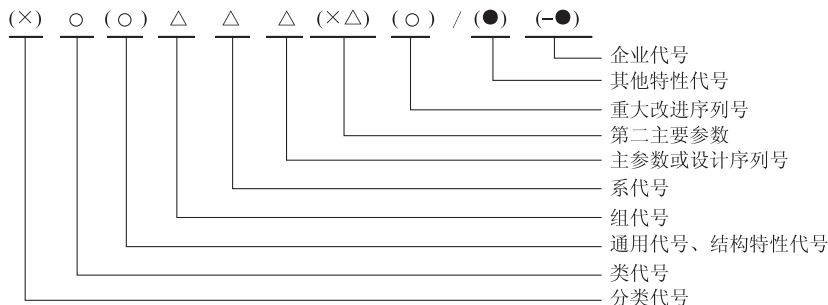
(4) 按照机床加工精度的不同：机床可分为普通精度机床、精密机床和高精度机床。

(5) 按照机床主要工作部件的多少：机床可分为单轴、多轴机床或单刀、多刀机床等。

随着机床的发展，其分类方法也将不断变化。现代机床正向数控化方向发展，数控机床的功能日趋多样化，工序更加集中。现在的数控机床已经集中了越来越多的传统机床的功能。例如，数控车床在卧式车床功能的基础上，集中了转塔车床、仿形车床、自动车床等多种车床的功能；车削中心在数控车床功能的基础上，又加入了钻、铣、镗等类机床的功能，并对主轴进行伺服控制（C 轴控制）。又如，具有自动换刀功能的镗铣加工中心机床，习惯上称为“加工中心”（Machining Center），集中了钻、镗、铣等多种类型机床的功能。有的加工中心的主轴既能立式又能卧式，即集中了立式加工中心和卧式加工中心的功能。可见，机床数控化引起了机床传统分类方法的变化。这种变化主要表现在机床品种不是越分越细，而是趋向综合。

3.1.2 机床类型的编制方法

机床的型号是赋予每种机床的一个代号，用以简明地表示机床的类型、通用特性和结构特性、主要技术参数等内容。我国现在最新的机床型号，是按 1994 年颁布的标准 GB/T 15375—1994《金属切削机床型号编制方法》编制的。该标准规定，机床型号由汉语拼音字母和阿拉伯数字按一定的规律组合而成。型号构成如下：



其中：(1) 有“（ ）”的代号或数字，当无内容时则不表示，若有内容则不带括号；

(2) 有“O”符号者，为大写的汉语拼音字母；

(3) 有“Δ”符号者，为阿拉伯数字；

(4) 有“●”符号者，为大写的汉语拼音字母，或阿拉伯数字，或两者兼有之。

在整个型号规定中，最重要的是：类代号、组代号、主参数以及通用特性代号和结构特性代号。

1. 机床的分类及类代号

机床按工作原理分为车床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、铣床、刨插床、拉床、锯床、其他机床 11 类。机床的类代号用大写的汉语拼音字母表示，见表 3-1。必要时每类可分为若干分类，分类代号在类代号之前，作为型号的首位，用阿拉伯数字表示（第一分类代号前的“1”省略），见表 3-1 中的磨床。

表 3-1 机床的类别和分类代号

类别	车床	钻床	镗床	磨床			齿轮 加工 机床	螺纹 加工 机床	铣床	刨插床	拉床	锯床	其他 机床
代号	C	Z	T	M	2M	3M	Y	S	X	B	L	G	Q
读音	车	钻	镗	磨	二磨	三磨	牙	丝	铣	刨	拉	锯	其

2. 通用特性代号和结构特性代号

这两种特性代号用大写的汉语拼音字母表示，位于类代号之后。

(1) 通用特性代号。通用特性代号有统一的固定含义，在各类机床的型号中表示的意义相同，见表 3-2。当某类机床除有普通型外还有下列某种通用特性时，在类代号之后加通用特性代号予以区分。如果某类机床仅有某种通用特性而无普通形式，通用特性不予表示。当在一个型号中须同时使用二到三个通用特性代号时，一般按重要程度排列顺序。

表 3-2 通用特性代号

通用 特性	高 精度	精密	自动	半 自动	数控	加工中心 (自动换刀)	仿形	轻型	加重 型	筒式 或经 济型	柔性	数显	高速
代号	G	M	Z	B	K	H	F	Q	Z	J	R	X	S
读音	高	密	自	半	控	换	仿	轻	重	筒	柔	显	速

(2) 结构特性代号。对主参数值相同而结构、性能不同的机床，在型号中加结构特性代号予以区分，它在型号中没有统一的含义，只在同类机床中起区分机床结构、性能不同的作用。当型号中已有通用特性代号时，结构特性代号应排在通用特性代号之后。

3. 机床组、系的划分原则及代号

每类机床划分为十个组，每组使用一位阿拉伯数字表示，位于类代号或通用特性代号和结构特性代号之后。每组又划分为十个系（系列），每个系列用一位阿拉伯数字表示，位于组代号之后。车机床的类、组划分见表 3-3。

表 3-3 金属切削机床类、组划分表

组别类别		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
车床 C		仪表 车床	单轴 自动 车床	多轴 自动半 自动 车床	回轮转 塔车床	曲轴及 凸轮轴 车床	立式 车床	落地及 卧式 车床	仿形及 多刀 车床	轮轴辊 锭及铲 齿车床	其他 车床
钻床 Z			坐标镗 钻床	深孔 钻床	摇臂 钻床	台式 钻床	立式 钻床	卧式 钻床	铣钻床	中心孔 钻床	其他 钻床
镗床 T				深孔 镗床		坐标 镗床	立式 镗床	卧式铣 镗床	精镗床	汽车 拖拉机 修理用 镗床	其他 镗床
磨床	M	仪表 磨床	外圆 磨床	内圆 磨床	砂轮机	坐标 磨床	导轨 磨床	刀具 刀磨床	平面及 端面 磨床	曲轴、 凸轮轴 花键轴 及轧辊 磨床	工具 磨床
	2M		超精机	内圆 珩磨机	外圆及 其他 珩磨机	抛光机	砂带抛 光及磨 削机床	刀具刀 磨及研 磨基础	可转位 刀片磨 削机床	研磨机	其他 磨床
	3M		球轴承 套圈沟 磨床	滚子轴 承套圈 滚道 磨床	轴承 套圈 超精机		叶片磨 削机床	滚子加 工机床	钢球加 工机床	气门、 活塞及 活塞环 磨削 机床	汽车 拖拉机 修磨 机床
齿轮加 工机床 Y		仪表 齿轮 加工机		锥齿 轮加 工机	滚齿轮 及 铣齿机	剃齿及 珩齿机	插齿机	花键 轴铣床	齿轮 磨齿机	其他 齿轮 加工机	齿轮 倒角 及检 查机

续表

组别类别	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
螺纹加工机床 S				套丝机	攻丝机		螺纹铣床	螺纹磨床	螺纹车床	
铣床 X	仪表铣床	悬臂及滑枕铣床	龙门铣床	平面铣床	仿形铣床	立式升降台铣床	卧式升降台铣床	床身铣床	工具铣床	其他铣床
刨插床 B		悬臂刨床	龙门刨床			插床	牛头刨床		边缘及磨具刨床	其他刨床
拉床 L			侧拉床	卧式外拉床	连续拉床	立式内拉床	卧式内拉床	立式外拉床	键槽、轴瓦及螺纹拉床	其他拉床
锯床 C			砂轮片锯床		卧式带锯床	立式带锯床	圆锯床	弓锯床	刨锯床	
其他机床 Q	其他仪表机床	管子加工机床	木螺钉加工机		刻线机	切断机	多功能机床			

例如：C6 落地及卧式车床

C5 立式车床

其中，C51 单柱立式车床、C52 双柱立式车床

4. 机床主参数代号

机床以什么尺寸作为主参数有统一一个规定。主参数代表机床的规格，主参数折算系数代表主参数的折算值，排在组、系代号之后。表 3-4 列出了常用机床的主参数及其折算系数。

表 3-4 机床的主要参数及其折算系数

机床名称	主参数名称	主参数折算系数
普通机床	床身上最大工件回转直径	1/10
自动机床、六角机床	最大棒料直径或最大车削直径	1/1
立式机床	最大车削直径	1/100

续表

机床名称	主参数名称	主参数折算系数
立式钻床、摇臂钻床	最大孔径直径	1/1
卧式镗床	主轴直径	1/10
牛头刨床、插床	最大刨削或插削长度	1/10
龙门刨床	工作台宽度	1/100
卧式及立式升降台铣床	工作台工作面宽度	1/10
龙门铣床	工作台工作面宽度	1/100
外圆磨床、内圆磨床	最大磨削外径或孔径	1/10
平面磨床	工作台工作面的宽度或直径	1/10
砂轮机	最大砂轮直径	1/10
齿轮加工机床	(大多数) 最大工件直径	1/10

其中，卧式镗床的主参数是主轴直径；拉床的主参数是额定拉力。

5. 机床型号举例

CA6140 C 车床（类代号）

A 结构特性代号

6 组代号（落地及卧式车床）

1 系代号（普通落地及卧式车床）

主参数（最大加工件回转直径 400 mm）

XKA5032A X 铣床（类代号）

K 数控（通用特性代号）

A（结构特性代号）

50 立式升降台铣床（组系代号）

32 工作台面宽度 320 mm（主参数）

A 第一次重大改进（重大改进序号）

MGB1432 M 磨床（类代号）

G 高精度（通用特性代号）

B 半自动（通用特性代号）

14 万能外圆磨床（组系代号）

32 最大磨削外径 320 mm（主参数）

C2150 ×6

C 车床（类代号）

21 多轴棒料自动车床（组系代号）