

金属切削的基本要素



金属切削刀具和工件按一定规律作相对运动,通过刀具上的切削刃切除工件上多余的(或预留的)金属,从而使工件的形状、尺寸精度及表面质量都合乎预定要求,这样的加工称为金属切削加工。成形运动和刀具是实现工件切削加工过程的两个基本要素。

1.1 工件表面的形成方法和成形运动

零件的形状是由各种表面组成的,表面成形原理是切削加工方法设计的基础。

1.1.1 工件的加工表面及其形成方法

1. 被加工工件的表面形状

图 1-1 是机器零件上常用的各种表面。可以看出,零件表面是由若干种基本表面组成的,如图 1-2 所示,这些基本表面是:平面、直线成形表面、圆柱面、圆锥面、球面、圆环面、螺旋面等。

2. 工件表面的形成方法

一般的基本表面都可以看作是一条母线沿着一条导线运动形成的,母线和导线统称为形成表面的发生线。

为得到平面(图 1-2(a)),可以使直线 1(母线)沿着直线 2(导线)移动。直线 1 和 2 就是形成平面的两条发生线。为得到直线成形表面(图 1-2(b)),需使直线 1(母线)沿着曲线 2(导线)移动。直线 1 和曲线 2 就是形成直线成形表面的两条发生线。同样,为形成圆柱面(图 1-2(c)),需使直线 1(母线)沿圆 2(导线)运动,直线 1 和圆 2 就是它的两条发生线,等等。

有些表面的两条发生线相同,但因母线的原始位置不同,也可形成不同的表面。如图 1-3 中,母线皆为直线 1,导线皆为圆 2,轴心线皆为 OO ,所需要的运动也相同。但由于母线相对于旋转轴线 OO 的原始位置不同,所产生的表面也就不同,如圆柱面、圆锥面或双曲面等。

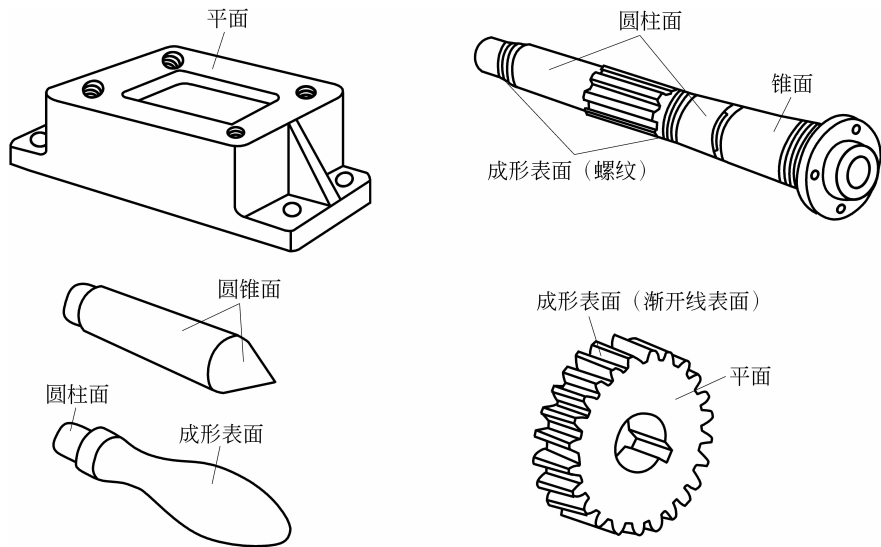


图 1-1 机器零件上常用的各种典型表面

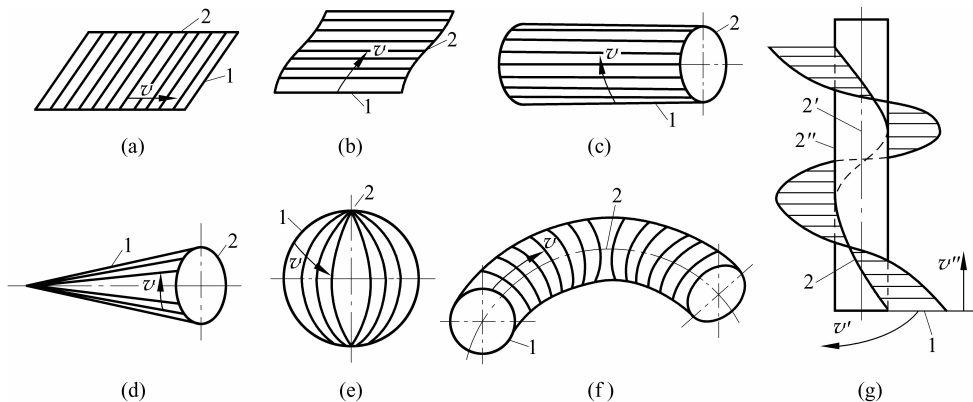


图 1-2 组成工件轮廓的几种基本表面

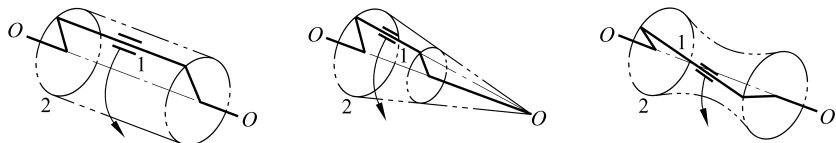


图 1-3 母线原始位置变化时形成的表面

3. 发生线的形成方法及所需的运动

发生线是由刀具的切削刃与工件间的相对运动得到的。由于使用的刀具切削刃形状和采取的加工方法不同,形成发生线的方法可归纳为以下 4 种:

(1) 轨迹法。如图 1-4(a)所示,切削刃为切削点 1,它按一定规律作轨迹运动,从而形成所需要的发生线 2。

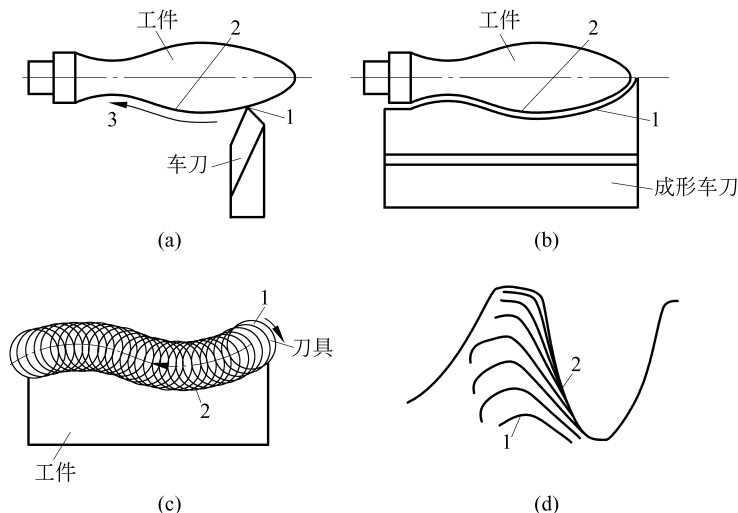


图 1-4 形成发生线的 4 种方法

(2) 成形法。如图 1-4(b)所示,它是利用成形刀具对工件进行加工的方法,切削刃为一条切削线 1,它的形状和长短与需要形成的发生线 2 完全一致。因此,用成形法来形成发生线不需要专门的成形运动。

(3) 相切法。如图 1-4(c)所示,刀具旋转,刀具的旋转中心按一定规律运动,刀具上切削刃 1 的运动轨迹与工件表面相切,从而形成了发生线 2。用相切法形成发生线需要两个成形运动,一个是刀具的旋转运动,另一个是刀具中心按一定规律的运动。

(4) 展成法。如图 1-4(d)所示,它是利用工件和刀具作展成切削运动的加工方法。刀具切削刃为切削线 1,它与需要形成的发生线 2 的形状不吻合。切削线 1 与发生线 2 彼此作无滑动的纯滚动,发生线 2 就是切削线 1 在切削过程中连续位置的包络线。

1.1.2 表面成形运动

为了获得所需的工件表面形状,必须使刀具和工件按上述 4 种方法完成一定的运动,这种运动称为表面成形运动。

1. 表面成形运动分析

表面成形运动是保证得到工件要求的表面形状的运动。例如,图 1-5 是用车刀车削外圆柱面,形成母线和导线的方法都属于轨迹法。工件的旋转运动 B_1 产生母线(圆);刀具的纵向直线运动 A_2 产生导线(直线)。运动 B_1 和 A_2 就是两个表面成形运动。又如刨削,滑枕带着刨刀(牛头刨床和插床)或工作台带着工件(龙门刨床)作往复直线走刀运动,产生母线;工作台带着工件(牛头刨床和插床)或刀架带着刀具(龙门刨

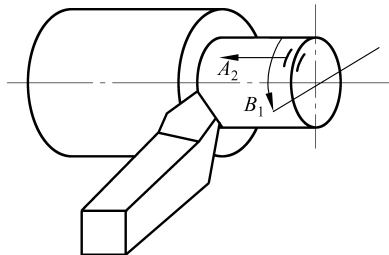


图 1-5 车削外圆柱表面时的成形运动

床)作间歇直线进给运动,产生导线。

1) 成形运动的种类

以上所说的成形运动都是旋转运动或直线运动。这两种运动最简单,也最容易得到,因而都称为简单成形运动。在机床上,它以主轴的旋转,刀架或工作台的直线运动的形式出现。一般用符号 A 表示直线运动,用符号 B 表示旋转运动。

有些成形运动是由简单运动复合形成的。图 1-6(a)所示为用螺纹车刀车削螺纹。螺纹车刀是成形刀具,其形状相当于螺纹沟槽的轴剖面形状。因此,形成螺旋面只需一个运动:车刀相对于工件做螺旋运动。在机床上,最容易得到并最容易保证精度的是旋转运动(如主轴的旋转)和直线运动(如刀架的移动)。因此,把这个螺旋运动分解成等速旋转运动和等速直线运动,在图 1-6(b)中,以 B_{11} 和 A_{12} 代表,这样的运动称为复合成形运动。为了得

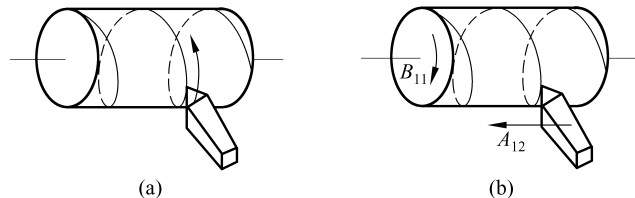


图 1-6 加工螺纹时的运动

到一定导程的螺旋线,运动的两个部分 B_{11} 和 A_{12} 必须严格保持相对关系,即工件每转 1 转,刀具的移动量应为 1 个导程。图 1-7 为用齿条刀加工齿轮,产生渐开线靠展成法,需要一个复合的展成运动。这个复合运动可分解为工件的旋转 B_{11} 和刀具的直线运动 A_{12} , B_{11} 和 A_{12} 是一个运动(展成运动)的两个部分,必须保持严格的运动关系,即工件每转过 1 个齿,齿条刀应移动 1 个周节 πm (m 为模数)。

有些零件的表面形状很复杂,例如螺旋桨的表面,为了加工它需要十分复杂的表面成形运动。这种成形运动要分解为更多个部分,这只能在多轴联动的数控机床上实现。运动的每个部分,就是数控机床上的一个坐标轴。

由复合成形运动分解成的各个部分,虽然都是直线或旋转运动,与简单运动相像,但本质是不同的。复合运动的各个部分必须保持严格的相对运动关系,是互相依存,而不是独立的。简单运动之间是互相独立的,没有严格的相对运动关系。

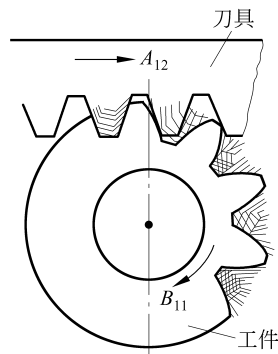


图 1-7 齿条刀加工齿轮时的运动

2) 零件表面成形所需的成形运动

母线和导线是形成零件表面的两条发生线。因此,形成表面所需要的成形运动,就是形成其母线及导线所需要的成形运动的总和。为了加工出所需的零件表面,机床就必须具备这些成形运动。

例 1-1 用普通车刀车削外圆(见图 1-5)。

母线——圆,由轨迹法形成,需要一个成形运动 B_1 。

导线——直线,由轨迹法形成,需要一个成形运动 A_2 。

表面成形运动的总数为 2 个,即 B_1 和 A_2 ,都是简单的成形运动。

例 1-2 用成形车刀车削成形回转表面(图 1-8(a))。

母线——曲线刀刃,由成形法形成,不需要成形运动。

导线——圆,由轨迹法形成,需要一个成形运动 B_1 。

表面成形运动的总数为 1 个,即 B_1 ,是简单的成形运动。

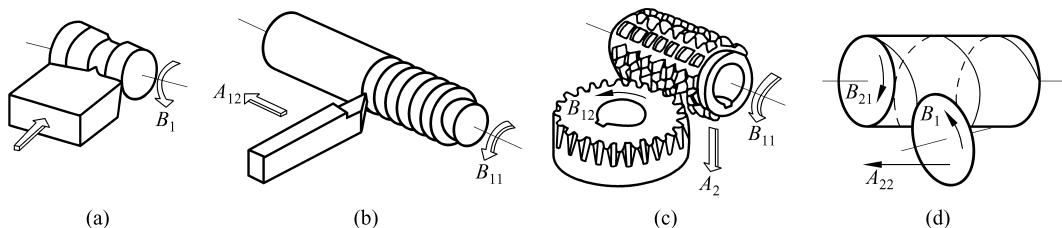


图 1-8 形成所需表面的成形运动

例 1-3 用螺纹车刀车削螺纹(图 1-8(b))。

母线——车刀的刀刃形状与螺纹轴向剖面轮廓的形状一致,故母线由成形法形成,不需要成形运动。

导线——螺旋线,由轨迹法形成,需要一个成形运动。这是一个复合运动,把它分解为工件旋转 B_{11} 和刀具直线移动 A_{12} 。 B_{11} 和 A_{12} 之间必须保持严格的相对运动关系。表面成形运动的总数为 1 个,即 $B_{11}A_{12}$,是复合的成形运动。

例 1-4 用齿轮滚刀加工直齿圆柱齿轮齿面(图 1-8(c))。

母线——渐开线,由展成法形成,需要一个成形运动,是复合运动,可分解为滚刀旋转 B_{11} 和工件旋转 B_{12} 两个部分, B_{11} 和 B_{12} 之间必须保持严格的相对运动关系。

导线——直线,由相切法形成,需要两个独立的成形运动,即滚刀的旋转运动和滚刀沿工件的轴向移动 A_2 。其中滚刀的旋转运动与复合展成运动的一部分 B_{11} 重合。因此,形成表面所需的成形运动的总数只有两个:一个是复合的成形运动 $B_{11}B_{12}$;另一个是简单的成形运动 A_2 。

例 1-5 用螺旋槽铣刀(或砂轮)铣削(或磨削)加工螺杆(图 1-8(d))。

母线——一条空间曲线,由铣刀刀齿回转面(或砂轮回转面)与螺旋槽面相切线形成,需要两个独立的成形运动,即铣刀盘(或砂轮)的旋转运动 B_1 和铣刀(或砂轮)轴线沿螺杆轴线的螺旋复合运动 $B_{21}A_{22}$ 。

导线——螺旋线,由螺旋复合运动 $B_{21}A_{22}$ 形成,与母线形成运动的一部分重合。

2. 主运动、进给运动和合成切削运动

各种切削加工中的成形运动,按照它们在切削过程中所起的作用,可以分为主运动和进给运动两种,而这两种运动的向量和称为合成切削运动。所有切削运动的速度及方向都是相对于工件定义的。

1) 主运动

主运动是刀具与工件之间的主要相对运动,它使刀具的切削部分切入工件材料,使被切金属层转变为切屑,从而形成工件新表面。

在车削时,工件的回转运动是主运动;在钻削、铣削和磨削时,刀具或砂轮的回转运动是主运动;在刨削时,刀具或工作台的往复直线运动是主运动。主运动可能是简单的成形运动,也可能是复合的成形运动。上面所述各种切削中的主运动都是简单运动。图 1-8(b)所示的车削螺纹,主运动就是复合运动 $B_{11}A_{12}$ 。

在表面成形运动中,必须有而且只能有一个主运动。一般地,主运动消耗的功率比较大,速度也比较高。

由于切削刃上各点的运动情况不一定相同,所以在研究问题时,应选取切削刃上某一个合适的点作为研究对象,该点称为切削刃上选定点。

主运动方向(图 1-9): 切削刃上选定点相对工件的瞬时主运动方向。

切削速度(图 1-9) v_c : 切削刃上选定点相对工件的主运动的瞬时速度。

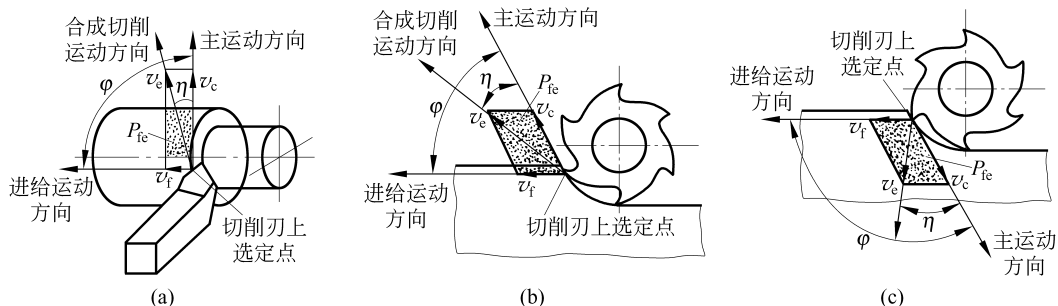


图 1-9 切削运动和切削速度

2) 进给运动

进给运动配合主运动,使切削加工持续不断地进行,形成具有所需几何形状的已加工表面。进给运动可能是连续的(例如在车床上车削圆柱表面时,刀架带车刀的连续纵向运动),也可能是间歇的(例如在牛头刨床上加工平面时,刨刀每往复一次,工作台带工件横向间歇移动一次)。进给运动可以是简单运动,也可以是复合运动。上述两个例子的进给运动都是简单运动。用成形铣刀铣削螺纹(见图 1-8(d))时,铣刀相对于工件的螺旋复合运动 $B_{21}A_{22}$ 是进给运动,这时的主运动是铣刀的旋转 B_1 ,是一个简单运动。

进给运动方向(图 1-9): 切削刃上选定点相对于工件的瞬时进给运动的方向,与主运动方向的夹角为 φ 。

进给速度 v_f (图 1-9): 切削刃上选定点相对于工件的进给运动的瞬时速度。

3) 合成切削运动

合成切削运动是由同时进行的主运动和进给运动合成的运动。

合成切削运动方向(图 1-9): 切削刃上选定点相对于工件的瞬时合成切削运动的方向。

合成切削速度 v_c (图 1-9): 切削刃上选定点相对于工件的合成切削运动的瞬时速度。

合成切削速度角 η (图 1-9): 主运动方向和合成切削运动方向之间的夹角。它在工作进给剖面 P_{fe} 内度量。

在车削中(图 1-9(a)), $\varphi=90^\circ$, $v_c=v_c/\cos \eta$ 。在大多数实际加工中 η 值很小,所以可认为 $v_c=v_c$ 。

1.2 加工表面和切削用量三要素

1.2.1 切削过程中工件上的加工表面

车削加工是一种最典型的切削加工方法。如图 1-10 所示,普通外圆车削加工在主运动和进给运动的共同作用下,工件表面的一层金属连续地被车刀切下来并转变为切屑,从而加工出所需要的工件新表面。在新表面的形成过程中,工件上有 3 个不断变化着的表面:待加工表面、过渡表面和已加工表面,它们的含义是:

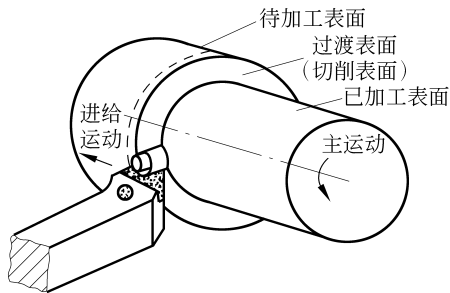


图 1-10 外圆车削运动和加工表面

(1) 待加工表面,指加工时即将被切除的表面。

(2) 已加工表面,指已被切去多余金属而形成符合要求的工件新表面。

(3) 过渡表面,指加工时主切削刃正在切削的那个表面,它是待加工表面和已加工表面之间的表面。

在切削过程中,切削刃相对于工件的运动轨迹面,就是工件上的过渡表面和已加工表面。显然,这里有两个要素:一是切削刃;二是切削运动。不同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,如图 1-11 所示。

1.2.2 切削用量三要素

切削速度 v_c 、进给量 f 和切削深度 a_p 称为切削用量三要素。

1. 切削速度 v_c

主运动为回转运动时,切削速度的计算公式如下:

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (\text{m/s 或 m/min}) \quad (1-1)$$

式中: d 为工件或刀具上某一点的回转直径,mm; n 为工件或刀具的转速,r/s 或 r/min。

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

由于切削刃上各点的回转半径不同(刀具的回转运动为主运动),或切削刃上各点对应的工件直径不同(工件的回转运动为主运动),因而切削速度也就不同。考虑到切削速度对刀具磨损和已加工表面质量有影响,在计算切削速度时,应取最大值。如外圆车削时用 d_w 代入公式计算待加工表面上的切削速度,内孔车削时用 d_m 代入公式计算已加工表面上的切削速度,钻削时计算钻头外径处的速度,其中 d_w 和 d_m 见图 1-11(a)。

2. 进给速度 v_f 、进给量 f 和每齿进给量 f_z

进给速度 v_f 是单位时间内的进给位移量,单位是 mm/s(或 mm/min);进给量是工件或

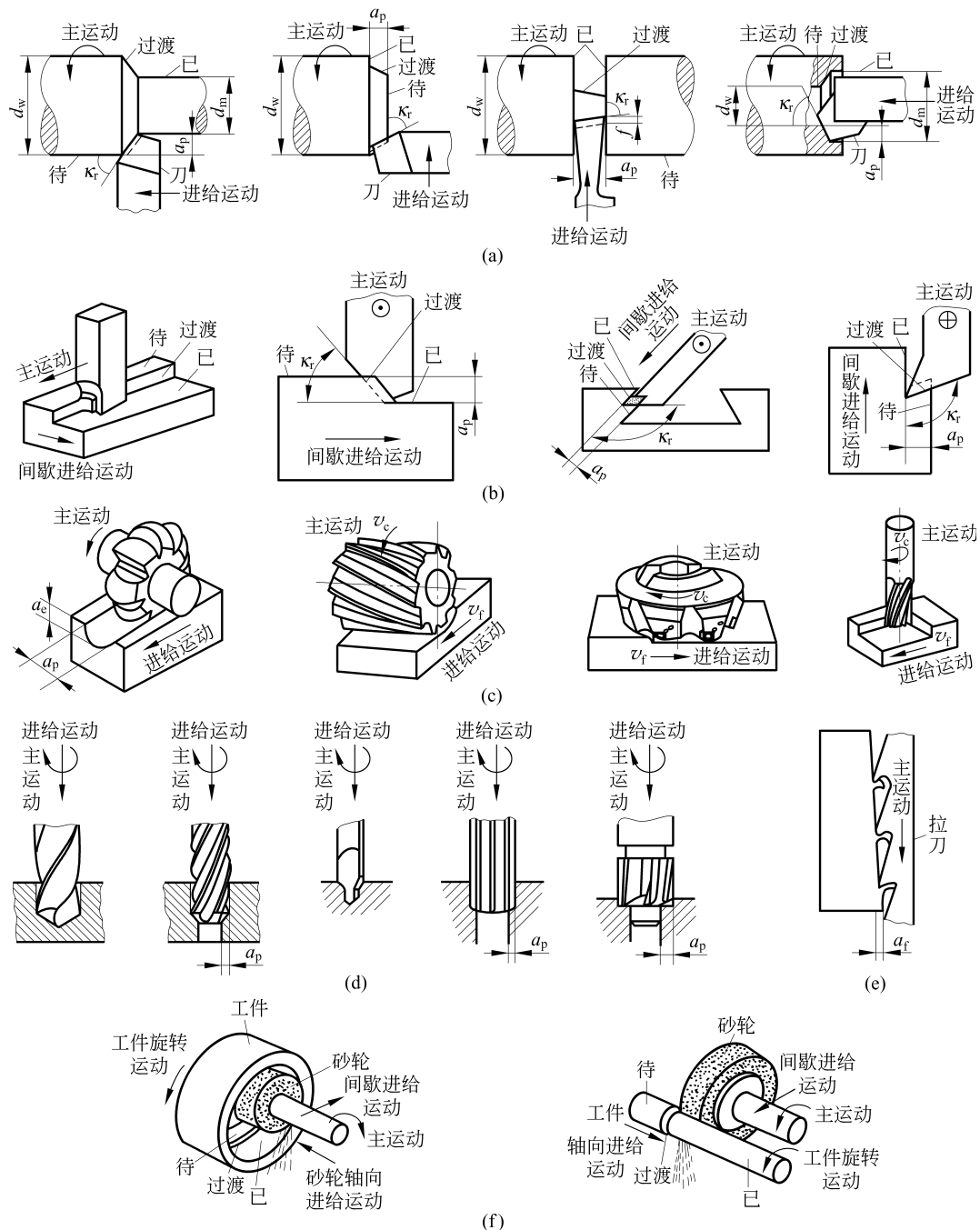


图 1-11 各种切削加工的切削运动和加工表面

“已”表示已加工表面；“过渡”表示过渡表面；“待”表示待加工表面

刀具每回转 1 周时二者沿进给方向的相对位移,单位是 mm/r 。

对于刨削、插削等主运动为往复直线运动的加工,虽然可以不规定间歇进给速度,但要规定间歇进给的进给量,单位为 mm/双行程 。对于铣刀、铰刀、拉刀、齿轮滚刀等多刃刀具

(齿数用 z 表示),还应规定每齿进给量 f_z ,单位是 mm/齿。

显然进给速度 v_f 、进给量 f 和每齿进给量 f_z 有如下关系:

$$v_f = fn = f_z zn \quad (\text{mm/s 或 mm/min}) \quad (1-2)$$

3. 切削深度(背吃刀量)* a_p

参照图 1-11 所示的车削和刨削工况,切削深度(或称背吃刀量) a_p 为工件上已加工表面和待加工表面间的垂直距离,单位为 mm。

外圆车削时切削深度可用下式计算:

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \quad (\text{mm}) \quad (1-3)$$

对于钻削,

$$a_p = \frac{d_m}{2} \quad (\text{mm}) \quad (1-4)$$

上两式中: d_m 为已加工表面直径,mm; d_w 为待加工表面直径,mm。

1.3 刀具角度

1.3.1 刀具切削部分的结构要素

尽管金属切削刀具的种类繁多,但其切削部分的几何形状与参数都有共性,即不论刀具结构如何复杂,其切削部分的形状总是近似地以外圆车刀切削部分的形状为基本形态。

因此,在确定刀具切削部分几何形状的一般术语时,常以车刀切削部分为基础。刀具切削部分的结构要素如图 1-12 所示,其定义如下:

(1) 前刀面 A_f 。前刀面 A_f 是切屑流过的表面。

(2) 后刀面 A_a 。后刀面 A_a 是与主切削刃毗邻,且与工件过渡表面相对的刀具表面。与副切削刃毗邻,且与工件上已加工表面相对的刀面称为副后刀面,用 A'_a 表示。

(3) 切削刃 S 。切削刃是前刀面上直接进行切削的边锋。有主切削刃 S 和副切削刃 S' 之分,如图 1-12 所示。

(4) 刀尖。刀尖是指主、副切削刃衔接处很短的一段切削刃,通常也称为过渡刃。常用刀尖有 3 种形式,即交点刀尖、圆弧刀尖和倒角刀尖,如图 1-13 所示。

* 国内机械工程领域早前一直沿用“切削深度”一词,美国主流机械工程教材例如 *Fundamentals of Modern Manufacturing*、*Manufacturing Engineering and Technology* 等也沿用“depth of cut”用语。随着 ISO 国际标准的推行,根据 ISO 3002(1982)等标准中“back engagement of a cutting edge”一词,1990 年制定的国家标准 GB/T 12204—1990《金属切削基本术语》确定了“背吃刀量”的术语,一经发表即引起学界争议,认为这个直译的“背”字不符合汉语语言习惯,“背吃刀量”的定义在所涉及的刀具结构和参考系上都没有能产生汉字“背”的语言意识的元素,而中国国家标准要编的是中文汉字的“基本术语”,其用语的基本出发点应当体现汉字词的语言特点,能够激发相应的语言意识和语言感受,“切削深度”这个词在我国的工厂、学校早已成为汉语系中广为使用和成熟的用语,因此建议国家标准制定仍允许使用“切削深度”一词。经过近 20 年的长期争议讨论,2010 年修订的新的国家标准 GB/T 12204—2010《金属切削基本术语》中在“背吃刀量”的定义注释中增加了“在一些场合,可使用‘切削深度’(depth of cut,符号 a_p)来表示‘背吃刀量’”的表述。

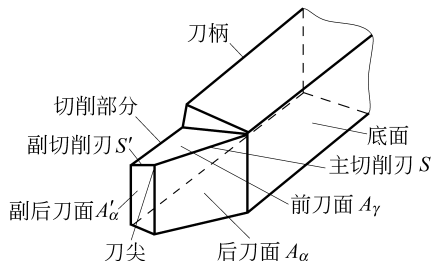


图 1-12 车刀切削部分的结构要素

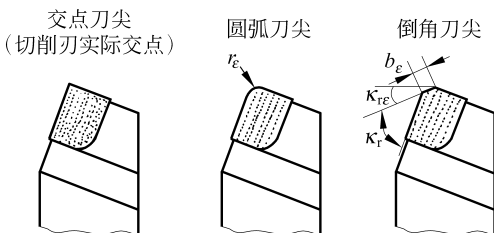


图 1-13 刀尖形状

1.3.2 刀具角度的参考系

刀具切削部分必须具有合理的几何形状,才能保证切削加工的顺利进行和获得预期的加工质量。刀具切削部分的几何形状主要由一些刀面和刀刃的方位角度来表示。为了确定刀具的这些角度,必须将刀具置于相应的参考系中。参考系可分为刀具标注角度参考系和刀具工作角度参考系,前者由主运动方向确定,后者则由合成切削运动方向确定。

1. 刀具标注角度参考系

构成刀具标注角度参考系的参考平面通常有基面、切削平面、主剖面、切削刃法剖面、进给剖面 and 切深剖面。

1) 基面 P_r

基面是通过切削刃上选定点,垂直于主运动方向的平面(图 1-14)。通常基面应平行或垂直于刀具上便于制造、刃磨和测量的某一安装定位平面或轴线。

例如,普通车刀、刨刀的基面 P_r 平行于刀具底面(图 1-14);钻头和铣刀等旋转类刀具,其切削刃上各点的主运动(即回转运动)方向都垂直于通过该点并包含刀具旋转轴线的平面,故其基面 P_r 就是刀具的轴向平面。

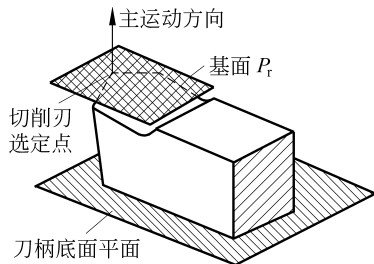


图 1-14 普通车刀的基面 P_r

2) 切削平面 P_s

切削平面是通过切削刃上选定点与切削刃 S 相切,并垂直于基面 P_r 的平面。也就是切削刃 S 与切削速度方向构成的平面(见图 1-15)。

基面和切削平面十分重要。这两个平面加上以下所述的任一剖面,便构成不同的刀具角度参考系。

3) 主剖面 P_o 和主剖面参考系

主剖面 P_o 是通过切削刃上选定点,同时垂直于基面 P_r 和切削平面 P_s 的平面。图 1-15 所示为 P_r - P_s - P_o 组成的一个正交主剖面参考系,这是目前生产中最常用的刀具标注角度参考系。

4) 切削刃法剖面 P_n 和法剖面参考系

法剖面 P_n 是通过切削刃上选定点,垂直于切削刃的平面。如图 1-15 所示, P_r - P_s - P_n 组成一个法剖面参考系。由该图可知,两个参考系的基面和切削平面相同,只是剖面不同。

5) 进给剖面 P_f 和切深剖面 P_p 及其组成的进给、切深剖面参考系

进给剖面 P_f 是通过切削刃上选定点, 平行于进给运动方向并垂直于基面 P_r 的平面。通常 P_f 也平行或垂直于刀具上制造、刃磨和测量时的某一安装定位平面或轴线。例如, 车刀和刨刀的 P_f 垂直于刀柄底面(图 1-16); 钻头、拉刀、端面车刀、切断刀等的 P_f 平行于刀具轴线; 铣刀的 P_f 则垂直于铣刀轴线。

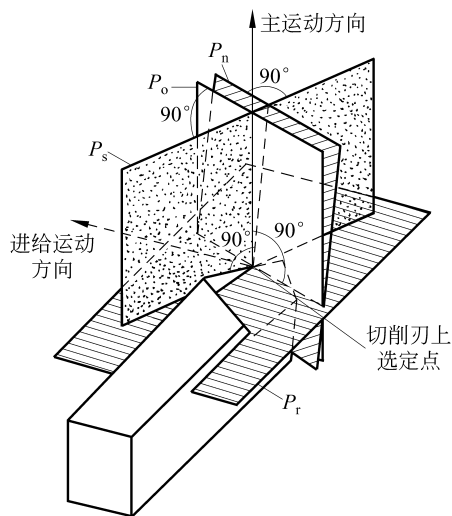


图 1-15 主剖面与法剖面参考系

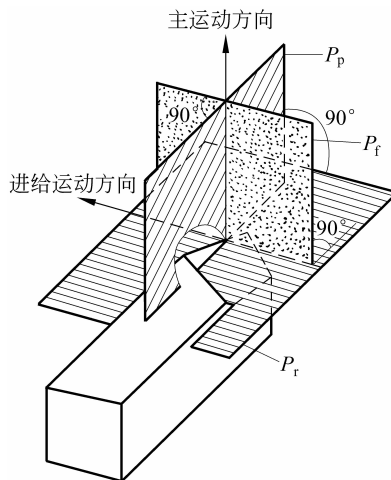


图 1-16 进给、切深剖面参考系

切深剖面 P_p 是通过切削刃上选定点, 同时垂直于 P_r 和 P_f 的平面。图 1-16 所示为由 P_r - P_f - P_p 组成的一个进给、切深剖面参考系。

2. 刀具工作角度参考系

在刀具标注角度参考系里定义基面时, 只考虑了主运动, 未考虑进给运动。但刀具在实际使用时, 这样的参考系所确定的刀具角度往往不能反映切削加工的真实情形, 只有用合成切削运动方向来确定参考系才符合实际情况。刀具工作角度参考系的定义见表 1-1。

表 1-1 刀具工作角度参考系

参 考 系	参 考 平 面	符 号	定 义 与 说 明
工作主剖面参考系	工作基面	P_{re}	垂直于合成切削运动方向的平面
	工作切削平面	P_{se}	与切削刃 S 相切并垂直于工作基面 P_{re} 的平面
	工作主剖面	P_{oe}	同时垂直于工作基面 P_{re} 和工作切削平面 P_{se} 的平面
工作法剖面参考系	工作基面	P_{re}	垂直于合成切削运动方向的平面
	工作切削平面	P_{se}	与切削刃 S 相切并垂直于工作基面 P_{re} 的平面
	切削刃法剖面	P_{ne}	工作系中的切削刃法剖面与标注系中所定义的切削刃法剖面相同, 即 $P_{ne} = P_n$
工作进给、切深剖面参考系	工作基面	P_{re}	垂直于合成切削运动方向的平面
	工作进给剖面	P_{fe}	由主运动方向和进给运动方向所组成的平面。显见, P_{fe} 包含合成切削运动方向, 因此 P_{fe} 与工作基面 P_{re} 互相垂直
	工作切深剖面	P_{pe}	同时垂直于工作基面 P_{re} 和工作进给剖面 P_{fe} 的平面

1.3.3 刀具标注角度

在刀具标注角度参考系中确定的切削刃与各刀面的方位角度,称为刀具标注角度。由于刀具角度的参考系沿切削刃各点可能是变化的,故所定义的刀具角度均应指明是切削刃选定点的角度。下面通过普通车刀给各标注角度下定义(见图 1-17),这些定义同样适用于其他类型的刀具。

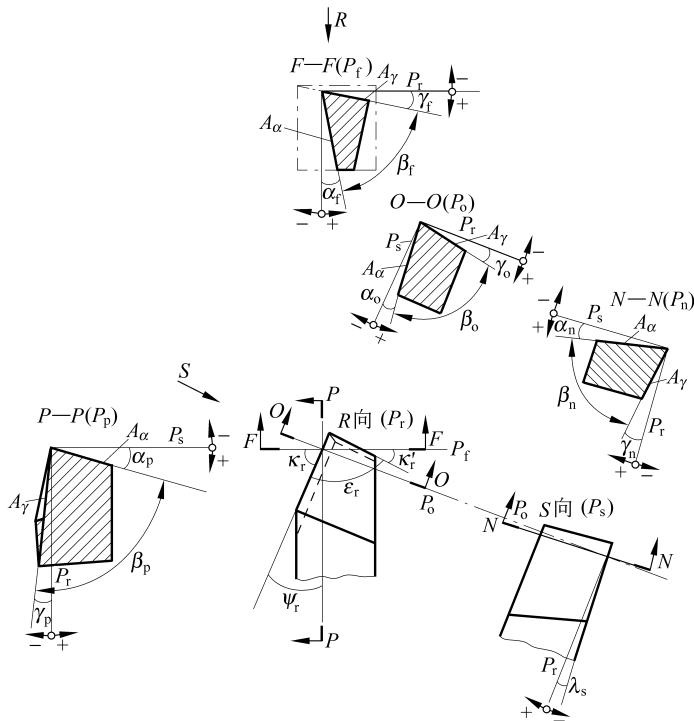


图 1-17 车刀的标注角度

1. 主剖面参考系内的标注角度

在主剖面参考系中的参考平面 P_r , P_o 和 P_s 内有如下一些标注角度。

1) 在主剖面 P_o 内的标注角度

- (1) 前角 γ_o : 在主剖面内度量的基面 P_r 与前刀面 A_γ 的夹角。
- (2) 后角 α_o : 在主剖面内度量的后刀面 A_a 与切削平面 P_s 的夹角。
- (3) 楔角 β_o : 在主剖面内度量的后刀面 A_a 与前刀面 A_γ 的夹角。

显然, γ_o , α_o 和 β_o 之间有如下关系:

$$\beta_o = 90^\circ - (\alpha_o + \gamma_o) \quad (1-5)$$

2) 在切削平面 P_s 内的标注角度

刃倾角 λ_s : 在切削平面内度量的主切削刃 S 与基面 P_r 的夹角。

3) 在基面 P_r 内的标注角度

- (1) 主偏角 κ_r : 在基面 P_r 内度量的切削平面 P_s 与进给平面 P_f 的夹角。它也是主切削

刃 S 在基面内的投影与进给运动方向之间的夹角。

(2) 刀尖角 ϵ_r : 在基面内度量的切削平面 P_s 和副切削平面 P'_s 的夹角。也可以定义为主切削刃 S 和副切削刃 S' 在基面上投影的夹角。从图 1-17 可知:

$$\epsilon_r = 180^\circ - (\kappa_r + \kappa'_r) \quad (1-6)$$

在主剖面参考系里定义了 5 个角度: $\gamma_o, \alpha_o, \lambda_s, \kappa_r$ 和 β_o , 其中, β_o 是派生角度, 只有前 4 个角度是独立的。当给定刃倾角 λ_s 和主偏角 κ_r 后, 主切削刃 S 在空间的方位就唯一被确定了。再进一步给定前角 γ_o 和后角 α_o 后, 前刀面 A_γ 和后刀面 A_α 也唯一被确定。对于单刃刀具, 若给定这 4 个独立角度, 那么它的切削部分的几何形状便被唯一确定。对于具有主切削刃 S 和副切削刃 S' 的刀具, 还必须给出与副切削刃 S' 有关的 4 个独立角度: 副偏角 κ'_r 、副刃倾角 λ'_s 、副前角 γ'_o 和副后角 α'_o , 这把刀具切削部分的几何形状才能确定。与副切削刃 S' 有关的 4 个独立角度的定义可以参照 $\gamma_o, \alpha_o, \lambda_s, \kappa_r$ 的定义。

如果主、副切削刃共在一个平面前刀面上, 则只需再给出副偏角 κ'_r 和副后角 α'_o , 副切削刃的空间位置即可确定。

前角 γ_o 、后角 α_o 和刃倾角 λ_s 的定义是有正负号的, 其正负号的判定如图 1-17 所示。

2. 法剖面参考系内的标注角度

法剖面参考系和主剖面参考系的差别仅在于剖面不同。因此, 只有法剖面内的标注角度和主剖面内的标注角度不同, 其余角度是相同的, 所以只需定义法剖面 P_n 内的标注角度即可。

(1) 法前角 γ_n : 在法剖面内度量的前刀面 A_γ 与基面 P_r 的夹角。

(2) 法后角 α_n : 在法剖面内度量的切削平面 P_s 与后刀面 A_α 的夹角。

(3) 法楔角 β_n : 在法剖面内度量的前刀面 A_γ 与后刀面 A_α 的夹角。

上述 3 个角度有如下关系:

$$\gamma_n + \alpha_n + \beta_n = 90^\circ \quad (1-7)$$

3. 进给、切深剖面参考系内的标注角度

进给、切深剖面参考系中的标注角度可以从图 1-17 所示的 R 向视图 P_r 、 $F-F(P_f)$ 和 $P-P(P_p)$ 剖面图得到。进给剖面 P_f 内的标注角度有进给前角 γ_f 、进给后角 α_f 和进给楔角 β_f ; 切深剖面 P_p 内有切深前角 γ_p 、切深后角 α_p 和切深楔角 β_p 。

1.3.4 刀具角度换算

在设计和制造刀具时, 需要对不同参考系内的刀具角度进行换算, 也就是将主剖面、法剖面、切深剖面、进给剖面之间的角度进行换算。

1. 主剖面与法剖面内的角度换算

在刀具设计、制造、刃磨和检验时, 常常需要知道法剖面内的标注角度。许多斜角切削刀具(图 1-18), 特别是大刃倾角刀具, 如大螺旋角圆柱铣刀, 必须标注法

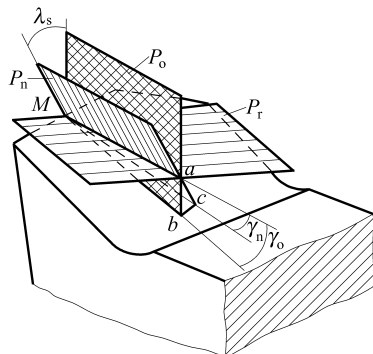


图 1-18 主剖面与法剖面的角度换算

剖面角度。法剖面内的角度可以从主剖面内的角度换算得到。换算公式如下：

$$\tan \gamma_n = \tan \gamma_o \cos \lambda_s \quad (1-8)$$

$$\cot \alpha_n = \cot \alpha_o \cos \lambda_s \quad (1-9)$$

以前角为例,推导换算公式。根据图 1-18 可得到

$$\tan \gamma_n = \frac{\overline{ac}}{\overline{Ma}}$$

$$\tan \gamma_o = \frac{\overline{ab}}{\overline{Ma}}$$

$$\frac{\tan \gamma_n}{\tan \gamma_o} = \frac{\overline{ac}}{\overline{Ma}} \cdot \frac{\overline{Ma}}{\overline{ab}} = \frac{\overline{ac}}{\overline{ab}} = \cos \lambda_s$$

$$\tan \gamma_n = \tan \gamma_o \cos \lambda_s$$

同理,可以推导出

$$\cot \alpha_n = \cot \alpha_o \cos \lambda_s$$

2. 主剖面与其他剖面内的角度换算

如图 1-19 所示, $AGBE$ 为通过主切削刃上 A 点的基面, $P_o(AEF)$ 为主剖面; P_p 和 P_f 分别为切深剖面 and 进给剖面; $P_\theta(ABC)$ 为垂直于基面的任意剖面, 它与主切削刃 AH 在基面上投影 AG 间的夹角为 θ ; $AHCF$ 在前刀面上。

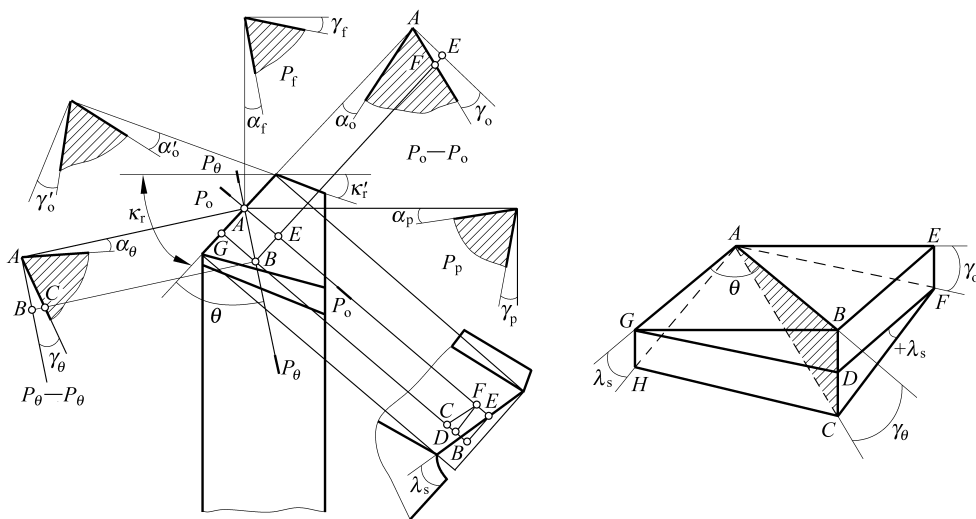


图 1-19 任意剖面内的角度变换

求解任意剖面 P_θ 内的前角 γ_θ :

$$\begin{aligned} \tan \gamma_\theta &= \frac{\overline{BC}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{BD} + \overline{DC}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{EF} + \overline{DC}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{AE} \cdot \tan \gamma_o + \overline{DF} \cdot \tan \lambda_s}{\overline{AB}} \\ &= \frac{\overline{AE}}{\overline{AB}} \cdot \tan \gamma_o + \frac{\overline{DF}}{\overline{AB}} \cdot \tan \lambda_s = \tan \gamma_o \sin \theta + \tan \lambda_s \cos \theta \end{aligned} \quad (1-10)$$

当 $\theta=0$ 时, $\tan \gamma_\theta = \tan \lambda_s$, 即 $\gamma_\theta = \lambda_s$ 。

当 $\theta=90^\circ-\kappa_r$ 时,可得切深前角 γ_p :

$$\tan \gamma_p = \tan \gamma_o \cos \kappa_r + \tan \lambda_s \sin \kappa_r \quad (1-11)$$

当 $\theta=180^\circ-\kappa_r$ 时,可得进给前角 γ_f :

$$\tan \gamma_f = \tan \gamma_o \sin \kappa_r - \tan \lambda_s \cos \kappa_r \quad (1-12)$$

变换公式形式可得 γ_o, λ_s 计算公式:

$$\tan \gamma_o = \tan \gamma_p \cos \kappa_r + \tan \gamma_f \sin \kappa_r \quad (1-13)$$

$$\tan \lambda_s = \tan \gamma_p \sin \kappa_r - \tan \gamma_f \cos \kappa_r \quad (1-14)$$

同理,可求出任意剖面内的后角 α_θ :

$$\cot \alpha_\theta = \cot \alpha_o \sin \theta + \tan \lambda_s \cos \theta \quad (1-15)$$

当 $\theta=90^\circ-\kappa_r$ 时,

$$\cot \alpha_p = \cot \alpha_o \cos \kappa_r + \tan \lambda_s \sin \kappa_r \quad (1-16)$$

当 $\theta=180^\circ-\kappa_r$ 时,

$$\cot \alpha_f = \cot \alpha_o \sin \kappa_r - \tan \lambda_s \cos \kappa_r \quad (1-17)$$

1.3.5 刀具工作角度

刀具标注角度是在假定运动条件和假定安装条件下得到的,如果考虑合成切削运动和实际安装条件,则刀具角度的参考系将发生变化,因而刀具角度也将产生变化,即刀具的实际工作角度不等于标注角度。按照切削加工的实际情况,在刀具工作角度参考系中所确定的角度称为刀具工作角度。

由于通常进给速度远小于主运动速度,所以在一般安装条件下,刀具的工作角度近似地等于标注角度,如普通车削、镗削、端铣、周铣等。只有在进给运动引起刀具角度值变化较大时(如车螺纹或丝杠、铲背和钻孔时)才计算工作角度。

1. 进给运动对刀具工作角度的影响

1) 横车

以切断刀为例(图 1-20),当不考虑进给运动时,车刀主切削刃上选定点相对于工件的运动轨迹为一圆周,切削平面 P_s 为通过切削刃上该点并切于圆周的平面,基面 P_r 为平行于刀杆底面同时垂直于 P_s 的平面,工作前角和后角就是标注前角 γ_o 和标注后角 α_o 。当考虑进给运动后,切削刃选定点相对于工件的运动轨迹为一平面阿基米德螺旋线,切削平面变为通过切削刃切于螺旋面的平面 P_{se} ,基面也相应倾斜为 P_{re} ,角度变化值为 η 。工作主剖面 P_{oe} 仍为 P_o 平面。此时在刀具工作角度参考系 $P_{re}-P_{se}-P_{oe}$ 内,刀具工作角度 γ_{oe} 和 α_{oe} 分别为

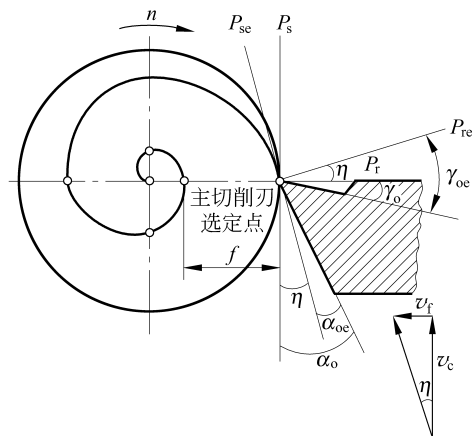


图 1-20 横向进给运动对刀具工作角度的影响

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{oe} &= \gamma_o + \eta \\ \alpha_{oe} &= \alpha_o - \eta \\ \tan \eta &= \frac{v_f}{v_c} = \frac{fn}{\pi dn} = \frac{f}{\pi d} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

从上式可知,进给量 f 越大, η 也越大,说明对于大进给量的切削,不能忽略进给运动对刀具角度的影响,如铲背加工时, η 值很大,不能忽略。另外, d 随着刀具横向进给不断减小,因此 η 值随着切削刃趋近工件中心而增大。靠近中心时, η 值急剧增大,工作后角 α_{oe} 将变为负值。

2) 纵车

同理,纵车时也是由于工作中基面 P_r 和切削平面 P_s 发生了变化,形成了一个合成切削速度角 η ,引起了工作角度的变化。如图 1-21 所示,假定车刀 $\lambda_s = 0$,在不考虑进给运动时,切削平面 P_s 垂直于刀柄底面,基面 P_r 平行于刀柄底面,刀具工作前角和后角就是标注前角 γ_o 和标注后角 α_o ;考虑进给运动后,工作切削平面 P_{se} 为切于螺旋面的平面,刀具工作角度参考系 $P_{se}-P_{re}$ 倾斜了一个 η 角,则工作进给剖面 $F-F$ 内的工作角度为

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{fe} &= \gamma_f + \eta \\ \alpha_{fe} &= \alpha_f - \eta \\ \tan \eta &= \frac{f}{\pi d_w} \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

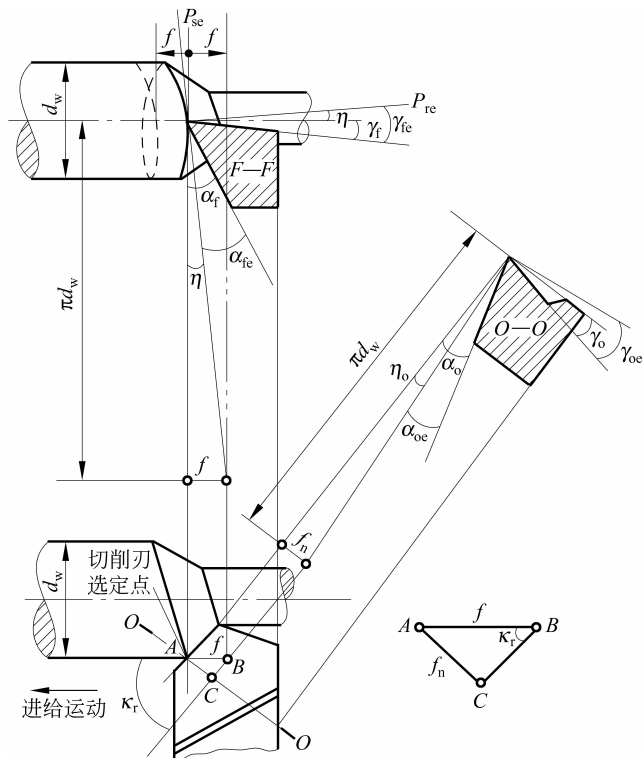


图 1-21 外圆车削纵向走刀对刀具工作角度的影响

上述角度变换可以换算到主剖面内：

$$\left. \begin{aligned} \tan \gamma_o &= \tan \gamma \sin \kappa_r \\ \gamma_{oe} &= \gamma_o + \eta_o \\ \alpha_{oe} &= \alpha_o - \eta_o \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

由上式可知, η 值与进给量 f 和工件直径 d_w 有关。一般外圆车削的 η 值不超过 $30' \sim 40'$, 因此可以忽略不计。但在车螺纹, 特别是车大螺旋升角的多头螺纹时, η 的值很大, 必须进行工作角度的计算。

2. 切削刃上选定点安装高低对刀具工作角度的影响

如图 1-22 所示, 当切削刃上选定点安装得比工件中心高时, 工作切削平面将变为 P_{se} , 工作基面变为 P_{re} , 在切深剖面 $P-P$ (仍为标注切深剖面) 内的工作前角 γ_{pe} 增大, 工作后角 α_{pe} 减小, 其角度变化值为 θ_p :

$$\tan \theta_p = \frac{h}{\sqrt{(d_K/2)^2 - h^2}} \quad (1-21)$$

式中: h 为切削刃上选定点高于工件中心线的数值, mm; d_K 为切削刃 K 点处的工件直径, mm。则刀具工作角度为

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{pe} &= \gamma_p + \theta_p \\ \alpha_{pe} &= \alpha_p - \theta_p \end{aligned} \right\} \quad (1-22)$$

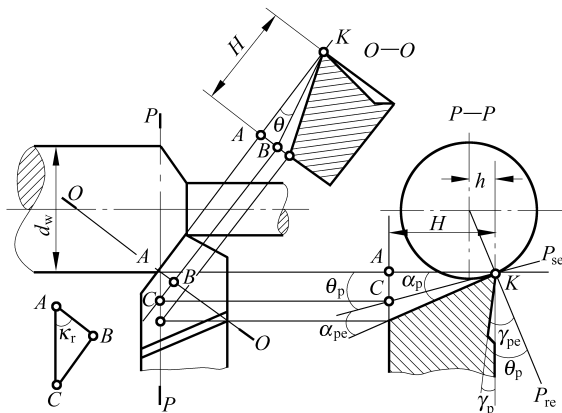


图 1-22 切削刃上选定点安装高低对工作角度的影响

当切削刃上选定点安装得低于工件中心时, 上述计算公式符号相反; 镗孔时计算公式符号与外圆车削计算公式符号相反。

图 1-23 为镗刀杆上小刀头安装位置对工作角度的影响, 其计算公式与车床上镗孔一样。

上述计算是在刀具的工作切深剖面内的角度变化, 还需换算到工作主剖面内:

$$\tan \gamma_{oe} = \frac{\tan(\gamma_o \pm \theta_o) \cos \lambda_s}{\cos(\lambda_s + \theta_s)} \quad (1-23)$$

$$\tan \alpha_{oe} = \frac{\tan(\alpha_o \mp \theta_o) \cos \lambda_s}{\cos(\lambda_s + \theta_s)} \quad (1-24)$$

上式中,

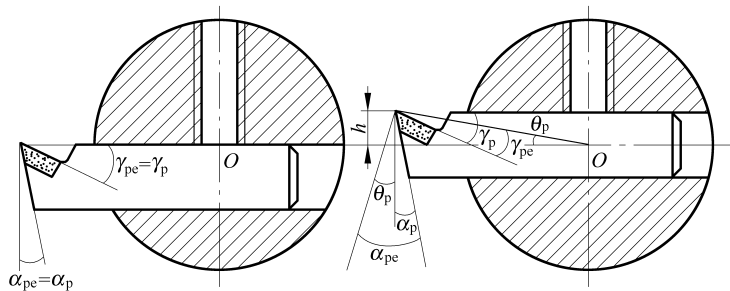


图 1-23 镗刀安装高低对工作角度的影响

$$\tan \theta_o = \tan \theta_p \cos \kappa_r \quad (1-25)$$

$$\tan \theta_s = \tan \theta_p \sin \kappa_r \quad (1-26)$$

外圆车削时,当切削刃上选定点 A 高于工件中心时,式(1-23)中 θ_o 取正号,式(1-24)中 θ_o 取负号;当 A 点低于工件中心时,式(1-23)中 θ_o 取负号,式(1-24)中 θ_o 取正号。

3. 刀柄中心线与进给方向不垂直对刀具工作角度的影响

如图 1-24 所示,当车刀刀柄与进给方向不垂直时,其工作主、副偏角将发生变化:

$$\left. \begin{aligned} \kappa_{re} &= \kappa_r \pm G \\ \kappa'_{re} &= \kappa'_r \mp G \end{aligned} \right\} \quad (1-27)$$

式中: G 为进给剖面 P_f 与工作进给剖面 P_{fe} 之间的夹角,在基面 P_r 内测量。

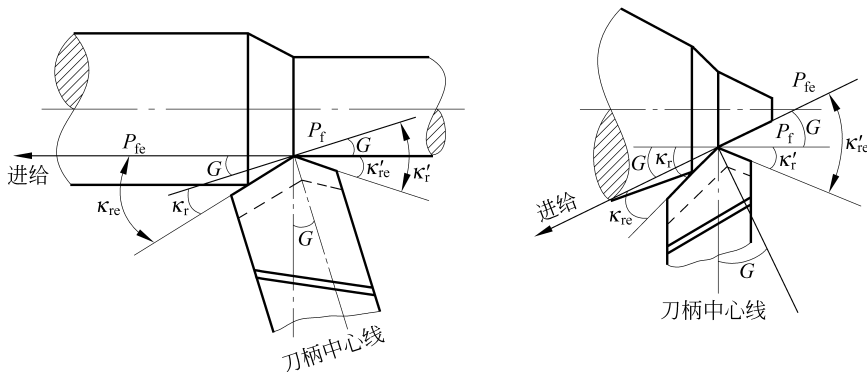


图 1-24 刀柄中心线不垂直于进给方向对工作角度的影响

1.4 切削层参数

各种切削加工的切削层参数,可用典型的外圆纵车来说明。如图 1-25 所示,车刀主切削刃上任意一点相对于工件的运动轨迹是一条空间螺旋线。当 $\lambda_s = 0$ 时,主切削刃切出的过渡表面为阿基米德螺旋面。工件每转 1 转,车刀沿轴线移动 1 个进给量 f ,这时切削刃从过渡表面 I 的位置移至过渡表面 II 的位置上,于是 I, II 之间的金属变为切屑。由车刀正在

切削着的这一层金属叫做切削层,切削层的大小和形状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。当 $\kappa'_r=0, \lambda_s=0$ 时,切削层的剖面形状为一平行四边形;当 $\kappa_r=90^\circ$ 时为矩形。但不论切削层的形状如何,其底边尺寸总是 f ,高总是 a_p ,因此,切削用量的两个要素 f 和 a_p 又称为切削层的工艺尺寸。但是,不论何种切削加工,真正能够说明切削机理的是切削层的真实厚度和宽度。切削层及其参数的定义如下。

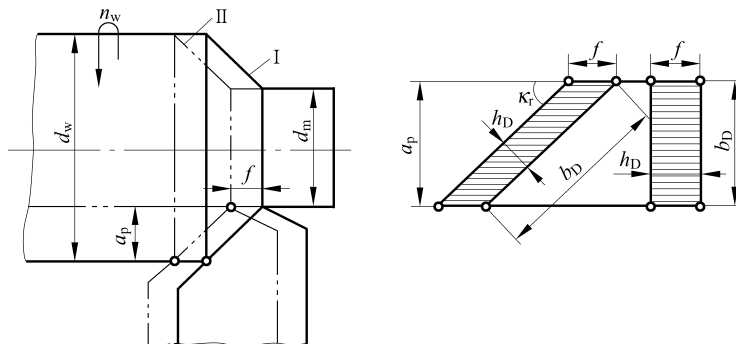


图 1-25 外圆纵车时切削层的参数

1) 切削层

在各种切削加工中,刀具相对于工件沿进给方向每移动 $f(\text{mm/r})$ 或 $f_z(\text{mm/齿})$ 之后,一个刀齿正在切削的金属层称为切削层。切削层的尺寸称为切削层参数。切削层的剖面形状和尺寸通常在基面 P_r 内观察和度量。

2) 切削厚度

垂直于过渡表面来度量的切削层尺寸(图 1-25)称为切削厚度,以 h_D 表示。在外圆纵车($\lambda_s=0$)时

$$h_D = f \sin \kappa_r \quad (1-28)$$

3) 切削宽度

沿过渡表面来度量的切削层尺寸(图 1-25)称为切削宽度,以 b_D 表示。外圆纵车($\lambda_s=0$)时

$$b_D = a_p / \sin \kappa_r \quad (1-29)$$

在 f 与 a_p 一定的条件下, κ_r 越大,切削厚度 h_D 也越大(图 1-26),但切削宽度 b_D 越小; κ_r 越小时, h_D 越小, b_D 越大;当 $\kappa_r=90^\circ$ 时, $h_D=f$ 。

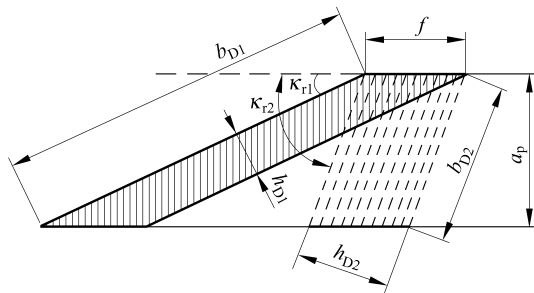


图 1-26 κ_r 不同时 h_D 和 b_D 的变化

对于曲线形主切削刃,切削层各点的切削厚度互不相等(图 1-27)。

4) 切削面积

切削层在基面 P_r 内的面积称为切削面积,以 A_D 表示。其计算公式为

$$A_D = h_D b_D \quad (\text{mm}^2) \quad (1-30)$$

对于车削来说,不论切削刃形状如何,切削面积均为

$$A_D = h_D b_D = f a_p \quad (1-31)$$

上面计算出的面积为名义切削面积(图 1-28 中的 $ACDB$)。实际切削面积 A_{DE} 等于名义切削面积 A_D 减去残留面积 ΔA_D ,即

$$A_{DE} = A_D - \Delta A_D \quad (1-32)$$

残留面积 ΔA_D 是指刀具副偏角 $\kappa'_r \neq 0$ 时,切削刃从位置 I 移至位置 II 后,残留在已加工表面上的不平部分的剖面面积(图 1-28 中的 ABE)。

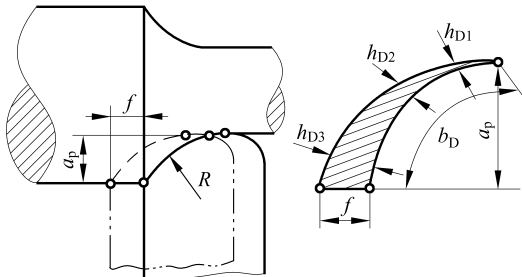


图 1-27 曲线切削刃工作时的 h_D 和 b_D

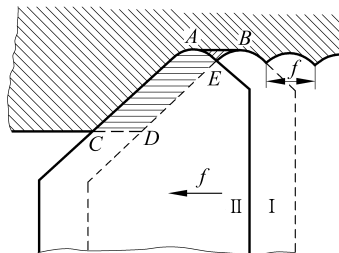


图 1-28 切削面积和残留面积

5) 金属切除率

金属切除率是指刀具在单位时间内从工件上切除的金属的体积,它是衡量金属切削加工效率的指标。金属切除率 Z_w 可由切削面积 A_D 和平均切削速度 v_{av} 求出,即 $Z_w = 1000 A_D v_{av}$ 。

对于车削, $v_{av} = \frac{\pi n (d_w + d_m)}{2000}$ (m/s 或 m/min), 所以

$$\begin{aligned} Z_w &= 1000 A_D v_{av} = 1000 a_p f v_{av} \\ &= \frac{\pi n a_p f (d_w + d_m)}{2} \\ &= \pi n a_p f (d_m \pm a_p) \end{aligned} \quad (1-33)$$

车外圆取正号,镗孔取负号。一般情况下, a_p 比 d_m 小很多,所以金属切除率可用下式近似计算:

$$Z_w \approx \pi n a_p f d_m \quad (1-34)$$

对于钻孔,

$$Z_w = \frac{\pi n f d_m^2}{4} \quad (1-35)$$

对于扩孔,

$$Z_w = \frac{\pi n f (d_m^2 - d_w^2)}{4} \quad (1-36)$$

上面各式中,各变量的单位分别为: Z_w 为 mm^3/s 或 mm^3/min ; n 为 r/s 或 r/min ; a_p 为 mm ; f 为 mm/r ; d_m 为 mm ; d_w 为 mm 。