



# 金属切削的基本要素

金属切削刀具和工件按一定规律做相对运动,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,基本表面有平面、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(见图 1-2(a)),可以使直线 1(母线)沿着直线 2(导线)移动,直线 1 和直线 2 就是形成平面的两条发生线;为得到直线成形表面(见图 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,为得到圆柱面(见图 1-2(c)),需使直线 1(母线)沿圆 2(导线)运动,直线 1 和圆 2 就是形成圆柱面的两条发生线;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。

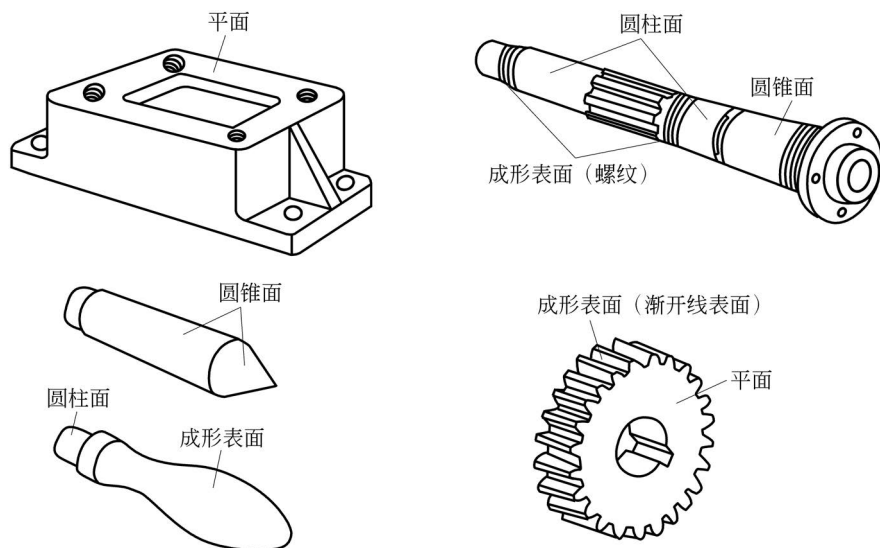


图 1-1 机器零件上常用的各种典型表面

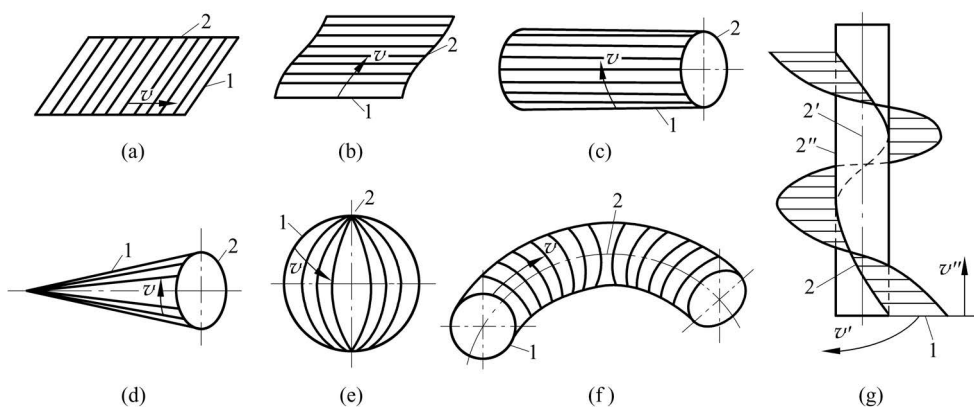


图 1-2 组成工件轮廓的几种基本表面

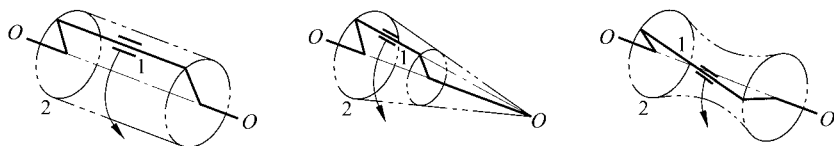


图 1-3 母线原始位置变化时形成的表面

### 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,它按一定规律做轨迹运动,从而形成所需要的发生线 2。

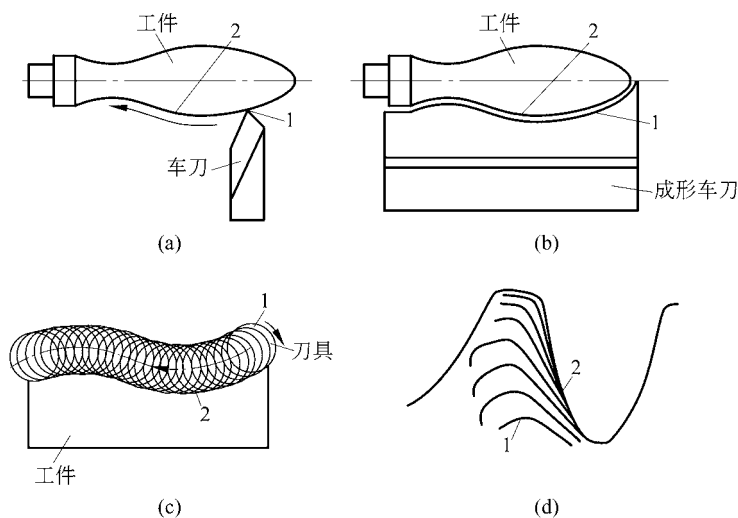


图 1-4 形成发生线的 4 种方法

(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做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 彼此做无滑动的纯滚动,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)做往复直线走刀运动,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(龙门刨床)做

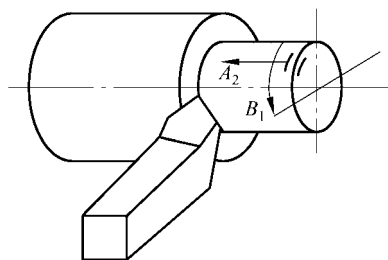


图 1-5 车削外圆柱表面时的成形运动

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成形运动复合形成的。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  $A_{12}$  表示,这样的运动称为复合成形运动,为了得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,这个复合成形运动可分解为工件的旋转运动  $B_{11}$  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  $\pi m$  ( $m$  为模数)。

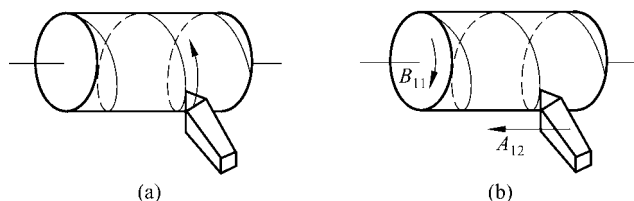


图 1-6 加工螺纹时的运动

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,虽然都是直线运动或旋转运动,与简单成形运动相像,但本质是不同的。复合成形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;简单成形运动之间是互相独立的,没有严格的相对运动关系。

### 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  $A_2$ 。

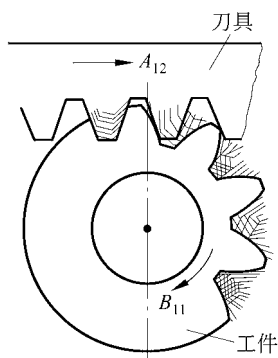


图 1-7 齿条刀加工齿轮时的运动

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

**例 1-2** 用成形车刀车削成形回转表面(见图 1-8(a))。

母线——曲线刀刃轮廓,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。

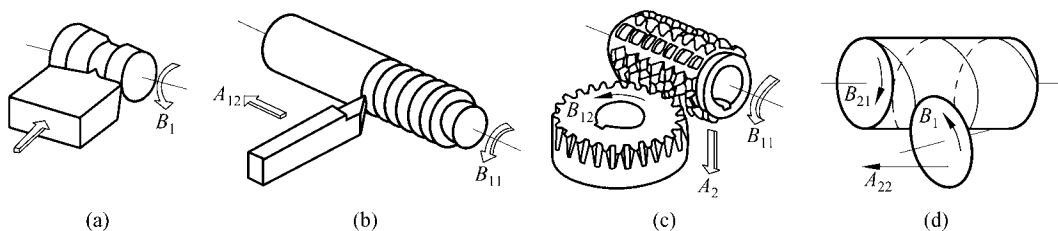


图 1-8 形成所需表面的成形运动

**例 1-3** 用螺纹车刀车削螺纹(见图 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,这是一个复合成形运动,把它分解为工件旋转运动  $B_{11}$  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  $B_{11}A_{12}$ ,是复合成形运动。

**例 1-4** 用齿轮滚刀加工直齿圆柱齿轮齿面(见图 1-8(c))。

母线——渐开线,由展成法形成,需要一个成形运动,是复合成形运动,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为 2 个,即复合成形运动  $B_{11}B_{12}$  和简单成形运动  $A_2$ 。

**例 1-5** 用螺旋槽铣刀(或砂轮)铣削(或磨削)加工螺杆(见图 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成形运动  $B_{21}A_{22}$ 。

导线——螺旋线,由螺旋复合成形运动  $B_{21}A_{22}$  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。主运动可能是简单成形运动,也可能是复合成形运动。上面所述各种切削中的主运动都是简单成形运动。图 1-8(b)所示的车削螺纹,主运动是复合成形运动  $B_{11}A_{12}$ 。

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

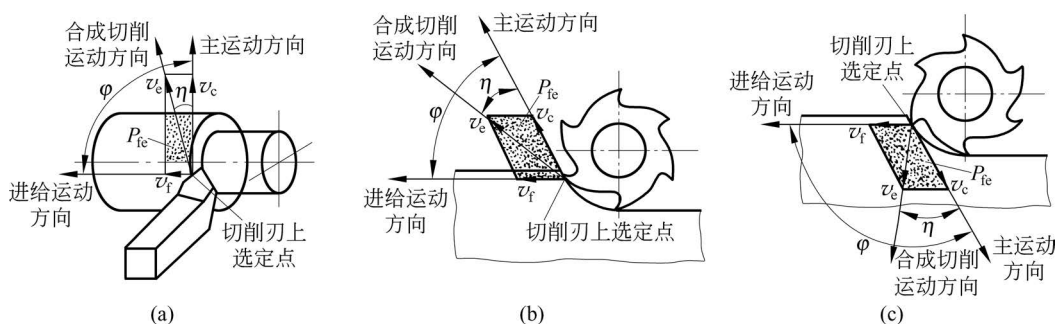


图 1-9 切削运动和切削速度

## 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成形运动,也可以是复合成形运动。上述两个例子的进给运动都是简单成形运动。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成形运动  $B_{21}A_{22}$  是进给运动,这时的主运动是铣刀的旋转  $B_1$ ,是一个简单成形运动。

进给运动方向(见图 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  $\varphi$ 。

进给速度  $v_f$ (见图 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(见图 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  $v_c$ (见图 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  $\eta$ (见图 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(见图 1-9(a)),  $\varphi = 90^\circ$ ,  $v_c = v_c / \cos \eta$ 。在大多数实际加工中  $\eta$  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:

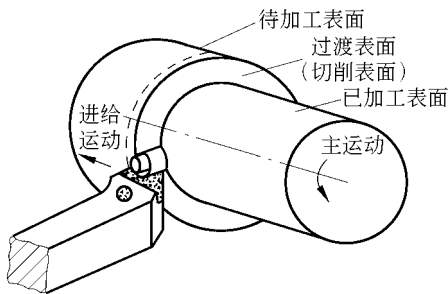


图 1-10 外圆车削运动和加工表面

- (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:

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

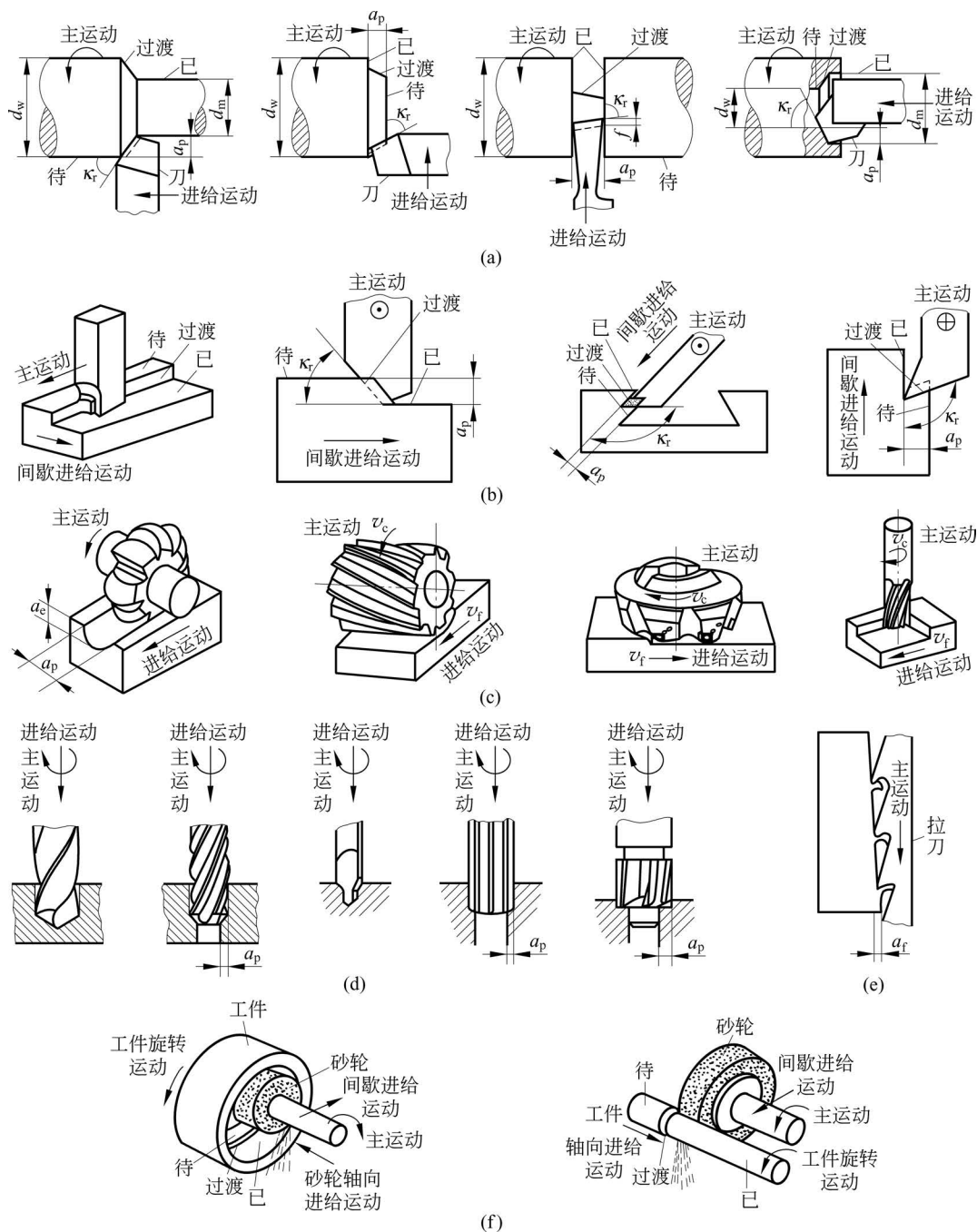
式中, $v_c$  为切削速度,m/s 或 m/min;  $d$  为工件或刀具上某一点的回转直径,mm;  $n$  为工件或刀具的转速,r/s 或 r/min。

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  $d_m$  如图 1-11(a)所示。

#### 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  $f$  是工



“已”—已加工表面；“过渡”—过渡表面；“待”—待加工表面。

图 1-11 各种切削加工的切削运动和加工表面

件或刀具每回转 1 周时二者沿进给方向的相对位移,单位是  $\text{mm/r}$ 。

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  $\text{mm/双行程}$ 。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:

$$v_f = fn = f_z zn \quad (1-2)$$

### 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:

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

对于钻削,

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

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》中确定了“背吃刀量”的术语,标准一经发布即引起学界争议,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,而中国国家标准要规定的是中文汉字的“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,因此建议国家标准中仍允许使用“切削深度”一词。经过近 20 年的争议讨论,2010 年修订发布的新国家标准 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。

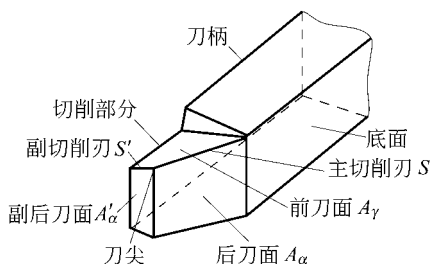


图 1-12 车刀切削部分的结构要素

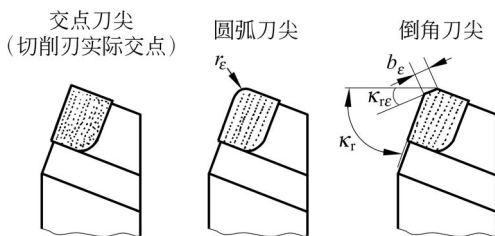


图 1-13 刀尖形式

### 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、法剖面、进给剖面和切深剖面。

##### 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(见图 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  $P_r$  平行于刀柄底面(见图 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。

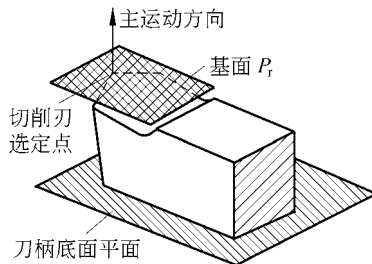


图 1-14 普通车刀的基面  $P_r$

##### 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) 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。