

# 第 2 章 金属切削与刀具设计基础

## 2.1 金属切削加工及刀具的基本知识

### 2.1.1 切削加工基本知识

#### 1. 切削运动与切削用量

(1) 切削运动。在金属切削机床上切削工件时，工件与刀具之间要有相对运动，这个相对运动即称为切削运动。

图 2.1 所示为外圆车削时的情况。工件的旋转运动形成母线(圆)，车刀的纵向直线运动形成导线(直线)，圆母线沿直导线运动时就形成了工件上的外圆表面。故工件的旋转运动和车刀的纵向直线运动就是外圆车削时的切削运动。

图 2.2 所示为在牛头刨床上刨平面的情况。刨刀做直线往复运动形成母线(直线)，工件做间歇直线运动形成导线，直母线沿直导线运动时就形成了工件上的平面。故在牛头刨床上刨平面时，刨刀的直线往复运动和工件的间歇直线运动就是切削运动。

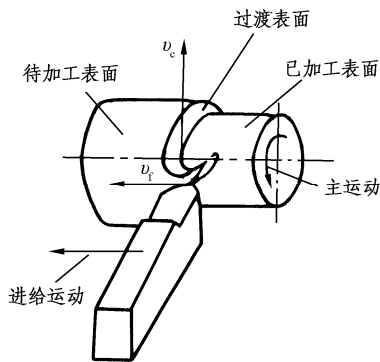


图 2.1 外圆车削的切削运动与加工表面

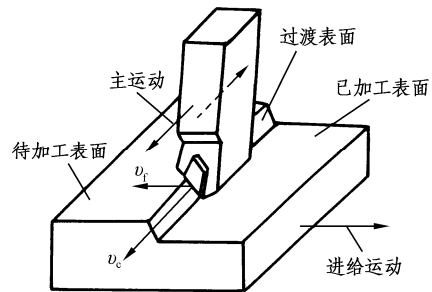


图 2.2 平面刨削的切削运动与加工表面

在其他各种切削加工方法中，工件和刀具同样也必须完成一定的切削运动。切削运动通常按其其在切削中所起的作用可以分为以下两种：

① 主运动。使工件与刀具产生相对运动以进行切削的最基本的运动称为主运动。这个运动的速度最高，消耗的功率最大。例如，外圆车削时工件的旋转运动和平面刨削时刀具的直线往复运动（图 2.1 和图 2.2）都是主运动。主运动的形式可以是旋转运动或直线运动，但每种切削加工方法中主运动通常只有一个。

② 进给运动。使主运动能够继续切除工件上多余的金属，以便形成工件表面所需的运动称为进给运动。例如，外圆车削时车刀的纵向连续直线运动（图 2.1）和平面刨削时工件的间歇直线运动（图 2.2）都是进给运动。进给运动可能不止一个，它的运动形式可以是直线运动，也可以是旋转运动或两者的组合，但无论哪种形式的进给运动，其运动速度和消耗的功率都比主运动要小。

总之，任何切削加工方法都必须有一个主运动，可以有一个或几个进给运动。主运动和进给运动可以由工件或刀具分别完成，也可以由刀具单独完成（例如在钻床上钻孔或铰孔）。

(2) 工件上的加工表面。在切削加工中，工件上通常存在 3 个表面，以图 2.1 的外圆车削和图 2.2 的平面刨削为例，它们是：

① 待加工表面。它是工件上即将被切去的表面。随着切削过程的进行，它将逐渐减小，直至全部切去。

② 已加工表面。它是刀具切削后在工件上形成的新的表面。随着切削过程的进行，它将逐渐扩大。

③ 过渡表面。它是切削刃正切着的表面，并且是切削过程中不断改变着的表面，它总是处在待加工表面与已加工表面之间。

上述这些定义也适用于其他类型的切削加工。

(3) 切削用量。是指切削速度、进给量和背吃刀量三者的总称。他们分别定义如下：

① 切削速度  $v_c$ ，它是切削加工时，切削刃上选定点相对于工件的主运动速度。切削刃上各点的切削速度可能是不同的。当主运动为旋转运动时，工件或刀具最大直径处的切削速度由下式确定：

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (\text{m/s}) \quad (2.1)$$

式中  $d$ ——完成主运动的工件或刀具的最大直径，mm；

$n$ ——主运动的转速，r/s 或 r/min。

② 进给量  $f$ ，它是工件或刀具的主运动每转一转或每一行程时，工件和刀具两者在进给运动方向上的相对位移量。例如，外圆车削的进给量  $f$  是工件每转一转时车刀相对于工件在进给运动方向上的位移量，其单位为 mm/r；又如在牛头刨床上刨平面时，其进给量  $f$  是刨刀

每往复一次，工件在进给运动方向上相对于刨刀的位移量，其单位为 mm/双行程。

在切削加工中，也有用进给速度  $v_f$  来表示进给运动的。所谓进给速度  $v_f$ ，是指切削刃上选定点相对于工件的进给速度，其单位为 mm/s。若进给运动为直线运动，则进给速度在切削刃上各点是相同的。在外圆车削中有：

$$v_f = f \cdot n \quad (\text{mm/s}) \quad (2.2)$$

式中  $f$ ——车刀每转进给量，mm/r；

$n$ ——工件转速，r/s。

③ 背吃刀量  $a_{sp}$ ，对外圆车削（图 2.1）和平面刨削（图 2.2）而言，背吃刀量  $a_{sp}$  等于工件已加工表面与待加工表面间的垂直距离，其中外圆车削的背吃刀量为：

$$a_{sp} = \frac{d_w - d_m}{2} \quad (\text{mm}) \quad (2.3)$$

式中  $d_w$  —— 工件待加工表面的直径，mm；

$d_m$  —— 工件已加工表面的直径，mm。

## 2. 刀具角度和刀具的工作角度

(1) 刀具角度的静止参考系：

① 刀具切削部分的表面与切削刃。切削刀具的种类繁多，结构形状各异。但就其切削部分而言，都可视为外圆车刀切削部分的演变。因此，以外圆车刀为例来介绍刀具切削部分的一般术语，这些术语同样也适用于其他金属切削刀具。

外圆车刀的切削部分如图 2.3 所示，它具有下述表面和切削刃：

前面 ( $A_r$ ) —— 切下的切屑沿其流出的表面。

主后面 ( $A_{\alpha}$ ) —— 与工件上过渡表面相对的表面。

副后面 ( $A'_{\alpha}$ ) —— 与工件上已加工表面相对的表面。

主切削刃 ( $S$ ) —— 前面与主后面的交线。它承担主要的金属切除工作并形成工件上的过渡表面。

副切削刃 ( $S'$ ) —— 前面与副后面的交线。它参与部分的切削工件并最终形成工件上的已加工表面。

刀尖 —— 主、副切削刃的交点。但多数刀具将此处磨成圆弧或一小段直线，如图 2.4 所示。

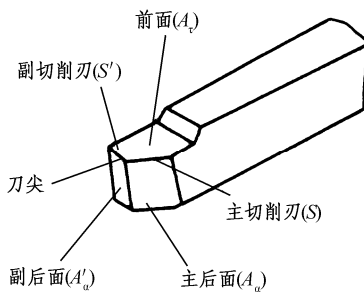


图 2.3 车刀的切削部分

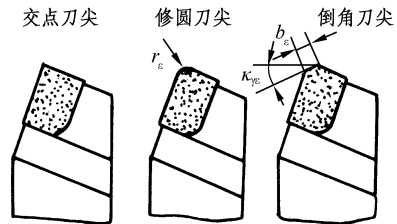


图 2.4 刀尖形状

② 刀具角度的静止参考系。刀具角度是指在刀具工作图上需要标出的角度。刀具的制造、刃磨合测量就是按照这种角度进行的。谈刀具角度时，并未把刀具同工件和切削运动联系起来，刀具本身还处于尚未使用的静止状态。

刀具角度是在一套便于制造、刃磨合测量的刀具静止参考系里度量的。对于车刀，为了便于测量，在建立刀具静止参考系时，特作如下三点假设：

- a. 不考虑进给运动的影响，即  $f=0$ 。
- b. 安装车刀时应使刀尖与工件中心等高，且车刀刀杆中心线与工件轴线垂直。

c. 主切削刃上选定点  $x$  与工件中心等高。

做了上述三点假设以后，就可方便地建立下列三个刀具静止参考系。

- 正交平面参考系

基面 ( $p_r$ )。过切削刃上选顶并垂直于该点切削速度向量  $v_c$  的平面。通常，基面应平行与刀具上便于制造、刃磨合测量的某一安装定位平面。对于普通车刀，它的基面总是平行于刀杆的底面。

切削平面 ( $p_s$ )。过切削刃上选定点作切削刃切线，此切线与该点的切削速度向量  $v_c$  所组成的平面。

正交平面 ( $p_o$ )。过切削刃上选定点，同时垂直于该点基面  $p_r$  和切削平面  $p_s$  的平面。

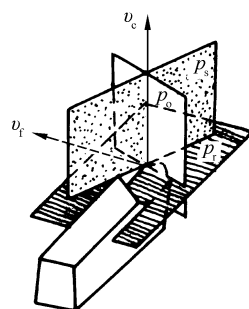


图 2.5 正交平面参考系

显然，对于切削刃上某个选定点，该点的正交平面  $p_o$ 、基面  $p_r$  和切削平面  $p_s$  构成了一个两两相互垂直的空间直角坐标系，将此坐标系称之为正交平面参考系，如图 2.5 所示。

由图 2.5 可知，正交平面垂直于主切削刃或其切线在基面上的投影。

- 法平面参考系

基面  $p_r$  和切削平面  $p_s$  的定义与正交平面参考系里的  $p_s$  和  $p_r$  相同。

法平面 ( $p_n$ )。过切削刃上选定点垂直于切削刃或其切线的平面。对于切削刃上某一选定点，该点的法平面  $p_n$ 、基面  $p_r$  和切削平面  $p_s$  就构成了法平面参考系，如图 2.6 所示。在法平面参考系中， $p_s \perp p_r$ 、 $p_s \perp p_n$ ，但  $p_n$  不垂直于  $p_r$ （在刃倾角  $\lambda_s \neq 0$  的条件下）。

- 背平面和假定工作平面参考系

基面  $p_r$  的定义同正交平面参考系。

背平面 ( $p_p$ )。过切削上选定点，平行于刀杆中心线并垂直于基面  $p_r$  的平面，它与进给方向  $v_f$  是垂直的。

假定工作平面 ( $p_f$ )。过切削刃上的选定点，同时垂直于刀杆中心线与基面  $p_r$  的平面，它与进给方向  $v_f$  平行。

对于切削刃上某一选定点，该点的  $p_p$ 、 $p_f$  与  $p_r$  就构成了背平面和假定工作平面参考系，如图 2.7 所示。显然，这个参考系也是一个空间直角坐标系。

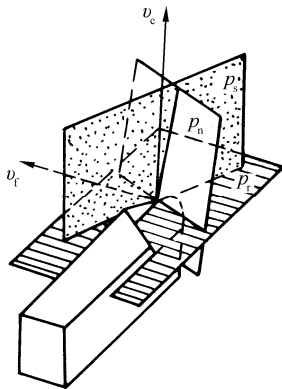


图 2.6 法平面参考系

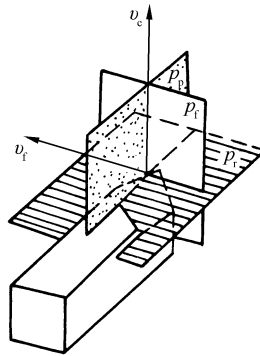


图 2.7 背平面、假定工作平面参考系

我国过去多采用正交平面参考系，与欧洲标准相同，近年来参考国际标准 ISO 的规定，逐渐兼用正交平面参考系和法平面参考系。背平面、假定工作平面参考系则常见于美、日文献中。

## (2) 刀具角度：

① 刀具在正交平面参考系中的角度。刀具角度的作用有两个：一是确定刀具上切削刃的空间位置；二是确定刀具上、后面的空间位置。现以外圆车刀为例予以说明，如图 2.8 所示。

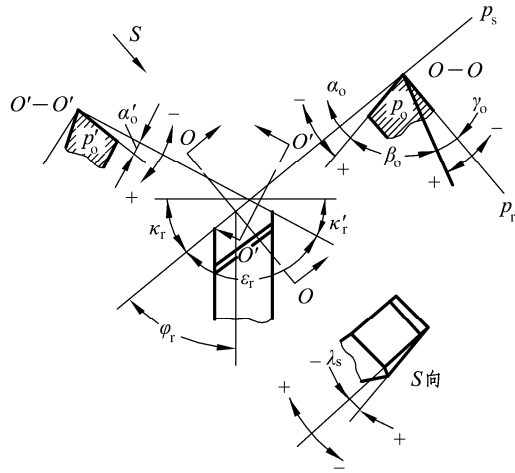


图 2.8 外圆车刀在正交平面参考系的角度

确定车刀主切削刃空间位置的角度有两个：

主偏角  $\kappa_r$ 。主切削刃在基面上的投影与进给方向之间的交角，在基面  $p_r$  上测量。

刃倾角  $\lambda_s$ 。主切削刃与基面  $p_r$  的交角，在切削平面  $p_s$  中测量。当刀尖在主切削刃上为最低点时， $\lambda_s$  为负值；反之，当刀尖在主切削刃上为最高点时， $\lambda_s$  为正值。

确定车刀前面与后面空间位置的角度有两个：

前角  $\gamma_o$ 。在主切削刃上选定点的正交平面  $p_o$  内，前面与基面之间的夹角。

后角  $\alpha_o$ 。在同一个正交平面  $p_o$  内，后面与切削平面之间的夹角。

除了上述与主切削刃有关的角度外，对于车刀的副切削刃，也可采用同样的分析方法，得到相应的四个角度。

但是，由于在刃磨车刀时，常常将主、副切削刃磨在同一个平面型的前面上，所以，当主切削刃及其前面已由上述的基本角度  $\kappa_r$ 、 $\lambda_s$ 、 $\gamma_o$  确定后，副切削刃磨上的副切削刃上的副刃倾角  $\lambda'_s$  和副前角  $\gamma'_o$  也随即确定，故与副切削刃有关的独立角度就只剩以下两个：

副偏角  $\kappa'_r$ 。副切削刃在基面上的投影与进给方向之间的夹角，它在基面  $p_r$  上测量。



副后角  $\alpha'_0$ 。在副切削刃上选定点的副正交平面  $p'_0$  内，副后面与副切削平面之间的夹角。副切削平面是过该定点做副切削刃的切线，此切线与该点切削速度向量所组成的平面；副正交平面  $p'_0$  是过该选定点并垂直于副切削平面与基面的平面。

以上是外圆车刀必须标出的六个基本角度。有了这六个基本角度，外圆车刀的三面（前面、主后面、副后面）、两刃（主切削刃、副切削刃）、一尖的空间位置就完全确定下来了。

有时根据实际需要，还可以标出以下角度：

楔角  $\beta_0$ 。在主切削刃上选定点的正交平面  $p_0$  内，前面与后面的夹角， $\beta_0 = 90^\circ - (\gamma_0 + \alpha_0)$ 。

刀尖角  $\varepsilon_r$ 。主、副切削刃在基面上投影之间的交角，在基面  $p_r$  上测量， $\varepsilon_r = 180^\circ - (\kappa_r + \kappa'_r)$ 。

余偏角  $\varphi_r$ 。主切削刃在基面上的投影与进给方向垂线之间的夹角，在基面  $p_r$  上测量， $\varphi_r = 90^\circ - \kappa_r$ 。

② 刀具在法平面参考系中的角度。刀具在法平面参考系中要标出的角度，基本上和正交平面参考系中的类似。在基面  $p_r$  上表示的角度主偏角  $\kappa_r$ 、副偏角  $\kappa'_r$ 、刀尖角  $\varepsilon_r$ 、余偏角  $\varphi_r$  和在切削平面  $p_s$  内表示的角度  $\lambda_s$ ，两参考系是相同的；所不同的是只需将正交平面  $p_0$  内的前角  $\gamma_0$ 、副后角  $\alpha_0$ 、楔角  $\beta_0$ ，改为法平面  $p_n$  内的法前角  $\tau_n$ 、法后角  $\alpha_n$  与法楔角  $\beta_n$ ，如图 2.9 所示。

法前角  $\tau_n$ 、法后角  $\alpha_n$ 、法楔角  $\beta_n$  的定义与前角  $\gamma_0$ 、后角  $\alpha_0$ 、楔角  $\beta_0$  相同，所不同的只是法前角  $\tau_n$ 、法后角  $\alpha_n$ 、法楔角  $\beta_n$  在法平面  $p_n$  内，前角  $\gamma_0$ 、后角  $\alpha_0$ 、楔角  $\beta_0$  在正交平面  $p_0$  内。

③ 刀具在背平面和假定工作平面参考系中的角度。除基面上表示的角度与上面相同外，前角、后角和楔角是分别在背平面  $p_p$  和假定工作平面  $p_f$  内标出的，故有背前角  $\gamma_p$ 、背后角  $\alpha_p$ 、背楔角  $\beta_p$  和侧前角  $\gamma_f$ 、侧后角  $\alpha_f$ 、侧楔角  $\beta_f$  诸角度，如图 2.10 所示。

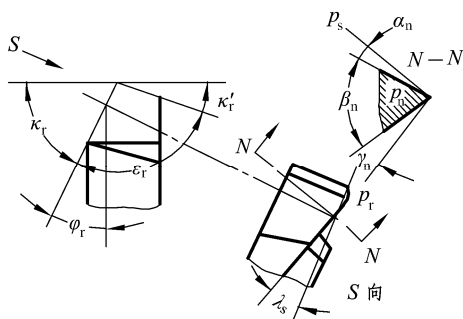


图 2.9 外圆车刀在法平面参考系的角度

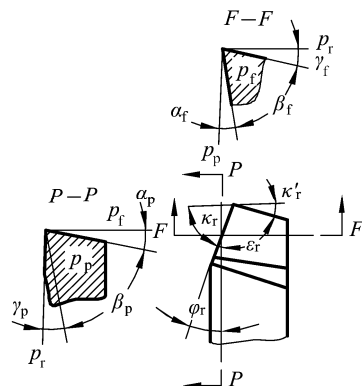


图 2.10 外圆车刀在背平面和假定工作平面参考系的角度

前角、后角、楔角定义同前，只不过  $\gamma_p$ 、 $\alpha_p$  和  $\beta_p$  在背平面  $p_p$  内； $\gamma_f$ 、 $\alpha_f$  和  $\beta_f$  在假定工作平面  $p_f$  内。

(3) 刀具的工作角度。上面讲到的刀具角度，是在忽略了进给运动的影响，而且刀具又按特定条件安装的情况下给出的。而刀具的角度是指刀具在实际工作状态下的切削角度，它必须考虑进给运动和实际的安装情况，此时刀具的参考系发生变化，从而导致刀具的工作角度不同于原来的刀具角度。

① 刀具工作参考系。与刀具静止参考系一样，刀具工作参考系也有三种：工作正交平面参考系；工作法平面参考系；工作背平面和工作平面参考系。刀具工作参考系与静止参考系的区别在于：用合成切削速度向量代替切削速度向量；用实际安装条件代替假定安装条件；用实际的进给方向代替假定的进给方向。刀具工作参考系中各坐标平面的定义如表 2.1 所示。

② 刀具的工作角度。刀具的工作角度就是在刀具工作参考系中确定的角度，其定义与原来的刀具工作角度相同。刀具的工件角度是刀具在实际工作状态下的切削角度，显然，它

更符合于生产实际情况。

表 2.1 刀具工作参考系 (过切削刃上选定点)

参考系	坐标平面	符号	定义与说明
工作正交平面参考系	工作基面	$p_{re}$	垂直与合成切削速度向量 $v_c$ 的平面
	工作切削平面	$p_{se}$	切削刃的切线与合成切削速度向量 $v_c$ 组成的平面
	工作正交平面	$p_{oe}$	同时垂直于工作基面 $p_{re}$ 和工作切削平面 $p_{se}$ 的平面
工作法平面参考系	工作基面	$p_{re}$	垂直于合成切削速度向量 $v_c$ 的平面
	工作切削平面	$p_{se}$	切削刃的切线与合成切削速度向量 $v_c$ 组成的平面
	工作法平面	$p_{ne}$	垂直于切削刃或其切线的平面 (工作参考系中的法平面与静止参考系中的法平面二者相同, 即 $p_{ne} = p_n$ )
工作背平面和工作平面参考系	工作平面	$p_{je}$	由合成切削速度向量 $v_c$ 和进给速度向量 $v_f$ 所组成的平面。显然, $p_{je}$ 包含合成切削速度向量 $v_c$ , 因此, $p_{je} \perp p_{re}$
	工作背平面	$p_{pe}$	同时垂直于工作基面 $p_{re}$ 和工作平面的平面 $p_{je}$

以切断刀为例。如图 2.11 所示, 在不考虑进给运动时, 刀具切削刃上选定点  $A$  的合成切削速度向量  $v_c$  过  $A$  点垂直向上,  $A$  点的基面  $p_r \perp v_c$ , 显然,  $p_r$  为一平行于刀具底面的平面;  $A$  点的切削平面  $p_s$  包含切削速度  $v_c$ , 所以, 它与过  $A$  点的圆相切;  $A$  点的正交平面  $p_o$  为示图纸面。显然,  $p_o$ 、 $p_r$  和  $p_s$  组成了刀具切削刃上  $A$  点的正交平面参考系,  $\gamma_o$  和  $\alpha_o$  就为正交平面  $p_o$  内的前角和后角。

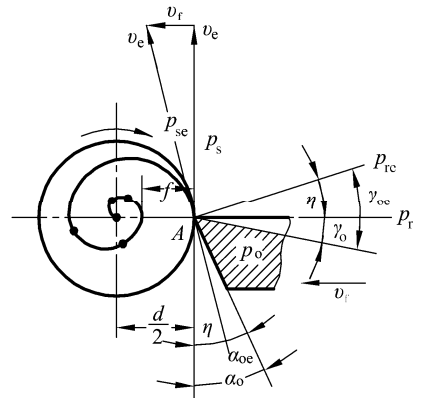


图 2.11 刀具工作参考系 (过切削刃上选定点)

当考虑进给运动后,  $A$  点的合成切削速度向量  $v_c$  由切削速度向量  $v_c$  与进给速度向量  $v_f$  合成, 即  $v_c = v_c + v_f$ 。此时, 工作基面  $p_{re} \perp v_c$ , 且  $p_{re}$  不平行于刀具的底面; 工作切削平面  $p_{se}$  过  $v_c$ , 且  $p_{se}$  与切削刃在工件上切出的阿基米德螺旋线相切; 工作正交平面  $p_{oe}$  与原来的  $p_o$  是重合的, 仍为示图纸面。显然,  $p_{oe}$ 、 $p_{re}$  和  $p_{se}$  组成了切削刃上  $A$  点的工作正交平面参考系,  $\gamma_{oe}$  和  $\alpha_{oe}$  就为工作正交平面  $p_{oe}$  内的工作前角和工作后角。

由于  $p_{rc}$  与  $p_{sc}$  相对于原来的  $p_r$  与  $p_s$  倾斜了一个角度  $\eta$ ，因此，现在的工作前角  $\gamma_{oc}$  和工作后角  $\alpha_{oc}$  应为：

$$\gamma_{oc} = \gamma_o + \eta \quad (2.4)$$

$$\alpha_{oc} = \alpha_o - \eta \quad (2.5)$$

$$\tan \eta = \frac{v_f}{v_c} = \frac{nf}{\pi dn} = \frac{f}{\pi d} \quad (2.6)$$

式中  $\eta$ ——合成切削速度角，它是同一瞬时主运动方向与合成切削方向之间的夹角，在工作平面中测量；

$f$ ——工件每转一转时刀具的横向进给量；

$d$ ——切削刃上选定点  $A$  在横向进给切削过程中相对工件中心的直径，该直径是一个不断改变着的数值。

由式 (2.6) 可知，切削刃愈接近工件中心， $d$  值愈小，则  $\eta$  值愈大。因此，在一定的横向进给量  $f$  下，当切削刃接近工件中心时， $\eta$  值急剧增大，工作后角  $\alpha_{oc}$  将变为负值，此时，刀具已不再是切削工件而成了挤压工件。横向进给量  $f$  的大小对  $\eta$  值也有很大影响， $f$  增大则  $\eta$  值增加，也有可能使  $\alpha_{oc}$  变为负值。因此，对于横向切削的刀具，不宜选用过大的进给量  $f$ ，并应适当加大后角  $\alpha_o$ 。

③ 影响刀具工作角度的因素。除上述横车时，横向进给运动会影响刀具的工作角度外，以下因素也会影响刀具相应的工作角度：

- 纵向进给运动影响刀具工作前、后角。
- 刀具安装高低影响刀具工作前、后角。
- 刀杆中心线与进给运动方向不垂直影响刀具工作主、副偏角。

### 3. 刀具角度的换算

由于在刀具设计、制造、刃磨检验中，常需要对不同参考系内的刀具角度进行换算，因此有必要知道切削刃上某一点的正交平面、法平面、背平面和假定工作平面内角度间的关系。

(1) 法平面与正交平面内前、后角的关系。如图 2.12 所示，车刀的刃倾角为  $\lambda_n$ ，主切削刃上任意点  $A$  的法前角为  $\gamma_n$ ，该点正交平面内的前角为  $\gamma_o$ 。 $\overline{Aa}$  是法平面  $p_n$ 、正交平面  $p_o$  与基面  $p_r$  的公共交线， $\overline{Ab}$  和  $\overline{Ac}$  分别为  $p_o$  和  $p_n$  与车刀前面的交线

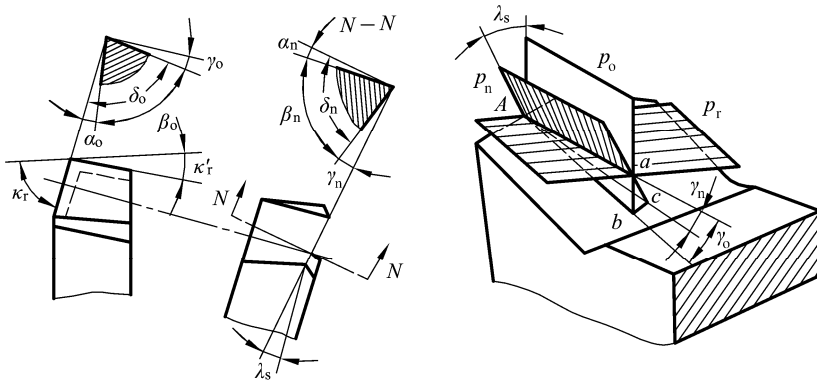


图 2.12 法平面与正交平面内的角度换算

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

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

$$\tan \gamma_n = \tan \gamma_o \cos \lambda_s \quad (2.7)$$

为了推导出后角  $\alpha_n$  与  $\alpha_o$  之间的关系，必须引入一个切削角的概念。所谓切削角是指过切削刃上选定点，切削平面与前面之间的夹角。在正交平面和法平面内的切削角分别用  $\delta_o$  和  $\delta_n$  表示，如图 2.12 所示。

$$\gamma_n = 90^\circ - \delta_n$$

$$\gamma_o = 90^\circ - \delta_o$$