

第11篇 机械制造工艺(二)

主 编	叶仲仁 (机械电子工业部北京机床研究所)
编 写 人	李自通 (机械电子工业部北京机床研究所)
	雷鸣达 (机械电子工业部北京机床研究所)
	瞿景明 (机械电子工业部北京机床研究所)
	章天僖 (机械电子工业部北京机床研究所)
	周广德 (中国科学院电工研究所)
	张魁武 (机械电子工业部北京机床研究所)
责任编辑	王少怀

1 金属切削原理与刀具

1.1 基本概念

a. 切削运动和切削用量 在切削加工过程中，刀具与工件之间必须有相对的切削运动。切削运动包括主运动和进给运动。

主运动——直接切除工件上的被切削层、使之成为切屑的主要运动。主运动速度称为切削速度 v (m/min ，磨削加工中一般为 m/s)。通常， v 值较高，它所消耗的功率较大。

进给运动——使被切削层不断地投入切削的运动。它可分为：

(1) 吃刀运动 控制刀具切入深度的运动。在多数情况下，吃刀运动是间歇性的。吃刀的大小称为切削深度 a_p (mm)。

(2) 走刀运动 沿着所要形成的工件表面的进给运动，用进给速度 v_f (mm/min) 或进给量 f 表示。在刨削中，进给量 f 指每双行程（即刀具与工件相对往返一次）工件相对于刀具在走刀运动方向上移动的距离 ($\text{mm}/\text{双行程}$)；在车削、镗削、钻削和铰削中，进给量 f 表示工件或刀具旋转一转时，刀具相对于工件在走刀运动方向上移动的距离 (mm/r)。采用旋转的多齿刀具切削，有时还需知道每齿进给量 f_z ($\text{mm}/\text{齿}$)。它们之间的关系如下式：

$$v_f = nf = nz f_z \quad \text{mm}/\text{min}$$

式中 n ——刀具转速 r/min

z ——刀具齿数

切削速度 v 、切削深度 a_p 和进给量 f 是切削用量的三要素。

b. 刀具切削部分的构造要素 以外圆车刀（图11-1）为例，刀具切削部分各要素的名称和定义见表11-1。

c. 刀具的几何角度 刀具的几何角度有两类，即刀具角度和刀具工作角度。制造、刃磨和测量刀具，需要应用在静止基准系中的刀具角度；为分析刀具在实际工作中的切削情况，需要应用在工作基准

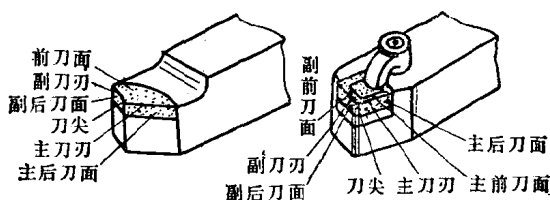


图11-1 外圆车刀切削部分的构造要素

表11-1 刀具切削部分要素

名 称	符 号	定 义
前刀面	A_f	直接切入和挤压工件被切削层并控制切屑沿其排出的刀面
主后刀面 (后刀面)	A_a	与工件加工表面相互作用和相互面对的刀面
副后刀面	A'_a	与工件已加工表面相互作用和相互面对的刀面
主刀刃 (切削刃)	s	前刀面与主后刀面的相交部位。主刀刃是形成工件上切削表面的一段刀刃，简称切削刃
副刀刃 (副切削刃)	s''	前刀面与副后刀面的相交部位。副切削刃是配合主切削刃最终形成工件已加工表面的一段刀刃
刀尖		刀刃（或刃段）之间转折的尖角部分

注：1.各刀刃都有自己的前刀面，但为了制造简单，常取公共前刀面。

2.为增强刀尖部分，经常刃磨出直线或圆弧过渡刃。

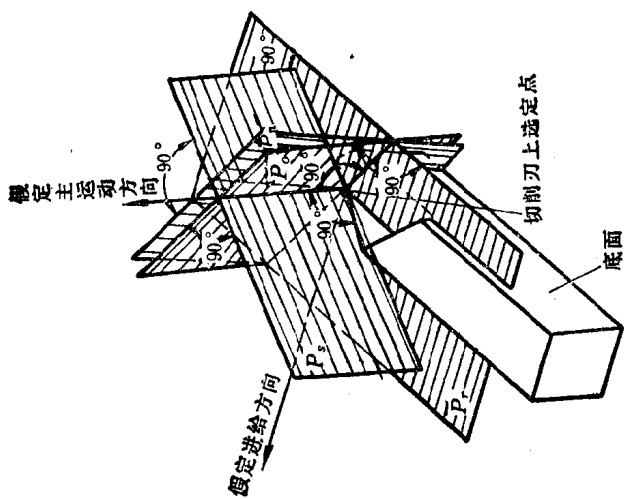
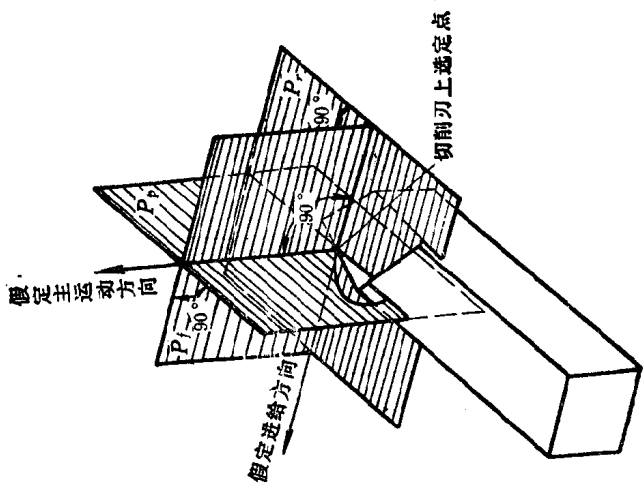
系中的刀具工作角度。通常，根据在切削中所需的刀具工作角度，换算出所需刃磨的刀具角度。

刀具的基准系在切削刃上各点是变化的，因此应指明所选定的点，未特殊注明时所选定的点是指刀尖点。

以车刀为例，刀具的静止基准系是在不考虑进给运动、规定刀尖安装在工件中心高上、刀杆的中心线垂直于进给方向等简化条件下的坐标系统。静止基准系的各坐标平面见表11-2和图11-2，车刀在静止基准系内的刀具角度见表11-3。

表 11-2 刀具静止基准系的各坐标平面

名 称	符号	定 义	说 明
基面	P_r	通过切削刃选定点, 垂直于该点的切削速度方向	对普通车刀, 基面平行刀具底面; 对旋转刀具基面包含刀具轴线
切削平面	P_s	通过切削刃选定点与切削刃相切, 且垂直于该点基面 (P_r) 的平面	在选定点切于工件的加工表面
主剖面	P_o	通过切削刃选定点, 垂直于基面 (P_r) 和切削平面 (P_s) 的平面	P_r - P_s - P_o 组成一个互相正交的主剖面坐标系
法剖面	P_n	通过切削刃选定点与切削刃相垂直的平面	当刃倾角 $\lambda_s \neq 0$ 时, P_n 和 P_r 不正交
假定走刀平面	P_f	通过切削刃选定点, 与基面 (P_r) 相垂直, 并平行于假定走刀方向	对普通车刀, P_f 垂直于刀杆的轴线; 对钻头, 则平行于刀具的轴线
假定切深平面	P_p	通过切削刃选定点且垂直于基面 (P_r) 和假定走刀平面 (P_f) 的平面	P_r - P_f - P_p 组成一个互相正交的走刀平面坐标系
最大前角平面	P_g	通过切削刃选定点, 垂直于前刀面 (A_g) 和基面 (P_r) 的平面	
最小后角平面	P_b	通过切削刃选定点, 垂直于后刀面 (A_b) 和基面 (P_r) 的平面	



a) 空间立体图

表11-3 车刀在静止基准系内的角度

名 称	符号	定 义
前 角		前刀面 (A_f) 与基面 (P_r) 之间的夹角
主前角	γ_o	在主剖面 (P_o) 内测量的前角
法前角	γ_n	在法剖面 (P_n) 内测量的前角
走刀方向前角	γ_f	在假定走刀平面 (P_f) 内测量的前角
切深方向前角	γ_p	在假定切深平面 (P_p) 内测量的前角
最大前角	γ_g	在最大前角平面 (P_g) 内测量的前角
后 角		主后刀面 (A_a) 与切削平面 (P_s) 之间的夹角
主后角	α_o	在主剖面 (P_o) 内测量的后角
法后角	α_n	在法剖面 (P_n) 内测量的后角
走刀方向后角	α_f	在假定走刀平面 (P_f) 内测量的后角
切深方向后角	α_p	在假定切深平面 (P_p) 内测量的后角
最小后角	α_b	在最小后角平面 (P_b) 内测量的后角
主偏角	κ_r	切削平面 (P_s) 与假定走刀平面 (P_f) 的夹角, 在基面 (P_r) 内测量
副偏角	κ'_r	副切削刃的切削平面 (P'_s) 与假定走刀平面 (P_f) 的夹角, 在基面 (P_r) 内测量
刃倾角	λ_s	切削刃与基面 (P_r) 间的夹角, 在切削平面 (P_s) 内测量
副后角	α'_o	副切削刃的切削平面 (P'_s) 与副后刀面 (A'_a) 之间的夹角, 在副剖面 (P'_o) 内测量

注: 1. 当切削刃与副切削刃有公共前刀面时, 副切削刃的前角及刃倾角是派生角度。

2. 为了与前角正负号的标注一致, 刃倾角正负号的标注与以前习惯上正好相反。

通常,主切削刃与副切削刃有公共前刀面,副切削刃的前角(副刃前角 γ'_0)及刃倾角(副刃刃倾角 λ'_0)是派生角度,可按下式计算:

$$\operatorname{tg} \gamma'_0 = \operatorname{tg} \gamma_0 \cos(\kappa_r + \kappa'_r) + \operatorname{tg} \lambda_0 \sin(\kappa_r + \kappa'_r)$$

$$\operatorname{tg} \lambda'_0 = \operatorname{tg} \gamma_0 \sin(\kappa_r + \kappa'_r) - \operatorname{tg} \lambda_0 \cos(\kappa_r + \kappa'_r)$$

主刀刃在空间的位置,由主偏角 κ_r 及刃倾角 λ_r 确定;组成主刀刃的前刀面位置 and 主后刀面位置,分别由前角 γ_r 和后角 α_r 确定。对任一刀刃,均有与上述相应的四个基本角度,并且只需标注某一基准系内的角度即可。各基准系内的刀具角度换算公式见表11-4。

考虑了进给运动、刀具安装条件以及切削过程中的积屑瘤、流屑方向的影响而确定的刀具几何角度,称为刀具工作角度或刀具实际角度。刀具各工作角度的定义与静止基准系中的刀具角度相似,在工作基准系内也有相应的主剖面系、法剖面系等的刀具工作角度,其术语多冠以“工作”字样,其符号的下角标处均加注“e”字母。

以车刀为例,进给运动和安装条件对刀具角度的影响见表11-5。

通常进给速度远小于主运动速度,在正常的安装条件下,刀具工作角度近似等于静止基准系内的刀具角度。因此,多数情况下不必进行刀具工作角度的计算。

大刃倾角刀具流屑方向改变后的刀具工作角度情况见本章1.3的斜角切削。

1.2 刀具几何参数的选择

刀具几何参数是指刀具几何角度、过渡刃形状、刃口型式及其他有关的形状尺寸参数。

a. 刀具几何角度的选择原则 (表11-6)

b. 过渡刃形状和参数的选择 刀尖处强度较低、散热条件较差,而该处的切削力和切削热又比较集中,因此刃磨出过渡刃以强化刀尖是提高刀具耐用度、切削效率和加工质量的重要措施。表11-7列出过渡刃的型式、参数、特点及应用。表11-8列出刃口的型式、参数及应用。

表11-9列出硬质合金车刀合理几何参数参考值,可供参考应用。

表11-4 各基准系中车

已知	(P _r -P _s -P _o 系) 主剖面系		(P _r -P _s -P _n 系) 法平面系	
	$\kappa_r, \lambda_s, \alpha_o, \gamma_o$		$\kappa_r, \lambda_s, \alpha_n, \gamma_n$	
求解				
主剖面系	κ_r	不 变	不 变	
	λ_s			
	α_o		$\operatorname{tg} \alpha_o = \operatorname{tg} \alpha_n \cos \lambda_s$	
	γ_o		$\operatorname{tg} \gamma_o = \frac{\operatorname{tg} \gamma_n}{\cos \lambda_s}$	
法平面系	κ_r	不 变		
	λ_s			
	α_n			
	γ_n			
假定走刀平面系	α_p	$\operatorname{ctg} \alpha_p = \cos \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_o + \sin \kappa_r \operatorname{tg} \lambda_s$	$\operatorname{ctg} \alpha_p = \cos \kappa_r \frac{\operatorname{ctg} \alpha_n}{\cos \lambda_s} + \sin \kappa_r \operatorname{tg} \lambda_s$	
	α_f	$\operatorname{ctg} \alpha_f = \sin \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_o - \cos \kappa_r \operatorname{tg} \lambda_s$	$\operatorname{ctg} \alpha_f = \sin \kappa_r \frac{\operatorname{ctg} \alpha_n}{\cos \lambda_s} - \cos \kappa_r \operatorname{tg} \lambda_s$	
	γ_p	$\operatorname{tg} \gamma_p = \cos \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_o + \sin \kappa_r \operatorname{tg} \lambda_s$	$\operatorname{tg} \gamma_p = \cos \kappa_r \frac{\operatorname{tg} \gamma_n}{\cos \lambda_s} + \sin \kappa_r \operatorname{tg} \lambda_s$	
	γ_f	$\operatorname{tg} \gamma_f = \sin \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_o - \cos \kappa_r \operatorname{tg} \lambda_s$	$\operatorname{tg} \gamma_f = \sin \kappa_r \frac{\operatorname{tg} \gamma_n}{\cos \lambda_s} - \cos \kappa_r \operatorname{tg} \lambda_s$	
最大前角系	θ_r	$\operatorname{tg}(\kappa_r + \theta_r) = -\frac{\operatorname{ctg} \alpha_o}{\operatorname{tg} \lambda_s}$	$\operatorname{tg}(\kappa_r + \theta_r) = -\frac{\operatorname{ctg} \alpha_n}{\sin \lambda_s}$	
	δ_r	$\operatorname{tg}(\kappa_r + \delta_r) = -\frac{\operatorname{tg} \gamma_o}{\operatorname{tg} \lambda_s}$	$\operatorname{tg}(\kappa_r + \delta_r) = -\frac{\operatorname{tg} \gamma_n}{\sin \lambda_s}$	
	α_o	$\operatorname{ctg} \alpha_o = \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \alpha_n + \operatorname{tg}^2 \lambda_s}$	$\operatorname{ctg} \alpha_o = \sqrt{\frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha_n}{\cos^2 \lambda_s} + \operatorname{tg}^2 \lambda_s}$	
	γ_o	$\operatorname{tg} \gamma_o = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma_n + \operatorname{tg}^2 \lambda_s}$	$\operatorname{tg} \gamma_o = \sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2 \gamma_n}{\cos^2 \lambda_s} + \operatorname{tg}^2 \lambda_s}$	

注: δ_r ——最大前角平面方向角; θ_r ——最小后角平面方向角。

刀几何角度换算公式

(P _r -P _f -P _l 系) 假定走刀平面系	(P _r -P _g -P _l 系) 最大前角系
$\alpha_p \quad \alpha_f \quad \gamma_p \quad \gamma_f$	$\theta_r \quad \delta_r \quad \alpha_b \quad \gamma_g$
$\operatorname{tg} \kappa_r = \frac{\operatorname{ctg} \alpha_f - \operatorname{tg} \gamma_f}{\operatorname{ctg} \alpha_p - \operatorname{tg} \gamma_p}$	$\operatorname{tg} \kappa_r = \frac{\operatorname{ctg} \alpha_b \cos \theta_r - \operatorname{tg} \gamma_g \cos \delta_r}{\operatorname{ctg} \alpha_b \sin \theta_r - \operatorname{tg} \gamma_g \sin \delta_r}$
$\operatorname{tg} \lambda_s = \sin \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_p - \cos \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_f$ $\operatorname{tg} \lambda_s = \sin \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_p - \cos \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_f$	$\operatorname{tg} \gamma_s = -\cos(\kappa_r + \theta_r) \operatorname{ctg} \alpha_b$ $\operatorname{tg} \gamma_s = -\operatorname{tg} \gamma_g \cos(\kappa_r + \delta_r)$
$\operatorname{ctg} \alpha_o = \cos \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_p + \sin \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_f$	$\operatorname{ctg} \alpha_o = \operatorname{ctg} \alpha_b \sin(\kappa_r + \theta_r)$
$\operatorname{tg} \gamma_o = \cos \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_p + \sin \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_f$	$\operatorname{tg} \gamma_o = \operatorname{tg} \gamma_g \sin(\kappa_r + \delta_r)$
$\operatorname{tg} \gamma_o = \cos \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_p + \sin \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_f$	$\operatorname{tg} \gamma_o = \operatorname{tg} \gamma_g \sin(\kappa_r + \delta_r)$
$\operatorname{ctg} \alpha_n = (\cos \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_p + \sin \kappa_r \operatorname{ctg} \alpha_f) \cos \lambda_s$	$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{\operatorname{tg} \alpha_b}{\cos \lambda_s \sin(\kappa_r + \theta_r)}$
$\operatorname{tg} \gamma_n = (\cos \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_p + \sin \kappa_r \operatorname{tg} \gamma_f) \cos \lambda_s$	$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma_g \cos \lambda_s \sin(\kappa_r + \delta_r)$
不 变	$\operatorname{ctg} \alpha_p = \sin \theta_r \operatorname{ctg} \alpha_b$
	$\operatorname{ctg} \alpha_f = \cos \theta_r \operatorname{ctg} \alpha_b$
	$\operatorname{tg} \gamma_p = \sin \delta_r \operatorname{tg} \gamma_g$
	$\operatorname{tg} \gamma_f = \cos \delta_r \operatorname{tg} \gamma_g$
$\operatorname{tg} \theta_r = \frac{\operatorname{tg} \alpha_f}{\operatorname{tg} \alpha_p}$	不 变
$\operatorname{tg} \delta_r = \frac{\operatorname{tg} \gamma_p}{\operatorname{tg} \gamma_f}$	
$\operatorname{ctg} \alpha_b = \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \alpha_p + \operatorname{ctg}^2 \alpha_f}$	
$\operatorname{tg} \gamma_g = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma_p + \operatorname{tg}^2 \gamma_f}$	

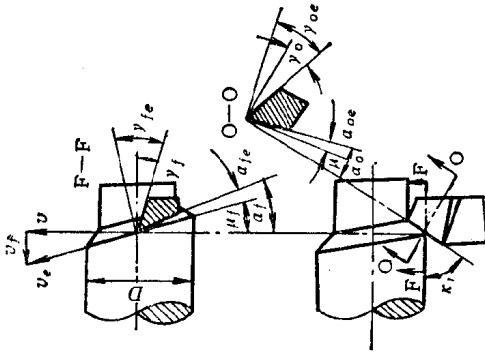
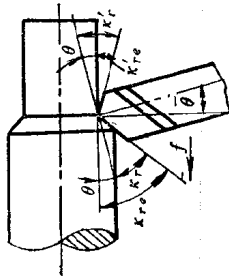
进给运动		1. 主剖面 P_o 内 $\gamma_{oe} = \gamma_o + \mu \quad \alpha_{oe} = \alpha_o - \mu$ 2. 车螺纹时，左侧刃工作角度的计算公式应取相反符号 3. μ 按下式求得， $\tan \mu = \frac{f \sin \kappa_r}{\pi D}$
刀杆中心线与进给方向不垂直		1. $\kappa_{re} = \kappa_r \pm \theta \quad \kappa'_{re} = \kappa_r \mp \theta$ 2. 式中，上面的符号适用于图示方向的 θ（刀尖按逆时针方向转动），θ 与图示方向相反时，取下面的符号

表11-6 刀具几何角度的功用及选择原则

名 称	功 用	选 择 原 则
前 角	增大前角可减少切削层的塑性变形, 减小切屑流动时的摩擦阻力, 从而使切削力和切削热减小。但前角过大, 将削弱切削刃和刀头强度, 散热条件恶化, 使刀具耐用度降低, 甚至造成崩刃	工件材料的强度、硬度愈低, 塑性愈好, 应取较大的前角; 加工脆性材料 (如铸铁) 或刀具一切屑接触长度短的材料 (如钛合金) 时, 应取较小的前角; 加工特别硬的材料, 如淬火锅, 前角很小, 甚至取负值
后 角 或 副 后 角	减小刀具后刀面或副后刀面与工件之间的摩擦, 但后角过大, 会削弱切削刃和刀头强度, 恶化散热条件, 使刀具耐用度降低, 甚至造成崩刃	1. 精加工时, 切削厚度薄, 磨损主要发生在后刀面, 宜取较大后角; 粗加工及承受冲击载荷时, 要求刃口坚固, 应取较小的后角 2. 工件材料较软、粘、加工硬化倾向大时, 后刀面摩擦重, 宜取较大后角; 工件材料硬度、强度高, 应取较小后角; 但对加工硬材料的负前角刀具, 后角可稍大些, 以便刀刃易于切入工件; 加工脆性材料, 切削力集中于刃口处, 宜取较小后角 3. 被加工工件刚性差 (如细长轴或薄壁工件) 时, 应取较小后角, 以增加后刀面与工件的接触面积, 减小或消除振动 4. 有尺寸精度要求的刀具应取较小后角, 以免重磨后刀具尺寸变化太大 5. 成形车刀或铲齿刀具等刃形复杂, 各处法向后角常不相等, 最小后角尽量不小于$2^{\circ}30'$ 6. 高速钢刀具比硬质合金刀具的后角可增大$2^{\circ}\sim 3^{\circ}$

(续)

名 称	功 用	选 择 原 则
主 偏 角	1. 改变主偏角 (κ_r) 的大小, 可调整吃刀抗力 F_p 和走刀抗力 F_f 的比例。主偏角增大时, F_p 减小、F_f 增大, 有利于减小工艺系统的弹性变形和振动 2. 减小主偏角, 可减小切削厚度和切削刃单位长度上的负荷, 同时刀尖角增大, 刀具的散热条件得到改善, 刀具耐用度可提高 3. 主偏角影响断屑效果和排屑方向, 增大主偏角, 可使切屑变得窄而厚, 容易断屑。对于孔加工刀具还有利于排出切屑	1. 精加工或半精加工, 一般选用较大的主偏角, 以利于减振和断屑 2. 在工艺系统 (机床—工件—夹具—刀具) 刚性允许的条件下, 可减小主偏角以提高刀具耐用度 3. 工件材料强度、硬度高时, 宜取较小的主偏角 4. 需从中间切入的刀具, 应取较大的主偏角 5. 加工某些工件 (如车阶梯轴、铣直角台阶等) 主偏角的大小还应注意与工件的形状相适应
副 偏 角	1. 增大副偏角 (κ'_r) 可减小副刀刃不工作部分与工件已加工表面之间的摩擦。但副偏角过大, 会使刀尖角减小, 工件表面的残留面积也增加, 使刀具的散热条件恶化, 表面粗糙度的 R_a 值增大 2. 减小副偏角, 对已加工表面的修光作用加强, 有利于降低表面粗糙度。但过小的副偏角会使吃刀抗力 F_p 增大, 在工艺系统刚性不足时易引起振动	1. 在不引起振动的情况下, 一般选用较小的副偏角。精加工刀具的副偏角应取得更小一些; 必要时可磨出一段 $\kappa'_r = 0$ 的修光刃, 修光刃长度 $b_s \approx (1.2 \sim 1.5) f$ 2. 切断及切槽刀具的副偏角应取较小值, 以保证重磨后刀具尺寸变化量较小。一般取 $\kappa'_r \approx 1^\circ \sim 2^\circ$

(续)

名 称	功 用	选 择 原 则
刃 倾 角	1. 改变刃倾角 (λ_s) 的大小和方向, 可控制切屑流动的方向 2. 可增加实际工作前角 (见11-1-3 的斜角切削), 减小切屑变形, 使切削轻快 3. 可减小切削刃口的实际工作圆弧半径, 使刀刃锋利, 可实现微量切削 4. 断续切削时, 适当的刃倾角可使切削刀逐渐切入和切出工件; 冲击得到缓和, 切削比较平稳 5. 负值的刃倾角, 可使刀尖避免受到冲击, 刀尖散热条件也较好, 有利于提高刀具耐用度 6. 减小刃倾角会使吃刀抗力 F_p 增大	1. 粗加工时, 应取负值的刃倾角, 以保护刀尖, 提高切削平稳性, 一般取 $\lambda_s = 0^\circ \sim -5^\circ$ 精加工时, 应取正值的刃倾角, 使切屑流向待加工表面, 以免划伤已加工表面, 一般取 $\lambda_s = 0^\circ \sim 5^\circ$ 2. 冲击负荷较大的断续切削, 应取更大负值的刃倾角 3. 加工特别硬的材料 (如淬火钢) 时, 对刀尖强度要求较高, 应取较大负值的刃倾角 4. 工艺系统刚性不足时, 应尽量不用负刃倾角, 以免吃刀抗力 F_p 过大而引起振动, 但可考虑采用双刃倾角, 即主刀刃上近刀尖处取 $-\lambda_s$, 其他部分取 $+\lambda_s$ 5. 微量精车、精镗孔或精刨平面时, 可采用很大的刃倾角, 使刃口非常锋利, 以实现微量切削, 并获得较高的表面质量 6. 圆柱铣刀、立铣刀的刀齿螺旋角 β (即主刀刃刃倾角 λ_s) 增大时, 可使切削轻快平稳, 刀具耐用度、生产效率和加工表面质量均可提高