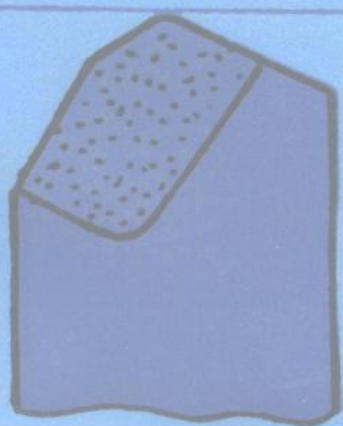


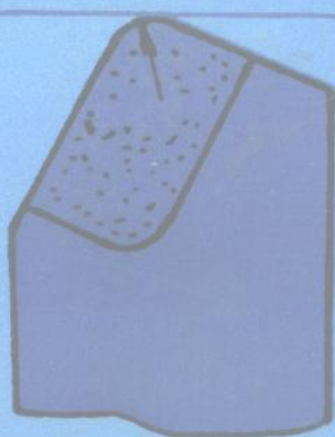
金属切削原理
蔡在璽 编著

金属切削原理

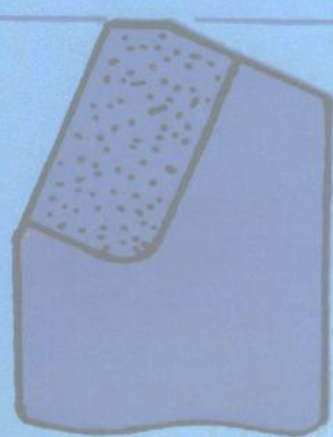
蔡在璽 编著



a)



b)



c)

同济大学出版社

金属切削原理

蔡在夏 编著

同济大学出版社

(沪)新登字 204 号

内 容 提 要

金属切削原理的基本任务是研究金属切削过程的基本规律, 研究新型刀具材料的切削性能, 研究如何提高切削效率, 保证加工零件的表面质量。本书共分五个部分: 一是刀具角度和角度换算, 二是金属切削的基本规律, 三是应用部分, 四是磨削, 五是切削试验的多元回归方法。

金属切削原理是一门专业基础课, 一方面, 它与很多课程有联系, 另一方面, 它与生产实际联系密切, 它是机械加工专业人员的一门必修课。

本书可供机械系机械加工专业的师生作教材使用, 也可供有关人员作参考资料。

责任编辑 陆菊英

封面设计 王肖生

金属切削原理

蔡在亶 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

常熟市印刷二厂印刷

开本: 767×1092 1/16 印张: 18.5 字数: 460千字

1994年8月第1版 1994年8月第1次印刷

印数: 1—2500 定价: 9.00元

ISBN 7-5706-1345-3/TG·3

前 言

机械制造业对整个国家经济的发展有重大影响。全世界工业发达国家几乎都有十分先进的机械制造业。美国的宇航与航空工业,日本的汽车工业都是例子。切削加工在机械制造业中有突出的地位。因为要把毛坯表面高低不平的缺陷层去除掉,以获得高精度的表面完整的零件,切削与磨削加工是最常用的方法。据统计,全世界工业发达国家(包括苏联),在80年代中期每年用于切削加工的费用就超过2500亿美元。我国每年用在切削加工方面的费用约为320多亿元人民币。我国目前拥有320多万台机床,如何提高这些机床的效率,降低成本,对我国机械工业具有重大的经济意义。

金属切削原理的基本任务是研究金属切削过程的基本规律,研究新型刀具材料的切削性能,研究如何提高切削效率、保证加工零件的表面质量。由于科学技术和机械制造业的发展,金属切削原理的研究工作也在不断深化。特别是新型刀具材料、刀具的磨损与破损机理的研究更显得十分活跃,新的研究成果不断涌现。

本书是我校机械制造专业系列教材之一。作为教材,本书以讲述基本内容为主,但也照顾到比较公认的科研成果。本书共分下列几部分:

1. 刀具的角度与角度的换算 由于刀具的特殊性,必须先掌握刀具的角度,以及角度的换算。

2. 金属切削的基本规律 包括切削变形、切削力、切削温度及刀具的磨损与破损。其中切削温度的理论分析可按具体情况选择讲授,故加上*号。

3. 应用部分 这部分包括刀具材料、工件材料的切削加工性、切削液、表面质量、刀具角度与切削用量的选择,这些内容是在掌握基本规律的基础上,结合生产实际,讲述某一方面的应用。其中刀具材料的性质与选用一章不放在基本规律之前,而放在其后,主要想法是在掌握刀具的磨损与破损规律后,这一章的内容可以讲述得更深入。

4. 磨削 这一章包括了砂轮的基本知识、磨削的基本规律以及磨削表面质量、高效磨削等内容。

5. 切削试验的多元回归方法 这部分内容也可按具体情况选择讲授,故加上*号。

金属切削原理是一门专业基础课。一方面,它与很多课程有联系,如数学、材料力学、弹性力学、有限元、金属学、传热学、摩擦磨损学、化学热力学等;另一方面,它与生产实际联系密切,切削过程的复杂性又使得人们难以用某一方面的理论解释涉及到多方面的规律。最后,不得不用实验公式总结切削力、切削温度、刀具磨损这些基本规律。这些特点希望读者多加注意。

编 者

1993.3.

目 录

前 言

第一章 刀具角度与切削层截面形状	7
§ 1—1 刀具角度的定义.....	7
§ 1—2 切削层要素.....	12
§ 1—3 刀具角度的换算.....	13
§ 1—4 麻花钻的前角.....	15
第二章 切削变形	19
§ 2—1 直角自由切削切屑形成的模型.....	19
§ 2—2 剪切区的变形.....	23
§ 2—3 刀-屑接触区的变形与摩擦.....	27
§ 2—4 几个主要因素对切屑变形的影响.....	36
§ 2—5 斜角切削.....	39
第三章 切削力	47
§ 3—1 切削力的来源、切削分力及其作用.....	47
§ 3—2 主切削力的分析.....	49
§ 3—3 切削力的测量与实验数据的处理.....	51
§ 3—4 影响切削力的主要因素.....	57
§ 3—5 切削力的计算和例题.....	61
第四章 切削温度	67
§ 4—1 切削热的产生与传出.....	67
* § 4—2 切削温度的理论分析.....	69
§ 4—3 测量切削温度的方法.....	84
§ 4—4 切削温度变化规律的实验研究.....	87
§ 4—5 切削区的温度分布.....	90
第五章 刀具磨损与破损	95
§ 5—1 刀具磨损形式与磨损过程.....	95
§ 5—2 刀具磨损的原因与本质.....	97
§ 5—3 刀具破损的原因与本质.....	110
§ 5—4 切削用量与刀具耐用度之间关系的经验公式.....	118

第六章 刀具材料的性质与选用	124
§ 6—1 对刀具材料的要求.....	124
§ 6—2 高速钢.....	125
§ 6—3 硬质合金.....	133
§ 6—4 其他刀具材料.....	140
§ 6—5 刀具材料的选用.....	147
第七章 工件材料的切削加工性	152
§ 7—1 切削加工性的概念.....	152
§ 7—2 钢的物理力学性能、化学成分及金相组织对其切削加工性的影响	153
§ 7—3 易切削钢.....	161
§ 7—4 镍与镍基合金的切削加工性.....	164
第八章 切削液	171
§ 8—1 切削液对切削过程的影响.....	171
§ 8—2 切削液的作用及其机理.....	177
§ 8—3 切削液的分类与选用.....	185
第九章 切削加工的表面质量	193
§ 9—1 表面质量的标志及其与零件使用性能之间的关系.....	193
§ 9—2 已加工表面形成过程.....	197
§ 9—3 已加工表面粗糙度.....	193
§ 9—4 加工硬化.....	208
§ 9—5 残余应力.....	210
第十章 刀具角度及切削用量的选择	216
§ 10—1 刀具角度的选择.....	216
§ 10—2 切削用量的选择.....	222
§ 10—3 切削用量的优化.....	232
第十一章 磨削	238
§ 11—1 砂轮的特征.....	238
§ 11—2 磨削几何参数与磨削过程机理.....	243
§ 11—3 磨削力.....	250
§ 11—4 磨削温度.....	253
§ 11—5 砂轮磨损.....	257
§ 11—6 磨削表面质量.....	263
§ 11—7 高效磨削.....	269

附录 切削试验的多元回归方法	276
§ 1 多元线性回归方程回归系数的求法.....	276
§ 2 回归的显著性检验.....	280
§ 3 线性回归正交设计.....	282
§ 4 举例.....	284

本书常用的名词、术语、符号和单位

符 号	名 称	单 位
A_R	实际接触面积	mm^2
a_c	切削厚度	mm
a_f	每齿进给量	mm/z
a_k	冲击韧性	J/m^2
a_m	单个磨粒平均切削面积	mm^2
a_o	切屑厚度	mm
a_p	切削深度, 磨削深度	mm
a_{pa}	修整砂轮时径向切入深度	mm
a_w	切削宽度	mm
b	磨削宽度	mm
b_s	砂轮宽度	mm
b_{a1}	后刀面上棱带宽度	mm
$b_{\gamma 1}$	负倒棱宽度	mm
b_s	过渡刃长度	mm
c	工序生产成本	
C_{FZ}	主切削力 F_Z 实验公式的系数	
c_s	磨刀费用及分摊在每次磨刀上的刀具成本	
c_v	切削速度实验公式的系数	
c	比热	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{k}$
d	工件直径	mm
d_c	钻芯直径	mm
d_0	刀具直径	mm
d_s	砂轮直径	mm
d_{s0}	砂轮当量直径	mm
$\text{erf}(u)$	误差函数	
$\exp(u)$	自然对数e的指数函数, 即 e^u	
F'	铁素体	
F	摩擦力	N
F_a	铣削或磨削的轴向分力	N
F_f	前刀面上的摩擦力	N
F_{fa}	后刀面上的摩擦力	N
F_l	铣削进给方向分力	N
F_n	前刀面上的法向力	N
F_n	与磨削表面垂直方向的分力	N
$F_{n,b}$	单位磨削宽度法向力	N
F_{ns}	垂直剪切面的分力	N
F_{na}	后刀面上的法向力	N
F_r	切削合力	N
F_r'	切屑形成力	N
F_{ra}	后刀面上的合力	N
F_{rr}	前刀面上的合力	N
F_s	剪切面上的剪切力	N
F_t	切向力	N
$F_{t,b}$	单位磨削宽度的切向力	N
F_v	铣削垂直方向分力	N
F_x	走刀抗力(轴向力)	N
F_{xy}	切削合力在基面内的分力	N
F_y	吃刀抗力(径向力)	N

续上表

符 号	名 称	单 位
F_z	主切削力	N
f	每转进给量	mm/r
f_a	每一往复行程沿砂轮轴向的进给量	mm/行程
f_d	修整砂轮时的砂轮每转轴向进给量	mm/r
f_r	磨削的径向进给量	mm
G	磨削比	
G	吉布斯自由能	J
ΔG	吉布斯自由能的变化	J
ΔG_f°	生成自由能	J/mol
$\Delta G_{Q,p}$	恒温恒压条件下吉布斯自由能的变化	J
H_{max}	残留面积高度	μm
h_y	加工硬化层厚度	μm
K_B	月牙洼宽度	mm
K_{FZ}	主切削力 F_z 的修正系数	
K_{IC}	断裂韧性	$\text{MN}/\text{m}^{3/2}$
KM	月牙洼中心到切削刃距离	mm
$K_0(u)$	零阶二类修正贝塞尔函数	
K_r	相对加工性	
K_T	月牙洼深度	mm
k	导热系数	$\text{w}/\text{m} \cdot \text{K}$
L	偏差平方和	
l	被切削层长度	mm
l_c	切屑长度	mm
l_c	砂轮与工件接触弧长	mm
l_f	刀-屑接触长度	mm
M	切削扭矩	$\text{N} \cdot \text{m}$
M	该工序单位时间内分担的全厂开支	
m	$v-T$ 关系中 T 的指数	
\underline{N}	金属材料硬化程度	
\underline{N}	法线向量	
\underline{N}_0	单位法线向量	
NB	刀具径向磨损量	mm
N_s	同时参加磨削的磨粒数	
n	工件转速	r/min
P	载荷	N
P	珠光体	
P	切削生产率	
P_m	切削功率	kw
P_0	主剖面	
P_r	基面	
P_r	径向力	N
P_s	切削平面	
P_t	切向力	N
p	单位切削力	N/mm^2
Q	热量	J
Q	剩余平方和	
q_l	单位长线热源上产生的热量	J/m

符 号	名 称	单 位
q_c	单位时间产生的热量	W
q_{ts}	热流密度	W/m ²
R	半径	mm
R	切削热量传入切屑的比例	
R_a	表面粗糙度算术平均偏差	μm
R_z	表面粗糙度十点高度平均值	μm
r	相关系数	
r_c	实际刃口钝圆半径	μm
r_n	刃口钝圆半径	μm
r_s	某一点半径	mm
r_s	刀尖圆弧半径	mm
S	导程	mm
T	刀具耐用度	min
T_c	经济耐用度	min
T_p	最高生产率耐用度	min
t	时间	min
t_{ct}	换刀时间	min
t_m	切削时间	min
t_{ot}	辅助时间	min
t_w	工序工时	min
U	消耗的总功率	kW
U	回归差平方和	
u_f	切除单位体积金属消耗的摩擦功	kW
u_s	切除单位体积金属消耗的剪切功	kW
VB	后刀面磨损带中部平均磨损量	mm
VB_{max}	后刀面磨损带中部最大磨损量	mm
VC	刀尖处后刀面磨损带宽度	mm
VN	切削刃切削工件外圆处出现磨损缺口的后刀面磨损带宽度	mm
V_s	砂轮磨损体积	mm ³
V_w	工件磨除体积	mm ³
$V_{w,b}$	单位磨削宽度金属磨除体积	mm ³ /mm
v	切削速度	m/min
v_c	切屑流出速度	m/min
v_f	进给速度	m/min
v_s	砂轮磨削速度	m/s
$v_{s,d}$	修整砂轮时的砂轮速度	m/s
v_w	磨削时工件进给速度	m/s
W_c	估算出的磨损体积	mm ³
W_R	实际测量出的磨损体积	mm ³
W_s	砂轮磨损重量	mg
W_w	磨屑重量	mg
w	磨粒平均间距	mm
X_{FZ}	主切削力实验公式中的指数	
x_v	切削速度实验公式中的指数	
Y_{FZ}	主切削力实验公式中的指数	
y_v	切削速度实验公式中的指数	
Z_{FZ}	主切削力实验公式中的指数	

续上表

符 号	名 称	单 位
Z_s	砂轮磨损率	m^3/min
Z_w	金属磨除率	m^3/min
$Z_{w,b}$	单位磨削宽度的金属切除率	$m^3/min \cdot mm$
α	线膨胀系数	
α	导温系数	m^2/s
α_e	工作后角	$^\circ, deg$
α_n	法向后角	$^\circ, deg$
α_0	主剖面后角	$^\circ, deg$
α'_0	副后角	$^\circ, deg$
α_{01}	消振棱后角	$^\circ, deg$
β	前刀面上的摩擦角	$^\circ, deg$
β	螺旋角	$^\circ, deg$
β_0	楔角	$^\circ, deg$
β_x	某一点的螺旋角	$^\circ, deg$
γ	剪切变形	
$\dot{\gamma}$	剪切变形速度	s^{-1}
γ_e	工作前角	$^\circ, deg$
γ_f	进给平面前角	$^\circ, deg$
γ_{max}	最大前角	$^\circ, deg$
γ_n	法向前角	$^\circ, deg$
γ_0	主剖面前角	$^\circ, deg$
γ_{0e}	主剖面工作前角	$^\circ, deg$
γ_{01}	负倒棱前角	$^\circ, deg$
γ_{0x}	某一点的前角	$^\circ, deg$
γ_p	切深平面前角	$^\circ, deg$
γ_e	任意剖面内的前角	$^\circ, deg$
δ	延伸率	
$\dot{\epsilon}$	剪切变形	
$\dot{\epsilon}$	应变速度	s^{-1}
ϵ_l	切向剪切变形	
η	前刀面与 α 滑移线之间的夹角	$^\circ, deg$
ϵ_n	法向剪切变形	
ϵ_r	刀尖角	$^\circ, deg$
η	流屑角	$^\circ, deg$
η_m	机床传动效率	
θ	切削温度	$^\circ C$
$\bar{\theta}$	平均切削温度	$^\circ C$
$\bar{\theta}$	切屑底面平均温升	$^\circ C$
θ_m	变形速度修正的温度	$^\circ C$
θ_{max}	最高温度	$^\circ C$
θ_s	剪切面平均温度	$^\circ C$
$\bar{\theta}_t$	前刀面接触区平均温度	$^\circ C$
κ_r	主偏角	$^\circ C$
κ_r'	副偏角	$^\circ C$
κ_{rs}	过渡刃主偏角	$^\circ C$
ΔW	单位法向力作用下工件的磨除率	$mm^3/s \cdot N$
Δs	单位法向力作用下砂轮的磨损率	$mm^3/s \cdot N$

λ_s	刃倾角	$^{\circ}, \text{deg}$
λ_{so}	工作刃倾角	$^{\circ}, \text{deg}$
μ	摩擦系数	
ξ	变形系数	
ξ_l	长度变形系数	
ξ_n	法向变形系数	
ρ	密度	kg/m^3
σ	正应力	Pa
σ_b	抗弯强度	Pa
σ_n	法向残余应力	Pa
σ_s	屈服应力	Pa
σ_t	切向残余应力	Pa
σ_r	前刀面正应力	Pa
τ	剪应力	Pa
τ_s	剪切屈服强度	Pa
τ_r	前刀上面的剪应力	Pa
τ_{ϕ}	剪切面上的剪应力	Pa
ϕ	剪切角	$^{\circ}, \text{deg}$
ϕ	钻头顶角的一半	$^{\circ}, \text{deg}$
ψ	磨削用量系数	
χ	切削合力方向与剪切面之间的夹角	$^{\circ}, \text{deg}$
Ψ	断面收缩率	
ω	切削合力方向与切削速度方向的夹角	$^{\circ}, \text{deg}$
∇^2	拉普拉斯算子	

第一章 刀具角度与切削层截面形状

§1-1 刀具角度的定义

一、坐标平面

刀具角度(例如前角、后角)是由刀具上参加切削的表面(前刀面、后刀面)与坐标平面(基面、切削平面)形成的。坐标平面与切削时刀具和工件的相对运动有关。相对运动有主运动和进给运动两种。

主运动 切削运动中速度最高、消耗功率最大的运动称为主运动。它是切下金属所必需的基本运动,如车削中工件的旋转运动,牛头刨床上刀具的往复运动或钻头、铣刀、砂轮的转动等。主运动速度称为切削速度,用 v (英文 velocity 的第一个字母)表示。其单位为 m/s 或 m/min 。若主运动是回转运动,切削速度可用下式计算:

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

式中 d ——工件或刀具外径,mm,

n ——工件或刀具转速,以每秒的转数 r/s 或每分钟的转数 r/min 表示。

进给运动 使新的金属层不断投入切削,以切完工件表面上全部余量的运动。用进给量表示它的大小,用 f (英文 feed 的第一个字母)表示进给量。对于外圆车削,进给量指工件每转一转,刀具沿工件轴向移动的距离,因而 f 的量纲为 mm/r 。对于钻头, f 表示钻头每转一转钻进工件内的距离,量纲也是 mm/r ,但因为钻头有两个主切削刃,每个切削刃切的只有 $f/2$,称为每齿进给量,用 a_p 表示,它的量纲为 mm/z , z 表示刀具的主切削刃数(齿数)。同样,铣刀的每齿进给量也用 a_p 表示,量纲也是 mm/z 。此外,铣床的工作台用进给速度 v_f 表示,它的量纲为 $mm/s(mm/min)$ 。

几种典型加工的主运动与进给运动见图1-1,图中 a_p 表示切削深度。任何加工都必需有一个主运动,同时一般也只有一个主运动。多数加工进给运动也只有一个,但有时可有几个。例如外圆纵向磨削,有工件回转的圆周进给、工件的轴向进给及砂轮架的径向进给等。

既然主运动与进给运动是同时进行的,所以刀具与工件的相对运动应该是这两者的合成运动。合成切削速度向量 \vec{v}_c 等于切削速度 \vec{v} 与进给速度 \vec{v}_f 的向量和,即

$$\vec{v}_c = \vec{v} + \vec{v}_f \quad (1-2)$$

根据合成切削速度向量可对坐标平面之一的基面作出如下的定义:

基面 通过切削刃某选定点,垂直于合成切削速度向量 \vec{v}_c 的平面。以外圆纵车或钻削为例,主切削刃各点的切削速度 \vec{v} 并不相等,因此合成切削速度向量 \vec{v}_c 也并不相等,沿主切削刃各点的基面也是变化的,所以在定义中首先明确通过切削刃的某选定点。横车时的基面示于图1-2中。在图中工件以转速 n 旋转,车刀以进给量 f 作横向进给。这两个运动的

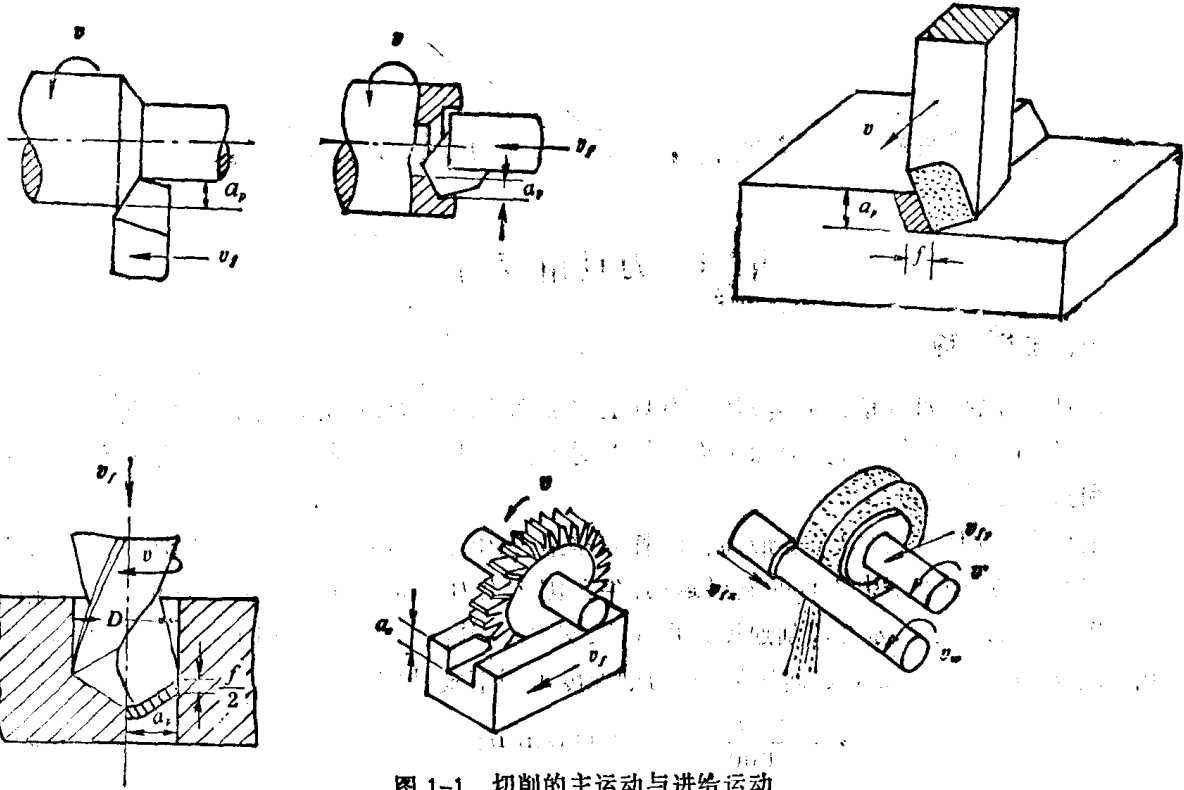


图 1-1 切削的主运动与进给运动

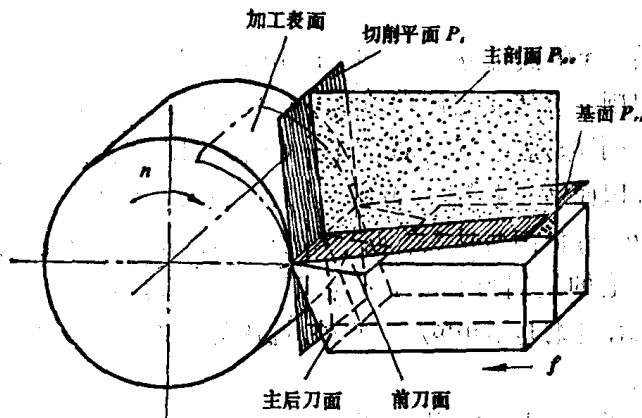


图 1-2 横车的基面、切削平面和主剖面

合成使切削刃切削出图示双点划线的加工表面。在切削刃上与加工表面相切的方向就是合成切削速度的方向。根据基面的定义，与这个方向相垂直的平面就是基面。实际上， v_f 比 v 要小得多，常常可忽略不计，以图 1-2 的横车为例， v_f 与 v 的比例为

$$\frac{v_f}{v} = \frac{nf}{1000v} = \frac{\frac{1000v}{\pi d} f}{1000v} = \frac{f}{\pi d}$$

f 一般为 0.2mm/r 左右，只要 d 大于 6.37mm ， $\frac{v_f}{v}$ 就小于 0.01 。也就是说，不考虑 v_f

造成的基面位置角度的偏差小于 0.57° 。对刀具角度来说，这个偏差是可以允许的。但当切断刀接近工件中心时，或者钻头近中心的横刃部分， d 值很小，这时 v_f 的影响就不能忽略不计。如果忽略 v_f ，则基面垂直切削速度；车削时通过切削刃上选定点与工件中心形成的径向平面就是基面，同理，旋转工具（钻头、铣刀）切削刃上某点的径向平面就是该点的基面，如图 1-3 所示。

另一个坐标平面——切削平面的定义如下：

切削平面 与切削刃上被选定点相切，且垂直于基面的平面，如图 1-2 所示。在忽略进给速度的情况下，车削时，切削平面与切削刃上选定点的工件圆周方向相切；钻削与铣削时，与该点刀具的圆周方向相切。

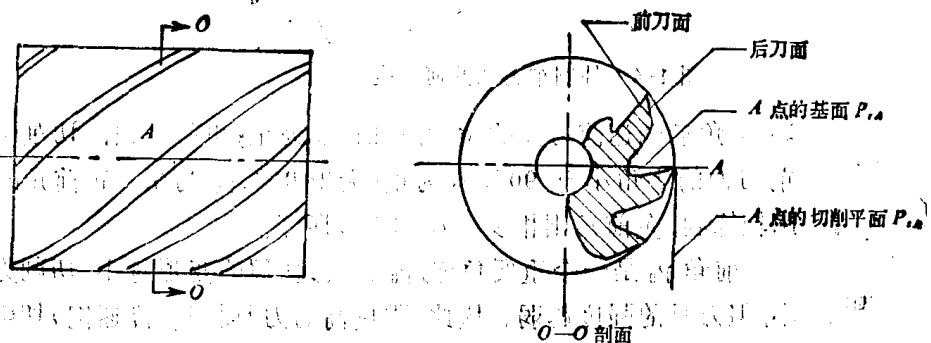
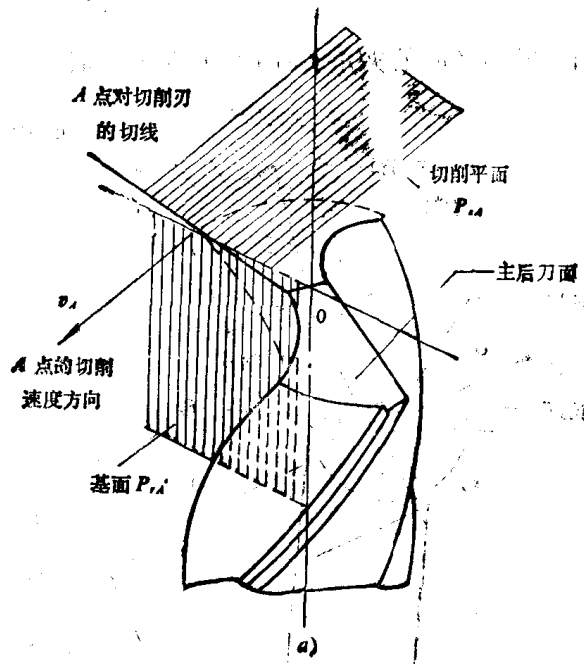


图 1-3 钻头与铣刀的坐标平面
a) 钻头 b) 铣刀

二、刀具的四个基本角度

切削刀具种类繁多,形状各异,但不管是什么刀具,都必须有切削刃,都必须有前刀面与后刀面。这一点是共同的。因此,我们可以把外圆车刀的刀头作为典型的例子来定义刀具的角度。

每条切削刃都只有四个基本角度,前角、后角、主偏角、刃倾角。大多数刀具的切削刃不止一条,例如外圆车刀可以有主切削刃与副切削刃两条。其中绝大多数的切削工作由主切削刃承担,因此我们主要分析主切削刃上的角度。通常情况下,当刃倾角不大时,可近似地认为切屑是在垂直主切削刃在基面上的投影方向流出的。所以,刀具的前角和后角一般都规定在主剖面内测量。

主剖面 过切削刃上被选定点,且同时垂直于基面与切削平面的平面,如图 1-2 所示。

1. 在主剖面内测量的角度

前刀面 刚形成的切屑沿其流出的表面,如图 1-2 中的车刀前刀面,图 1-3a)中与钻头主切削刃连接的螺旋槽及图 1-3b)中的铣刀前刀面。

前角 γ_0 前刀面与基面之间的夹角。在图 1-4 的主剖面 $O-O(P_0)$ 中基面顺时针方向旋

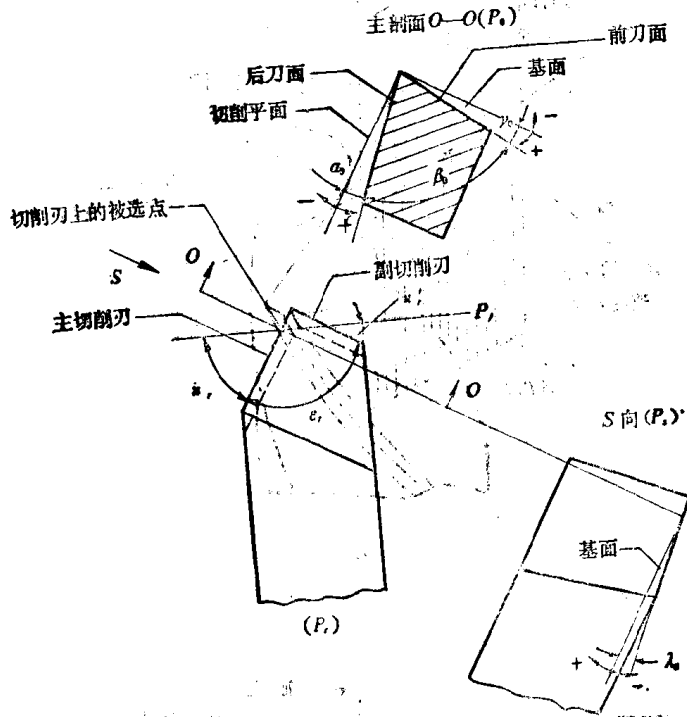


图 1-4 外圆车刀的几何角度

转 γ_0 角后到达前刀面的位置, 这时 γ_0 为正; 也就是说, 切削平面与前刀面的夹角小于 90° , γ_0 为正; 大于 90° , γ_0 为负。正前角的刀具比较锋利, 负前角则相反。如图 1-5 所示。

前角 γ_0 是一个重要角度, γ_0 越大, 切屑的变形越小, 切削力也越小, 但刀具的强度越弱。因此, 强度高的刀具材料(高速钢)切削强度低的有色金属(紫铜、铝)应该选用大的前角; 反之, 强度低的刀具材料(陶瓷)切削淬火钢等硬材料时应该选用负的前角。

主后刀面 和工件加工表面相对的表面, 如图 1-2、图 1-3 所示。

后角 α_0 后刀面与切削平面之间的夹角, 见图 1-4。后角的主要功用是减少后刀面与加工表面之间的摩擦, 保持刀刃必要的强度。当切削刃上的载荷不很大的情况下, 例如工件材料的硬度不很高, 切削厚度不很大, 为了减少后刀面的磨损, 在尺寸精度要求不很高的情况下, 可以适当增大后角。反之, 则不宜选用大的后角。

γ_0 、 α_0 的下标“0”表示在主剖面内测量的角度。

在主剖面内还有一个派生角度楔角 β_0 。

楔角 β_0 前刀面与后刀面之间的夹角, 见图 1-4。当 γ_0 、 α_0 已定, β_0 可按下式算得:

$$\beta_0 = 90^\circ - (\gamma_0 + \alpha_0) \quad (1-3)$$

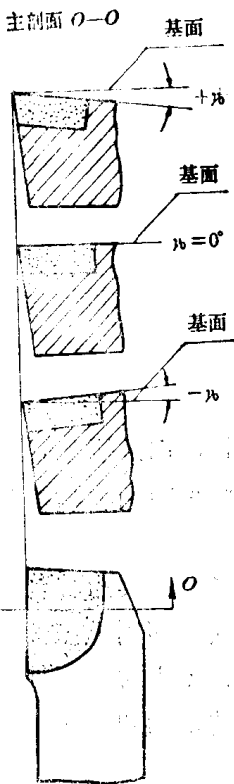


图 1-5 正前角、零前角和负前角

2. 在基面内测量的角度

在图 1-4 的正视图内, 可以看到两条切削刃, 一条是由前刀面与主后刀面形成的主切削刃, 另一条是与它相邻的副切削刃。这两条刃的位置由主偏角 κ_r 与副偏角 κ_r' 确定。