

普通高等院校机械类“十一五”规划教材

金属切削原理

JINSHU QIEXUE YUANLI

庞丽君 尚晓峰 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校机械类“十一五”规划教材

金属切削原理

庞丽君 尚晓峰 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书内容分为两部分,共计16章。第1章~第10章为金属切削原理部分,主要内容包
括:基本定义、刀具材料、金属切削过程、切削力、切削热与切削温度、刀具磨损和使用寿
命、工件材料切削加工性、已加工表面质量、刀具合理几何角度和切削用量的选择、磨削。
第11章~第16章为切削刀具部分,主要包括:成形车刀、铣削与铣刀、孔加工刀具、拉刀、
齿轮刀具及螺纹刀具。

本书可作为高等院校机械类及有关专业本科、专科的教材,也可供机械类和相近专业
的其他类型学校的师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属切削原理/庞丽君,尚晓峰编著. —北京:国防工业
出版社,2009.3

普通高等院校机械类“十一五”规划教材

ISBN 978-7-118-06211-3

I.金... II.①庞... ②尚... III.金属切削—理
论—高等学校—教材 IV.TG501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 016874 号

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路25号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12 1/4 字数 285 千字

2009年3月第1版第1次印刷 印数 1—4000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

本书根据沈阳航空工业学院教学大纲的修订和素质教育的需要,针对《金属切削原理》变成机械设计制造及其自动化专业基础平台课的现状,结合作者多年教学经验和科研成果,参考其他同类教材的基础上编写而成的。

本书力求突出基础理论的讲解,以增强工程实践能力的培养为目标,内容做到少而精,深浅度适中。在编写中既注重基本知识的阐述,又联系生产实际,还注意介绍航空企业的先进金属切削与刀具设计、制造及其使用技术。全书分为金属切削原理和刀具设计两大部分。重点放在切削原理部分:在阐明金属切削加工的基本定义、切削机理和切削过程中的基本现象和规律的基础上,进一步研究工件、刀具材料和切削参数合理选择问题,旨在提高加工表面质量和生产效率、最大限度地降低成本。刀具部分:简单介绍常用切削方法和刀具的结构特点和使用范围;为了满足刀具专业课与课程设计的需要,较详细介绍了几种专用刀具的设计原理和方法。

本书在第7章中对航空材料的加工性做了较系统的阐述和总结。书中带“*”号的章节供学生自学之用。

本书在编写中力求贯彻新国标,与国际标准接轨,并兼顾我国多年切削加工的习惯。

本书由庞丽君、尚晓峰编写,参与编写的还有王阿春、张桂木。具体分工是:庞丽君编写第1、3、8、9、11、12、13章;尚晓峰编写第4、5、6、10章;王阿春编写第16章;庞丽君、王阿春共同编写第2、14章;庞丽君、张桂木共同编写第7、15章。沈阳航空工业学院机电工程学院纪俐参加了书中插图的绘制工作,韩冬雪参与了文字的录入工作。全书由庞丽君教授审稿、定稿。

由于编者水平所限,编写时间仓促,书中如有错误不足之处,恳请批评指正。

目 录

第1章 基本概念	1
1.1 概述	1
1.2 切削运动、加工表面和切削用量三要素	1
1.2.1 切削运动和工件上的加工表面	1
1.2.2 主运动、进给运动与合成切削运动	2
1.2.3 切削用量三要素	3
1.3 刀具几何角度及其选择	4
1.3.1 车刀切削部分的组成	5
1.3.2 车刀切削部分的标注角度	5
1.4 刀具工作角度	7
1.5 切削层参数	8
1.6 切削方式	9
习题	10
第2章 刀具材料	11
2.1 刀具材料应具备的性能	11
2.2 高速钢	11
2.2.1 普通高速钢	12
2.2.2 高性能高速钢	13
2.2.3 粉末冶金高速钢	13
2.2.4 涂层高速钢	13
2.3 硬质合金	13
2.3.1 硬质合金的种类和性能	14
2.3.2 硬质合金的选用	16
2.3.3 其他新型硬质合金	18
2.4 高硬刀具材料	18
2.4.1 陶瓷	18
2.4.2 金刚石	19
2.4.3 立方氮化硼	20
习题	20

第3章 金属切削过程	21
3.1 概述	21
3.2 变形区划分及各变形区变形规律	21
3.2.1 切屑的形成过程	21
3.2.2 切削过程中的三个变形区	22
3.3 切削变形的表示方法	23
3.3.1 切削变形系数	23
3.3.2 相对滑移	24
3.3.3 相对滑移与变形系数的关系	25
3.4 剪切角	26
3.4.1 作用在切屑上的力	26
3.4.2 剪切角的计算	27
3.5 切屑的种类	28
3.5.1 切屑的类型	28
3.5.2 卷屑和断屑	29
3.6 前刀面上的摩擦	30
3.7 积屑瘤	31
3.7.1 积屑瘤现象及形成原因	31
3.7.2 积屑瘤对切削加工的影响	32
3.7.3 抑制积屑瘤的措施	32
3.8 影响切削变形的因素	33
3.8.1 工件材料的影响	33
3.8.2 刀具几何参数的影响	33
3.8.3 切削用量	34
习题	35
第4章 切削力	36
4.1 概述	36
4.2 切削力来源	36
4.3 切削合力、分力及切削功率	36
4.3.1 切削合力和分力	36
4.3.2 切削功率、单位切削功率和单位时间金属切除量	38
4.3.3 单位切削力 k_c	39
4.4 切削力测量和经验公式建立	39
4.4.1 测力仪	39
4.4.2 切削力的经验公式	41

4.4.3 实验数据的处理和经验公式的建立	42
4.5 影响切削力的因素	45
4.5.1 工件材料的影响	45
4.5.2 切削用量的影响	45
4.5.3 刀具几何参数的影响	47
4.5.4 其他因素的影响	48
习题	49
第5章 切削热与切削温度	50
5.1 切削热的产生和传出	50
5.2 切削温度测量	51
5.3 影响切削温度主要因素	53
5.3.1 切削用量对切削温度的影响	53
5.3.2 工件材料对切削温度的影响	53
5.3.3 刀具几何参数对切削温度的影响	54
5.3.4 其他因素的影响	55
习题	55
第6章 刀具磨损和使用寿命	56
6.1 刀具磨损形态与原因	56
6.1.1 刀具磨损形态	56
6.1.2 刀具磨损原因	57
6.2 刀具磨损过程与磨钝标准	59
6.2.1 刀具磨损过程	59
6.2.2 刀具磨钝标准	60
6.2.3 刀具使用寿命	60
6.3 切削用量与刀具使用寿命的关系	61
习题	63
第7章 工件材料的切削加工性	64
7.1 工件材料切削加工性的概念和衡量加工性的指标	64
7.1.1 工件材料切削加工性的概念	64
7.1.2 衡量加工性的指标	64
7.2 影响工件材料切削加工性的因素及改善途径	65
7.2.1 影响工件材料切削加工性的因素	65
7.2.2 改善材料可加工性的途径	66
7.3 材料切削加工性的综合分析方法	66

7.4 航空材料切削加工性分析	69
7.4.1 高温合金切削加工性分析	69
7.4.2 钛合金切削加工性分析	70
习题	72
第8章 已加工表面质量	73
8.1 概述	73
8.2 已加工表面形成过程	73
8.3 表面粗糙度	74
8.3.1 理论粗糙度	74
8.3.2 实际粗糙度	75
8.3.3 影响表面粗糙度的因素	77
8.4 加工硬化和残余应力	79
8.4.1 加工硬化	79
8.4.2 已加工表面的残余应力	83
习题	86
第9章 刀具合理几何角度和切削用量的选择	87
9.1 刀具合理几何参数选择	87
9.1.1 前角 γ_o 选择	87
9.1.2 后角 α_o 选择	88
9.1.3 副后角 α'_o 选择	89
9.1.4 主偏角 κ_r 选择	89
9.1.5 副偏角 κ'_r 选择	90
9.1.6 刃倾角 λ_s 选择	90
9.2 切削用量的选择*	91
9.2.1 选择切削用量的原则	91
9.2.2 切削用量三要素的合理选择	92
习题	96
第10章 磨削	97
10.1 砂轮特性与选择	97
10.1.1 砂轮的组织结构	97
10.1.2 砂轮的种类	100
10.2 磨削加工的类型与磨削运动	101
10.3 磨削过程	103
10.4 磨削力	105

10.5	磨削温度	106
10.6	磨削表面质量	107
	习题	108
第 11 章	成形车刀	109
11.1	成形车刀类型与应用	109
11.2	成形车刀的装夹	110
11.3	成形车刀前、后角形成	111
11.4	径向成形车刀的廓形设计	113
11.4.1	成形车刀廓形设计概念	114
11.4.2	成形车刀廓形设计原理	114
11.5	成形车刀加工圆锥面时的双曲线误差	116
11.5.1	双曲线误差产生的原因	116
11.5.2	避免或减少双曲线误差的措施	118
	习题	119
第 12 章	铣削与铣刀	120
12.1	铣刀分类及铣削特点	120
12.1.1	按用途分类	120
12.1.2	铣刀按齿背形式分类	121
12.1.3	铣削特点	122
12.2	铣刀的几何角度	122
12.2.1	圆柱铣刀的几何角度	122
12.2.2	端铣刀的几何角度	123
12.2.3	铣刀几何角度的合理选择	123
12.3	铣削参数及铣削基本规律	125
12.3.1	铣削要素	125
12.3.2	铣削切削层参数	125
12.3.3	铣削力与铣削功率	126
12.3.4	铣削方式	129
12.4	成形铣刀	131
	习题	134
第 13 章	孔加工刀具	135
13.1	孔加工刀具的特点及分类	135
13.2	麻花钻	141
13.2.1	麻花钻的结构和几何参数	142

13.2.2	钻削过程	143
13.2.3	麻花钻存在的问题及修磨方法	144
13.3	铰刀分类及结构要素	146
13.3.1	铰刀分类及用途	146
13.3.2	铰刀的结构及各主要参数选择与设计	147
13.3.3	铰刀的合理使用	150
习题		151
第 14 章	拉刀	152
14.1	拉刀的种类和用途	152
14.1.1	拉削特点	152
14.1.2	拉刀的种类和应用范围	153
14.2	拉刀的结构和拉削过程	155
14.2.1	拉刀的组成	155
14.2.2	拉刀切削部分几何参数	155
14.3	拉削方式	156
14.3.1	分层式	156
14.3.2	分块式	157
14.3.3	综合式	158
14.4	圆孔拉刀设计	158
14.4.1	拉刀工作部分设计	158
14.4.2	拉刀其他部分设计	164
14.4.3	拉刀强度及拉床拉力校验	165
14.5	矩形花键拉刀设计特点	166
14.5.1	花键拉刀刀齿组合方式	166
14.5.2	花键拉刀切削齿形状	167
14.5.3	倒角齿计算	169
习题		170
第 15 章	齿轮刀具	171
15.1	齿轮刀具的分类	171
15.1.1	按被加工的齿轮类型分类	171
15.1.2	按加工原理分类	171
15.2	成形齿轮铣刀	171
15.3	插齿刀	173
15.3.1	插齿刀的工作原理、类型和应用	173
15.3.2	插齿刀的齿面形状和切削角度	175

15.3.3	正前角插齿刀的齿形误差及其修正	176
15.4	齿轮滚刀	177
15.4.1	齿轮滚刀工作原理	177
15.4.2	滚刀基本蜗杆及造形误差	178
15.4.3	齿轮滚刀的结构参数	181
15.4.4	齿轮滚刀的合理使用	183
15.4.5	滚刀与插齿刀加工齿轮特点比较	183
	习题	185
第 16 章	螺纹刀具简介*	186
16.1	切削螺纹刀具	186
16.2	滚压螺纹刀具	191
	习题	191
	参考文献	192

第1章 基本概念

1.1 概 述

金属切削加工是用切削刀具将坯料或工件上的多余材料切除,以获得所要求的尺寸、形状、位置精度和表面质量的加工方法,是机械加工的基本方法。在切削加工过程中,刀具同工件之间必须有相对的切削运动,它可以通过人手或金属切削机床的作用来实现。机床、夹具、刀具和工件,构成金属切削加工的工艺系统。切削加工的各种现象和规律都要在机床、夹具、刀具和工件组成的工艺系统中去考察研究,研究这些现象和规律是学习各种金属切削加工方法的共同基础。

1.2 切削运动、加工表面和切削用量三要素

1.2.1 切削运动和工件上的加工表面

切削加工的方法很多,如车削、钻削、刨削、铣削、磨削、镗削、拉削等。其中车削加工是一种最常见的、典型的切削加工方法。如图 1-1 所示,普通外圆车削加工中的切削运动是由两种运动单元组合而成的,其一是工件的回转运动,它是切除多余金属以形成工件新表面的基本运动;其二是车刀的纵向进给运动,它保证了切削工作的连续进行。



图 1-1 外圆车削运动和加工表面

在这两个运动合成的切削运动作用下,工件表面的一层金属不断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,工件上有三个依次变化着的表面,即待加工表面、过渡表面和已加工表面,它们的涵义如下:

- (1) 待加工表面:加工时即将被切除的工件表面。
- (2) 已加工表面: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:切削刃正在切削的表面。它是待加工表面和已加工表面之间的表面,也被称作切削表面或加工表面。

上述车削运动和加工表面的分析认识,也适用于其他切削加工。

金属切削加工的种类很多,图 1-2 所示为其中的几种。各种切削加工的目的都是为了形成合乎要求的工件表面,因此,表面形成问题是切削加工的基本问题。从这个意义上来说,切削刃相对于工件的运动过程,就是表面形成过程。在这个过程中,切削刃相对于工件运动的轨迹面就是工件上的过渡表面和已加工表面。这里有两个要素,一是切削刃,二是切削运动。不同形状的切削刃加上不同切削运动的组合,即可形成各种工件表面。

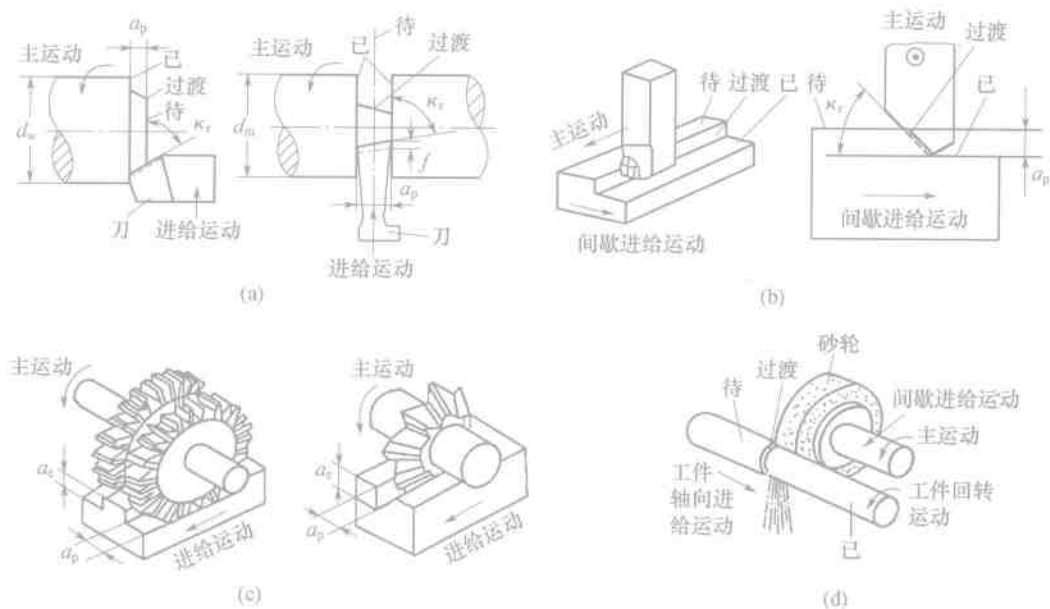


图 1-2 几种切削加工的工作运动与工件表面
(a) 车削; (b) 刨削; (c) 铣削; (d) 磨削。

1.2.2 主运动、进给运动与合成切削运动

各种切削加工中的运动单元,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。这两个运动的向量和,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

主运动是指直接切除工件上的切削层,使之转变为切屑,形成工件新表面的运动。主运动是在切削加工中形成机床切削速度或消耗主要动力的工作运动。这种运动在切削过程中只能有一个,通常主运动的速度最高,消耗的切削功率也较大。

如图 1-2 所示,在车削时,工件的回转运动是主运动;在铣削和磨削时,刀具或砂轮的回转运动是主运动;在平面刨削时,刀具的往复直线运动是主运动。

由于切削刃上各点的运动情况不一定相同,在研究问题时,应选取切削刃上某一适宜点,这个为便于研究问题所选取的适宜点,称为切削刃选定点。研究清楚该点的运动情况,再研究整个切削刃就比较容易了。

主运动方向:切削刃上选定点相对于工件的瞬时主运动方向,如图 1-3 所示。

切削速度 v_c :切削刃上选定点相对于工件的主运动的瞬时速度,如图 1-3 所示。

2. 进给运动

由机床或手动传给刀具或工件的运动称为进给运动,它配合主运动依次地或连续不断地切除切屑,同时形成具有所需几何特性的已加工表面。进给运动可以是间歇的,也可以是连续进行的。

进给运动方向:切削刃选定点相对于工件的瞬时进给运动的方向,如图 1-3 所示。

进给速度 v_f :切削刃选定点相对于工件的进给运动的瞬时速度,如图 1-3 所示。

对于间歇的进给运动,如刨削加工,可不规定进给速度。

3. 合成切削运动

由同时进行的主运动和进给运动合成的运动称为合成切削运动。

合成切削运动方向:切削刃选定点相对于工件的瞬时合成切削运动的方向,如图 1-3 所示。

合成切削速度 v_c :切削刃选定点相对于工件的合成切削运动的瞬时速度,该速度的方向与过渡表面相切,如图 1-3 所示。

由图 1-2 所示的几种切削加工的工作运动,可以看到:在一个工艺切削系统中,主运动只能有一个,而进给运动可有几个(图 1-2(d));工作运动有旋转运动也有直线运动;有连续运动也有间歇运动。工作运动可由刀具或工件分别完成或单独完成(如钻削、铰削)。

1.2.3 切削用量三要素

在切削加工过程中,需要针对不同的工件材料、刀具材料和其他技术要求来选定适宜的切削速度 v_c 、进给量 f 或进给速度 v_f 值,还要选定适宜的背吃刀量 a_p 值。 v_c 、 f 、 a_p 称为切削用量三要素。

1. 切削速度 v_c

大多数切削加工的主运动采用回转运动。回转体(刀具或工件)上外圆或内孔某一点的切削速度计算公式为

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

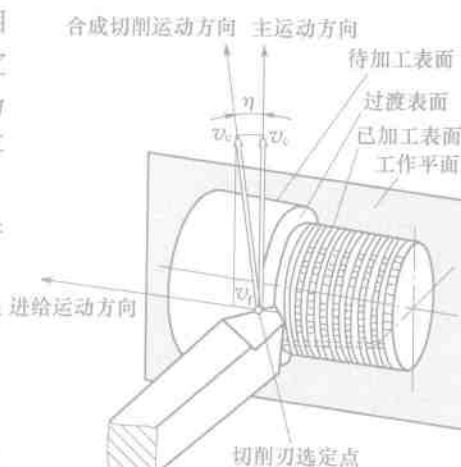


图 1-3 车削相对于工件的运动

式中 n ——主轴转数, r/s 或 r/min;

d ——工件或刀具上某一点的回转直径, mm。

在当前生产中, 磨削速度单位用米/秒(m/s), 其他加工的切削速度单位习惯用米/分(m/min)。

即使转速一定, 切削刃上各点由于工件直径不同, 切削速度也不相同。考虑到切削速度对刀具磨损和已加工质量有影响, 在计算时, 应取最大的切削速度。例如, 外圆车削时计算待加工表面上的速度(用 d_w 代入公式), 内孔车削时计算已加工表面上的速度(用 d_m 代入公式), 钻削、铣削时计算钻头、铣刀外径处的速度。

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 是指单位时间的进给量, 单位是 mm/s(或 mm/min)。

进给量 f 是工件或刀具每回转一周时两者沿进给运动方向的相对位移, 单位是毫米/转(mm/r)。

对于刨削、插削等主运动为往复直线运动的加工, 虽然可以不规定进给速度, 却需要规定间歇进给的进给量, 其单位为毫米/双行程(mm/d·str)。

用铣刀、铰刀、拉刀、齿轮滚刀等多刃切削工具进行切削时, 还应规定每一个刀齿的进给量 f_z , 即后一个刀齿相对于前一个刀齿的进给量, 单位是毫米/齿(mm/z)。

显而易见

$$v_f = f \cdot n = f_z \cdot Z \cdot n \text{ (mm/s 或 mm/min)} \quad (1-2)$$

因为进给运动是由刀具完成的, 故习惯上也称走刀运动, 其大小称为走刀量。

3. 背吃刀量 a_p

背吃刀量(旧称切削深度) a_p , 指垂直于进给速度方向测量的切削层最大尺寸, 单位为 mm。

对图 1-2 所示的车削和刨削加工来说, 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。

外圆柱表面车削时的切削深度可用下式计算:

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

对于钻削, 则

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

式中 d_w ——待加工表面直径, mm;

d_m ——已加工表面直径, mm。

1.3 刀具几何角度及其选择

刀具种类繁多、形状各异, 但其切削部分的结构要素和几何角度都有许多共同特征。外圆车刀的切削部分可以看作是各类刀具切削部分的基本形态, 各种形状复杂的刀具, 就其中的一

个刀齿而言,都可看作一把车刀。下面就以车刀为例,分析切削部分的构成和标注角度。

1.3.1 车刀切削部分的组成

车刀切削部分一般由三个刀面、两个切削刃和一个刀尖组成,如图 1-4 所示。

- (1) 前刀面 A_f : 切屑流经的表面。
- (2) 主后刀面 A_o : 与工件上过渡表面相对的表面。
- (3) 副后刀面 A_o' : 与工件上已加工表面相对的表面。
- (4) 主切削刃 S : 前刀面与主后刀面的交线,完成主要的切削工作。
- (5) 副切削刃 S' : 前刀面与副后刀面的交线。
- (6) 刀尖: 主、副切削刃汇交处。刀尖并非绝对尖锐,为了增加刀尖的强度和刚度,常做成一小段圆弧或直线,也称过渡刃。

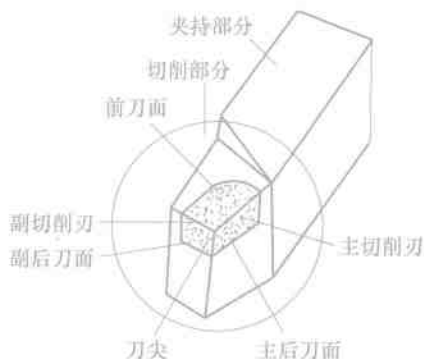


图 1-4 外圆车刀切削部分的组成

1.3.2 车刀切削部分的标注角度

为了确定车刀的空间位置,以便设计、制造、刃磨和测量刀具角度,必须建立一个由辅助平面所组成的坐标参考系,并以此为标准,分别在各辅助平面内定义和规定其几何角度。下面介绍 ISO 标准推荐的正交平面参考系和法平面参考系。

1. 正交平面参考系

正交平面参考系的三个坐标平面为基面 P_r 、切削平面 P_s 和正交平面 P_o ,如图 1-5 所示。

(1) 基面 P_r : 通过切削刃选定点,垂直该点切削速度的平面。车刀的基面是平行于车刀安装面的平面。

(2) 切削平面 P_s : 通过切削刃选定点,与切削刃相切,并垂直于基面的平面。对于直线切削刃它包含在切削平面内。

(3) 正交平面 P_o (主剖面): 通过切削刃选定点,同时垂直于该点的基面和切削平面的平面,或者称垂直于主切削刃在基面内投影的平面。

这样,由 P_r — P_s — P_o 组成一个正交平面参考系,这三个平面互相垂直。

2. 标注角度

刀具的标注角度是指在刀具工作图中要标出的几何角度,即在静止坐标参考系中的几何角度。

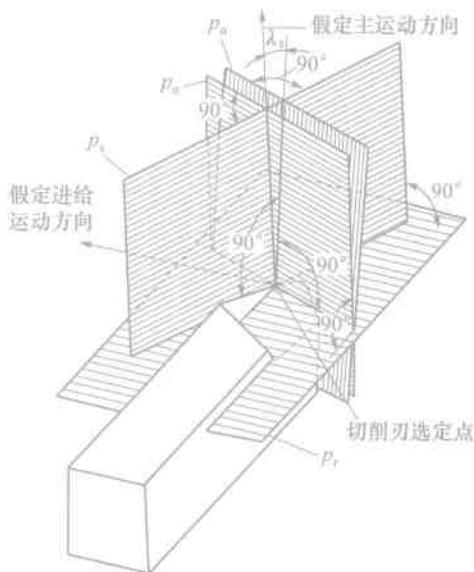


图 1-5 正交平面参考系和法平面参考系

它是刀具设计、制造、刃磨和测量的依据。

下面介绍正交平面参考系内车刀的标注角度,如图 1-6 所示。

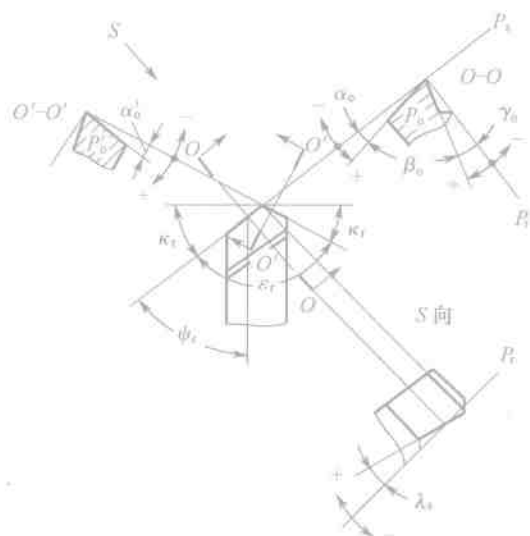


图 1-6 外圆车刀正交平面参考系的标注角度

1) 在正交平面 P_o 中测量的角度

(1) 前角 γ_o : 在正交平面内度量的基面 P_r 与前刀面 A_f 的夹角。前角是车刀重要的几何参数之一,它直接影响刀具的锋利程度和刃口强度。根据前刀面与基面相对位置的不同,前角可有正、负、零之分,如图 1-6 所示。

(2) 后角 α_o : 主后刀面 A_o 与切削平面 P_s 间的夹角,如图 1-6 所示。后角也有正、负之分,也是刀具的重要几何参数之一。它直接影响加工质量、刀具使用寿命和生产率。后角的主要作用是减少主后刀面与过渡表面间的摩擦。

(3) 楔角 β_o : 前刀面 A_f 和主后刀面 A_o 之间的夹角。楔角影响主切削刃的强度。楔角大,主切削刃的强度高。楔角与前角、后角的关系如下式所示:

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

2) 在基面 P_r 内测量的角度

(1) 主偏角 κ_r : 主切削刃在基面上的投影与进给方向的夹角。它主要影响切削层的性质,并直接影响切削刃的工作长度和单位切削刃上的负荷。

(2) 副偏角 κ'_r : 副切削刃在基面上的投影与进给反方向的夹角。副偏角的主要功用是形成已加工表面,因此, κ'_r 选取首先考虑已加工表面粗糙度要求,还要考虑刀尖强度、散热与振动等。

(3) 刀尖角 ϵ_r : 主切削刃与副切削刃在基面上投影的夹角。它影响刀尖强度和散热条件。刀尖角与主偏角、副偏角的关系如下式所示:

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

3) 在切削平面内测量的角度

刃倾角 λ_s : 主切削刃 S 与基面 P_r 间的夹角。它主要影响切屑流出方向、刀尖强度、切入切出的平稳性、切削分力及切削刃的工作长度。当刀尖位于主切削刃上的最高点时,