



普通高等教育“十二五”规划教材

# 机械制造工程学

朱 林 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

TH16/206

2013

普通高等教育“十二五”规划教材

本书是“十二五”规划教材，由机械工业出版社出版。本书共分10章，主要介绍机械制造的绪论、机械零件的失效形式及失效分析、机械零件的可靠性设计、机械零件的疲劳强度设计、机械零件的接触疲劳强度设计、机械零件的断裂力学设计、机械零件的腐蚀与防护、机械零件的润滑与密封、机械零件的装配与调试、机械零件的制造与检测。

# 机械制造工程学

朱林 主编

1. ①机... ②机... ③机... ④机... ⑤机... ⑥机... ⑦机... ⑧机... ⑨机... ⑩机...  
I. ①机... ②机... ③机... ④机... ⑤机... ⑥机... ⑦机... ⑧机... ⑨机... ⑩机...  
II. ①机... ②机... ③机... ④机... ⑤机... ⑥机... ⑦机... ⑧机... ⑨机... ⑩机...  
III. ①机... ②机... ③机... ④机... ⑤机... ⑥机... ⑦机... ⑧机... ⑨机... ⑩机...  
IV. ①机... ②机... ③机... ④机... ⑤机... ⑥机... ⑦机... ⑧机... ⑨机... ⑩机...  
V. ①机... ②机... ③机... ④机... ⑤机... ⑥机... ⑦机... ⑧机... ⑨机... ⑩机...

中国图书馆分类号 (2013) 第 180508 号

本书可作为高等院校机械类专业及相关专业的教材，也可供从事机械工作的工程技术人员参考。



北方工业大学图书馆



C00340272

中国石化出版社

2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷  
定价: 39.00元

## 内 容 提 要

《机械制造工程学》是机械类本科教材。本书将《金属切削原理》、《机床夹具设计原理》、《机械制造工艺学》和《机床概论》四本教材的内容进行了精选、修改、增删、重新编写,全面、系统地介绍了机械制造的基本原理、基本理论及基本装备,机械加工的误差及控制加工质量的方法,提高生产效率、降低工艺成本的方法,理论的实践应用,机械制造的新技术和新发展。

本书内容丰富,编排精炼,表达清楚,实践性强,可供大专院校机械类专业作为教材使用,也可供有关工程技术人员参阅。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械制造工程学 / 朱林主编. —北京:中国石化出版社,2013.8  
ISBN 978-7-5114-2302-3

I. ①机… II. ①朱… III. ①机械制造工艺-高等学校-教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 180208 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 16 印张 393 千字  
2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷  
定价:39.00 元

# 前 言

《机械制造工程学》是原中国石油天然气总公司“九·五”规划教材。经过十几年的使用，许多教师和读者提出了一些较好的意见和建议。根据这些建议及国家高等学校机械类本科专业的教学要求，我们对相关内容作了适当的删减与补充，重新编写而成。

本书分为基础篇、加工分析篇、应用篇及发展篇四大部分。分别论述了机械制造的基本原理、基本概念、基本规律与基本装备；加工误差、加工精度分析、提高生产效率，降低工艺成本的方法及措施；理论的实践与应用；机械制造技术的现状与发展等。

本教材有如下几个特点：

(1) 把过去的四门专业课教材(《金属切削原理》、《机械制造工艺学》、《机床概论》和《机床夹具设计原理》)的内容，根据宽口径的要求加以精选、重组，融合成一本新的教材，符合当前教学改革的方向。

(2) 在内容上取舍合宜，删去了原来四门课中不少专业性很强、面很窄的内容，但保留了机械制造工程的基础和主要内容。学生学了之后，能对机械制造工艺有一个全面而概括的认识，为进一步深入钻研打下良好的基础。

(3) 在体系上，全书分成基础篇、加工分析篇、应用篇和发展篇四部分，内容是由浅入深和相对独立的。任课教师可以根据安排的课时灵活掌握，可以讲授全书，也可以只讲前三篇、前两篇，甚至只讲第一篇也不失其完整性。教师的选择余地大，可以适应各种学时的教学要求，使本教材的适用面大，这是它的一大特色。

(4) 在“发展篇”中介绍了机械制造技术的动态和新发展，有助于扩大学生的眼界和知识面，这些内容在过去的四本教材中是没有的。

全书共分12章，第1章、第6章和第9章由朱林编写，第3章、第4章、第5章和第10章由刘战锋编写，第2章、第7章和第12章由赵洪兵编写，第8章和第11章由刘雁蜀编写。全书由朱林主编，刘战锋为副主编。

鉴于我们的业务水平有限，加之教材内容较多，编写的错误和不妥之处在所难免，恳请同行专家和读者不吝指教。

# 目 录

(741)	.....	4.0
(941)	.....	2.0
(122)	.....	1.7
(100)	.....	5.7
(101)	.....	5.7
(101)	.....	5.7
<b>第1部分 基础篇</b>		
<b>第1章 金属切削的基本原理</b>	.....	( 1 )
1.1 金属切削的基本概念	.....	( 1 )
1.2 金属切削变形理论	.....	( 9 )
1.3 金属切削的基本规律	.....	( 17 )
<b>第2章 金属切削的机床设备</b>	.....	( 33 )
2.1 金属切削机床的分类与型号编制	.....	( 33 )
2.2 车床	.....	( 36 )
2.3 孔加工机床	.....	( 39 )
2.4 铣床	.....	( 42 )
2.5 磨床	.....	( 44 )
2.6 齿轮加工机床	.....	( 47 )
<b>第3章 机床夹具的基本原理</b>	.....	( 51 )
3.1 机床夹具概述	.....	( 51 )
3.2 工件在夹具中的定位原理	.....	( 55 )
3.3 常见定位方式及定位元件	.....	( 59 )
3.4 定位误差分析	.....	( 67 )
3.5 工件在夹具中的夹紧原理	.....	( 73 )
<b>第4章 机械加工工艺设计基础</b>	.....	( 79 )
4.1 工艺过程的基本概念	.....	( 79 )
4.2 机械加工工艺规程设计	.....	( 85 )
4.3 加工余量及工序尺寸	.....	( 91 )
4.4 工艺尺寸链	.....	( 94 )

## 第2部分 加工分析篇

<b>第5章 机械加工精度</b>	.....	(104)
5.1 加工精度的基本概念	.....	(104)
5.2 影响加工精度的因素及分析	.....	(105)
5.3 加工误差的综合分析	.....	(128)
5.4 提高加工精度的工艺途径	.....	(134)
<b>第6章 机械加工表面质量</b>	.....	(140)
6.1 机械加工表面质量的基本概念	.....	(140)
6.2 机械加工后的表面粗糙度	.....	(141)
6.3 机械加工后的表面物理机械性能	.....	(143)

6.4	控制加工表面质量的工艺途径	(147)
6.5	机械加工中的振动	(149)
<b>第7章</b>	<b>装配质量的控制</b>	<b>(155)</b>
7.1	装配工艺规程的制订	(155)
7.2	装配尺寸链	(160)
7.3	保证装配精度的工艺方法	(165)
7.4	零部件的装配工艺性	(173)

### 第3部分 应用篇

<b>第8章</b>	<b>提高生产率的工艺措施及工艺成本分析</b>	<b>(177)</b>
8.1	提高生产率的工艺措施	(177)
8.2	工艺成本分析	(179)
<b>第9章</b>	<b>提高金属切削效率的途径</b>	<b>(184)</b>
9.1	切屑的控制	(184)
9.2	刀具材料的选用	(187)
9.3	改善工件材料切削加工性的途径	(192)
9.4	刀具几何参数的合理选择	(195)
9.5	切削用量的合理选择	(200)
9.6	切削液的选用	(202)
<b>第10章</b>	<b>机床夹具设计方法</b>	<b>(203)</b>
10.1	机床夹具设计的基本要求和步骤	(203)
10.2	机床夹具总图的标注	(204)
10.3	各类机床夹具设计要点	(207)
10.4	机床夹具设计实例	(216)
<b>第11章</b>	<b>典型零件的机械加工</b>	<b>(224)</b>
11.1	轴类及套类零件机械加工工艺特点	(224)
11.2	箱体类零件加工工艺的分析与设计	(226)

### 第4部分 发展篇

<b>第12章</b>	<b>先进制造技术及其发展趋势</b>	<b>(232)</b>
12.1	先进制造技术的内涵及特点	(232)
12.2	先进制造技术简介	(235)
12.3	先进制造技术的发展趋势	(248)

# 第 1 部分 基础篇

## 第 1 章 金属切削的基本原理

本章主要介绍金属切削的基本概念、基础理论和基本规律，着重介绍金属切削的变形过程、切削力、切削热、刀具磨损和刀具耐用度等内容。它们是认识和选用切削加工方法，分析加工过程及编制工艺规程不可缺少的基本知识。正确地运用这些知识，对于保证加工质量、提高生产效率及降低成本有着重要的意义。

### 1.1 金属切削的基本概念

#### 1.1.1 切削运动和切削过程中的工件表面

金属切削加工的种类很多，有车削、铣削、刨削、钻削、磨削等，如图 1-1 所示。切削运动和切削过程中的工件表面在工件上要切削加工出零件所需的表面，工件与刀具之间必须形成一定的相对运动。它们各自所做的运动称切削运动，由切削运动形成的工件表面称为加工表面。例如，车削外圆(图 1-2)，工件需作旋转运动，车刀需作纵向直线运动，在工件上形成三个加工表面。



图 1-1 各种切削加工

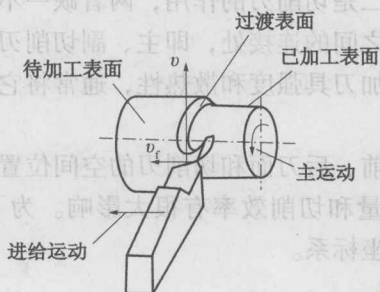


图 1-2 外圆车削的切削运动与加工表面

### 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。其特点是运动的速度最高、消耗功率最大。例如，车削外圆时的工件旋转运动就是主运动。不论主运动是旋转运动还是直线运动，其主运动的方向是假设工件不动，刀具相对于工件的运动方向。通常主运动只有一个。

### 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。这个运动所消耗的功率比主运动小。例如，车削外圆时的刀具纵向直线运动是进给运动。其他切削加工方法的进给运动可以是直线运动、旋转运动或两者的结合，进给运动可能不只是一个。进给运动的方向也是假设工件不动，刀具相对于工件的运动方向。

### 3. 切削过程中的工件表面

在切削过程中，通常工件上存在三个表面，以图 1-2 的外圆车削为例，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表面，并随着切削的继续进行而逐渐扩大。

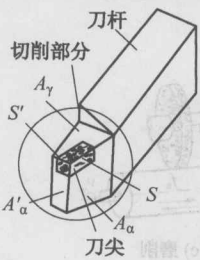
(3) 过渡表面 它是刀刃正切削着的表面，并且是切削过程中不断改变着的表面，但它总是处在待加工表面与已加工表面之间。

上述这些定义也适用于其他类型的切削加工。

## 1.1.2 刀具切削部分的几何参数

### 1. 刀具切削部分的表面与刀刃

图 1-3 是外圆车刀的切削部分，它具有下述表面和刀刃：



(1) 前刀面  $A_\gamma$  切下的切屑沿其流出的表面。

(2) 主后刀面  $A_\alpha$  与工件上过渡表面相对的表面。

(3) 副后刀面  $A'_\alpha$  与工件上已加工表面相对的表面。

(4) 主切削刃  $S$  前刀面与主后刀面相交而得到的边锋，并承担主要切削任务的切削刃。

(5) 副切削刃  $S'$  前刀面与副后刀面相交而得到的边锋，承担次要切削任务的切削刃。它协同主切削刃完成金属切除工作，以最终形成工件的已加工表面。由此可见，主副切削刃的定义说明两点，其一是切削刃的位置，其二是切削刃的作用，两者缺一不可。

(6) 刀尖 主、副切削刃之间的连接处，即主、副切削刃的交点。但大多数刀具在刀尖处磨出圆弧或直线切削刃以增加刀具强度和散热性，通常将它称为过渡刃。

### 2. 刀具标注角度的参考系

刀具几何角度是用来表示前、后刀面和切削刃的空间位置的。各刀面和切削面的空间位置对刀具的切削性能、加工质量和切削效率有很大影响。为了有一个统一的科学的评定标准，必须建立一个空间假定的坐标系。

#### 1) 坐标参考系建立的条件

(1) 假定运动条件 标注角度不考虑进给运动的影响。



(2) 假定安装条件 规定刀具的刃磨和安装基准面垂直于切削平面或平行于基面，同时规定刀杆的中心线同进给运动方向垂直，刀尖与工件回转轴线等高。

### 2) 刀具标注角度的参考平面

(1) 切削平面  $P_s$  通过刀刃上选定点，切于工件过渡表面的平面。在切削平面内包含有刀刃在该点的切线和主运动向量。

(2) 基面  $P_r$  通过刀刃上选定点，垂直于主运动向量的平面。显然，刀刃上同一点的基面与切削平面是互相垂直的。

### 3) 刀具标注角度的坐标参考系

当参考平面确定后，还应有一个平面作为标注和测量刀具角度的“测量平面”，由测量平面和参考平面就构成了所谓的刀具标注角度参考系。目前各个国家由于选用的测量平面不同，所以采用的刀具标注角度参考系也不完全统一。现在以常用的外圆车刀为例，来说明几种不同的刀具标注角度参考系。

车刀标注角度参考系可以随所选测量平面而不同，然而无论选用哪一个平面作测量平面，各个标注角度参考系的切削平面  $P_s$  和基面  $P_r$  却是共同的。一般用作标注前、后刀面角度的测量平面有三种：

(1) 正交平面  $P_o$ 。过主刀刃上选定点，并垂直于切削平面  $P_s$  与基面  $P_r$  的平面，如图 1-4 中所示的  $O-O$  剖面，因此正交平面  $P_o$  垂直于主刀刃在基面的投影。 $P_o$ 、 $P_s$  与  $P_r$  三个平面构成一个空间直角坐标系[见图 1-5(a)]。

(2) 法平面  $P_n$ 。它是过主刀刃上选定点并垂直于主刀刃或其切线的平面，如图 1-4 所示的  $N-N$  剖面。

(3) 背平面  $P_p$  和假定工作平面  $P_f$ 。由图 1-4 可知，背平面  $P_p$  是通过主刀刃上选定点，平行于刀杆轴线并垂直于基面  $P_r$  的平面，它与进给方向  $v_f$  是垂直的；假定工作平面  $P_f$  是通过主刀刃上选定点，同时垂直于刀杆轴线及基面  $P_r$  的平面，它与进给方向  $v_f$  平行。 $P_f$ 、 $P_p$  与  $P_r$  也构成空间直角坐标系[见图 1-5(c)]，简称背、假平面参考系。

因此，刀具标注角度对刀刃上同一选定点来说可以有表 1-1 和图 1-5 所示的三种。

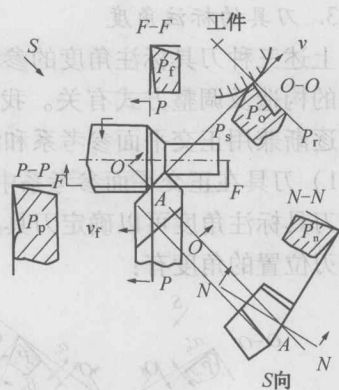
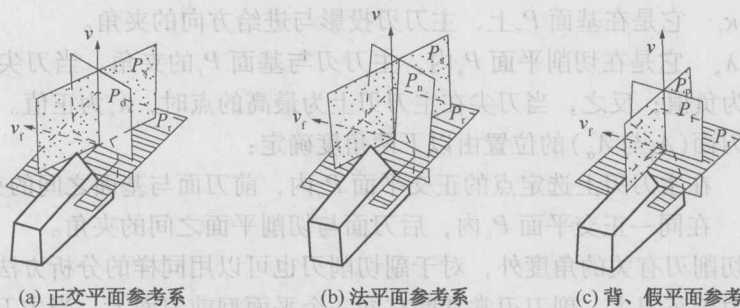


图 1-4 车刀标注角度的测量平面



(a) 正交平面参考系

(b) 法平面参考系

(c) 背、假平面参考系

图 1-5 刀具标注角度参考系

表 1-1 刀具标注角度参考系

参考系	参考平面	符 号
正交平面参考系	基面	$P_r$
	切削平面	$P_s$
	正交平面	$P_o$
法平面参考系	基面	$P_r$
	切削平面	$P_s$
	法平面	$P_n$
背、假平面参考系	基面	$P_r$
	背平面	$P_p$
	假定工作平面	$P_f$

### 3. 刀具的标注角度

上述三种刀具标注角度的参考系的选用, 与生产中实际采用的刀具角度刃磨方式和检测夹具的构造及调整方式有关。我国过去多采用正交平面参考系, 近年来参照国际 ISO 的规定, 逐渐兼用正交平面参考系和法平面参考系。背、假平面参考系则常见于美、日文献中。

#### 1) 刀具在正交平面参考系中的标注角度

刀具标注角度可以确定刀具上刀刃、刀面的位置。以外圆车刀为例(图 1-6), 确定车刀主刃位置的角度有:

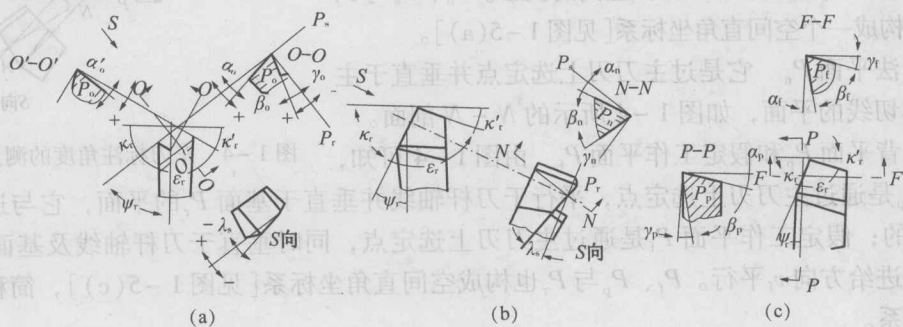


图 1-6 外圆车刀的标注角度

(1) 主偏角  $\kappa_r$  它是在基面  $P_r$  上, 主刀刃投影与进给方向的夹角。

(2) 刃倾角  $\lambda_s$  它是在切削平面  $P_s$  内, 主刀刃与基面  $P_r$  的夹角。当刀尖在主刀刃上为最低的点时,  $\lambda_s$  为负值; 反之, 当刀尖在主刀刃上为最高的点时,  $\lambda_s$  为正值。

车刀前、后刀面 ( $A_\gamma$  与  $A_\alpha$ ) 的位置由以下两角度确定:

(1) 前角  $\gamma_o$  在主刀刃上选定点的正交平面  $P_o$  内, 前刀面与基面之间的夹角。

(2) 后角  $\alpha$  在同一正交平面  $P_o$  内, 后刀面与切削平面之间的夹角。

除上述与主切削刃有关的角度外, 对于副切削刃也可以用同样的分析方法, 得到相应的四个角度, 但是由于车刀主、副刀刃常常磨在同一个平面型前刀面上, 当主刀刃及其前刀面已由上述四个基本角度  $\kappa_r$ 、 $\lambda_s$ 、 $\gamma_o$ 、 $\alpha$  确定之后, 副刀刃上的副刃倾角  $\lambda_s'$  和副前角  $\gamma_o'$  即随之确定, 故在刀具工作图上只需标注副刀刃上的下列角度:

(1) 副偏角  $\kappa_r'$  它是在基面上, 副刀刃投影与进给方向的夹角。

(2) 副后角  $\alpha_0'$ 。它是在副刀刃上选定点的副正交平面  $P_0'$  内, 副后刀面与副切削平面之间的夹角。副切削平面是过该选定点并包含切削速度向量和副刀刃在该点切线的平面。

以上是外圆车刀主、副刀刃上所必须标注的六个基本角度。有时根据实际需要, 还可再标出以下派生角度:

(1) 楔角  $\beta_0$ 。在主刀刃上选定点的正交平面  $P_0$  内, 前刀面与后刀面的夹角,  $\beta_0 = 90^\circ - (\alpha_0 + \gamma_0)$ 。

(2) 刀尖角  $\varepsilon_r$ 。在基面  $P_r$  上, 主刀刃和副刀刃的投影之间的夹角,  $\varepsilon_r = 180^\circ - (\kappa_r + \kappa_r')$ 。

(3) 余偏角  $\psi_r$ 。在基面  $P_r$  上, 主刀刃投影与进给方向垂线之间的夹角,  $\psi_r = 90^\circ - \kappa_r$ 。

以上角度的标注位置和符号可以按“入体”原则来确定。如主偏角  $\kappa_r$  的标注位置是主刀刃在基面上以刀尖为原点的“入体”投影方向与进给方向的夹角; 又如前角  $\gamma_0$  的符号是以基面为基准, 前刀面“入体”为正, 反之为负。

#### 2) 刀具在法平面参考系中的标注角度

刀具在法平面参考系中要标注的角度, 基本上和上面相类似。在基面  $P_r$  和切削平面  $P_s$  内表示的角度  $\kappa_r$ 、 $\kappa_r'$ 、 $\varepsilon_r$ 、 $\psi_r$  和  $\lambda_s$  是相同的, 只需将正交平面  $P_0$  内的  $\gamma_0$ 、 $\alpha_0$  与  $\beta_0$  改为在法平面  $P_n$  的法前角  $\gamma_n$ 、法后角  $\alpha_n$  与法楔角  $\beta_n$  [图 1-6(b)]。

#### 3) 刀具在背、假平面参考系中的标注角度

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  $\beta_f$  等角度 [图 1-6(c)]。

#### 4. 刀具的工作角度

上述刀具角度是在假定运动和安装条件下的标注角度。如果考虑实际切削运动(主运动与进给运动)的合成速度方向和安装情况, 则标注角度的参考系(即参考平面)将发生变化。按照实际切削工作中的参考系所确定的刀具角度, 称为工作角度(或切削角度)。

##### 1) 进给运动对刀具工作角度的影响

工件切断和切槽时, 进给运动是沿横向进行的, 如图 1-7 所示。  $P_s$  和  $P_r$  为不考虑进给运动时, 车刀刃上某一定点  $O$  的切削平面和基面。当考虑进给运动后, 刀刃上任一点  $O$  在工件上的运动轨迹为阿基米德螺线, 切削平面改变为过  $O$  点切于该螺线的平面  $P_{sc}$ , 基面则为过同一  $O$  点垂直于切削平面  $P_{sc}$  的平面  $P_{re}$ , 均相对于原来的  $P_s$  与  $P_r$  倾斜了一个角度  $\mu$ , 但工作正交平面  $P_{oe}$  与原来的  $P_0$  是重合的。因此, 工作角度参考系 [ $P_{re}$ 、 $P_{sc}$ 、 $P_{oe}$ ] 内的刀具工作前角  $\gamma_{oe}$  和工作后角  $\alpha_{oe}$  应为:

$$\gamma_{oe} = \gamma_0 + \mu$$

$$\alpha_{oe} = \alpha_0 - \mu$$

$$\tan \mu = \frac{f}{\pi d}$$

式中  $f$ ——工件每转一周时刀具的横向进给量, mm/r;

$d$ ——刀刃上选定点  $O$  在横向进给切削过程中相对于工件中心所处的直径, mm。

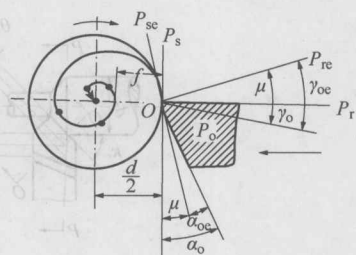


图 1-7 横向进给运动对工作角度的影响

由上式可知,  $d$  值过小,  $f$  值过大, 都有可能使工作后角变为负值。因而, 对于横向切削的刀具, 不宜选用过大的进给量  $f$ , 或者应适当加大标注(刃磨)后角  $\alpha_0$ 。

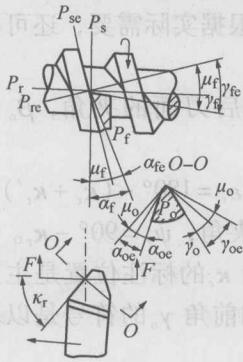


图 1-8 纵向进给运动  
对工作角度的影响

一般外圆车削时, 由于纵向进给量  $f$  较小, 它对车刀工作角度的影响通常均忽略不计; 但在车螺纹, 尤其是车多头螺纹时, 纵向进给的影响就不可轻视了。如图 1-8 车螺纹时的情况, 刀具左刃的工作角度将为:

$$\gamma_{fe} = \gamma_f + \mu_f$$

$$\alpha_{fe} = \alpha_f - \mu_f$$

$$\tan \mu_f = \frac{f}{\pi d_w}$$

式中  $f$ ——纵向进给量, 或被切螺纹的导程, mm;

$d_w$ ——工件直径, 或螺纹的外径, mm。

在工作正交平面内, 刀具的工作角度为:

$$\gamma_{oe} = \gamma_0 + \mu_0$$

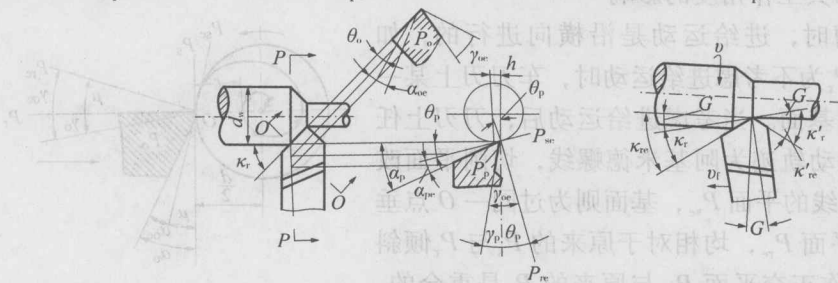
$$\alpha_{oe} = \alpha_0 - \mu_0$$

$$\tan \mu_0 = \tan \mu_f \sin \kappa_r = \frac{f \sin \kappa_r}{\pi d_w}$$

同样,  $\mu_f$  与  $\mu_0$  和进给量  $f$  及工件直径  $d_w$  有关。  $f$  愈大或  $d_w$  愈小,  $\mu_f$  与  $\mu_0$  值均增大。值得注意的是, 以上是分析车右螺纹(图示运动状况)时的车刀左侧刀刃, 此时右侧刀刃的  $\mu_f$  及  $\mu_0$  值的符号(正、负号)是相反的, 因此, 对车刀右侧刃工作角度的影响也正好相反。这说明车削右螺纹时, 车刀左侧刀刃应注意适当加大刃磨后角, 而右侧刀刃却应设法增大刃磨前角。

## 2) 刀具安装位置对工作角度的影响

如图 1-9(a)所示, 假定车刀  $\lambda_s = 0^\circ$ , 则当选定点装得高于工件中心时, 切削平面将变为  $P_{se}$ , 它切于工件过渡表面; 工作基面  $P_{re}$  保持与  $P_{se}$  垂直, 因而在工作背平面  $P_{pe}$  内, 刀具工作前角  $\gamma_{pe}$  增大, 工作后角  $\alpha_{pe}$  减小, 两者角度的变化值均为  $\theta_p$ , 即



(a) 装刀高低

(b) 刀杆中心与进给方向不垂直

图 1-9 刀具安装对工作角度的影响

$$\gamma_{pe} = \gamma_p + \theta_p$$

$$\alpha_{pe} = \alpha_p - \theta_p$$

$$\tan \theta_p = \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{d_w}{2}\right)^2 - h^2}}$$

式中  $h$ ——选定点高于工件中心线的数值, mm;

$d_w$ ——工件直径, mm。

在正交平面  $P_{oe}$  内, 刀具工作前角  $\gamma_{oe}$  和工作后角  $\alpha_{oe}$  的变化情况也与上面类似, 即

(2-1)

$$\gamma_{oe} = \gamma_o + \theta_o$$

(3-1)

$$\alpha_{oe} = \alpha_o - \theta_o$$

$$\tan \theta_o = \tan \theta_p \cos \kappa_r$$

式中  $\theta_o$ ——正交平面内工作角度的变化值。

(8) 如果选定点低于工件中心, 则上述工作角度的变化情况恰好相反。内孔镗削时装刀高低对工作角度的影响也是与外圆车削相反的。

(9) 如图 1-9(b) 所示。当车刀刀杆中心线与进给运动方向不垂直时, 则工作主偏角  $\kappa_{re}$  将增大(或减小), 而工作副偏角  $\kappa_{re}'$  将减小(或增大), 其角度变化值为  $G$ , 即

(10-1)

$$\kappa_{re} = \kappa_r \pm G$$

$$\kappa_{re}' = \kappa_r' \pm G$$

式中“+”或“-”号由刀杆偏斜方向决定;  $G$  为刀杆中心线的垂线与进给方向的夹角。

### 5. 刀具标注角度的换算

刀具在不同参考系中的标注角度, 有时由于设计和制造的需要, 须在相互之间进行必要的换算。在前述标注角度参考系中, 测量平面除法平面外, 都与基面垂直, 因此, 只要知道法平面与正交平面  $P_s$  内角度的关系(见图 1-10)和任意平面  $P_i$  (过主切削刃任意点并垂直于基面的平面, 与该点的切削平面  $P_s$  在基面  $P_r$  内的夹角为  $\tau_i$ , 见图 1-11。), 就可以进行换算。

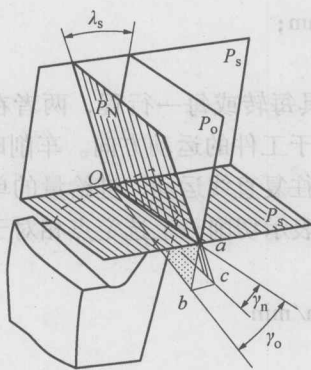


图 1-10  $\gamma_o$  与  $\gamma_n$  的关系

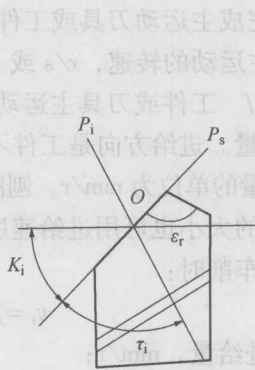


图 1-11 任意平面  $P_i$  内的角度换算

#### (1) 法平面与正交平面内前、后角的关系

$$\tan \gamma_n = \tan \gamma_o \cos \lambda_s \tag{1-1}$$

$$\cot \alpha_n = \cot \alpha_o \cos \lambda_s \tag{1-2}$$

#### (2) 任意平面 $P_i$ 与正交平面内前、后角的关系

$$\tan \gamma_i = \tan \gamma_o \sin \tau_i + \tan \lambda_s \cos \tau_i \tag{1-3}$$

$$\cot \alpha_i = \cot \alpha_o \sin \tau_i + \tan \lambda_s \cos \tau_i \tag{1-4}$$

#### (3) 任意平面 $P_i$ 在特殊位置时的角度计算

由图 1-11 和式(1-3)、式(1-4)可知

(1) 当  $\tau_i = 0^\circ$  时,  $P_i = P_s$ ,  $\gamma_i = \lambda_s$ ;

(2) 当  $\tau_i = 90^\circ$  时,  $P_i = P_o$ ,  $\gamma_i = \gamma_o$ ,  $\alpha_i = \alpha_o$ ;

(3) 当  $\tau_i = 90^\circ - \kappa_r$  时,  $P_i = P_p$ ,  $\gamma_i = \gamma_p$ ,  $\alpha_i = \alpha_p$ , 则

$$\tan \gamma_p = \tan \gamma_o \cos \kappa_r + \tan \lambda_s \sin \kappa_r \quad (1-5)$$

$$\cot \alpha_p = \cot \alpha_o \cos \kappa_r + \tan \lambda_s \sin \kappa_r \quad (1-6)$$

(4) 当  $\tau_i = 180^\circ - \kappa_r$  时,  $P_i = P_f$ ,  $\gamma_i = \gamma_f$ ,  $\alpha_i = \alpha_f$ , 则

$$\tan \gamma_f = \tan \gamma_o \sin \kappa_r - \tan \lambda_s \cos \kappa_r \quad (1-7)$$

$$\cot \alpha_f = \cot \alpha_o \sin \kappa_r - \tan \lambda_s \cos \kappa_r \quad (1-8)$$

(5) 当  $\tau_i = \varepsilon_r - 90^\circ$  时,  $P_i = P_o'$ ,  $\gamma_i = \gamma_o'$ , 则

$$\tan \gamma_o' = -\tan \gamma_o \cos \varepsilon_r + \tan \lambda_s \sin \varepsilon_r \quad (1-9)$$

(6) 当  $\tau_i = \varepsilon_r$  时,  $P_i = P_s'$ ,  $\gamma_i = \lambda_s'$ , 则

$$\tan \lambda_s' = \tan \gamma_o \sin \varepsilon_r + \tan \lambda_s \cos \varepsilon_r \quad (1-10)$$

### 1.1.3 切削用量、切削层要素和切削方式

#### 1. 切削用量

切削用量包括切削速度  $v$ 、进给量  $f$  和背吃刀量  $a_p$ 。

(1) 切削速度  $v$  切削加工时, 刀刃上选定点相对于工件的主运动的速度。其方向是工件不动, 刀具相对于工件的运动方向。

当主运动为旋转运动时, 切削速度由下式确定:

$$v = \frac{\pi d n}{1000} \quad \text{m/s 或 m/min}$$

式中  $d$ ——完成主运动刀具或工件的最大直径, mm;

$n$ ——主运动的转速, r/s 或 r/min。

(2) 进给量  $f$  工件或刀具主运动时, 工件或刀具每转或每一行程, 两者在进给运动方向上的相对位移量。进给方向是工件不动, 刀具相对于工件的运动方向。车削时, 主运动是旋转运动, 进给量的单位为 mm/r。刨削时, 主运动是往复直线运动, 进给量的单位为 mm/双行程。进给运动的大小也可用进给速度  $v_f$  来表示, 其表示切削刃上选定点相对于工件的瞬时进给运动速度, 车削时:

$$v_f = f n \quad \text{mm/s 或 mm/min}$$

式中  $f$ ——进给量, mm/r;

$n$ ——主运动转速, r/s 或 r/min。

(3) 背吃刀量  $a_p$  对外圆车削(图 1-1)而言, 背吃刀量  $a_p$  等于工件已加工表面与待加工表面间的垂直距离, 即

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \quad \text{mm}$$

式中  $d_w$ ——工件待加工表面的直径, mm;

$d_m$ ——工件已加表面的直径, mm。

#### 2. 切削层参数

刀刃在一次走刀中从工件待加工表面切下的金属层, 称为切削层。切削层的截面尺寸即为切削层参数, 通常该截面取在过切削刃上选定点并与该点主运动方向垂直的平面内(即不

考虑进给运动影响)。图1-12是车外圆时的切削层及其截面尺寸。车刀由位置I移动到II,工件I、II位置间的一层金属被切下。切削层的截面(图中剖面线部分)垂直于主运动方向,即在不考虑进给运动影响的基面内观察和测量。

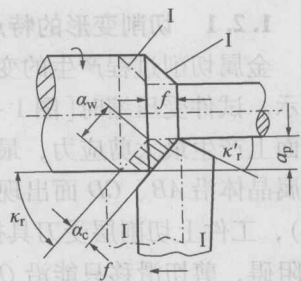


图1-12 切削层参数

(1) 切削厚度  $a_c$ 。在主切削刃选定点的基面内,垂直于过渡表面度量的切削层尺寸。车刀主切削刃为直线时,切削厚度为:

$$a_c = f \sin \kappa_r \quad (1-11)$$

由此可见,  $f$  或  $\kappa_r$  增大, 则  $a_c$  变厚。

(2) 切削宽度  $a_w$ 。在主切削刃选定点的基面内,沿过渡表面度量的切削层尺寸。当车刀主切削刃为直线时,切削宽度为:

$$a_w = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (1-12)$$

由上式可知,当  $a_p$  减小或  $\kappa_r$  增大时,  $a_w$  变短。

(3) 切削面积  $A_c$ 。在主切削刃选定点的基面内的切削层截面面积。车削时为:

$$A_c = a_c a_w = f a_p \quad (1-13)$$

### 3. 金属切除率

金属切除率  $Z_w$  是指单位时间切下工件材料的体积。这是衡量切削效率高的一种指标。车削时  $Z_w$  由下式计算:

$$Z_w \approx 1000 v f a_p \quad \text{mm}^3/\text{min} \quad (1-14)$$

由上可知,金属切除率等于切削用量三要素的乘积。

### 4. 切削方式

(1) 自由切削与非自由切削 只有一条直线刃参加切削称为自由切削。刀刃为曲线,或有几条刀刃同时参加切削称为非自由切削。非自由切削的切屑流出时受干扰且切屑变形比较复杂。一般,主切削刃的工作长度远远大于副切削刃的工作长度,为了方便分析和研究问题,常将非自由切削当作自由切削。

(2) 直角切削与斜角切削 直角切削是指刀具主切削刃的刃倾角  $\lambda_s = 0^\circ$  时的切削,此时主切削刃与切削速度方向成直角,故亦称为正交切削。

斜角切削是指刀具主切削刃的刃倾角  $\lambda_s \neq 0^\circ$  时的切削,此时主切削刃与切削速度方向不成直角。

## 1.2 金属切削变形理论

金属切削过程是塑性变形的过程,不但应变大而且是在高速、高温情况下产生的,涉及塑性理论及金属物理等学科的范围。当前对金属切削过程的研究工作已深入到塑性力学、有限元法、位错理论以及断裂力学的范畴,在实验方法上已采用了电子显微镜、高速摄影机等设备,从单因素试验进入多因素的综合试验,从静态观测进入了动态观察,从宏观研究进入了微观研究。

### 1.2.1 切削变形的特点

金属切削过程产生的变形与力学中的压缩试验产生的变形是不同的,其区别由图 1-13 表示。试件受压缩时[图 1-13(a)],在外力  $F$  作用下,与  $F$  作用方向呈  $45^\circ$  的  $AB$ 、 $CD$  线族面上产生最大剪应力,最大剪应力随着外力增加而增大,当剪应力达屈服强度时,试件的金属晶体沿  $AB$ 、 $CD$  面出现剪切滑移而形成塑性变形;图 1-13(b)是在切削时(直角自由切削),工件上切削层受刀具挤压作用后,在切削层内部产生塑性变形。由于切削层下部金属的阻碍,剪切滑移只能沿  $OM$  进行。此外,切削过程是在速度快、压力大、摩擦严重和温度高的情况下进行的,所以切削层内塑性变形更为复杂。利用切削变形的实验方法,可以较直观地了解切削层的塑性变形和剪切滑移过程。其中较为简易的实验方法是划格观察法,在经抛光的切削层侧面上划出小方格,通过低速直角自由切削(刨削),观察切削时的方格变形情况;也可以用快速落刀法,在切削过程中刀具瞬间脱离工件,使切屑根部来不及被切离而留在切削表面上,取下切屑根部,经金相磨片后,用金相显微镜就可清晰、精确地观察到切屑根部切削区域的金属变形情况;比较好的方法是用高速摄影机以每秒拍摄 10000 幅左右的画面,来完整地记录切削变形的动态过程。

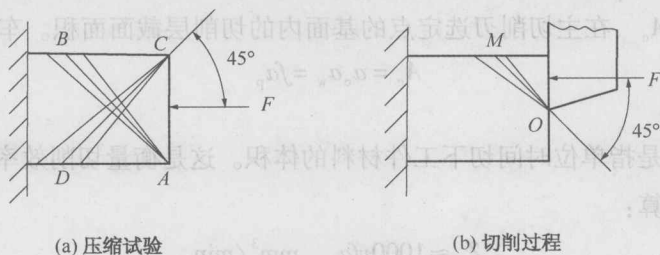


图 1-13 压缩试验变形与切削过程变形比较

根据以上方法获得的切屑根部切削区域的金属变形情况,可绘制出如图 1-14 所示的金属切削过程中的变形区示意图。即工件与刀具作用部位存在着三个变形区:

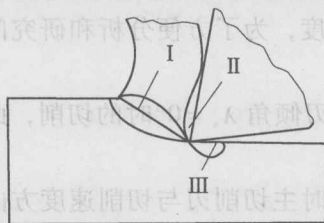


图 1-14 切削变形区

- 第 I 变形区 在切削层上形成切屑的变形区;
- 第 II 变形区 切屑流出时,与前刀面接触的切屑底层受摩擦作用后产生的变形区;
- 第 III 变形区 在已加工表面上与后刀面挤压摩擦形成的变形区。

三个区域的变形存在着相互联系、相互影响。切削过程中产生的各种现象均与各区域的变形有关。

### 1.2.2 切削变形过程

金属切削层经过了第 I 变形区的剪切滑移后形成切屑。其变形过程如图 1-15 (a) 所示(以直角自由切削形成的连续型切屑为例),切削层内质点  $P$  在切削力作用下向刀具逼近(亦即刀具切削时向前移动)至“1”位置时,剪应力达到材料屈服强度,在该位置产生了剪切滑移变形,此后  $P$  点没有由“1”移动到“2”处,而是在剪应力的作用下沿最大剪应力方向的剪切面上滑移至“2”处,之后同理继续滑移至“3”、“4”处后成为切屑上的一个质点并沿前刀面流出。在切削层上其余各点,移动至  $OA$  线均开始滑移,离开  $OM$  线终止滑移,在沿切削



宽度范围内,称  $OA$  是始滑移面,  $OM$  是终滑移面。 $OA$  与  $OM$  之间即为第 I 变形区。由于切屑形成的应变速度快、时间短,故  $OA$ 、 $OM$  面间距离很近,约为  $0.02 \sim 0.2\text{mm}$ ,所以常用  $OM$  滑移面表示第 I 变形区,  $OM$  面亦称剪切面。滑移是由金属结晶组织的晶格沿晶面上产生位移所致。如图 1-15(b) 所示,滑移使圆形晶粒变形拉长后呈椭圆形,椭圆形长轴方向就是切屑内部金属纤维伸长方向,该方向与滑移面不重合。

图 1-15(c) 表示切削层内  $mn$  线移至  $OM$  面时,经变形后使  $m'n'$  滑移至  $m''n''$ 。若将切削层内与  $mn$  平行的各线当作一叠卡片,则切屑形成过程可简单地当作各卡片间相互滑移(位错)过程。

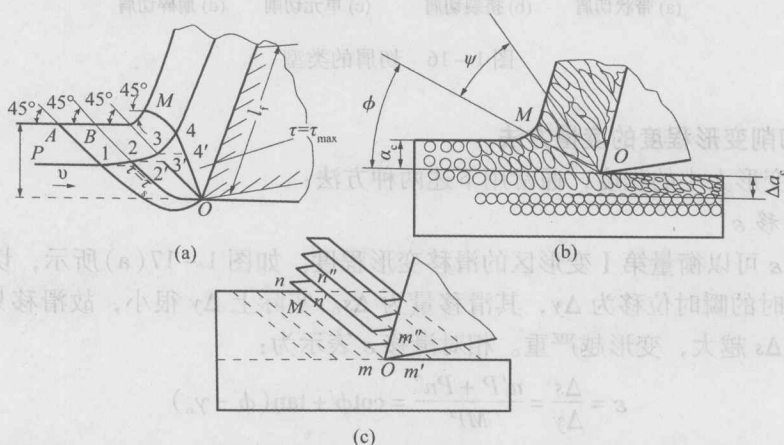


图 1-15 切屑形成过程

切削速度  $v$  与滑移面  $OM$  间的夹角  $\phi$  称为剪切角;金属纤维伸长方向与滑移面间的夹角为  $\psi$ 。

### 1.2.3 切屑形成的形态

由于形成切屑时变形程度的不同,一般可得到四种类型的切屑:

(1) 带状切屑带状切屑的外形呈带状[图 1-16(a)],它是完成了塑性变形后被刀具切削分离得到的切屑。

(2) 挤裂切屑挤裂切屑的背面局部开裂成节状[图 1-16(b)],这是由于切削层在塑性变形过程中,剪切面上局部位置处剪应力达到材料强度极限而产生局部挤裂造成的。

(3) 单元切屑单元切屑呈均匀的颗粒状[图 1-16(c)],在剪切面上产生的剪应力超过材料强度极限,切屑形成时被剪切断裂成颗粒状。

(4) 崩碎切屑切屑呈不规则的细粒状[图 1-16(d)],在切削脆性材料时,由于材料未经塑性变形而产生脆性崩裂得到的切屑。

实验表明,形成带状切屑时产生的切削力较小,较稳定,加工表面的粗糙度小;形成挤裂、单元切屑时的切削力变化较大,加工表面较粗糙;形成崩碎切屑时产生的切削力虽小,但具有较大的冲击振动,加工表面较粗糙。

金属切削层的变形程度不同,形成了不同形状切屑。切削层的变形程度是由被加工材料的应力—应变特性和加工条件决定的,例如切削塑性金属,若采用较高切削速度、较小进给量和较大的刀具前角即形成带状切屑。但随着切削速度减小、进给量增大和刀具前角减小,当剪应力达到和超过材料强度极限时,就可能得到节状的挤裂切屑或粒状的单元切屑;