



21世纪高等学校应用型规划教材

数控加工工艺

简明教程

■ 主 编 罗春华 刘海明

■ 副主编 蔡厚道 任晓莉

■ 主 审 张岐生

Shukong jiagong gongyi
jianming jiaocheng



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TG659

189

2007

21 世纪高等学校应用型规划教材

数控加工工艺简明教程

主 编	罗春华	刘海明
副主编	蔡厚道	任晓莉
主 审	张岐生	



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

全书共分为八章,内容包括数控加工切削基础、工件的装夹与数控机床夹具、数控加工工艺基础、数控车削加工工艺、数控铣削加工工艺、数控加工中心加工工艺、数控线切割加工工艺及模具数控加工工艺。

本书简明扼要、浅显易懂,理论结合实际,是一本针对性和实用性较强的教材,书中的实例都接近实际加工,可作为数控技术应用专业、机电一体化专业等专业课程的教材,也可供相近专业师生及有关工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

数控加工工艺简明教程/罗春华,刘海明主编. —北京:北京理工大学出版社, 2007.3

21 世纪高等学校应用型规划教材

ISBN 978-7-5640-1025-6

I. 数… II. ①罗…②刘… III. 数控机床-加工-高等学校-教材
IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 022641 号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本/787 毫米×960 毫米 1/16

印 张/22

字 数/435 千字

版 次/2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

印 数/1~4000 册

定 价/35.00 元

责任校对/张 宏

责任印制/李绍英

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

目前,随着国内数控机床用量的剧增和国家大力发展制造业,急需培养一大批掌握数控加工操作技能的高级技术人才。为了适应我国高等职业技术教育发展及数控应用型技术人才培养的需要,编写了此书。

基于目前数控教学的特点,编者根据多年的教学经验,并借鉴一直在机加工岗位从事操作的技术人员的经验,对本书的内容进行了精心编排,使其既能适应高职高专教学的需要,又能适应其他不同层次学习者的要求,还可供生产企业、公司、工厂等有关技术人员参考。

本书简明扼要,浅显易懂,理论结合实际。理论部分突出简明性、系统性、实用性和先进性。第1章主要介绍了数控加工切削的基础知识:切削运动与切削要素、金属切削过程的基本规律、金属切削刀具等;第2章介绍了工件的装夹与机床夹具设计基础知识:工件的装夹方法与定位原理、常用定位方式和定位元件、工件的夹紧与数控机床夹具等;第3章介绍了数控加工工艺基础知识:数控加工工艺规程的制订、加工余量的确定、机械加工精度及表面质量等;第4章介绍了数控车削加工工艺知识:数控车削加工工艺的特点、数控车削加工工艺的制定、难加工材料的数控车削加工等;第5章介绍了数控铣削加工工艺知识:铣削加工及数控铣削工艺分析、数控铣削加工工艺装备选用、典型结构的数控铣削加工工艺等;第6章介绍了数控加工中心加工工艺知识:加工中心加工工艺的拟订、典型零件的加工中心加工工艺分析等;第7章介绍了数控线切割加工工艺知识:数控线切割加工工艺的拟订、典型零件的数控线切割加工工艺等;第8章介绍了模具数控加工工艺知识:模具基本表面的机械加工方法、模具的加工方法、典型模具零件的加工工艺。

本书共有8章,由江西蓝天学院罗春华、刘海明主编,由江西蓝天学院张岐生教授主审,其中第1章、第3章、第5章5.4节、第6章、第7章由江西蓝天学院罗春华编写;第2章、第4章由江西蓝天学院刘海明编写;第5章5.1、5.2、5.3节、第7章由江西蓝天学

院任晓莉编写；第5章5.5、5.6节、第8章由江西蓝天学院蔡厚道编写；全书由罗春华统稿。

另外，本书编写时还参阅了许多高等院校、公司的教材和资料，并得到了从事数控车、数控铣、加工中心操作的技师、高级技师的宝贵建议和大力帮助，在此致以衷心的感谢。

本书完稿后，虽经本院数控教研室有关老师详细审阅，但难免有不足之处，望读者和同仁提出宝贵意见。

编者

目 录

第 1 章 数控加工的切削基础	1
1.1 切削运动与切削要素的概述	1
1.1.1 切削运动和工件加工表面	1
1.1.2 切削要素	3
1.2 金属切削过程的基本规律	5
1.2.1 金属切削过程中的变形区概述	5
1.2.2 切屑的形成和种类	7
1.2.3 积屑瘤与鳞刺	8
1.2.4 切削力	10
1.2.5 切削热与切削温度	13
1.3 金属切削刀具	15
1.3.1 刀具材料	15
1.3.2 刀具构造	18
1.3.3 刀具几何参数选择	26
1.3.4 刀具失效和刀具耐用度	33
1.4 切削用量与切削液的选择	37
1.4.1 合理选择切削用量	37
1.4.2 切削液的选择	39
1.5 改善工件材料的切削加工性能	41
1.5.1 工件材料切削加工性能的分类比较	41
1.5.2 影响工件材料切削加工性能的因素	42
1.5.3 改善工件材料切削加工性能的途径	44
习题一	44
第 2 章 工件的装夹与夹具设计基础	46
2.1 工件的装夹方法与定位原理	46

2.1.1	工件装夹的方法	46
2.1.2	工件定位的基本原理	47
2.2	常用定位方式和定位元件	49
2.2.1	常见定位方式	49
2.2.2	常见定位方案	53
2.3	定位误差	56
2.4	工件的夹紧与数控机床夹具	60
2.4.1	工件的夹紧	60
2.4.2	数控机床夹具	63
习题二		69
第3章	数控加工工艺基础	71
3.1	基本概念	71
3.1.1	生产过程	71
3.1.2	机械加工工艺过程的组成	71
3.1.3	机械加工的生产纲领、生产类型及其工艺特征	74
3.2	数控加工工艺规程的制订	76
3.2.1	工艺规程的概念、作用、步骤和格式	76
3.2.2	零件的结构工艺分析	83
3.2.3	零件毛坯的种类和选择	86
3.2.4	工件定位基准的选择	88
3.2.5	工艺路线的拟定步骤	94
3.3	加工余量的确定	107
3.3.1	加工余量的概念	107
3.3.2	工序加工余量的影响因素	109
3.3.3	确定加工余量的计算方法	110
3.4	工序尺寸和公差的确	110
3.4.1	基准重合时, 工序尺寸和公差的计算	111
3.4.2	基准不重合时, 工序尺寸和公差的计算	112
3.5	机械加工精度和表面质量	121
3.5.1	机械加工精度	121
3.5.2	机械加工表面质量	133
习题三		138

第4章 数控车削加工工艺	141
4.1 数控车床的加工特点和主要加工对象	141
4.1.1 数控车床的加工特点	141
4.1.2 数控车床的主要加工对象	142
4.2 数控车削加工的工艺特点	143
4.2.1 数控加工的工艺特点	143
4.2.2 数控车削加工的主要内容	144
4.3 数控车削加工工艺的制定	146
4.3.1 分析零件图	146
4.3.2 制定工艺方案	147
4.4 典型零件编程实例	161
4.4.1 轴类零件的工艺分析与编程	161
4.4.2 套类零件的工艺分析与编程	164
4.4.3 螺纹车削加工实例	169
4.5 难加工材料的数控车削加工	171
4.5.1 难加工材料的分类和特点	171
4.5.2 难加工材料的数控车削	172
4.6 数控车拉工艺介绍	175
4.6.1 车拉工艺原理	175
4.6.2 数控车拉工艺的应用	177
习题四.....	178
第5章 数控铣削加工工艺	181
5.1 数控铣床及其加工对象	181
5.1.1 数控铣床的特点	181
5.1.2 数控铣削加工对象	182
5.2 铣削加工及数控铣削工艺分析	184
5.2.1 铣削加工的特点和方式	184
5.2.2 适合数控铣削零件的工艺分析	187
5.3 数控铣削加工工艺装备选用	192
5.3.1 数控铣削加工的工件装夹	193
5.3.2 数控铣削加工的刀具与选用	195

5.3.3 铣削用量的选择	199
5.4 典型结构的数控铣削加工工艺	203
5.4.1 平面铣削工艺	203
5.4.2 立铣刀的周铣削工艺	206
5.5 典型零件的数控铣削加工工艺分析	216
5.5.1 孔类零件加工工艺分析	216
5.5.2 轮廓加工工艺分析	217
5.5.3 挖槽加工工艺分析	218
5.5.4 支架零件的数控铣削加工工艺	220
5.6 数控铣削加工综合实例	225
5.6.1 零件图工艺分析	226
5.6.2 数控机床选择	226
5.6.3 加工顺序的确定	227
5.6.4 确定装夹方案	227
5.6.5 刀具与切削用量选择	228
5.6.6 拟订数控铣削加工工序卡片	228
5.6.7 加工程序	229
习题五	233

第6章 数控加工中心加工工艺

6.1 加工中心概述	236
6.1.1 加工中心加工的对象	236
6.1.2 加工中心的工艺特点	239
6.2 加工中心加工工艺的拟订	240
6.2.1 零件图的工艺分析	240
6.2.2 加工方法的选择	242
6.2.3 加工阶段的划分	243
6.2.4 加工顺序的安排	243
6.2.5 夹具的选择和工件装夹	244
6.2.6 刀具的选择	246
6.2.7 进给路线的确定	254
6.2.8 切削用量的选择	257
6.2.9 加工中心的选择	259

6.3 典型零件的加工中心加工工艺分析	262
6.3.1 壳体的加工工艺	262
6.3.2 支承套的加工工艺	266
6.3.3 盖板的加工工艺	271
6.3.4 异形支架的加工工艺	276
习题六	282
第7章 数控线切割加工工艺	285
7.1 数控线切割概述	285
7.1.1 线切割的加工原理	285
7.1.2 线切割的加工特点	286
7.1.3 线切割的加工应用	287
7.2 数控线切割加工工艺的拟订	287
7.2.1 零件图的工艺分析	288
7.2.2 工艺准备	289
7.2.3 工件的装夹和位置的校正	294
7.2.4 电极丝的位置校正	296
7.2.5 切割路线的选择	296
7.2.6 穿丝孔位置的确定	298
7.2.7 接合突尖的去除方法	298
7.3 典型零件的数控线切割加工工艺	300
7.3.1 冷冲模加工	300
7.3.2 零件加工	302
7.3.3 数控线切割的应用技巧与经验	304
习题七	307
第8章 数控模具加工工艺	309
8.1 模具基本表面的机械加工方法	309
8.1.1 模具零件的常用加工方法	309
8.1.2 选择模具表面加工方法的原则	310
8.2 模具的加工方法概述	311
8.2.1 模具的成型制模法	311
8.2.2 模具的堆积制模法	320

8.2.3 模具的切除制模法	324
8.3 典型模具零件的加工工艺	332
8.3.1 模具零件车削加工工艺	332
8.3.2 模具零件铣削加工工艺	333
8.3.3 模具零件加工中心加工工艺	335
习题八	337
参考文献	341

第 1 章

数控加工的切削基础

1.1 切削运动与切削要素的概述

1.1.1 切削运动和工件加工表面

在金属切削加工过程中，数控机床的运动主要包括切削运动和辅助运动。

1. 切削运动

切削加工就是用金属切削刀具把工件毛坯上余量（预留的金属材料）切除，获得图样所要求的零件。在切削过程中，刀具和工件之间必须有相对运动，这种相对运动就称为切削运动。切削运动是由金属切削机床通过两种运动单元组合而成的，其一是产生切削力的运动，其二是保证了切削工作连续进行的运动，按照它们在切削过程中所起的作用，通常分主运动和进给运动。

（1）主运动

主运动是由机床提供的主要运动，它使刀具和工件之间产生相对运动，从而使刀具接近工件并切除切削层，即切削过程中切下切屑所需的运动。其特点是切削速度（ v_c ）最高，消耗的机床功率也最大。如图 1-1 所示，主运动必须有一个，可以是旋转运动，如车削时工件的旋转运动，铣削时铣刀的旋转运动，磨削工件时砂轮的旋转运动，钻孔时钻头的旋转运动等；也可以是直线运动，如刨削时刀具或工件的往复直线运动。

（2）进给运动

进给运动又称走刀运动，是由机床提供的使刀具与工件之间产生附加的相对运动，加上主运动即可不断地或连续地切除切削层，并得出具有所需几何特性的已加工表面。其特点是消耗的功率比主运动小得多。如图 1-1 所示，进给运动可以有一个、两个或多个，甚至没有（如拉削）。其形式可以是连续的运动，如车削外圆时车刀平行于工件轴线的纵向运动，钻孔时钻头沿轴向的直线运动等；也可以是间断运动，如刨削平面时工件的横向移动；或两者的组合，如磨削工件外圆时砂轮横向间断的直线运动和工件的旋转运动及轴向（纵向）往复直线运动。



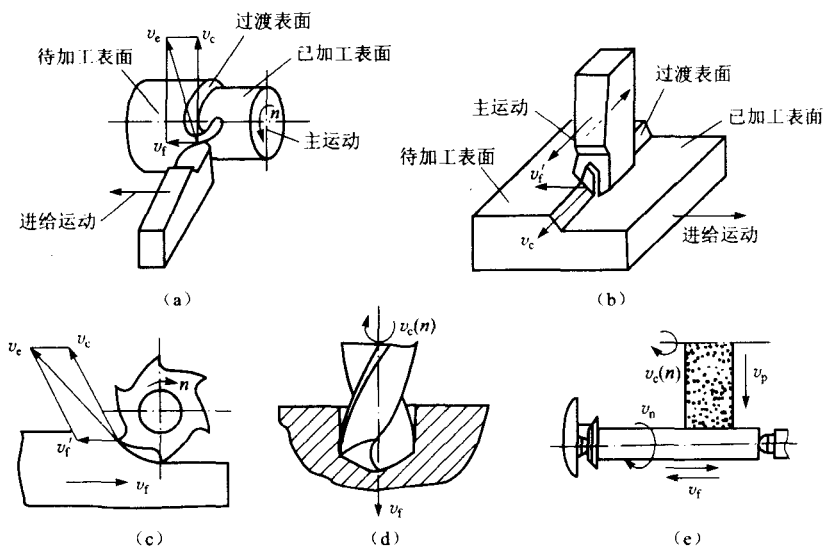


图 1-1 几种常见加工方法的切削运动

(a) 车外圆; (b) 侧平面; (c) 铣平面; (d) 钻孔; (e) 磨外圆
 v_c —主运动; v_f —纵向进给运动; v_n —圆周进给运动; v_p —径向进给运动

(3) 合成切削运动

当主运动和进给运动同时进行时, 由主运动和进给运动合成的运动称为合成切削运动, 又叫表面成形运动。刀具切削刃上选定点相对工件的瞬时合成运动方向称为合成切削运动方向, 其速度称为合成切削速度, 该速度方向与过渡表面相切, 如图 1-1 所示。合成切削速度 v_e 等于主运动速度 v_c 和进给运动速度 v_f 的矢量和, 即

$$v_e = v_c + v_f \quad (1-1)$$

2. 辅助运动

除主运动、进给运动以外, 机床在数控加工过程中, 还需一系列的其他运动, 即辅助运动。辅助运动的种类很多, 主要包括刀具接近工件、切入、切出工件、快速返回原点的运动, 机床对刀时的运动, 多工位工作台和多工位刀架的分度运动等。另外, 机床的启动、停车、变速、换向以及工件的夹紧、松开等操纵控制运动, 也属于辅助运动。辅助运动在整个加工过程中是必不可少的。

3. 加工中的工件表面

在金属切削加工过程中, 工件上多余的材料不断地被刀具切除而转变为切屑, 与此同时, 工件在切削过程中形成了三个不断变化着的表面, 如图 1-1 所示, 分别如下:

(1) 待加工表面

工件上有待切除切削层的表面称为待加工表面。

(2) 过渡表面

工件上由切削刃形成的那部分表面，它在下一切削行程（如刨削）、刀具或工件的下一转里（如单刃镗削或车削）将被切除，或者由下一切削刃（如铣削）切除的表面。

(3) 已加工表面

工件上经刀具切削后产生的表面称为已加工表面。

1.1.2 切削要素

切削要素包括切削用量和切削层的几何参数。如图1-2所示。

1. 切削用量三要素

切削用量是用来表示切削运动、调整机床加工参数的参量，用来定量表述主运动和进给运动。切削用量包括切削速度、进给量和背吃刀量三个要素，如图1-2所示。

(1) 切削速度 (v_c)

切削刃上选定点相对于工件主运动的瞬时线速度称为切削速度，单位是 m/min 。当主运动是回转运动时，线速度 v_c 的计算公式如下：

$$v_c = \pi d n / 1000 \quad (1-2)$$

需要注意的是：车削加工时，应计算待加工表面的切削速度。

当主运动是往复直线运动时，则常以往复运动的平均速度作为切削速度，线速度 v_c 的计算公式如下：

$$v_c = 2 L n / 1000 \quad (1-3)$$

式中 d ——切削刃上选定点处所对应的工件或刀具的回转直径，单位为 mm ；

n ——工件或刀具的转速，单位为 r/min ；

L ——工件或刀具作往复运动的行程长度，单位为 mm 。

(2) 进给量 (f)

在主运动的一个循环内，刀具在进给运动方向上相对于工件的位移量，称为进给量。可用刀具或工件每转或每行程的位移量来表达或度量，如图1-2所示，其单位用 mm/r （如车削、镗削等）或 mm/行程 （如刨削、磨削等）表示。

数控编程时，也可以用进给速度 v_f 表示刀具与工件的相对运动速度，单位是 mm/min 。车削时的进给速度 v_f 为：

$$v_f = n f \quad (1-4)$$

对于铰刀、铣刀等多齿刀具，通常规定每齿进给量 f_z （单位： mm/z ），其含义是刀具每转过一个齿，刀具相对于工件在进给运动方向上的位移量，即

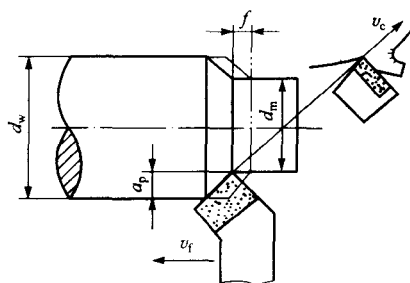


图1-2 切削用量的三要素

$$f_z = f/z \quad (1-5)$$

式中 z ——刀具齿数。

(3) 背吃刀量 (a_p)

也叫切深, 是已加工表面与待加工表面之间的垂直距离, 称为背吃刀量, 其单位为 mm。车削外圆时:

$$a_p = (d_w - d_m) / 2 \quad (1-6)$$

式中 d_w ——待加工表面直径, 单位为 mm;

d_m ——已加工表面直径, 单位为 mm。

镗孔时式 (1-6) 中的 d_w 与 d_m 的位置互换一下, 钻孔加工的背吃刀量为钻头的半径。

2. 切削层参数

在金属切削过程中, 刀具或工件沿进给运动方向每移动一个 f (车削) 或 f_z (多齿刀具切削) 所切除的金属层, 称为切削层。图 1-3 所示为车削时的切削层, 当工件旋转一转时, 车刀主切削刃由过渡表面 I 的位置移动到过渡表面 II 的位置, 其间所切除的工件材料层即为车削时的切削层。切削层的尺寸称为切削层参数, 切削层参数通常在基面内测量。

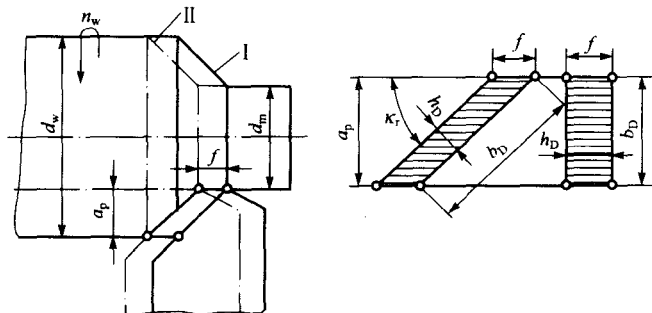
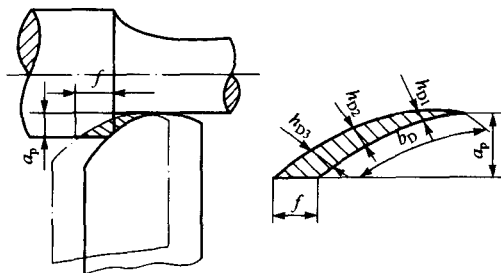


图 1-3 外圆纵车切削层的参数

(1) 切削厚度 (h_D)

切削厚度是指在垂直于切削刃方向度量的切削层截面的尺寸, 单位为 mm。当主切削刃为直线时, 各点的切削厚度相等, 如图 1-3 所示, 并可近似按式 (1-6) 计算。在曲线切削刃上, 各点的切削厚度是变化的如图 1-4 所示。



$$h_D \approx f \sin \kappa_r \quad (1-7) \quad \text{图 1-4 曲线切削刃工作时的切削厚度与宽度}$$

(2) 切削宽度 (b_D)

切削宽度是指沿切削刃方向度量的切削层截面的尺寸, 单位为 mm。它大致反映了刀具

主切削刃参与切削工作的长度,如图1-3所示。对于直线刃的切削宽度可按式(1-8)估算:

$$b_D = a_p / \sin \kappa_r \quad (1-8)$$

(3) 切削面积 (A_D)

切削面积是指切削层的横截面积,单位为 mm^2 。车削时切削面积可按式(1-9)计算:

$$A_D = b_D h_D \quad (1-9)$$

在实际切削时,由于刀具副偏角的存在,刀具常常会在已加工表面上留下刀纹,这些刀纹的横截面积即为残留面积 (ΔA_D)。残留面积将直接影响已加工表面的粗糙度,同时也减小了切削层的切削面积。

1.2 金属切削过程的基本规律

1.2.1 金属切削过程中的变形区概述

研究证明:金属的切削过程实质上是切削金属层在刀具挤压作用下产生剪切滑移的塑性变形直到剪切断裂的过程。在这个过程中切削力、切削热、加工硬化和刀具磨损等都对加工质量和生产率有很大的关系。

为了研究方便,通常把切削过程中的塑性变形区域划分为三个变形区,如图1-5所示:

1. 第一变形区

被切削金属层在刀具前面的挤压力作用下,首先产生弹性变形,当最大切应力达到材料的屈服极限时,即沿图1-6中的 $OA-OM$ 曲线发生剪切滑移,并依次由位置1移至位置2,2-2'之间的距离就是它的滑移量。随着刀具前刀面的逐渐趋近,塑性变形也逐渐增大,滑移依次为3-3'、4-4',直至 OM 曲线,滑移终止,被切削金属层与母体脱离成为切屑沿刀具前面流出。曲线 $OAMO$ 所包围的区域就是剪切滑移区,又称第一变形区,也是金属切削过程中的主要变形区,其宽度很窄,约为 $0.02 \sim 0.2 \text{ mm}$,且切削速度越高,宽度越窄。第一变形区消耗大部分功率并产生大量的切削热。

为使问题简化,设想用一个平面 OM 代替剪切滑移区,则平面 OM 就称为剪切平面。剪切平面与切削速度之间的夹角称为剪切角,以 φ 表示,如图1-5所示。

2. 第二变形区

经第一变形区剪切滑移而形成的切屑,在沿刀具前刀面流出时,又受到前刀面的挤压而产生摩擦,靠近前刀面处的金属再次产生剪切变形,使切屑底层薄薄的一层金属流动滞缓,这一层滞缓流动的金属层称为滞流层。滞流层的变形程度比切屑上层大几倍到几十倍。

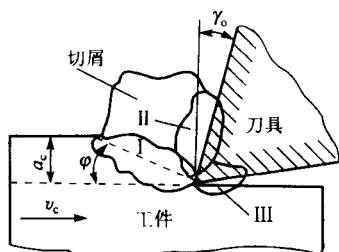


图 1-5 三个变形区的划分

I—第一变形区；II—第二变形区；III—第三变形区

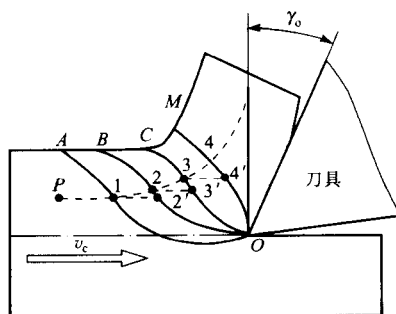


图 1-6 第一变形区的剪切滑移

3. 第三变形区

第三变形区是刀具后刀面和工件的接触区，是指工件过渡表面和已加工表面金属层受到切削刃钝圆部分和后刀面的挤压、摩擦与回弹而产生塑性变形的区域。第三变形区的金属变形，造成已加工表层金属的纤维化和加工硬化，并产生一定的残余应力，将影响到工件的表面质量和使用性能。

以上分别讨论了三个变形区的特征，三个变形区是既相互联系又相互影响的。金属切削过程中的许多物理现象都和三个变形区的变形密切相关，研究切削过程中的变形是掌握金属切削加工技术的基础。

切削变形的大小，主要取决于第一变形区及第二变形区的挤压和摩擦情况，其主要影响因素及规律如下：

(1) 工件材料

实验证明，工件材料强度和硬度越高，变形系数越小；而塑性大的金属材料变形大，塑性小的金属材料变形小。

(2) 刀具前角

刀具前角越大，变形系数越小。这是因为增大刀具前角，可使剪切角增大，从而使切削变形减小。

(3) 切削速度

切削速度 v_c 与切削变形系数 ξ 的实验曲线如图 1-7 所示，当中低速切削 30 钢时，首先，切削变形系数 ξ 随切削速度的增加而减小，它对应于积屑瘤的成长阶段，由于实际前角的增大而使 ξ 减小。而后，随着速度的提高， ξ 又逐渐增大，它对应于积屑瘤减小和消失的阶段。最后，在高速范围内， ξ 又随着切削速度的继续增高而减小。这是因为切削温度随 v_c 的增大而升高，使切削底层金属被软化，剪切强度下降，降低了刀具和切屑之间的摩擦系数，从而使变形系数减小。此外，当切削速度 v_c 很高时，切削层有可能未充分滑移变形就