



JINSHU  
QIEXIAO  
DONGLIXUE



PUTONG GAODENG YUANXIAO  
JIXIELEI SHISANWU GUIHUA JIAOCAI

普通高等院校机械类“十三五”规划教材

# 金属切削动力学

JINSHU QIEXIAO DONGLIXUE

马术文 编



西南交通大学出版社



## 普通高等院校机械类“十三五”规划教材

机械原理  
机械设计  
机械设计基础  
机械设计基础(非机类)  
机械制造技术基础  
工程材料及其应用  
工程材料及成形技术基础  
工程材料学习与实验指导  
设计方法学与创新设计  
材料成形技术基础  
机械制图(第2版)  
计算机辅助制图  
工程制图  
工程制图习题集  
机电控制技术基础(第二版)  
模具材料及表面处理技术  
机械专业实验教程  
机械基础实验教程  
机械CAX/NX9.0应用教程  
液压与气压传动  
金工实习教材  
金工实习指导书(第2版)  
工业机器人  
机械基础实验指导书  
机械精度设计与检测  
数控技术基础  
机电设备管理  
数控技术基础实训指导  
数控编程与加工实训教程  
**金属切削动力学**



交大e出版  
微信购书|数字资源



官方天猫店  
上天猫 买正版

ISBN 978-7-5643-6558-5

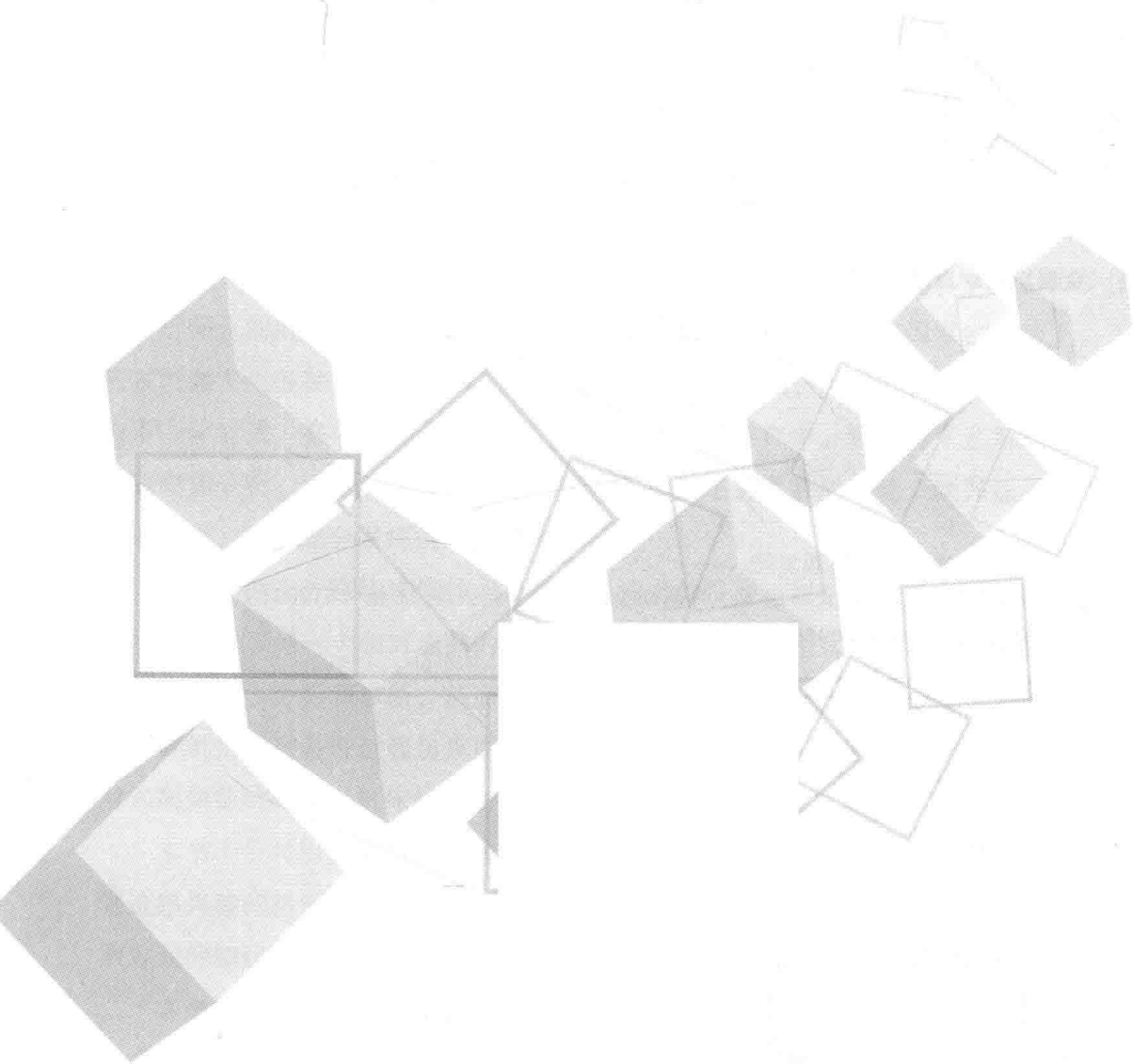


9 787564 365585 >

定价: 45.00元

# 金属切削动力学

马术文 编



西南交通大学出版社  
· 成都 ·

---

图书在版编目 ( C I P ) 数据

金属切削动力学 / 马术文编. —成都: 西南交通大学出版社, 2019.1  
ISBN 978-7-5643-6558-5

I. ①金… II. ①马… III. ①金属切削 - 机械动力学  
IV. ①TG5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 245883 号

---

## 金属切削动力学

马术文 / 编

责任编辑 / 李 伟

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

( 四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031 )

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 15.5 字数 389 千

版次 2019 年 1 月第 1 版 印次 2019 年 1 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-6558-5

定价 45.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 前 言

制造业不仅为国民经济各部门提供必要的产品，同时也为科学研究、制造业本身提供装备。人类进入 21 世纪，科学技术得到突飞猛进的发展，各行业向制造业提出了更高的要求，要求零件的表面质量和精度越来越高、研制周期越来越短，从而使高速和超高速加工、精密和超精密加工技术得到发展并在制造业中得到广泛的应用。在高速和精密加工中，需要对切削加工的基础理论进行深入研究，在此基础上对工艺过程中的工艺参数进行优化，使工艺系统在一种较理想的状态下工作，从而有效保证切削零件的质量和效益。

要充分发挥工艺系统的效能，要高效能地加工出高质量的零件，一方面需要对金属切削加工工艺基础理论做深入的研究和分析，同时需要对工艺系统的动力学性能进行深入的研究。在高速加工工艺过程中，在各种内在和外在因素的影响下，工艺系统会发生各种类型的振动，特别是加工过程的颤振，影响了加工零件的质量，为了确保质量，必须降低切削参数，从而降低劳动生产率。通过对工艺系统动力学的研究和分析，可以对工艺参数进行优化。通过工艺参数的优化，既保证了加工零件的质量，又能充分发挥机床的效率。

当前，由于计算机建模技术、传感器技术的发展，制造过程的在线监控及分析技术已经发展到一个相对成熟的地步，我们可以综合应用这些技术，对金属切削过程进行监控、分析和诊断，从而使金属切削的工艺系统工作在一个理想的状态。同时计算机仿真在各种过程仿真中得到充分应用，通过对工艺系统的切削过程仿真，对切削参数的确定、机床结构的设计、刀具几何参数的选取等具有重要的意义。

本书不仅可以作为机械制造及其自动化专业的研究生教材，也可以作为对机械制造感兴趣的机械工程专业的研究生教材。通过本门课程的学习，主要让学生掌握两方面的知识：金属切削的基本理论和金属切削动力学分析的基本理论与方法。

本书第 1 章是绪论，主要介绍金属切削动力学的概念和发展趋势；第 2 章主要介绍金属切削的基本理论；第 3 章介绍金属切削力及其建模技术；第 4 章介绍高速切削的基本理论；第 5 章介绍工艺系统的变形与切削加工过程中产生自激振动的基本原理；第 6 章讨论切削过程中的非线性振动及其对工艺系统振动特性的影响；第

7章介绍切削颤振的诊断与控制；第8、9、10章分别针对常用的切削加工工艺——车削、铣削和磨削的动力学性能进行介绍和分析。

对于本书的编写提出宝贵意见的专家，以及各参考文献的作者，在此表示感谢！由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者谅解！

编 者

2018年12月

# 目 录

1 绪 论	1
1.1 金属切削动力学研究的意义	1
1.2 金属切削动力学研究面临的挑战	2
1.3 金属切削动力学研究的主要内容	3
2 金属切削的基本理论	5
2.1 金属切削过程	5
2.2 切削过程中前刀面的摩擦	13
2.3 切削力及其影响因素	15
2.4 切削温度及其影响因素	17
2.5 积屑瘤和鳞刺	26
2.6 切屑形态及其控制	31
2.7 切削加工的表面质量	37
2.8 刀具的磨损	43
2.9 材料的切削加工性	54
3 切削力学	59
3.1 概 述	59
3.2 切削力的理论模型	61
3.3 剪切角的理论分析	68
3.4 切削力的经验公式	72
3.5 切削过程的有限元分析	76
4 高速切削加工理论	85
4.1 概 述	85
4.2 高速切削的切屑形态	86
4.3 高速切削的切削力	89
4.4 高速切削的切削热和切削温度	93
4.5 高速切削过程中的刀具磨损	96
4.6 高速切削的表面完整性	105
5 工艺系统的变形与切削振动	114
5.1 概 述	114
5.2 工艺系统的变形	116

5.3	工艺系统的振动 .....	118
5.4	速度反馈引起的切削颤振原理 .....	122
5.5	位移延时反馈引起的切削颤振原理 .....	126
5.6	模态耦合引起的切削颤振 .....	132
6	切削颤振的非线性理论分析 .....	137
6.1	切削过程的非线性因素 .....	137
6.2	机床结构的非线性因素对切削颤振的影响 .....	142
6.3	切削刃振离工件对切削颤振的影响 .....	144
6.4	加工稳定性分析 .....	147
7	切削动力学的诊断与控制 .....	154
7.1	概 述 .....	154
7.2	动力学诊断的基本理论 .....	154
7.3	动力学诊断的实验装置 .....	155
7.4	切削颤振的识别技术 .....	160
8	车削加工动力学 .....	169
8.1	车削加工动力学原理 .....	169
8.2	车削动力学分析的方法、工具 .....	170
8.3	车削动力学有限元分析的实例 .....	171
8.4	车削动力学仿真的实验分析实例 .....	173
8.5	输入参数对车削工艺系统动力学的影响 .....	179
9	铣削加工动力学 .....	181
9.1	周铣的动态切削力模型 .....	181
9.2	铣削加工动力学模型 .....	192
9.3	铣削工艺系统的模型分析 .....	197
9.4	铣削动力学模型的应用 .....	198
9.5	铣削过程的系统识别技术 .....	212
10	磨削加工动力学 .....	217
10.1	概 述 .....	217
10.2	磨削的运动学和磨削力学 .....	219
10.3	磨削表面的形成 .....	223
10.4	一个磨削周期的运动学 .....	227
10.5	磨削运动学和力学的应用 .....	230
	参考文献 .....	237

# 1 绪 论

## 1.1 金属切削动力学研究的意义

在机械制造的过程中，人们为了得到满足设计精度和表面质量要求的金属零件，大量采用金属切削加工的方法来去除工件上多余的材料。当前金属切削加工仍然是基本的制造工艺，并将在未来的几十年中继续作为主要的精密加工工艺而存在。根据国际生产研究协会的报告（International Institution Production Research），由于切削加工可以得到较理想的精度、生产率、可靠性和能耗，所以在全部制造工艺中，切削加工占了接近一半的工作量<sup>[1]</sup>。

为了保证切削加工的高生产率、高精度和高可靠性，切削加工的工艺系统（机床、刀具、夹具、工件）在切削加工过程中必须具有良好的动力学性能，特别是在高速、高精度以及大量难加工材料的切削过程中。这就需要对工艺系统和工艺过程中的切削特性和工艺能力进行必要的优化，保证工艺系统能够以要求的生产率、精度生产出用户最终需求的产品。在优化工艺系统的过程中，机床动力学分析和加工工艺动力学分析是完成此项工作必不可少的两个基本工作，如图 1-1 所示。在本书的后续章节中，如没有特别说明，把机床动力学和加工工艺动力学统称为切削动力学。

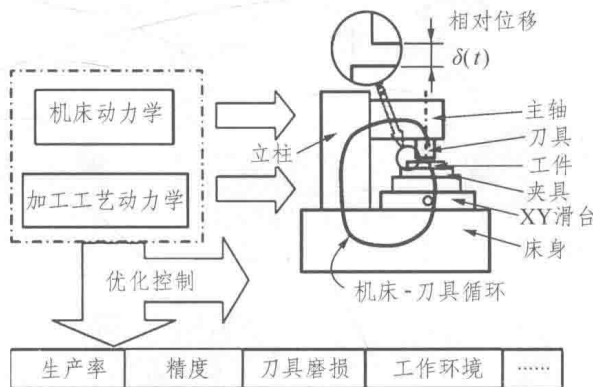


图 1-1 切削动力学在工艺系统中的作用

工艺系统优化是研究切削动力学的最终目的，在这个过程中，必须充分掌握切削动力学的基本理论和方法，并应用到生产实践中去。工艺参数不合理，会对加工过程和加工质量造成直接的影响：

- (1) 降低机床的加工精度、影响加工表面的组织及其表面完整性。
- (2) 导致颤振和切削过程的不稳定性。
- (3) 加速刀具的磨损和破损。

- (4) 加速机床的磨损并损坏机床和零件。
- (5) 由于颤振和振动，会产生烦人的噪声。

基于以下两个基本目标，许多分析和实验方法被用来研究工艺系统的动力学行为：

- (1) 为了设计稳定的、坚固耐用的机床而采用的识别规则和指导性原则。
- (2) 为了在最佳的状态下运行动态稳定性好的工艺过程而开发的规则、模型和算法。

切削动力学是影响生产过程的主要因素，特别是在高速切削过程中。在精密加工中考虑切削动力学因素将变得特别重要，如磨削、金刚石车削，更精确的加工如微纳加工。作为一门学科，切削动力学是一门覆盖切削力学、摩擦学、传感器和仪器、机床设计、刀具、工艺优化和控制以及制造测量学的综合性学科，是理论分析和实验研究的无缝结合。

## 1.2 金属切削动力学研究面临的挑战

零件的加工质量受组成工艺系统的机床、刀具、夹具及工件等硬件和工艺参数的制约，如图 1-2 所示。在加工过程中，需要从加工工艺、机床性能、工件材料特性、夹具的装夹误差和刚性，以及刀具几何参数等多个方面建立动态的切削工艺模型，通过对切削工艺模型的研究，探究在整个加工过程中加工表面的质量（特别是表面完整性）和工艺系统的功能特性的关系。从制造科学的观点看，研究高精度表面的制作对具有可重复性、可预测性、可生产性及高生产率的高精密加工有重要的意义。制造科学和技术的最终目标是获得精密加工表面的仿真、优化和控制模型，包括生产工艺过程中的表面结构、几何形貌、表面完整性和功能的生成和组成等的模型。

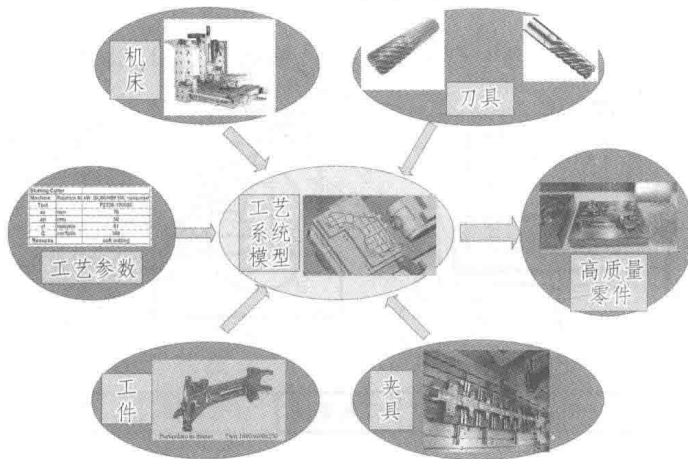


图 1-2 工艺系统模型的构成及与加工质量的关系

工艺系统的切削动力学对构建制造科学的理论基础研究是非常重要的，具有基础性的作用。它们的重要性进一步体现在高速加工、超精密加工、纳米和微细加工过程中。

计算机建模、传感器技术、诊断设备和分析工具、表面测量等技术在过去几十年获得了长足的发展，综合利用这些技术从一个新的角度对切削动力学进行学术和工程方面的研究也取得了巨大的进步，并在企业界获得大量的应用。例如：

- (1) 材料切削动力学的分析，特别是在高应力和高温条件下进给速度和刀具几何参数对

刀具工件结合面、表面完整性和表面功能的影响。

(2) 包括机床结构部件结合面之间动力学特性的多体动力学分析,如主轴、导轨和驱动系统的动力学分析。

(3) 机床结构的动态重复特性,这对机床动力学特性的预测控制是非常重要的。

(4) 工艺系统的动力学模型及系统模态参数的在线识别。

(5) 建立复杂曲面的稳定性分析解和断续切削的非线性模型。

(6) 形成了一个针对实时加工误差补偿的理想算法(集成在 CAD/CAM/CAE 工具中)。

(7) 在超精密加工、微纳加工过程中的加工动力学和微颤振分析。

### 1.3 金属切削动力学研究的主要内容

精密零件的生产需求的不断增加,要求开发精密机床以满足高附加值的制造过程。精密机床开发的一个趋势,是机床开发者不仅希望集中精力于机床本身运动轴的最大速度和加速度上,还充分考虑机床加工过程的切削动力学。这样在设计精密机床时,必须同时考虑机床的机械结构、控制系统动力学性能和切削过程动力学性能。在设计精密机床时需要如图 1-3 所示的一个集成的动力学驱动模型。

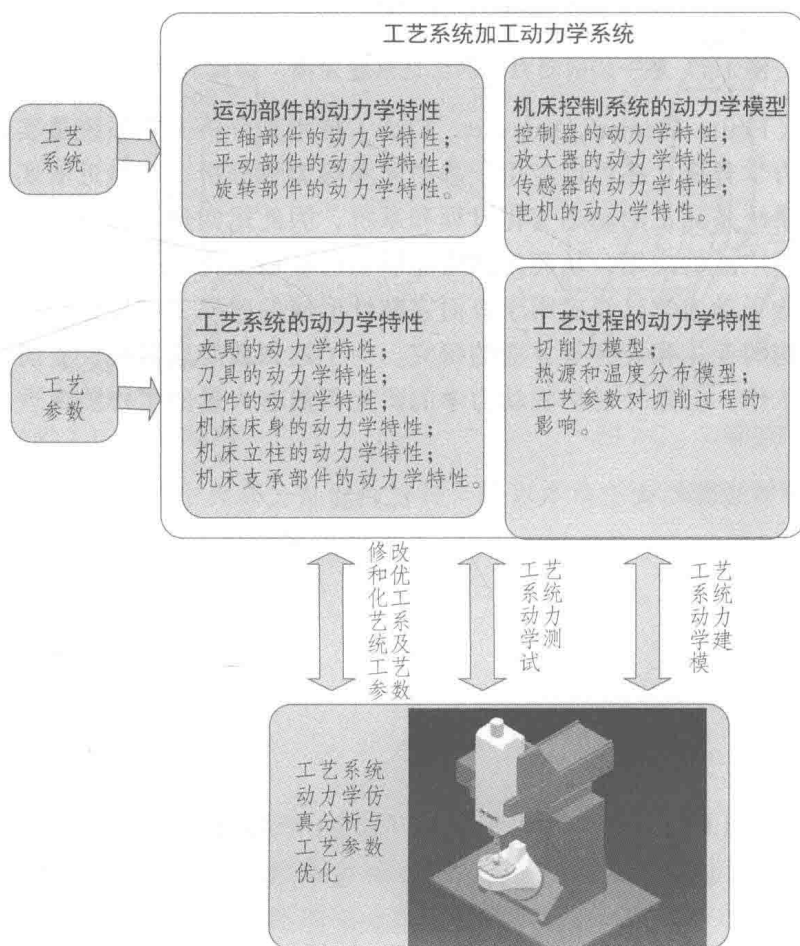


图 1-3 工艺系统切削动力学系统的组成

尺寸从几百微米到几毫米或者从几微米到几百微米的高精度的微细机械零件，已经广泛应用于各个领域，如航天、生物工程、电子、通信和光学等。先进的高精密机床在一个较广泛的工程材料范围内制造具有高精度、表面光洁、几何形状复杂的高端微细零件方面有独特的优势。对于微细的零件和产品，加工表面的微细特征和功能特征变得特别独特，这样从深度上理解高精密加工和微纳加工过程中机床、工艺、刀具和材料之间的复杂关系变得越来越必要了。如图 1-4 所示，切削动力学驱动的建模和仿真能够应用于复杂关系和现象的深入研究。

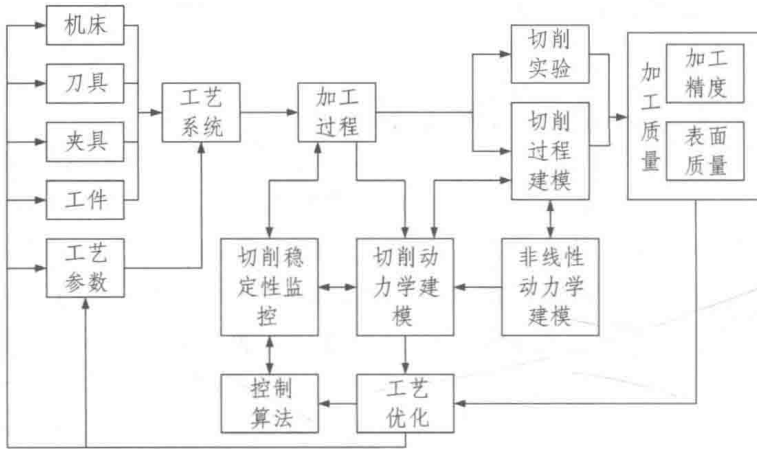


图 1-4 基于切削动力学的工艺系统建模、仿真、优化和控制

有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 技术是分析工艺系统最实用的方式。有限元不仅应用于动力学分析，还可以应用于静力学和热力学分析。在最近的实践中，由于加工过程和相关工艺系统是真正的动态变化过程和系统，因此用四边形和立方体单元自动网格划分技术得到越来越广泛的应用，从而使网格能够自适应地变化；并且基于复合有限元的多尺度，微观力学、分子动力学已经应用于表面完整性形成的建模，如表面粗糙度、残余应力、微观硬度、微结构的变化和疲劳等方面的研究。为了达到最终的目标，各国学者已经做了大量的研究和开发工作，但是针对切削动力学的研究仍然有大量的工作需要进一步研究。

## 2 金属切削的基本理论

金属切削过程中会发生各种物理现象，如切削力、切削热和刀具磨损等，以及会出现许多问题，如积屑瘤、振动、卷屑、断屑和加工表面质量问题等，这些都和金属切削层的变形有关。因此，金属切削过程中切削层变形规律的研究，对于切削加工技术的发展、保证加工质量、降低生产成本和提高生产率，都有着十分重要的意义。

实际生产中，虽然一般都是如图 2-1 所示的三维切削。在这种情况下，切削刃与切削方向不垂直，或主切削刃和副切削刃同时参加切削，或切削刃不是直线等，因而在切削过程中得到的是复杂的三维塑性变形。它使切削过程的研究极为困难，为此，将切削模型简化为如图 2-2 所示的二维正交切削模型进行研究。正交切削过程中，由于切削刃与切削运动方向垂直，切削宽度  $a_w$  与切削厚度  $a_c$  之比很大，因而在与切削刃垂直的工件和切屑剖面中得到的是较为简单的二维塑性变形。

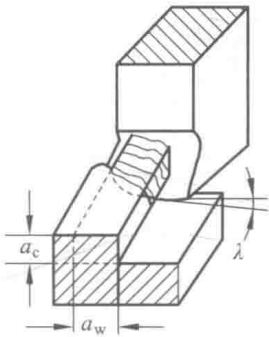


图 2-1 三维切削

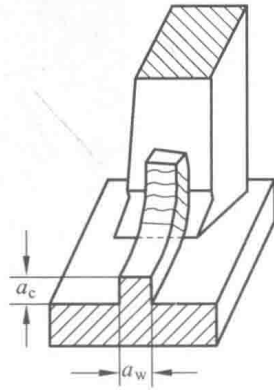


图 2-2 二维切削

由于被切削的金属材料中大部分是塑性材料，所以本章主要以塑性材料为例来介绍金属的切削过程。

### 2.1 金属切削过程

#### 2.1.1 切削变形区的划分

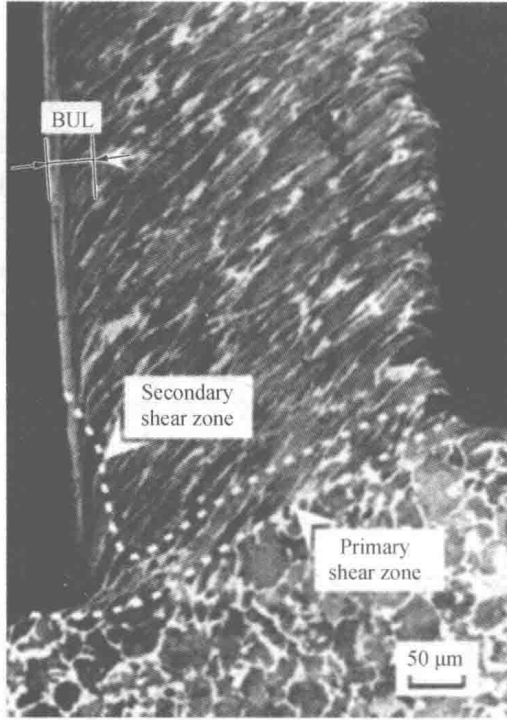
根据图 2-3 所示的二维正交切削时金属切削层变形图，可绘制如图 2-4 所示的金属切削过程中的滑移线和流线示意图。流线即为切削金属的某一点在切削过程中流动的轨迹，根据金属流动的情况，可以把金属切削区域划分为 3 个变形区。

第一变形区 ( I ): 从  $OA$  线开始发生塑性变形，到  $OM$  线晶粒的剪切滑移基本完成，也

称剪切区。

第二变形区(Ⅱ): 切屑沿前刀面流出时进一步受到前刀面的挤压和摩擦, 使靠近前刀面处金属纤维化, 其方向基本上和前刀面平行。

第三变形区(Ⅲ): 已加工表面受到切削刃口圆弧和后刀面的挤压与摩擦, 产生变形, 造成已加工表面的纤维化与加工硬化。



$v=2 \text{ m/s}; f=0.2 \text{ mm/r}$

图 2-3 金属切削层变形图片<sup>[2]</sup>

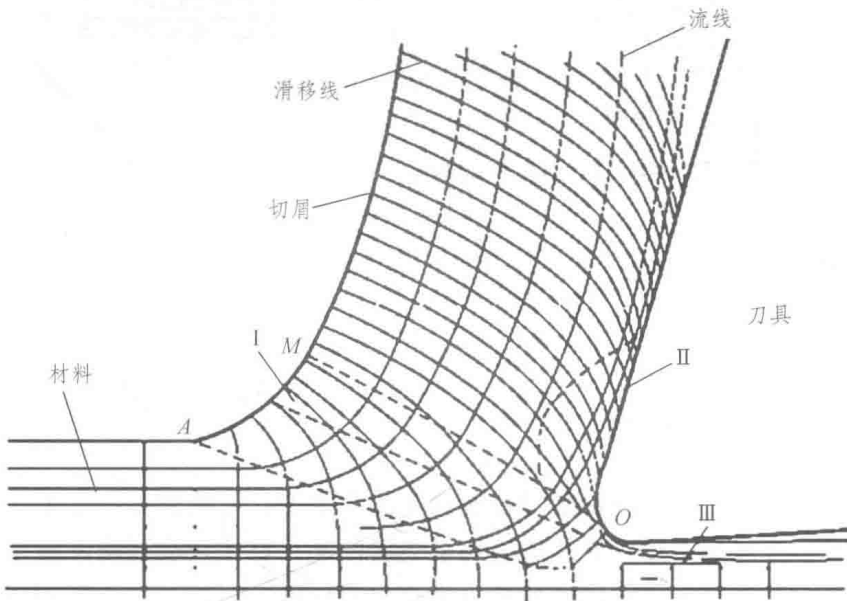


图 2-4 金属切削过程中的滑移线和流线示意图

这3个变形区汇集在切削刃附近，应力比较集中而且复杂，金属的被切削层就在此处分离，大部分变为切屑，小部分留在已加工表面上。因此，我们研究金属切削过程，不仅要研究3个变形区的变形情况，还要研究刃前区的应力状态。

### 2.1.2 切屑的形成

切屑形成过程可以描述为：当刀具和工件开始接触的最初瞬间，切削刃和前刀面在接触点挤压工件，使工件内部产生应力和弹性变形。随着切削运动的继续，切削刃和前刀面对工件材料的挤压作用加强，使工件内部的应力和变形逐渐增大，当应力达到材料的屈服极限 $\tau_s$ 时，被切削层的金属开始沿剪应力最大的方向滑移，并产生塑性变形。图2-5中的 $OA$ 面代表“始滑移面”。以图中所示的切削层中点 $P$ 为例，当 $P$ 点到达位置1时，由于 $OA$ 面上的剪应力达到材料的屈服极限，点1在向前移动的同时，也沿 $OA$ 面滑移，其合成运动使点1运动到点2， $2'-2$ 就是它的滑移量。随着滑移的产生，剪应力进一步加大，当点 $P$ 向1、2、3和4运动时，它的剪应力不断增大，当移动到点4的位置时，其流动的方向与前刀面平行，不再滑移。于是被切削层沿切削刃与工件基体分离，从而形成切屑沿前刀面流出。 $OM$ 代表“终滑移面”。始滑移面 $OA$ 和终滑移面 $OM$ 之间的区域就是第一变形区，其变形的主要特征是沿滑移面的剪切变形，以及随之产生的加工硬化。

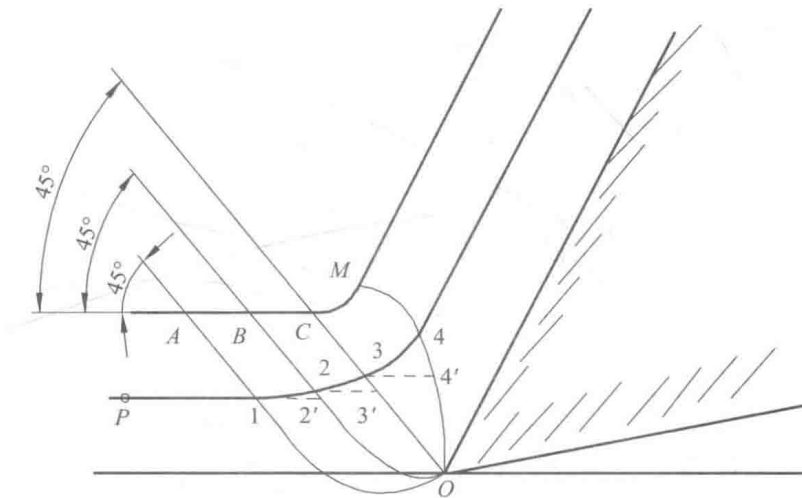


图 2-5 第一变形区金属的滑移

试验表明，第一变形区的厚度随切削速度的增大而变薄，在一般切削速度下，第一变形区的厚度仅为 $0.02 \sim 0.2 \text{ mm}$ ，因此，可以用一个平面 $OM$ 来表示第一变形区，第一变形区又可以称为剪切面。剪切面 $OM$ 与切削速度方向的夹角 $\phi$ 称为剪切角。根据这种假设建立的模型称为剪切面切削模型，如图2-6所示。

当切屑沿前刀面流出时，受到前刀面的挤压与摩擦。在前刀面摩擦阻力的作用下，靠近前刀面的切屑底层再次产生剪切变形，也就是

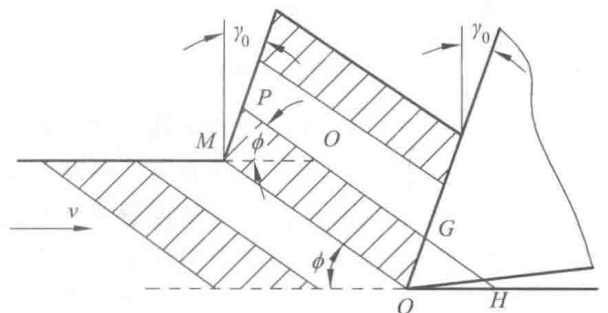


图 2-6 正交切削的剪切面切削模型

第二变形区的变形,使薄薄的一层金属流动滞缓,晶粒再度伸长,沿着前刀面的方向纤维化。流动滞缓的这一层金属称为滞流层,它的变形程度比切屑上层剧烈几倍到几十倍。

总之,切屑形成过程,就其本质来说,是被切削层金属在刀具切削刃和前刀面作用下,经受挤压而产生剪切滑移变形的过程。

### 2.1.3 切屑变形的度量

在生产过程中,切屑的变形程度将影响切削过程中切削力的大小、切削热的多少以及切削的表面质量,它是反映切削过程的一个重要状态变量。因此,需要定量地测定切屑的变形程度。目前衡量切屑变形程度的指标有变形系数、相对滑移和剪切角等。

#### 2.1.3.1 变形系数 $\xi$

实践表明,金属切削加工中切下的切屑,其尺寸不同于切削层的尺寸。切削一般钢料时,与切削层的尺寸相比较,切屑长度  $l_{ch}$  缩短了,而切屑厚度  $a_{ch}$  增大了,如图 2-7 所示。变形系数  $\xi$  就是切削层长度  $l_c$  和切屑长度  $l_{ch}$  的比值,或者是切屑厚度  $a_{ch}$  和切削层厚度  $a_c$  的比值,即

$$\xi_l = l_c / l_{ch} \quad (2-1)$$

$$\xi_a = a_{ch} / a_c \quad (2-2)$$

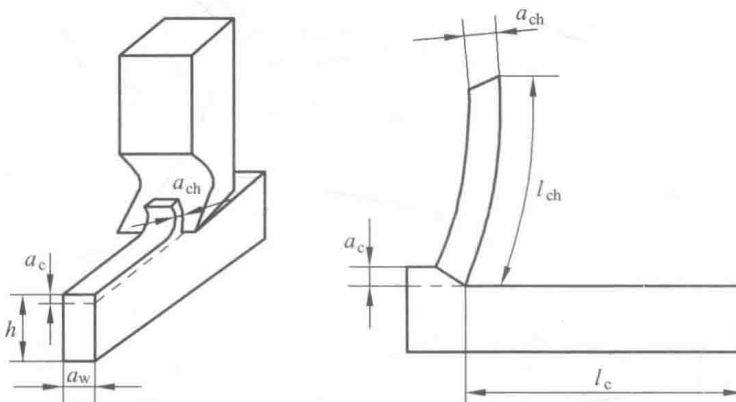


图 2-7 变形系数  $\xi$  的测定

一般情况下,当切削层的宽度和切削层的厚度相比,比值比较大时,切削层的宽度与切屑的宽度基本相等,根据大塑性变形时材料不可压缩的假设,则变形后体积保持不变,所以

$$\xi_l = \xi_a = \xi \quad (2-3)$$

通常情况下,切屑的变形系数  $\xi$  一般是大于 1 的数,为 1.5~4。变形系数  $\xi$  越大,切屑的变形程度就越大。对于某些金属,可能会出现变形系数小于 1 或接近于 1 的情况,并不表明在切削过程中切屑没有发生塑性变形,如钛合金变形系数  $\xi$  接近于 1 甚至小于 1,就不再真实反映切削过程中的塑性变形情况。表 2-1 是几种金属的切屑变形系数。

切屑变形系数  $\xi$  的最大优点是比较直观,而且测量方便。只要用细金属丝测出切屑的长度  $l_{ch}$ , 便可由已知的切削层长度  $l_c$  计算出  $\xi$  值。

表 2-1 几种金属的切屑变形系数  $\xi$ 

加工材料	切屑变形系数 $\xi$
工业纯铁 $\sigma_b=294 \sim 392$ MPa	4 ~ 5
中硬钢 $\sigma_b=588 \sim 686$ MPa	2 ~ 3
硬钢 $\sigma_b=883 \sim 1\ 079$ MPa	1.3 ~ 1.5
镍基高温合金	1.5 ~ 2.5
钛合金	0.8 ~ 1.06

在切削层长度  $l_c$  不确定的情况下, 可称出一段切屑的质量  $Q$ , 然后计算切削层长度  $l_c$ , 按下式计算出变形系数  $\xi$ :

$$Q = f \cdot a_p \cdot l_c \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad (\text{g}) \quad (2-4)$$

$$\xi = \frac{l_c}{l_{ch}} = \frac{Q}{l_{ch} \cdot f \cdot a_p \cdot \rho} \cdot 10^6 \quad (2-5)$$

式中  $\rho$  —— 工件材料的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 2.1.3.2 剪切角 $\phi$ 和相对滑移系数 $\varepsilon$

由剪切面切削模型可知, 切削层的金属是通过在剪切面上产生剪切滑移形成切屑的, 可以用剪切角  $\phi$  和相对滑移系数  $\varepsilon$  来衡量切屑的变形程度。

如图 2-8 所示, 在滑移厚度  $\Delta y$  相同的情况下, 如剪切角  $\phi < \phi'$ , 则剪切滑移距离  $\overline{NP} > \overline{N'P'}$ 。也就是说, 剪切角  $\phi$  越小, 切屑的剪切滑移距离越长, 变形程度越大。

剪切角  $\phi$  可以从图 2-3 所示的切屑根部金相图片上直接测量, 也可以用剪切角的理论公式计算。

如图 2-8 (b) 所示, 当没有滑移变形时, 切削层的  $M$  点将运动到  $N$  点, 由于剪切滑移, 实际上运行到了  $P$  点, 相对滑移系数为

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{\Delta y} = \frac{\overline{NP}}{\overline{MK}} = \frac{\overline{NK} + \overline{KP}}{\overline{MK}} = \cot \phi + \tan(\phi - \gamma_0) = \frac{\cos \gamma_0}{\sin \phi \cos(\phi - \gamma_0)} \quad (2-6)$$

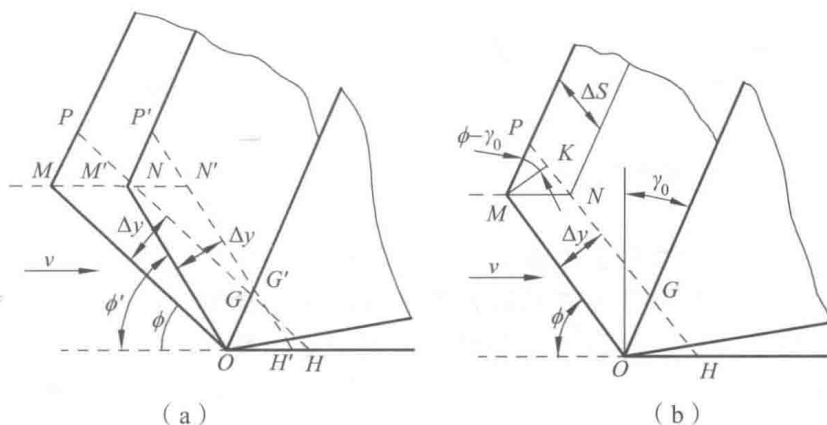


图 2-8 剪切角与相对滑移系数