

哈尔滨理工大学
制造科学与技术系列专著



金属切削过程有限元 仿真技术

岳彩旭 著

非外借



科学出版社

哈尔滨理工大学制造科学与技术系列专著

金属切削过程有限元仿真技术

岳彩旭 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书开展了金属切削过程有限元仿真技术的研究,旨在推进该技术在金属切削过程研究中的应用。书中首先阐述了切削过程基础理论,综述了切削过程有限元仿真技术的国内外研究现状和发展趋势;然后介绍了切削过程有限元仿真关键技术,并基于 Abaqus 对典型仿真案例进行了详细介绍;在此基础上,对金属车削和铣削过程进行了仿真分析,并探讨了刀具磨损仿真和切削过程控制仿真;最后对不同仿真软件的研究结果进行了特性对比。本书成果丰富了金属切削机理的研究手段。

本书可供从事切削理论与技术研究的科研人员、机械制造行业的技术人员参考,也可作为高等院校相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

金属切削过程有限元仿真技术 / 岳彩旭著. —北京: 科学出版社, 2017.10
(哈尔滨理工大学制造科学与技术系列专著)

ISBN 978-7-03-046859-8

I. ①金… II. ①岳… III. ①金属切削 IV. ①TG501

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 199186 号

责任编辑: 裴 育 赵微微 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 10 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017 年 10 月第一次印刷 印张: 17

字数: 326 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 言

数字化设计与制造技术是实现智能制造的基础,而基于有限元理论的量化仿真技术为产品的结构和性能优化、加工过程的定量分析与控制提供了重要的方法和手段。随着计算技术和计算机硬件的发展,有限元仿真技术取得了长足的发展,仿真技术也作为认识客观世界的第三种方法,在科学研究和技术开发的各个领域发挥着越来越重要的作用。

金属切削过程是在刀具刃前区几立方毫米的区域内,发生金属材料的高速变形、分离和流出、形成加工表面的过程。切削温度变化梯度大,刀具磨损快,导致切削状态变化十分复杂,若单纯依靠实验手段来研究则有一定的局限性。自有限元仿真技术被引入金属加工研究领域以来,受到了相关研究人员和技术开发者的广泛重视。该技术在切削机理研究、刀具设计和切削参数优化等方面已有了较好的应用案例。

该书详细阐述了切削过程有限元仿真技术的基础理论、技术方法及应用实践。作者结合自身近十年仿真经验和其所在团队在切削仿真方面取得的成果,着重论述了切削仿真的理论基础(有限元仿真基础知识)、切削仿真技术(车削及铣削典型案例设计)、切削过程仿真应用,并注重这三者的有机结合。该书基于仿真软件 Abaqus 建立了切削过程二维仿真模型及切削过程三维仿真模型,对切屑形成、切削力、切削温度、切削应力和刀具磨损进行了分析研究,仿真结果揭示了相关物理量的变化规律;同时,也将 Abaqus 与 Third Wave AdvantEdge 和 Deform 在软件操作及仿真结果等方面进行了对比论述,便于读者依据实际研究对象选取合适的仿真软件。

目前,专门针对切削过程仿真方面的论著还比较少,该书是作者在国家自然科学基金和国家科技重大专项等相关课题的研究中,对切削过程有限元仿真技术进行了系统研究而形成的。该书内容丰富,基础理论和技术实践相结合,并兼具学术研究专著和技术参考书的特点,具有较好的可读性和实用性。期望该书的出版能对从事相关研究的高校师生及科研人员有一定的帮助。



2017年7月

前 言

切削过程的研究若单纯依靠实验手段,不仅耗时耗力,且要配备高精度的实验仪器和检测仪器作为支撑。近年来,随着计算机技术和软件技术的发展,有限元仿真技术在切削过程研究中得到越来越广泛的应用。经过仿真分析,可降低分析成本和时间。因此,有限元仿真技术在切削过程的研究中起到了越来越重要的作用。由于仿真技术已成为切削过程研究的有力工具,国际生产工程学会(CIRP)专门成立了“Modeling of Machining Operation”工作组来推动仿真技术在切削机理方面的研究和工业界的应用。同时,国内诸多学者也开展了此方面工作的研究。

早在 2000 年前后,本课题组在刘献礼教授的带领下开展了切削过程有限元仿真的研究,并获得了国家自然科学基金“淬硬钢高速切削过程的建模与仿真”(50575061)的资助。十多年来,课题组采用有限元仿真技术在切削力、切削温度、刀具寿命、已加工表面质量的预报及切削过程的优化与控制等方面取得了一系列成果,并在哈尔滨汽轮机厂有限责任公司、株洲钻石切削刀具股份有限公司、厦门金鹭特种合金有限公司等合作单位取得了良好的应用效果。研究成果为切削工艺优化和刀具设计提供了重要的参考依据。

为进一步凝练学术方向,作者在总结课题组研究成果的基础上撰写本书。书中主要从切削过程基础理论、切削过程仿真的关键技术、基于 Abaqus 的车削和铣削过程仿真、切削过程中的刀具磨损仿真、基于有限元仿真的切削工艺控制及不同软件的仿真结果对比等方面展开论述。目前,常用的切削仿真软件主要有 Deform、Third Wave AdvantEdge、Abaqus 等主流软件。上述软件的应用背景和计算特性各有不同,为了使本书内容更有针对性,书中所介绍的实例操作及典型案例分析主要选取 Abaqus,同时也将此软件与其他软件在模型操作和仿真结果等方面进行了特性对比。作为切削过程有限元仿真技术的专著,本书既有理论基础,又注重实际应用。为了使读者更好地掌握和理解本书内容,书中图文并茂,并在典型案例介绍时力求步骤详细,可操作性强。

在本书撰写过程中,得到了导师哈尔滨理工大学刘献礼教授的悉心指导和帮助,是刘献礼老师把我引入了切削过程仿真领域,在此表示深深的感谢。在切削试验研究方面,得到了严复钢高工、李玉甫高工和马晶老师热情的帮助;在模型计算方面,得到了南方科技大学融亦鸣教授、美国佐治亚理工学院 Steven Y. Liang 教授和潘智鹏博士、北京领航科技公司梁桂强老师、湖南大学研究生陶琪的帮助;

“高效切削及刀具”国家地方联合工程实验室和“先进加工技术与智能制造”黑龙江省重点实验室的同事及研究生也给予作者细致的帮助，在此一并表示感谢。对已经毕业的硕士研究生盆洪民和于明明表示特别感谢。同时，感谢在我访学期间美国佐治亚理工学院精密制造实验室（GTMI）提供的 Abaqus 和 Deform 的软件支持，以及北京澳森拓维科技有限公司在 Third Wave AdvantEdge 方面提供的资料。感谢国家自然科学基金项目（51575147、51235003）为本书提供的资助。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者提出宝贵意见。

岳彩旭

2017年6月

目 录

序言	
前言	
第 1 章 金属切削过程基本规律及研究方法	1
1.1 切削运动和切削用量	1
1.2 切削变形区	2
1.3 切屑的形成	3
1.3.1 切屑的形成过程	3
1.3.2 切屑的类型	4
1.3.3 研究切屑的方法	5
1.4 切削力	6
1.4.1 切削力的来源	7
1.4.2 影响切削力大小的主要因素	7
1.4.3 切削力的研究方法	8
1.5 切削热和切削温度	9
1.5.1 切削热的产生和传出	10
1.5.2 影响切削温度的主要因素	10
1.5.3 切削热和切削温度的研究方法	11
1.6 已加工表面质量	12
1.6.1 已加工表面粗糙度	13
1.6.2 表层材质变化	14
1.6.3 已加工表面质量的研究方法	15
1.7 本章小结	16
参考文献	16
第 2 章 金属切削过程有限元仿真技术	18
2.1 有限元法的基本思想	18
2.2 有限元法的一般分析流程	18
2.3 有限元分析的基本步骤	23
2.4 有限元分析的基本假设	23
2.5 有限元分析计算成本估计和结果评价	25
2.6 有限元技术在金属切削研究中的应用	26

2.6.1 金属切削研究中常用的有限元分析软件	26
2.6.2 有限元仿真技术在金属切削过程中的应用	28
2.7 本章小结	30
参考文献	30
第3章 基于 Abaqus 的金属切削过程有限元仿真	32
3.1 前处理	32
3.1.1 部件模块	34
3.1.2 属性模块	37
3.1.3 装配模块	40
3.1.4 分析步模块	41
3.1.5 相互作用模块	42
3.1.6 载荷模块	43
3.1.7 网格模块	44
3.2 模型的提交与运算和后处理	46
3.2.1 模型的提交与运算	46
3.2.2 后处理	48
3.3 基于 Abaqus 的金属切削过程仿真应用实例	49
3.3.1 Module: Part (部件)	50
3.3.2 Module: Property (创建材料属性)	52
3.3.3 Module: Assembly (装配)	58
3.3.4 Module: Step (分析步)	59
3.3.5 Module: Mesh (网格)	61
3.3.6 Module: Interaction (接触)	64
3.3.7 Module: Load (载荷)	68
3.3.8 Module: Job (作业)	69
3.3.9 Module: Visualization (后处理)	70
3.4 本章小结	74
参考文献	75
第4章 金属切削加工仿真常用的本构模型	76
4.1 切削过程金属变形分析	76
4.1.1 切削金属材料变形的物理性质	76
4.1.2 切削过程中材料的塑性变形	78
4.2 弹塑性材料本构模型	79
4.2.1 幂函数形式的本构方程	79
4.2.2 Johnson-Cook 本构方程	80

4.2.3	Zerilli-Armstrong 本构方程	80
4.2.4	Bodner-Parton 本构方程	81
4.2.5	常用本构模型的应用和对比	81
4.3	Johnson-Cook 本构方程参数及其求解过程	81
4.4	淬硬钢准静态压缩试验	86
4.4.1	Cr12MoV 模具钢的材料属性	86
4.4.2	试验设备选择和试验试样的制备	87
4.4.3	准静态压缩试验结果分析	88
4.5	Cr12MoV 模具钢的动态力学性能试验	88
4.5.1	霍普金森压杆试验原理	89
4.5.2	霍普金森压杆试验	89
4.5.3	霍普金森压杆试验结果	91
4.6	Johnson-Cook 本构模型系数敏感性仿真分析	93
4.7	材料本构参数对锯齿形切屑形成影响的仿真分析	96
4.7.1	锯齿形切屑的表征	96
4.7.2	材料本构参数的仿真分析	99
4.8	本章小结	101
	参考文献	101
第 5 章	Abaqus 网格及接触摩擦处理技术	103
5.1	网格划分技术	103
5.1.1	网格种子	103
5.1.2	网格单元	105
5.1.3	网格划分技术分类及举例	112
5.1.4	网格划分问题处理	114
5.2	接触属性设置技术	116
5.2.1	定义接触面	116
5.2.2	设置接触对	118
5.3	接触属性	120
5.3.1	切向接触	121
5.3.2	法向接触	122
5.3.3	热传递	122
5.3.4	热生成	122
5.4	刚体约束	123
5.5	本章小结	124
	参考文献	124

第 6 章 基于 Abaqus 的稳态切削过程仿真	125
6.1 二维稳态切削过程仿真	125
6.1.1 仿真模型的转化	125
6.1.2 有限元仿真模型的建立	125
6.1.3 切屑的形成过程	127
6.1.4 应力场分析	128
6.1.5 切削温度分析	128
6.1.6 不同刀具参数对切削力的影响分析	129
6.1.7 仿真结果验证	131
6.2 三维稳态切削过程仿真	132
6.2.1 有限元仿真模型的建立	133
6.2.2 切屑的形成过程	133
6.2.3 切削力分析	134
6.2.4 切削温度分析	134
6.2.5 仿真结果验证	135
6.3 本章小结	136
参考文献	136
第 7 章 基于 Abaqus 的非稳态切削过程仿真	138
7.1 非稳态切削仿真实现手段	138
7.1.1 Abaqus/Explicit 显式算法	138
7.1.2 动态分析程序设置	138
7.1.3 稳定性限制	139
7.1.4 Abaqus/Explicit 中的单元失效模拟	139
7.1.5 有限元模型的质量放大	140
7.1.6 准静态分析过程中的质量放大	141
7.2 二维非稳态切削过程仿真	143
7.2.1 有限元仿真模型的建立	143
7.2.2 切屑的形成过程	144
7.2.3 不同刃口对切削力的影响分析	144
7.2.4 不同刃口对切削温度的影响分析	145
7.2.5 不同刃口对已加工表面残余应力影响分析	146
7.2.6 仿真结果验证	147
7.3 非稳态切削过程三维有限元仿真	147
7.3.1 有限元仿真模型的建立	148
7.3.2 切屑的形成过程	148

7.3.3 锯齿形切屑形成过程的温度场分析	149
7.3.4 切削力的历程输出	149
7.4 本章小结	150
参考文献	150
第8章 基于 Abaqus 的三维铣削过程仿真	151
8.1 建立成形铣刀几何模型	151
8.2 建立有限元仿真模型	151
8.2.1 材料及刀具特性	151
8.2.2 有限元仿真模型建立的过程	152
8.3 切屑的形成过程	162
8.4 铣刀结构对铣削力的影响	163
8.4.1 铣刀齿数对铣削力的影响	163
8.4.2 铣刀螺旋线旋向对铣削力的影响	165
8.4.3 铣刀等齿距与不等齿距对铣削力的影响	166
8.5 铣削试验与结果分析	167
8.5.1 试验条件	167
8.5.2 单因素试验设计	168
8.5.3 铣刀齿数对铣削力及振动的影响	169
8.5.4 铣刀螺旋线旋向对铣削力及振动的影响	170
8.5.5 铣刀等齿距与不等齿距对铣削力及振动的影响	171
8.6 有限元仿真结果精度的验证	173
8.7 本章小结	174
参考文献	174
第9章 切削过程刀具磨损的有限元仿真	176
9.1 刀具磨损形式	176
9.1.1 正常磨损	176
9.1.2 非正常磨损	177
9.2 刀具磨损过程	177
9.2.1 初期磨损	178
9.2.2 正常磨损	178
9.2.3 剧烈磨损	178
9.3 刀具磨损研究	179
9.3.1 PCBN 刀具磨损机理研究	179
9.3.2 切削条件对刀具磨损影响的研究	182
9.3.3 刀具磨损对切削过程影响的研究	184

9.4 刀具磨损的预测	189
9.4.1 刀具磨损率模型的选择	190
9.4.2 基于有限元法刀具磨损计算程序设计	191
9.4.3 计算前、后刀面节点位移	197
9.4.4 更新刀具几何形状	199
9.5 本章小结	199
参考文献	200
第 10 章 基于 Abaqus 的参数化建模及切削工艺优化	201
10.1 Abaqus 的二次开发简介	201
10.1.1 Abaqus 二次开发语言及途径	203
10.1.2 Python 语言在 Abaqus 中的应用	203
10.2 切削过程有限元参数化建模	206
10.2.1 参数化技术概述	206
10.2.2 定制切削参数化界面的实现	206
10.2.3 Abaqus 中切削模型参数化的实现步骤	207
10.3 基于有限元仿真的切削工艺优化控制研究	212
10.3.1 优化算法介绍	212
10.3.2 切削仿真优化设计的数学模型	216
10.3.3 Abaqus 与 iSIGHT 联合仿真技术	218
10.3.4 切削工艺优化及试验验证	221
10.4 本章小结	224
参考文献	224
第 11 章 有限元软件仿真结果对比	226
11.1 Deform 介绍	226
11.1.1 Deform 主要功能介绍	226
11.1.2 Deform-2D、Deform-3D 介绍	227
11.1.3 Deform 主窗口介绍	228
11.1.4 Deform 的特性分析	236
11.2 Third Wave AdvantEdge 介绍	236
11.2.1 Third Wave AdvantEdge 主要功能介绍	237
11.2.2 Third Wave AdvantEdge 主要窗口介绍	238
11.2.3 Third Wave AdvantEdge 主要模块	240
11.2.4 Third Wave AdvantEdge 的特性分析	251
11.3 二维切削过程仿真模型的建立	251
11.3.1 二维切削过程仿真	251

11.3.2 二维切削过程仿真结果的比较	252
11.4 三维切削过程仿真模型的建立	254
11.4.1 三维切削过程仿真	254
11.4.2 三维切削过程仿真结果的比较	255
11.5 本章小结	257
参考文献	257

第 1 章 金属切削过程基本规律及研究方法

用切削刀具切除工件上多余的金属,从而使工件的形状、尺寸精度及表面质量都符合预定的要求,这样的加工称为金属切削加工。金属切削过程是刀具和工件互相作用的过程,在这个过程中既要保证低成本和高效率,又要保证工件的加工质量。随现代科学技术的快速发展,许多先进的加工技术已经伴随传统的切削加工技术而产生,如超声加工、激光加工、电火花加工和化学加工等技术,可以部分取代传统的切削加工。然而,由于传统的金属切削加工具有加工精度高、生产效率高、成本低等优点,机械制造方面的大多数零件还必须通过传统的切削加工来实现。

1.1 切削运动和切削用量

切削加工时,为了获得所需的零件形状,刀具与工件必须具有一定的相对运动,即切削运动,切削运动按其所起的作用可分为主运动和进给运动,如图 1.1 所示。

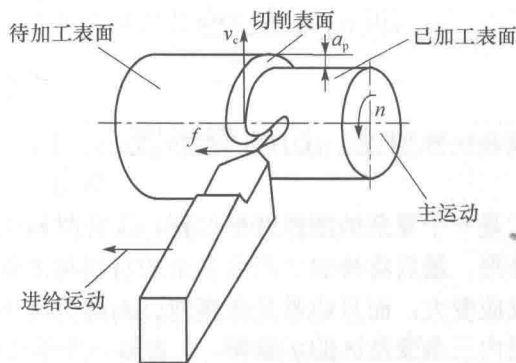


图 1.1 切削运动示意图^[1]

(1) 主运动。主运动是由机床或手动提供的刀具与工件之间主要的相对运动,它使刀具切削刃及其毗邻的刀具表面切入工件材料,使被切削层转变为切屑,从而形成工件新表面。

(2) 进给运动。进给运动是由机床或手动传递给刀具或工件的运动,它配合主运动依次切除金属切屑,与此同时形成具有所需的几何特性的已加工表面。进

给运动可以是间歇进行的，也可以是连续进行的。

(3) 合成运动。合成运动是主运动和进给运动的合成。

切削用量是切削时各运动参数的总称，包括切削速度 v_c 、进给量 f 和切削深度 a_p 。切削用量是调整机床，计算切削力、切削功率和工时定额的重要参数。

(1) 切削速度 v_c 。计算切削速度时，应选取刀刃上速度最高的点进行计算。主运动为旋转运动时，切削速度 v_c (m/s 或 m/min) 由式 (1.1) 确定：

$$v_c = \frac{\pi dn}{1000} \quad (1.1)$$

式中， d 为工件或刀具的最大直径，mm； n 为工件或刀具的转速，r/s 或 r/min^[2]。

(2) 进给量 f 。进给量是工件或刀具每回转一周时，二者沿进给方向的相对位移，单位为 mm/r；进给速度 v_f 是单位时间内的进给位移量，单位为 mm/s 或 mm/min。对于刨削、插削等主运动为往复直线运动的加工，虽然可以不规定间歇进给速度，但要规定间歇进给的进给量。

进给量 f 、进给速度 v_f 和每齿进给量 f_z 之间的关系为： $v_f = f \cdot n = f_z \cdot z \cdot n$ (mm/s 或 mm/min)。

(3) 切削深度 a_p 。刀具切削刃与工件的接触长度在同时垂直于主运动和进给运动方向上的投影值称为切削深度 (mm)。外圆车削的切削深度就是工件已加工表面和待加工表面间的垂直距离， d_w 为待加工表面直径， d_m 为已加工表面直径，三者之间的关系为

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \quad (1.2)$$

1.2 切削变形区

金属的切削加工是一个复杂的塑性变形过程，工件材料在刀具的剪切挤压作用下，经过弹塑性变形，最后将待加工表面多余的材料与工件表面分离进而产生切屑。这一过程不仅应变大，而且通常是在高速、高温情况下进行的^[3,4]。图 1.2 为低速切削时切削层内三个变形区的示意图，Ⅰ为第一变形区，Ⅱ为第二变形区，Ⅲ为第三变形区。

(1) 第一变形区。当刀具前刀面以切削速度 v_c 挤压切削层时，切削层中的某点沿 OA 面开始产生剪切滑移，直至其流动方向开始与刀具前刀面平行，不再沿 OM 面产生滑移，切削层形成切屑沿刀具前刀面流出。从 OA 面开始发生塑性变形到 OM 面的剪切滑移基本完成，这一区域称为第一变形区^[1]。第一变形区的主要特征是沿滑移面的剪切滑移变形以及随之产生的加工硬化。

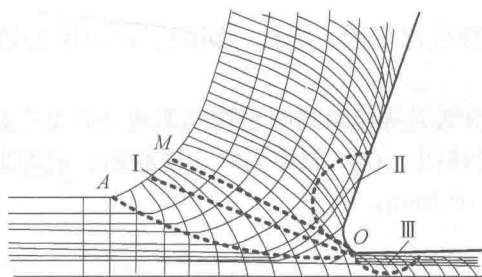


图 1.2 切削时形成的三个变形区

(2) 第二变形区。当剪切滑移形成的切屑在刀具前刀面流出时，切屑底层进一步受到刀具的挤压和摩擦，使靠近刀具前刀面处的金属再次产生剪切变形，这一区域称为第二变形区。

(3) 第三变形区。第三变形区是工件与刀具后刀面接触的区域，受到刀具刃口与刀具后刀面的挤压和摩擦，造成已加工表面变形。这是由于在实际切削中刀具刃口不可避免地存在钝圆半径，被挤压层再次受到刀具后刀面的拉伸、摩擦作用，进一步产生塑性变形，使已加工表层变形加剧。

1.3 切屑的形成

金属切削过程是切屑不断生成的过程。掌握金属切削规律，对提高切削效率、降低加工成本、改善产品质量有着至关重要的作用。

1.3.1 切屑的形成过程

通过试验得出：金属切削过程是工件切削层在受到刀具前刀面的挤压后而产生的以滑移为主的变形过程。

如图 1.3 所示， OA 面与 OM 面之间的塑性变形区域称为第一变形区。

在第一变形区内，变形的过程和特点是：当切削刃处于起始切削点 O 位置时，在切削层 OA 面上受刀具的 F_r' 作用后，使 OA 面上产生的切应力达到材料屈服强度 $\sigma_{0.2}$ ，引起金属材料组织中晶格在晶面上的剪切滑移，滑移方向与切应力方向一致，即与 F_r' 作用方向呈 45° 。继而切削层移动到 OM 面时，其上晶格在晶面上滑移的方向仍然与切削力方向呈 45° 。这主要

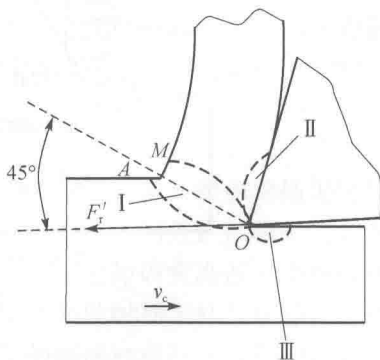


图 1.3 切削变形区域及特点

是由材料受力变形的特点决定的。因此，切削层经 OM 面后即被刀具切离而形成切屑^[5]。

由图 1.3 可知，切削层从起始到终止切削形成切屑是在极短时间内完成的，通常 OA 面称为起始滑移面， OM 面称为终止滑移面，它们之间是个很窄的塑性变形区域，仅为 $0.02\sim0.2\text{mm}$ 。

1.3.2 切屑的类型

根据剪切滑移后形成切屑的外形不同，切屑可分为四种类型。

1. 带状切屑

带状切屑如图 1.4 (a) 所示，切削层经塑性变形后被刀具切离。其形状是延绵不断的带状，并沿刀具前刀面流出。

2. 节状切屑

节状切屑如图 1.4 (b) 所示，切削层在塑性变形过程中，剪切面上局部位置处切应力达到材料强度极限而产生局部断裂，使切屑顶部开裂形成节状。

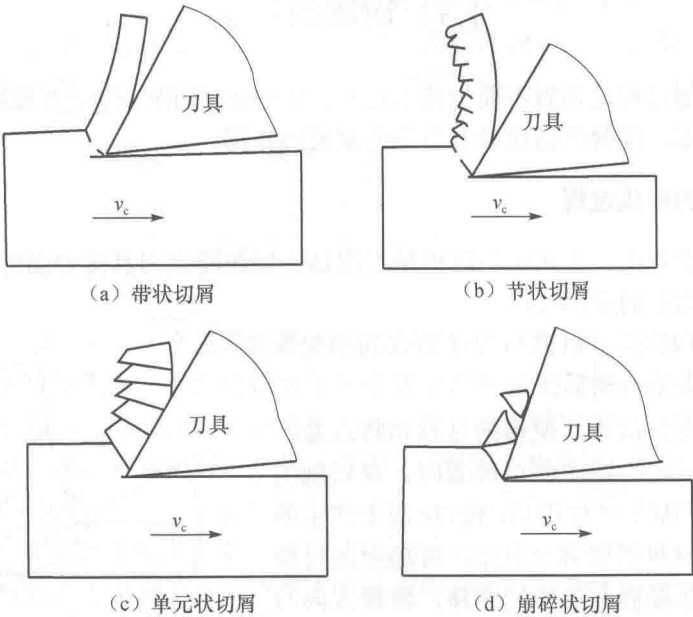


图 1.4 四种切屑类型