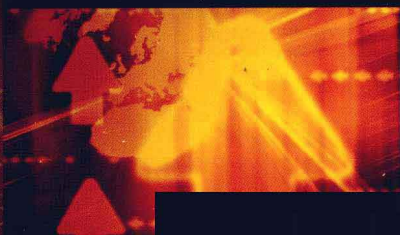


微细

切削技术

WEIXI QIEXIAO JISHU

石文天〇著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

微 细 切 削 技 术

石文天 著



机 械 工 业 出 版 社

本书是在作者对微细切削技术多年的理论和试验研究基础上写成的。

全书共分七章。其中,第1章主要介绍了微细切削技术的研究背景和研究现状;第2章阐述了微细切削区别于常规尺度切削的基础理论,并介绍了微细切削的理论特点;第3章为微细切削模型的建立与研究,主要探讨了微细切削的最小厚度现象以及正交切削模型的相关理论和计算,并进行了相关试验;第4章针对微细切削刀具,总结了微细切削刀具的材料及特点,进行了微成形车刀、铣刀、切槽刀和微小型齿轮滚刀的设计和试验;第5章为典型微小型零件的微细切削工艺研究,总结了微小型结构件的典型特点和工艺要求,按照轴类、板类、齿轮、三维结构件进行分类研究和试验;第6章是微细切削的表面粗糙度试验研究,分别采用单因素、正交和二次曲面响应方法进行了微细车削、铣削、车铣的对比试验研究;第7章对微细切削技术进行了总结与展望。

本书主要供有关从事微细切削技术、微小型加工技术、精密制造技术的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微细切削技术/石文天著. —北京:机械工业出版社, 2011.5
ISBN 978-7-111-34086-7

I. ①微… II. ①石… III. ①金属切削—技术 IV. ①TG5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第061141号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:曲彩云 责任编辑:庞晖

版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:陈沛 责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2011年6月第1版第1次印刷

169mm×239mm·11.25印张·181千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-34086-7

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010) 88379782

社服务中心:(010) 88361066

网络服务

销售一部:(010) 68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

微细切削技术是建立在传统机械切削技术基础之上，融合应用超精密加工技术、数控机床技术、CAD/CAM 技术、超精密检测技术、金属切削实验技术、微小型刀具设计技术等发展起来的针对微小型零部件及总成的一种微细加工技术。随着产品微型化、小型化的发展趋势，微小型复杂、异型、高强度、多尺度金属结构件的加工对微细加工技术提出了更高要求，原本由半导体集成电路制作工艺发展而来的微细加工方法，如光刻技术、刻蚀技术、超薄膜形成技术、离子注入加工技术、特种电加工技术、超声微加工技术等，在加工效率、加工质量、三维结构、材料多样性方面已显得力不从心。微细切削技术因其具有的加工精度高、加工成本低、加工效率高、三维加工能力强、适用工件材料范围广等诸多优点而得到迅速发展，并成为微细加工的重要手段，因其符合微机械零件材料多样化、结构三维化、功能复杂化、批量柔性化的发展趋势而成为国内外研究的热点和重点。

本书是在北京理工大学先进加工国防重点学科实验室的支持下完成的，主要内容是在导师王西彬教授的指导下，由作者在硕士和博士期间所做的科研课题总结而成。感谢整个课题组成员刘玉德、蒋放、解丽静、龙震海、辛民、杨洪建、马利杰、刘志兵、刘汉良、贾源、丁悦、郑树杰、武树成、孙凤举、董丰路、方泽平、丁红军等同志所作的大量前期工作和后续补充。在这里向他们致以衷心的感谢和崇高的敬意。

本书针对微细切削技术的基础理论进行了详细论述和具体分析，总结了微细切削技术的最小切削厚度现象、尺度效应理论、位错理论、非自由切削理论；对微细正交切削模型进行了理论分析和相关计算；针对微小型零件的不同工艺特点进行了微成形车刀、铣刀、切槽刀和微小型齿轮滚刀的设计和试验；总结和分析了微小型轴类、板类、齿轮、三维结构件的工艺特点，并进行了加工工艺的研究和零件

的制造；针对微细车削、微细铣削、微细正交车铣三种工艺，采用不同的试验方法进行了表面粗糙度的试验研究，并得到相关的优化工艺参数。

本书在北京工商大学人才强校专项资金的资助下才得以出版，在此谨致以衷心的感谢。

本书经由机械工业出版社曲彩云等编辑负责审稿出版，提出了很多宝贵意见，给予了很大的支持和帮助，在此谨致以衷心的感谢。

由于时间仓促，作者学识水平及试验条件有限，书中疏漏之处难免，敬请专家、读者不吝批评指正。

石文天

2010 年 12 月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 微细切削技术的背景	1
1.2 微细切削技术发展现状	2
1.2.1 微小型机床的研究和发展现状	2
1.2.2 微小型刀具的研究和发展现状	4
1.2.3 微细切削的试验、建模分析与理论研究概况	6
1.2.4 微细切削的工艺研究及代表性成果	10
第 2 章 微细切削区别于常规尺度切削的基础理论	15
2.1 概述	15
2.2 微细切削中的尺度效应	16
2.2.1 尺度效应的概念	16
2.2.2 微细切削中尺度效应的作用	17
2.3 微细切削中的位错理论	20
2.3.1 工件材料中的位错缺陷	20
2.3.2 位错理论的提出	21
2.3.3 微细切削过程的位错理论分析	22
2.4 非自由切削的定义及最小能量耗散理论	26
2.4.1 非自由切削的定义	26
2.4.2 最小能量耗散原理的定义	27
2.4.3 单元刀具切削下的最小能量耗散原理	29
2.4.4 最小能量耗散原理的相关检验	30
2.5 微细切削中的非自由切削	31
2.5.1 单切削刃刀具的等效切削刃和排屑角	31
2.5.2 考虑刀尖圆弧半径的等效切削刃和排屑角	32
2.5.3 非自由度系数及自由切削法	34
2.6 小结	34
第 3 章 微细切削模型的建立与研究	36
3.1 概述	36
3.2 微细切削的最小切削厚度	37
3.2.1 切削刃弹性回退量的计算	37

3.2.2 最小切削厚度的范围	38
3.2.3 最小切削厚度时刀具的负前角及切削力	40
3.3 微细切削模型的建立	42
3.3.1 微细切削的切削变形区	42
3.3.2 微细切削的切削力计算	45
3.3.3 微细切削的切削力分析	54
3.4 切削力验证试验	57
3.5 小结	60
第4章 微细切削刀具	61
4.1 概述	61
4.2 微小型刀具的基本特点	61
4.3 微细切削刀具材料	63
4.4 微小型成形车刀	65
4.4.1 微小型零件的成形车削	65
4.4.2 微小型成形车刀的设计	66
4.4.3 微小型成形车刀的应用	68
4.5 微小型切槽刀	69
4.6 微小型齿轮成形铣刀	70
4.6.1 微成形铣削齿轮零件	71
4.6.2 微小型齿轮铣刀主要结构参数设计	71
4.6.3 微小型齿轮铣刀齿形的设计计算	75
4.6.4 微小型齿轮铣刀的制造	77
4.7 微小型齿轮滚刀	78
4.7.1 微小型齿轮目标零件	78
4.7.2 微小型齿轮滚刀结构设计	80
4.7.3 微小型齿轮滚刀齿形设计与局部结构强度校核	84
4.7.4 微小型齿轮滚刀的加工	87
4.8 小结	89
第5章 典型微小型零件的微细切削工艺研究	90
5.1 概述	90
5.2 微细切削加工设备及刀具系统配置	90
5.3 典型微小型结构件的特点及工艺要求	92
5.3.1 微小型结构件的特点	92
5.3.2 微小型结构件的工艺要求	92
5.4 微小型轴类零件的加工工艺研究	94
5.4.1 微细轴的车削加工	94
5.4.2 微细轴的车铣加工	96

5.4.3 车铣与车削工艺的对比分析	97
5.5 微小型板类零件的加工工艺研究	98
5.6 微小型齿轮的加工工艺研究	100
5.6.1 微小型齿轮加工工艺综述	100
5.6.2 微小型齿轮的成形铣削加工	104
5.6.3 微小型齿轮的滚削加工	112
5.6.4 微小型齿轮的加工工艺对比与总结	113
5.7 微小型三维结构件的加工工艺研究	114
5.8 小结	122
第6章 微细切削的表面粗糙度试验研究	123
6.1 概述	123
6.2 试验设计方法概述	124
6.2.1 单因素试验设计	124
6.2.2 正交试验设计	124
6.2.3 响应曲面试验设计	125
6.3 试验设备与测量仪器	129
6.4 微细车削表面粗糙度研究	131
6.4.1 微细车削的理论表面粗糙度	131
6.4.2 微细车削表面粗糙度的单因素试验	132
6.4.3 基于正交试验方法的微细车削表面粗糙度试验	138
6.5 微细铣削表面粗糙度研究	142
6.5.1 微细铣削表面粗糙度的两种预测模型	142
6.5.2 微细铣削表面粗糙度的两种试验方案	144
6.5.3 微细铣削表面粗糙度的试验结果分析	146
6.6 微细车铣钛合金的表面粗糙度试验研究	149
6.6.1 微细正交车铣的理论表面粗糙度	150
6.6.2 基于二次响应曲面法的微细正交车铣表面粗糙度试验	151
6.6.3 微细正交车铣表面粗糙度试验结果分析	152
6.7 小结	158
第7章 总结与展望	159
7.1 全文总结	159
7.2 主要创新点	162
7.3 工作展望	163
参考文献	164

第 1 章

绪 论

1.1 微细切削技术的背景

近年来，微机械作为军民两用的高科技产品，受到世界各国的普遍关注，并得到迅速发展。微机械具有体积小、重量轻、能耗低、精度高、性能可靠、灵敏度及效率高等优点，易于实现整个系统的小型化、智能化，降低原材料和能源的消耗，从而可以降低成本，适于大批量生产。微机械符合产品小型化的趋势，在航空航天、生物医学、国防军事、精密仪器等领域有着广泛的应用前景。微机械技术（micro-mechanism）的发展导致了微机电系统（即 MEMS）的出现。MEMS 体积小、重量轻，是利用微细加工技术将机构及其致动器、控制器、传感器、电源等集成在一个微小体积范围内，而发挥机械功能的机电一体化产品，是机、电、光、磁、化学、自动控制、传感技术与信息处理等多种技术的综合。

微细加工技术最初是由半导体集成电路制作工艺发展而来的工艺方法，其最典型的应用就是大规模集成电路（VLSI）和超大规模集成电路（ULSI）的加工制造。传统的微细加工技术包括光刻技术、刻蚀技术、超薄膜形成技术、离子注入加工技术、特种电加工技术、超声微加工技术等。其中光刻技术是微细加工技术的主流技术，也是应用最广的一种技术。如实验室内利用飞秒激光（Femtosecond Laser）进行的微纳米加工技术可以达到的最高精度为 10nm。离子刻蚀技术下的致薄探测器探头，可以大大提高其灵敏度；致薄月球岩石样品，能从 10 μ m 致薄到 10nm，

而且能在 10nm 厚的 Au-Pa 膜上刻出 8nm 的线条来。

传统微细加工技术虽然可以达到极小的加工尺度和较高的加工精度,但只适于对特定材料以及二维和二维半几何形状的加工,不能满足微机械零件材料多样化、结构三维化、功能复杂化、批量柔性化的发展趋势。微细切削技术由于具有加工精度高、加工成本低、加工效率高、三维加工能力强、适用工件材料范围广等优点,而成为微细加工的重要手段,在近几年得到了飞速发展。微细切削技术是建立在传统机械切削技术基础之上,并融合应用超精密加工技术、数控机床技术、CAD/CAM 技术、超精密检测技术、金属切削实验技术、微小型刀具设计技术等发展起来的,针对微小型零部件及总成的一种微细加工技术。

微细切削技术适用于加工表面粗糙度和几何精度在数十纳米至微米之间的微小零件。由于受到机床刀具及加工方式等多方面的约束,微细切削有其加工极限,虽然不能达到原子级的加工水平,但仍能满足微小型零件和各种微小型三维结构件的加工需求。随着微小型刀具制备、微小型位置检测、微小型机床研制水平的提高,微细切削的加工对象和应用范围在逐渐扩大,如微机电引信中的微小型三维高承载金属结构件,制导兵器中的微机械陀螺、微惯性器件等,都成为微细切削技术的重点应用领域。而微小型复杂、异型、高强度、多尺度金属结构件的加工对微细切削技术提出了更高的要求,迫切需要我们z对微细切削的有关基础理论进行研究,对微细切削的工艺方法进行总结和相关的工艺试验研究。

1.2 微细切削技术发展现状

1.2.1 微小型机床的研究和发展现状

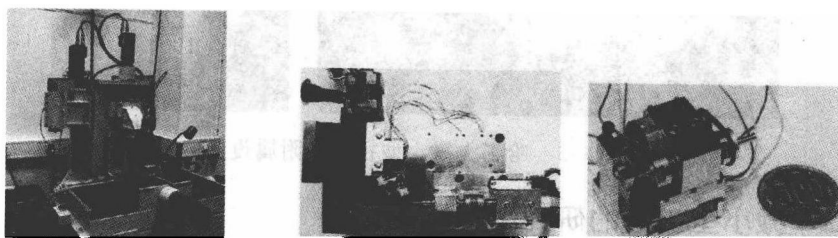
微细切削机床属于在精密与超精密机床的基础上发展起来的一种专用机床。各国在微细切削机床研究方面都有很大投入,取得了较大成果。

德国卡尔斯鲁厄大学(University of Karlsruhe)的机床与制造科学研究所设计了一种三轴微细铣削机床,如图 1-1a 所示。机床的外形尺寸为 400mm × 150mm × 220mm,定位精度优于 1μm;主轴最高转速达 160000r/min,是当时世界上转速最高的机床,能够保证足够的线速度;与高速主轴相匹配的是钢轴承座和陶瓷滚珠的混合轴承,具有很好的刚

性, 适合于加工淬硬钢等硬材料; 轴承跳动小于 $0.3\mu\text{m}$ 。

日本金泽大学 (Kanazawa University) 开发出了一种用于微细切削的车削系统, 如图 1-1b 所示。系统由工件与卡盘、刀具与刀座、机床主机、传感器件、观测单元、操作单元等部分组成, 整体尺寸很小, 可以放置在桌面上。针对微小型工件直接观察比较困难的问题, 专门配备了光学显微镜。主轴转速在 $3000 \sim 15000\text{r/min}$ 范围之间, 主轴的末端安装有一个单动卡盘, 能够夹持直径为 0.3mm 的工件。

日本通产省工业技术研究院 (MEL) 于 1996 年开发出世界上第一台微型车床, 主轴电动机额定功率 1.5W , 重量约 100g , 外形尺寸为 $32\text{mm} \times 25\text{mm} \times 30.5\text{mm}$, 如图 1-1c 所示。用该机床切削黄铜时, 可得到的加工工件圆度为 $2.5\mu\text{m}$, 其最小外圆直径为 $60\mu\text{m}$, 沿进给方向的表面粗糙度值为 $R_{\text{a}}1.5\mu\text{m}$ 。该微型车床的开发不仅验证了生产设备微型化及微型工厂的概念, 而且证明了微型机床能够节省能源和空间, 从而进一步节约生产资源。



a) 德国卡尔斯鲁厄大学的微机床 b) 日本金泽大学的微细车削系统 c) 日本MEL的微型车床

图 1-1 微型机床系统

在国内, 上海交通大学研制的微小型铣床, 如图 1-2 所示, 其外形尺寸为 $270\text{mm} \times 190\text{mm} \times 220\text{mm}$, 加工范围为 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 30\text{mm}$, 主轴最大转速为 60000r/min , 工作台定位精度为 $1.6\mu\text{m}$, 重复定位精度 $0.3\mu\text{m}$, X 向直线度误差为 $\pm 0.2\mu\text{m}$, Y 向直线度误差为 $\pm 0.3\mu\text{m}$ 。可加工壁厚 (最薄) 为 $20\mu\text{m}$, 深度为 $200\mu\text{m}$, 最大深径比为 10 的微小型同心圆形槽。

哈尔滨工业大学研制的三轴微小型立式铣床, 如图 1-3 所示。采用全闭环控制, 分辨率可达 $0.1\mu\text{m}$ 。其外形尺寸为 $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times 290\text{mm}$, 主轴最大转速为 160000r/min , 最大径向跳动量为 $1\mu\text{m}$; 驱动系统重复定位精度为 $0.25\mu\text{m}$, 速度范围 $1\mu\text{m/s} \sim 250\text{mm/s}$ 。

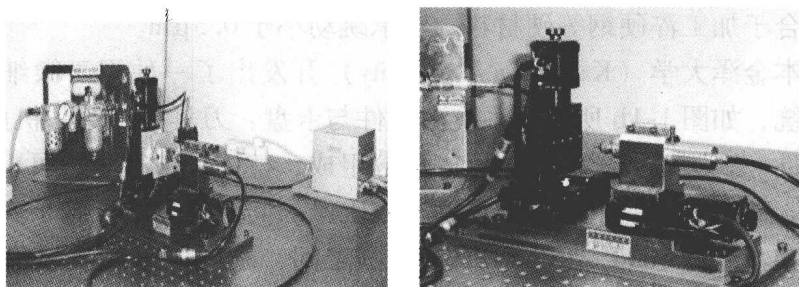


图 1-2 上海交通大学研制的微小型铣床

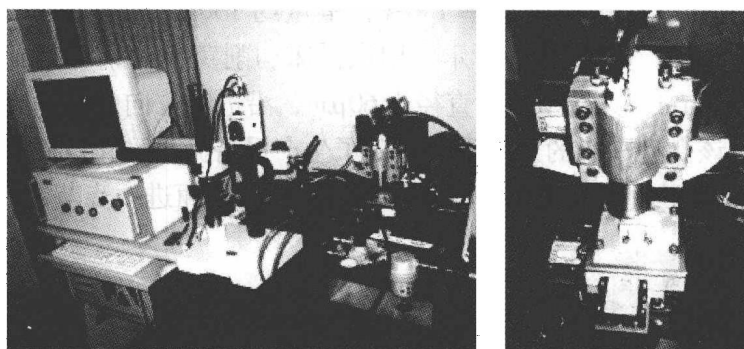


图 1-3 哈工大微小型机床及附属设备

1.2.2 微小型刀具的研究和发展现状

目前, 商品化供应的微细切削刀具的最小直径为 $50\mu\text{m}$ 。进行微细切削试验研究需要用到直径更小和尺寸更小的各种微细刀具, 这就必须借助于特种加工技术来制作此类刀具, 聚焦离子束溅射加工 (focused ion beam, FIB) 和电火花线电极磨削 (wire electrical discharge grinding, WEDG) 是常用的微细刀具制备技术。

利用聚焦离子束技术制备微细刀具的基本原理如图 1-4 所示: 将一个尖部半径为亚微米级的钨针浸泡在液态的镓金属中, 并在针尖处施加高密度的电场, 使镓金属产生离子化并加速至 20keV , 使之聚集在亚微米直径的斑点。然后在一个八极静电场中, 控制聚焦后的镓离子对工件进行加工。镓离子的动态能量使原子以溅射的形式向工件喷射, 通常每个入射镓离子可以去除 $3\sim 5$ 个工件原子, 因此可以精确地控制材料的去除。适用于 FIB 技术的刀具材料有: 钨合金、高速钢、单晶金刚石等。聚焦离子束溅射工艺中, 材料的去除率约为 $0.5\mu\text{m}^3/\text{s}$, 刀具的制备可以在 2h 以内完

成。该工艺的不足是入射离子束是呈高斯分布的，因此沿离子束的轴向去除的材料比沿周向去除的材料多。

通过应用聚焦离子束技术，许多国外和国内的科研院所制作出了尺寸更小的微细刀具。

美国桑迪亚国家实验室 (Sandia National Laboratories) 的 Adams 等人制备出了一系列的微细切削刀具：如以 M42 高速钢和 C2 细晶粒硬质合金材料作为刀具材料，制备出的直径小于 $25\mu\text{m}$ 的多刃复杂微细立铣刀，如图 1-5a 所示；具有三角形、矩形和其他复杂形状的表面，且刀口半径为 40nm ，直径为 $15 \sim 100\mu\text{m}$ 的刀具，以及宽度达到 $13\mu\text{m}$ 的微细槽和螺纹加工刀具，如图 1-5b 所示。

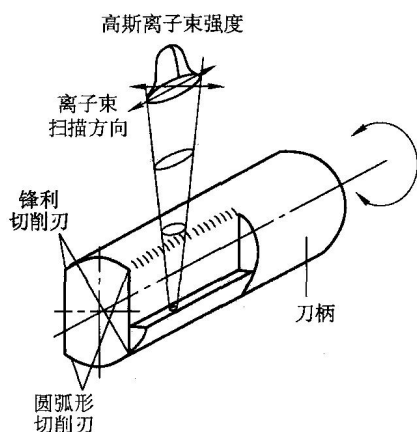
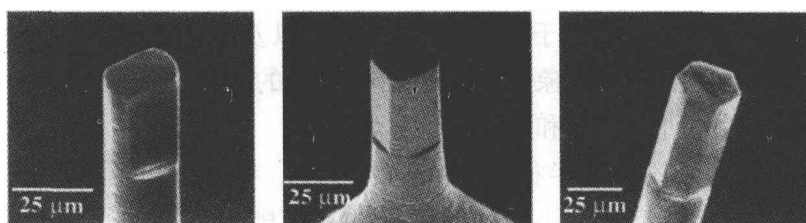
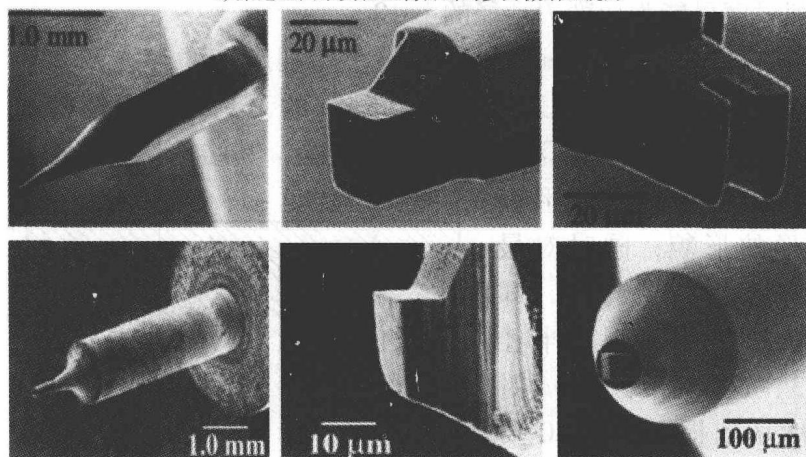


图 1-4 基于聚焦离子束溅射工艺的微细刀具制备原理



a) 桑迪亚国家实验室制备出的多刃微细立铣刀



b) 桑迪亚国家实验室制备出的微细异型刀具

图 1-5 桑迪亚国家实验室制备出的微小型刀具

日本理化研究所应用电火花线电极磨削 (WEDG) 的方法, 制备出了刀尖特征尺度为 $2\mu\text{m}$ 的金字塔形微细刀具, 以及超大深宽比的微细刀具 (见图 1-6)。用压痕试验评价了刀具的断裂强度, 其结果表明, 微刀具的强度与纳米级的表面质量有着很好的对应关系。

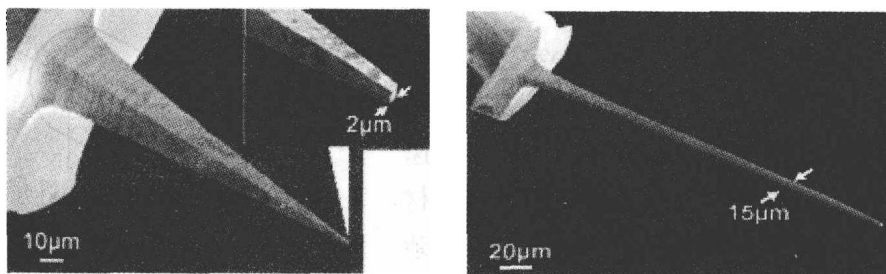


图 1-6 日本理化研究所制备出的微细刀具

1.2.3 微细切削的试验、建模分析与理论研究概况

1. 最小切削厚度现象的研究

微细切削过程中, 由于刃口半径的存在以及切削参数尺度的极其微小, 存在最小切削厚度现象。对最小切削厚度的理论和实验研究一直是国内外微细切削的研究热点和重点。

Ikawa 等人采用刃口半径为 10nm 的刀具, 对最小切削厚度进行了实验研究, 并得出结论: 最小切削厚度受刀具切削刃几何的影响非常显著, 最小切削厚度可能为切削刃半径的 $1/10$ 。

在微铣削过程中, Weule 指出了最小切削厚度的存在及其对表面成形的显著影响。实验采用刃口半径为 $5\mu\text{m}$ 的刀具, 在超精密加工机床上对 SAE1045 钢进行不同温度下的铣削实验, 其结论认为: 由于最小切削厚度的影响导致了成形表面锯齿形的形貌; 同时对最小切削厚度进行了计算, 即最小切削厚度为切削刃半径的 0.293 , 这个值比 Ikawa 对纳米尺度切削提出的 $1/10$ 要稍大, 如图 1-7 所示。

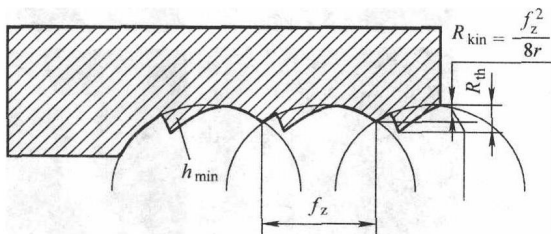


图 1-7 考虑最小切削厚度时的理论侧截面

Lucca 在对无氧铜的切削实验中发现: 当切削厚度很小时, 实验测得

的总能量远大于剪切能和克服前刀面摩擦所需能量之和,并指出,当切削厚度的值接近刀具刃口半径时,工件沿后刀面的弹性回复和犁切对切削过程的影响很大。试验同时研究了微切削过程中切削能量的尺度效应现象。

随后, Lucca 进行了高速超精密切削实验,实验采用单晶金刚石刀具,研究切削刃几何因素,如前角、刃口半径等对切屑、切入力和特殊能量现象的影响。实验表明,当微细切削中的切削厚度为 $10\text{nm} \sim 20\mu\text{m}$ 时,切削力和能量分布均受到刀具几何前角和名义前角的影响,当切削厚度接近切削刃半径时,切削力的大小由有效切削前角决定。他还采用金刚石刀具进行塑性铝的车削实验,并对切削过程的变化(即切削从以剪切为主到以犁切为主的过渡)情况进行了研究。实验发现采用刃口半径为 200nm 的金刚石刀具进行切削,当切削厚度小于刃口半径时,沿切入方向的单位增量引起的力的增大要比切削方向单位增量所引起的力的增大大得多,这与常规机械切削观察到的现象有所不同。实验还发现当切削厚度减小时,测得的力的向量更加接近切入力方向而不是切削方向;实验中还表明当切削厚度小于切削刃半径时,刀具是否磨损(即磨损状态)对切入力的影响非常大。

Taminiau 则开展了微细切削铜实验研究,并证实了切削能量随切削厚度的减小而增大的异常现象。根据实验所测得的切削力比能对工件材料的屈服剪切应力进行了估计,发现超精加工中的屈服剪切应力是传统切削的 2 倍左右,并将其解释为由超精加工时的高应变率现象导致。常规机械切削时采用刃口半径为 $15 \sim 200\mu\text{m}$ 的刀具,微细切削时采用刃口半径为 $15\mu\text{m}$ 的刀具,通过刀具对比实验,可得出切削力比是由未切切屑厚度与刃口半径之比确定的。

Kim 通过实验建立了考虑刀具柔性的切削厚度模型,并采用该模型对最小切削厚度的范围进行了估算。Ikawa 等人研究了金刚石刀具对铜的纳米切削,通过仿真结果分析发现:当切削厚度小于刀具切削刃半径时,不会因产生切屑而造成表面阶梯形的现象。

哈尔滨工业大学的孙雅洲对微细铣削的最小切削厚度进行了估算,认为最小切削厚度与切削力的变化周期、每齿进给量和对应的瞬时接触角有关,并得出了最小切削厚度的范围公式。

2. 微细切削的仿真试验研究

对于最小切削厚度的界定,作者充分考虑到了材料的性能,通过应用

弹塑性力学的相关理论,对刀具—工件之间的弹性接触进行了分析计算,并对最小切削厚度的范围进行了研究。由于最小切削厚度的存在,致使微细切削的模型发生了相应改变,国内外均已对微细切削的模型展开了仿真试验研究,研究时大多采用 MD (分子动力学, Molecular Dynamics) 方法。

Shimada 采用 MD 方法对金刚石刀具车削铜进行了研究,研究中事先假设刀具没有磨损且切削过程平稳。研究得出的结论:在该种假设条件下,切削的最小切削厚度在理论上可以达到 1nm 甚至更小,这个值一般为实际刀具刃口半径的 1/10,甚至 1/20。同时还发现:工件的变形深度和成形表面的表面粗糙度随刃口半径的增大而增大。

Kim 采用 MD 方法对微切削过程进行仿真,发现:实际微切削实验的结果与 MD 的结果相近,切削变形区稳态切屑瘤和剪切区的实验中所观测到的结果与 MD 仿真的结果非常相近。此外, Kim 还采用 MD 方法与滑移线理论相结合,用来对不同切削厚度与刃口圆弧半径之比(即切削厚度/刃口圆弧半径)时的切削力进行预测。MD 仿真结果可以得到滑移线理论计算时所需要的参数,如剪切角、切削前角等,然后以投影滑移线理论求得,其结果与 Lucca 的微切削实验数据经对比表明,两者结果非常相近。

上海交通大学的李红涛应用细观力学应变梯度理论,引入尺度变量对材料本构关系的 JC (Johnson-Cook) 模型进行修正,建立了以考虑介观尺度力学效应为基础的材料切削本构模型;还在综合考虑刀具切削刃半径、接触摩擦和材料断裂失效准则的前提下,建立了平面应变条件下正交切削过程中的有限元仿真模型;最后,应用仿真模型对尺度效应产生机理进行分析,并得出以下结论:①介观尺度下,材料力学性能的变化是微细切削尺度效应的主要原因,修正的 JC 模型为描述这种尺度效应提供了有效手段;②刀具切削刃半径与切削深度相当是产生犁切现象的原因,从而造成介观尺度切削时的最小切削厚度现象;③刀具前角对介观尺度切削最小切削厚度有显著的影响。

清华大学的方刚针对硅和铜的加工过程进行了 MD 模拟,此次模拟对微尺度下脆性材料从脆性到塑性转变时的刀具条件进行了讨论,并得出了结论:刀具应具有较大负前角,以保证在切削区域有足够的压应力方能完成脆性到塑性的切削条件转变。

郭斌教授等人利用 MD 模拟,对微观尺度上的单晶铜弯曲裂纹的萌生过程、扩展过程及其产生机理进行了研究。研究表明:由于应变能的不断积累,致使晶体内部产生空位,材料的裂纹正好萌生于空位,空位的合并形成纳米级裂纹,后续微观裂纹的扩展则类似于宏观裂纹;裂纹缺陷促进了裂纹的萌生和扩展。

哈尔滨工业大学董申教授等人采用 MD 三维模型研究单晶铜纳米切削过程。通过分析切削过程中的瞬间原子图像、切削力、单位切削力和轴向切削力与切向切削力的比值发现,在整个切削过程中有位错产生,使加工表面发生弹性回复,但切屑体积未发生改变,切屑以原子团的方式被去除,单位切削力和轴向切削力与切向切削力的比值项比传统切削要大得多。由此得出了单晶铜纳米切削过程是位错在晶体中运动产生的塑性变形的结论。

3. 微细切削力的试验研究

微细切削的切削力对切削过程的影响显著。切削力会施加于刚性较弱的微切削刀具,从而导致刀具的变形甚至折断;而且切削力会使刀具-工件之间产生弹性变形,导致工件弯曲,从而影响加工精度,制约加工极限。切削刃的锋利程度,即刃口半径的大小,会极大地影响切削力,所以对刀具刃口半径的分析研究引起了各方面的极大重视。随着单齿进给量的下降和轴向切削深度的降低,单位切削力会急剧增加。典型的微铣削力在 100mN 的量级内,在很大程度上与材料的去除率无关。

Zinan 等人的研究表明,随着工件直径的下降,工件的刚性也随之下降。因此,为了提高加工精度,应对微细切削的切削力加以控制,使切削力在数值上小于导致工件发生塑性变形的力。通过试验给出了三向切削力随切削速度的上升而下降的变化曲线。当切削速度 $v = 3\text{m/min}$ 、切削深度 $a_p = 5\mu\text{m}$ 时,切削力 F_c 约为 1mN。根据材料强度公式,估算出了这种切削力作用下的工件变形和内部最大应力。如果工件直径为 $20\mu\text{m}$,那么变形量为 $0.04\mu\text{m}$,最大内应力为 80MPa,低于材料的塑性变形极限。

Tansel 等人研究了微细铣削时刀具磨损量与切削力特征之间的对应关系。利用直径为 0.08mm 的硬质合金微细立铣刀,分别对钢和铝合金进行了微细铣削试验,并测量了切削力信号。试验结果表明,加工铝合金等软材料时,切削力随磨损量的增加而单调增加。因此,可以利用切削力的特征来估计刀具的磨损状态,在此基础上提出了两种神经网络算法,并成功地预测了微细立铣刀的磨损量。而加工钢等硬材料时,刀具磨损量和切削