



装备科技译著出版基金

微制造

——微型产品的设计与制造

Micro-Manufacturing

Design and Manufacturing of Micro-Products

【美】穆阿姆梅尔·科驰 (MUAMMER KOÇ)

主编

图格鲁勒·欧泽勒 (TUĞRUL ÖZEL)

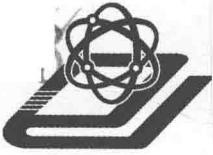
于化东 主译

王作斌 主审

WILEY



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

微制造

——微型产品的设计与制造

Micro-Manufacturing
Design and Manufacturing of Micro-Products

[美] 穆阿姆梅尔·科驰 (MUAMMER KOÇ) 主编
图格鲁勒·欧泽勒 (TUĞRUL ÖZEL)

于化东 主译
王作斌 主审

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2013-050号

图书在版编目(CIP)数据

微制造:微型产品的设计与制造/(美)穆阿姆梅尔·科驰(Muammer Koc),(美)图格鲁勒·欧泽勒(Tugrul Ozel)主编;于化东主译. —北京:国防工业出版社,2017. 1

书名原文:Micro-Manufacturing:Design and Manufacturing of Micro-Products
ISBN 978-7-118-10846-0

I. ①微… II. ①穆… ②图… ③于… III. ①工业产品-产品设计 ②工业产品-制造 IV. ①TB4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第235294号

Micro - Manufacturing by MUAMMER KOÇ, TUĞRUL ÖZEL

ISBN 978 - 0 - 470 - 55644 - 3

Copyright © 2011 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under John Wiley & Sons license. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 22½ 字数 416 千字

2017年1月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 98.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

主译主审者简介

于化东 男,1961年出生,工学博士,长春理工大学机电工程学院教授,博士生导师,俄罗斯圣彼得堡国立研究型信息技术机械与光学大学荣誉博士。现任吉林省精密微制造、检测及装备重点实验室主任,同时担任教育部机械基础课程教学指导委员会副主任委员、纳米操纵制造与测量国际学会主席、中国计量测试学会副理事长、973项目首席科学家。1998年4月获得日本千叶大学博士学位,1998年4月至2000年12月曾就职于世界著名工具制造商Sandvik日本公司技术研发部。多年从事硬脆材料精密加工技术、精密与超精密加工技术及微光机电一体化技术方面的教学与科研工作。近年来,他领导的团队致力于微制造系统开发、机械微制造技术以及相关微加工基础理论的研究,取得了丰硕的研究成果。先后获得省部级科研奖励4项,发表学术论文70余篇,申请发明专利36项。

负责全书的主译与统稿。

王作斌 男,1960年出生,工学博士,长春理工大学电子信息工程学院教授,博士生导师,“长白学者”特聘教授,英国Bedfordshire大学和西交利物浦大学兼职教授。长春理工大学国家纳米操纵与制造国际联合研究中心主任,吉林省纳米操纵、装配与制造国际科技合作基地主任,吉林省纳米操纵与制造科技创新中心主任,长春市纳米制造技术与应用科技创新中心主任,3M-NANO国际会议创始主席(<http://www.3m-nano.org>),3M-NANO国际学会副主席兼秘书长。分别于1982年和1985年获长春光学精密机械学院(现长春理工大学)光学电子专业学士和硕士学位。1993年,获原国家教委和英国文化委员会联合选派的中英友好奖学金(SBFSS)赴英国Warwick大学微工程与纳米技术中心攻读博士学位。1997年5月博士毕业至2010年6月之间,在英国Cardiff大学先后任研究助理、高级研究员,参加并领导过多个欧盟框架项目。

近年来一直从事纳米测量与制造技术研究,主要研究包括:激光纳米制造技术和机器人纳米操纵技术。主持欧盟第七研究框架、国家973前期、国家国际合作专项、国家自然科学基金、博士点基金、吉林省科技厅研究计划等多个项目。近5年申请发明专利17项(已授权7项),发表国际杂志论文30余篇。

负责全书的校译与审核。

主编者简介



Muammer Koç 博士

Muammer Koç 博士是美国国家自然科学基金委工业与大学合作精密成形研究中心主任,弗吉尼亚联邦大学机械工程系副教授,伊斯坦布尔城市大学工业工程系副教授。研究领域包括微制造过程与系统、微制造、微纳观功能表面结构设计以及产品创新。



Tuğrul Özel 博士

Tuğrul Özel 博士是美国罗格斯大学制造与自动化研究实验室主任,工业与系统工程系副教授。研究领域包括制造过程与自动化系统、加工过程计算模拟、激光微纳加工以及微型产品的设计与制造。

撰稿者简介

ABU BAKAR

新加坡国立大学机械工程系。

ALI ASAD

新加坡国立大学机械工程系。

VAMSI K. BALIA

美国华盛顿州立大学机械与材料工程学院。

AMIT BANDYOPADHYAY

美国华盛顿州立大学机械与材料工程学院。

SGELDON A. BERNARD

美国华盛顿州立大学机械与材料工程学院。

SUSMITA BOSE

美国华盛顿州立大学机械与材料工程学院。

KUNIAKII DOHDA

日本名古屋工业大学工程物理、电子与机械系教授。

GANG FU

新加坡南洋理工大学机械工程系。

MUHAMMAD PERVEJ

新加坡国立大学机械工程系。

OMKAR G. KARHADE

亚利桑那钱德勒英特尔公司加工技术开发工程师。

MUAMMER KOÇ

美国国家自然科学基金委工业与大学合作精密成形研究中心主任,弗吉尼亚联邦大学机械工程系副教授,伊斯坦布尔城市大学工业工程系副教授。

THOMAS KURFESS

美国克莱蒙森大学自动化国际研究中心教授, BMW 产品制造负责人。

NGIAP HIANG LOH

新加坡南洋理工大学机械工程系。

SASAWAT MAHABUNPHACHAI

泰国国家金属与材料技术中心。

TAKEHIKO MAKINO

日本名古屋工业大学工程物理、电子与机械系副教授。

TAKESHI MASAKI

新加坡国立大学机械工程系。

TUĞRUL ÖZEL

美国罗格斯大学工学院制造自动化研究实验室主任,工业与系统工程系副教授。

MUSTAFIZUR RAHMAN

新加坡国立大学机械工程系教授。

BEE YEN TAY

新加坡南洋理工大学机械工程系。

KASIF TEKER

美国霜堡州立大学物理与工程系副教授。

THANONGSAK THEPSONTHI

美国罗格斯新泽西州立大学工业与工程系制造自动化研究室。

SHU BENG TOR

新加坡南洋理工大学机械工程系。

YOKE SAN WONG

新加坡南洋理工大学机械工程系。

BENXIN WU

美国伊利诺伊斯理工学院机械工程系激光辅助制造与应用实验室副教授。

DONGGANG YAO

美国佐治亚理工学院材料科学与工程学院副教授。

译 者 序

本书是由 Muammer Koç 博士和 Tuğrul Özel 博士牵头组织微制造领域世界著名专家学者共同编著而成的。本书针对广泛的主题和应用,系统描述了微制造领域相关的基础知识、基本理论和加工技术,既包含作者多年的科学研究成果,也包含了该领域的技术诀窍和科学发现,是世界范围内该领域著名学者的研究成果集大成。微制造技术是连接微观与宏观制造领域的桥梁技术,是 21 世纪的重点发展方向,然而,与微制造技术相关的著作大多着重介绍基于 MEMS 的硅微加工,很少涉及机械微加工,本书是首批关于非硅材料微制造的书籍之一。本书对于国内正在兴起的机械微制造技术研究具有重要的指导和参考价值,为致力于微制造领域研究的学生、研究人员、工程师、管理人员和教师提供有益的帮助。

3D 微小零件广泛应用于航空航天、国防、医疗、通信等领域,如微型传感器、引信、微卫星零部件、光学阵列元件、微型电子零部件、微马达、血管支架以及生物芯片等。微小零件不仅在尺寸上变得越来越小,在使用功能、材料特性、结构形状、可靠性等方面的要求也越来越高。结构形状的特异化、材料的复合多样化、尺寸与表面质量要求的高精度化成为微小型零件的显著特征。

LIGA、MEMS 等技术主要适合于 2D 和 2.5D 硅基材料微小零件的制造,存在一定的局限性,难以满足工程上的需求;采用机械微加工方法可利用多种工程材料制造几何形状复杂的微小零件,具有成本低、效率高、精度高等优点,已成为微制造领域的一个重要发展方向。

机械微加工技术已受到各国的高度重视。日本、欧盟、韩国和美国等发达国家都投入了大量的人力、物力和财力,开展相关技术方面的研究与开发。1991 年—2000 年日本产业技术综合研究所(AIST)主导进行了微型工厂的开发计划,以开发各式超精密微加工设备、成型机用于精密微型零件的制造;欧盟自 2004 年起进行名为 4M - Multi Material Micro Manufacture Network of Excellence 的跨国性计划,整合了欧盟各成员国的研发资源,在 2004 年—2009 年间累计已投入超过 30 亿欧元,以期能于最短的时间内获得最大的技术与应用突破;韩国也于 2004 年起投入 6000 万美元,进行名为 Development of Micro - Factory System for Next Generation 的 5 年计划;美国自 2005 年起,开始重视精密微机械制造(Micro/Meso Mechanical Manufacturing, M4)技术的开发,其

国家智库单位 WTEC (World Technology Evaluation Center, Inc.) 和 NSF (National Science Foundation) 等机构共同出资, 针对国际上 Non - MEMS 微型加工技术研究发展现状与趋势组成考察团, 分赴日本、韩国、欧盟等国家和地区的全世界 47 个微制造技术相关研发机构进行调查, 调查报告中指出, Non - MEMS 超精密微机械制造技术将成为 21 世纪重要新技术, 是改变传统加工理念(加工时间、地点、方式)的技术, 是增强美国竞争优势的战略性技术。

目前, 国内有清华大学、北京大学、哈尔滨工业大学、北京理工大学、华中科技大学、南京航空航天大学、长春理工大学、北京航空精密机械研究所等多所大学和研究所相继开展精密微加工技术及微制造系统方面的研究工作, 取得了一些卓有成效的研究成果。

本书的突出特点: 国际性: 多个章节由不同研究机构的多名国际知名学者担任, 全书汇集了国际微制造领域的最新成果; 新颖性: 在阐述经典基础理论的基础上, 详述了 MEMS 制造、非硅微制造、微传感技术等当前微制造领域的最新成果; 系统性: 全书系统阐述了非硅机械微制造、激光微制造、微 EMD、微成形和分层微制造等加工方法, 并介绍了微制造过程建模与分析、微尺度检测评价及控制等相关原理及应用。

编译工作由以下人员完成:

于化东教授(长春理工大学)负责第一章、第八章翻译, 并负责全书的统稿;

翁占坤教授(长春理工大学)负责第二章、第六章翻译;

李一全副教授(长春理工大学)负责第三章翻译;

王世峰副教授(长春理工大学)负责第四章翻译;

于占江博士(长春理工大学)负责第五章翻译;

王春举副教授(哈尔滨工业大学)负责第七章、第九章翻译;

许金凯副研究员(长春理工大学)负责第十章翻译;

薛常喜副教授(长春理工大学)负责第十一章翻译。

我们殷切期望本书的翻译和出版能够对我国从事微制造相关技术的教学与科学研究工作的专家学者提供有益的启发、参考和借鉴, 从而推动我国微制造领域的技术进步与发展。本书翻译力图保持原著的表达形式与写作风格, 但限于译者的学识和专业水平, 译文中难免有疏漏和不当之处, 敬请读者批评指正。

译者

2016 年 10 月

前 言

自 20 世纪 90 年代初期开始,无论是日常生活还是工业领域对紧凑、集成化微小产品的需求日益增加。日常产品不仅变得更小,而且集成了越来越多的功能。此外,许多装置都具有微小化趋势,如便携式电源装置(蓄电池、燃料电池、微型涡轮机)、电子冷却系统、医学装置(起搏器、导管和支架)以及传感器等。这些装置中的零件也因此变得越来越小,达到了微/介观尺度,不久的将来有望达到纳观尺度。硅基材料的微制造技术已经得到了完善的发展并且广泛应用于电子产品制造,而且与半导体、微电子及微制造过程相关的书籍已出版成百上千种。该技术显然适合于上述微小产品以及微机电系统(MEMS)制造,然而,这些技术局限于硅基材料加工,当制造形状复杂的金属微小零件时,则应该采用微/介观的成形和切削技术。

本书在世界范围内收集了各领域著名学者的研究成果,是首批关于非硅材料微制造的书籍之一。我们的主要目标是,针对广泛的主题和应用,将相关经验、技术诀窍和科学发现进行系统整理,为致力于微制造领域研究的学生、研究人员、工程师、管理人员和教师提供有益的帮助。

本书第一章由 M. Koç 和 T. Özel 博士撰写,总结了当前微制造的最新进展,包括尺寸效应、微制造应用和模具等。第二章由 K. Teker 博士完成,介绍了硅基材料的微制造方法,以便读者将相关方法与其余各章所阐述的内容进行比较。T. Makino 和 K. Dohda 博士撰写了第三章,详细阐述了微制造过程的建模与分析中的各种问题,并对不同方法进行了比较分析。O. Karhade 和 T. Kurfess 博士在第四章中介绍了微尺度下测量、检测以及质量控制等的基本手段和方法。A. Bandyopadhyay 博士等在第五章中介绍了分层微制造技术及其在医学装置和传感器方面的应用。在第六章中,Wu 和 T. Özel 博士通过相关实例叙述了激光微制造过程,并讨论了长短脉冲激光与材料间相互作用。Yao 博士在第七章描述了高分子材料微注射成形技术。T. Özel 博士及其合作者在第八章讨论了机械微加工技术。M. Koç 博士与其同事 Mahabunphachai 博士撰写了第九章,介绍了微锻造、微冲压和微液压成形等微成形技术,并讨论了尺寸效应。Rahman 博士及其研究团队完成了第十章,讨论了微细电火花加工技术及设备

研制方法。Fu Gang 博士在第十一章中,通过实例介绍了微金属注射成形技术及应用。

我们向本书所有的撰稿者表示感谢,同时非常感谢 John Wiley 的 Anita Lehwani 女士,感谢她对本书的编写和出版所提供的帮助。

Muammer Koç
Tuğrul Özel
2010年6月

目 录

第一章 微制造基础	1
1.1 引言	1
1.2 微成形(微尺度变形加工)	3
1.2.1 微成形加工中的尺寸效应	4
1.2.2 微尺度变形数值仿真	7
1.3 分立零件微制造的机械微加工	8
1.3.1 机械微加工中的尺寸效应	11
参考文献	14
第二章 半导体工业中的微制造工艺	19
2.1 引言	19
2.2 半导体衬底	19
2.2.1 硅	19
2.2.2 硅片制造	20
2.2.3 硅的氧化	21
2.2.4 碳化硅(SiC)与砷化镓(GaAs)	22
2.3 化学气相沉积(CVD)	22
2.3.1 CVD 的类型	23
2.3.2 CVD 生长的优缺点	24
2.4 光刻技术	25
2.5 物理气相沉积(PVD)	26
2.6 干法刻蚀技术	28
2.7 湿法体材料微加工	29
2.8 总结	30
参考文献	30
第三章 微尺度建模与分析	31
3.1 引言	31
3.2 微尺度下连续介质模型局限性	32
3.3 修正的连续介质模型	34
3.4 分子动力学模拟及其局限性	35

3.5	微尺度模拟方法实例及其相互比较	36
3.5.1	均匀摩擦下多晶体各向异性有限元法	36
3.5.2	利用第一性原理计算电子态获得原子间势对摩擦界面进行 分子动力学模拟	41
3.5.3	晶体塑性有限元与分子动力学结合(注射—锻粗)	45
3.6	总结、结论以及待研究的问题	50
	参考文献	51
第四章	微尺度测量、检测与加工控制	52
4.1	引言	52
4.2	空间检测	53
4.2.1	光学方法	53
4.3	数字全息成像显微系统	59
4.3.1	扫描式电子显微镜	60
4.4	微坐标测量机—— μ CMM	61
4.5	扫描式探针显微镜	62
4.5.1	微计算机 X 射线照相术	63
4.5.2	扫描声学显微镜	64
4.5.3	微机械部件的测温	65
4.6	机械特性的测量	66
4.6.1	拉曼光谱法	66
4.6.2	弯曲测试	67
4.6.3	拉伸测试	67
4.6.4	界面特性	68
	参考文献	68
第五章	分层微制造	73
5.1	引言	73
5.1.1	历史	74
5.1.2	加工步骤	75
5.1.3	分层制造的优势	80
5.2	分层制造工艺	81
5.2.1	分类	81
5.2.2	工艺细节	81
5.3	材料和分层制造加工能力	100
5.3.1	材料	100
5.3.2	分层制造加工能力	102

5.4	分层制造技术的应用	105
5.4.1	快速成型	105
5.4.2	快速模具	106
5.4.3	快速/直接制造	109
5.5	发展趋势	112
	参考文献	114
第六章	激光微加工	125
6.1	引言	125
6.2	激光辐射、吸收和热效应	127
6.3	激光加工材料	129
6.3.1	激光加工金属和合金	129
6.3.2	激光加工处理聚合物和复合材料	130
6.3.3	激光加工处理玻璃和硅	130
6.3.4	激光加工陶瓷与硅	130
6.4	激光加工工艺参数	131
6.4.1	激光光斑尺寸和光束质量	131
6.4.2	峰值功率	131
6.4.3	脉冲持续时间	132
6.4.4	脉冲重复率	132
6.5	超短脉冲激光烧蚀	133
6.5.1	双温传热	133
6.5.2	表面的电子发射和库仑爆炸	135
6.5.3	电子发射形成早期等离子体	136
6.5.4	流体动力学膨胀	137
6.6	纳秒脉冲激光烧蚀	140
6.6.1	烧蚀机理	140
6.6.2	双脉冲激光烧蚀	142
6.6.3	纳秒激光诱导等离子体	143
6.7	激光冲击强化	145
6.7.1	激光冲击强化加工	145
6.7.2	激光冲击强化物理学	146
6.7.3	LSP 对材料机械特性的影响	149
6.7.4	LSP 的优势、劣势和应用	150
	参考文献	151
第七章	聚合物微成型/成形工艺	157
7.1	引言	157

7.2	微模具成型用聚合物材料	159
7.3	微模具成型工艺分类	160
7.4	微模具成型加工普遍动力学	163
7.5	微注射模具成型	166
7.5.1	微注射成型设备	167
7.5.2	注射模具快速热循环	168
7.5.3	微注射模具成型工艺策略	169
7.6	热模压	170
7.6.1	高效热循环	171
7.6.2	恒温模压成型	173
7.6.3	贯穿厚度压印	173
7.6.4	壳体图案模压	174
7.6.5	模压成形压力实现	176
7.7	微模具制造	177
7.8	结论与正在进行的研究	178
	参考文献	181
第八章	机械微制造	186
8.1	引言	186
8.2	微尺度下材料去除	187
8.2.1	尺寸效应	187
8.2.2	极限切削厚度	188
8.2.3	微结构和晶粒尺寸影响	189
8.3	刀具几何、磨损与变形	190
8.3.1	微型刀具几何形状与涂层	191
8.3.2	微切削刀具磨损机理	193
8.3.3	动态载荷下刀具刚度和变形	194
8.4	微车削	196
8.4.1	作为刀具材料的金刚石	196
8.4.2	金刚石微切削	197
8.5	微端铣	198
8.5.1	微型铣刀	199
8.5.2	微铣削力学	200
8.5.3	微铣削数值分析	201
8.5.4	微铣削动态特性	204
8.5.5	微端铣工艺规划	204
8.6	微钻削	207

8.7	微磨削	208
8.8	微机床	210
	参考文献	211
第九章	微成形	217
9.1	引言	217
9.2	微锻造	222
9.3	微压印/模压	223
9.4	微挤压	225
9.5	微弯曲	227
9.6	微冲压成形	228
9.7	微拉深成形	228
9.8	微液压成形	231
9.9	微成形应用设备和系统	232
9.10	总结与未来工作	233
	参考文献	234
第十章	微细电火花加工 (μ-EDM)	236
10.1	引言	236
10.2	微细电火花加工工艺	237
10.2.1	微细电火花加工的物理原理	237
10.2.2	脉冲发生器/电源	238
10.2.3	微细电火花加工的变型	242
10.3	微细电火花加工工艺的参数控制	246
10.3.1	电参数	246
10.3.2	材料的性能参数	248
10.3.3	机械运动控制参数	249
10.4	微细电火花加工性能测试	251
10.4.1	材料去除率	251
10.4.2	工具电极损耗率	251
10.4.3	表面质量	251
10.4.4	电火花间隙/切缝宽度、间隙宽度	252
10.4.5	微细电火花加工小型化的公差和限制	252
10.5	微细电火花加工工艺应用与实例	253
10.5.1	在线电极制备	253
10.5.2	利用微细电火花加工刀具	254
10.5.3	制造用于钻孔的微型钻头 (孔的尺寸与钻头相同)	256
10.5.4	重复的模式转移批量处理	257

10.5.5	成型加工微型腔和微型结构	260
10.5.6	微细电火花铣削制造三维微特征和微模具	261
10.5.7	微细电火花铣削精细特征	262
10.5.8	大深径比微孔和喷嘴制造	262
10.5.9	微细电火花加工的其他创新应用	263
10.6	微细电火花加工最近的发展和研究	264
10.6.1	LIGA 和微细电火花加工	264
10.6.2	微细电火花加工和微磨削	265
10.6.3	微细电火花加工和微细电解加工	265
10.6.4	微细电火花加工和微超声波加工	266
10.6.5	振动辅助微细电火花加工	267
10.6.6	混粉微细电火花加工	268
10.6.7	微细电化学放电加工	269
10.7	总结	270
	参考文献	270
第十一章	微尺度金属粉末注射成型技术	275
11.1	金属注射成型技术介绍	275
11.2	微金属注射成型技术	276
11.3	原料准备	277
11.3.1	粉末	277
11.3.2	黏结剂	278
11.3.3	原材料的混炼	279
11.4	注射成型	281
11.4.1	微金属粉末注射成型技术的设备及工艺参数	281
11.4.2	微金属粉末注射成型技术的模具镶块	282
11.4.3	微金属粉末注射成型技术的变模温	283
11.5	脱脂	285
11.6	烧结	286
11.6.1	微结构的烧结	287
11.6.2	微齿轮的烧结	288
11.7	结束语	289
	参考文献	289
	主题词索引	296