



国际制造业先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

微米加工与纳米制造

Microfabrication and Nanomanufacturing

[美] Mark J. Jackson 主编
繆旻 张月霞 李振松 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际制造业先进技术译丛

微米加工与纳米制造

[美] 马克 J. 杰克逊 (Mark J. Jackson) 主编
 缪 旻 张月霞 李振松 译
 郝一龙 金玉丰 审



机械工业出版社

Microfabrication and Nanomanufacturing/by Mark J. Jackson/ISBN: 978-0-8247-2431-3

Copyright© 2006 by Taylor & Francis Group, LLC

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并在限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有, 翻印必究。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01-2007-4183 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

微米加工与纳米制造/(美) 杰克逊 (Jackson, M. J.) 主编; 缪旻等译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 9

(国际制造业先进技术译丛)

书名原文: Microfabrication and Nanomanufacturing

ISBN 978- 7- 111- 51482- 4

I. ①微… II. ①杰… ②缪… III. ①纳米技术 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 214127 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: 孔 劲 责任编辑: 孔 劲 臧弋心

版式设计: 霍永明 责任校对: 丁丽丽

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 李 洋

机工印刷厂印刷

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 25 印张 · 554 千字

0001—2000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-51482-4

定价: 128.00 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

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

当前，微/纳米技术日益融合，形成了对微小对象进行精细操控、加工和探查的有效手段；微米/纳米技术已形成较为独立的技术门类，逐渐渗透到国民经济、科学研究、国家安全等诸多领域，并在很大程度上影响其发展走向。

本书是微米/纳米加工技术方面的一本优秀著作，既有一定的理论深度，又有足够的广度，而且还有较高的可读性。它较为系统地梳理了微米加工（特别是非硅基加工）技术以及纳米加工手段，结合微流体、微惯性器件、纳米传感器等方面的典型案例，阐释了这些技术的原理和特点，提出了特定问题的高效率解决方案，给出了工艺设计方面的指南，并对这些技术的发展走向做出了高屋建瓴的判断。

本书可供微米/纳米技术的研究者、微米/纳米工艺工程师、微米/纳米机电系统及其三维集成与封装方面的设计师、相关 EDA 软件的开发者、微电子工程师，以及微米/纳米技术界、微电子行业中对未来技术走向高度敏感的管理者和投资者使用。作为一本组织严谨而又行文流畅、可读性强、方便自学的图书，本书也可作为研究生教材和教师教辅参考用书。

译者序

微米加工作为一门工程技术的历史可以追溯到 20 世纪 60 年代，当时其手段和产品非常有限，主要局限于微电子领域和屈指可数的几种传感器与执行器。从 20 世纪 90 年代开始，在集成电路工艺发展的推动和多样化应用需求的拉动下，微米技术也迎来了百花齐放的时代；90 年代还出现了纳米技术，它使得人们能够第一次以自顶向下、自底向上或者两者相结合的方式真正操控分子级的对象，因而能洞察自然界的深层次奥秘，并构建前所未见的功能单元。在 21 世纪第一个 10 年结束之际，微/纳米技术日益融合，形成了一类对微小对象进行精细操控、加工和探查的有效手段，一方面丰富、深化了人们对微观世界的科学规律的认识，另一方面为各类应用提供了可高度集成的对多物理量敏感、智能信号处理/通信乃至对外界具有操控能力的装置，并激发了人们在相关技术方面的发展新思路。此外，人们意识到，基于三维集成技术和多功能异质集成的“超越摩尔定律”发展路线将极大地突破目前微电子技术发展路线的局限，在微观系统集成方面产生革命性影响并起到巨大推动作用，而微/纳米技术势必成为这种集成的重要技术基础之一。于是，微/纳米技术便作为一项较为独立的学科与技术门类，不断渗透到国民经济、科学研究、国家安全等诸多领域，并在很大程度上影响了这些方面的发展走向。微/纳米技术以其低物耗、微观操控、多功能化等特点而被公认为助力绿色经济、精益制造等新发展模式的重要技术基础。国际上大规模开展微/纳米加工技术研究已有十多年的历史，可谓“百家争鸣”，从 MEMS、Transducers 等具有广泛影响力的国际会议中的论文和 Yole Development、NEXUS 等机构的市场调研分析报告即可见一斑。微惯性传感器、垂直集成的 CMOS 图像传感器、喷墨打印头、芯片实验室、微麦克风等诸多应用的商业化和市场化的成功，更是吸引了全球投资者的眼光和大量资金的支持。

无论是微/纳米技术还是各应用领域的研发者与决策者，都认可微/纳米技术在未来 10~15 年的影响力还将不断扩大，并向着异质系统集成的方向发展。在这段时间内，微/纳米级的加工与制造技术作为支撑平台，其重要性不但不会被削弱，反而会得到进一步加强。值得注意的是，其标准化和平台化的趋势将延续下去，而且这一发展并不与其多样化相背离。两者将相辅相成。无论是工艺工程师、器件设计者、市场推广者、企业决策者和对该领域感兴趣的投资者，都应当充分了解微/纳米加工技术的特点乃至制造方式，才能让这项技术真正在物理、化学、生物医学等科学研究领域直至关乎国家安全、经济建设的工程应用的土壤中扎根，并结出丰硕的果实。

IV 微米加工与纳米制造

在我国国内,从“八五”中后期开始,就有高校和研究所开始了微米加工的探索;至“九五”时期,不少高校和科研院所跟踪国际纳米前沿技术,开展了相关材料和制备工艺研究;“十五”期间科技部等多部委从国家战略安全和经济发展的角度强调该类技术的重要意义,大力组织和倡导科研力量投入相关领域的研发,通过国家自然科学基金、863计划、973计划等渠道,组织了各类专题计划,资助了大规模的研究开发,建设了一批以微/纳米加工技术国家级重点实验室(依托北京大学和上海交通大学)为代表的研究中心和试验线,使得我国的微/纳米加工技术在国际上占有一席之地,而且影响力不断扩大。以敏芯微电子公司、矽睿科技公司等为代表的国内创业企业吸引了国内外有远见的投资者的关注,并在风险投资、政府计划的扶持下,迅速成长起来,其影响力不断扩大,而近年来中芯国际等有国际影响力的芯片加工工厂的加入则使得这些技术得到大规模商业化推广。

在日常科研以及与同行的交流中,我们深感微/纳米三维集成设计方法与工艺技术仍将是未来三维微系统集成的研发重点和难点,而系统学习和借鉴国际已有相关成果显然是一条获得先进技术的捷径。由 Mark J. Jackson 博士主编的《Microfabrication and Nanomanufacturing》一书的中文译本的出版,将很好的补充和丰富目前国内微/纳米加工制造工艺技术方面的资料。

许多专家、学者参加了本书的翻译工作:北京信息科技大学教授,信息微系统研究所所长,微/纳米加工技术国家级重点实验室(北京大学)客座教授缪旻博士翻译了原书序言和第1~9章、14章,完成全书的统稿,并审校了全书;北京信息科技大学信息微系统研究所的张月霞副教授翻译了第12、13章;北京信息科技大学信息微系统研究所李振松翻译了第10、11章;电信科学技术研究院的韩波参与了全书的审校工作。左国义、李晶晶、臧晓晗等研究生参与了本书的图稿处理工作。

本书承蒙北京大学郝一龙教授、金玉丰教授等专家审阅并提出中肯的意见,在此表示由衷的谢意。

译者

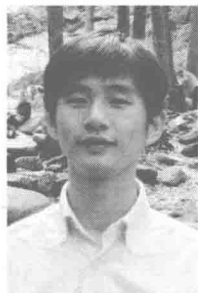
译者简介



缪旻——1973年11月出生。2004年12月毕业于北京大学微电子学研究院，获微电子学与固体电子学专业博士学位，主攻方向为射频微机电系统。毕业后在北京信息科技大学任教至今，任该校信息微系统研究所所长，教授，专门从事微/纳米及其系统集成相关技术研究。2006年入选“北京市科技新星”计划，2014年入选北京市属高校“长城学者”计划。2005年以来作为负责人承担国家级和省部级微/纳米机电系统(M/NEMS)、先进封装方面的重大、重点课题多项。作为第一发明人获得国家发明专利授权4项，作为第一作者发表论文多篇，合著微/纳米器件、IC及其封装技术方面的中文专著2部（国家科学技术学术出版基金等资助），合著在英国出版的微/纳米器件封装技术英文专著1部，主持翻译出版国内外3D IC方面的专著一部，并参与翻译另外3部微/纳米方面的技术专著。



张月霞——1978年10月出生，2008年9月毕业于北京邮电大学通信工程学院，获电路与系统专业博士学位。毕业后在北京信息科技大学任教至今，副教授，专门从事移动通信、物联网、微/纳米及其系统集成相关技术研究。近年来参与多项国家级和省部级项目，发表论文十余篇，申请专利7项，已授权3项，撰写专著2部，译著1部。



李振松——1982年3月出生。2008年4月毕业于北京邮电大学信息与通信工程学院，获通信与信息系统专业硕士学位。毕业后在北京信息科技大学任教至今，任该校信息微系统研究所助理研究员，信息与通信工程学院讲师，从事通信技术以及微/纳米系统集成相关技术研究。近年来作为项目主要人员参与了多项国家级和省部级先进封装、微/纳米机电系统(M/NEMS)方面的重大、重点课题。

译 丛 序

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是 20 世纪 80 年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，它与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

把信息技术引入制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、交通运输、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，既具有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来,国际间的交流与合作对制造业技术进步领域的发展及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用,制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到,我国制造业与工业发达国家相比,仍存在较大差距。因此必须加强原始创新,在实践中继承和创新,学习国外的先进的制造技术和经验、引进消化吸收创新,提高自主创新能力,形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史,可以追溯到唐朝甚至更远一些,唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式,早在20世纪初期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段,但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性,看书总比在计算机上看资料要方便习惯,不同层次的要求可以参考不同层次的图书,不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书,同时它具有比较长期的参考价值 and 收藏价值。当然,技术图书的交流具有时间上的滞后性,不够及时,翻译的质量也是个关键问题,需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收和创新方面为广大读者做出贡献,为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先制造技术的出版资源,翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作,从而能够提升我国制造业的自主创新能力,引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选译严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书,在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量,力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授以及工程技术人员承担,充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书,组成一套“国际制造业先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性和广泛性,应能代表相关专业的技术前沿,对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业,例如机械、材料、能源等,既包括对传统技术的改进,又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员,高等院校的教师和学生,可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际制造业先进技术译丛”的专家学者,感谢积极推荐国外相关优秀图书,仔细评审外文原版书,推荐评审和翻译的知名专家,特别要感谢承担翻译工作的译者,对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切的敬意,同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助,欢迎广大读者不吝指教,提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

原 书 序

目前，在发达国家，为了进一步推进经济发展，提高人们的生活水平，微米、纳米技术受到人们空前的重视。纳米技术的推广被视为工业革命后的又一次革命。可以预见，纳米技术所带来的美好前景将改变我们生存的方式。然而，在如此微小的尺度上构建产品，所要面临的挑战是显而易见的。因为这一尺度空间曾经是人类的加工能力无法企及的禁地。

该书的主要内容是在微米和纳米尺度上对工程材料进行的加工与制造。其中，第1章列出了微/纳米加工技术中遇到的挑战的情景，对半导体工业构建电路所用的各项微加工技术进行了综述，并为如何通过制造工艺的等比例缩减对非半导体材料进行纳米尺度上的加工提供了线索。第2章阐释了已经成熟的光刻技术在微米级零件加工方面的应用，该章描述了用于微米级零件成型的X射线光刻技术，列举了运用LIGA和深X射线光刻制造主模的一些例子，这些主模随后将用于制造微米和纳米尺度的产品。

第3章专门阐述体型和表面微机械加工工艺，它们通过刻蚀、机械切削和模铸工艺来形成沟槽等特征结构。其中还介绍了诸如注塑成型和热压印之类的制造技术。这两种工艺可完成聚合物的成型，从而以较经济的方式大批量生产微米和纳米尺度的产品。在第4章至第6章中，作者介绍了微米尺度上切削成型工艺的效用，它们可以用来加工各种模具和生物医学产品，例如那些由不锈钢以及对生物无害的合金构成的微米、纳米流体器件。这些材料构成的衬底必须平坦，故需要用磨削技术来确保其满足表面粗糙度公差要求。接下来，可以借助微铣削工艺从材料表面去除多余的少许材料，形成微小尺寸的几何形状。这些工艺技术都需要人们专门开发运用物理和化学气相沉积方法制作的切削刀具。第7章将向读者介绍在这些刀具表面沉积固体薄膜的工艺方法。

第8章和第9章阐述了非传统的微/纳米尺度上的工艺过程，包括一种新开发的、被称为脉冲水滴喷射机械加工的工艺方法，该方法利用水来实现微米尺度上的材料切削，其在硅基材料加工方面的适用性已经得到验证。第9章讲述了运用光能量来有效去除材料的方法，并且阐释了如何开发激光器并将其用于微/纳米尺度上材料的机加工。

第10章至第12章探讨了用于各类非半导体产品的纳米尺度加工工艺的开发。其中第10章讨论了如何运用嵌入多孔刀具中的磨粒进行加工的方法，该章讲述了将嵌入研磨材料的刀具固定到一个压电振荡器上的技术，这可以改善在纳米尺度上对材料的机械加工水平。第11章介绍了纳米级的机械加工工艺及其加工刀具的开

发情况。第12章则阐释了纳米晶体金刚石的淀积及应用。

第13章专门探讨了微/纳米级产品的推广和商业化，分析了产品—市场方面的问题将如何影响针对各类需求而进行的微/纳米加工技术开发，并专门讨论了这些产品市场化所需的基础设施。第14章对微/纳米加工技术的发展前景进行了展望，并概述了它们发展成为纳米级制造工艺的途径。

对微/纳米制造这样一种高度综合的技术进行阐释，需要来自许多学科领域的专家才能完成。在此谨对那些为本书的出版做出贡献的专家学者，表达自己的感激之情。

M. J. Jackson
West Lafayette, Indiana

原书主编简介

Mark J. Jackson 哲学博士，现任美国 Purdue 大学机械工程专业副教授。他在工程学方面的研究始于 1983 年，那时他进行了针对 O. N. C. Part I 考试的学习，而且修完了机械工程专业的第一年的学徒训练课程。在以优异的成绩获得国家普通学位并赢得 I. C. I. 的奖项后，他在英国 Liverpool Polytechnic 学院攻读机械与制造工程学位，而且在此期间他先后为 I. C. I. Pharmaceuticals、Unilever Industries 和 Anglo Blackwells 等公司短期工作。在 Jack Schofield 教授的指导下，他以“优等”的成绩获得工程硕士学位，随后又在 Liverpool 获得了材料工程领域的哲学博士学位，专攻玻璃黏结磨削材料的微观结构—特性关系，导师是 Benjamin Mills 教授。

他随后被 Unicorn Abrasives 公司 (Saint—Gobain Abrasives 集团) 的中心研发实验室录用，担任材料技师，后来又升任技术经理，负责在欧洲的产品开发和新业务的拓展，而且作为与大学间的联络官，负责与磨削工艺开发相关的项目管理。后来，Jackson 博士成为英国剑桥大学 Cavendish 实验室的研究员，与 John Field 教授，一起对金刚石的冲击断裂和摩擦学开展研究，并于 1998 年成为 Liverpool 大学的工程学方面的讲师。

在 Liverpool 大学，Jackson 博士开展了运用机械刀具、激光光束和磨粒进行微机械加工的研究。在 Liverpool，他争取到一系列研究项目资助，凭借所开发具有革新性的工艺流程，他于 2001 年 11 月与他人一道被英国工程与物理科学研究委员会委任为一所“创新制造技术中心”的管理者。2002 年，他成为美国田纳西科技大学 (系美国 Oak Ridge 国家实验室的联系大学) 的制造研究中心和电力研究中心的机械工程副教授和教授团助理以及 Oak Ridge 国家实验室的教授团助理。Jackson 博士同时是美国田纳西科技大学的高校方程式大赛团队的学术指导。

2004 年，他转任美国 Purdue 大学机械工程技术系的机械工程副教授。Jackson 博士在微米尺度金属切削领域的材料特性、微/纳米磨削机械加工和激光微机械加工等研究领域十分活跃。他还从事了新一代制造工艺和生物医学工程技术的开发。

Jackson 博士已经主持、共同主持和管理了如下组织、机构资助的项目：英国工程和物理科学研究委员会，英国伦敦皇家学会，英国皇家工程院，欧盟、英国国防部 (伦敦)，英国原子武器研究所，美国国家自然科学基金会，美国 NASA，美国能源部 (通过美国 Oak Ridge 国家实验室)，位于田纳西州 Oak Ridge 的 Y12 国家安全联合体，以及多家产业公司。获得研究经费总额超过 1 千万美元。Jackson 博士组织了多次会议，目前担任国际表面工程大会的主席。他撰写和共同撰写了超过 150 篇出版物，发表于各存档学报和同行评审的会议论文集中，他还担任一系列同行评审学报的客座编辑。他还是最近新成立的 *International Journal of Nanomanufacturing* 的总编。

撰 稿 人

Waqar Ahmed, Ph. D.

Manchester 城市大学 Dalton 研究院
英国 Manchester

Nasar Ali, Ph. D.

Averio 大学机械工程系机械技术与自动化中心
葡萄牙 Aveiro

Kai Cheng, PH. D.

Leeds 城市大学理工学院
英国 Leeds

Juan Gracio, PH. D.

Averio 大学机械工程系机械技术与自动化中心
葡萄牙 Aveiro

Luke J. Hyde

Purdue 大学 Birck 纳米技术中心及理工学院
美国印第安纳州 West Lafayette

Sudin Izman, Ph. D.

马来西亚理工大学机械工程学院
马来西亚 Johor Durul Ta' zim

Mark J. Jackson, Ph. D.

Purdue 大学 Birck 纳米技术中心及理工学院
美国印第安纳州 West Lafayette

Dr. Xun Luo

Leeds 城市大学理工学院
英国 Leeds

Sam B. McSpadden, Jr.

美国 Oak Ridge 国家实验室高温材料实验室机械加工研究组
美国田纳西州 Oak Ridge

Grant M. Robinson

Liverpool 大学工程学系机械加工研究组
英国 Liverpool

Htet Sein

Manchester 城市大学 Dalton 研究院
英国 Manchester

Milton C. Shaw, Ph. D.

亚利桑那州州立大学机械工程系
美国亚利桑那州 Tempe

David Tolfree

Daresbury 实验室 Technopreneur Ltd
英国 Cheshire 的 Daresbury

Vellore C. Venkatesh, Ph. D.

马来西亚理工大学机械工程学院
马来西亚 Johor Durul Ta' zim

目 录

译者序

译者简介

译丛序

原书序

原书主编简介

撰稿人

第 1 章 微米和纳米加工	1
1.1 前言	1
1.2 微米加工	2
1.3 纳米加工	12
1.3.1 基于软刻印的纳米加工	12
1.3.2 采用操纵技术的纳米加工	16
1.3.3 采用碳纳米材料的纳米加工	26
1.4 结论	31
参考文献	32
第 2 章 采用 X 射线光刻的微米加工	34
2.1 前言	34
2.2 X 射线光刻技术	35
2.3 同步加速器辐射	36
2.3.1 一般特性	36
2.3.2 光谱特性	38
2.3.3 光谱的辉度和亮度	38
2.4 微米加工	39
2.4.1 概述	39
2.4.2 LIGA 工艺	39
2.4.3 光刻步骤	39
2.4.4 X 射线光刻	39
2.4.5 X 射线掩膜	41
2.4.6 掩膜材料	42
2.4.7 单吸收层制造	45
2.4.8 衬底中 X 射线掩膜的对准	46
2.4.9 大高宽比微光刻技术的掩膜	46
2.4.10 光刻胶衬底的选择	49

2.4.11	对光刻胶的要求	49
2.4.12	光刻胶涂覆方法	51
2.4.13	曝光	52
2.4.14	台阶状和倾斜型的微结构	54
2.4.15	微主模具制造方法	55
2.5	展望	57
	参考文献	58
第3章	高纵横比微结构的刻蚀、加工和模铸	60
3.1	前言	60
3.2	干法刻蚀	60
3.3	等离子刻蚀加工	61
3.4	离子束辅助自由基刻蚀	61
3.5	等离子体特性	62
3.5.1	鞘区	62
3.5.2	边界区域	62
3.6	微结构的刻蚀	62
3.6.1	刻蚀现象	63
3.6.2	沟槽内的抑制剂的耗尽	63
3.6.3	沟槽内的自由基的耗尽	63
3.6.4	体积输运	64
3.7	刻蚀的中断机制	68
3.8	刻蚀效应	70
3.8.1	倾斜效应	70
3.8.2	弓形化效应	70
3.8.3	瓶状效应 (Bottling)	71
3.8.4	TADTOP	71
3.8.5	离子造成的刻蚀延迟效应	71
3.8.6	由于自由基耗尽或反射造成的刻蚀延迟效应	72
3.8.7	微草效应	74
3.9	高深宽比微米结构的微机械加工	74
3.10	微模塑	75
3.11	微模塑加工	75
3.11.1	注塑成型	76
3.11.2	反应注塑成型	76
3.11.3	热压印	77
3.11.4	注塑压缩成型	81
3.12	微模塑工具	81
3.13	微模塑成型的设计	83
3.14	微模塑应用	83

3.15	微模塑的局限性	83
3.16	结论	84
	参考文献	84
第4章	微机械加工中的尺寸效应	87
4.1	前言	87
4.2	机械加工的尺寸效应	87
4.3	剪切角的预测	91
4.4	大应变情况下的塑性行为	95
4.4.1	Langford 和 Cohen 的模型	95
4.4.2	Walker 和 Shaw 的模型	98
4.4.3	Usui 的模型	100
4.4.4	硬车削中的锯齿切屑形成	100
4.4.5	金属切屑形成中的类流体流动	100
4.4.6	Kececioglu 模型	102
4.4.7	Zhang 和 Bagchi 的模型	103
4.5	大塑性流动机制	106
4.6	不均匀应变	107
4.7	尺寸效应的起源	109
	参考文献	109
第5章	机械微加工	111
5.1	前言	111
5.2	微流体系统	111
5.3	微机械加工理论	113
5.3.1	微铣削技术	113
5.3.2	切屑初始卷曲建模	116
5.4	微机械加工实验	119
5.4.1	微机械加工装置	119
5.4.2	切屑形成过程的观察	121
5.4.3	微机械加工的结果	123
5.5	微机械加工的刀具设计	123
5.6	高速空气涡轮主轴	125
5.6.1	流体流动分析	125
5.6.2	CFD 方法中的假设	126
5.6.3	CFD 几何学模型	126
5.6.4	流体模型	126
5.6.5	边界条件	127
5.6.6	支配方程	127
5.6.7	求解办法	128