

微电子机械系统力学 性能及尺寸效应



刘凯 韩光平 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



微电子机械系统力学 性能及尺寸效应

刘 凯 韩光平 著



机械工业出版社

本书是作者从事微电子机械系统 (MEMS) 力学性能及尺寸效应研究工作的总结, 系统地阐述了微电子机械系统尺寸效应理论及其应用, 较全面地反映了这一领域的研究现状。全书共分 9 章, 分析了 MEMS 的特征及其近期发展; 详细分析了尺寸效应的内涵; 建立尺寸效应泛函的分析模型; 研究了单晶硅微桥式梁弯曲强度的尺寸效应及分布规律, 建立 QFD/TRIZ/FUZZY 集成技术模型; 研究 MEMS 残余应力; 对静电致动微泵的结构建立数学分析模型和有限元分析; 对微机械振动式陀螺的动力学特性进行了分析, 得到了微机械陀螺驱动模态固有频率和检测模态固有频率随其主要结构尺寸变化的规律。

本书取材新颖, 研究内容结合实际。可作为高等院校机电专业的教师和研究生教学参考书, 并可供从事 MEMS 研究的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

微电子机械系统力学性能及尺寸效应/刘凯, 韩光平著. —北京: 机械工业出版社, 2009. 2

ISBN 978-7-111-25575-8

I. 微… II. ①刘…②韩… III. 微电子技术 IV. TN405

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 177864 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 舒雯 版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 赵颖哲 责任印制: 洪汉军

中国农业出版社印刷厂印刷

2009 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

148mm×210mm·7 印张·203 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-25575-8

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379733

封面无防伪标均为盗版

前 言

微电子机械系统 (MEMS) 是一门多学科的交叉技术, 其研究内容主要是微米量级的微机械和微装配的加工、设计和应用等问题。MEMS 自 20 世纪 60 年代问世以来, 逐步成为人们在微观领域认识和改造客观物质世界的一种高新技术和重要手段, 广泛应用于生物医学、环境控制、数据存储及通信、微卫星的推进系统和核武器的微安全开关、航空航天等军事和民用的多个领域。由于其应用的广泛性, 国内外投入到该研究领域的人力、物力日益增加, 同时, 人们更加关注可以应用的各种微器件的研究开发。经过近十年的迅猛发展, MEMS 研究取得了巨大的进展。国内外在硅微细加工、光刻、LIGA、高能束刻蚀技术、牺牲层技术、外延技术、准分子激光微细加工技术等各种微制造工艺方面取得了显著的成就, 设计制造出多种微传感器和微执行器等微器件, 如微阀、微泵、微齿轮、微马达、微加速度计、微陀螺和微卫星、MEMS 力传感器、微加速度传感器、微显示器芯片、微惯性传感器、微机械血液测试仪等, 初步解决了微型化制作和构件功能开发的基本问题。

随着系统特征尺寸的不断减小, 许多物理现象与宏观世界有很大的差别, 一些常规理论将作修正。目前, MEMS 的研究主要还是依赖经验和反复试验, 完整的微观尺度下的理论体系尚未建立。因此, 微观尺度下的基础性理论研究显得尤为重要。在微观领域中, 微器件的显著特征就是呈现出尺寸效应和表面效应, 而表面效应也是由于尺寸的减小引起表面作用的增强。当物体的尺寸改变时, 与尺寸相关的各种物理量、机械量发生相应的变化, 尺寸效应及其引起的变化 (如表面缺陷数、晶格层错、介质不连续、量子效应等) 导致了微观领域的许多物理现象与宏观领域相比较有显著差异, 甚至相悖。微电子机械系统的基础理论研究相对落后, 已成为该学科继续发展的“瓶颈”, 其中, 材料机械性能的研究又落后于电学性能的研究, 材料的力学性能需要精确的评价, 尺寸效应问题显得尤为突出。

西安理工大学机械传动研究室系统研究了 MEMS 基础理论的尺寸效应问题,取得了一些研究成果,主要有:①详细分析了尺寸效应内涵,提出了广义和狭义尺寸效应,建立了狭义尺寸效应的泛函分析数学模型,从泛函的绝对值、相对值和尺寸灵敏度三个方面对模型进行分析,提出了尺寸的正效应、负效应和零效应及其判据,保持了尺寸效应在宏微观领域的连续性和完整性。本文建立的数学模型突破了已有尺寸效应研究局限于单个力学性能的定性分析这一局限,可应用于多个不同力学性能甚至其他物理量的分析上。并且,应用该模型还可以对尺寸效应进行精确的定量分析。②用光刻等微细加工技术制备了横截面为梯形的系列单晶硅桥式微梁试件(梯形截面的试件可代表矩形、方形等截面的常见微梁),采用纳米压痕法进行弯曲测试获取载荷、位移等重要实验数据,揭示了获取弹性模量、硬度和弯曲强度等多种力学性能参数尺寸效应状态。③应用弯曲测试实验获取的载荷一位移数据,对单晶硅桥式微梁的弯曲强度及 Weibull 分布进行了详细的分析。应用脆性材料的断裂理论推导出微细加工工艺等原因导致微梁侧面产生的裂纹与弯曲强度的关系,定量地说明了裂纹尺寸对断裂强度的影响,应用 Griffith 理论对桥式微梁的断裂特性进行分析,从一个新的角度解释了弯曲强度的尺寸效应,为硅微构件的可靠性分析提供依据。④基于产品创新设计的 QFD 需求,建立了 QFD/TRIZ/FUZZY 集成模型,选取材料强度和材料变形作为设计的主要技术矛盾,对微摩擦测试仪力传感器的微梁结构进行了尺寸优化设计,该方法首次提出将管理学科的理论知识应用到微电子机械系统的产品设计,充分体现了微电子机械系统的多学科交叉的特点。另外,还研究了微电子机械系统的残余应力,对热失配应力和本征应力进行了详细分析,比较了残余应力的几种主要测量方法及其基本工作原理,探讨了残余应力的释放和控制,合理地解释了相变材料的复合初化现象,这些研究结果对微电子机械系统产品设计和应用中残余应力因素的考虑具有重要的参考价值。

作为微电子机械系统的重要组成部分和应用举例,我们还研究了微流体特性物理量的尺寸效应,建立 $F-V$ 类比法等效电路,给出管道的等效电路图。利用板壳理论建立微泵泵膜的变形方程、泵膜自由

振动方程的数学模型,对单向阀和无阀微泵采用的扩散口/喷嘴进行建模。对微泵的流量和压力特性进行分析。利用泛函分析静电力的尺寸效应,证明了静电力具有快的响应速度和较高的功率能量密度。分析静电吸合现象,研究吸合电压的尺寸效应及泵膜几何尺寸对吸合电压的影响,得到了静电间隙与泵膜厚度对吸合电压呈现正尺寸效应,其中吸合电压对静电间隙的灵敏度较大,泵膜半径则呈现负尺寸效应结论。可以通过适当降低泵膜厚度,提高微泵致动电压,使微泵致动频率与泵膜一阶固有频率相接近,来提高微泵的工作效率。

在微机械陀螺的研究中,陀螺的灵敏度和分辨率的提高始终是人们追求的主要目标。作为微电子机械系统的重要组成部分,本书对微机械陀螺的动力学特性进行研究,采用有限元对其进行模拟,分析其主要几何尺寸对其固有频率的影响。根据陀螺驱动模态频率和检测模态的频率匹配,优化其结构尺寸。建立微机械振动式陀螺的动力学方程,分析刚度系数以及阻尼系数。给出梳状静电驱动器的驱动力大小计算公式,分析静电的负刚度效应、静电负阻尼效应和静电吸合现象。给出其灵敏度及其线性度的计算公式,考虑谐波角速度输入时其带宽特性。分析微机械振动式陀螺的误差及噪声特性及残余应力对微机械振动式陀螺的性能影响。

本书是作者与所指导的研究生从事微电子机械系统尺寸效应问题研究工作的总结。著作内容主要取材于作者等人发表的论文和研究生学位论文,编写本书的目的在于向读者系统地介绍有关微电子机械系统尺寸效应问题研究的最新成果。

本书由刘凯主编,其中第7、第8章初稿分别由刘迎伟、朱二辉编写,其余7章初稿由郑州航空工业管理学院韩光平副教授编写。全书由刘凯审定。本书得到了西南交通大学许明恒教授,南京航空航天大学朱荻教授,西安交通大学张陵教授、梅雪松教授,西北工业大学王润孝教授、赵宁教授等审阅,并提出了不少宝贵修改建议,对此表示衷心地感谢。

由于作者的水平有限,书中定会存在不少错误,敬请广大读者批评指正。

本研究得到了西安市科技计划工业攻关项目资助(项目编号:

GG06044)和教育部“高等学校博士学科点专项科研基金”资助(项目编号:20060700002)。在此向一切支持本项目研究工作的单位和个人致以真诚的感谢。

刘 凯

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 MEMS 及其发展	1
1.1.2 研究力学性能及尺寸效应的意义	3
1.2 国内外研究现状分析	4
1.2.1 国内研究现状	4
1.2.2 国外研究现状	5
1.2.3 力学性能测试方法	6
1.3 本文主要研究内容	12
第 2 章 MEMS 尺寸效应的分析模型及应用	15
2.1 引言	15
2.2 尺寸效应的内涵	15
2.2.1 尺寸效应的基本概念	15
2.2.2 尺寸的范畴	16
2.2.3 尺寸效应的研究目标	17
2.3 尺寸效应的分类	19
2.3.1 尺寸的相对性和绝对性	19
2.3.2 几何尺寸效应	20
2.3.3 力的尺寸效应	21
2.3.4 其他物理性能的尺寸效应	22
2.4 尺寸效应的数学模型及其分析	23
2.4.1 广义尺寸效应和狭义尺寸效应	23
2.4.2 狭义尺寸泛函	23
2.4.3 基本初等函数表示的尺寸效应	24
2.4.4 复杂函数表示的尺寸效应	28
2.4.5 分析模型的应用举例	29
2.5 本章小结	31

第3章 单晶硅微桥式梁力学性能的弯曲测试及尺寸

效应分析	33
3.1 引言	33
3.2 梯形截面的几何特性	34
3.2.1 梯形截面的形心	34
3.2.2 梯形截面的惯性矩	35
3.2.3 惯性矩的尺寸效应分析	36
3.3 单晶硅微桥式梁试件加工	38
3.3.1 硅材料的特点	38
3.3.2 微细加工和集成制造	39
3.3.3 微桥式梁的加工工艺	40
3.4 微桥式梁的支反力及弯矩	41
3.4.1 微桥式梁的力学假设	41
3.4.2 微桥式梁的支反力	42
3.4.3 微桥式梁的弯矩	43
3.5 微桥式梁的弯曲测试及力学参数计算	44
3.5.1 微桥式梁的弯曲测试	44
3.5.2 微硬度计算	45
3.5.3 单晶硅的弹性模量	46
3.5.4 多晶硅的弹性模量	47
3.6 实验结果分析	48
3.6.1 微梁样品的几何参量	48
3.6.2 微梁弯曲测试结果	49
3.7 本章小结	50

第4章 单晶硅微桥式梁弯曲强度的 Weibull 分布及断裂

特性分析	52
4.1 引言	52
4.2 阵列微梁样品	53
4.3 单晶硅微桥式梁弯曲强度	54
4.3.1 弯曲强度的线弹性分析	54
4.3.2 弯曲强度的 Weibull 分析	55
4.3.3 Weibull 参量的最大似然估计值	57
4.3.4 弯曲强度的统计分析	58
4.3.5 弯曲强度的尺寸效应	59

4.4 单晶硅微桥式梁弯曲断裂特性分析	61
4.4.1 脆性材料的理想化断裂	61
4.4.2 Griffith 断裂理论	62
4.4.3 Griffith 理论修正	63
4.4.4 微梁试件的断面	65
4.4.5 单晶硅微梁断裂的应变设计	66
4.5 本章小结	67
第 5 章 基于 QFD/TRIZ/FUZZY 集成技术的微摩擦测试仪力 传感器尺寸优化	68
5.1 引言	68
5.2 QFD/TRIZ/FUZZY 集成创新设计数学模型	68
5.2.1 QFD 质量功能配置方法	69
5.2.2 解决冲突问题的 TRIZ 理论	70
5.2.3 基于 FUZZY 设计优化技术的模糊层次分析法	73
5.3 基于 QFD/TRIZ/FUZZY 集成技术的微摩擦测试仪力传感器尺寸优化 ..	74
5.3.1 微摩擦测试仪力传感器的质量屋	74
5.3.2 技术冲突矛盾的解决方案	76
5.3.3 基于 FUZZY 优化技术的设计评价	78
5.4 本章小结	80
第 6 章 MEMS 残余应力分析	81
6.1 引言	81
6.2 薄膜残余应力	82
6.2.1 热膨胀系数	82
6.2.2 热失配应力	84
6.2.3 本征应力	85
6.2.4 单层薄膜和多层薄膜残余应力	88
6.2.5 残余应力梯度	89
6.3 残余应力的测量方法	91
6.3.1 谐振频率法	92
6.3.2 鼓泡法	93
6.3.3 拉曼光谱法	94
6.3.4 X 射线衍射法	95
6.3.5 微悬臂梁法	96
6.4 残余应力的释放和控制	96

6.4.1 残余应力的释放	96
6.4.2 残余应力的控制	97
6.5 本章小结	98
第7章 静电微泵的研究	100
7.1 引言	100
7.2 微泵简介	100
7.3 静电微泵结构的理论建模	102
7.3.1 振膜式静电微泵的结构及其工作原理	102
7.3.2 泵膜的理论分析	103
7.3.3 阀单元分析	109
7.3.4 微泵流量及压力	116
7.4 静电微泵致动特性及其尺寸效应分析	118
7.4.1 尺寸效应的数学模型	118
7.4.2 静电驱动及尺寸效应	121
7.4.3 静电吸合及尺寸效应分析	123
7.5 静电微泵的动态分析	128
7.5.1 微泵的有限元分析	128
7.5.2 微泵流体有限元分析	136
7.5.3 静电微泵泵膜等效电路	139
第8章 微机械陀螺的动力学特性研究	142
8.1 引言	142
8.2 微机械陀螺的动力学方程的建立	142
8.2.1 振动陀螺的基本原理	143
8.2.2 微机械振动式陀螺的数学模型	145
8.2.3 微机械陀螺中弹性梁的分析	146
8.2.4 微机械陀螺中的空气阻尼分析	149
8.3 微机械陀螺中静电驱动及其作用	157
8.3.1 微机械陀螺的静电驱动	159
8.3.2 静电调节模态匹配	161
8.3.3 静电负阻尼	162
8.3.4 静电吸合	164
8.4 微机械陀螺的动力学特性分析	166
8.4.1 拉格朗日方程	166
8.4.2 利用拉格朗日方程建立微机械振动式陀螺的动力学方程	168

8.4.3 微机械陀螺的动力学特性分析	170
8.5 微机械陀螺中的主要误差及噪声分析	175
8.5.1 微机械振动式陀螺的误差分析	175
8.5.2 微机械振动式陀螺的噪声分析	180
8.5.3 残余应力对微机械陀螺动力学特性的影响	181
8.6 微机械振动式陀螺的有限元模拟	184
8.6.1 振子框架式微机械振动式陀螺仪的结构及工作原理	185
8.6.2 振动模态分析	186
8.6.3 各主要结构尺寸变化对陀螺模态频率的影响	188
参考文献	192

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 MEMS 及其发展

微电子机械系统 (MEMS, Micro electro mechanical systems) 是基于微电子和微机械的有机集成, 在微电子技术基础上设计及制造特征尺寸在亚微米至毫米之间的微型机械, 将微传感器、微执行器、信号处理、智能控制集于一体。MEMS 产品的研发将常规集成电路 (IC, Integrated Circuit) 工艺和微机械加工 (Micro-fabrication) 独有的特殊工艺相结合, 涉及微电子学、机械设计、自动控制、材料学、光学、力学、生物医学、声学 and 电磁学等多种工程技术和学科。因此, MEMS 技术是一门多学科交叉的综合技术, 集约了各学科前沿领域研究的新技术、新成果, 和纳米科学技术 (NST, Nano Science and Technology) 一起被列为 21 世纪关键技术之首。如同微电子 (Microelectronics) 和 IC 是上世纪技术领域最有影响的因素一样, MEMS 成为下一个技术年代的决定因素, 对社会的发展、科技进步以及人类的生产、生活将会产生革命性的影响。

目前, MEMS 还没有统一的、严格的定义。一般地说, MEMS 具有以下几个非约束性的特征:

(1) 尺度方面。外形特征尺寸在毫米到微米范围之内, 故该技术有时也称为毫微米技术, 区别于一般宏 (Macro), 即传统的、大于 1mm 尺度的“机械”, 但并非进入物理上的微观层次。产品体积小, 能在极小的空间里运行, 产品重量轻, 可轻至纳克, 占用材料少。和微机械一起, 目前热点研究对象还包括微小型机械 (Mini-machine, 1 ~ 10mm) 和纳米机械 (Nano-machine, 1nm ~ 1 μ m)。

(2) 加工工艺。将 IC 与微机械 (Micromachine) 结合起来, 基

于(但不限于)硅微细加工(Silicon Micromachining)技术制造产品。

(3) 产品成本。加工 MEMS 产品的设备成本昂贵,产品能耗低,与微电子芯片的生产方式类同,可实现产品的低成本、大批量生产,产品的性价比与传统机械制造技术相比,有较大幅度的提高。

(4) 产品范围。MEMS 中的“机械”不限于狭义的机械力学中的机械,它代表一切具有能量转化、传输等功能的效应,包括力、热、声、光、电、磁,乃至化学、生物等。

(5) 工作状况。产品服役期间工作性能稳定,可靠性好,灵敏性和工作效率高。

(6) 实现功能。MEMS 的目标是微“机械”与 IC 集成的微系统,即具有智能的微系统,产品可以实现集成化、多功能化和智能化,常常将传感、驱动和内部控制的物理参数集于一体。

用以上特征来衡量,应用微电子技术(不限于)制造的微器件、微部件和微系统等都属于 MEMS 范畴。微器件和微系统只说明 MEMS 发展的不同层次,而相关的科学技术都统称为 MEMS 技术。

自 20 世纪 60 年代问世以来, MEMS 逐步成为人们在微观领域认识和改造客观物质世界的一种高新技术和重要手段,广泛应用于生物医学、环境控制、数据存储及通信、航空航天等军事和民用的多个领域。由于其应用的广泛性和迫切性,国内外投入到该研究领域的人力、物力日益增加。考虑到实用性,人们更加关注可以即时应用的各种微器件的研究开发,特别是经过近十年的迅猛发展, MEMS 研究取得了巨大的进展。国内外在硅微细加工、光刻、LIGA 和准 LIGA 技术、高能束刻蚀技术、牺牲层技术、外延技术、准分子激光微细加工技术等各种微制造工艺方面取得了显著的成就,设计制造出多种微传感器和微执行器等微器件,例如微阀、微泵、微齿轮、微马达、微加速度计、微陀螺和微卫星, MEMS 力传感器、微加速度传感器、微显示器芯片、微惯性传感器、微机械血液测试仪等,初步解决了微型化制作和构件功能开发的基本问题。

由于现代信息技术的高速发展和实际需求的紧迫感,产品研发和信息交流的网上交易成为 MEMS 发展的一个新趋势,越来越多的研

究所和公司提供此类服务,其中著名的有美国国家自发研究组织(Corporation for National Research Initiatives of Resto)创建的 MEM-Snet 站点,欧盟基金资助的欧洲微系统网络平台(European Microsystems Technology Network)等,表 1-1 列出了部分较有影响的此类政府或非政府组织的地址和网站等相关信息。

表 1-1 MEMS 网络资源

组 织 名 称	地 址	备 注	网 站
MEMSnet	美国弗吉尼亚州,雷斯頓	美国信息交易所	www.memsnet.org
MEMS Exchange	美国弗吉尼亚州,雷斯頓	加工服务中介公司	www.mems-exchange.org
MEMS Industry group	美国宾夕法尼亚州,匹兹堡市	产业联盟	www.memsindustrygroup.org
NIST	美国马里兰州,盖士堡市	美国政府项目资助	www.atp.nist.gov
DARPA	美国弗吉尼亚州,阿灵頓	美国政府项目资助	www.darpa.mil
IDA	美国弗吉尼亚州,亚历山大市	军民两用技术	mems.ida.org
NEXUS	法国格勒诺布尔市	欧洲微系统网络平台	www.nexus-mems.com
VDI/VDE-IT	德国,泰尔托	德国工程协会	www.mstonline.de
AIST-MITI	日本东京	日本微机械工程产业技术联合研究所	www.aist.go.jp
ATIP	美国新墨西哥州阿尔伯克基市	亚洲技术信息工程	www.atip.org
中国芯片	中国北京	在线交易	www.ic72.com

1.1.2 研究力学性能及尺寸效应的意义

随着系统特征尺寸的不断减小,许多物理现象与宏观世界有很大

的差别,一些常规理论需要进行修正。目前, MEMS 的研究主要还是依赖经验和反复试验,完整的微观尺度下的理论体系尚未建立,因此微观尺度下的基础理论研究显得尤为重要。在微观领域中,微器件的显著特征就是呈现出尺寸效应和表面效应,而表面效应也是由于尺寸的减小引起表面作用的增强。当物体的尺寸改变时,与尺寸相关的各种物理量、机械量发生相应的变化,尺寸效应及其引起的变化,如表面缺陷数、晶格层错、介质不连续、量子效应等,导致了微观领域的许多物理现象与宏观领域相比较有显著差异,甚至相悖,从而出现新的研究领域,对经典理论提出挑战。

MEMS 理论基础的研究领域都包含有一个共同的特征——“微”,说明尺度因素是微电子机械系统设计中的主导因素。以尺寸效应作为 MEMS 理论基础的主要研究内容,既可以突出研究重点——构件的微型化,又给出了 MEMS 所涉及各学科之间的联系,即微型化的构件产生的效应,使其具有自身独特的性能,导致在各学科领域产生新的问题。因此,研究 MEMS 的基础理论,必须研究尺寸效应。

同日渐成熟的微机械加工技术相比,人们对微观条件下 MEMS 器件的失效机理、物理特性和受载之下的力学性能及其尺寸效应缺乏充分的认识。当尺寸不断减小时,与尺寸的高次方成比例的惯性力、电磁力等的作用相对减小,而与尺寸的低次方成比例的粘性力、弹性力、表面张力、静电力的作用相对增大。微构件材料力学性能的研究远远落后于对材料电学性能和加工工艺的研究。

综上所述, MEMS 力学性能及尺寸效应的理论研究具有重大意义,为 MEMS 的进一步发展和产品的设计开发、加工和应用等提供依据。

1.2 国内外研究现状分析

1.2.1 国内研究现状

国内外已有一些学者对 MEMS 力学性能的尺寸效应开展了研究。国内,清华大学丁建宁等利用静电驱动微磁力线圈装置和纳米硬度计,分别进行了多晶硅试件的微拉伸测试和微梁的弯曲测试,测量了

多晶硅的力学性能, 并研究尺寸效应问题; 大连理工大学的唐祯安等, 对细观力学、介观物理及微尺寸理论作过详细研究; 中国科技大学的梅涛等对 MEMS 材料力学性能尺寸效应的理论问题进行了深入的研究; 中国科学院力学研究所的赵亚溥, 对微尺寸下的部分力学问题作过详细分析; 香港科技大学的张统一等, 利用微桥法测量研究了 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 膜的部分力学性能参数及其与几何尺寸的关系。我国的一些公司和研究机构, 多年前便已开始 MEMS 技术研究并重视其巨大的市场。

我国科技工作者在 MEMS 技术的研究和推广上也取得了相当大的成就。据有关资料介绍, “九五计划”期间, 通过微齿轮、微泵、微电机、微马达、微型飞机和微型陀螺等研究, 我国科学家提出和发展了由于尺度效应而产生的微机械学。他们发现: 有的宏观脆性材料在纳米尺度时具有很强的塑性, 而塑性材料随着结构特征尺寸的减小也会呈现脆性断裂; 流体在微管流动中, 液体的表面张力和对管壁的附着力已不可忽略; 在纳米加工及其表面质量分析中, 必须考虑原子间的结合力及量子效应。我国科学家还创造性地发展了微细电火花加工、三维半导体加工和深层刻蚀 (LIGA) 等微细加工工艺, 以及扫描隧道、原子力显微镜等纳米测量技术, 部分成果已达到国际先进水平。此外, MEMS 技术已开始在我国的研究中发挥作用, 例如: 微操作机器人已开始用于生物工程中的细胞分割、显微手术和生物芯片的制造工艺中; 微传感器已经用于飞行器的加速度、压力等参数的实时测量; 纳米薄膜润滑技术已用于“长征三号”火箭和计算机硬盘的制造工艺上。

1.2.2 国外研究现状

国外, Takahiro Namazu 等人用原子力显微镜对桥式单晶硅线进行弯曲测量, 研究了弹性模量和断裂强度的尺寸效应; Sriram Sundararajan 等人采用 AFM 通过微梁弯曲法, 得到了 Si、 SiO_2 微梁的弹性模量、弯曲强度和断裂韧性及其尺寸效应; M. A. Haque 等人用 SEM 和 TEM 研究了纳米级 Al 试件弹性模量和屈服强度的尺寸效应; H. D. Espinosa 等人用微梁弯曲法, 测量出 Au 膜的应力并分析其尺寸