

“十二五”国家重点图书

微机电系统(MEMS)工艺基础与应用

MEMS TECHNOLOGY
FOUNDATION AND
APPLICATION

邱成军 曹姗姗 卜丹 编著

43

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书

微机电系统(MEMS)工艺基础与应用

MEMS TECHNOLOGY
FOUNDATION AND
APPLICATION

邱成军 曹姗姗 卜丹 编著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书着重从基本理论和具体应用方面阐述 MEMS 工艺。主要介绍 MEMS 的概念、发展现状与趋势及力学相关知识;重点阐述 MEMS 实现工艺,主要有刻蚀(包括各向同性和各向异性刻蚀的原理、实现的方法、以及刻蚀自停止技术和干法刻蚀),表面微加工工艺的基本原理及其常用材料,硅片键合技术的各种方法、工艺过程及其各自的影响因素,LIGA 技术的基本工艺流程和各部分工艺的实现方法;在工艺基础上介绍传感器和执行器的基本原理、应用范围及其工艺流程;最后就 MEMS 在军事、医疗、汽车方面的应用及对 MEMS 器件实现检测的方法加以介绍。全书共分为 10 章,主要内容有:MEMS 系统简介,MEMS 相关力学基础,体硅加工工艺,表面微加工工艺,硅片键合工艺,LIGA 技术,MEMS 传感器,MES 执行器,MEMS 的封装,MEMS 的应用及检测技术。

本书适合高等学校微电子专业本科生和研究生学习 MEMS 工艺时使用,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微机电系统(MEMS)工艺基础与应用/邱成军,
曹姗姗,卜丹编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学
出版社,2016.2

ISBN 978-7-5603-5109-4

I. ①微… II. ①邱… ②曹… ③卜…
III. ①微电机-高等学校-教材 IV. ①TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 303450 号



责任编辑 范业婷

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 660mm×980mm 1/16 印张 19.25 字数 344 千字

版 次 2016 年 2 月第 1 版 2016 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5109-4

定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

序 言

微机电系统(Micro Electro-Mechanical System MEMS)技术是一门多学科交叉的学科,涉及物理、化学、力学、电子学、光学、材料科学、生物医学和控制工程等多个技术学科。与宏观系统相比,MEMS系统能够大批生产,成本低,性能高,甚至能够实现宏观所无法实现的功能,因此已经广泛应用于仪器测量、无线和光通信、能源环境、军事国防、航空航天、生物医学、汽车电子以及消费电子等多个领域。已经并会继续对人类的科学技术和工业生产产生深远的影响。

本书着重从基本理论和具体应用方面介绍 MEMS 工艺,适合于微电子专业本科生和研究生学习 MEMS 工艺时使用。

本书共分为 10 章,主要内容有:第 1 章 MEMS 系统简介。介绍了 MEMS 的概念、特点、研究领域、发展现状及其未来的发展趋势。第 2 章 MEMS 相关力学基础。主要介绍了应力和应变、简单负载下梁的弯曲、扭转变形以及动态系统谐振特点等一系列的力学相关知识。第 3 章体硅加工工艺。重点介绍各向同性和各向异性刻蚀的原理、实现的方法,还包括刻蚀自停止技术和干法刻蚀。第 4 章表面微加工工艺。介绍了表面微加工工艺的基本原理、用于表面微加工技术的常用材料,并比较了体硅加工工艺和表面微加工工艺。第 5 章硅片键合工艺。主要介绍了硅片键合技术的各种方法、工艺过程及其各自的影响因素。第 6 章 LIGA 技术。介绍了 LIGA 技术的基本工艺流程和各部分工艺的实现方法,并介绍了 LIGA 技术的扩展,另外还简单介绍了一些其他的微细加工技术。第 7 章 MEMS 传感器。主要介绍了物理、化学和生物传感器的基本原理、应用范围和一些工艺流程。第 8 章 MEMS 执行器。重点介绍了制作 MEMS 执行器的材料,MEMS 电动机、微阀、微泵等一些执行器的基本原理和各自特点。第 9 章 MEMS 的封装。介绍了键合方法、实现过程和

各自的影响因素。第 10 章 MEMS 的应用及检测技术。主要介绍了 MEMS 在军事、医疗、汽车方面的应用,及对 MEMS 器件实现检测的各种方法。

本书的第 1、2、3 章由黑龙江大学邱成军编写,第 4、5、7、8 章由黑龙江工程学院曹姗姗编写,第 6、9、10 章由黑龙江大学卜丹编写。

本书在编写过程中,参考并引用了一批国内外相关图书和文献的内容,并得到了哈尔滨工业大学、黑龙江大学、黑龙江工程学院等院校的大力支持与协助,谨此一并致谢。

限于作者水平,不足与不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者
2015 年 4 月

目 录

第 1 章 MEMS 系统简介	1
1.1 MEMS 的基本概念及特点	1
1.2 MEMS 的研究领域	2
1.3 MEMS 的发展现状与发展趋势	5
第 2 章 MEMS 相关力学基础	8
2.1 应力与应变	8
2.2 简单负载条件下挠性梁的弯曲	12
2.3 扭转变形	16
2.4 本征应力	17
2.5 动态系统、谐振频率和品质因数	19
2.6 弹簧常数和谐振频率的调节	23
第 3 章 体硅加工工艺	24
3.1 湿法刻蚀	24
3.2 刻蚀自停止技术	57
3.3 干法刻蚀	68
3.4 SCREAM 工艺	75
第 4 章 表面微加工工艺	77
4.1 表面微加工基本原理	77
4.2 多晶硅的表面微加工	80
4.3 SOI 表面微加工	87
4.4 光刻胶表面微加工	90
4.5 表面微加工中的力学问题	91
4.6 体硅加工技术与表面微加工技术	94
4.7 HARPSS 工艺	95
4.8 Hexsil 工艺	98

第 5 章 硅片键合工艺	100
5.1 阳极键合	100
5.2 硅熔融键合	106
5.3 黏合剂键合	110
5.4 共晶键合	112
5.5 BDRIE 工艺	114
5.6 硅片溶解法	115
第 6 章 LIGA 技术	116
6.1 LIGA 基本工艺流程	116
6.2 制作技术	117
6.3 LIGA 技术的扩展	128
6.4 EFAB 技术	133
6.5 其他微加工技术	134
第 7 章 MEMS 传感器	138
7.1 MEMS 物理传感器	138
7.2 MEMS 化学量传感器	182
7.3 MEMS 生物量传感器	185
第 8 章 MEMS 执行器	195
8.1 MEMS 执行器的材料	196
8.2 MEMS 电动机	202
8.3 微泵与微阀	218
8.4 微阀	231
8.5 微行星齿轮减速器	233
第 9 章 MEMS 的封装	237
9.1 MEMS 的封装材料	238
9.2 MEMS 的封装工艺	238
第 10 章 MEMS 的应用及检测技术	244
10.1 MEMS 应用	244
10.2 MEMS 的检测	263
参考文献	299

第 1 章 MEMS 系统简介

随着微电子技术的迅速发展,其集成度越来越高,加工尺寸越来越小,已开始进入亚微米时代。微电子技术的发展促进了 MEMS 技术的兴起和发展。20 世纪 50 年代硅和砷化镓等半导体压阻特性的发现促进了硅传感器和换能器的发展,1971 年 Case Western Reserve 大学研制出集成微压力传感器,1977 年 Stanford 大学研制出电容式硅压力微电机。1987 年美国利用集成电路制造工艺首次制造出了直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的硅静电微电机,转子的直径仅为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 。这一突破性技术成就开创了采用微电子技术制造微机械的崭新领域。随后,微膜、微梁、微齿轮、微弹簧、微锥体、微轴承等微机械构件相继被研制出来。微机械技术与微电子技术相结合,形成了一个新兴的技术领域——微机电系统(MEMS)。

1.1 MEMS 的基本概念及特点

1.1.1 基本概念

微机电系统(MEMS)是指微机械加工技术制作的包括微机械传感器、微机械执行器等微机械基本部分以及微能源和由集成电路加工技术制作的高性能电子集成线路组成的微机电器件、装置或系统。其关键尺寸在亚微米至亚毫米范围内。MEMS 涉及多个学科,包括微机械学、微电子学、自动控制、物理、化学、生物以及材料科学等多门学科,是近些年发展起来的一门新兴的、高新技术的交叉学科。

简单讲,MEMS 是一种集成微电子电路、微机械传感器和微机械执行器的微小器件(或系统)。它既可以根据电路信息的指令控制执行器实现机械操作;也可以利用传感器探测或接受外部信息,传感器转换出来的信号经电路处理后,再由执行器变为机械操作,去执行信息命令。可以说,MEMS 是一种获取、处理信息和执行机械操作的集成器件。

完整的 MEMS 系统是由微传感器、微执行器、信号处理和控制电路、通信接口及电源组成的一体化的微型器件系统,完成传统大尺寸机电系统所不能完成的任务,也可以由独立的微器件,如微传感器,嵌入到大尺寸系统中来使

用,从而大幅度地提高系统的自动化、智能化和可靠性水平。

1.1.2 MEMS 的典型特点

1. 结构尺寸微小

MEMS 的尺寸一般在微米乃至纳米量级,例如 ADXL202 加速度传感器和微电机的结构尺寸在一百至几百微米,而单分子操作器件的局部尺寸仅在微米甚至纳米水平。尽管 MEMS 器件的绝对尺寸很小,但是一般来说其相对尺寸误差和间隙却比较大,例如传统宏观机械的相对精度高达 $1:200\,000$,而 MEMS 的相对精度一般只有 $1:100$ 左右。

2. 多能量域系统

能量与信息的交换和控制是 MEMS 的主要功能。由于集成了传感器、微结构、微执行器和信息处理电路, MEMS 具有感知和控制外部世界的能力,能够实现微观尺度下电、热、机械、磁、光、生化等领域的测量和控制。例如加速度传感器将机械能转换为电信号,打印机喷头将电能转换为机械能,生化传感器将化学和生物反应能转换为电能或机械能。

3. 基于微加工技术制造

MEMS 起源于 IC 制造技术,大量地利用了 IC 制造方法,力求与 IC 制造技术兼容。但是,由于 MEMS 的多样性,其制造过程引入了多种新方法。这些方法的不断引入,使得 MEMS 制造与 IC 制造的差别越来越大。

4. MEMS 不完全是宏观对象的等比例缩小

尽管许多不同领域的微型化都可以发展和应用自己的微系统,但是 MEMS 不是宏观系统的简单缩小,而是包含着新原理和新功能,这是由比例效应决定的。例如微电机不仅结构与宏观电机不同,其利用静电驱动的工作原理也与传统宏观电机的磁力驱动明显不同。

5. MEMS 范畴内,经典物理学规律仍然有效,但其影响因素更加复杂和多样

物理化学场互相耦合、器件的表面积和体积比急剧增大,使宏观状态下忽略的与表面积和距离有关的因素,例如表面张力和静电力,成为 MEMS 范畴的主要影响因素。进入纳米尺度后,器件将产生量子效应、界面效应和纳米尺度效应等新效应。目前还没有掌握微尺度下的规律。

1.2 MEMS 的研究领域

MEMS 具有体积小、重量轻、能耗低、集成度和智能化程度高等一系列优点, MEMS 的研究不仅与微电子学密切相关,还涉及现代光学、气动力学、流体

力学、热学、声学、磁学、自动控制、仿真学、材料科学以及表面物理与化学等领域,所以 MEMS 技术是一门多学科的综合技术。MEMS 的研究包括:理论基础、技术基础和应用与开发研究。

1.2.1 理论基础

MEMS 理论基础研究包括由于结构尺寸的微型化、机构材料以及加工方法的不同带来的一些新的理论问题。

结构尺寸效应和微小型化理论,如:力的尺寸效应、微结构表面效应、微观摩擦机理、热传导、误差效应和微构件材料性能等。尺寸减小到一定程度,有些宏观物理量需要重新定义,随着尺寸减小,需要进一步研究微结构学、微动力学、微流体力学、微摩擦学、微电子学、微光学和微生物学等。

MEMS 中起主导作用的力是表面力(静电力、黏性力、范德华力等),主要负载是摩擦力,摩擦副表面的物理化学性能代替机械性能成为影响摩擦的主要因素,微摩擦学是在分子尺度范围内,研究摩擦界面上的行为与损伤及其对策,包括微/纳米膜润滑和微摩擦磨损机理以及表面和界面的分子(原子)工程研究,即通过材料表面改性或建立超薄膜润滑状态,达到减摩耐磨的目的。

微结构材料由于用气相、液相或固相等特殊制造方法而具有与宏观加工成形的整体材料不同的物性,随着构件微小化,微型构件的力学性能出现很大变化。另外,在 MEMS 中大量地用到了各种薄膜材料,薄膜的厚度一般在几十纳米到几十微米。这些薄膜材料的机械、物理特性与宏观尺寸相同材料的特性有很大的差别。传统的关于材料研究的各种理论和方法,已无法完全适应微材料特性的研究,因此必须从微机械应用角度重新认识、发展和完善传统的材料科学。

1.2.2 技术基础

技术基础包括 MEMS 设计技术、复杂可动结构微细加工、微机械材料、微装配和封装、微系统检测、微能源、微系统的集成与控制、微宏接口等技术。微传感器、微执行器和微控制器是 MEMS 的基础单元。

1. MEMS 设计技术

MEMS 设计技术主要是设计方法的研究,其中计算机辅助设计(CAD)是 MEMS 设计的有力工具。CAD 设计工具应包括:器件模拟、系统校验、优化、掩模版设计、过程规划等,还应建立混合的机械、热和电气模型,进一步还应考虑对所涉及的物理、化学效应进行更加综合的描述和分析。与宏观系统的 CAD 设计工具相比,目前为 MEMS 开发的 CAD 工具还不能很好地满足上述要求。

2. 微细加工

微细加工技术是 MEMS 技术的核心技术,也是 MEMS 技术研究中最活跃的领域。

3. 微机械材料

微机械材料包括用于敏感元件和致动元件的功能材料、结构材料,具有良好的电气、机械性能,是适应微细加工要求的新材料。材料技术与加工技术是密不可分的。

4. MEMS 检测技术

MEMS 检测技术涉及材料的缺陷,电气机械性能,微结构、微系统参数和性能测试。需要在测量的基础上,建立微结构材料的数据库和系统的数学、力学模型。

5. MEMS 的集成

MEMS 集成技术也被称为二次集成技术,系统集成是 MEMS 发展的必然趋势,它包括系统设计、微传感器和微执行器与控制、通信电路以及微能源的集成等。MEMS 是将零部件、单元和连接件等通过搬运、融合、固化、胶合、密封等工艺组合成的复杂技术。常用的搬运方法有两种:其一是利用玻璃针尖以真空吸附和吹气的方式进行组装;其二是利用微夹持和安放的形式进行组装。封装中需用的融合、固化、胶合、密封等技术都是微电子封装技术在 MEMS 领域的拓展。目前 MEMS 组装技术的研究在 MEMS 技术中处于相对落后的状态,它始终是 MEMS 制作过程中的瓶颈。然而,无论 MEMS 集成制造技术多么先进,MEMS 组装技术始终是 MEMS 技术的必要补充,是完成更复杂的 MEMS 系统的必需途径。

1.2.3 应用与开发研究

研究 MEMS 技术的最终目的是为了应用,目前已经应用和可以预见的应用领域包括汽车、航空航天、信息通信、生物化学、医疗、自动控制、消费品及国防等。可以说,MEMS 技术几乎可以应用于所有的行业领域,而它与不同的技术结合,往往会产生新型的 MEMS 器件。

微传感器、微执行器是构成 MEMS 的基础。而微传感器无疑是 MEMS 研究中最具活力与现实意义的领域,多种微传感器已经商品化。

MEMS 的另一重要基础是微执行器。有关微执行器的研究成果很多,如微电机、微陀螺、微泵等。但是能够像喷墨打印机用的高分辨率喷墨头那样,成功地转化为商品的并不多。主要是因为微执行器需要直接作用于现实的物质世界并与之进行能量交换,而微执行器本身的微小在某种程度上决定了它

的脆弱性,因而限制了它的作用方式、作用范围和作用能力。所以,不论是对微执行器的设计还是对它的应用方式都需要做进一步的探讨和研究。

MEMS 是传感器和执行器的有机组合,它是微机械技术研究的最高层次。1987 年美国德州仪器公司发明的数字微镜器件是典型的 MEMS 器件,另一个成功的 MEMS 实例是德国因兹技术研究所使用两个采用 LIGA 技术制作的 5 mm 大小的微电机“使世界上最小的直升机腾空而起”。各种微型机器人更是 MEMS 研究的一个重要目标。

如何在各领域更有效地应用 MEMS 技术和开发更多满足应用要求的 MEMS 器件和系统将是今后重要的研究方向。

1.3 MEMS 的发展现状与发展趋势

1.3.1 MEMS 的发展现状

MEMS 系统在工业、信息通信、国防、航空航天、航海、医疗、生物工程、农业、环境和家庭服务等领域有着潜在的巨大应用前景,它将成为 21 世纪最重要的科技领域和主要的支柱技术之一。

目前对 MEMS 的需求产业主要来自于汽车工业、通信网络信息业、军事装备应用、生物医学工程;而按专业 MEMS 分四大类:生物 MEMS 技术、光学 MEMS 技术、射频 MEMS 技术和传感 MEMS 技术。

1. 生物 MEMS 技术

生物 MEMS 具有微型化、集成化、成本低的特点。功能上有获取信息量大、分析效率高、系统与外部连接少,实时通信、连续检测的特点。国际上生物 MEMS 的研究已成为热点,不久将为生物分析、化学分析系统带来一场重大的革新。

CardioMEMS 公司采用 MEMS 技术制成心血管微传感器测量动脉的压力,该传感器就像汽车里的 EZPass 设备(一种在高速公路入口无需停车即可完成付费的自动感应装置)一样工作,本身不带电源,读取信息时在外面用一个感应棒启动传感器即可得到此人动脉的所有相关数据。利用 MEMS 还能制作出智能型外科器械,减少手术风险和时间,缩短病人康复时间,降低治疗的费用。Verimetra 公司正在利用 MEMS 技术把现有手术器械转变成智能型手术器械,可用于多种场合,包括小手术、肿瘤、神经、牙科和胎儿心脏手术等。

药物注入是生物医学 MEMS 另一个可能有巨大增长潜力的领域, MicroChipd 公司正在开发的一种药物注入系统则利用了硅片或聚合物微芯

片,其上带有成千上万个微型贮液囊,里面充满药物、试剂及其他药品。这些微芯片能够向人体注入药物,使止痛剂、荷尔蒙以及类固醇之类的注入方式发生革命性的变化。类似这样的生物医学新进展还将催生出新型器械,如便携式掌上型透析机等。

2. 光学 MEMS 技术

随着信息技术、光信息技术的迅猛发展,MEMS 发展的又一领域是与光学结合,即综合微电子、微机械、光电子技术等基础技术,开发新型光器件,称为微光机电系统(MOEMS),它能把各种 MEMS 机构件与微光学器件、光波导器件、半导体激光器、光电检测器件等完整地集成在一起,形成一种全新的功能系统。目前较成功的应用研究主要集中在两方面:一是基于 MOEMS 的新型显示、投影设备,主要研究如何通过反射面的物理运动进行光的空间调制,典型代表为新型投影仪、数字微镜阵列芯片和光栅光阀;二是通信系统,主要研究通过微镜的物理运动来控制光路发生预期的改变,较成功的有光开关、光调制器、光滤波器及复用器等光通信器件。

3. 射频 MEMS 技术

目前最熟悉的应用就是无线通信领域,诸如手机、无线接入、全球定位系统和蓝牙技术。其中最成熟的 MEMS 器件当属开关。

在日本,欧姆龙公司首先开发上市 MEMS 开关产品,随后日本村田制作所、松下网络开发本部及日本三菱电机公司都相继开发了高频 REMEMS 的开关。中国在 MEMS 方面也进行了大量的工作,对悬臂式 REMEMS 开关进行了设计和研制。对 REMEMS 开关驱动电压进行了分析和研究。

MEMS 开关制造商 TeraVista Technologies 公司将推出号称世界上最快的 MEMS 开关。这种单极双掷开关适用于数字电视、卫星通信和定向雷达等领域。在此之前,该公司已经推出了 7GHz 的 MEMS 开关,用于自动测试设备(ATE)和 RF 无线领域。

4. 传感 MEMS 技术

传感 MEMS 技术是指用微电子微机械加工出来的,用敏感元件如电容、压电、压阻、热电偶、谐振、隧道电流等来感受转换电信号的器件和系统,包括速度、压力、湿度、加速度、气体、磁、光、声、生物、化学等各种传感器。现阶段各类 MEMS 传感器技术已经大量应用于各个领域。

苹果公司颇有想象力地使用 MEMS 加速计来支持 iPhone 显示器横向与纵向画面的自动切换,取得了巨大的成功,从而刺激了智能手机用于探测运动的 MEMS 应用的激增。如 ADI 公司生产的 ADXL203 双轴硅微加速计。此外还有应用于导航和制导领域如小型无人机的导航控制、短程战术武器制导的

高精度微加速度计。Litton SiAC 硅加速度计为其典型的代表,已广泛应用于 LN - 200、LN - 200S、LN - 300 等惯性测量组合上,以及 LTN - 101E、LISA - 200 两种民用和军用飞机惯性导航系统上。

1.3.2 未来发展趋势

在未来十年里,MEMS 的研究领域有望继续突飞猛进。极有可能取得巨大进展的几个方向如下。

1. 应用更为广泛

为了满足各种应用的需要,MEMS 器件的功能将更具多样性,其中包括低产量工业应用以及高产量消费应用。传感器应用技术将继续发展,这类产品有机器人、医疗设备、虚拟现实系统、执行器以及显示器,这些将成为新兴产业中的竞争者。

2. 快速而复杂的系统设计将成为现实

MEMS 设计方法和关键技术逐渐成熟,而设计的复杂度将继续增加。现代设计和仿真工具可以在一定时间内完成复杂的设计,而且具有较高精度,而 MEMS 设计能力将会减慢其上市时间。

3. 电子功能集成继续发展

MEMS 器件将从电路集成中受益,即把电子、逻辑、计算和决策功能等与机械器件集成在一起。

4. 制造和生产 MEMS 产品的能力继续增加

MEMS 加工的方法和设备更加成熟,代加工能力稳步前进,真正的无生产线 MEMS 发展模式将成为可能。封装技术将决定 MEMS 设计方案。

5. MEMS 生产将转到更大的圆片

6. 竞争更加激烈

由于 MEMS 产品将逐步实现更多的功能,小型化及低成本,对现有产品挑战或产生新的应用,因此竞争将更加激烈,并会刺激创新。

第2章 MEMS 相关力学基础

2.1 应力与应变

应力表示单位面积上的作用力,是反映物体一点处受力程度的力学量。应变是由应力引起的变形。机械应力分为两种:正应力和切应力。对应的应变也分为正应变和切应变。

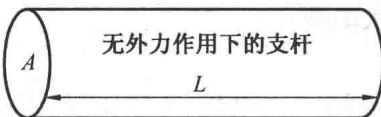
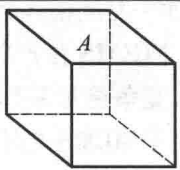
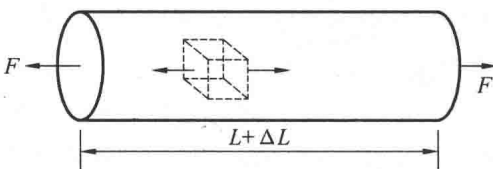
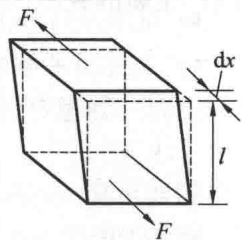
2.1.1 正应力和正应变

对于任意选择的横剖面,在剖面的整个面上都有连续的分布力作用。这个力的密度就称为应力,如果应力以垂直于横剖面的方向作用,就称为正应力,见表 2.1^[1]。正应力通常用 σ 表示,其定义式为

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

单位为 N/m^2 或者 Pa 。

表 2.1 正应力和切应力

	正应力/应变	剪切应力/应变
无负载	 无外力作用下的支杆	
有负载		

正应力可以是张应力(沿着支杆方向拉伸的情况)或者压应力(沿着支杆方向推压的情况)。正应力的极性可以通过在支杆内部隔离出无限小的单元

来确定。如果这一单元在某一特殊的方向被拉伸,这个应力就是张应力;如果这一单元被推压,这个应力就是压应力。

支杆的单位伸长量表示应变。如果应变的方向垂直于梁的横截面,此种应变称为正应变。假设杆本来长度为 L_0 ,在给定正应力作用下,杆伸长到 L ,则杆的应变定义为

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

实际上,沿长度 x 轴上的外加应力不仅会在应力方向上产生拉伸作用,而且会使横截面的面积变小,如图 2.1 所示。这一现象可以解释为:材料要保证原子间距和体积不变。 y 和 z 方向上尺寸的相对变化可以表示成 ε_y 和 ε_z 。材料的这种特性可以用泊松比 ν 来表示。泊松比的定义为横向和纵向伸长量之比

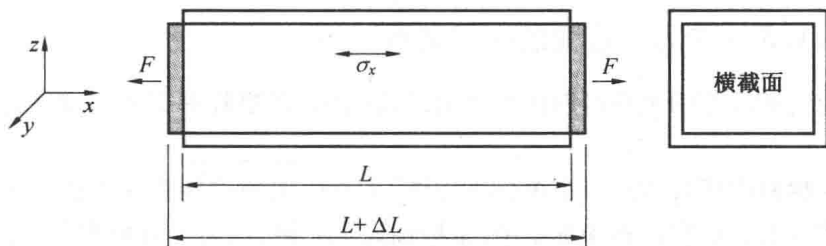


图 2.1 外加正应力棒的纵向拉伸

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \right| \quad (2.3)$$

应力和应变密切相关。在小形变情况下,根据胡克定律,应力和应变成比例

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.4)$$

比例常数 E 称为弹性模量,它是材料的固有性质。对于给定的材料,无论其形状和尺寸怎样,弹性模量都是常数。

2.1.2 切应力和切应变

切应力可以在不同的作用力负载条件下产生。产生纯剪切负载的最简单方法就是表 2.1 中的情况,即一对作用力作用在立方体两个相对的面上。这种情况下,切应力大小为

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

τ 的单位是 N/m^2 。切应力在 x, y 和 z 方向上都没有拉长或缩短单元的趋势,切

应力会使单元的形状产生变形。切应变定义为转动角位移的大小

$$\gamma = \frac{\Delta X}{L} \tag{2.6}$$

切应变是没有单位的,实际上,它表示单位为弧度的角位移。切应力和切应变也通过一个比例系数相互关联,称作弹性剪切模量 G 。 G 的表达式为

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{2.7}$$

G 的单位是 N/m^2 。 G 的值只与材料有关,与物体的形状和尺寸无关。

对于给定的材料, E, G 和泊松比 ν 通过

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{2.8}$$

建立联系。

2.1.3 应力和应变的一般关系

应力和应变的关系可以用矩阵的形式表示,在矩阵中应力和应变都是矢量。

从材料内部分离出一个单位立方体,下面只考虑作用在其上的应力和应变。将立方体放在直角坐标系中,坐标轴为 x, y 和 z 。为了分析方便, x, y 和 z 轴也分别用 1, 2 和 3 轴表示。

立方体有 6 个面。所以,就有 12 个可能的剪切分量。它们并不是互不相关的。例如,每一对作用于平行面并沿着同一轴的剪切应力分量大小相等、方向相反已达到力的平衡,这就将独立剪切应力的数目降到了 6 个。这 6 个剪切应力分量的图解如图 2.2 所示。每个分量都用两个下标字母标注。第一个下标字母表示应力作用面的垂直方向,而第二个字母表示应力分量的方向。

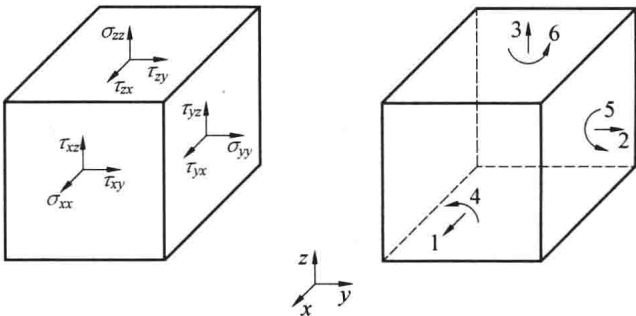


图 2.2 基本应力分量

基于力矩平衡,作用于两个面并指向同一边的两个剪切应力分量应该大