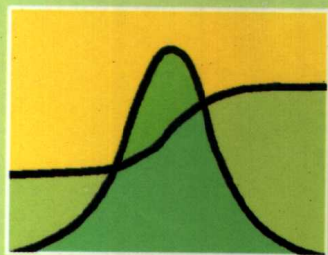


弹性与非弹性的



测量

和应用

李昕 蒋瑞兴 陈洪荪 龚俊杰 著

冶金工业出版社

弹性与非弹性的 测量和应用

李 昕 蒋瑞兴 著
陈洪荪 龚俊杰

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
1999

图书在版编目 (CIP) 数据

弹性与非弹性的测量和应用/李昕等著.-北京:冶金工业出版社, 1999. 9

ISBN 7-5024-2317-6

I. 弹… II. 李… III. 工程材料-弹性试验
IV. TB302.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 07680 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
责任编辑 张卫 王雪涛 美术编辑 王耀忠 责任校对 李健谦 责任印制 牛晓波
北京源海印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
1999 年 9 月第 1 版, 1999 年 9 月第 1 次印刷
850 mm×1168 mm 1/32; 12.125 印张; 326 千字; 374 页; 1-1500 册
35.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64013877
冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



前 言

弹性与非弹性是固体材料的基本性能特征之一。如果没有弹性任何物体都难以保持确定的形状。人类对弹性与非弹性相关性能的认识与利用，可追溯到久远的年代。战国时的编钟所以能发声，就在于它的弹性振动；而不同材质的编钟音质所以不同，则与彼此间材质的非弹性差异密切相关。在现代社会生产生活中，从大型建筑物的肱梁、载波通信中的机械滤波器，到手表的游丝，都涉及弹性的测量与应用；在环境保护中广泛使用的减震材料是非弹性应用的典型事例；非弹性中的松弛现象是导致各类机械阀门失效的主要原因，因而非弹性的测量与应用日益受到广泛的重视。长期以来，本领域存在的有关文献十分分散，难以查找，一些科技出版物中摘要式的简介内容过于简单，不便操作，至今仍未见相应的专著出版，这与当前人们从事材料研究和从事材料质量控制研究对系统资料急需状况相矛盾，这些都成为著者编著本书的动力，希望我们的奉献能受到广大读者的欢迎。

由于外力作用下的实际物体的弹性与非弹性现象即是相伴发生的，而又各具特点，我们兼顾这两个方面分别阐述，这是编著本书的侧重点之一；本书侧重点之二是力求做到“理论阐述清楚”与“实践指导明确”两者的结合。著者注意到目前较为系统阐述测量方法的资料最为缺乏，故本书以测量为主，兼顾应用。基于各向异性材料弹性的表述与测量方法有其特殊性，机械材料松弛测量与应用自有特点，故将“各向异性体的弹性测量”与“松弛测量”两部分分篇阐述。

本书在著者编著出版的《金属材料物理性能手册·金属物理性能及测量方法》、《金属的弹性各向异性》及若干论文的基础上，汇集国内外最新资料，经整理、撰写而成。书中第1、3篇及附录

由李昕、蒋瑞兴撰写，第2篇由陈洪荪撰写，第4篇由龚俊杰撰写，李昕任主编。

全书是著者于业余时间完成，由于条件限制，尽管历以了若干寒暑，仍难免有不尽人意之处，敬希读者不吝指正。最后，要特别感谢原电子工业部第十研究所在本书写作、出版过程中所提供的大力支持。

作 者

1999年1月20日

目 录

第 1 篇 弹性常数测量的理论与方法

1 固体的弹性与弹性常数	2
1.1 弹性与弹性变形的基本规律	2
1.2 晶体的弹性系数与材料的弹性常数	5
1.3 弹性的影响因素	9
1.3.1 原子核外电子与晶格固有振动等结构特征的影响	9
1.3.2 晶体择优取向的影响	12
1.3.3 变形速率的影响	13
1.3.4 温度的影响	13
1.3.5 磁场或磁性转变的影响	14
1.3.6 相变的影响与超弹性	15
1.4 弹性与其他物理性能间的关系	16
2 静态弹性常数的测量方法	21
2.1 静态杨氏模量测量方法	21
2.1.1 静载拉伸法	21
2.1.2 悬臂梁法	23
2.1.3 简支梁法	29
2.2 静态切变模量测量方法	32
2.2.1 适用范围	32
2.2.2 测量原理	32
2.2.3 测量条件与要求	34
2.3 静态泊松比测量方法	35
2.3.1 适用范围	35
2.3.2 测量原理	35
2.3.2 测量条件与要求	35

3 动态弹性常数的共振测量方法	37
3.1 杆状试样杨氏模量测量方法.....	37
3.1.1 弯曲共振法.....	37
3.1.2 纵共振法.....	52
3.2 杆状试样切变模量测量方法.....	58
3.2.1 适用范围.....	58
3.2.2 测量原理.....	58
3.2.3 测量条件与要求.....	69
3.2.4 应用与发展概况.....	72
3.3 高阻尼材料弹性常数检测方法.....	73
3.3.1 适用范围.....	73
3.3.2 测量原理.....	74
3.3.3 测量条件与要求.....	78
3.3.4 应用与发展概况.....	79
3.4 圆板弹性常数检测方法.....	80
3.4.1 适用范围.....	80
3.4.2 测量原理.....	80
3.4.3 测量条件与要求.....	84
3.4.4 应用与发展概况.....	85
3.5 小尺寸球体与单晶弹性常数检测方法.....	86
3.5.1 球形样品弹性常数的测量.....	86
3.5.2 单晶体弹性常数的测量.....	88
4 动态弹性常数的波速测量方法	92
4.1 固体中的声波波速与弹性常数.....	92
4.1.1 固体中的声波.....	92
4.1.2 无限介质中的纵波与横波波速.....	93
4.1.3 细杆中的拉伸波与扭转波波速.....	97
4.1.4 杆中的弯曲波波速.....	98
4.2 波速值的修正与基本参数间的关系.....	99
4.2.1 尺寸因素的影响及其修正.....	99

4.2.2	各类波速测量中基本参数间的关系	100
4.2.3	波速与弹性常数间的关系	102
4.3	波速简易测量方法	103
4.3.1	厚度计法	103
4.3.2	瞬间接触法	106
4.4	常规试样的精密测量方法	107
4.4.1	脉冲回波法	107
4.4.2	超声干涉法	110
4.4.3	相位比较法	111
4.5	特殊试样的波速测量方法	113
4.5.1	单平面试样与表面波波速测量	113
4.5.2	小尺寸试样的波速测量	115
4.5.3	高阻尼材料的波速测量	116
5	其他弹性测量方法与方法综述	118
5.1	其他弹性测量方法	118
5.1.1	射线衍射技术的应用	118
5.1.2	激光技术的应用	118
5.2	弹性测量方法统计综述	119
5.2.1	测量方法标准化概况	119
5.2.2	不同方法结果间的比较	121
5.2.3	方法的应用	121
	参考文献	123

第 2 篇 弹性的各向异性

1	基本概念	126
1.1	各向异性的概念及意义	126
1.2	各向异性的本质	127
1.2.1	单晶材料	127
1.2.2	多晶材料	128
1.2.3	复合材料	129

1.3	各向异性与不均匀性	129
2	张量与群论基础	131
2.1	张量	131
2.2	群论	134
3	各向异性材料的弹性表征	137
3.1	广义胡克定律、刚度与柔度	137
3.2	工程弹性常数	140
3.2.1	工程弹性常数的定义	140
3.2.2	工程弹性常数的取向分布	141
3.3	弹性柔度与工程弹性常数的关系	143
3.3.1	以工程弹性常数表示柔度系数	143
3.3.2	以柔度系数表示工程弹性常数	146
4	常见金属材料的弹性各向异性特征	151
4.1	正交异性	151
4.2	横向同性	155
4.3	立方对称	163
5	多晶金属弹性模量的统计计算	168
5.1	按取向分布函数统计刚度系数	169
5.2	按反极图统计杨氏模量	171
6	金属织构的弹性分析方法	173
6.1	晶体弹性各向异性的图像表示	173
6.1.1	晶体的三维弹性各向异性极射赤面投影图	174
6.1.2	晶体诸晶面的二维弹性各向异性图像	174
6.2	六方金属织构的弹性分析	174
6.3	立方金属织构的弹性分析	177
6.3.1	定性分析	177
6.3.2	定量分析	180
7	复合材料的弹性各向异性分析	183
7.1	复合材料层片的弹性各向异性	183
7.1.1	主坐标系中的柔度与刚度	183

7.1.2	非主坐标系中的柔度与刚度	186
7.2	层合板的弹性各向异性	188
7.2.1	层合板的弹性表征	188
7.2.2	几种典型层合板的弹性各向异性特征	196
8	复合材料弹性的预测	200
8.1	纵向杨氏模量 E_1	201
8.2	纵横向泊松比 μ_{21}	202
8.3	横向杨氏模量 E_2	203
8.3.1	蔡-韩公式	205
8.3.2	植村-山胁公式	205
8.4	纵横向切变模量 G_{12}	206
9	各向异性介质中的弹性波	207
9.1	波动方程	207
9.2	传播张量及其特征值和特征矢量	208
9.3	正交异性介质中的弹性波	210
9.3.1	沿 2 次轴方向传播的弹性波	211
9.3.2	在对称面内传播的弹性波	211
9.4	横向同性介质中的弹性波	212
9.4.1	沿 6 次轴方向传播的弹性波	212
9.4.2	沿横向传播的弹性波	212
9.5	立方对称介质中的弹性波	213
9.5.1	沿 4 次轴方向传播的弹性波	214
9.5.2	沿 3 次轴方向传播的弹性波	214
9.5.3	沿 2 次轴方向传播的弹性波	215
9.6	各向同性介质中的弹性波	216
	参考文献	217

第 3 篇 非弹性与振动阻尼的测量与应用

1	非弹性的基本概念及其表述	219
1.1	非弹性与机械滞后	219

1.1.1	固体中的非弹性现象	219
1.1.2	机械滞后, 静滞后与内耗	220
1.1.3	粘弹性与滞弹性	221
1.2	非弹性与内耗的量度	225
1.2.1	应变响应滞后角 φ	225
1.2.2	耗损系数 η	225
1.2.3	阻尼能力率 P	225
1.2.4	机械品质因数 Q	226
1.2.5	对数衰减率 δ	226
1.2.6	阻尼系数 β	226
1.2.7	声衰系数 (衰减系数) α	227
1.2.8	分贝衰减率 γ	227
1.3	滞弹性与内耗的形式理论	228
1.3.1	应力-应变关系	228
1.3.2	应变弛豫与应力弛豫	230
1.3.3	内耗与弛豫谱	231
1.4	非弹性与内耗的影响因素	233
1.4.1	界面弛豫	233
1.4.2	热弹性弛豫	233
1.4.3	点缺陷弛豫	233
1.4.4	斯诺克弛豫	234
1.4.5	甄纳弛豫	234
1.4.6	位错弛豫	234
1.4.7	磁弹性弛豫	235
1.4.8	传导电子弛豫	235
1.4.9	各类内耗源的特征及其应用	235
2	非弹性测量方法	240
2.1	应力或应变弛豫与弹性后效测量法	240
2.1.1	应力弛豫的测量	240
2.1.2	弹性后效的测量	242

2.1.3	弛豫参量的自动测量	246
2.2	扭摆内耗与振动衰减测量法	247
2.2.1	葛氏摆法	248
2.2.2	倒摆法	252
2.2.3	复合摆法	254
2.3	振动阻尼与音频内耗测量法	255
2.3.1	幅比法	255
2.3.2	峰宽法	260
2.3.3	衰减法	262
2.4	声衰系数与超声衰减测量法	264
2.4.1	适用范围	264
2.4.2	测量原理	265
2.4.3	测量条件与要求	266
2.4.4	就应用发展概况	267
2.5	高阻尼材料振动衰耗特性测量法	267
2.5.1	适用范围	267
2.5.2	测量原理	268
2.5.3	测量条件与要求	270
2.5.4	应用发展概况	271
2.6	粘弹性材料性能工业检测	271
2.6.1	正弦力激励法	271
2.6.2	谐振试验法	272
2.6.3	自由衰减法	273
2.7	内耗绝对测量的有关问题	274
2.7.1	支撑的影响	274
2.7.2	空气阻尼的影响	275
2.7.3	测量方法与条件的选择	275
3	非弹性测量的应用	277
3.1	概述	277
3.2	减振降噪技术中的应用	277

3.2.1 粘弹阻尼材料	278
3.2.2 减振合金	280
3.3 金属固溶体浓度及沉淀析出的研究	281
3.4 扩散参量的测定	283
参考文献	286

第 4 篇 弹性松弛的测量与应用

1 弹性松弛概论	288
1.1 松弛现象	288
1.2 应力松弛的物理本质	289
1.3 应力松弛试验名词术语	291
1.4 应力松弛曲线与特性指标	293
2 弹性松弛测量方法	295
2.1 拉伸应力松弛试验法	295
2.1.1 静态拉伸法	295
2.1.2 动态拉伸法	296
2.1.3 国标法	298
2.2 弯曲应力松弛试验法	299
2.2.1 等弯矩环法	299
2.2.2 两端自由法	301
2.2.3 两端固定法	301
2.2.4 门德尔贴筒法	303
2.2.5 三点弯曲试验法	304
2.3 松弛试验国内外标准概述	305
2.3.1 应力状态	305
2.3.2 温度控制精度	306
2.3.3 试样尺寸与形状	307
2.3.4 施加载荷的规定	308
3 工程材料应力松弛检测方法	309
3.1 开关簧片的应力松弛检测	309

3.2	螺旋弹簧应力松弛检测	314
3.2.1	螺旋弹簧应力松弛试验装置	314
3.2.2	螺旋弹簧应力松弛的自动检测装置	316
3.3	纺机摇架弹簧的松弛检测	317
3.3.1	摇架弹簧的绕制	317
3.3.2	松弛试验	317
3.3.3	65 钢的松弛曲线及关系式	318
3.4	预应力钢材的松弛检测	320
4	常用合金材料的应力松弛特性	323
4.1	合金材料的应力松弛特性与产品可靠性的关系	323
4.2	形变强化弹簧钢的应力松弛性能	324
4.3	铍青铜的应力松弛特性	325
4.4	形变强化铜合金的应力松弛特性	329
4.5	提高合金材料松弛稳定性的途径	334
4.5.1	提高合金钢材松弛稳定性的途径	334
4.5.2	提高弹性元件松弛稳定性的途径	335
4.5.3	提高铍青铜松弛性能的新方法	336
	参考文献	338

附录 A 测量不确定度应用基础

1	经典的测量误差概念	339
1.1	测量值与正态分布	339
1.1.1	测量及其分类	339
1.1.2	等精度单水平测量值的分布	339
1.1.3	置信水平与误差限	343
1.2	经典的测量误差与相关术语	344
1.2.1	测量误差	344
1.2.1.1	绝对误差与相对误差	344
1.2.1.2	偶然误差与系统误差	344

1.2.2 测量精密度、准确度与测试方法重复性、再现性	345
2 有限次测量的样本偏差及其分布	346
2.1 样本标准差	346
2.2 样本偏差的分布与 χ^2 检验	347
2.2.1 有限次测量中样本偏差的分布	347
2.2.2 χ^2 分布表的应用	349
2.2.2.1 总体标准差置信上限的估算	349
2.2.2.2 χ^2 检验	351
3 测量不确定度及其表征	353
3.1 经典误差概念中的问题与不确定度	353
3.2 不确定度及其表征	354
4 不确定度的估算	355
4.1 相关量测量不确定度的估算	355
4.2 间接测量值测量不确定度的估算	356
4.3 合成不确定度的估算	357
5 置信因子的确定与总不确定度估算	360
5.1 t 分布及其应用	360
5.2 置信因子与总不确定度估算法	362
参考文献	365
附录 B 化学元素常见物理性能表	

第 1 篇 弹性常数测量的理论与方法

弹性是固体在外力作用下得以保持确定形状能力的表征。人类从学会使用生产工具起，就认识到物体的弹性并开始应用。在现代生产活动中，对材料或器件弹性性能的测量应用于工程构件的应力分析、仪表游丝的扭矩计算、集成电路插件的弹性控制以及机械滤波器工作频率设计等广泛领域中，这种测量亦成为混凝土、焦炭、硬质合金等材料质量评估的有效工具。近 20 年来，对于不断提高比模量（弹性模量与密度的比值）的追求促进了弹性测量的应用与发展，而对热弹性马氏体及相关的记忆合金的研究，亦使这种测量成为材料研究的有效手段之一，成为微动态分析（MDA）的重要组成部分。

依器件使用过程中变形速率的不同，相应的弹性测量方法分为“静态”和“动态”两类。静态弹性常数是在测量过程中试样的变形速度趋于零，即在等温条件下所得出的常数；动态弹性常数对应的变形速率趋近无穷大，相当于在绝热过程中所得出的常数。从理论上说，这两类常数的差异不大于 1%，但由于静态常数是在试样具有显见应变值下测得的，这与在应变趋近于零下得出的动态常数往往有较显著的不同，故常将两者予以区别。常依试样的形变模式来将测量方法分类，本文将先按使用要求区分，再分类阐述。

在弹性测量漫长发展历程中，里程碑式的人物或事件依次是，1678 年发表的胡克定律，即物体弹性变形的基本规律^[1]，它奠定了弹性力学基础；1787 年库仑率先完成的金属扭转弹性的测量^[2]及 20 世纪 30 年代由艾德 (Ide, J., 1935)^[3]和弗斯特 (Föster, F., 1937)^[4]分别创立的纵共振测量法和弯曲共振法，它们的出现极大地提高了弹性测量的精度。近年来，借助伴随计算机技术而日渐普及的共振频谱分析方法，弹性测量已实现了全自动化^[5]。

1 固体的弹性与弹性常数

1.1 弹性与弹性变形的的基本规律

物体在外力作用下改变其形状和大小，外力卸除后又可回复其原始形状和大小的特性称为“弹性”。物体弹性变形的的基本规律由胡克定律表述，这一规律是研究固体力学性能的基础。

我们来考察受力物体中的一个足够小的立方体元。在直角坐标系中，一般用三个不同方向上的基本应力来描述周围对该体元一个界面的作用；其中，将方向与立方体表面垂直的应力称为“正应力”，与表面平行且相互垂直的两个应力称为“切应力”。在应力的脚标中，第一个字母表示应力所作用的面（以面的法向为代表），第二个字母表示应力作用的方向，如图 1-1-1 所示。在平衡状态下，由于这个立方体足够小，其相对两面上对应的应力相等。根据合力矩等于零的条件，应有 $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ($i, j = x, y, z; i \neq j$)。因此，为了描述物体内某点处的应力状态，只需要 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 、 σ_{xy} 、 σ_{yz} 、 σ_{zx} 这六个独立的应力分量。

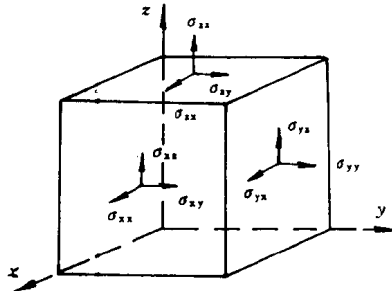


图 1-1-1 物体中某一处的应力

若物体内初始坐标为 (x, y, z) 的一点变形后为 $(x+u, y+v, z+w)$ ，其中 u, v, w 为位移的三个分量，则坐标原为 $(x+\delta x, y+\delta y, z+\delta z)$ 的相邻点变形后的位移为 $(u+\delta u, v+\delta v, w+\delta w)$ ；若 $\delta x, \delta y, \delta z$ 都足够小，则有