



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



黏弹性理论与应用

杨挺青 罗文波 徐平 著
危银涛 刚芹果



科学出版社



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



黏弹性理论与应用

杨挺青 罗文波 徐 平 著
危银涛 刚芹果



科学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

黏弹性理论与应用体现力学、物理、化学和工程学科相互渗透与交融,与先导工业、工程及高新技术密切相关,涉及聚合物、复合材料、智能材料、生物体、地质材料、高温下金属以及它们的结构,在材料、生物、能源、海洋、宇航和地下工程,在化工、轻纺、建筑、机械等行业及日用品工业中有广泛应用。

本书第一至八章为基础理论部分,包括黏弹性力学行为与本构关系、线黏弹性力学问题及解法、线黏弹性结构分析、黏弹性与不可逆热力学、非线性黏弹性本构方程、黏弹塑性本构关系和黏弹性体的能量损耗。第九至十四章为黏弹性理论在技术与工程中的应用,着重聚合物黏弹性、带缺陷高聚物的损伤与破坏、黏弹性橡胶与轮胎力学、岩石黏弹性力学性能、岩石与岩体工程流变分析以及某些生物固体的黏弹性分析。

本书可作为高等学校力学及相关专业研究生教材或教学参考书,也可供有关学科和技术工程领域的科研与设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

黏弹性理论与应用 / 杨挺青等著. - 北京: 科学出版社, 2004.9
ISBN 7-03-013938-0

I. 黏… II. 杨… III. 黏弹性理论 IV. O345

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 072016 号

责任编辑: 王 军 / 责任印制: 高 嵘

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

湖北京山德新印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2004 年 9 月第一次印刷 印张: 26 1/2 插页: 2

印数: 1-1 500 字数: 614 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

许多物质或材料往往兼具弹性和黏性两种不同机理的变形,综合地呈现弹性固体和黏性流体两者的力学行为,物质(或材料)的这种性能称为黏弹性。随着聚合物、复合材料、智能材料、生物体、地质材料、高温下金属以及它们的结构的日益发展与广泛应用,黏弹性理论与应用研究日益拓展。

黏弹性力学是连续介质力学的重要内容之一,体现力学、物理、化学和工程学科相互渗透与交融,有新兴学科分支的特征,与先导工业、工程和高新技术有密切联系。它涉及塑料、橡胶、树脂、油漆、玻璃、陶瓷、金属等工业材料,岩石、土壤、沥青、混凝土、石油和矿物等地质材料,肌肉、筋腱、骨骼、血液等生物体,纺织纤维、纸浆、化妆品、油料、食品等轻工和生活用品原料,在材料、生物、能源、海洋、宇航和地下工程中,在化工、轻纺、建筑、机械等行业以及日用品工业中都有重要应用或广阔的应用前景,正越来越受到力学、材料、化学和工程技术界的共同关注与重视。

本书所述的黏弹性理论,主要研究固态材料的时间相关力学行为、本构关系和破坏过程,研究黏弹性物体随时间变化的应力、变形和失效规律,因而也可以称为黏弹性力学。

本书的主要内容是作者及所在研究组近 10 余年承担国家自然科学基金项目和参加部分重要工程研究任务所取得的成果,其中许多内容已在国内外重要刊物发表,有的已在相关技术与工程中采用。全书分为十四章。第一至八章为基础理论部分,包括黏弹性力学行为与本构关系,线黏弹性力学问题的建立及解法,线黏弹性结构分析,黏弹性与不可逆热力学,非线性黏弹性本构关系,黏弹塑性本构关系,黏弹性物体的能量损耗。在基础理论的论述中,注重基本概念、基本原理和基本方法,力求学术理论的深入、创新与拓展,如:线性和非线性黏弹性体在若干周期应变下的应力与能耗理论解,线黏弹性本构微分关系,黏弹性轴对称问题的一般解,黏弹性结构延迟屈曲,薄板蠕变屈曲载荷-时间相关规律,黏弹性结构的动力响应,某些非线性黏弹性本构方程等。第九至十四章着重黏弹性理论在技术与工程中的应用,含:聚合物黏弹性,带缺陷高聚物的损伤与破坏,黏弹性橡胶与轮胎力学,岩石黏弹性力学性能,岩石与岩体工程流变分析,某些生物固体的黏弹性问题。这些内容体现黏弹性理论与工程技术密切相关,理论与应用各具特色,例如:高聚物黏弹性非线性行为研究,时间-温度-应力等效原理,含缺陷聚合物的银纹扩展机理;岩石压缩蠕变与应力松弛,岩体及结构面蠕变性能,三峡工程岩体蠕变数据处理,岩体高边坡施工期、运行期流变分析;橡胶准静态、动态黏弹性行为及其分析,黏弹性轮胎滚动接触动力学;骨力学性能测试与黏弹性力学行为,松质骨黏弹性分析。

本书试图体现黏弹性理论与应用某些前沿研究水平,兼顾黏弹性力学系统与拓展,反映部分研究新成果,加强工程技术应用。撰写中注重概念与提法正确,物理基础清晰,数学表述准确;力求叙述严谨,逻辑性强,文字简练。全书内容基本体系为:本构关系-问题建立与解法;专题研究;在技术与工程中的应用。在第一至三章线黏弹性力学的基础上,第四至八章可各自成为理论专题,第九至十四章着重于黏弹性理论在技术工程中的应用,

同样可作为专题研究的内容。这种由浅入深、逐步提高与拓展的内容体系,可以满足广大读者的不同要求,以供各取所需。笔者于 1988 年成稿的《黏弹性力学》一书(华中理工大学出版社,1990,1992),先后有许多高等学校有关教师用作研究生教材或教学参考书,反映良好,本书第二、三、五至七章中的基础理论部分引用了该书相应的基本内容,以便查考或用作教材,利于致趣黏弹性理论与应用的部分读者自学。

感谢国家自然科学基金委员会研究成果专著出版基金(10224002)的资助,使本书得以出版。10 多年来,国家自然科学基金委员会批准的黏弹塑性本构理论及其应用(1870320)、黏弹性材料的非线性力学行为及其应用(19172027)、含缺陷流变物体的材料破坏理论(重点项目19632030)、承载高聚物蠕变损伤-破坏力学行为与细观机理(10172037)、高聚物应力银纹化的研究(20204012)、高边坡岩体流变断裂特性研究(59279392)、“三峡船闸高边坡岩体分级宏观力学参数和施工监测反馈分析研究”(重大项目专题 59493600-III-4-3)和砧板及牵引砧分离流变性质研究(39170242)等项目的资助,使我们的黏弹性理论与应用研究得以持续进行,作者再次表示感谢。

在笔者长期的黏弹性力学研究与教学中,承蒙许多良师益友的关怀和支持。黄克智院士、杨桂通教授、徐秉业教授、匡震邦教授、丁皓江教授、沈亚鹏教授、刘延柱教授、程昌钧教授、余寿文教授、白以龙院士、杜善义院士、袁龙蔚教授、黄筑平教授、杨嘉陵教授、张文教授、傅衣铭教授以及其他同仁给予很多启示和热情帮助,笔者借此机会向他们表示深切的敬意和感谢。美国 Rutgers 大学 Yu Chen 教授、G. J. Weng 教授在本人 1981~1982 作访问学者期间给予许多关照与热诚指导,美国 R. M. Christensen 教授、加拿大 G. A. C. Graham 教授、日本 S. Murakami 教授和波兰 M. Zyczkowski 教授等的有益讨论与文稿交流,在美、日、德、韩、加拿大、新加坡等国以及香港、台湾地区讲学和学术交往期间有关同仁给予的帮助,在此向他们一并表示诚挚的谢意。同时,笔者衷心感谢几十年来在华中科技大学力学系共同完成科学研究与教学任务的同事们和同学们。

本书完稿与出版之际,笔者深切缅怀敬爱的恩师王仁院士。

在共同拟定详细编写大纲的基础上,本书第一至七章、§ 8-1 和 § 8-2 由华中科技大学杨挺青撰写,第九、十章由湘潭大学罗文波撰写,§ 8-3~§ 8-5 和第十一章由清华大学危银涛撰写,第十二、十三章由长江科学院徐平撰写,第十四章由河北大学刚芹果撰写。全书由杨挺青统稿。在各章的修订稿完成以后,杨挺青、罗文波和徐平共同审阅讨论了全书内容。

限于作者的水平与经验,书中错漏与不当之处,恳请读者批评指正。

杨挺青

2004 年元月于武昌

目 录

前 言	i
第一章 绪论	1
§1-1 物质的黏弹性	1
§1-2 黏弹性力学行为	2
1-2-1 蠕变和应力松弛	2
1-2-2 载荷速率效应	3
1-2-3 频率相关性能	4
1-2-4 温度依赖性	5
§1-3 黏弹性本构关系	6
§1-4 黏弹性力学	7
1-4-1 黏弹性力学	7
1-4-2 本书内容概要	9
参考文献	11
第二章 线黏弹性本构关系	13
§2-1 黏弹性模型表述	13
2-1-1 两基本模型	13
2-1-2 三参量固体	17
§2-2 蠕变柔量和松弛模量	19
§2-3 一维微分型本构关系	20
2-3-1 广义 Maxwell 模型和广义 Kelvin 模型	20
2-3-2 一维微分型本构方程	22
§2-4 一维积分型本构关系	24
2-4-1 积分型本构方程	24
2-4-2 应力应变历史相关性	27
2-4-3 材料函数的积分表达	30
§2-5 复模量和复柔量	31
2-5-1 复模量和复柔量	32
2-5-2 材料函数之间的关系	38
2-5-3 动态性能与频率的关系	42
§2-6 三维本构关系	43
2-6-1 三维微分型本构方程	43
2-6-2 三维积分型本构方程	46
参考文献	48
第三章 线黏弹性力学边值问题	49
§3-1 线黏弹性力学问题	49
§3-2 线黏弹性问题求解	50

§3-3 相应原理	53
§3-4 梁的弯曲	56
3-4-1 直梁弯曲	56
3-4-2 连续支承梁	59
§3-5 圆轴的扭转	62
§3-6 黏弹性轴对称圆筒	64
3-6-1 轴对称圆筒	64
3-6-2 外表面受约束圆筒	68
3-6-3 不可压缩圆筒动态响应	72
§3-7 轴对称平面问题一般解	76
3-7-1 基本解	76
3-7-2 厚壁圆筒	77
3-7-3 数值逆变换	79
3-7-4 算例	82
参考文献	84
第四章 线黏弹性结构分析	85
§4-1 黏弹性 Timoshenko 梁的准静态分析	85
4-1-1 基本方程	85
4-1-2 两种梁理论解的基本关系	86
4-1-3 几种单跨梁解的关系式	87
§4-2 黏弹性基支黏弹薄板的准静态弯曲	89
4-2-1 Laplace 空间的方程及其解	89
4-2-2 数值逆变换	91
4-2-3 算例与结果	92
§4-3 基支黏弹板轴对称问题的动力响应	94
4-3-1 基本方程	94
4-3-2 基支圆板的求解	95
4-3-3 算例	97
§4-4 黏弹性大挠度圆板的轴对称弯曲	99
4-4-1 基本方程	99
4-4-2 基本控制方程求解	101
4-4-3 标准线性固体圆板	103
§4-5 薄板蠕变屈曲载荷-时间特性	106
4-5-1 黏弹性薄板的压屈方程	107
4-5-2 薄板蠕变屈曲载荷-时间关系	108
4-5-3 屈曲载荷-时间特性	109
4-5-4 薄板压屈实验测试	110
§4-6 高密度聚乙烯板材焊接储液罐蠕变分析	112
4-6-1 储液罐细部的变形与内力分析	113
4-6-2 储液罐蠕变分析	117
参考文献	118
第五章 黏弹性与不可逆热力学	120

§5-1 概述	120
§5-2 热力学基础	121
5-2-1 热力学定律	121
5-2-2 非均匀系	121
5-2-3 Onsager 原理	122
§5-3 线性后效材料演变方程	124
§5-4 演变方程求解	126
5-4-1 可逆变量与不可逆变量	126
5-4-2 演变方程一般解	127
§5-5 内变量与本构关系	131
§5-6 一种广义黏弹性本构方程	133
5-6-1 率相关非弹性本构关系及演变方程	133
5-6-2 线黏弹性本构微分关系	135
5-6-3 一种黏弹性本构方程	137
参考文献	139
第六章 非线性黏弹性本构关系	140
§6-1 概述	140
§6-2 多重积分型本构关系	141
6-2-1 一维多重积分型本构关系	141
6-2-2 三维多重积分型本构关系	144
§6-3 不可压缩材料和线性可压缩材料	146
6-3-1 不可压缩材料的蠕变	146
6-3-2 线性可压缩材料	148
§6-4 简单受力多重积分本构方程	150
6-4-1 轴力和扭转联合作用	150
6-4-2 简单拉压	151
6-4-3 纯扭转	151
6-4-4 近似核函数	152
§6-5 有限变形理论概述	153
6-5-1 变形梯度和变形张量	153
6-5-2 应变张量和变形率	156
6-5-3 相对变形	157
6-5-4 应力	158
6-5-5 黏弹性固体本构描述	159
6-5-6 不可压缩材料	159
§6-6 单积分型非线性本构关系	161
6-6-1 不可压缩固体本构关系	162
6-6-2 修正叠加法和物理线性近似	166
6-6-3 含折算因数的本构关系	168
6-6-4 广义应变模型	169
§6-7 非线性本构关系的其他形式	171
6-7-1 非线性黏弹性幂率关系	171
6-7-2 新胡克定律	171

参考文献	172
第七章 黏弹塑性本构关系	174
§7-1 变形固体一般模型	174
§7-2 黏弹塑性本构关系	176
7-2-1 黏弹塑性材料的屈服准则	176
7-2-2 黏弹塑性本构表达	178
§7-3 弹黏塑性本构方程	179
7-3-1 弹黏塑性本构关系	179
7-3-2 各向同性强化弹黏塑性材料	181
7-3-3 弹黏理想塑性材料	182
§7-4 无屈服面黏弹塑性理论	185
7-4-1 内时理论和过应力模型简介	185
7-4-2 Bodner-Partom 本构方程	186
7-4-3 某些模型的修正与讨论	188
§7-5 黏弹塑性细观理论概述	191
7-5-1 小应变细观理论	192
7-5-2 有限变形细观理论	193
参考文献	193
第八章 黏弹性物体的能量损耗	195
§8-1 线性黏弹体的能耗	195
8-1-1 谐波作用下的响应与能耗	195
8-1-2 三角形脉动循环应变下的应力和能耗	197
§8-2 非线性黏弹性体在周期应变条件下的应力与能耗	200
8-2-1 能量损耗表达	200
8-2-2 本构关系	201
8-2-3 谐波应变作用	202
8-2-4 三角形脉动变形作用	203
§8-3 一般非谐变循环载荷下的应力与能耗	205
8-3-1 梯形脉动应变循环	206
8-3-2 一般非谐应变情况	207
§8-4 颗粒增强橡胶动态力学性能和生热预报	210
8-4-1 应变放大因子	210
8-4-2 均匀填充橡胶的能耗	211
8-4-3 炭黑分散不均匀的影响	211
§8-5 黏弹性纤维复合材料的三维能耗	214
8-5-1 均质各向异性黏弹性材料的能耗公式	214
8-5-2 多层复合材料的有效阻尼(损耗)矩阵和能耗	216
8-5-3 数值算例与分析	219
参考文献	221
第九章 聚合物黏弹性力学性能	223
§9-1 概述	223
§9-2 高聚物非线性黏弹性行为	224

9-2-1 高聚物变形行为的率相关性	225
9-2-2 应力行为的应变历史相关性	227
9-2-3 蠕变行为的应力水平相关性	229
§9-3 时间-温度等效原理	230
9-3-1 高聚物力学性能的温度依赖性	230
9-3-2 时间-温度等效原理	231
§9-4 时间-温度-应力等效原理	234
9-4-1 自由体积的温度与应力水平相关性	234
9-4-2 时间-温度-应力等效原理	236
9-4-3 热塑性高聚物的非线性蠕变分析	237
§9-5 时间-温度-损伤等效原理	239
9-5-1 时间-温度-损伤等效原理	239
9-5-2 橡胶材料的 Payne 效应模拟	240
§9-6 聚合物银纹损伤演化	242
9-6-1 银纹损伤及其演化	242
9-6-2 蠕变银纹损伤演化实验研究	248
参考文献	253
第十章 含缺陷聚合物的损伤与破坏	256
§10-1 含缺陷聚合物形变热效应	256
10-1-1 控制方程	256
10-1-2 形变热效应实验研究	257
10-1-3 形变生成热计算	261
10-1-4 降温-升温现象分析	262
§10-2 裂纹定常扩展过程的热耗散与温度场	263
10-2-1 裂尖不可逆塑性区的形状与尺寸	263
10-2-2 热源密度分布	264
10-2-3 稳态扩展裂纹周围温度场	265
10-2-4 算例	266
§10-3 聚合物裂尖银纹损伤区的生长	267
10-3-1 裂尖应力银纹化的实验研究	267
10-3-2 聚合物裂尖银纹区生长模型	270
§10-4 银纹生长与断面形貌	280
10-4-1 高聚物断面特征形貌	280
10-4-2 二次曲线状特征形貌的计算机模拟	281
§10-5 银纹断裂与银纹化增韧	283
10-5-1 银纹化增韧概述	283
10-5-2 银纹断裂的弹性力学模型	284
10-5-3 银纹化增韧的微观设计	287
参考文献	289
第十一章 黏弹性橡胶与轮胎力学	292
§11-1 概述	292
§11-2 橡胶本构理论	294
11-2-1 橡胶弹性理论	295

11-2-2 橡胶黏弹性特征	299
11-2-3 橡胶本构的数值实施	300
§11-3 橡胶的 Mullins 效应	304
11-3-1 Mullins 效应描述	304
11-3-2 伪弹性理论	304
11-3-3 Mullins 效应的模拟	305
§11-4 橡胶动态黏弹性 Payne 效应	309
11-4-1 Payne 效应的基本描述	309
11-4-2 Payne 效应的 Kraus 模型	311
11-4-3 橡胶的老化特性与 Payne 效应	312
§11-5 轮胎滚动阻力计算	315
11-5-1 轮胎滚动阻力定义	315
11-5-2 滚动阻力有限元计算方法	317
11-5-3 非谐变载荷下的能耗公式	318
§11-6 黏弹性轮胎滚动接触动力学	319
11-6-1 轮胎环模型基本方法	319
11-6-2 动态接触分析	321
参考文献	323
第十二章 岩石黏弹性力学性能	326
§12-1 概述	326
§12-2 岩石的压缩蠕变与应力松弛	327
12-2-1 岩石的压缩蠕变性能	327
12-2-2 岩石的应力松弛性能	331
§12-3 岩体单轴和三轴压缩蠕变性能	332
12-3-1 单轴和三轴压缩蠕变试验	332
12-3-2 岩体蠕变模型及其参数	334
§12-4 岩体结构面剪切蠕变性能	334
12-4-1 岩体结构面室内剪切蠕变性能	334
12-4-2 现场岩体结构面剪切蠕变性能	335
12-4-3 考虑加载历史影响的蠕变试验曲线	336
12-4-4 结构面长期抗剪强度	337
12-4-5 结构面剪切蠕变方程	339
§12-5 岩体剪切蠕变性能	340
12-5-1 硬岩的剪切蠕变性能	340
12-5-2 松散结构岩体剪切蠕变性能	341
12-5-3 泥化夹层剪切蠕变性能	343
§12-6 岩石蠕变断裂特性	345
12-6-1 试验方法	345
12-6-2 试验结果分析	346
12-6-3 试样断口显微观察	347
§12-7 工程岩体蠕变位移数据处理	349
12-7-1 滑坡蠕变吸引子分析	350
12-7-2 Lyapunov 指数计算	352

§12-8 岩体黏弹性参数反分析	354
12-8-1 黏弹性参数反分析方法	355
12-8-2 构皮滩枢纽软弱岩层黏弹性参数反分析	359
12-8-3 三峡工程岩体黏弹性参数反分析	361
12-8-4 三峡工程岩体黏弹性参数综合取值	362
参考文献	363
第十三章 岩石工程流变分析	365
§13-1 岩石工程流变有限元方法	365
13-1-1 黏弹性有限元分析方法	365
13-1-2 岩石工程开挖模拟方法	366
13-1-3 有限元程序框图	366
§13-2 岩体高边坡施工期流变分析	368
13-2-1 三峡工程永久船闸工程地质特征	368
13-2-2 三峡工程永久船闸工程概况	371
13-2-3 永久船闸高边坡施工期流变分析	371
§13-3 岩体高边坡运行期流变分析	378
13-3-1 边坡渗透水压力与等效节点荷载计算	378
13-3-2 计算条件与方案	378
13-3-3 计算结果分析	379
13-3-4 岩体流变参数敏感性分析	380
§13-4 考虑开挖卸荷效应的高边坡流变分析	381
13-4-1 高边坡岩体开挖卸荷区及其参数确定	381
13-4-2 计算基本条件	384
13-4-3 计算结果分析	385
13-4-4 与现场实测资料对比分析	388
§13-5 地下岩石工程流变分析	390
13-5-1 三峡工程地下厂房围岩稳定性黏弹性分析	390
13-5-2 软弱岩层洞群围岩黏弹性分析	394
参考文献	396
第十四章 若干生物固体黏弹性分析	397
§14-1 生物组织特性与黏弹性	397
§14-2 软组织黏弹性本构方程的修正	397
§14-3 骨骼板力学性能与黏弹性分析	400
§14-4 骨单元力学模型	401
14-4-1 骨单元的力学模型	402
14-4-2 骨单元的受力分析	403
§14-5 松质骨的力学性质	405
§14-6 椎体和椎间盘系统力学模型	406
参考文献	409
主要词汇英汉对照表	411

第一章 绪 论

§ 1-1 物质的黏弹性

在连续体力学中,人们最早熟悉的两类简单物质或材料是弹性固体和黏性流体。弹性固体具有确定的体积和构形,受静载作用时应力状态和变形与时间无关,外力卸除后完全恢复原状;从能量观点来看,在弹性体变形过程中外力所做的功全部以弹性势能方式存储,而且能在载荷卸除过程中被完全释放出来。黏性流体没有确定的构形,其形状决定于容器,在外力作用下随时间连续地变形,产生不可逆的流动;变形运动时相邻流体层产生内摩擦作用。

实际上,一切固体都会或多或少地产生变形,许多乃是流动的固体。塑料、橡胶、树脂、油漆、玻璃、陶瓷、金属等工业材料,岩石、土壤、沥青、混凝土、石油和矿物等地质材料,肌肉、筋腱、骨骼、血液等生物体,纺织纤维、纸浆、化妆品、油料、食品等轻工和日用品原料,在一定的条件下,往往同时具有弹性固体和黏性流体两者的特性,综合呈现弹性和黏性两种不同机理的形变,物质的这种性质称为黏弹性^[1.1~1.4]。

黏弹性物质可分为线性和非线性两大类。若物质的力学性能表现为线弹性和理想黏性的组合,则为线性黏弹性物质^[1.1~1.4]。如果以线弹性胡克体和理想黏性牛顿流体为两端来构成材料谱系,则介于这两者之间的均属于线黏弹性体。线性黏弹性物体在不同时刻的应力和应变虽然各有不同,但在任一时刻其应力与应变均呈线性关系。在许多情况下,黏弹性物体呈现非线性弹性或非牛顿流体变形,或组合地呈现非线性弹性和非牛顿流体的特征,这种物质是非线性黏弹性体^[1.3~1.7],它的力学行为和本构关系比线黏弹性物质复杂。若黏弹性固体受一定载荷后产生屈服、出现塑性变形,或在弹性变形过程与塑性变形阶段均有黏性效应,物质同时呈现弹性、黏性和塑性特性的组合,则为黏弹塑性物质^[1.4]。

载荷与使役条件对于物质性状和力学行为有重要的影响。物质的黏弹性能与温度、负荷时间、加载速率、应变幅值和其他环境因素密切相关,其中最主要的因素是时间和温度。多数金属材料在常温和小应变时表现为弹性,但在振动问题中或高温条件下往往需要考虑其黏弹性行为。受高速冲击的金属材料与构件可能需要采用其他的模型,如黏塑性、弹黏塑性模型或高温高压下的流体动力模型。硬聚苯乙烯或其他塑料等许多固态聚合物,在某些条件下或许能粗略地视为弹性体,而实际上却存在着流动性,且随着温度的升高会加速流动,当温度较高时则熔融成为熔体或一种高黏度流体。通常,根据聚合物性能依赖于温度和时间特性,把非晶态聚合物分为几种力学状态,即玻璃态、黏弹态、高弹态(橡胶态)和黏流态,这些状态呈现不同机理的流变行为,构成描述非晶态聚合物力学性能的基础。由于高分子聚合物的黏弹性质特别突出,常称聚合物为黏弹性材料。事实上,许多聚合物在一定的条件下呈现明显的黏弹性能,与其将高聚物统称为黏弹性材料,不如将此类聚合物谓之黏弹性状态或黏弹性聚合物更为确切。

物质的黏弹性行为依赖于时间,且决定于应变率。时间的效应表明,材料的应变或应

力响应决定于载荷和变形的历史与过程,所以往往说这些材料是有记忆的。弹性固体是一个特例,它只记忆未发生形变的初始构形。

§ 1-2 黏弹性力学行为

物质黏弹性的宏观表象描述,着重于物质的力学行为与时间、速率、频率和温度的相关性。本节简要阐述物质的黏弹性性能:准静态条件下物体的应力应变随时间而变化的基本现象,即蠕变和应力松弛;黏弹性与加载速率有关;谐波作用时黏弹性能的频率相关性;黏弹性行为的温度依赖性。详细的内容见后续相应的章节。

1-2-1 蠕变和应力松弛

在一定的载荷作用下,弹性固体的应变或应力为一定值,不随时间而变化;对于理想黏性流体,其变形则以等应变率随时间而增加。黏弹性物质受一定应力作用时会或多或少地继续产生变形,在一定的应变条件下应力幅值将随时间而有所减小。

1. 蠕变

在恒定载荷(或应力)作用下,应变随时间而逐渐增加的过程或现象,称为蠕变。通常,不同的材料或某种材料在不同条件下的蠕变并不相同,聚合物尤为明显。图 1.2.1a 表示在突加后保持恒定应力 σ_0 作用下的一种蠕变曲线 ABC,应变 $\varepsilon = f(\sigma, t)$, t 表示时间。在较低应力水平下,固体材料的应变可能达到某一稳态值。受较大载荷时或在较高温度下,材料与结构蠕变过程呈现出瞬时蠕变(应变率随时间增加而减小)、稳态蠕变(应变率几乎为一常值)和加速蠕变(应变率随时间迅速增加)三个阶段,这种蠕变破坏曲线如图 1.2.1b 所示。

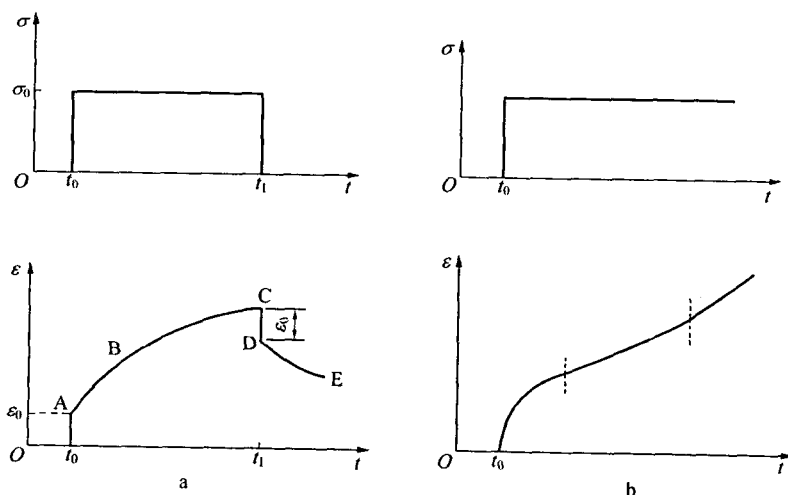


图 1.2.1 等应力作用下的蠕变过程

可见,为了保持构件、机械零件和制品的形状尺寸,不宜采用易产生蠕变的物质作为材料或原料。

回复 若在某时刻卸去载荷,弹性固体将恢复原样,如果不考虑惯性,则应变瞬时回复为零。对于黏弹性材料,在 $t=t_1$ 时刻除去外力(图 1.2.1a),则在瞬时弹性恢复(CD)后,有一逐渐回复的过程(DE)。这种蠕变回复现象,有时称为滞弹性恢复或延迟回复。留存于物体中不可恢复的应变,由回复曲线的渐近值确定。

材料的蠕变往往影响工程结构正常工作,乃至破坏机件的运行。例如:蒸汽透平叶片和涡轮机叶轮的径向位移超过叶片与机壳之间的间隙而顶住;叶片根部因长期蠕变而断裂;高温管道接头部分连接螺栓松脱;承载高聚物结构因蠕变而破坏。高温金属及其结构蠕变力学方面的文献不胜枚举^[1.8,1.9];国际理论与应用力学联合会以往举办的 6 次结构蠕变科学研讨会及其系列出版物,都很注重材料的蠕变性能^[1.10]。

显然,蠕变过程有线性和非线性之分,采用不同模型的材料函数和本构关系表述。本书第二至四章的相关内容中着重论述线黏弹性蠕变行为,第六、七章涉及非线性黏弹性蠕变,在第八章以后有关章节中将结合某些材料或结构作蠕变测试与表述,进行蠕变分析。

2. 应力松弛

在恒定应变下应力随时间而减小的现象或过程,称为应力松弛。图 1.2.2 表示一般的应力松弛,开始时应力较快地衰减,而后应力逐渐降低并趋于某一恒定值。从流变机理和相关模型看,黏性流动经过一些时间后将使应力较快地衰减至零。因而,在一定应变条件下,应力较快地降低并最后趋于零的物质是黏弹性流体;而经过较长的时间后应力衰减至某一定值的物质则为黏弹性固体。

应力松弛与蠕变现象相互对应。线黏弹性和非线性黏弹性应力松弛行为与松弛型本构关系,将分别在第二章和第六章具体阐述。

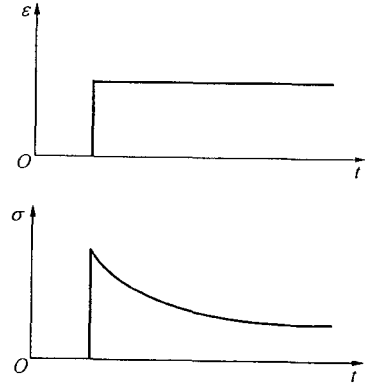


图 1.2.2 应力松弛

由于物质及其载荷起因和形变过程不同,材料随时间而变化的力学行为相当复杂,只用普通准静态条件下的简单蠕变和应力松弛往往不足以表述黏弹性物质的流变过程。然而,就表观现象而言,黏弹性固体准静态形变过程呈现的主要力学行为是:蠕变、应力松弛、瞬时弹性、滞弹性回复和永久变形。

1-2-2 载荷速率效应

除了蠕变、应力松弛和滞弹性现象外,加载速率效应是材料黏弹性的重要特征。为分析材料黏弹性能与加载速率的相关性,需要研究不同应变率下的应力响应,或不同应力速率对应变的影响。

随着应变率的增高,一般物质的应力响应幅值有程度不同的增加,如图 1.2.3 所示。聚合物的率敏感性通常比金属材料更为明显。现有的研究较多地涉及较低应变率下的黏弹性力学行为,例如,图 1.2.4 为一种高密度聚乙烯(HDPE)在不同应变率下的应力应变曲线,从中可见应变率对材料蠕变的影响。

高应变率和冲击对材料的黏弹性能有很大的影响。朱兆祥等对环氧树脂、有机玻璃、聚碳酸酯 PC、尼龙和 ABS 等的黏弹性能及其率效应进行了一系列实验研究工作^[1.11],认

为在准静态到一定的冲击载荷作用下,即应变率在 $10^{-4} \sim 10^3 \text{s}^{-1}$ 的范围内,高聚物的非线性力学行为来自弹性响应,材料速率相关的响应往往是线黏弹性的。本书在 § 6-6 将介绍其中一种非线性黏弹性本构关系。

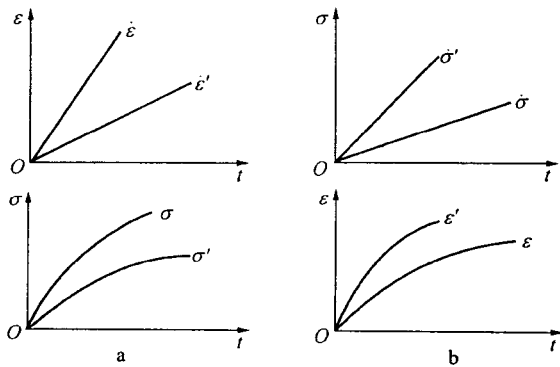


图 1.2.3 载荷速率效应示意图

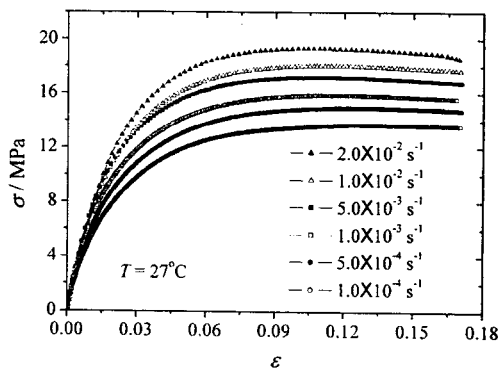


图 1.2.4 不同应变率下 HDPE 的应力-应变关系

进一步而言,加载速率影响材料强度。黏弹性材料的屈服应力幅值一般随应变率的增高而增大,这种屈服强度的率相关问题有着重要的理论意义与应用价值^[1,12]。

通常在准静态条件下研究材料的率效应。然而,某些材料及其结构承受应变率很高的冲击载荷,这类冲击载荷和黏弹性应力波等方面的内容,本书未予以讨论。某些基础性内容可见[1.2]~[1.4]及其中引述的文献。

1-2-3 频率相关性能

蠕变、应力松弛和应变率效应描述准静态载荷下一定或较长时间过程的黏弹性行为。然而,许多黏弹性材料及其结构所受的载荷随时间而交替变化,材料由于黏滞效应而与频率相关,产生能量耗散,这是黏弹性能的重要特征之一。

当弹性固体受到呈正(余)弦波变化的应力作用时,应变与应力同相地作正(余)弦波的变化(图 1.2.5a),此时没有能量损耗;对于理想黏性流体,从应力应变关系 $\sigma = \eta \dot{\epsilon}$ 可知,应变滞后相位 $\pi/2$,滞后时间为 $\pi/2\omega$,其中 ω 为频率,见图 1.2.5b。对一般线黏弹性体而

言,谐波应力下的应变响应则介于弹性固体与黏性流体之间,若用 δ 表示应变滞后相位差,则有 $0 < \delta < \pi/2$,滞后时间为 δ/ω ,如图 1.2.5c 所示。

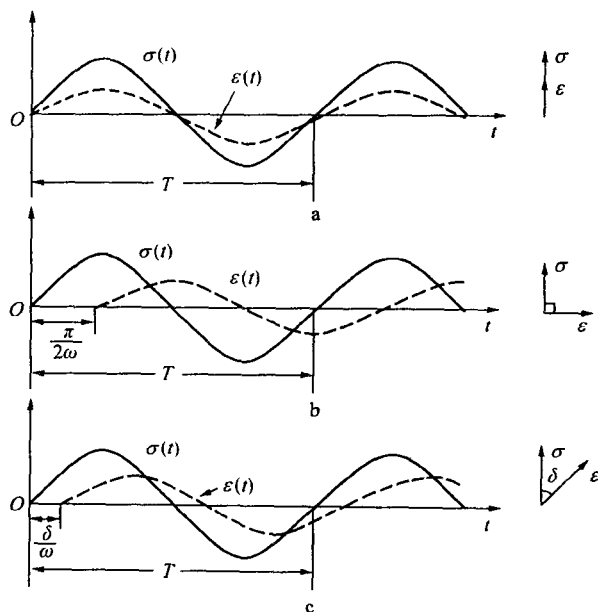


图 1.2.5 交变应力作用下的应变响应

各种轮胎和许多传动件工作运行中的发热现象,减振与隔音材料及其结构的阻尼作用,都与材料的黏弹性能密切相关。因此,研究材料在稳态谐振条件下的黏弹性力学行为有其理论意义与应用价值。这种稳态谐振条件下的黏弹性行为,有时习惯地称为黏弹性动态力学性能。

通常采用振动试验研究频率相关的黏弹性动态行为。为适应各种频率以及温度条件而有不同的振动试验方法,它们的共同点是研究黏弹性体在交变应力或交变应变作用下的稳态或非稳态响应,研究有关动态黏弹性能的物理量表述,常用复模量、复柔量和损耗因子(滞后角的正切 $\tan \delta$) 表达,或以能量耗散及其有关参量来描述。

值得注意的是,复模量、复柔量和损耗因子与频率和物性密切相关且受温度影响,而与时间及应力或应变幅值无关,将在 § 2-5 和第八章中详细论述。涉及与应力或应变幅值有关的一些问题,在第九章末及第十一章中有所提及。

1-2-4 温度依赖性

物质的黏弹性力学性能显著地依赖于温度,因而有时需要研究变温黏弹性问题^[1.3, 1.13]。常温下蠕变不明显的材料,在较高温度时产生显著的变形或流动。温度变化很大甚至会改变物质的力学性能,物质呈固体、熔体或流体,随温度而定。

在一定的温度条件下,黏弹性行为的时间相关性相应于物质内部存在一种特征时间。聚合物的特征时间受温度、压力、溶剂浓度等许多因素的影响,其中温度影响最为突出。通常在一定的温度范围内,温度升高会加速蠕变和应力松弛的进程,即提高温度与延长时间有一定的等效性。人们首先在聚合物中发现了一类热流变简单材料,建立了时间-温度