

[英] B. E. READ, G. D. DEAN 著

聚合物和复合材料的 动态性能测试

过梅丽 刘士昕 译



上海科学技术文献出版社

聚合物和复合材料的 动态性能测试

【英】 B.E.Read, G.D.Dean 著

过梅丽 刘士昕译

尚久方校

K922/09
(K622/28)



上海科学技术文献出版社

聚合物和复合材料的动态性能测试

[英] B.E.Rdad G.D.Dean 著

过梅丽 刘士昕 译

尚久方 校

责任编辑 徐翔飞

•

上海科学技术文献出版社出版

(上海市武康路2号)

该书由上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

•

开本 787×1092 1/32 印张 8.25 字数 199,000

1986年11月第1版 1986年11月第1次印刷

印数: 1—2,200

书号: 15192·462 定价: 1.70元

《科技新书目》124—210

内 容 提 要

本书介绍了用于聚合物和复合材料动态力学测试的四大类技术,对于仪器结构和测试原理,数据分析和误差来源及其校正方法都作了详细而系统的论述,并对各类测试技术的精度、局限性及对不同材料的适用性作了全面的评述。

本书可供从事高分子材料教学、科研、生产的科技人员阅读,也可作为高等院校有关专业本科生和研究生的参考书。



译者前言

聚合物材料和复合材料自问世以来,其发展速度之快、应用之广,远远超过人类历史上任何其他材料,它必将在当今世界技术革命的三大支柱之一——材料科学中发挥越来越大的作用。

动态性能测试技术是研究聚合物结构和粘弹性,测定聚合物和复合材料各种力学性能的最简便、最灵敏的手段。六十年代末期以来,国外动态性能测试技术发展极其迅速。最近几年,这项技术也受到国内从事高分子材料各项工作的科技人员的很大重视,然而,迄今为止,国内尚未有一本关于动态性能测试的中文专著(或中译本)问世。

英国国家物理实验室的 G.D.Dean 博士向我们介绍了他和 B.E.Read 合著的《聚合物和复合材料的动态性能测试》一书,现在我们将此书翻译出来,推荐给从事高分子工作的同行们,希冀有助于他们的工作。

本专著对动态力学测试的四大类仪器(强迫非共振、扭摆、声频共振、超声)作了详尽的描述,还系统地介绍了它们的原理、讨论了相应的数据分析和误差来源及其校正方法,论述了它们的精度以及对不同材料的适用性和局限性,并将这项现代测试技术用到高度各向异性的复合材料的研究中去。这些工作在动态性能测试技术领域中有一定的独创性。

参加本书翻译工作的是过梅丽、刘士昕同志,并由尚久方同志校对了全书。在本书翻译过程中,崔盛瑞、邓浩同志曾协助整理了译稿和本书技术名词汉英对照表,在此深表谢意。

译者 1985.9.

原 序

动态力学试验方法已被广泛地用来研究聚合物的结构和粘弹性行为,并用来测定这些材料在各种实际应用中的刚度和阻尼特性。虽然动态试验的基本原理早已建立起来,但是业已发表的评论提到的仅仅是这些试验方法的梗概,并且最初介绍各种动态技术的文章对于这些技术的局限性和精度常常缺乏详尽的指导性意见。由于误差的各种来源并非总是很清楚的,因此用不同的技术或在不同的实验室里获得的数据之间常常出现差异。而且,很少有人致力于将动态技术应用到象纤维增强复合材料这类高度各向异性的材料中去。由于这类复合材料在受力构件中的应用日益增多,因此,精确地表征这些材料刚度的各向异性的方法对于设计尤其重要。

作为研究项目的一部分,NPL*已研制了几种动态试验方法,并用它们来评价聚合物和复合材料的性能与结构。为了保证可以研究各种材料以及在宽阔的频率范围内进行精确的测量,NPL精心地选择和设计了一些动态技术。本专著将综述这些试验方法的原理和用途,描述仪器的设计并讨论数据分析和校正的步骤。本书的许多内容是独创性的,以前尚未发表过。

在导论一章中,对表征各向同性和各向异性材料的动态粘弹性行为的几个名词下了定义,并对动态性能与材料结构的依赖关系,以及在一系列抗振的实际使用中对动态数据的要求作了简要的评论。随后在第二到第七章中逐一讨论了各种动态技术,强调了用来测定特定类型聚合物性能的每一种方法的适用

* NPL——英国国家物理实验室的英文缩写。——译者注

性,并系统地介绍了作为数据分析基础的种种理论,同时考虑了它们在各向异性材料方面的应用。讨论了与理论模型中的近似计算有关以及与附加的外部影响有关的误差来源,并且提出了一些涉及仪器设计和测试步骤的建议,以便尽量减少某些误差来源。书中还提出了校正误差的方法并用所选择的数据加以说明。在最后一章中把用不同测试方法所获得的结果相互联系起来。

本书旨在为有兴趣发展动态测试方法或扩大其范围和提高现有设备精度的读者提供基础性的指南。本书将对高等院校、工业和政府实验室以及科学协会的材料研究工作者有所助益。橡胶、塑料和复合材料的生产者和用户可以从本书中选择有效的动态试验方法来估价他们的材料的结构与性能,以利于产品质量控制和设计。本书尤其可作为研究标准试验方法的标准化组织的一本有用的基本参考书。

必须强调:作者并未打算去全面评述文献中所介绍的或商品生产的各种动态试验设备,因为除了少数情况外,我们对这些商业仪器尚未掌握足够的第一手资料以使我们能作出可靠的评价。然而,本书所介绍的各种动态技术的原理以及所提出的数据分析和校正方法,很容易为现有的各种商品化动态仪器所采用或适应。还应当指出,虽然在书中提到 NPL 装置内各种元件的制造商,但是我们并没有系统地提供所有元件的来源资料,并且书中所提到的某供应厂商未必就意味着它是唯一合适的供货方。

我们要感谢对本书内容作出贡献的几位同事。M.F.Martinson 先生对超声仪的研制工作起了重大作用。J.O.Fenwick 先生,R.L.Jones 先生,D.Dawson 先生和 D.A.Hughes 先生帮助进行了一般的实验工作。A.Woolf 女士为数据分析编了许

多计算机程序。我们还要感谢国家物理实验室的东方设计室和车间帮助我们设计和制造仪器的一些零部件并为本著作准备了插图。最后我们还要感谢 F.J.Lockett 先生, A.F.Johnson 先生, M.F.Markham 先生和 K.Thomas 先生对本书原稿作了补充。

B.E.Read 和 G.D.Dean

目 录

译者前言

原序	(i)
----------	-----

第一章 导论	(1)
---------------------	------------

1.1 初步讨论	(1)
----------------	-----

1.2 各向同性材料动态性能的特征	(3)
-------------------------	-----

1.2.1 弹性模量和柔量	(3)
---------------------	-----

1.2.2 动态粘弹性函数	(7)
---------------------	-----

1.3 各向异性材料动态性能的特征	(14)
-------------------------	------

1.3.1 弹性模量和柔量	(15)
---------------------	------

1.3.2 动态粘弹性函数	(18)
---------------------	------

1.4 动态性能-结构之间的关系	(21)
------------------------	------

1.4.1 玻璃态区域	(22)
-------------------	------

1.4.2 玻璃-橡胶转变区	(23)
----------------------	------

1.4.3 橡胶平台区	(24)
-------------------	------

1.4.4 流动区	(24)
-----------------	------

1.4.5 晶区的转变和取向研究	(25)
------------------------	------

1.4.6 纤维增强聚合物	(25)
---------------------	------

1.5 动态数据设计要求	(26)
--------------------	------

1.5.1 隔振	(26)
----------------	------

1.5.2 动态刚度分析	(28)
--------------------	------

1.5.3 阻尼的应用	(29)
-------------------	------

第二章 强迫非共振法	(32)
-------------------------	-------------

2.1 引言	(32)
--------------	------

2.2	仪器	(34)
2.2.1	试验装置	(35)
2.2.2	拉伸、压缩和剪切性能的测定	(36)
2.2.3	传感器	(39)
2.2.4	数据处理用电子仪器	(41)
2.3	数据分析的校正	(42)
2.3.1	拉伸试验中长度校正的推导	(42)
2.3.2	对试验装置柔度的校正	(44)
2.3.3	对仪器共振的研究	(46)
2.3.4	试样共振的数据分析	(53)
第三章	扭摆	(59)
3.1	引言	(59)
3.2	仪器	(60)
3.3	原理	(64)
3.3.1	本方法的原理	(64)
3.3.2	矩形试样的扭转	(67)
3.4	长度、惯量、粘性阻尼系数和摩擦效应的实验测定	(72)
3.4.1	长度 l 的测定	(72)
3.4.2	惯量 I 的测定	(76)
3.4.3	粘性阻尼系数 η 和存在的摩擦的测定	(76)
3.5	具有附加刚度的扭转	(82)
第四章	声频共振法：概述和仪器说明	(85)
4.1	引言	(85)
4.2	仪器	(88)
4.2.1	固定-自由振动	(88)
4.2.2	自由-自由振动	(91)
4.2.3	电子仪器	(95)

第五章 弯曲共振	(99)
5.1 经典理论	(99)
5.1.1 自由振动	(99)
5.1.2 强迫振动	(105)
5.1.3 理论在各向异性试样中的应用	(107)
5.1.4 误差来源	(108)
5.2 外部因素的影响	(109)
5.2.1 附加质量校正	(109)
5.2.2 夹持误差	(115)
5.2.3 自由-自由振动中的悬挂误差	(118)
5.2.4 空气阻尼	(123)
5.2.5 磁场的影响	(125)
5.3 对转动惯量和剪切形变的校正	(129)
5.3.1 弹性梁	(129)
5.3.2 粘弹性梁	(135)
5.3.3 对有机玻璃的校正举例	(136)
5.3.4 各向异性试样	(138)
5.4 双层梁的弯曲共振	(142)
5.4.1 经典理论	(142)
5.4.2 对剪切形变和转动惯量的校正	(149)
5.4.3 试样的制备和测量	(151)
5.4.4 试验结果举例	(151)
5.5 小结和结论	(154)
第六章 扭转共振和纵向共振	(158)
6.1 扭转的经典理论	(158)
6.1.1 自由振动	(158)
6.1.2 强迫振动	(161)
6.1.3 理论在各向异性试样中的应用	(162)
6.2 外部因素对扭转数据的影响	(164)

6.2.1	附加质量校正	(164)
6.2.2	夹持误差	(167)
6.2.3	其它外部因素	(170)
6.3	对轴向应力和翘曲惯量的校正	(171)
6.4	纵向共振的经典理论	(176)
6.4.1	自由振动	(176)
6.4.2	强迫振动	(177)
6.5	外部因素对纵向数据的影响	(178)
6.5.1	附加质量校正	(178)
6.5.2	其它的外部因素	(179)
6.6	对横向惯量的校正	(179)
第七章	超声浸渍法	(181)
7.1	引言	(181)
7.2	实验	(184)
7.2.1	速度的测量	(184)
7.2.2	衰减的测定	(188)
7.3	本方法的原理	(189)
7.3.1	波在各向异性弹性材料中的传播	(189)
7.3.2	波在各向同性弹性材料中的传播	(195)
7.3.3	在粘弹性材料中的推广	(195)
7.3.4	波的速度和方向的计算	(198)
7.3.5	吸收系数的计算	(199)
7.4	某些例证性实验结果	(201)
7.4.1	实验结果的精度	(201)
7.4.2	各向异性弹性材料的实验结果	(202)
7.4.3	各向同性粘弹性试样的实验结果	(205)
第八章	数据和结论间的关系	(208)
8.1	硬质塑料	(209)

8.1.1 有机玻璃·····	(209)
8.1.2 聚氯乙烯·····	(217)
8.1.3 E828 环氧树脂 ·····	(219)
8.2 高损耗的橡胶 ·····	(220)
8.2.1 NBR-50 丁腈橡胶·····	(220)
8.2.2 PU-I 聚氨酯橡胶 ·····	(224)
8.3 碳纤维增强环氧试样 ·····	(226)
8.4 小结和结论 ·····	(229)
参考文献 ·····	(232)
本书技术名词汉英对照表·····	(236)

第一章 导 论

1.1 初步讨论

未增强和增强聚合物材料的低应变力学行为可用粘弹性来描述。当这些材料受到随时间正弦交变的力作用时，形变响应同样也是正弦变化的。但是，即使作用频率远远低于引起试样共振的频率，形变仍比载荷落后一定的相位角。动态力学性能可以用两个基本量来表征：其一是动态贮能模量，它是衡量材料有效刚度的物理量，正比于每一形变周期中贮存并能恢复的最大能量；另一个量叫做损耗因子或阻尼因子，它正比于每一周期中以热的形式消耗的净能量与最大贮能之比。

基于各种原因，聚合物材料的动态力学性能，特别是在宽广的频率和温度范围内测定的动态力学性能，具有很重要的实际意义。材料的动态力学性能可用来深入地研究材料的各种结构，也为测定聚合物转变温度提供了一种简便的方法。同时，动态力学性能也可能影响材料的其它重要性能，如疲劳、抗冲击性能等。动态力学性能还与系列聚合物的特殊应用，如工程部件的隔震或振动能量的散逸（如降低噪音）有直接的关系。

聚合物动态力学性能的特点是强烈地依赖于频率和温度：随着频率和温度的变化，聚合物可能从刚硬和基本弹性的固态一直变化到柔软和高损耗的类橡胶材料。如果材料是各向同性的，则其动态力学性能取决于形变的类型（如拉伸、剪切、压缩），而对各向异性材料，如取向聚合物或纤维增强聚合物来说，则

1108203

611

不论取哪一种形变类型，它们的动态力学性能还与加载方向有关。因此，为了精确并恰当地测定用于某些特定目的的给定材料的动态力学性能，可能要考虑一系列补充的测试技术。

多年来，已确立了动态测试的原理，并发展了若干种测试方法。但大多数只限于狭窄的频率范围、给定的形变类型，也只适用于某几种材料（如或适合于刚硬的低损耗材料，或适合于柔软的高损耗材料）。这些方法还有一个固有的特点，就是很容易引进较大的误差，其原因部分是受理论数据分析方法的限制，部分是由于偶然的外部因素对所测刚度和损耗的影响。在许多情况下，搞不清误差的来源或数据校正的方法，因而最乐观的估计通常是针对测试结果的总精度来讲的。难怪以不同技术或在不同实验室内测得的数据之间常常出现较大的偏差。由于实际上可采用的频率范围有限，通常是在频率基本不变的条件下测定动态力学性能数据随温度的变化，或者利用频率-温度等效原理来扩展有效频率范围。但频率-温度叠加过程的精确性不大可靠。

为了提高测试技术的功能，使它们能精确地测定各种材料在不同的形变方式下以及宽广的频率内的动态力学性能数据，要讨论的问题很多。许多材料研究工作者如果把测试结果与材料的结构联系起来，在解释中所遇到的困难就会被克服。市售的阻尼材料可以更恰当、更精确地用动态力学性能来表征，因此使结构设计工程师能在吃透材料特性的基础上更经济地应用这些材料。参与建立标准测试方法的标准化组织想必能够对仪器设计和数据处理提出更好的建议。

本专著旨在较详细地描述英国国家物理实验室(NPL)研制的几种测定聚合物和复合材料动态力学性能的方法。这些方法适用于宽广的频率范围(10^{-1} — 10^7 赫兹)、多种形变方式和各种

刚度和损耗范围。注意力将只限于动态应变很小时的线性粘弹性。试样的几何形状主要是矩形截面的条状试样,因为这种试样比较现成,也容易制备。从第二章至第七章,将陆续阐述各种技术。对每一种方法,将要描述测试设备,系统地评价所依据的理论以阐明基本模型中的限制和近似,同时也考虑把这些理论应用到各向异性材料中去。关于误差的外部来源,将要逐个讨论并提出数据校正的方法和步骤,并举例加以说明。在第八章中,将就所选的几种材料,把以不同技术测得的结果关联起来。许多这方面的工作都是独创性的,先前并未发表过。

在这一章中,将讨论表征各向同性材料和各向异性材料动态性能的物理量。为了说明我们的测试方法的依据,准备扼要地回顾和综述一下动态力学性能-结构之间的关系和一系列抗振应用中对动态数据的设计要求。

1.2 各向同性材料动态性能的表征

业已发现,许多聚合物材料的力学行为与测试方向无关,这种材料称为各向同性材料。众所周知的例子有聚合物橡胶和玻璃,它们的结构是无定形的,材料中分子链段无规取向。部分结晶的本体聚合物或短纤维增强塑料,如果其中的晶粒或纤维轴是无规取向的,也是各向同性材料。

1.2.1 弹性模量和柔量

对于线弹性材料,应变分量正比于引起形变的应力分量,与加载的历史或速率无关。在某一类形变下,应力与应变之比定义为弹性模量(刚度),此模量的倒数叫做柔量。当弹性材料受到某一频率(不致引起试样共振)的小振幅谐振应力作用时,所产生的应变应该与应力同相位,能量不以热的形式损耗,应力振幅与应变振幅之比与频率无关,并等于弹性模量。这类动态测

试,与一系列高频共振和波的传播方法一样,可以用来测定弹性材料的模量和柔量^[1]。

在定义某一被测试样内的应力或应变状态时^[2-4],习惯上总是考虑一个无限小的立方体单元,各边分别平行于直角坐标轴 x 、 y 和 z 。垂直地作用于与 x 、 y 和 z 轴垂直的各平面上的应力分量(单位面积上所受的力)分别用 σ_{xx} 、 σ_{yy} 和 σ_{zz} 表示。剪切应力分量表示为 $\sigma_{yx} = \sigma_{xy}$, $\sigma_{zx} = \sigma_{xz}$, $\sigma_{zy} = \sigma_{yz}$, 其中,以 σ_{zx} 为例,它是沿 z 方向作用在与 x 轴垂直的平面上的应力。起始坐标(x 、 y 、 z)中某一点的位移可分解为分别平行于 x 、 y 和 z 轴的三个分量 u 、 v 、 w 。因此,法向应变定义为:

$$\epsilon_{xx} = \partial u / \partial x, \quad \epsilon_{yy} = \partial v / \partial y, \quad \epsilon_{zz} = \partial w / \partial z,$$

而“工程”剪切应变定义为

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = (\partial v / \partial z) + (\partial w / \partial y),$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = (\partial u / \partial z) + (\partial w / \partial x),$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = (\partial u / \partial y) + (\partial v / \partial x).$$

在我们的测试方法中,所用的试样一般都是矩形截面的条状或块状试样,因此可以很方便地把平行于试样长度、宽度和厚度的方向定为 x 、 y 和 z 方向。

如果给定的材料是各向同性的,则只需要用两个弹性模量就足以表征其弹性性能。这两个弹性模量可根据试样发生的两种基本变形方式来定:(a)体积不变而形状改变(切变), (b)形状不变而体积改变。图 1.1(a)示意了所谓的简单剪切试验,其中,两个大小相等方向相反的剪切应力分别作用于试样块相对的两个平面上。剪切应力 σ_{zx} 为单位面积上所受的力,剪切应变 γ_{zx} 等于 $\tan \alpha$ (见图 1.1(a))。根据虎克定律,可近似地获得剪切模量 G :

$$\sigma_{zx} = G \gamma_{zx}. \quad (1.1)$$

• 4 •