

高分子材料力学试验

许凤和 编著

科学出版社

高分子材料力学试验

范风和 编著

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书作者根据多年的实践经验,总结出一套切实可行的高分子材料力学性能测试技术和试验方法,其测试数据准确、可靠,实用性强。

本书主要阐述了高分子材料的力学性能测试原理及其实验技术,包括拉伸、压缩、弯曲、蠕变、疲劳及断裂等试验。此外,还详细分析和介绍了测试高分子材料力学性能的各种试验方法、试验数据及试验设备。

本书可供从事材料科学研究及高分子材料测试技术的科研人员和高等院校有关专业师生参考。

高分子材料力学试验

许 凤 和 编 著

责任编辑 童安齐

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1988年6月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1988年6月第一次印刷 印张: 14 1/4

印数: 0001—2,340 字数: 335,000

ISBN 7-03-000623/FB·20

定价: 4.90 元

序 言

高分子材料是本世纪 30 年代发展起来的新兴材料,近二十年来获得了高速发展,世界各国年增长速度平均为 14% 左右。在美国,高分子材料的产量按体积计算已经超过了钢铁。到 90 年代,工业先进国家将采用塑料作为运输工具的结构材料,其重量将占结构材料总重量的 70~80%。由此可见,高分子材料在国民经济中所占有的重要地位。

高分子材料所以能获得飞速发展,除了资源、生产条件等因素外,还由于这类材料具有优异的性能,而要保证其性能优异则又必须具备完善的测试技术与装备,在用作结构材料方面,力学性能(包括蠕变、疲劳和断裂等)的测试最为重要。鉴于高分子材料的发展历史短,以往在性能测试及实验技术方面几乎是沿用了金属材料的测试原理和方法,而高分子材料有其本身的独特性能,象粘弹性、低耐温性等,所以,建立高分子材料性能测试原理及实验技术,以及制定高分子材料性能测试方法的规范与标准,就是十分需要的了。

当前,我国高分子材料的生产与应用的发展也很迅速,保证材料及制品质量的性能测试与设备亦日益为大家所重视。本书作者从事高分子材料研究工作多年,具有一定的理论水平和实践经验,编著此书必将对我国高分子材料的发展起一定的积极作用。

沈 嗣 堂

前 言

目前,国内、外高分子材料发展很快,特别是用于受力构件的高分子材料,如复合材料、结构胶粘剂、有机玻璃、聚碳酸酯及尼龙等在国防和民用各工业部门都得到了广泛的应用。高分子材料具有许多优异性能,而保持和充分利用这些优异性能,就必须具备先进的测试手段和设备。在高性能材料性能测试中,以力学性能的测试最为重要。

本书从高分子材料的粘弹性和大分子结构基础出发,阐明了高分子材料力学性能试验的目的和意义,论述了高分子材料的大分子结构,详细介绍了高分子材料的静态、动态力学试验(包括拉伸、压缩、弯曲、蠕变和疲劳试验等)以及所用的试验技术、试验方法和试验设备。

在本书的编写过程中,承蒙北京航空材料研究所的副总工程师范棠同志,以及王山根、吴培远、王文芳、秦志敬、林荣火和严子键等同志的热情支持和帮助,北京航空材料研究所的高级工程师沈嗣堂同志审阅了全书,并为此书写了序言。在此,向以上诸同志表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中缺点和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 材料力学试验的目的和意义	1
1.2 高分子材料的发展	2
1.3 高分子材料的粘弹特性	3
1.4 高分子材料的力学特性	4
1.5 试验方法的研究程序	8
参考文献	11
第二章 高分子材料的分子结构	12
2.1 大分子结构	12
2.2 分子链的形态	14
2.3 分子链的排列	20
2.4 常用高分子材料的典型性能和用途	24
参考文献	29
第三章 试验机和形变传感器	30
3.1 试验机的发展情况	30
3.2 万能静动态试验机	36
3.3 电子万能试验机	49
3.4 电液伺服拉压疲劳试验机	55
3.5 硬度计	60
3.6 形变传感器	62
第四章 拉伸和压缩试验	76
4.1 拉伸和压缩试验的概念和意义	76
4.2 拉伸强度	80
4.3 应力-应变曲线	94

4.4	弹性模量	1
4.5	断裂过程和机理	10
4.6	压缩试验	7
	参考文献	19
第五章 弯曲和剪切试验		19
5.1	弯曲试验	1
5.2	剪切试验	1
	参考文献	19
第六章 冲击和硬度试验		19
6.1	冲击试验	19
6.2	硬度试验	19
	参考文献	19
第七章 纤维复合材料力学试验		19
7.1	纤维复合材料的工程常数	19
7.2	纤维复合材料的细观力学	1
7.3	纤维复合材料力学试验方法	2
	参考文献	22
第八章 蠕变试验		25
8.1	蠕变试验的概念和意义	25
8.2	蠕变试验方法	23
8.3	影响蠕变结果的主要因素	24
8.4	蠕变试验结果及其应用	25
	参考文献	25
第九章 疲劳试验		26
9.1	疲劳试验的意义	26
9.2	疲劳的概念、术语和符号	26
9.3	试样	26
9.4	单点试验法	27
9.5	成组试验法	27
9.6	影响 $S-N$ 曲线的几个主要因素	28

9.7 周期形变性能	300
9.8 几种材料的疲劳性能	308
9.9 疲劳断裂过程	313
参考文献	315
第十章 断裂力学	316
10.1 引言	316
10.2 能量平衡方法	317
10.3 应力强度因子方法	320
10.4 试验方法	329
10.5 疲劳裂纹扩展速率	335
参考文献	352
第十一章 断口分析	353
11.1 断口分析的意义	353
11.2 断口分析方法	354
11.3 高分子材料的断口形貌	358
11.4 疲劳断裂的微观机理	387
参考文献	400
附录	402

第一章 绪 论

1.1 材料力学试验的目的和意义

17 世纪由伽利略进行了拉伸、压缩及弯曲试验, 以及由胡克用试验的方法确定了应力与应变之间的线性关系, 从而奠定了材料力学试验基础。如今, 材料力学试验原理和试验技术已有了很大的发展, 这不仅仅局限于静态试验, 而且发展了动态疲劳试验和断裂力学试验。目前国内、外的许多工厂、学校都建立了材料力学试验室, 许多专业人员从事这方面的试验研究工作。尤其是随着电子技术的发展, 电液伺服试验机的出现和电子计算机的应用, 使材料力学试验技术有了突破性的进展, 许多复杂试验可以通过一定的程序控制达到试验目的, 从而对新材料、新工艺的研究及设计思想的改革起到了有力的促进作用。

材料力学试验的目的在于测定材料的强度和刚度等基本力学性能, 利用这些性能数据, 来达到控制材料质量的目的。一种材料要制成零件或构件, 特别是用作结构受力件, 必须要知道其强度和刚度等性能指标, 由此计算出构件能否在使用期内不发生破坏。例如, 无机玻璃用作汽车、火车的窗玻璃, 既明亮又适用, 但用普通的无机玻璃作飞机座舱的玻璃就不行, 因为普通无机玻璃很脆, 在飞行过程中会爆破而发生重大事故。而有机玻璃和聚碳酸酯板材则不仅由于透明性好, 又具有一定强度和韧性, 因此可以完全满足飞机座舱玻璃的使用要求。这些材料的选用无疑要取决于材料力学试验和

其它物理试验。

材料的动态疲劳试验，对预测构件的使用寿命具有重要的意义。材料在各种条件下的疲劳寿命曲线，有时接近构件的使用状态，有时甚至比构件的使用条件更苛刻。从材料的疲劳寿命曲线可以估算构件的使用寿命，这正是疲劳设计思想的基础。材料在存在缺陷、微裂纹等条件下对疲劳寿命的影响及材料抵抗疲劳裂纹扩展的能力等则又是破损安全设计思想的基础。

材料力学试验的第二个目的是验证和发展材料力学的理论。我们知道，材料力学是在材料力学试验的基础上发展起来的，两者密切相关。根据材料力学的理论和定律，经过试验建立了许多试验方法，这些试验方法是指导试验顺利进行的关键。高分子结构材料是一门新兴的学科，有许多特性不同于金属材料。从大量的材料力学试验中，发现了高分子材料既具有弹性又具有粘滞的性质，即具有粘弹性的特点，这就构成了高分子材料力学试验研究的新课题。

1.2 高分子材料的发展

从70年代开始，高分子材料在全世界的发展是十分迅速的，在三大合成高分子材料（塑料、橡胶和纤维）中，以塑料的增长最快。1970年全世界产量约为二千七百万吨，到1980年就增加到五千三百万吨（约增加一倍），估计到1990年将可突破一亿吨。

高分子材料在国民经济建设中起着重要的作用。在各个工业部门，如轻工、化工、机械、电子和钢铁工业等无不应用塑料、橡胶和合成纤维。特别是近年来高分子材料大量用作建筑材料，例如用作门窗、地板、天花板、浴池、各种型材和高级

活动房屋等。由于其具有耐腐蚀、装卸方便的优点,也可用作石油管道、储油罐及排水管等。在农业方面,高分子材料可用作农用薄膜、喷灌机械零件和渔具等。在国防和尖端科学方面,近十多年来发展的耐高温、高强度和高模量材料,以及具有特殊的光、电、磁性的功能高分子材料,在航天、导弹、超音速飞机及核能设备等方面起着重要作用。

高分子材料可分为通用高分子材料和特种功能高分子材料两大类。通用高分子材料不但需求量大而且应用面广,如塑料中的聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯和聚苯乙烯,合成橡胶中的丁苯、顺丁、丁腈及乙丙橡胶,合成纤维中的涤纶、锦纶、腈纶及维纶等都是大量生产的。今后的发展方向将是扩大产量、简化工艺、降低成本和发展新品种。特种耐热高分子和功能高分子材料是近二十多年来发展十分迅速的高分子材料,它们的产量并不很大,可是在应用上都非常重要,如有机硅、有机氟的高分子材料具有耐热和耐化学腐蚀的优异特性,特种纤维中的聚芳酰胺、吡龙,特种橡胶中的硅氟橡胶、氟橡胶等都是国防和尖端科学中不可缺少的重要材料。今后这方面的新品种将会不断出现,这是高分子材料发展中值得重视的一个分枝。

高分子材料的发展将随材料科学和应用基础理论的发展的快慢所决定,而后者又涉及到多种学科。因此高分子材料的发展必须以现代各学科的理论、实验技术和计算方法来充实和提高。

1.3 高分子材料的粘弹特性

高分子材料力学行为的特点是高弹性和粘弹性。理想的弹性材料服从胡克定律,即应力与应变成正比,在给定负荷下

伸长到一定长度,当除去负荷时,又恢复到原来的长度。高分子材料不是理想的弹性材料,因为其除了具有弹性材料的一些特性外,还具有粘性液体的一些特性。通常称高分子材料为粘弹性材料。高分子材料的粘弹性表现在它有突出的力学松弛现象(即力学行为与外力的作用时间有很大关系),同时,温度对其力学性能影响也很大,特别是热塑性材料,温度的变化可以使其呈现三种不同的力学状态,即玻璃态、高弹态和粘流态。在一定的温度下,不同的外力作用速率也能使热塑性材料呈现上述三种不同的力学状态。一般用于结构件的材料是处于玻璃态中,材料的应力-应变关系基本符合胡克定律,即在最初阶段应力与应变成正比。热固性材料和各种纤维复合材料则没有上述三种力学形态的变化,它们的强度和刚度都很高,其比强度和比刚度超过某些金属材料。

由于高分子材料的粘弹特性,在材料力学试验中要特别注意温度和湿度等环境条件对试验结果的影响。一般高分子材料力学性能试验对温度和湿度有严格的规定。另外,对外力作用时间,即试验的拉伸(或压缩)速度都要有明确的规定,从而使试验结果具有重复性和可比性。同时,由于高分子材料是一门新学科,因此有许多问题尚待研究,如材料的成分、结构、成型及加工等对性能的影响,以及粘弹特性与使用的关系等,这些都必须借助高分子材料的力学试验来解决。

1.4 高分子材料的力学特性

材料在外力作用下所表现的力学行为称为材料的力学性能。材料的力学性能与材料本身的成分、结构、工艺条件等诸多因素有关。材料的力学性能数据由试验来确定。此外,试验条件对高分子材料的力学行为也有一定影响。高分子材料

的种类很多,其力学性能相差很大,这就要求在进行高分子材料力学性能测定时,必须结合各种材料的特性,选择适用的材料试验机和形变传感器,才能准确地测出材料的力学性能数据,设计工作者利用这些数据设计出的零件或构件,基本上可以满足使用要求。如果测定的结果不准确,则将对设计、生产和使用带来重大损失。因此,提高高分子材料的测试技术和选择好的试验方法是很重要的。为此,首先应该了解高分子材料力学性能的一些特点。

均质各向同性材料具有简单的力学性能,它对外力的响应应用两个参数就可确定,而各向异性材料(结晶或复合材料)的力学特性,则需要用更多的参数来确定,例如,复合材料层压板一般要用两个以上的参数来表征其力学特性。层板在外力作用下,要产生一定的形变,而由于受力形式不同,产生的形变形式也不同,通常可分为三种基本形变形式,即轴向拉伸(或压缩)、扭转和弯曲。

最简单的一个杆件在外力作用下(图1-1),其单位横截面上所受的应力 σ 为

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.1)$$

式中 F 为外力, A_0 为横截面积。
应变 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.2)$$

式中 ΔL 为伸长增量, L_0 为原长。

对符合胡克定律的材料,弹性模量 E 定义为应力与应变之比,即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1.3)$$

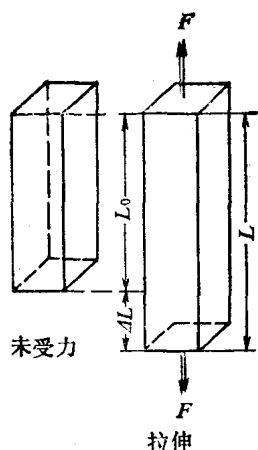


图 1-1 简单杆件的拉伸

材料在受轴向力作用时，一般在轴向方向伸长，而在横向方向收缩。横向与轴向应变之比称为泊松比，以 μ 表示

$$\mu = \frac{-\varepsilon_{\text{横}}}{\varepsilon_{\text{轴}}} \quad (1.4)$$

式中 $\varepsilon_{\text{横}}$ 为横向应变， $\varepsilon_{\text{轴}}$ 为轴向应变。

材料在受剪切力作用时（图1-2），其刚度或剪切模量 G 定义为切应力对切应变之比，即

$$G = \frac{\text{切应力 } \sigma_{\text{切}}}{\text{切应变 } \varepsilon_{\text{切}}} = \frac{F/A}{S/D} = \frac{F}{A \tan \theta} \quad (1.5)$$

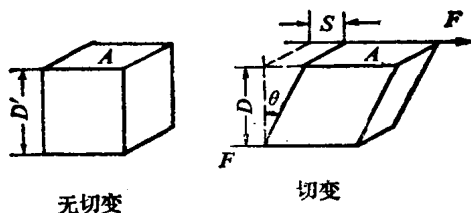


图 1-2 材料的剪切形变

一个矩形梁在扭转下也产生剪切形变，若 L 为长度、 B 为宽度、 D 为厚度、 ϕ 为扭转角度及 T 为转矩，则其切变模量 G 为

$$G = \frac{16LT}{BD^3\gamma\phi} \quad (1.6)$$

式中 γ 为形状因子，与宽度和厚度的比例有关，在表 1-1 中列出。

在各向同性材料中，弹性模量、切变模量和泊松比有如下关系

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (1.7)$$

大多数材料的弹性模量为剪切模量的 2.5~3.0 倍，弹性模量为极限强度的 10 倍或更多。

从上面不难看出，材料的力学特性最基本、最主要的是应

表 1-1 形状因子 γ 的数值

试样的宽与厚之比 (B/D)	形状因子 (γ)	试样的宽与厚之比 (B/D)	形状因子 (γ)
1.00	2.249	4.00	4.493
1.20	2.658	4.50	4.586
1.40	2.990	5.00	4.662
1.60	3.250	6.00	4.773
1.80	3.479	7.00	4.853
2.00	3.659	8.00	4.913
2.25	3.842	10.00	4.997
2.50	3.990	20.00	5.165
2.75	4.111	50.00	5.266
3.00	4.213	100.00	5.300
3.50	4.373	∞	5.333

力和应变以及两者之间的关系。高分子材料的应力-应变特性与金属材料有许多不同之处，主要反映在高分子材料的粘

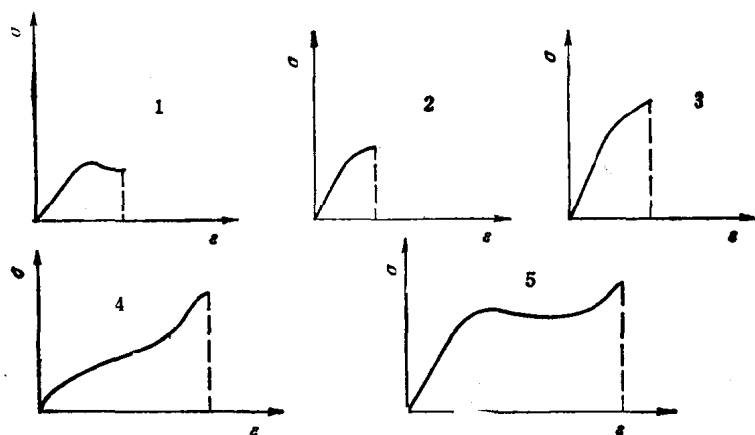


图 1-3 应力-应变曲线的五种类型

1. 软而弱, 2. 硬而脆, 3. 硬而强, 4. 软而韧, 5. 硬而韧

弹性特性符合胡克定律的范围小,并与温度和应变速率有关.就高分子材料而言,应力-应变曲线的种类是很多的,Carswell和Nason把测得的高分子材料应力-应变曲线分为五类,如图1-3所示.

软而弱的材料不能用于结构受力件,因为这类材料的强度和刚度都很低.聚碳酸酯和定向有机玻璃等材料,不仅具有一定的强度而且韧性好,它们的相对伸长率在20%左右,高的可达100%,并且冲击韧性和断裂韧性都很高.未定向的有机玻璃在室温下属于脆性材料,相对伸长率在2%左右.玻璃纤维增强复合材料和碳纤维增强复合材料,它们的强度和刚度都很高,韧性也很好,可以制成各种形状的结构受力件,是非常有前途的结构材料.当然这种材料也存在缺点,即层间剪切强度低.

1.5 试验方法的研究程序

为了进行材料力学试验,必须建立试验方法.试验方法来源于试验,又用于指导试验.在新材料、新工艺的研制中,需了解材料在各种应力作用下的性质,以便对材料和工艺质量进行正确的评价.在材料性能研究中,需了解各种试验条件对材料性能的影响,从而逐步形成材料的某些基础的试验方法.

1.5.1 试验方法的原理、用途和范围

研究一种新的试验方法要以材料力学的理论为基础,没有这个理论指导,试验方法是不能使用的,并且试验方法的用途和范围也不能超出这个理论所指出的范围.例如纤维复合材料的应力-应变曲线类似1.4节图1-3中的3,而有些碳纤

维复合材料的应力-应变曲线直到断裂时也没有屈服点(见图1-4)。这样,我们在制定弹性模量测试方法时,应力范围可以很大,甚至在很高应力下也能够准确地测出弹性模量值。另外一些材料,例如聚甲基丙烯酸甲酯和聚苯乙烯等,在极限强度的60~70%以上,应力和应变不成正比,因此,测定其弹性模量时的应力不能超过极限强度的60~70%。

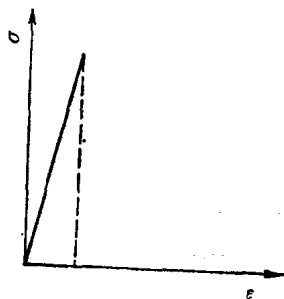


图1-4 碳纤维复合材料的应力-应变曲线

在疲劳试验中,加载频率对试验结果影响较大,而且对不同材料影响也不相同。热塑性材料疲劳加载频率不能过高,而热固性材料或纤维复合材料则可以很高。所以,要结合材料的力学特性,通过试验来确定各种材料的试验条件。目前国内外均把热塑性、热固定和复合材料分开,分别制定专用的试验方法。

1.5.2 试样形状的选择

试样形状应符合试验目的和便于测量的要求。对于拉伸试样,第一要使其断裂在有效部位(即工作段),第二要便于测量应力与应变。目前高分子材料板材拉伸试样大都采用哑铃形试样,复合材料采用长条形试样。有些材料试样的宽度和厚度对试验结果有一定的影响,因而对试样的宽度和厚度在比例上要有一定要求。压缩试样与高度也有一定关系。因此,在设计试样形状和尺寸时,应结合试验要求和材料本身特点来确定试样形状。此外,对试样的机械加工和光洁度都应有明确规定。加工时进刀速度和进刀量都应控制在使试样不产生过热现象的范围内。