

文章编号: 1001-4888(2017)02-0179-10

一种动光弹模型材料的制作方法及其应用^{*}

岳中文, 王煦, 杨仁树, 邱鹏, 胡庆文, 陈程

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于#618 环氧树脂、甲基六氢苯酐、促进剂 DMP-30、环氧树脂消泡剂四种原料, 提出制作光弹性模型的新配方和新方法, 并利用单轴压缩实验、电测法和动态光弹法分别测定了制作的光弹模型的动态力学参数。新方法工艺简单, 制作周期短, 对人体无害。制作的光弹模型初始应力小, 表面光洁, 质地均匀, 透光性好, 光学灵敏度高, 具有良好的机械加工和切削性能。通过三点弯曲梁冲击实验, 得到了清晰的光弹等差条纹图像, 验证了该配方和方法制作的模型可以应用于动态光弹性实验。

关键词: 动光弹实验; 环氧树脂; 光弹性模型; 三点弯曲梁

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-148

0 引言

光弹性方法是解决复杂二维、三维工程结构应力分析的一种有效实验方法^[1-3], 长期以来一直被学术界和工程界所重视^[4]。近几年, 光弹性方法在航空航天工业、机械和土木工程领域、生物和医学领域的应用日益增多, 为强度分析、优化结构设计和寻找破坏根源起了重要作用。此外, 光弹性实验在验证理论分析中也有重要的应用价值。

光弹性现象在 1816 年就被发现, 然而直到 20 世纪 30 年代才被广泛应用于解决实际工程问题, 其主要原因是缺乏合适的光弹性模型材料。很多科研工作者曾使用酚醛树脂、丙苯树脂、聚碳酸酯、丙烯酸树脂和聚酯树脂等材料作为光弹性模型材料, 但实验效果均不够理想。直到 1951 年, 出现了以环氧树脂为基的新型光弹性材料。环氧树脂的常见型号有#616、#618、#6101、#634 等。李斌等^[5,6]经过大量实验表明, 采用环氧树脂#618 制作光弹性模型进行动态光弹性实验, 能够取得较好的效果。目前已有一些学者总结出几种制作环氧树脂模型的配方。佟景伟等^[7]用#618 环氧树脂、固化剂二乙烯三胺、增塑剂邻苯二甲酸二丁酯在常温固化条件下制作光弹模型。方如华等^[8]用#618 环氧树脂、固化剂 593 在 18℃ 低温固化条件下浇筑光弹模型, 丁懿^[9]、倪凡^[10]运用这一浇筑方法制作光弹模型, 在工程问题中取得了一些有价值的成果。佟景伟等^[7]用#618 环氧树脂、固化剂顺丁烯二酸酐、增塑剂邻苯二甲酸二丁酯在 105℃ 高温固化条件下制作光弹性模型, 许多科研工作者运用这一制作方法在生物力学、土木、地质等领域取得了一定成果^[11-14]。按照上述配方制作的光弹模型应用于光弹性实验中已取得了很多有价值的成果, 但这些配方具有制作工艺复杂、步骤繁琐、固化周期长、环氧树脂与固化剂混合时反应速度过快或过慢等缺点。尤其是使用顺丁烯二酸酐、邻苯二甲酸二丁酯与环氧树脂配制混合液制作模型时, 在混合搅拌过程中会产生具有强烈刺激性气味的有毒气体, 对人体危害极大。这些问题都大大增加了光弹性实验的复杂性和难度, 影响了光弹性实验的进行。光弹模型的制造是光弹实验的第一个工序,

^{*} 收稿日期: 2016-08-14; 修回日期: 2016-10-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51374210)资助

通讯作者: 岳中文(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究领域: 动态断裂力学。Email: zwyue75@163.com

模型质量的好坏直接关系到实验的成败和实验结果的精度。为克服上述缺点,本文提出一种浇筑环氧树脂模型的新配方和新方法,简化和改进了光弹性模型的制作工艺,而且制作过程中不会产生有毒气体。本文以制作环氧树脂平板模型为例详细介绍模型的制作方法及应用。

1 光弹性模型材料制作新方法

1.1 制作模具

选取两块尺寸相同的玻璃板、一个 U 型有机玻璃隔条,玻璃板和 U 型有机玻璃隔条的尺寸可根据实验所需模型的尺寸确定。将玻璃板清洗干净,用医用脱脂棉蘸酒精或丙酮擦拭玻璃表面,将玻璃表面擦到光滑明亮平整如镜面。将 JD-909A 脱模剂均匀喷在玻璃板一个表面,用无尘擦拭布沿同一方向缓慢擦拭玻璃表面,将脱模剂涂抹均匀,使玻璃表面达到光亮平整如喷脱模剂前的样子,否则会影响制得的光弹模型表面的平整度。待脱模剂晾干后,用两块玻璃板夹住有机玻璃隔条,有脱模剂的一面朝内,无脱模剂的一面朝外,用夹持板把两块玻璃板和有机玻璃隔条固定在一起,如图 1 所示。在 U 型有机玻璃隔条的外侧(即模具的左侧、右侧和下侧)涂 704 密封胶,使有机玻璃隔条和玻璃板紧密粘在一起。704 密封胶凝固后,把夹持板去掉即可。本文中制作的平板形状模型采用有机玻璃隔条、玻璃板等常规材料制作模具即可。若制作的模型结构复杂,如三维模型等,可根据实验需要使用硅橡胶、石蜡、石膏等材料制作不同形状的模具。

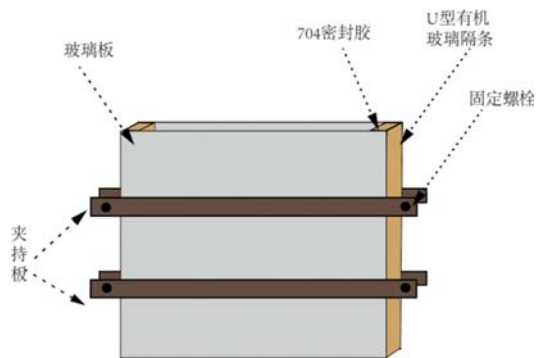


图 1 夹持板固定后的模具

Fig. 1 Schematic of mold fixed by clamping plate

固化反应过程过于剧烈,不易控制反应进度,因此在本实验中不宜将其作为固化剂使用,只是加入少量作为促进剂,达到适度加快固化过程的效果,否则会导致混合液固化时间过长,大大延长模型的制作周期,从而影响后期的实验进度。经过大量实验证明,将 #618 环氧树脂、甲基六氢苯酐、促进剂 DMP-30 和环氧树脂消泡剂按照 250 : 95 : 50 : 1 的质量比配制混合液制得的模型最好。

配制混合液的具体步骤如下:

先称量适量环氧树脂。环氧树脂在常温下流动性差,因此称量好的环氧树脂中充满气泡,需要将气泡排出才可进行下一步骤。去除气泡的方法是将环氧树脂放入烤箱加热,加热温度为 80°C ,加热时间为 2 小时。随着温度升高,环氧树脂流动性逐渐增大,环氧树脂中的气泡会自然逸出。再称量适量甲基六氢苯酐、促进剂 DMP-30 和消泡剂,把甲基六氢苯酐和消泡剂倒入环氧树脂中,把三种原料组成的混合液放入水浴恒温搅拌器中搅拌,搅拌时间为 1.5 小时,水浴温度为 80°C 。混合液搅拌时间过长,会导致混合液在搅拌过程中已经开始固化;混合液搅拌时间过短,则混合液中的各种试剂无法充分反应。在混合液搅拌过程中,用胶头滴管将称量好的促进剂 DMP-30 缓慢滴入混合液中。由于促进剂 DMP-30 与环氧树脂的反应过于迅速、剧烈,若把促进剂 DMP-30 直接倒入混合液,DMP-30 还未与混合液充分混合,就已经与其发生反应,形成大量固体沉淀物,导致混合液无法使用,因此只能将促进剂 DMP-30 逐滴滴入混合液。

混合液搅拌完毕后,按图 2 所示方式浇筑模型。把搅拌好的混合液缓慢倒入漏斗,混合液经漏斗和橡胶软管缓慢流入模具。为了避免倒入模具的混合液中产生气泡,橡胶软管的下端要伸到模具底部。

1.2 配制混合液并浇筑模型

制作环氧树脂模型所需原料为 #618 环氧树脂、甲基六氢苯酐、促进剂 DMP-30 和环氧树脂消泡剂。其中,甲基六氢苯酐是固化剂,用量过少会延长混合液的固化进程;用量过多会降低模型的光学性能。因为光弹性实验是利用环氧树脂具有的双折射现象来反映模型中的应力分布情况,对应力场进行分析从而得出实验结论。若混合液中其他物质比例过大,环氧树脂比例过小,必然会影响模型的双折射效应。同理,混合液中消泡剂也不宜用量过多。DMP-30 是一种强烈的固化剂,其

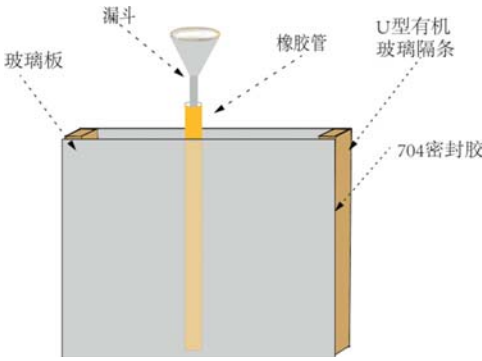


图 2 浇筑过程示意图

Fig. 2 Schematic of process of pouring

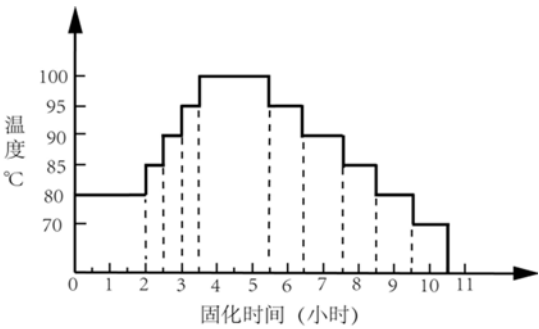


图 3 固化过程温度图

Fig. 3 Temperature map of the curing process

1.3 模型固化与褪火

浇筑完毕后,把模具放入烤箱加热,使混合液固化,固化过程的温度设置如图 3 所示。在 80 $^{\circ}\text{C}$ 时,混合液已达到固化反应温度,开始逐渐固化,只是在此温度下反应十分缓慢。100 $^{\circ}\text{C}$ 是混合液的最佳反应温度,固化过程较快。但若将固化温度直接设置为 100 $^{\circ}\text{C}$,混合液从搅拌时的 80 $^{\circ}\text{C}$ 迅速升高到 100 $^{\circ}\text{C}$,骤然的温度变化会使模型在固化过程中留下较大的内部残余应力,从而影响光弹性实验效果。因此固化过程的温度设置应从 80 $^{\circ}\text{C}$ 起按照一定梯度升高到 100 $^{\circ}\text{C}$ 。模型在 100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下完全固化后,把温度从 100 $^{\circ}\text{C}$ 逐渐降低。模型固化后,固体模型在温度发生变化的条件下极易产生细微变形,因此降温设置的温度变化梯度应比升温时更缓慢,避免模型在降温过程中产生较大内部应力或细微变形。固化过程结束后,把模具从烤箱中取出,立即拆下模具即可得到成型环氧树脂平板模型。

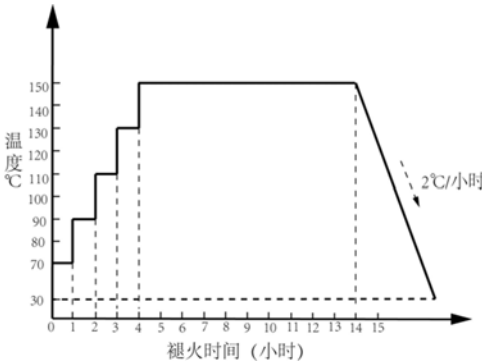


图 4 褪火过程温度图

Fig. 4 Temperature map of the annealing process



图 5 褪火后的模型照片

Fig. 5 Picture of model after annealing

接着要对模型进行褪火,以消除模型内部微小的残余应力。取一块略大于环氧树脂板模型的玻璃板,依次用清水和蘸有酒精的医用脱脂棉把玻璃表面清洗、擦拭干净。在玻璃板表面均匀刷一层机油,把环氧树脂平板模型平放在玻璃板上,此时模型和玻璃板之间会形成一层薄薄的油膜,然后将其放入烤箱进行褪火。褪火过程的温度设置如图 4 所示。若褪火开始时直接将温度设置为 150 $^{\circ}\text{C}$,模型由于温度骤然升高,会产生轻微变形,因此需要使温度按一定梯度升高到 150 $^{\circ}\text{C}$ 。模型在各个表面都不受约束的条件下,在 150 $^{\circ}\text{C}$ 时会逐渐变软却不变形。模型在该温度下经过足够长的时间,可以将其内部的残余应力逐渐释放。接着以十分缓慢的速度让模型渐渐冷却,使模型在冷却过程中不再产生超过误差允许范围的内部应力。褪火后的平板模型如图 5 所示。

2 光弹性材料动态力学性能测试

在动态光弹性实验中,应力、应变的计算以及主应力的分离都要用到光弹性材料的动态性能参数,

所以,对光弹性材料动态性能参数的测定是动态光弹性研究中不可或缺的组成部分。采用单轴压缩实验、电测法、动态光弹法等方法分别测定了环氧树脂材料的基本力学参数。

2.1 实验设备及试件

本次实验使用的设备有动态光弹性实验系统、声波发送接收组合探头、超动态应变仪、静态加载光弹性实验系统。试件共有三种,依次为立杆试件(宽 40mm×厚 10mm×高 280mm)、圆柱试件(直径 50mm×高度 100mm)和圆盘试件(直径 50mm×厚度 8mm)。

2.2 材料力学参数测试

(1) 测量材料密度 ρ

已知立杆试件的尺寸为 40mm×10mm×280mm,用电子天平称出试件的质量 $m=140.62\text{g}$,即可根据公式

$$\rho = m/v \quad (1)$$

得出试件的密度(式中 v 代表试件的体积)。文中测得试件密度 $\rho=1255\text{kg/m}^3$ 。

(2) 测量一维杆应力波波速 C

立杆试件可近似看作一维杆,利用落锤冲击立杆顶端,对其施加冲击荷载,用超动态应变仪记录应变片两端电压随时间的变化曲线,即可测出试件上不同测点处发生应变的时间,从而得到应力波在一维杆中的传播速度 $C=1875\text{m/s}$ 。

(3) 测量动态弹性模量 E_d

根据一维杆中应力波的传播理论

$$C = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (2)$$

可知

$$E_d = \rho C^2 \quad (3)$$

将上文测得的材料密度 ρ 和波速 C 代入式(3)可以算出 $E_d=4412\text{MPa}$ 。

(4) 测量动态泊松比 ν

可以利用超动态应变仪测得环氧树脂材料的动态泊松比 $\nu=0.34$ 。

(5) 测定材料动态条纹值 $f_{\alpha d}$

材料的条纹值由光源的波长 λ 和应力—光学常数 c 共同决定,与模型的尺寸、形状无关。

由二维应力—光学定律可知:

$$\sigma_1(t) - \sigma_2(t) = \frac{N(t)}{d} f_{\alpha d} \quad (4)$$

本文采用一维杆试件测定材料的动态条纹值 $f_{\alpha d}$ 。一维杆在冲击荷载作用下, $\sigma_1=0$, $\sigma_2=-\sigma$,代入式(4)可得:

$$\sigma(t) = \frac{N(t)}{d} f_{\alpha d} \quad (5)$$

根据一维弹性理论有

$$\sigma(t) = E_d \epsilon(t) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得

$$f_{\alpha d} = \frac{E_d \epsilon(t) d}{N(t)} \quad (7)$$

由此可见,只要同时测出某一点的纵向应变 $\epsilon(t)$ 和条纹级数 $N(t)$ 即可得到 $f_{\alpha d}$ 。本文测量立杆试件应变片 R 处截面的纵向应变 $\epsilon(t)$ 和条纹级数 $N(t)$,经过计算得到光弹性材料的动态应力条纹值 $f_{\alpha d}=1.85 \times 10^4 \text{N}/(\text{m} \cdot \text{级})$ 。

(6) 测定材料静态条纹值 f_{σ}

由弹性力学理论可知,径向受压圆盘圆心处主应力值为:

$$\sigma_1 = \frac{2P}{\pi dD}, \sigma_2 = -\frac{6P}{\pi dD}$$

式中, d 为圆盘试件厚度; D 为圆盘试件直径; P 为圆盘试件承受的荷载。

将式(8)代入式(4)可得

$$f_{\sigma} = \frac{8P}{n\pi D}$$

利用静态加载装置对圆盘试件施加径向荷载,用 Tardy 补偿法测取圆盘试件中心点的条纹级数 n , 读取此时压力传感器的示数 P ,代入式(9)即可得到材料的静态条纹值 $f_{\sigma}=1.66\times10^4\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{级})$ 。

(7) 横波波速与纵波波速测定

利用声波发送接收组合探头测定材料的横波波速与纵波波速。在圆柱形试件上下底面均匀涂上蜂蜜,防止探头在试件表面滑动。涂匀蜂蜜后,将声波发送、接收探头分别放在试件上下两侧,控制声波发送探头分别发送 P 波及 S 波,即可测定试件的横波波速 v_s 与纵波波速 v_p 。图 6 为波速测定结果,由图中可知 $v_p=2347\text{ m/s}$, $v_s=1468\text{ m/s}$ 。

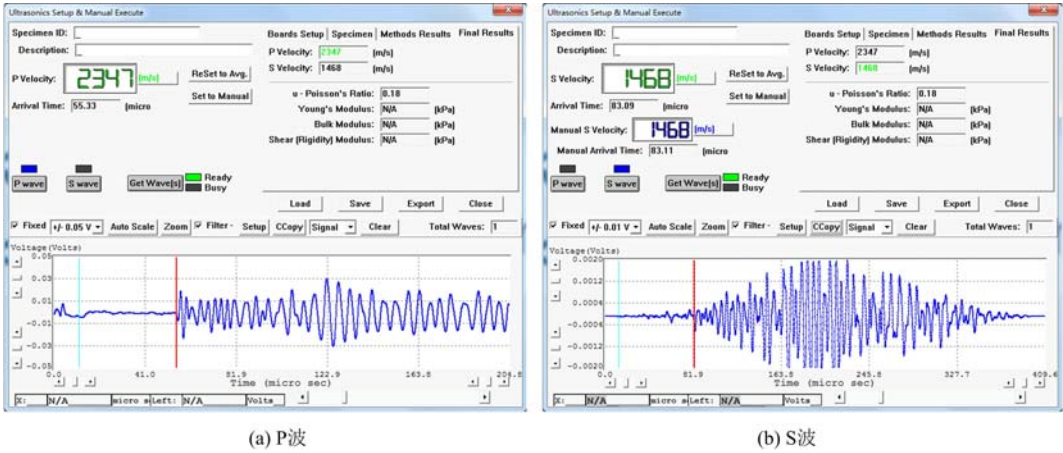


图 6 纵波、横波波速测定结果

Fig. 6 Measurement results of the wave velocity of P wave and S wave

综上所述,按照文中所述配方和方法制作的光弹模型动态力学参数见表 1 所示。

表 1 光弹模型基本力学参数表

Tab. 1 The basic mechanical parameters of photoelastic model

动态力学参数	密度 ρ (kg/m^3)	波速 C (m/s)	弹性模量 E_d (MPa)	泊松比 ν	动态条纹值 $f_{\sigma d}$ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{级}^{-1}$)	纵波波速 v_p (m/s)	横波波速 v_s (m/s)	静态条纹值 f_{σ} ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{级}^{-1}$)
数值	1255	1875	4412	0.34	1.85×10^4	2347	1468	1.66×10^4

3 光弹性模型的应用

3.1 实验设备及试件

实验使用的设备为动态光弹性实验系统,如图 7 所示。采用落锤冲击三点弯曲梁实验验证制作的光弹模型的实验效果。光弹模型的规格为 $220\text{ mm}\times50\text{ mm}\times10\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚),数量为 5 个,如图 8 所示。在试件下边缘中间,预制一条竖直裂纹垂直于试件边缘,其长度为 5 mm ,宽度为 0.3 mm 。支撑试件的两支座间距为 190 mm ,落锤质量为 0.82 kg ,落锤冲击试件时的速度为 2.55 m/s ,试件受冲击位置为三点弯曲梁的跨中位置。光源使用 532 nm 波长的泵浦绿光激光器,光场调为暗场。使用高速数字照相机记录实验过程中三点弯曲试件的等差条纹变化情况,实验时将高速数字照相机的拍摄速度设置为 10^5 fps ,快门设置为 $1/100000\text{ sec}$ 。拍摄的照片分辨率为 320×192 ,照片像素与实际长度比例为 $0.3275\text{ mm}/\text{pixel}$ 。试件模型及落锤加载位置示意图如图 8 所示。由于实验设备的限制,高速相机拍摄的视场

范围为图 8 中虚线方框所示区域,并未记录到整个试件全场的等差条纹图。通过 5 个试件所得的光弹条纹图片及测量的实验数据基本一致,由于篇幅限制,仅针对其中一个试件的光弹条纹图及相应的实验数据进行讨论。

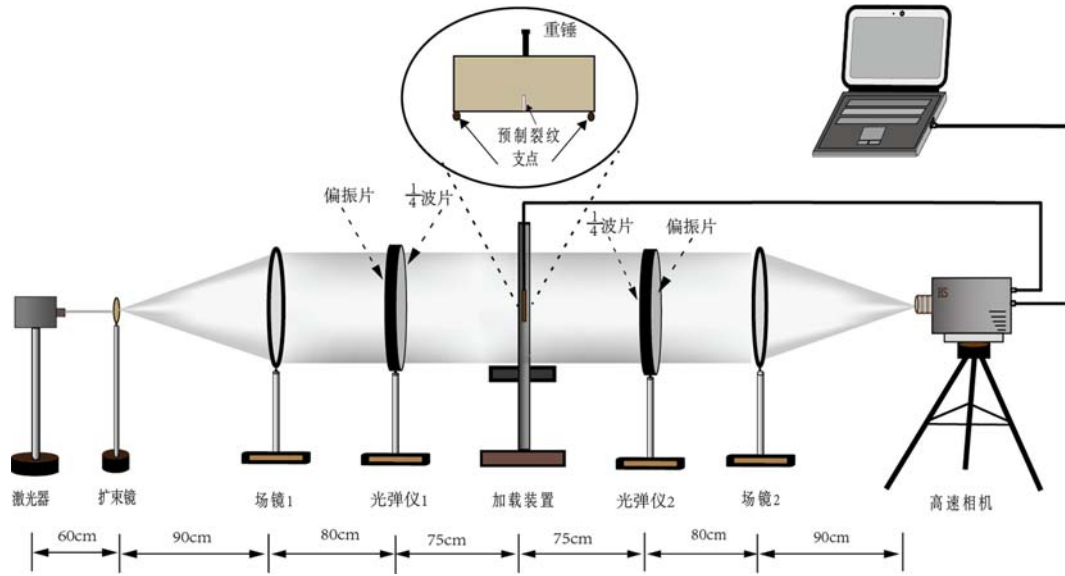


图 7 动态光弹性实验系统

Fig. 7 Picture of dynamic photoelasticity experimental system

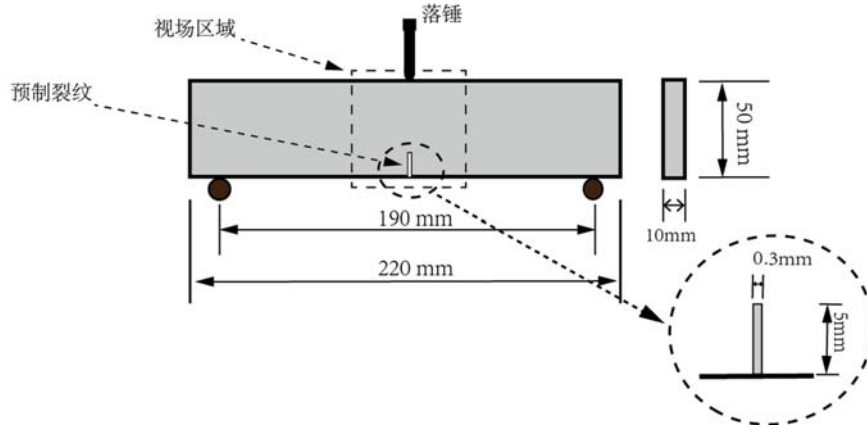


图 8 试件模型及加载位置示意图

Fig. 8 Schematic of specimen and loading position

3.2 利用光弹性数据确定裂纹尖端应力强度因子的方法

裂纹尖端荷载的基本形式共有三种,即拉伸荷载(I型)、面内剪切荷载(II型)、离面剪切荷载(III型)。裂纹尖端承受混合型荷载时,可表示为:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) + \sigma_{\infty} \quad (10)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (12)$$

又由于

$$\tau_m^2 = \frac{(\sigma_y - \sigma_x)^2}{4} + \tau_{xy}^2 \quad (13)$$

将式(10)(11)(12)代入式(13)中,可得裂纹尖端附近等差条纹图的关系式:

$$\frac{8\pi r \tau_m^2}{K_I} = \sin^2 \theta + m^2(4 - \sin \theta) + 2m \left[\sin 2\theta - \sigma_{\infty} \sqrt{2\pi r} \left(2\sin \frac{\theta}{2} + \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2} \right) \right] + \sigma_{\infty}^2 2\pi r - 2\sigma_{\infty} \sqrt{2\pi r} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2} \quad (14)$$

式中 $m = K_{II} / K_I$ 。

式(14)中共有三个变量 K_I 、 K_{II} 和 σ_{∞} 用来对混合型裂纹尖端的等差条纹图形进行分类, Dally 和 Rossmanith 都计算出了具体分类方案^[15,16]。混合型等差条纹图最为突出的一个特征是裂纹尖端条纹具有不对称性。对于 II 型裂纹, 混合模式指数 $m^{-1} \rightarrow 0$, 裂尖条纹图仍为对称图形。当混合模式指数 m 从 0 增加到 0.1 时, 裂纹尖端的等差条纹图形即逐步转变为非对称图形。

Irwin 针对 I 型裂纹给出了确定裂尖动态应力强度因子 K 值的一种简单的工程方法^[17], 如图 9 所示, 在图中 A1 和 A2 点上, $\partial \tau_m / \partial \theta = 0$, 根据距离 r_{mj} 和倾角 θ_{mj} 即可确定裂纹尖端的应力强度因子 K_I 和 K_{II} 以及应力场参数 σ_{∞} 。对于 A1、A2 中的任何一个点而言, 满足

$$\frac{\partial \tau}{\partial \theta}(\theta = \theta_{mj}; r = r_{mj}) = 0 \quad (15)$$

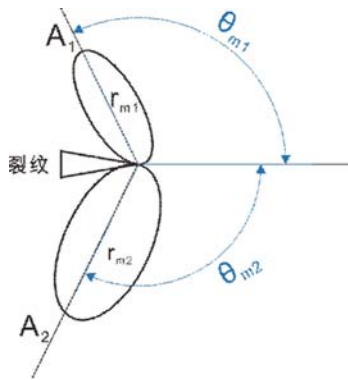


图9 裂纹尖端等差条纹图形示意图

Fig. 9 Geometrical configuration of asymmetric isochromatic crack-tip fringe loops

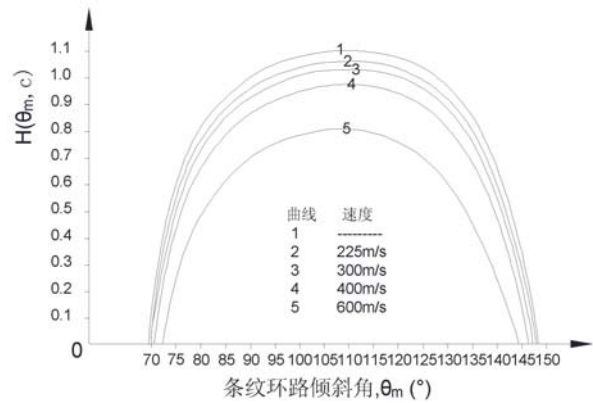


图10 $H(\theta_m, c)$ 与倾角 θ_m 的关系图

Fig. 10 Normalized stress intensity factor $H(\theta_m, c)$ versus fringe loop tilt angle θ_m

由式(15)可以得到一个关于 σ_{∞} 的关系式作为混合模式指数 m 的一个函数。对于点 A1、A2 而言, 即 $j=1$ 和 $j=2$ 时, σ_{∞} 是相同的, 因此可以得到一个关于混合模式指数 m 的三元方程, 该三元方程的解为:

$$K_{II} = mK_I, \quad m = H_m(r_{m1}, r_{m2}; \theta_{m1}, \theta_{m2}) \quad (16)$$

式中, H_m 为四个几何参数的函数。对于 I 型裂纹, 函数 H_m 与 θ_m 的关系可用图 10 表示。因此, I 型裂纹尖端的应力强度因子 K_I 可以表示为:

$$K_I = (Nf_\sigma/h) \sqrt{2\pi r_m} H(\theta_m) \quad (17)$$

式中, N 为条纹级数; f_σ 为条纹值; h 为试件厚度值。对于运动裂纹尖端的动态应力强度因子, 式(17)可以引入裂纹扩展速度 c 并表示为:

$$K_I^d = (Nf_\sigma/h) \sqrt{2\pi r_m} H(\theta_m, c) \quad (18)$$

3.3 实验结果

图 11 为三点弯曲梁在冲击荷载下内部等差条纹变化的系列图片。试件的等差条纹变化过程清楚地反映了三点弯曲梁在冲击荷载作用下的应力变化情况。图 11(a) 为落锤击中试件时 (即 $t=0\mu s$) 的照片。从图中可以看出制作的模型质地均匀, 表面平整, 基本无残余应力。 $t=0\mu s$ 时, 落锤击中试件的跨中部位, 能量以应力波的形式由落锤击中试件处向下传播。此后, 试件中的等差条纹逐渐密集, 说明试件内部的应力呈逐渐上升趋势。试件起裂后, 条纹主要集中在试件上部未起裂部分, 说明应力主要集中在

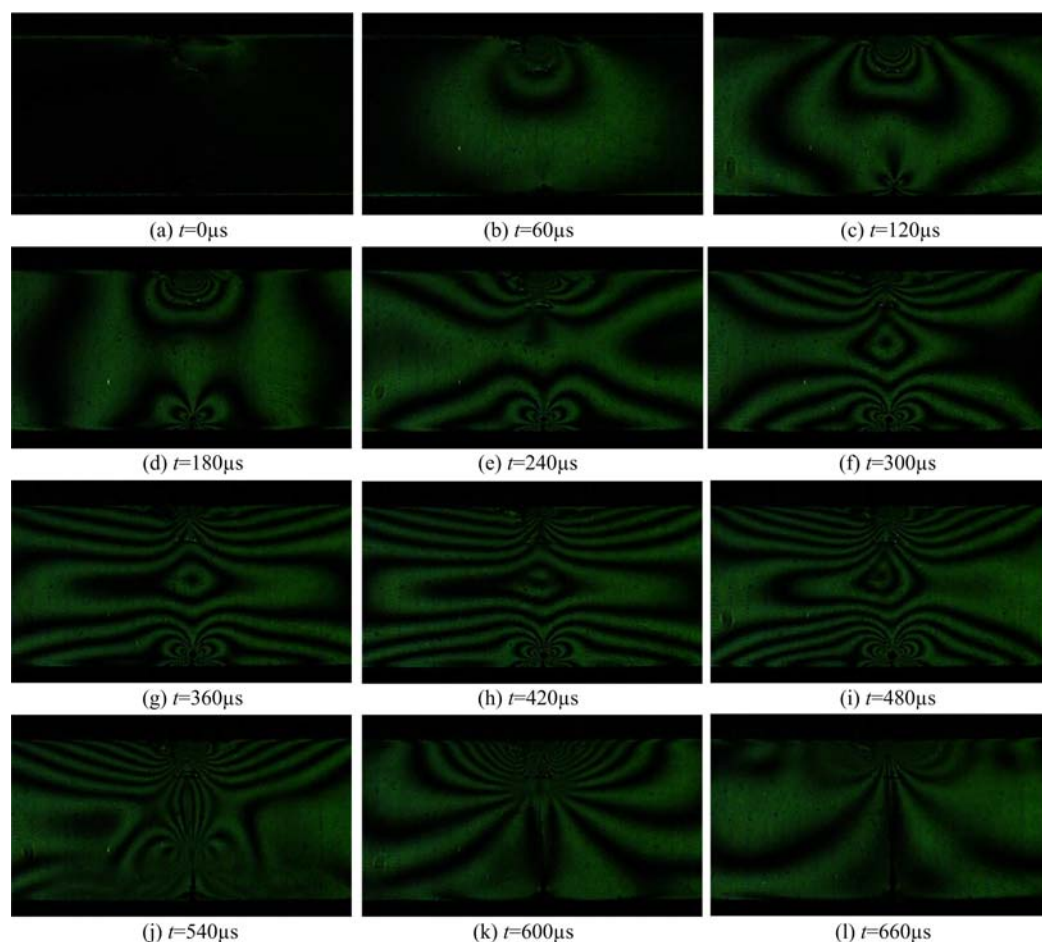


图 11 三点弯曲梁等差条纹图

Fig. 11 Picture of isochromatic fringes of three-point bending

在这一部分。在裂纹扩展后期,等差条纹数量逐渐减少。在整个断裂过程中,裂纹基本沿直线向上扩展,试件内部的应力呈左右对称的状态分布。三点弯曲梁断裂过程的等差条纹变化系列图像的等差条纹分布情况及变化规律与 Bonenberger^[18,19]、Karalekas^[20]等学者所得实验结果基本一致。图 11 中裂纹尖端附近区域有焦散斑出现,不利于动态法测量。焦散斑的出现是由于高速相机镜头对焦误差导致的。若镜头焦平面与试件没有完全重合,所得图片中裂纹尖端区域会出现焦散斑。在调试光弹系统光路时,只需保证镜头焦平面与试件完全重合,即可避免焦散斑的出现。

图 12 为三点弯曲梁裂纹扩展速度随时间的变化图。由图 12 可见, $t=0\mu\text{s}$ 到 $t=510\mu\text{s}$ 时间段,试件始终未起裂。试件起裂后,裂纹扩展速度先迅速上升,在 $t=520\mu\text{s}$ 时,裂纹扩展速度为 279.297m/s ,在 $t=530\mu\text{s}$ 时,裂纹扩展速度为 440.104m/s ,此时速度达到最大值。在 $t=540\mu\text{s}$ 到 $t=610\mu\text{s}$ 时间段,裂纹扩展速度始终保持在 295m/s 至 410m/s 之间,基本保持匀速扩展,平均速度为 357.585m/s 。 $t=620\mu\text{s}$ 时,裂纹扩展速度开始下降, $t=630\mu\text{s}$ 时裂纹扩展速度达到最小值 42.318m/s 。随后,裂纹扩展速度又震荡上升,直到试件完全开裂。

图 13 为三点弯曲梁裂纹尖端动态应力强度因子随时间的变化图。由图 13 可知, $t=0\mu\text{s}$ 到 $t=520\mu\text{s}$ 为第一阶段,此阶段试件没有起裂; $t=520\mu\text{s}$ 到 $t=690\mu\text{s}$ 为第二阶段,此阶段为试件起裂、扩展阶段。 $t=0\mu\text{s}$ 时,落锤击中试件跨中部位,应力波向试件底部传播。 $t=80\mu\text{s}$ 时,试件底部预制裂纹尖端开始产生应力集中,此时预制裂纹尖端应力强度因子为 $0.222\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 。 $t=80\mu\text{s}$ 后,由于应力波的作用,预制裂纹尖端的应力强度因子开始震荡增大。在 $t=510\mu\text{s}$ 时,应力强度因子达到最大值 $2.278\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$,试件起裂。试件起裂后,裂纹尖端动态应力强度因子呈震荡下降的趋势,直到试件完全断裂。这是因为起裂是一种失稳现象,集中在裂纹尖端区域的应力由于开裂而释放,裂纹尖端的应力

强度因子随之下降。

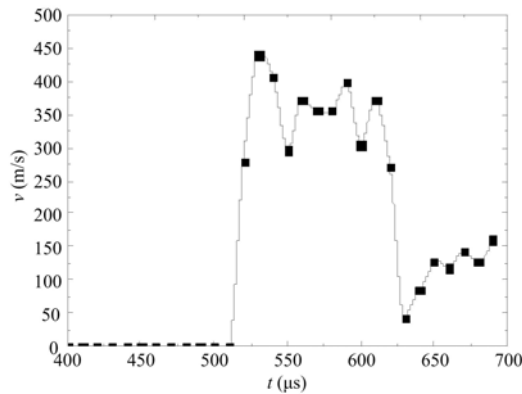


图12 裂纹扩展速度随时间的变化图

Fig. 12 Graph of crack velocity versus time

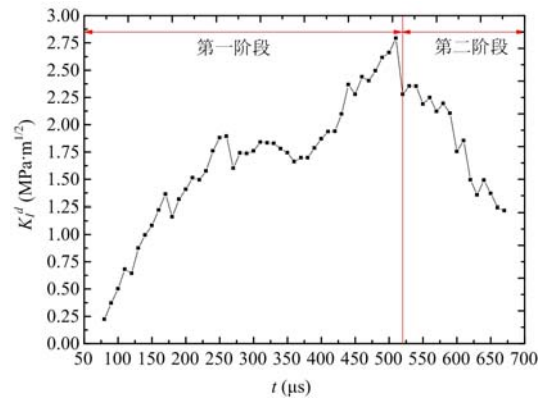


图13 裂纹尖端动态应力强度因子随时间的变化图

Fig. 13 Graph of stress intensity factor at crack tip versus time

4 结论

(1) 按照文中所述新配方和方法制作的环氧树脂光弹模型初始应力小,表面光洁平整,质地均匀,透光性好,光学灵敏度高,具有良好的机械加工和切削性能。

(2) 该方法操作工艺简便,制作周期短,并且在制作过程不会产生有毒、有害、有刺激性的气体,一般实验室均可采用,为动光弹实验的进行提供了有利的条件。

(3) 通过三点弯曲梁动态光弹性实验,得到了清晰的光弹等差条纹图像,验证了该配方和方法制作的模型可以应用于动态光弹性实验,用其进行一系列动态断裂力学实验研究是可行的。

参考文献:

- [1] Kobayashi A. Handbook on experimental mechanics[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1987.
- [2] 云大真,于万明. 结构分析光测力学[M]. 大连理工大学出版社,1996 (YUN Dazhen, YU Wanming. Structural analysis photomechanics[M]. Dalian University of Technology Press, 1996 (in Chinese))
- [3] 李伯芹,刘光廷,彭光履,等. 水工建筑物光测应力分析[M]. 北京:水利电力出版社,1988 (LI Boqin, LIU Guangting, PENG Guanglv, et al. Photomechanics analysis for water project buildings[M]. Beijing Hydroelectric Press, 1988(in Chinese))
- [4] 雷振坤,云大真,亢一澜,等. 数字光弹法综述实验力学[J]. 实验力学,2004,19(4):393—402 (LEI Zhenkun, YUN Dazhen, KANG Yilan, et al. A review of digital photoelasticity[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(4):393—402(in Chinese))
- [5] LI Bin, YANG Guobiao. Research on dynamic photoelastic experimental method based on three-dimensional model [J]. Acta Mechanica Solid Sinica, 2010, 23:210—214.
- [6] LI Bin, YANG Guobiao. Investigation of dynamic photoelasticity based on a three-dimensional model[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 83:261—266.
- [7] 佟景伟,李鸿琦. 光弹性实验技术及工程应用[M]. 北京:科学出版社,2012 (TONG Jingwei, LI Hongqi. Photoelastic experiment technique and engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2012(in Chinese))
- [8] 方如华,杨国标. 动光弹性法中若干问题的近期研究进展[J]. 实验力学,2011,26(5):491—502 (FANG Ruhua, YANG Guobiao. Resent development of some Issues in dynamic photoelastic method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):491—502 (in Chinese))
- [9] 丁懿. 水面舰艇船体和关键设备的抗冲击性能动光弹研究[D]. 同济大学硕士论文,2010 (DING Yi. Dynamic photoelastic study on impact resistance of the ship hulls and key equipments[D]. Tongji University (Master's Thesis), 2010 (in Chinese))
- [10] 倪凡. 动光弹法在海岸港口关键部位受冲击荷载下的应力分析研究[D]. 同济大学硕士论文,2011 (NI Fan. Stress analysis of the coast port's key parts applied impact load using dynamic photoelastic method[D]. Tongji

- University(Master's Thesis), 2011 (in Chinese))
- [11] 孙健, 洪凌斐, 夏荫培, 等. 单侧上颌骨缺损三维光弹模型的设计和制作[J]. 医用生物力学, 2009, 24(1):54—58 (SUN Jian, HONG Lingfei, XIA Yingpei, et al. Design and fabrication of 3D photoelastic model of unilateralmaxillary defects[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2009, 24(1):54—58(in Chinese))
- [12] 余文珺, 夏荫培, 张青青, 等. 无牙颌种植覆盖义齿三维光弹实验模型的建立[J]. 临床口腔医学杂志, 2010, 26(7): 387—390 (SHE Wenjun, XIA Yinpei, ZHANG Qingqing, et al. Establishment three-dimensional photoelastic model of implant-retained overdenture for edentulous patient[J]. Journal of Clinical Stomatology, 2010, 26(7):387—390 (in Chinese))
- [13] 宋芳, 张少锋, 白石柱, 等. 无牙下颌种植全口覆盖义齿不同上部结构光弹模型的建立[J]. 牙体牙髓牙周病学杂志, 2011, 21(3):146—148 (SONG Fang, ZHANG Shaofeng, BAI Shizhu, et al. Establishment of the mandibular edentulous photoelastic model of various retention mechanism on implanted complete overdentures[J]. Chinese Journal of Conservative Dentistry, 2011, 21(3):146—148 (in Chinese))
- [14] 谭学术, 鲜学福, 李正森, 等. 非均质地质体光弹模型的制造[J]. 焦作矿业学院学报, 1989, 2:30—36 (TAN Xueshu, XIAN Xuefu, LI Zhengsen, et al. The manufacture of photoelastic model for inhomogeneous geological body[J]. Journal of Jiaozuo Mining Institute, 1989, 2:30—36 (in Chinese))
- [15] Dally J W, Sanford R J. Classification of stress intensity factors from isochromatic fringe patterns [J]. Experimental Mechanics, 1978, 18(12):441—448.
- [16] Rossmann H P. Analysis of mixed-mode isochromatic crack-tip fringe patterns[J]. Acta Mechanica, 1979(34):1—38.
- [17] Irwin G R. Discussion to the dynamic stress distribution surrounding a running crack-A photoelastic analysis[J]. Society for Experimental Stress Analysis, 1958, 16(1):93—96.
- [18] Bonenberger R J, Dally J W, Irwin G R. Lower-bound initiation toughness with a modified-Charpy specimen[C]// Constraint Effects in Fracture. ASTM International, 1993.
- [19] Bonenberger R J, Dally J W. Further studies of a modified-Charpy specimen for lower-bound toughness[C]// Fracture Mechanics: 25th Volume. ASTM International, 1995.
- [20] Karalekas D E, Agelopoulos A. On the use of stereolithography built photoelastic models for stress analysis investigations[J]. Materials & design, 2006, 27(2):100—106.

A Method of Dynamic Photoelastic Experimental Model Material and its Application

YUE Zhong-wen, WANG Xu, YANG Ren-shu, QIU Peng, HU Qing-wen, CHEN Cheng

(School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Using four raw materials including # 618 epoxy resin, methyl hexahydrophthalic anhydride, accelerator DMP-30 and epoxy resin defoamers, new formulation and new preparation method for manufacturing photoelastic model are proposed in this paper, the dynamic mechanical parameters of newly prepared model were measured based on uniaxial compression experiment, electrical measuring method and dynamic photoelastic method, respectively. The new method is not only simple in processing and harmless to human body but also has short production cycle. New photoelastic model has small initial stress, smooth surface, uniform texture, good transparency, high optical sensitivity, and good mechanical and cutting performance. Through three-point bending beam impact experiment, a clear image of photoelastic isochromatic fringe was obtained. In dynamic photoelastic experiment, the application feasibility of this model prepared by using new formulation and new preparation method is verified.

Keywords: dynamic photoelastic experiment; epoxy resin; photoelastic model; three-point bending beam