

光弹性等达因法实验技术的初步研究*

PRELIMINARY RESEARCH OF PHOTOELASTIC
ISODYNES EXPERIMENTAL TECHNIQUES

钱振明 万亚兰 万 夫
Qian Zhenming Wan Yalan Wan Fu

(重庆大学工程力学系) (宁夏工学院机械系) (资中钻采工艺研究所)

摘 要 本文介绍了自行研制的光弹性等达因实验装置, 讨论了积分棱镜的设计和有关实验技术。利用该装置作了对径受压圆盘的应力分析和拉伸板边裂纹应力强度因子测定的基本实验。

主题词 光弹性等达因; 实验装置; 应力强度因子
中国图书资料分类法分类号 O 348.1

ABSTRACT The photoelastic isodyne experimental apparatus investigated by authors is presented. The design of the integrating prism and the relative experimental techniques are discussed. Using this apparatus the two fundamental experiments on the stress analysis of the circular disc loaded along vertical diameter and the determination of the stress intensity factor for the side crack of the extension-loaded plate are completed.

SUBJECT WORDS photoelastic isodynes; experimental techniques; stress intensity factor

一、引 言

从理论上说, 利用两张特征方向互相垂直的等达因条纹图, 就可获得平面应力场的全部应力分量[1]。但是, 从实验技术上看, 在对模型实时加载情况下, 实现光束和积分棱镜相对于模型在两个互相垂直方向的扫描比较困难。如果采用冻结模型, 虽可方便地实现任意方向的扫描, 但存在冻结引起的误差。为此, 作为研制等达因实验装置的第一步, 先实施仅能一个方向扫描的等达因实验装置, 并与普通透射光弹性系统相结合, 即类似于[2]中提出的积

本文为国家自然科学基金资助项目(1880383)的部分研究内容。

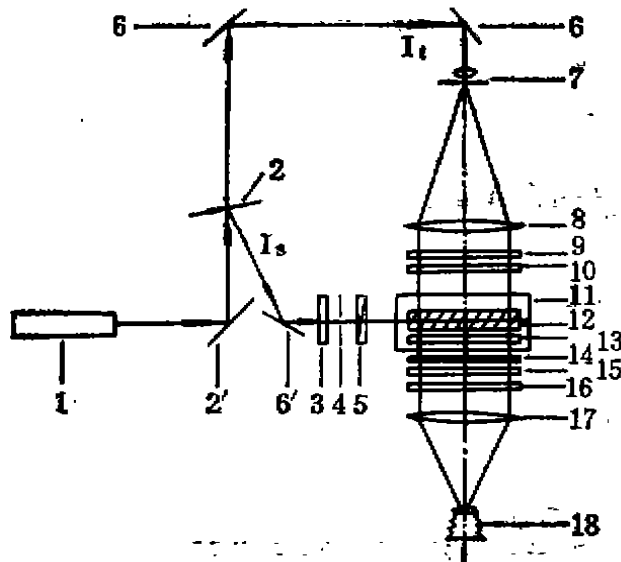
收文日期 1989年4月19日

分偏光仪系统。利用该系统，也可对同一模型在同一加载条件下分析平面应力场的全部应力分量。光弹性等达因实验装置要解决三个关键问题：(1)研制入射光束可穿过模型两个垂直侧面的可旋转 90° 的油缸内实时加载装置；(2)积分棱镜或等达因收集器的设计和制造；(3)扫描机构的设计和制造。这些关键装置属于J.T.Pindora的专利[3]、[4]，现根据我们的条件初步解决了这些问题。对第一个问题，在目前只获取一个特征方向等达因条纹的情况下，得到简化。下面将介绍所研制的实验系统和利用该系统所作的两个初步实验。

二、实验系统

(一) 光路布置

实验系统由两条光路组成：一条为等达因光弹性光路，另一条为透射光弹性光路。系统的光路图如图1所示。实验系统的外观照片如图2所示。可调分光镜2用来分别拍摄等色线

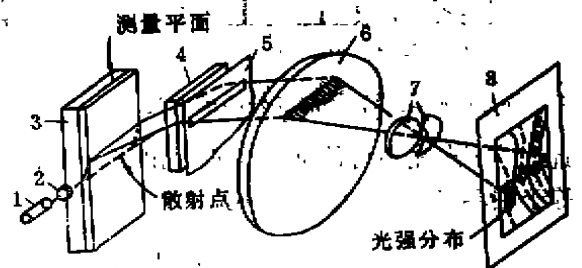


- 1. 激光器
- 2. 可调分光镜
- 2'. 光束提升器
- 3. 偏振器
- 4. 光栏
- 5. 补偿器
- 6. 反射镜
- 6'. 可调反射镜
- 7. 针孔滤波器
- 8. 准直透镜
- 9. 起偏镜
- 10. 1/4波片
- 11. 油缸
- 12. 模型
- 13. 等达因收集器
- 14. 光束选择屏
- 15. 1/4波片
- 16. 分析镜
- 17. 场镜
- 18. 照相机

图1 实验系统光路图



图2 实验系统的外观照片



- 1. 激光器
- 2. 偏振器
- 3. 光弹性模型
- 4. 等达因收集器(主收集器)
- 5. 光束选择屏
- 6. 场镜(副收集器)
- 7. 成像透镜和光栏
- 8. 光强分布存储器(象平面)

图3 等达因条纹获取的光路和过程

和等达因线时调整两光路中的光强。可调全反镜6'用在拍摄等达因条纹时，方便地调整入射光束，使其平行于模型中面通过。使用透射光弹性光路时，遮住13，并将13，14移开。使用等达因光路时，遮住13，将15，16移开。等达因条纹获取的光路和过程如图3所示。由于散射光光强与入射光波长的四次方成反比，故本实验系统中使用波长较短的大功率氩离子激光器（5145埃）作为光源。它同时可增大条纹密度。

(二) 等达因收集器

等达因收集器或积分棱镜是光弹性等达因实验装置中最重要的元件，它的作用是收集散射角 φ 等于或接近 $\pm 45^\circ$ 的散射光并将其准直。等达因收集器在光路中有两种安放位置：一种置于油缸外，即空气中；一种置于油缸内，即油中。我们共研制了三种等达因收集器，现分别介绍于后。

1. 置于油缸外的折射棱镜式等达因收集器。其收集散射光的光路如图4所示。环氧树脂和油的折射率相同， $n_1 = n_2 = 1.58$ ；缸壁和棱镜均为光学玻璃，它们的折射率 $n_3 = n_5 = 1.5163$ ；空气折射率 $n_4 = 1$ 。当光从光密介质向光疏介质折射时，入射角必须小于临界角，故需对A、B两点的入射角 δ_A 和 δ_B 进行检验。在取散射角 $\varphi = 45^\circ$ 时，

$$A点: \quad \delta_A = 45^\circ < \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} = 73.68^\circ \tag{1}$$

$$B点: \quad \delta_B = \delta'_A = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_3} \sin \delta_A \right) = 47.46^\circ > \sin^{-1} \frac{n_4}{n_3} = 41.26^\circ \tag{2}$$

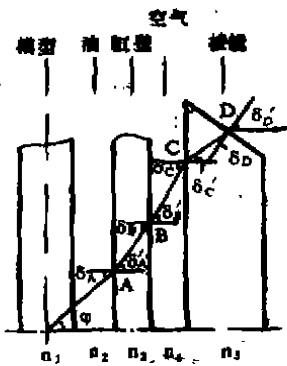


图4 等达因收集器置于油缸外的散射光路

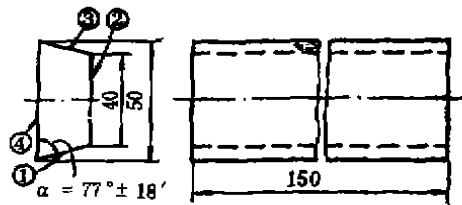


图5 折射棱镜式等达因收集器

因此，在B点光不可能从缸壁折射出去。即想获得最佳信噪比 ($\varphi = 45^\circ$) 是不可能的。若取 δ_B 等于临界角 (41.26°)，则

$$\varphi = \delta_A = \sin^{-1} \left(\frac{n_3}{n_2} \sin \delta_B \right) = 39.26^\circ \tag{3}$$

由此可见，要避免全反射， φ 必须小于 39.26° ，只能降低信噪比。综合临界角，信噪比和透射比等因素，选取 $\varphi = 35^\circ$ ，设计了一块折射棱镜式等达因收集器，如图5所示，棱镜顶角 α 通过解下列方程组

$$\begin{aligned}
 \delta'_A = \delta'_B &= \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_3} \sin \delta_A \right) \\
 \delta'_C = \delta'_D &= \sin^{-1} \left(\frac{n_5}{n_4} \sin \delta_B \right) \\
 \delta'_E &= \sin^{-1} \left(\frac{n_4}{n_5} \sin \delta_C \right) \\
 \delta'_F &= \sin^{-1} \left(\frac{n_6}{n_8} \sin \delta_D \right) \\
 \delta_D &= \delta'_D = \delta'_E \\
 \alpha &= \delta'_F
 \end{aligned} \tag{4}$$

得到， $\alpha = 71^\circ \pm 18'$ 。该棱镜收集的散光反差为 $0.94KI_n$ 。A 点光的透射比由菲涅尔公式得到：

$$t = \frac{2 \sin \delta_A \cos \delta'_A}{\sin(\delta'_A + \delta_A) \cos(\delta'_A - \delta_A)} = 0.97 \tag{5}$$

为增强棱镜的透射能力，在图 5 中的①、②、③、④面均镀以增透膜。这种棱镜的优点是安装，调整，维护方便，但信噪比不能达到最优。

2. 置于油缸内的内反射棱镜式等达因收集器。其收集散射光的光路如图 6a 所示。当 $\varphi = 45^\circ$ 时，经检验 A 点不会产生全反射。棱镜的顶角 α 由下列公式

$$\begin{cases}
 \delta_A = \varphi = 45^\circ \\
 \delta'_A = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_3} \sin \delta_A \right) \\
 \delta_B = \alpha = \frac{180^\circ - \delta'_A}{2}
 \end{cases} \tag{6}$$

求得， $\alpha = 66.2^\circ \pm 18'$ 。所设计的内反射棱镜式等达因收集如图 6b 所示。为增强棱镜的反射和透射性能，在①、②面镀以增反膜，③、④面镀以增透膜。这种棱镜可实现散光信噪比最优，但放在油中，使安装，调整及维护很不方便。

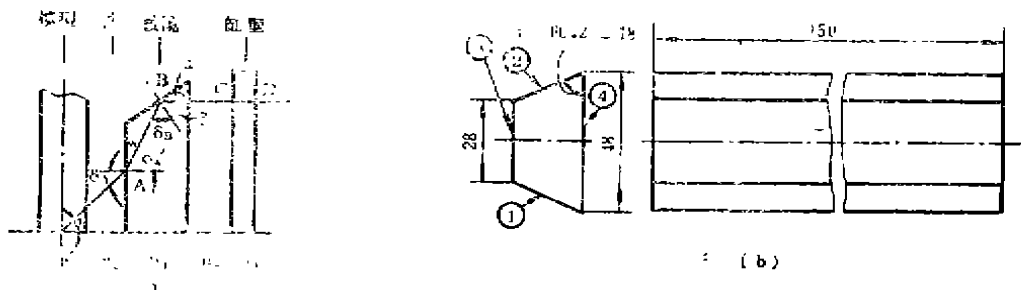


图 6 置于缸内的内反射棱镜式等达因收集器

3. 反射镜式等达因收集器。其结构和原理如图7所示。这种收集器既可放在油缸内，也可放在油缸外，只要调节收集器中的可调反射镜的角度 α 即可。反射镜前表面需镀与使用光束波长相匹配的高质量反射膜。对于仅在油缸内或油缸外使用的收集器，为使结构简单，反射镜可做成固定的。图8是三种收集器的实物照片。

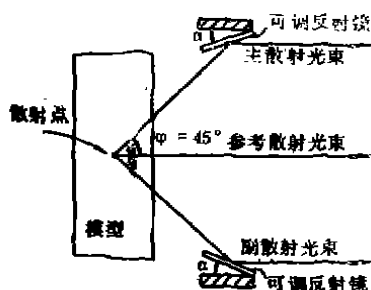


图7 反射镜式等达因收集器



图8 三种收集器的实物照片

(三) 扫描装置

扫描是必须的。虽然等达因收集器使模型中沿入射光束上各散射点到成像底片是等光程的，但只有通过垂直入射光方向的扫描，才能得到不歪曲模型形状的全场等达因条纹图。由图9可见，扫描应是A部分相对于B部分进行。有两种可能方案：A动，B不动或者B动，A不动。根据我们的条件，采用后一种方案。B部分的上下运动利用409-2型光弹性仪的加载架改装而成；只需将上下运动手柄换以皮带轮，用一低速可逆电机或力矩电机带动即可，见图10的照片。在载荷架平台上向后接出板条，安放场镜和相机。

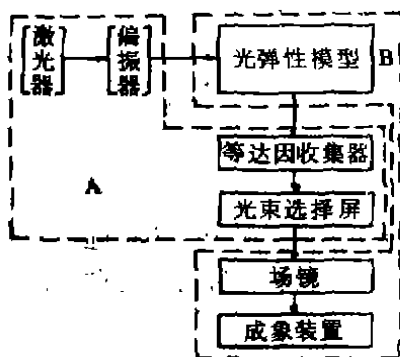


图9 各元件的相对扫描

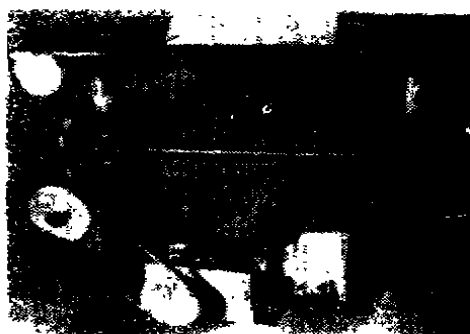
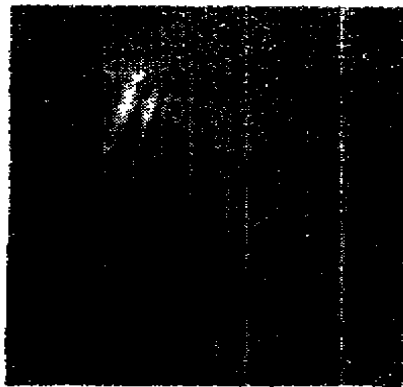


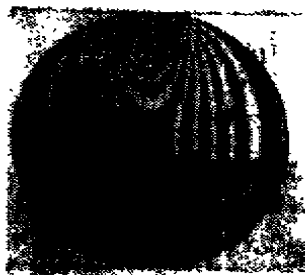
图10 扫描传动装置照片

(四) 油缸，加载装置和模型材料

油缸四边用光学玻璃粘成，底部钢板固定在加载架平台上，内装有加载框架，载荷由原载荷架的杠杆法码机构施加，浸渍油采用自配的混合油或硅油。模型材料，限于没有较适用于等达因实验的聚酯树脂，仍用环氧树脂。



(a)



(b)

图11 对径受压圆盘的 x -等达因(力)线和等色线

三、两个初步实验

(一) 对径受压圆盘

在同一载荷下同时获得 x 特征方向的等达因条纹图和等色条纹图，如图11所示。作出沿水平直径的等达因级数曲线（即 m_{xx} —

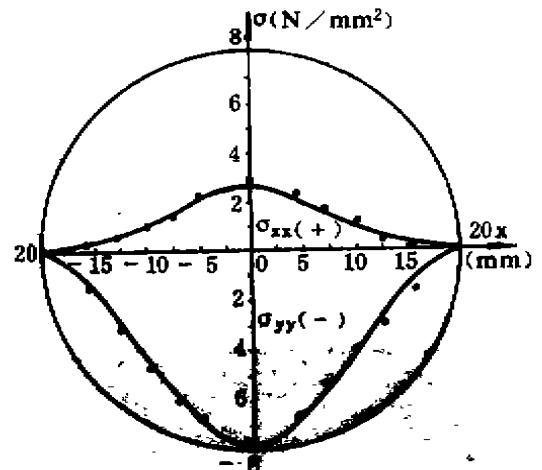


图12 理论值和实验值的比较

表1 对径受压圆盘水平直径上 σ_{yy} , σ_{xx} 的实验值

$x(\text{mm})$	± 20.0	± 15.6	± 12.5	± 9.85	± 7.47	± 4.82	0.00
$\sigma_{yy}(\text{MPa})$	0.00 0.00	-1.68 -1.66	-3.19 -3.14	-4.26 -4.56	-5.48 -5.85	-6.87 -6.86	-8.04
$\sigma_{xx}(\text{MPa})$	0.00 0.00	0.15 0.17	0.45 0.50	1.21 0.90	1.81 1.44	2.25 2.25	2.90

x 特征方向沿 x 的等达因函数)，其斜率即表示 δ_{yy} 。再结合等色线数据可得到 σ_{xx} 。 σ_{yy} 和 σ_{xx} 的实验值列于表1。实验值和理论值的比较见图12。曲线表示理论值，黑点表示实验值。

(二) 开有边裂纹的拉伸板

拉伸板和裂纹的尺寸如图13所示。获得的 x 特征方向等达因线图和等色线图如图14所示。 σ 示。由沿裂纹方向采集到的 m_{xx} 作出 m_{xx} - x 曲线，求得 σ_{yy} 。再由 $K_I(x) = \sqrt{2\pi x} \sigma$ 算得 $K_I(x)$ 。在裂纹前端区域找得的 σ_{yy} 和算得的 $K_I(x)$ 值见表2。用最小二乘法对表2的数据求出回归直线：

表2 裂纹前端的 σ_{yy} 和 $K_I(x)$ 值

$x(\text{mm})$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
$\sigma_{yy}(\text{N/mm}^2)$	7.58	7.53	7.40	7.26	7.17	7.16	6.95	6.84
$K_I(x)(\text{N/m}^{3/2})$	12.02	14.62	16.60	18.19	19.68	21.22	22.03	23.1

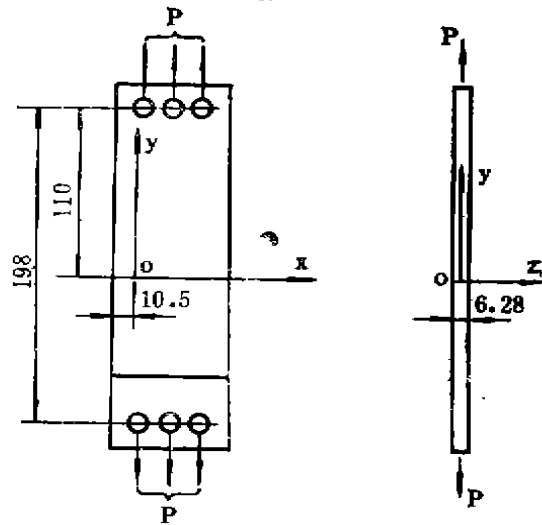
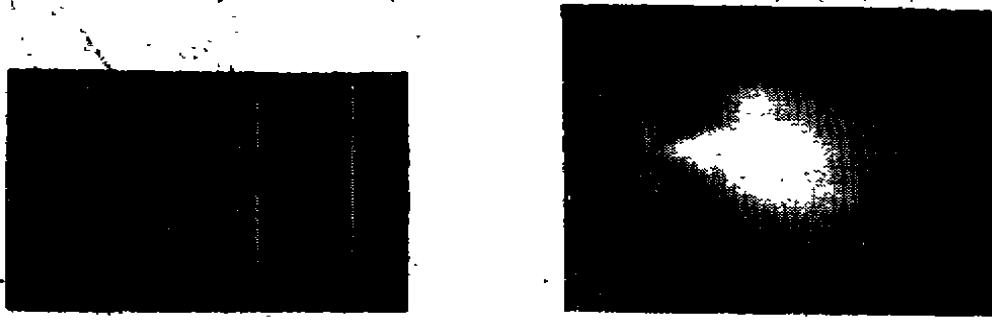


图13 带边裂纹的拉伸板试件

图14 带边裂纹的拉伸板的 x -等达因线图和等色线图

$$K_I(x) = 9.952 + 7.699x \quad (7)$$

所以

$$K_I = \lim_{x \rightarrow 0} K_I(x) = 9.952 \text{ N/mm}^{3/2} \quad (8)$$

由断裂力学得到模型应力强度因子的分析解为 $K_I = 10.8886 \text{ N/mm}^{3/2}$ 。

四、结 束 语

(一)所研制的光弹性等达因实验系统,虽然是初步的,有很多地方尚需改进和完善,但经实际使用证明效果尚好。下一步我们将研制一种能浸在油缸内的, x, y 方向可透光的,并可旋转 90° 的加载装置;继续改进等达因收集装置和扫描装置,探索新的等达因线的记录方法等。

(二)等达因实验的模型材料是很重要的。特别应提到的是,如果板材的厚度方向有初应力,即 $\sigma_z \neq 0$,虽对透射光弹性无影响,但对等达因光弹性就有明显的初条纹。上述两个实验中所用的环氧树脂板材都存在少量厚度方向的初应力,引起的初等达因条纹,我们在结果的计算中已予以扣除,这不是好的办法。因此需研制一种适用于等达因实验的材料——聚

酯树脂。

(三)光弹性等达因法特别适用于研究表面裂纹，内部裂纹，复合和层叠结构中的应力，接触应力，局部效应等问题。

实验过程中得到本实验室瞿华婴助理工程师的协助，谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 钱振明，光弹性等达因法的初步研究，第一部分，基本原理，第六届全国实验力学学术会议论文集，北京大学出版社，1989
- [2] Pindera J. T. and Straka P., Response of the Integrated Polariscope, J. of Strain Analysis, 1973,8(1)
- [3] Pindera J. T., Device for Birefringence Measurements Using Three Selected Sheets of Scattered Light (Isodyne Selector, Isodyne Collector, Isodyne Collimator), US, Patent, 1987, No. 4679933
- [4] Pindera J. T., Apparatus for Determination of Elastic Isodynes and of the General State of Birefringence....., US Patent 1987, No. 4703918
- [5] 母国光，战元令编：光学，北京人民教育出版社，1986
- [6] 袁旭论编：光学设计，北京科学出版社，1983
- [7] 黄炎编：工程弹性力学，北京清华大学出版社，1982