

反射型多火花摄影系统及其在动态 实验力学中的应用

苏先基 韩 雷 伍小平

(北京大学)

(中国科技大学)

主题词: 反射型多火花高速摄影系统光路, 反射式动态光弹性, 反射动态白光散斑的记录, 动态裂纹过程的记录

提要 本文设计和建立了国内第一台反射型多火花高速摄影系统。与国际上前人的类似工作比较, 光路更为合理, 像质明显改善。利用此新设备, 本文对多种光测方法, 进行了初步尝试。文中还分析了半反镜在反射型光路中对偏振度的影响, 并给出了补偿方法。

一、引 言

冲击、爆炸等瞬变载荷下应力波的传播、反射和相互作用, 裂纹的形成、扩展和分叉等动态力学现象的测试, 在材料本构关系研究和工程实际应用中, 都具有重要的意义。光学测量方法具有全场、非接触和直观等优点, 因而在固体动力学、爆炸力学实验中占有突出地位。

动态光测方法上的进展, 往往与各种高速摄影装置的研制与发展密切相关。在现有记录动态现象的分幅高速摄影装置中, Cranz和Schardin 1929年提出的多火花高速摄影装置^[1], 属于一次获得多幅照片的脉冲闪光摄影系统。它以电流通过两个电极的间隙放电作为光源, 又利用放电时间(光脉冲的宽度)来控制曝光时间而无需快门。所以, 这种高速摄影系统具有无运动部件, 同步易于实现, 幅间隔可调, 物像比较小, 像质好, 以及相对价廉等一系列优点。1955年, Christie^[2]首次将它用于固体力学实验。1981年, 北京大学和北京科学仪器厂试制成我国第一台多火花式动态光弹性仪^[3], 即火花间隙排成 4×4 方阵的双场镜透射型多火花高速摄影系统, 推动了我国的动态光弹性研究。

但是, 现有的多火花系统为透射型光路, 只能用于透明材料的模型研究。为适应非透明材料和多种光学方法, 以满足工程实际问题的需要, 将现有多火花高速摄影系统的透射型光路改造成反射型光路, 是得到多方面关注的、迫切而有意义的工作。

二、反射型多火花摄影系统的光路

透射型多火花摄影系统的分幅原理, 是基于平板透明模型对透射光束方向影响很小这一事实, 从而可以建立系统光轴近轴区域内的火花光源与相机镜头间的一一对应关系。因此, 平直表面模型镀有镜反射层后, 不同方向的入射光经镜面反射, 也可以与不同方向的相机镜头建立一一对应的关系而达到分幅的目的。以往的学者们也都是从这概念出发进行反射型光路设计的。现对已见于文献的方案进行简要评述。

Schardin 1950年提出的方案^[4], 是将各个火花发出的光, 经凹面镜依次投射到模型的镜反射面, 然后经它把入射光反射给相机镜头, 见图1。这种方案既增大了光路长度和加大了斜射,

本文于1986年6月1日收到

还产生了以慧差为主的各种像差。而且，大尺寸、高质量的凹面镜价格昂贵，对试件的平直度要求也较高。

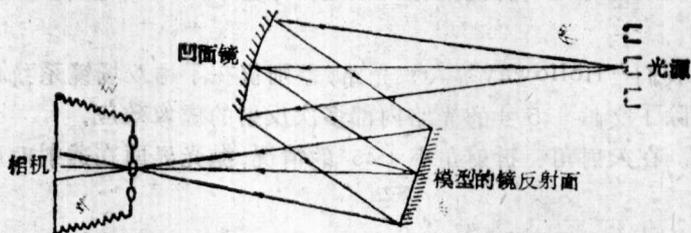


图 1

Holloway等人1979年^[5]提出的另一种光路，如图2所示。他们在原来透射型光路中加入一个半反镜，使照明光路与成像光路互成90°。显然，这种光路并未加大斜射，也不成增加原有光路的长度。但所拍摄的镜面岩石试件的动态裂纹照片质量甚差。不仅有十六个光源的亮点重迭在试件像上。

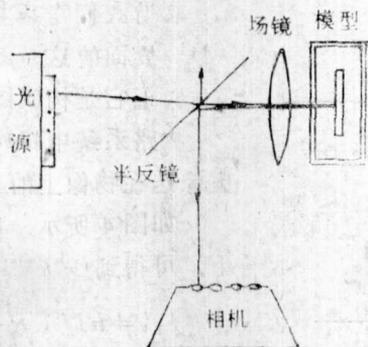
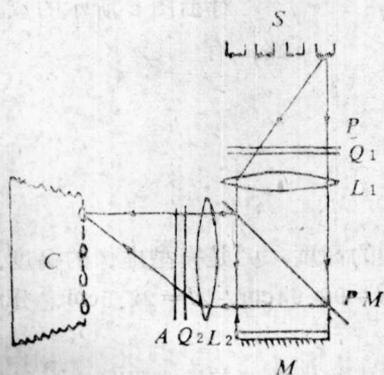
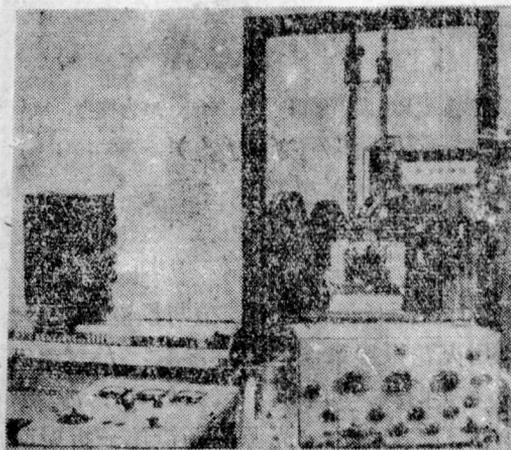


图 2 S为光源 PM为半反镜 L为镜头 M为模型 C为相机

我们建立的光路如图3所示。其中半反镜为厚3mm、直径400mm的光学平板玻璃制成，透射率与反射率之比 $T/R=50/50$ 。半反镜框架用铝合金制成，可绕铅垂轴和水平轴转动、调节。半反镜的法线与 L_1 和 L_2 的光轴成45°角，并使镀膜面朝向会聚场镜和模型。这样配置的主要考虑是：(1)加入半反镜不致加大斜射；(2)试件置于照明光源的对面，而不是放在相机的对面。这样，只相当于在照明光路中加了一块平行平板，这对成像质量毫无影响。而在成像光路中并不经过这平行平板的透射，从而避免了使用心光束变为非同轴光束引起不完全成像的可能；(3)在成像光路中利用的是半



(a) 光路示意图



(b) 反射型多火花动态光弹仪的照片

图 3 S: 光源, P: 起偏镜, Q₁: 四分之一波片, L₁: 准直场镜, PM: 半反镜, M: 模型, L₂: 会聚场镜, Q₂: 四分之一波片, A: 分析镜, C: 相机

反射镜的镜反射面，而平面镜是唯一能成完善像的光学元件。这样，就避免了像的畸变，得到很好的像质。虽然这样所成的像是物体的镜像，但这并不影响力学问题的实质，况且还不难通过其它方法解决。

值得指出的是：我们与Holloway等人的光路，差别仅在于用双场镜系统代替了单场镜系统。但正是这一差别，消除了文献〔5〕的光路内部多次反射的虚像效应。

由物理光学可知，在入射角、折射角小于45°的情况，抛光界面在透射时反射与入射的光通量之比为

$$\rho = \left(-\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2$$

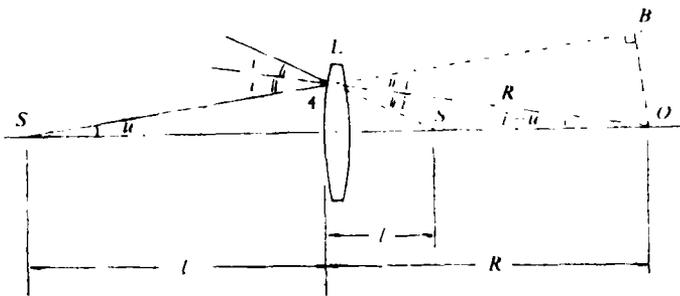


图 4 s为光源，L为场镜，s'为光源的虚像

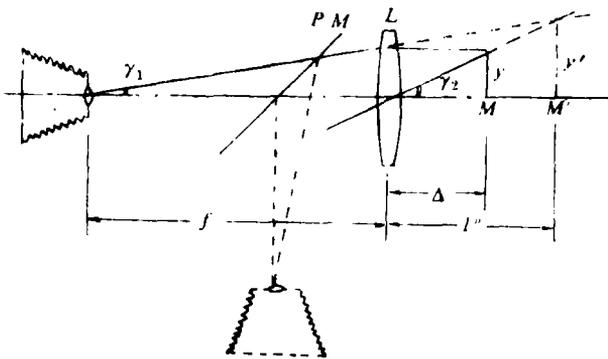


图 5 PM为半反光镜，L为场镜，M为模型，M'为模型虚像

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = y/f = y'/(f + f_2') \tag{2}$$

$$\operatorname{tg} \gamma_2 = y/\Delta = y'/l_2' \tag{3}$$

由(2)(3)联立，可以解得

$$l_2' = f\Delta / (f - \Delta) \tag{4}$$

式中f是场镜的焦距长度，Δ是模型与场镜的间距，y是模型的高度，y'是模型虚像的高度。

将所有用火花摄影系统的实际参数：f=l=87.5cm，R=92.94cm，Δ=22.5cm，分别代入(1)，(4)两式，可得l₁'=30.25cm，l₂'=30.29cm。

可见，在图2光路中，光源由场镜第一折射面反射所形成的虚像，与模型经场镜折射后形成的虚像，位置几乎重合。于是，在照相记录时，十六个电火花光源的虚像与模型的像势必重迭在一起。我们曾试搭了这一光路，也证实了这一点。在这个试验中还注意到了另外还有一组十六个

当从空气(n=1)射到玻璃(n'=1.5)，或者从玻璃射出到空气中时，光能损失均为4%。当我们考虑场镜的两个界面的这种效应，便发现它是构成图2所示光路系统中将16个光源的虚像迭在物像上的主要原因。

如图4所示，在近轴假设下，可得到

$$l_1' = Rl / (R + 2l) \tag{1}$$

式中l₁'为光源虚像与界面顶端的间距，l为光源与界面顶端的间距，R为界面的曲率半径。

对于图5所示的成像光路，有

亮斑也迭在像上，亮度稍暗。这显然是场镜的第二折射面反射所致。

本文设计的光路（图3）则完全消除了第一级虚像，并基本上消除了第二级虚像，因而获得了较佳的成像质量。尽管这种反射型的布置使可利用的光强下降到只有透射型的四分之一，但这并未成为严重的障碍。我们使用保定胶片厂生产的21DIN信息片，在加黄滤色镜的情况下，只要适当提高一点充电电压，仍得到了足够的曝光。

三、反射式动态光弹性

在透射型光弹性仪中，为了单独得到等差线条纹图，需用圆偏振光场。这时起偏镜的偏振轴与第一个四分之一波片 Q_1 的快、慢轴分别面 45° 角，第二个四分之一波片 Q_2 的快、慢轴正好与 Q_1 的相反，并与分析镜 A 的偏振轴成 45° 角。但是，在反射型光路中，加入了平板型半反镜。为了还能获得圆偏振光，就需要考虑这半反镜对偏振度的影响。

由Fresnel公式，当光振动的电场强度矢量 \vec{E} 垂直于入射面时，

$$E'/E = -\sin(\varphi - \varphi'') / \sin(\varphi + \varphi'') \quad (5)$$

$$E''/E = 2 \cos\varphi \sin\varphi'' / \sin(\varphi + \varphi'') \quad (6)$$

当 \vec{E} 平行于入射面时，

$$E'/E = \text{tg}(\varphi - \varphi'') / \text{tg}(\varphi + \varphi'') \quad (7)$$

$$E''/E = 2 \cos\varphi \sin\varphi'' / [\sin(\varphi + \varphi'') \cos(\varphi - \varphi'')] \quad (8)$$

式中： E 、 E' 、 E'' 分别为入射、反射和折射平面波的电场强度， φ 和 φ'' 分别为入射角和折射角，见图6。

可见，只有当 $\varphi = \varphi''$ 时，才有 $E' = 0$ ， $E'' = E$ 。也就是说，只有在这种情况下，才对入射光的偏振度无影响。而由图7可知，经 P 和 Q_1 出射的光，需经过半反透镜 PM 的透射和反射，再经过 Q_2 和 A 的透射才进入像机镜头。这时， $\varphi = 45^\circ \approx \varphi''$ 。所以，为获得圆偏振光场，就不能像透射光弹性那样使 P 、 A 与各自的 $\lambda/4$ 片成 45° 角。

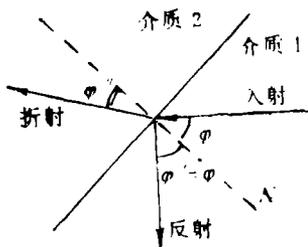


图 6

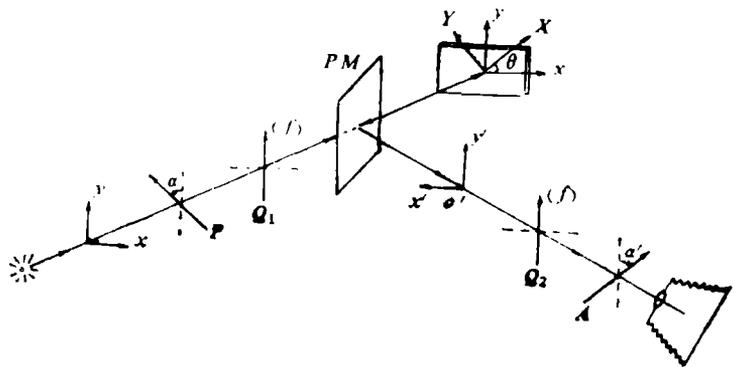


图 7

在照明光路中经 PM 透射时，对于垂直于入射面的分量，由空气→玻璃→空气这个过程，

$$\eta_{\perp} = \frac{E_{3\perp}}{E_{1\perp}} = \frac{E_{3\perp}}{E_{2\perp}} \cdot \frac{E_{2\perp}}{E_{1\perp}} = 4 \frac{\cos\varphi \cos\varphi'' \sin\varphi \sin\varphi''}{\sin^2(\varphi + \varphi'')} \quad (9)$$

对于平行于入射面的分量，则有

$$\eta_1 = \frac{E_{3''}}{E_{1''}} = \frac{E_{3''}}{E_{2''}} \cdot \frac{E_{2''}}{E_{1''}} = 4 \frac{\cos\varphi\cos\varphi' \sin\varphi\sin\varphi'}{\sin^2(\varphi+\varphi') \cos^2(\varphi-\varphi')} \quad (10)$$

由于 $\varphi \neq \varphi'$ ，所以 $\eta_1 \neq \eta_2$ 。即圆偏振光经 PM 透射后变为椭圆偏振光了。

如果令 P 的偏振轴和 Q_1 的快轴夹角为 α ($-90^\circ < \alpha < 90^\circ$)，见图7。当光振动经过 P 后，有

$$\left. \begin{aligned} x &= a \sin \omega t \\ y &= -a \operatorname{ctg} \alpha \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

如 Q_1 的快轴与 y 轴重合，则经 Q_1 出射时有

$$\left. \begin{aligned} x &= a \sin \omega t \\ y &= -a \operatorname{ctg} \alpha \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

再经 PM 透射后，有

$$\left. \begin{aligned} x &= \eta_1 a \sin \omega t \\ y &= \eta_2 (-a \operatorname{ctg} \alpha) \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

显然，可以通过调节 α ，使 $\eta_1 a = \eta_2 a \operatorname{ctg} \alpha$ ，从而得到按顺时针方向旋转的圆偏振光。

现在，对成像光路进行类似的讨论。在模型表面建立与该点主应力方向一致的 OXY 坐标系，并假定入射的顺时针方向旋转的圆偏振光为

$$\left. \begin{aligned} X &= b \sin \omega t \\ Y &= -b \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

设 δ 为该点主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 在两个光分量间引起的相对位相差。则光波再由模型出射时(模型背面为镜反射层)，成为

$$\left. \begin{aligned} X &= b' \sin(\omega t + \delta) \\ Y &= -b' \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由坐标交换

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$$

可得

$$\left. \begin{aligned} x/b' &= \sin(\omega t + \delta) \cos\theta - \cos\omega t \sin\theta \\ y/b' &= \sin(\omega t + \delta) \sin\theta + \cos\omega t \cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

经半反镜 PM 反射后，

$$\left. \begin{aligned} x' &= \xi_1 x \\ y' &= \xi_2 y \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{其中: } \xi_1 &= \operatorname{tg}(\varphi - \varphi''), \operatorname{tg}(\varphi + \varphi'') \\ \xi_2 &= -\sin(\varphi - \varphi'') / \sin(\varphi + \varphi'') \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

由(5)，(7)两式得到，

于是，经 Q_2 (其快轴与 y' 轴重合)后，

$$\left. \begin{aligned} x' &= b' \xi_1 [\sin(\omega t + \delta) \cos\theta + \cos\omega t \sin\theta] \\ y' &= b' \xi_2 [\cos(\omega t + \delta) \sin\theta + \sin\omega t \cos\theta] \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

如令 α' 为分析镜 A 的偏振轴与 y' 轴的夹角, ($-90^\circ < \alpha < 90^\circ$), 则透过 A 出射的光振动为

$$e = -x' \sin \alpha' + y' \cos \alpha' \quad (20)$$

将(19)代入(20), 并令 $-\xi_1 \sin \alpha' = \xi_2 \cos \alpha' = c$ (这可通过调节 α' 得到), 则有

$$e = 2b'c \sin \left(\omega t + \theta + \frac{\delta}{2} \right) \cos \frac{\delta}{2}$$

利用电火花光源进行曝光记录的时间, 虽仅微秒量级, 但仍远高于光振动的周期。所以, 光强仍为振幅平方的时间平均。即

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T e^2(t) dt = 2(b'c)^2 \cos^2 \frac{\delta}{2} = I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

这就是圆偏振场明场的光强方程。

同理, 如令 $\xi_1 \sin \alpha' = \xi_2 \cos \alpha' = c$, 则有

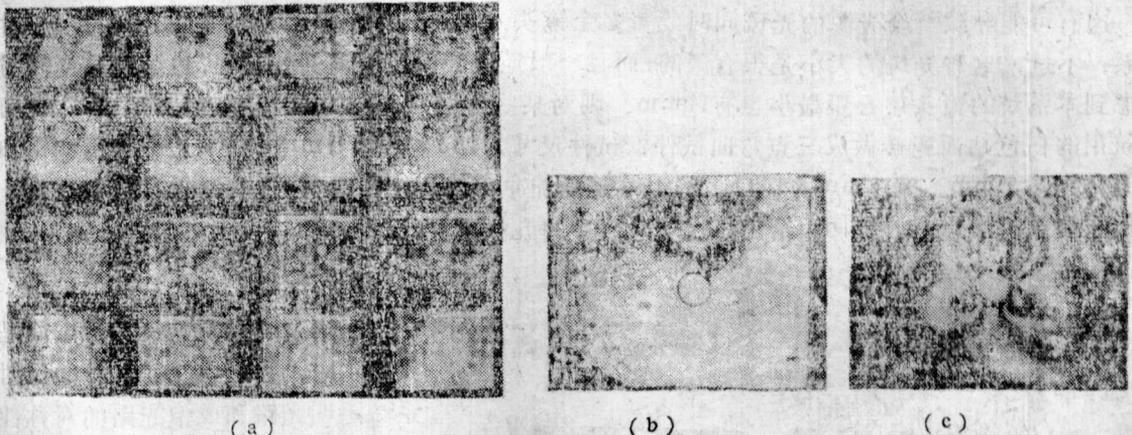
$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

这是圆偏振场暗场的光强方程。

可见, 只要适当选取 α 和 α' , 就可补偿掉半反镜在透射和反射时对偏振度的影响, 而得到圆偏振场。将 $n=1.5$, $\varphi=45^\circ$, 代入上面的有关公式, 不难求出补偿角 $\alpha=42^\circ 46'$, $\alpha' = \pm 73^\circ 07'$ 。

应当说明的是: 这一结果对半反镜的 $n=1.5$ 的情况算出的。具体使用时, 应根据所用半反镜的实际 n 值进行修正, 或用一个冻结的对径受压圆板模型进行校核。

我们拍摄了后表面附有镜反射层的聚碳酸酯带圆孔的矩形平板, 在冲击载荷作用下的明场等差线条纹图, 见图8。试验是用落锤加载, 落锤重量为420gr, 下落高度为36.5cm。试件尺寸为 $196 \times 145 \times 6$ mm, 圆孔直径为20mm。首幅延迟200 μ s, 幅向隔20 μ s。



(a) 为系列照片, (b) 为第三幅, (c) 为第十三幅

图8 反射动态光弹性照片

为考察在实际结构表面上的应用, 我们以 $160 \times 40 \times 4.7$ mm的铝合金板作为三点弯曲梁试件。梁下边中部用铝丝切割出长15mm、宽0.16mm的直缝, 并用 $50 \times 40 \times 2.9$ mm的CR-39薄片, 镀上反射层后用环氧树脂固化在试件表面。仍用落锤加载, 使梁试件上边中点受冲击。首幅延迟80 μ s, 幅间隔20 μ s。虽因加载条件所限, 未能使予制裂纹继续开裂, 但图9中仍可观察到加载点和裂纹尖端附近出现的应力集中。

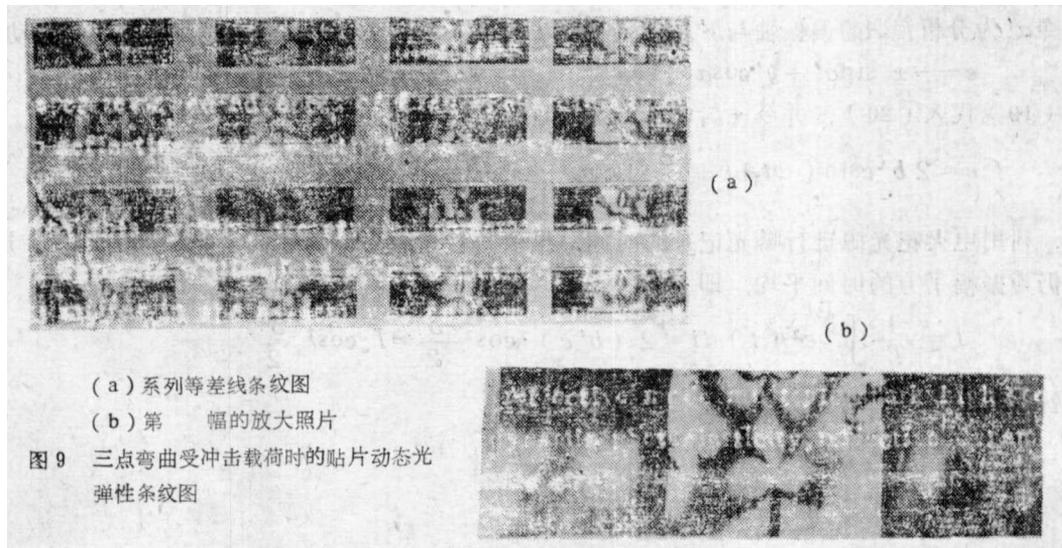


图9 三点弯曲受冲击载荷时的贴片动态光弹性条纹图

四、其它应用

1. 镜面和非理想镜面试件动态断裂过程的记录

既然多火花摄影系统的分幅，是基于光源和相机镜头列阵相对于系统主光轴的离轴，就不难在平直试件表面镀反射层实现直接摄影。我们用市售平面玻璃镜，将其背面的保护漆用丙酮轻轻拭去，作为前表面镀反射层的玻璃平板试件。成功地实现了动载下玻璃断裂过程的高速摄影。

其次，对于非理想镜面的试件，在镜头入瞳平面处，不再是光源像而是一个弥散的光斑了。这光斑的强度分布是光源、光学系统的光学透射函数、试件的表面形状和反射系数等因素的函数。这有可能导致一个光源的光斑同时复盖多个镜头，从而破坏光源和相机镜头之间的一一对应关系。不过，这种光斑的大小是很有限的，而且一般还是在对应的镜头处最强，边缘的强度较弱。考虑到本系统的镜头中心距最小也有70mm。则对某些情况，光斑的互相影响是有限的。我们用建筑用的白色贴面瓷砖做成三点弯曲试件，试件尺寸为150×40×5 mm，在下边中央用钢锯和玻璃刀开出长7 mm、宽1 mm的切口。仍用落锤施加冲击载荷，拍摄了这陶瓷板的断裂过程，并求出了裂纹扩展速度。图10中给出了这一过程中的几幅照片。

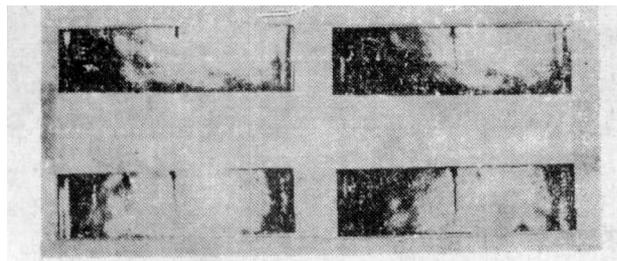


图10 陶瓷板断裂过程的照片

2. 反射动态白光散斑的记录

当模型表面不是镀反射层而是漫反射层时，利用本文所设计的反射型系统照明光路和成像光路的对称性，也可以分幅摄影。

我们拍摄了带椭圆孔的聚氨酯平板在落锤冲击下的双曝光白光散斑图

系列。试件尺寸的196×160×10mm，椭圆孔的长轴为30mm、短轴16.6mm。模型表面涂有100—160目的玻璃微珠。试验进行时，在加载荷前让十六个火花都放一次电，使十六个镜头后面的底片都记录了无载时试件表面的散斑图；然后启动落锤对试件进行冲击，则十六个火花在预定延迟时间后按一定幅间隔又依次放电一次。这样，就得到了对应于不同瞬时的十六幅双曝光散斑

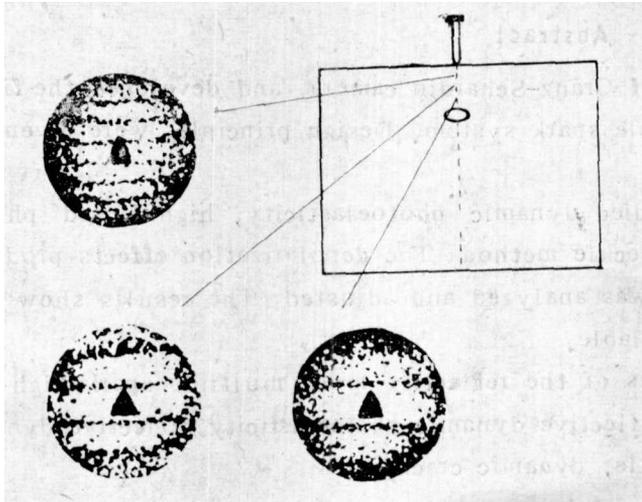


图11

图。图11是通过对应于冲击后1.22ms的双曝光散斑图逐点分析得到的杨氏条纹图。

应当指出的是，由于多火花摄影系统无快门装置，是用电火花的脉冲宽度来控制曝光的，所以上述试验过程应全部在暗室条件下完成。另一方面，正是由于本系统在记录过程中无任何运动部件，所以，在两次曝光之间底片位置不会有任何错动。这是其它高速摄影系统难以实现的，这一特点

，对用两次曝光记录以测量物体的位移和变形的白光散斑法，和其它方法是特别有利的。

五、结 论

本文围绕反射型多火花摄影系统进行的工作表明：本文设计和建立的反射型多火花摄影系统是合理的和成功的。在现有的透射型多火花摄影系统基础上改装，化费不多，而可实现一机多用，除文中已提到的工作外，还可用于焦散线、纹影法及反射云纹法等多种光学方法。为动态光测技术走向工程应用提供了一个有力工具。

本文对反射型动态光弹性圆偏振光场中，半反镜对偏振度影响的分析和给出的补偿方法，获得了与实际观察一致的结果。

本文提到的各种光测方法的实验，还只是初步的尝试，好些工作还有待于进一步深入研究。但我们相信，在这个基础上，我国的动态光学测试技术，及其在科研、工程实际中的应用，将会得到较快的发展。

参 考 文 献

- (1) Cran z, C. and Schardin, H. , Zeits Schrift fur physik, 56. (1929), 147.
- (2) Christie, D. G. , J. Photo. Sci. , 3. (1955), 157.
- (3) 苏先基、马莲芬, 爆炸与冲击, 4, 1 (1984), 56.
- (4) Schardin, H. , Glastechn. Ber. , 23, 1 (1950), 1.
- (5) Holloway, D. C. , Kobayashi, T. and Barker, D. B. , in Optical Methods in Mechanics of Solid, ed. Largarde, A. , Sijthoff and Noordhoff, (1981), 473.

REFLECTION MULTIPLE SPARK GAP CAMERA AND ITS APPLICATIONS IN DYNAMICAL EXPERIMENTAL MECHANICS

Su Xian,i

(Beijing University)

Han Lei Wu Xiaoping

(University of Science and Technology of China)

Abstract

This paper reviewed advances of Cranz-Schardin camera, and developed the first sixteen gap reflection mode multiple spark system. Design principles were given in detail.

Applying this system, we studied dynamic photoelasticity, high speed photography and dynamic white-light speckle method. The depolarization effects produced by partial mirror in the system was analyzed and adjusted. The results show that this system is successful and available.

KEYWORDS: the optical pathes of the reflective mode multiple spark high speed camera system, reflective dynamic photoelasticity, reflective dynamic white light speckle, dynamic crack

中国航空学会第五届光测力学学术会议 暨中国力学学会图象处理研讨会

中国航空学会第五届光测力学学术会议暨中国力学学会光测图象处理研讨会于1986年11月2日至8日在长沙举行。出席会议代表90名,来自全国45个单位。这次会议的主题是“光测力学在航空工程及其他方面的应用”和“光测力学数据采集与处理自动化”。会议采取大小会相结合,报告与自由讨论相结合的形式。交流论文所反映的学术水平和研究深度与上届会议相比,有明显的进步。如光测力学在工程中的应用更加广泛,技术上更加成熟。航空发动机几何形状复杂的零件在特殊工作条件下的应力分析,用光测力学方法进行大量实验分析,获得完整的应力资料,为产品设计、零件失效分析提供了依据。现已成为产品质量控制的有效手段。光测力学新方法、新技术、新仪器的研究开始向应用方面发展。计算机技术在光测力学领域中的应用,大大提高了实验精度和效率。这次会上,国防学术大学等单位分别介绍了各具特点的光测力学图象处理系统。达到了先进的水平。

代表们通过会议充分交流成果,沟通信息,提出问题明确方向。大家认为会议安排紧凑,讨论热烈,学术思想比较活跃,达到了预期的目的。代表们希望通过交流,促进协作,

互相支持,互相补充,互相启发。与会人员提议,今后的会议要为处在生产第一线的产业部门创造机会,使他们有代表、有机会发表他们的成果,讨论研究他们遇到的难题。同时希望一些大型项目能够统一规划,集中力量攻坚,避免课题不必要的重复。

鉴于航空事业的发展,在实验力学方面应强调研究与应用相结合,而许多实际工程问题往往不能单靠一种方法获得圆满的结果,要考虑多种方法的综合应用,促进解决实际工程问题能力的提高。代表们认为:为加强实验力学各分支的横向联系,希望下届光测力学会议能与电测、振动、疲劳、无损探伤等方面的同行共同召开。会议名称拟定为“结构试验会议”,并建议1988年召开,由北京航空学院、航空部六〇六所、六二三所联合筹备。

会议还根据审稿及出席会议的部分专家的意见,由会议领导小组讨论确定下列三篇论文为优秀论文,向中国航空学会推荐:(一)光测力学在航空工程中的应用,(二)曲栅云纹法在机身失稳中的应用,(三)光弹性数字图象分析系统研究。

(傅梦遽)