

动态全息和散斑干涉技术研究 薄板在横向冲击下的变形*

韩 雷 伍小平 胡时胜

(中国科学技术大学, 合肥, 230026)

提要 本文提出了全息干涉和离焦散斑干涉的动态测试方案, 并在对实际工程材料金属薄板的撞击实验中付诸实施, 获得了成功。以新型的 DJ-1 型双脉冲红宝石激光器作为瞬态实验的相干光源。因仪器的被动 Q 开关特性, 用自制的数字电路完成调 Q 监视、同步控制和测时。加载及动载测定装置由 Hopkinson 设备改制, 自编的软件可在实验后数分钟内得到撞击波形。

关键词 动态全息干涉, 动态散斑干涉, 红宝石脉冲激光器, Hopkinson 装置, 横向冲击

一、前 言

动态光测技术作为近代实验力学的重要分支, 不仅因其是验证动力学分析的主要手段, 还由于实际工程背景的推动。六十年代初脉冲激光器的出现, 为用近代光学方法研究结构的瞬态响应, 提供了有效的测试设备。其中, 全息干涉和散斑干涉方法, 具有精度高、非接触、可获得全场定量数据等优点, 引起了人们的极大兴趣。因动态实验的技术困难, 对薄板型构件受横向冲击条件下的全场测试的研究报告尚不多见, 而这又是实际应用中常见的情形。

作者提出了研究轴对称周边固支金属板在横向冲击下动态变形的全息干涉及离焦散斑干涉实测方案。作为脉冲光源的是 DJ-1 型红宝石激光器。我们并自行设计和制作了 TTL 数控系统, 用于激光器的调 Q 监视、测时及整个实验的同步。同时, 用改装的 Hopkinson 装置提供撞击载荷并测定加载波形。

这一系统的建立, 是综合了近代实验力学、物理光学、激光器件和技术、高频电子测量、微机应用诸学科内容的工作; 提出和实现的设想, 不仅是成功和可行的, 并可为动态实验力学的发展, 增添丰富的内容。

二、光 学 方 法

取记录平面为空间固定直角坐标系的 $O-xy$ 平面, 则试件上任一点 (x_0, y_0, z_0) 在变形前后发出的物光波在记录平面上可表为

* 国家自然科学基金资助项目。

本文于 1990 年 3 月 16 日收到, 1990 年 5 月 19 日收到修改稿。

$$O(x, y) = O_0(x, y)e^{i\varphi_0(x, y)} \quad (1a)$$

$$O'(x, y) = O_0(x, y)e^{i\varphi(x, y)} \quad (1b)$$

记录时的激光相干照明,使物光波和参考光波(其波源位于 (x_r, y_r, z_r) 处)在记录平面上相干迭加,如图 1.

双曝光底片经处理后再用参考光照明,其透过光波的第二项即为重现的两个物光波,对应光强为

$$I(x, y) = I_0[1 + \cos(\varphi - \varphi_0)] \quad (2)$$

而在折射率 $n = 1$ 的介质中,光程差为

$$\Delta = \frac{\lambda}{2\pi}(\varphi - \varphi_0) = (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{U} \quad (3)$$

式中 λ 为记录波长, $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_0$ 分别为观察方向和入射光方向的单位矢量. 这样,由(2)(3)式即建立了全息干涉再现条纹图强度分布与位移的关系.

动态实验所用记录波长(6943 Å)和再现波长(6328 Å)是不等的,对此,在 Fresnel 基元全息图分析的基础上,作者证明了:使用扩束参光的条件下,只要改变再现光源的角度,使满足

$$\frac{\sqrt{x_r'^2 + y_r'^2}}{z_r'} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\sqrt{x_r^2 + y_r^2}}{z_r} \quad (4)$$

即可令平面物体的再现像无畸变。(4)式中 λ_1 和 λ_2 分别为记录和再现所用的激光波长; (x_r, y_r, z_r) 和 (x_r', y_r', z_r') 分别为记录参光和再现参光的波源位置.

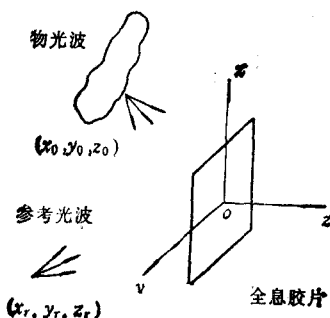


图 1

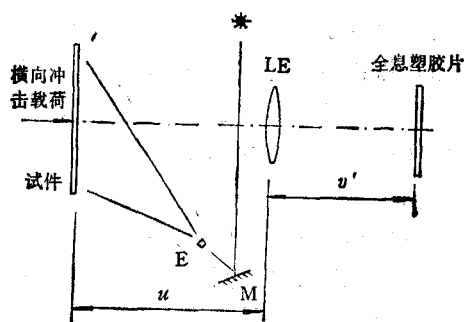


图 2

离焦散斑照相光路见图 2. 相机对物面精确成像时,物距 u 和像距 v 应有关系

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (5a)$$

今取像方离焦量 $\delta v = v' - v$, 则由

$$\frac{1}{u'} + \frac{1}{v'} = \frac{1}{f} \quad (5b)$$

可得

$$\delta u = u - u' = \frac{f^2 \delta v}{(v - f)(v' - f)} = \frac{\delta v}{M \left(M + \frac{\delta v}{f} \right)} \quad (6)$$

这里, f 为成像透镜 LE 的焦距, M 为精确成像(未离焦)时的成像放大率 $M = \frac{v}{u}$, δu 为物方离焦量。

由散斑场运动规律, 当 LE 对共轭平面成像, 并在试件变形前后双曝光记录, 则底片上记录到的斑对运动 (U, V) 为

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} - 2 \cdot \delta u \begin{pmatrix} \frac{\partial W}{\partial x} \\ \frac{\partial W}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 (u, v, w) 为物表面在两次曝光间沿 x, y, z 方向的位移。这里, z 方向为光路主轴方向, 并假定 $M = 1$ 以简化表达。不难看出, 离焦量 δu 的大小, 可调节对物面倾斜量 $\frac{\partial W}{\partial x}$, $\frac{\partial W}{\partial y}$ 的测量精度。

提取底片上象斑运动 (U, V) 可采用全场分析或逐点分析光路。后者情形下, 在一定距离 z 外接收到的 Fraunhofer 衍射图样, 即光束照射区域透过率函数的光学 Fourier 变换。不考虑表示中心亮点的 δ 函数, 衍射屏上光强分布为

$$I(x_f, y_f) \propto [\cos \pi(f_x \zeta + f_y \eta)]^2 \quad (8)$$

这就是说, 衍射晕内平行条纹的方向垂直于底片上象斑的错动方向, 其间隔

$$\Delta = \frac{\lambda z}{\sqrt{\zeta^2 + \eta^2}} \quad (9)$$

这里, λ 为波长, z 为衍射距离, $f_x = \frac{x_f}{\lambda z}$, $f_y = \frac{y_f}{\lambda z}$ 。

三、脉冲激光记录和同步设计

华东工学院研制的 DJ-1 型红宝石激光器采用脉冲氙灯为泵浦源, 以 Fabry-Perot 标准具限制纵模, 在谐振腔内插入 $\Phi 2\text{mm}$ 光阑选横模, 以得到相干性好的激光输出。

以往产生多脉冲激光的方式, 多是在泵浦超阈值输入下, 控制电光 Q 开关重复动作, 使在每次振荡阈值急剧下降的同时, 得到对应的巨脉冲输出。但是, 这种方式对红宝石棒的增益、损耗系数等要求较高, 光泵抽运功率必须很大, 热效应问题也更为突出。这均使设备结构复杂、成本增加、不便搬动。为此, DJ-1 型采用了共腔多通道新技术, 即在谐振腔内安放两根光学长度相等的红宝石棒, 相同的泵浦系统分别被各自的光泵激励, 见图 3。这样, 不仅仪器结构简化、成本降低、有利于现场实测, 而且双脉冲的间隔可任意调整, 脉冲能量亦可基本相同。

对单级振荡输出的 DJ-1 型仪器, 确保光束质量的前提下尽量提高到达记录平面的

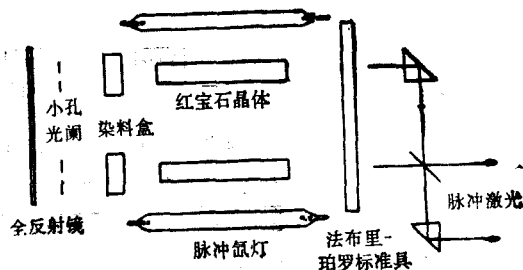


图 3

光强,是拍摄时的技术关键之一。我们除对试件适当研磨、激光器尽可能靠近实验装置外,参、物光均用扩束光照明并尽量少用反射镜。对于散斑照相,直接用单根红宝石棒的输出,且除去腔内光阑,以得到足够的曝光。

实验在普通的 SHPB 装置上而非光学防震平台上进行,又考虑到激光器氙灯触发及放电引起的震动,双脉冲的间隔应精确控制。然而, DJ-1 机内染料 Q 开关,在光泵开始工作后,需经一定的延迟时间后方使染料“漂白”,形成巨脉冲激光。实测这一延时为 $750\text{--}1000\mu\text{s}$, 这样的误差对同步要求很高的固体动力学实验来说是相当可观的。还有,谐振腔阈值取决于氙灯充电电压、放电网络 RC 参数、氙灯的状况、红宝石棒的增益和染料的浓度,这一烦琐的调试过程中亦需一直观的依据,来判断巨脉冲的形成与否。

作者自制的同步监控系统功能为: 1) $0.1\text{--}999.9\mu\text{s}$ 可调数字预延时; 2) 对单个红宝石棒的振荡进行监测,以确定谐振腔的阈值是否合适; 3) 对两个红宝石棒已形成的双个巨脉冲,进行高精度、大量程的测时。

小型石英晶体及与非门构成的振荡器,其稳定性极高的 10MHz 输出作为系统的时钟。以拨盘开关和 74LS160 组成的预选延时电路,以 $\pm 0.1\mu\text{s}$ 的误差给出延时,供同步调整及系统的自校。测时部分由 LCL601 新型组合器件和适当门电路构成,范围可达 1s , 足够覆盖通常的测试过程。为简化外光路布置及提高抗干扰性能,用远离激光器的单个光电探头检测先后的光脉冲信号,并设计了相应的掩蔽作用电路,以确保光脉冲的抖动不会被误认为是多个脉冲。考虑到调 Q 监视和实测的要求,由 74LS121 的外接阻容元件给出 $1\mu\text{s}$ 左右的掩蔽时间。实用表明,上述设计都是必要和成功的。

四、实验过程

试件为 LY-12 铝合金和 A-3 碳素钢。厚度为 3mm 和 2mm 的板材下料后,车成 $\Phi 70\text{mm}$ 的圆盘,用自制夹具固定于底座上。加载系统示意图见图 4。在弹性导杆尾端(即气枪子弹与导杆的直接撞击端)贴上应变片,尾端受子弹撞击后产生的动应变信号经 K54 超动态应变仪放大,由自制监控系统转换成需要的 TTL 电平送 DJ-1 型激光器外同步输入端;导杆中部的瞬态应变被 K54 另一前置放大通道送入 TCCJ-2000 瞬态波

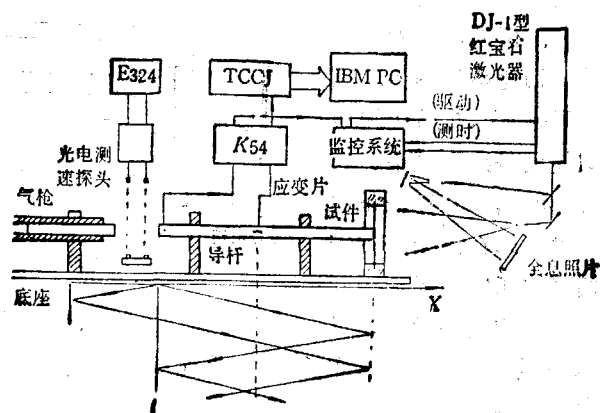


图 4

形存储器。IBM-PC/XT 机内接口将采集到的人、反射波形进行撞击力、速度、位移的计算。对于分离的人射波 $\varepsilon_I(t)$ 和反射波 $\varepsilon_R(t)$, 若规定压应变为正, 则按

$$F_s(t) = EA[\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t)] \quad (10a)$$

$$V_s(t) = C_0[\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t)] \quad (10b)$$

$$D_s(t) = \int_0^t V_s(\eta) d\eta \quad (10c)$$

可求出试件撞击处的加速度和位移波形。这里 E 、 A 、 C_0 分别为导杆的弹性模量、截面积和纵波波速。

上述方案直接使用的难点有二: 因装置长度所限, 无法安装长度至少为 3.5m 的钢制导杆, 以适应激光器触发和巨脉冲形成间至少为 700 μ s 延迟的同步要求; 普通 $\Phi 14.5$ mm 弹簧钢导杆和电阻应变片提取的信号按 (10a) 式计算所得的动载曲线抖动严重。文献 [6] 类似装置得到的力-时间曲线抖动的幅度已与力幅值相当, 以致于得不到应有信息。为此, 我们采用了如下改进方案: 用波速 2100m/s 的有机玻璃材料制成长度为 1498mm 的减速导杆与 $\Phi 8$ mm 的 60Si₂MnA 弹簧钢信号导杆相连, 以满足同步要求: 信号导杆中部贴有灵敏系数 100 的两片半导体应变片, 以提高信号对于高频噪声的信噪比; 这样, 即使 $\varepsilon_I(t)$ 和 $\varepsilon_R(t)$ 绝对值十分接近, 相减运算的结果仍远高于噪声。此外, 为使钢制子弹的撞击产生的是单个的人射脉冲以利入、反射波的分离, 还用了其长度声速比与钢子弹相同、材料与减速导杆相同的第二子弹。这种二级撞击方式使长度为 640mm 的信号导杆中部提取的人射脉冲虽类似钟形, 但基本上不致影响数据的处理。编制的 BASIC 处理软件, 具有图形处理、数据平滑、系统标定等多项功能。图 5 为第一子弹以 7m/s 速度撞击下, 试件的动载曲线。显然, 更长的子弹及导杆系统, 将可确定更长的载荷作用时间。

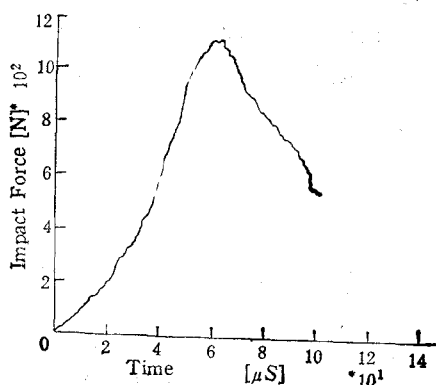


图 5

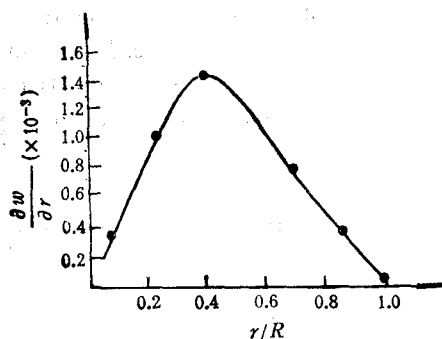


图 6

撞击后全息干涉图如图版 III 照片 1 所示, 时序为 0—8 μ s。因波前的微小挠度小于 $\lambda/4$, 对应波头的位置并不等同于按金属材料的弹性弯曲波速和剪切波速所估算出的位置, 这与文献 [1] 报告的情形是一致的。

离焦散斑干涉所用成像透镜焦距 f 为 75mm, 相对孔径 1/3.7, 照明方向与观察方向夹角约 12°, $M = 0.48$ 。当

$\delta v = 0.5$ mm, 板在撞击后 80 μ s 第二次曝光的散斑图, 逐点分析结果见图版 III 照片 2。这

里,因单脉冲方式工作的激光器第一次曝光时震动所致光束移动可等效为试件的刚体运动,我们用撞击中心和固支边界 $\frac{\partial w}{\partial r} = 0$ 这一假设,对图版 III 照片 2 沿某一直径所得的数据,进行了线性平行处理。得到的结果见图 6。此时, $\frac{\partial w}{\partial r}$ 峰值约 1.4 毫弧度,位置在 $r = 10\text{mm}$ 处,试件为 A-3 钢。

五、小 结

本文工作围绕近代实验力学有关技术的最新发展而进行,有关经验和技术均是有意义的探索;某些不足,亦可通过所用设备的改进而加以克服,使整套技术能更好地完善。因本课题是固体力学、结构动态响应、穿甲力学中十分重要的方向,这一研究虽为初步尝试,但可确信,这方面的实验研究,将随着器件、方法和技术方面的进步日益深入。

参 考 文 献

- [1] Aprahamian R. et al., *Exp. Mech.*, 1971, 11 (8):357.
- [2] Holloway D.C. et al., *Exp. Mech.*, 1977, 17 (18):231.
- [3] Chiang F.P. et al., SESA 1977 Spring Meeting, TX, 1977.
- [4] 伍小平等,物理学报,1980,29(9): 1142.
- [5] 国家专利局,发明专利公报, Int. Cl⁴. G03 H¹/04, 1985.
- [6] Li R.K.Y. et al., 6th Int. Conf. on Com. Materials, 1987.
- [7] 韩雷等,第六届全国实验力学会议论文集,1989,96.
- [8] 韩雷,第六届全国实验力学会议论文集 1989,686.

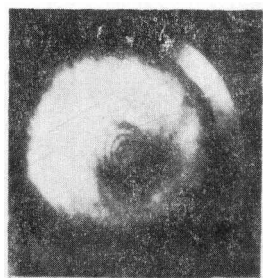
PULSED HOLOGRAPHIC AND SPECKLE INTERFEROMETRY TO INVESTIGATE THE DEFORMATION ON PLATES

Han Lei, Wu Xiaoping, Hu Shisheng

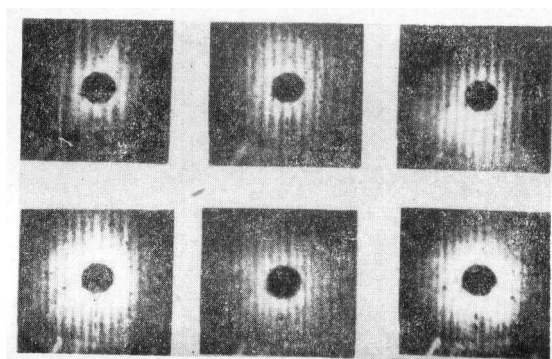
(University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China)

Abstract The major objective of this study is to investigate the dynamic experimental technique about the deformation of the finite-circular metal plates after normal impact. Holographic interferometry and defocus speckle photography are utilized to record the transient response of plates. Synchronization of the event with the pulses from the new type DJ-1 ruby laser is accomplished with the electronical equipment designed by the authors. Hopkinson type instrumented bar loading apparatus is used to determine the loading waveforms.

Key words pulse holography, dynamical speckle interferometry, ruby laser, Hopkinson apparatus, transverse impact



照片 1



照片 2