

# 爆炸载荷下大变形的阴影云纹测量术

张寒虹 胡晓军  
(中国科学技术大学)

**摘要** 本文介绍了用阴影云纹法测量爆炸载荷下铝板变形的方法及结果, 并进行了误差讨论和静态标定。

**关键词** 云纹法; 高速摄影; 测量变形。

## 1. 基本原理

阴影云纹有几种产生方式, 其中点照射、点接收式是简单易行的, 本文就是采用这种阴影云纹。其光路示意图见图1。参考栅是平面直线型栅, 放置在被测物体的前面。 $S$ 是点光源或平行于参考栅栅线的线光源。 $O$ 是观察点或相机物镜。在某些角度透过参考栅观察物体, 可以看到云纹。用 $D$ 表示光源与观察点的距离, 光源和观察点到参考栅平面的距离相等, 用 $L$ 表示。那么, 当试件尺寸远小于 $D$ 和 $L$ 时, 观察到的云纹代表一些等高线。同一条纹上的各点到参考栅平面的距离相等。第 $N$ 级亮条纹到栅平面的距离为

$$W_N = \frac{NL}{(D/P) - N} \quad (1)$$

其中 $P$ 为参考栅的节距。由公式(1)可见, 当 $D$ 和 $L$ 确定以后,  $N$ 级条纹的高度 $W_N$ 取决于 $P$ 。因此, 选用不同节距的栅板, 能够得到不同的测量范围和灵敏度。

阴影云纹法于1970年首先被用于测量静态下各种形状曲面的高度、离面位移; 梁、板、壳等构件的挠度和斜率。当物体受冲击载荷产生大挠度变形时, 只要在 $O$ 点放置高速摄影机, 使拍摄频率与变形速率相匹配, 就能记录一系列的阴影云纹图。由此得到各个时刻物体变形的形貌, 测定其变形量。

## 2. 实验与结果

试件为1毫米厚、80毫米×80毫米的合金铝板, 四角与背板固定, 在中心部分的背面安装爆炸丝。光源用线型脉冲氙灯。当爆炸丝爆炸时, 用高速转镜相机记录一系列爆炸加载下铝板变形过程的云纹形貌图, 见图2。拍摄频率为25万幅/秒, 相邻照片的时间间隔为8微秒。

测量 $D$ 、 $L$ 及 $P$ , 计算各级条纹的 $W_N$ , 再测量我们感兴趣的那些点在不同时刻的二维座标和条纹级数, 就能得到这些点的三维座标和运动轨迹。通过测量起爆后8微秒、40微秒、

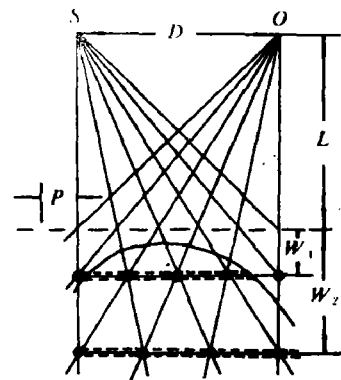


图1 点照射、点接收式阴影云纹原理图

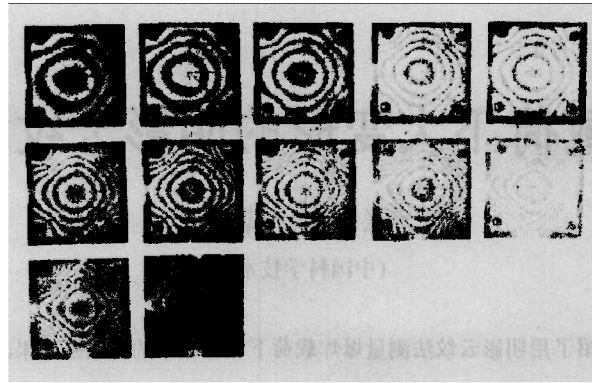


图2 爆炸加载下铝板变形的云纹图

72微秒的三幅照片，得到铝板中心正方形变形过程的三维图，见图3。

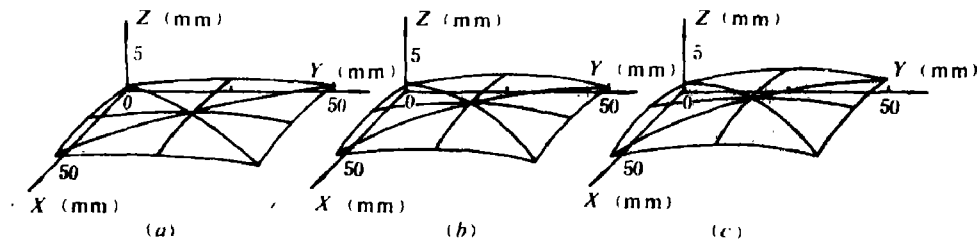


图3 爆炸加载下铝板变形过程

### 3. 误差讨论

#### 1) 间接测量误差

根据误差传递公式，求出高度 $W_N$ 的测量相对误差为

$$\frac{|\Delta W_N|}{W_N} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{D/P}{(D/P)-N} \cdot \frac{\Delta N}{N} + \frac{D/P}{(D/P)-N} \cdot \frac{\Delta D}{D} + \frac{D/P}{(D/P)-N} \cdot \frac{\Delta P}{P} \quad (2)$$

设 $D=400$  mm,  $L=500$  mm,  $P=0.5$  mm,  $N=10$

则有

$$\frac{|\Delta W_N|}{W_N} = \frac{\Delta L}{L} + 1.01 \frac{\Delta N}{N} + 1.01 \frac{\Delta D}{D} + 1.01 \frac{\Delta P}{P} \quad (3)$$

$\Delta L/L$ 、 $\Delta D/D$ 都约为1%；不考虑栅线的非均匀性时 $\Delta P/P$ 约为1%； $\Delta N/N$ 是一项较大的误差，直接读条纹级数时 $\Delta N$ 只能控制为不大于0.5， $\Delta N/N$ 随 $N$ 的增加而减小。设法避免读分数级条纹，可减小 $\Delta N/N$ 至2%，这样高度测量的相对误差可控制在5%。

#### 2) 系统误差

以上的讨论是针对(1)式为准确表达式而言的，事实上，它只是一个近似表达式。为了确认阴影云纹法在上述确定的光学配置下的测量系统误差，我们利用相同的光路测量了表面凹凸不平的试件，见图4(a)。四角 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 为四个平台，在同一平面内。除了这四个平台外，其余是横竖各五条深度不同的沟槽，沟槽交叉处形成高度、大小都不相同的四个金字塔形凸起I、II、III、IV见图4(b)，其阴影云纹图见图4(c)。

由图4(c)测量了各沟槽底及I、II、III、IV峰到 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 所在平面的高度，共

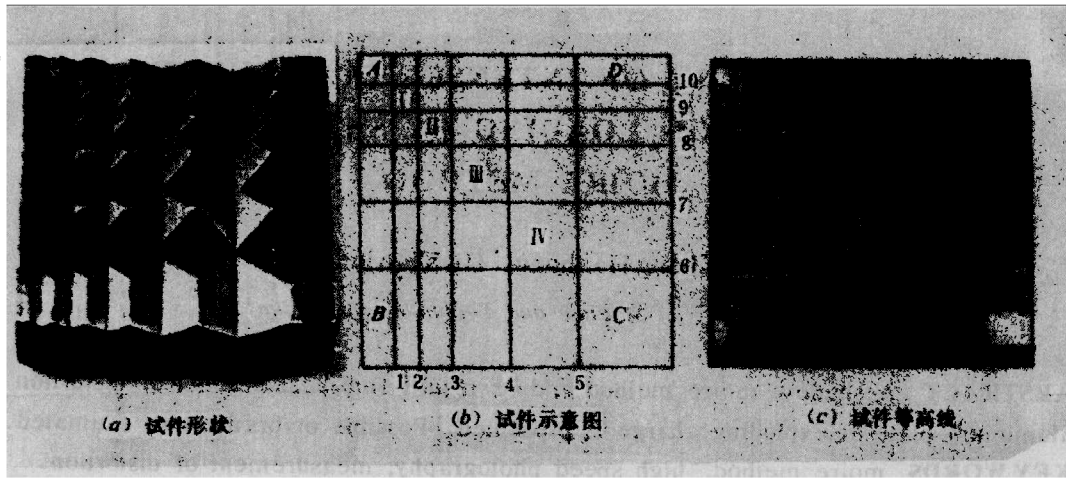


图 1

14个数据。再由安徽计量研究所用表面轮廓仪进行精密测量，两组数据列于表1。

表 1 高度测量数据表

测量值 测量方法	测量点	沟槽 1	沟槽 2	沟槽 3	沟槽 4	沟槽 5	沟槽 6	沟槽 7	沟槽 8	沟槽 9	沟槽 10	峰 I	峰 II	峰 III	峰 IV
	云纹法		1.4	2.2	3.3	1.8	5.5	5.7	4.6	3.2	2.2	1.4	0.4	0.9	1.2
表面轮廓仪		1.28	2.14	3.11	4.58	5.28	5.61	4.69	3.25	2.21	1.43	0.41	0.96	1.25	1.47
云纹法相对误差		9%	3%	6%	5%	4%	2%	2%	1%	0.2%	2%	2%	6%	4%	5%

由表1可见云纹法测量值的相对误差在5%以下的有11个，占总数的79%，相对误差在5%~10%之间的有3个，占总数的21%，没有误差超过10%的数据。

4. 结束语

综上所述，高速阴影云纹摄影在材料的动态和冲击问题研究中很有意义。它具有测量范围宽，测量面积不受限制、响应快，能提供全场信息，对材料本身没有影响，也没有特殊要求、适用于大变形及几乎所有工程材料、抗干扰能力强、能用于现场实物测量等特点。其测量精度满足一般动态实验的要求。由于莫尔条纹的边缘不太清晰，用人工判读难以获得更精确的数据，借助光电扫描，其精度可望提高。

参 考 文 献

[1] Fu-Pen Chiang *Moire method of strain Analysis* SESA manual on Experimental Stress Analysis 3rd Edition (1978).  
 [2] Zhang Han-Hong and Hu Xiao-Jun: *Application of high speed moire photography to dynamic measurement* SPIE Vol. 491.

---

**MEASUREMENT OF INTENSE STRAIN UNDER  
EXPLOSION LOADING BY SHADOW  
MOIRE METHOD**

**Zhang Hanhong Hu Xiaojun**

*(University of Science and Technology of china)*

**ABSTRACT** A shadow moire method and its results for measurement of distortion of aluminium plate at exploding charge is presented. Possible errors are also estimated.

**KEY WORDS** moire method, high speed photography, measurement of distortion.