

## 参 考 文 献

- (1) Tuler, F. R., et al., *Int. J. Frac. Mech.* 4 (1968), 431.  
(2) 科技大学爆炸力学教研室, 私人通讯 (1977).

## DETERMINATION OF SCAB THICKNESS AND CUMULATIVE CRITERION OF FRACTURE BY MANGANIN GAUGE TECHNIQUE

Wu Guodong Li Yin Liu Hongqing

Chi Jiachun Zhao Yuhua

## 国产箔式应变片的一种简易 动态标定技术

田兰桥 张 柯 段祝平

(1982年4月21日收到)

### 一、前 言

在高应变率下材料动力学性质的实验研究中,动态大应变的测量是一种不可缺少的技术。这里广泛采用箔式应变片来测量。但目前国产箔式片只给出在弹性范围内(约 $1\sim 3\times 10^3\mu\epsilon$ )的标定系数,能否将其推广到测量动态大应变中去(此时,应变率达 $10^2\sim 10^4$ 1/秒)是个急待解决的问题。段祝平等<sup>(1)</sup>提出了在SHPB装置上用残余应变法进行箔式片的动态标定技术。本文在此基础上进一步提出用SHPB技术进行箔式片的动态标定。

### 二、方法和原理

用分段Hopkinson压杆实验装置(即SHPB)进行箔式应变片动态标定方法如图1所示。实验在力学所火药枪实验室进行,表1给出了子弹、导杆和试件的几何尺寸及力学性质,实验时在试件中心位置同时对称地贴两个箔式应变片以消除弯曲效应影响。应变片阻值:  $120\Omega$

表1 试件、子弹和导杆的性能及尺寸

名称	$L$ (mm)	$\phi$ (mm)	$\rho$ ( $\frac{g}{cm^3}$ )	$C$ (m/s)	$V_c$ (m/s)
铝合金试件	$10^{+0.05}$ $14.5^{+0.05}$	$14.5^{+0.05}$	2.77	5340	17.06
18Ni子弹	302	14.90	8.02	5000	/
40Cr导杆	500	16.5	7.9	5050	/

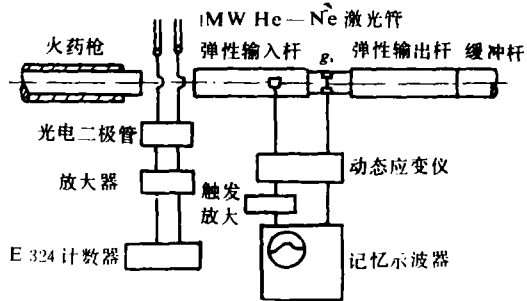
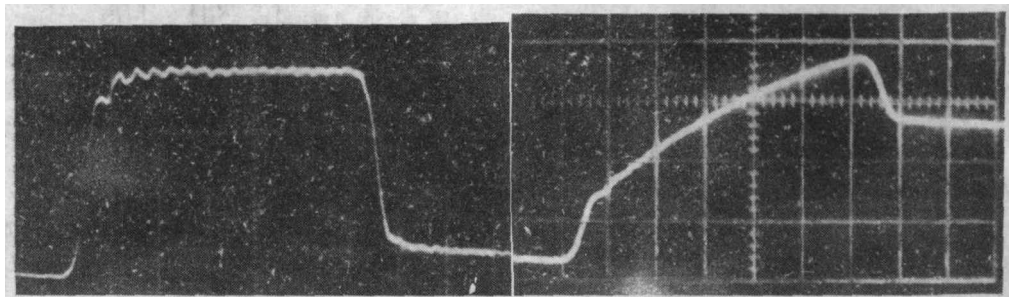


图1 箔式片的简易SHPB动态标定装置



照片1

照片2

这是实验中从试件获得的照片，扫描时间为 $20\mu s/\text{格}$ ，照片1表示开始冲击 $V_0 = 17.78\text{m/s}$ ；照片2表示产生大塑性变形， $V_0 = 24.70\text{m/s}$

$\sim 121.6\Omega$ ；规格： $2 \times 3\text{mm}^2$ ；出厂灵敏系数：2.05，七〇一所生产；粘胶用C X 122胶，粘贴后 $60^\circ\text{C}$ 保温三小时，自然冷却。当弹速 $V_0$ 到达和超过某一临界值 $V_c$ 时记录到塑性波，见照片1和2。从波形可知，试件的塑性变形如图2所示，一般经历四个阶段：弹性屈服(OA)段；塑性流动(AM)段；弹性卸载(MU)段和完全卸载，出现卸载平台(UF)段。假定：(1)卸载是弹性的；(2)塑性体积不可压缩；(3)由于子弹较长，对硬化指数较大的铝试件，从波导杆上记录到的波形可知，施加于试件的应力达到输入应力的幅值。利用一维波理论可知作用于试件上的最大应力为

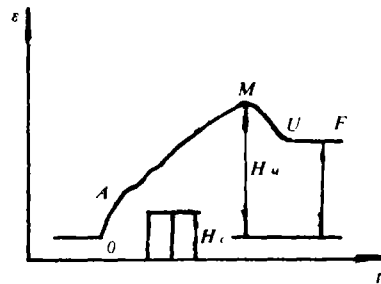


图2 试件上变形的四个阶段

$$\sigma_M = \left(\frac{r_g}{r_p}\right)^2 \frac{Z_g V_0^2}{\left[1 + \left(\frac{r_g}{r_p}\right)^2 \frac{Z_g}{Z_p}\right]} \quad (1)$$

其中 $r_p$ 和 $r_g$ 分别是子弹和导杆的半径， $Z_g$ 和 $Z_p$ 是导杆和子弹的弹性声抗， $V_0$ 是子弹速度，则试件上最大应变 $\epsilon_M$ 可表示为

$$\varepsilon_M = \varepsilon_M^e + \varepsilon_M^l = \left(\frac{r_x}{r_s}\right)^2 \frac{Z_s}{Z_s} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r_x}{r_p}\right)^2 \frac{Z_s}{Z_p}\right]} \frac{V_p^0}{C_s} + \ln \frac{l_{s0}}{l_{sp}} \quad (2)$$

其中 $r_s$ 是试件的半径, $Z_s, C_s$ 分别是试件弹性声抗和弹性波速。另一方面,实验中采用并联标定方法,如图3。如果应变片和标定电阻分别是 $R_x$ 和 $R_c$ ,则标定应变 $\varepsilon_c$ 和相应的应变值 $\varepsilon_M^*$ 分别为

$$\varepsilon_c = \frac{1}{K(1+R_c/R_x)}; \quad \varepsilon_M^* = \frac{H_M}{H_c} \varepsilon_c \quad (3)$$

$H_M$ 是应变片读数高度, $H_c$ 是标定应变高度。联立公式(2)和(3)可得灵敏度系数 $K$ 之公式是

$$K = \frac{H_M}{H_c \left(1 + \frac{R_c}{R_x}\right)} \left\{ \left(\frac{r_x}{r_s}\right)^2 \cdot \frac{Z_s}{Z_s} \cdot \frac{Z_p r_p^2}{(Z_p r_p^2 + Z_x r_x^2)} \frac{V_p^0}{C_s} + \ln \frac{l_{s0}}{l_{sp}} \right\}^{-1} \quad (4)$$

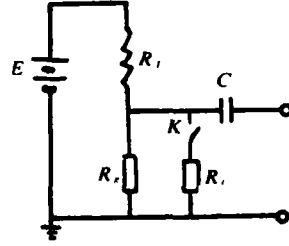


图3 应变测量的并联标定法

其中 $l_{s0}$ 和 $l_{sp}$ 是实验前后试件的长度。 $C_s$ 是试件弹性声速。 $Z_x, Z_s$ 和 $Z_p$ 分别是导杆、子弹和试件的弹性声抗。

### 三、实验结果

由公式(4)可知,在每次实验中,控制一定的子弹速度 $V_p^0$ ,可得到一定的 $l_{s0}$ 和示波记录波形的读数高度 $H_M$ 。改变 $V_p^0$ ,得到不同的 $H_M$ 和 $l_{s0}$ 。若实验证明, $K$ 值不随 $V_p^0$ 变化而变化。这就说明了国产箔式片的动态测量范围可以扩大。经过一系列实验得到的结果由表2给出。

表2 箔式应变片灵敏系数 $K$ 的动态标定数据

类别 试件号	$\frac{V_p^0}{C_s} \times 10^{-3}$	$\ln \frac{l_{s0}}{l_{sp}} \times 10^{-2}$	$\frac{H_M}{H_c}$	$\frac{R_c}{R_x}$	$\varepsilon_c^* \times 10^{-3}$	$\varepsilon_M \times 10^{-2}$	$K$	$\delta\%$ ( $\frac{K-K_m}{K}$ )
1-4	4.27	1.299	0.881	24.67	6.161	1.965	1.75	-14.8
1-8	4.05	1.075	1.763	49.34	6.318	1.707	2.05	0.00
1-11	4.38	1.504	1.116	24.67	6.827	2.187	2.00	-2.44
1-18	3.83	0.458	6.377	246.71	5.975	1.056	2.43	18.54
1-22	4.54	1.803	2.734	49.42	7.082	2.511	2.16	5.37
2-1	4.63	1.353	2.258	49.34	7.223	2.075	2.16	5.37
2-4	4.20	0.887	1.482	49.34	6.552	1.542	1.91	-6.83
2-8	4.64	1.815	1.338	24.71	7.238	2.539	2.06	0.49
2-9	5.04	2.784	1.818	24.71	7.862	3.570	1.98	-3.41
2-13	4.03	0.510	6.175	247.11	6.287	1.139	2.19	6.83
2-15	4.79	2.409	3.111	49.42	7.472	3.156	1.96	-4.39

备注 公式(4)中: $\left(\frac{R_x}{R_s}\right)^2 = 1.295, \frac{Z_s}{Z_p} = 0.985, \frac{Z_p}{Z_s} = 2.670, \left(\frac{R_x}{R_s}\right)^2 = 1.235, K_m = 2.05$

#### 四、讨论和结论

1. 本文提出了用 SHPB 装置和原理进行国产应变片在动态大应变下的标定技术, 应变率可达  $10^2 \sim 10^4$  1/秒。这种动态应变在一个时刻而不是整个波形的瞬态标定技术, 它和 Bell, Sharpe 等人<sup>[2][3]</sup>利用光栅法进行标定技术相比, 原理简单, 方便可行, 实验证明, 它将对今后国产大应变箔式片的研制提供一种方便简易的在高应变率下的动态标定技术;

2. 实验表明, 由七〇一所生产的箔式片, 在严格控制贴片工艺下, 经过这种简单标定技术证明, 应变片的测量范围可扩展到  $(3 \sim 4) \times 10^4 \mu\epsilon$ ,  $K$  值误差一般不超过 5%, 但片与片之间存在分散性;

3. 我们在火药枪实验装置上进行的标定, 实验的精度还是满意的, 但由于实验本身(导杆和子弹加工、实验中对心技术、试件初始和残余尺寸的测量、示波器照片的读数等)存在误差, 因此只有提高 SHPS 测试系统的实验精度才能进一步提高这种标定技术的精度。

#### 参 考 文 献

- [1] 段祝平, 孙瑞清, 杨大光, 田兰桥, 诸瑶, 力学进展, 10 (1) (1980), 1—16.
- [2] Bell, J. F., *Proc. Soc. Exp. Stress Anal.*, XVIII(2) (1960), 51—64.
- [3] Sharpe, W. N., Jr., *Exp. Mech.*, 10 (1970), 408—415.

## A SIMPLE DYNAMIC DEMARCATION TECHNIQUE OF CHINESE-MADE FOIL STRAIN GAUGE

Tian Lanqiao Zhang Ke Duan Zhuping