

文章编号: 1001-2486 (2000) 01-0094-04

平面动载实验中碰撞速度和倾斜度测试的一个方法*

卢芳云, 蔡清裕, 陈刚, 王志兵, 张振宇

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 平面动载实验中, 飞片碰撞速度和碰撞状态是加载条件的一个基本描述。本文采用电探针技术, 给出了一个同时测得真实飞片速度和碰撞倾斜状态的探针排布设计。此设计用于化爆产生平面动载的氮化硅粉体冲击波活化研究, 取得了较为理想的测试结果。

关键词: 速度测试; 电探针; 平面动载; 碰撞倾斜度

中图分类号: O384 文献标识码: A

A Method of Measuring Flyer Velocity and Impact Slant in Plane Dynamic Loading Experiments

LU Fang-yun, CAI Qing-yu, CHEN Gang, WANG Zhi-bin, ZHANG Zheng-yu

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In plane dynamic loading experiments, the velocity of flyer and state of impact are key parameters of loading condition. A technique of electric pins for measuring the above parameters is designed, aiming at deducing a real velocity of flyer and slant of impact from local records of pins signs through a certain arrangement of the pins. The method has been used in experiments of shock activating Si_3Ni_4 powder materials, and the results are satisfactory.

Key words: velocity measurement; electric pin technique; plane dynamic loading; impact slant

平面加载技术中, 飞片碰撞速度是提供加载条件的一个重要参数^[1]。对此, 已发展了不少测试方法, 如探针法、磁飞片法、闪光 X 射线法等等^[2,3]。它们被用于气炮加载系统的抛体速度测试, 显示出各自的优势。其中电探针法是用得最广泛、最为成熟的方法之一。它用于气炮或化爆加载系统的测试, 尤其在飞行片碰撞加载的倾斜状态监测时, 电探针技术显示出简便灵巧, 经济有效的独特魅力。在文献 [4, 5] 中给出了一种探针的排布设计, 可同时获得抛体速度和碰撞面之间倾斜状态的信息, 被用于气炮加载系统的精度分析^[4]。西南某研究所和国防科技大学在某型气炮的验收测试中, 采用了这种技术, 收到了理想的效果。在研究材料动态性能或物态方程时, 精确的加载条件测定是研究工作的一个关键前提, 故这类测试技术在冲击波物理研究领域具有显而易见的现实意义。

在文献 [4, 5] 中给出的探针设计的特点是: 将探针安装在过碰撞面中心、两相互垂直的直径上, 对称分布, 同一圆周上的探针高度相同。探针间的高度差给出飞片扫过探针的当地速度。然后从当地速度导出消除碰撞倾斜度后的真实飞片速度。碰撞的倾斜度和倾斜方位, 由同一高度不同位置分布的探针记录时刻差异得到。

这种设计用于加载系统的精度监测具有明显的优点, 但它要求探针正好分布在加载面上。若研究的目的和对象不允许我们在加载面上有任何干扰, 则这种设计就需修改了。例如在作平面动载粉末压实或平面冲击波活化研究时, 希望加载面上保持一致的加载条件, 避免探针的影响。若将三根高度不同的探针按高低顺序排列, 将出现测速误差, 且无法消除, 如图 1 所示, 很显然, 此时测得的速度将偏大。鉴于以上考虑, 我们设计了下面的探针排布方案, 即将探针安装在加载面的外围, 同时通过适当的高度和方位

* 收稿日期: 1999-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59602003)

作者简介: 卢芳云 (1963), 女, 副教授, 博士。

设计, 使我们可以从较少的探针信号分析出真实的飞片碰撞速度和碰撞状态。这种设计被用于国家自然科学基金项目“氮化物粉体的冲击波活化与烧结研究”的冲击波活化实验测试中, 获得了预期的效果。

1 探针排布设计和测试

探针设计的基本假设是: 飞片和靶板碰撞面是平的; 飞片从接触探针至撞靶期间, 其速度和倾斜度保持不变。探针对于飞片运动及其姿态的影响可忽略; 探针垂直于靶面安装; 飞片速度很高, 碰撞倾斜度很小, 以至飞片和靶板之间的碰撞线运动速度比靶中或飞片中冲击波速度快些。

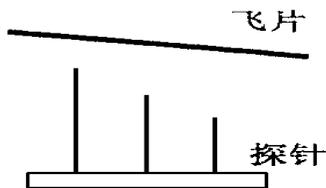


图1 测速失真的探针
Fig.1 The false pins system

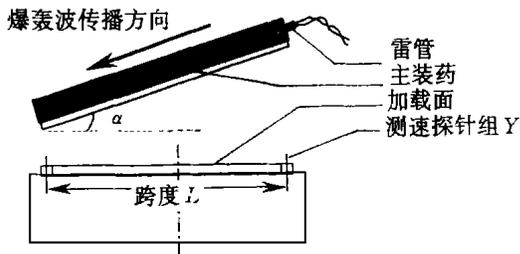


图2 实验装置示意图
Fig.2 Schematic diagram of the experiment set-up

实验中以炸药爆炸驱动飞片的鼠夹式平面加载实验为对象, 其实验装置见图2所示。设计探针系统的结构如图3所示, 其特点是: 垂直于起爆方向上安装两组平行的探针 X 和 Y, 跨度为 L。每组探针包括高、中、低三个探针(即 X 组的 A、B、C 和 Y 组的 a、b、c), 两两之间的高度差为 h, 间隔为 l, 探针 A - a 位于同一直径上。

探针安装时采用块规测量高度差, 以确保探针高度的精度和高度差的一致性, 块规的厚度误差为 0.002 mm。记录器使用 Tek 2 440 数字示波器, 带宽 400 MHz, 其记录时间分辨率为 0.002 5 μs。两个通道分别记录两组探针信号。用 t_a, t_b, t_c 或 t_A, t_B, t_C 分别表示各探针与飞片接触的时刻, 或探针闭合时刻, 记 $\Delta t_A = t_B - t_A, \Delta t_B = t_C - t_B, \Delta t_a = t_b - t_a, \Delta t_b = t_c - t_b, u_i = h / \Delta t_i, i$ 为 A, B, a 或 b。从而:

(1) 若无沿爆轰传播方向(即 a - A 方向, 以下称该方向为纵向)的碰撞倾斜度, 则 $|t_a - t_A| \equiv \Delta t_{a-A} = 0$ 。若无沿探针排列方向(即 B - C 或 b - c 方向, 以下称该方向为横向)碰撞的倾斜度, 则 $\Delta t_i = \Delta t(i = A, B \text{ 或 } a, b)$ 。这时可求得飞片速度 $u = h / \Delta t$ 。

(2) 否则: $\Delta t_A \neq \Delta t_B, \Delta t_a \neq \Delta t_b$, 并且可能还有 $\Delta t_{a-A} \neq 0$ 。这时, 当地速度 $u_i (i$ 取 A, B 或 a, b) 互不相等, 需要从测量到的 u_i 导出真实的飞片速度 u, 并分析出碰撞状态, 即横向和纵向的碰撞倾斜角, 由此可以解出碰撞轴的方位^[4, 5, 6]。

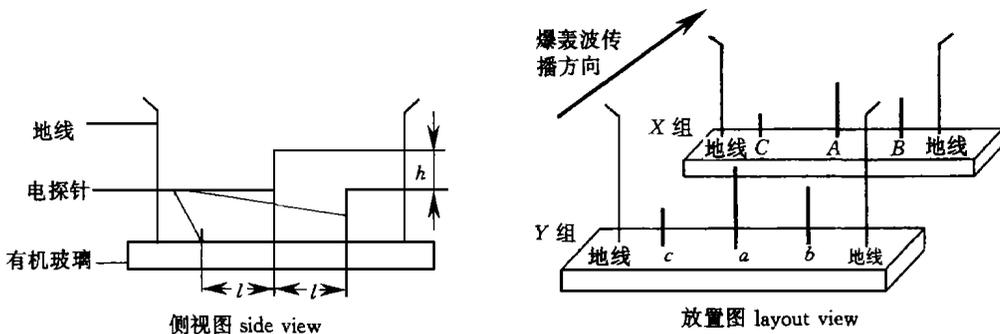


图3 探针结构设计
Fig.3 The design of velocity pins system

2 数据处理和误差分析

2.1 速度的获得和横向倾斜角 γ 的求解

以 X 组探针为例介绍速度的获得和横向倾斜角 γ 的求解。图 4(a) 中虚线为飞片无倾斜时的姿态, 粗实线为有 γ 角倾斜时的姿态。两种状态下飞片速度均为 u , 飞过相同探针间距的时间应该均为 Δt 。但由于有 γ 角, 使实际测到的 Δt_A 和 Δt_B 不相等。探针高度差 h 事先测定。若以 $u_A = h/\Delta t_A$ 和 $u_B = h/\Delta t_B$ 求飞片速度, 则两个值都带进了倾斜的影响, 不能反映真实的飞片速度。从图 4(a) 的几何分析可知,

$$\Delta t_A = \Delta t + \frac{l \cdot \tan \gamma}{u} \quad \Delta t_B = \Delta t - \frac{2l \cdot \tan \gamma}{u} \quad (1)$$

同理可设: $\Delta t_C = t_C - t_A = 2\Delta t - \frac{l \cdot \tan \gamma}{u}$ 和 $u_C = \frac{2h}{\Delta t_C}$ 由于

$$\frac{1}{u} = \frac{\Delta t}{h} = \frac{1}{3} \left[\frac{2(\Delta t + \frac{l \cdot \tan \gamma}{u})}{h} + \frac{\Delta t - \frac{2l \cdot \tan \gamma}{u}}{h} \right] = \frac{1}{3} \left[\frac{2\Delta t_A}{h} + \frac{\Delta t_B}{h} \right] = \frac{1}{3} \left(\frac{2}{u_A} + \frac{1}{u_B} \right)$$

$$u = \frac{3u_A u_B}{u_A + 2u_B} \quad (2)$$

飞片的碰撞倾斜角 γ 由(1) 中任一式解出:

$$\tan \gamma = u(\Delta t - \Delta t_A)/l = (h - u \Delta t_A)/l \quad (3)$$

以上 $\Delta t_i (i = A, B, C)$ 由示波器记录测得, h, l 事先测定。

于是, 由(2) 和(3) 分别获得了飞片的真实速度 u 和沿探针排布方向的碰撞倾斜角 γ 。

2.2 纵向碰撞倾角 β 的求解

若 $\alpha_{a-A} \neq 0$, 则存在纵向碰撞倾角 β , 如图 4(b) 所示。以两组探针中的两个探针 $A(X), a(Y)$ 为参考, 有:

$$\tan \beta = u \cdot \alpha_{a-A}/L \quad (4)$$

若两组探针测得的速度不同, 分别是 $U(X$ 组探针) 和 $V(Y$ 组探针), 则: 若 $t_a > t_A$ 有 $\tan \beta = V \cdot \alpha_{a-A}/L$, 这时 $\beta > 0$ (如图 4(b) 所示情形); 若 $t_a < t_A$ 有 $\tan \beta = U \cdot \alpha_{a-A}/L$, 这时 $\beta < 0$ 。

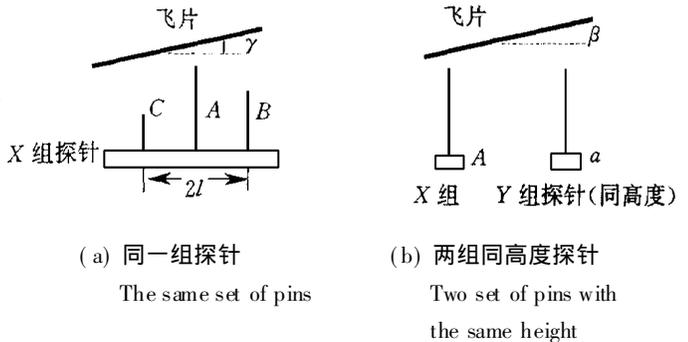


图 4 探针及飞片飞行状态示意图

Fig. 4 Relationship between pins and flying state of flyer

2.3 误差分析

测试系统的误差主要来源于长度测量和时间测试的误差。

(1) 对于速度测试误差, 由 $u_i = h/\Delta t_i$ 可分析知:

$$\left| \frac{\Delta u_i}{u_i} \right| \leq \left| \frac{\delta \Delta t_i}{\Delta t_i} \right| + \left| \frac{\delta h}{h} \right| \quad (5)$$

对于 $h = 4 \text{ mm}$, $u = 2000 \text{ m/s}$, 有 $\Delta t = 2 \mu\text{s}$, 此时示波器的采样率为 100 MHz , 故 $\delta \Delta t_i = 0.01 \mu\text{s}$, 又由于探针高度的测量误差为 $\delta h = 0.002 \text{ mm}$, 代入上式可得

$$\frac{\Delta u_i}{u_i} \leq \frac{0.01}{2} + \frac{0.002}{4} = 0.0055$$

$u_i (i = A, B, C$ 或 $a, b, c)$ 均具有以上精度, 而从(2) 式分析知:

$$\frac{\Delta u}{u} \leq \frac{\Delta u_i}{u_i} + \frac{2u_i \Delta u_i}{u_i^2} = 3 \frac{\Delta u_i}{u_i} = 0.0165$$

即速度测试的精度为 1.65% , 若 u_i 相差很小, 测试的误差会更小。

(2) 对于角度测试误差, 由(3) 式分析知(当 γ 很小时),

$$\left| \frac{\Delta \gamma}{\gamma} \right| \approx \left| \frac{\Delta \tan \gamma}{\tan \gamma} \right| \leq \left| \frac{\Delta l}{l} \right| + \left| \frac{\Delta u}{u} \right| + \left| \frac{\delta(\Delta t - \Delta t_A)}{\Delta t - \Delta t_A} \right|$$

当 $\gamma \approx 5 \text{ mrad}$, $l = 15 \text{ mm}$, 且 $\Delta l = 0.02 \text{ mm}$ 时有: $\frac{\Delta \gamma}{\gamma} \leq 0.038$, 即 γ 角的测试精度为 3.8%。

从(4) 式分析知:

$$\left| \frac{\Delta \beta}{\beta} \right| \approx \left| \frac{\Delta \tan \beta}{\tan \beta} \right| \leq \left| \frac{\Delta u}{u} \right| + \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| \frac{\Delta \delta t_{a-A}}{\delta t_{a-A}} \right|$$

对于 $\beta \approx 1.25 \text{ mrad}$ 的碰撞角, 若 $L = 160 \text{ mm}$, $\Delta L = 0.5 \text{ mm}$, 则 $\Delta \beta / \beta \leq 0.02$, 即 β 角的测试精度为 2.0%。所以, 此设计所测得的速度精度是很高的, 角度测试精度可以通过调整探针间距加以改进。

3 应用举例

在 Si_3N_4 粉末的平面动载冲击波活化实验中, 采用本方法进行了测试, 下面以某次测试中获得的实验数据为例来进行说明, 其数据和分析结果如表 1 所示。实验中 $h = 4 \text{ mm}$, $l = 15 \text{ mm}$, $L = 160 \text{ mm}$ 。

表 1 一次典型实验的数据记录及其分析结果

Tab. 1 The records and analyses results from a typical experiment

探针组	X			Y		
信号的时间间隔 (μs)	Δt_A	Δt_B	Δt_C	Δt_a	Δt_b	Δt_c
	2.74	3.50	6.24	3.0	4.46	7.40
测得的当地速度 ($\text{mm}/\mu\text{s}$)	u_A	u_B	u_C	u_a	u_b	u_c
	1.460	1.143	1.282	1.333	0.897	1.072
真实速度及其精度	$U(\text{mm}/\mu\text{s})$		$\Delta U/U$	$V(\text{mm}/\mu\text{s})$		$\Delta V/V$
	1.336		0.44%	1.154		0.39%
γ 及 γ 的精度	γ_A	$\Delta \gamma_A / \gamma_A$		γ_a	$\Delta \gamma_a / \gamma_a$	
	1.29°	1.6%		2.28°	1.1%	
δt_{a-A}				- 0.31 s		
β 及 β 的精度	$\beta = - 0.144^\circ$;			$\Delta \beta / \beta = 1.5\%$		

这次实验的测速精度为 0.4% 左右, 倾斜角的测试精度为 1.5% 左右。

4 结论

本文提出了一种利用电探针的合理设计, 同时测得平面动载实验中飞片速度和碰撞倾斜度。该方法能保证加载不受测试探针的影响, 从而确保加载平面上加载条件的一致性。

该方法从测试信号直接导出消除倾斜效应后的真实飞片速度, 并求出倾斜角。飞片速度为 2000 m/s 时, 测速精度为 1.65%; 横向和纵向的倾角分别为 5 mrad 和 1.25 mrad 时, 角度测试精度分别为 3.8% 和 2.0%。

该方法用于鼠夹式化爆平面加载的实验测试, 在 Si_3N_4 粉末的冲击波活化实验中取得了满意的效果。该实验的一次典型记录分析表明, 速度测试精度为 0.4% 左右, 角度精度在 1.5% 左右。

参考文献:

[1] Lawrence W. Measurement Problems in high-velocity impact experiments [R]. ADA105550, 1981.
 [2] Ken-ichi Kondo, Akira Sawaoka, Shinroku Saito. Magnetoflyer method for Measuring gas-gun projectile velocities [J]. Rev. Sci. Instrum., 1977, 48 (12): 1581-1582.
 [3] 经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
 [4] Smith J.H. Measurement of tilt impact velocity and Impact time between two plane surfaces [R]. SG-4728 (RR), 1962.
 [5] Mitchell A.C, Nillis W.J. Diagnostic System of the Lawrence Livermore National Laboratory two-stage Light-gas gun [J]. Rev. Sci. Instru., 1981, 52 (3).