

文章编号: 1001-1455(2002)02-0132-05

高压驱动研究方法的改进及其对质点运动的研究

言志信^{1,2}, 吴德伦¹, 王后裕¹, 郑周练¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;

2. 中南林学院建工学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 从分析二维运动的测试原理入手, 利用高速狭缝扫描摄影技术建立了测试系统, 该系统能获得二维运动的轨迹和速度, 从而把高速狭缝扫描摄影的研究领域由一维拓展到了二维, 并对不同种测试系统进行了比较。利用新的测试系统获得了物体运动的照片, 研究了质点高压下的运动, 同时, 获得了变形速度和变形角。

关键词: 测试; 扫描摄影; 质点速度*

中图分类号: O348.1 文献标识码: A

1 引言

爆炸产生的高压驱动周围介质使其加速或变形是一类重要爆炸现象, 它具有两个显著特点^[1]: 其一是爆炸荷载的大小与介质的运动是相互耦合的, 其二是介质运动的模型可根据情况做不同的选取和处理。而光学测试是对其研究的有效手段。

光学测试方法不仅具有极高的响应速率, 同时具有相当高的空间分辨率和时间分辨率, 借助各类高速摄像机, 能把物体的高速运动和变化过程拍摄下来, 利用力学原理可进一步推算应力、温度、密度以及材料的音速等^[2], 研究固体材料强冲击载荷下的性能, 在高速碰撞、爆炸力学、弹道学等广泛领域内成为最有效的研究手段之一。

常用的高速摄影方法有转镜式狭缝扫描摄影、转镜式分幅摄影和脉冲 X 光摄影, 分幅摄影对变化过程逐幅顺序不连续拍摄, 从而记录不同时刻变化过程的图象; 脉冲 X 光摄影是利用其极强的穿透能力, 从而获得实验对象内部的物理图象, 它与分幅摄影一样是逐幅不连续拍摄的; 狭缝扫描摄影能连续记录某过程的位移和速度^[3,4]等参量, 因此狭缝扫描摄影在定量研究中得到广泛的应用。

但是, 以往的狭缝扫描摄影局限于用来研究一维运动, 一定程度上限制了狭缝扫描摄影应用领域, 寻找狭缝扫描摄影方法研究二维运动规律将能使其研究领域大为拓宽。

2 二维运动的测试原理

对于高速变化过程的测量方法有多种, 一般而言, 都没能测得质点的真实速度。

在本文中, 我们所描述的原理是应用高速摄影狭缝扫描技术, 把高速变化物体表面质点的空间运动在两个不同方向的投影连续地扫描记录下来, 从而得到两个真实速度的分量, 进一步可得到质点速度。

如图 1 所示, M_1M_2 是被测物体的表面曲线, M 是 M_1M_2 的一个被测试点, n 是初始时刻被测物体表面上 M 的法线方向, τ 是任一时刻物体表面 M 的切线方向, 切线与水平方向的夹角为 θ 。 v 是 M 点的运动速度, v 的大小和方向都是随时间变化的连续函数, v 是 v 的大小, 所以 $v = v(t)$ 是连续函数, n 与 v 的夹角 $\delta = \delta(t)$ 也是时间的连续函数。

对于图 1 所示的 M_1M_2 , 可用高速狭缝扫描摄影技术连续地记录物体上质点运动轨迹在竖直方向

* 收稿日期: 2001-04-17; 修回日期: 2001-08-13

作者简介: 言志信 (1961—), 男, 博士研究生, 副研究员。

的投影；当其他实验条件不变，仅改变 θ ，质点 M 运动轨迹在竖直方向的投影也随之改变；由这两个投影可分别求得相应的速度投影，应用矢量运算法则，可得质点 M 的速度矢量大小和方向。

具体推导如下：如图 2 所示， v_1 、 v_2 是分别与 θ_1 、 θ_2 相对应的速度，因为实验条件相同，所以 v_1 、 v_2 大小相等，只是方向不同，即

$$|v_1(t)| = |v_2(t)| = |v(t)| = v(t) \quad (1)$$

v_1 与 v_2 的夹角为 β ； n_1 、 n_2 分别对应于 θ_1 、 θ_2 ，是初始时刻物体上 M 的法线； $\delta(t)$ 是抛掷角，它是 n_1 与 v_1 或 n_2 与 v_2 的夹角； $\alpha - \alpha(t)$ 表示 v_1 与竖直方向的夹角。由几何关系，可得 $\beta = \theta_2 - \theta_1$ 。

用 $v_{1y}(t)$ 、 $v_{2y}(t)$ 分别表示 $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$ 在竖直方向的投影。由图 2 可得

$$\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right) + [\alpha(t) + \delta(t)] = \frac{\pi}{2}$$

即 $\alpha(t) = \theta_1 - \delta(t) \quad (2)$

同理 $\alpha(t) = \theta_2 - \delta(t) - \beta$

而 $v_{1y}(t) = |v_1| \cos \alpha = |v_1| \cos[\theta_1 - \delta(t)] \quad (3)$

$$v_{2y}(t) = |v_2| \cos(\alpha + \beta) = |v_2| \cos(\theta_2 - \delta(t)) \quad (4)$$

将式(1)、(3)、(4)联立，解得

$$\delta(t) = \arctan \left[\frac{\cos \theta_1 - \alpha(t) \cos \theta_2}{\alpha(t) \sin \theta_2 - \sin \theta_1} \right] \quad (5)$$

式中 $\alpha(t) = v_{1y}(t)/v_{2y}(t) \quad (6)$

$$v(t) = v_{1y}(t)/\cos[\theta_1 - \delta(t)] \quad (7)$$

由此可知，只要能测得 $v_{1y}(t)$ 和 $v_{2y}(t)$ ，那么由公式(5)、(7)即可求得物体表面质点速度的大小和方向。

3 测试系统

根据上述原理，可以建立图 3 所示的测试系统^[3]，试件形状可以是板、管等；光源可依不同实验情况选择闪光光源、连续光源(如聚光灯)或者采用爆炸光源，总之光源应有足够的强度以保证胶片充分曝光。本研究采用的是爆炸光源，实验中，试件与光源同时起爆，获得了试件加速过程的规律。

但是，为了获得试件质点真实运动轨迹和速度，必须在仅改变 θ 角而其它条件

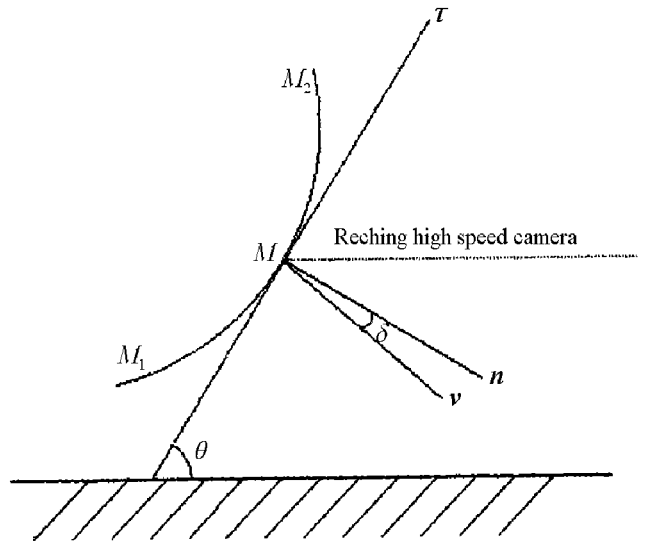


图 1 测试原理图

Fig. 1 Sketch of testing principle

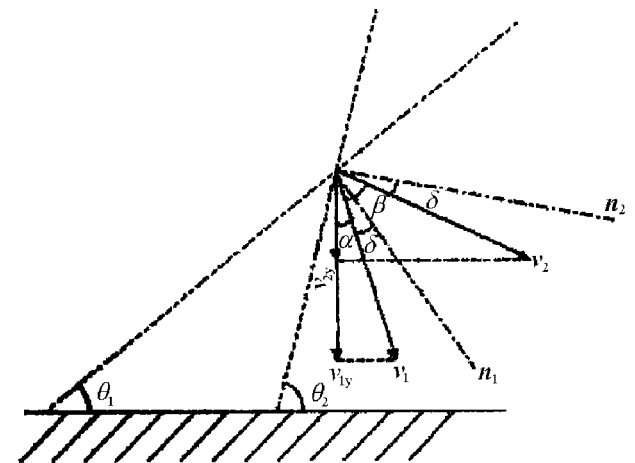


图 2 公式推导图

Fig. 2 Sketch of formula derivation

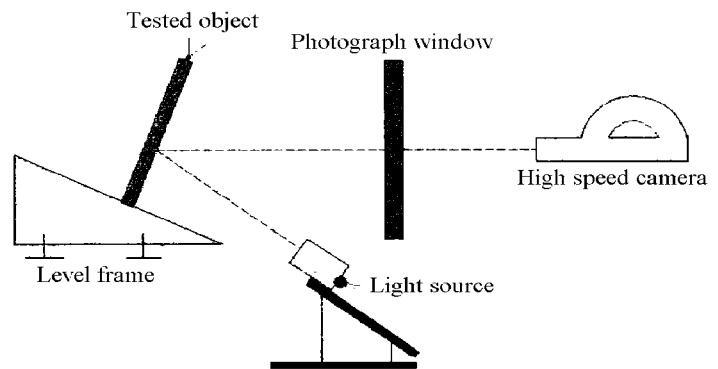


图 3 测试系统图

Fig. 3 Sketch of testing system

不变的情况下重复实验,然后由两次实验数据而得质点速度大小及方向。显而易见本系统根本问题在于:两次试验试件不可能完全相同;另外底片判读时间不可能严格对应。鉴于此,本研究对图 4 的测试系统进行了试验,并且对高压作用下凹形圆锥面内表面不同质点加速度过程进行了高速狭缝扫描摄影研究,虽然形状特殊且实验具有破坏性,但测试仍获得成功,摄影照片如图 5 所示。

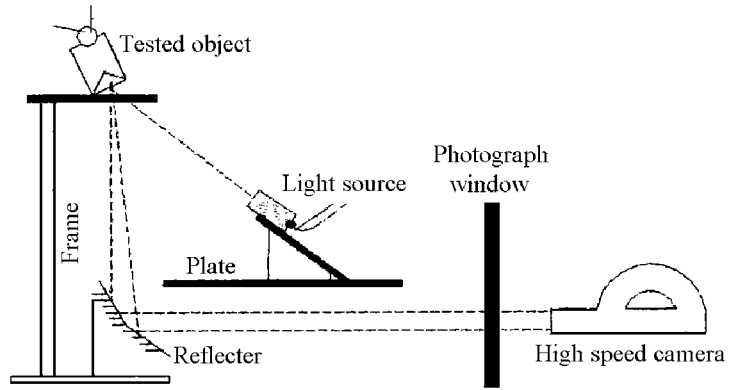


图 4 改进后的测试系统图

Fig.4 Sketch of improved testing system

图 4 所示测试系统采用两块反射镜,使质点 M 同时成两个像于胶片上,设两反射镜之间的夹角为 φ ,由光学反射定律知,试件两个像的初始角 θ_1 和 θ_2 相差 2φ , φ 应根据胶片宽度及反射镜,试件到高速摄影机距离等确定,对于 35mm 胶片,一般取 φ 为 $7^\circ \sim 9^\circ$ 为宜^[6]。

摄影时应保证测试系统支架呈水平状态,为此可通过水平架灵活调节,此外,确保两反射镜按要求配置,以保证质点的像能成在高速摄影机的狭缝上,这样才能做到一个质点同时成两个像。

对于试件,应进行适当的标记,可采用喷漆、照相制板或金属表面处理等方法。由于实验具有破坏性,本研究采用的爆炸光源是 8701 炸药、硝酸钡、铝粉压制成 $\phi 40$ 的药柱,为提高光强度,可用镁粉。

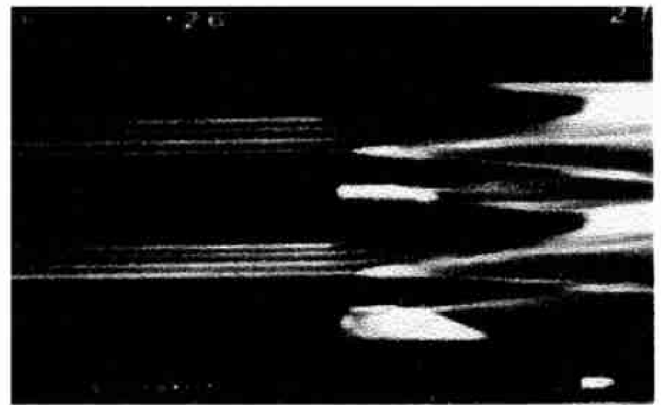


图 5 改进后系统所摄照片

Fig.5 Photograph of experiment of improved testing system

4 质点运动速度研究

采用我们建立的测试系统,对 45 号钢制等厚和变厚药型罩运动规律进行了研究。实验中采用经反复试验研制成功的爆炸光源,有效提高了摄影光强度;通过车床车制圆环,进行金属表面处理,然后利用油石磨去凸环的氧化膜,导致黑白环相间,从而标记出需测速度的质点。我们对等厚和变厚药形罩进行了几十次实验,其中两个较典型实验为:(1)等厚罩 $\phi 40\text{mm}$,锥角 140° ,质量 22.7g,装 65g8701 炸药,装药密度为 $1.648\text{g}/\text{cm}^3$,初始角为 $\theta_1=48.7^\circ$ 及 $\theta_2=64.2^\circ$; (2)变厚罩 $\phi 40\text{mm}$,内锥角 140° ,外锥角 130° ,质量 21.1g,装 65g8701 炸药,装药密度为 $1.648\text{g}/\text{cm}^3$,初始角为 $\theta_1=48.5^\circ$ 及 $\theta_2=64.1^\circ$ 。为便于说明问题,我们选定锥形罩顶点为 $l=0$,沿其形成线(母线)距这点的距离记为 l ,而本文所说的抛掷角(变形角)指的是锥形罩形成线(母线)上某点处的

表 1(a) 等厚罩的变形速度

Table 1(a) Projection velocity of same thick covering

l/mm	$v/(\text{mm}/\mu\text{s})$					
	$t/\mu\text{s}$					
	0.528	1.584	2.640	3.696	4.752	5.808
7.28	0.426	1.039	1.423	1.672	1.830	1.931
9.02	0.409	0.997	1.372	1.612	1.765	1.862
13.52	0.364	0.887	1.221	1.434	1.570	1.657
15.20	0.349	0.851	1.171	1.375	1.506	1.589

表 1(b) 等厚罩的变形角

Table 1(b) Projection angles of same thick covering

l/mm	$\delta/^\circ$					
	$t/\mu\text{s}$					
	0.528	1.584	2.640	3.696	4.752	5.808
7.28	1.840	4.439	6.057	7.066	7.694	8.084
9.02	1.818	4.394	6.007	7.017	7.650	8.037
13.52	1.711	4.159	5.711	6.695	7.319	7.714
15.20	1.650	3.984	5.478	6.431	7.037	7.331

压垮方向与罩变形前该点处法线方向所夹的锐角,从爆轰到达标记点微元时刻记为 $t=0$ 。

由狭缝扫描拍摄的实验照片,在投影仪上即可测量在一定时间间隔内各质点的位移,从而计算出 v_{1y} 及 v_{2y} ; 用式(7)和式(5)可得罩壁上各点随 t 和 l 变化的速度大小 v 和变形角 δ 。对于等厚罩的测量结果如表 1(a)和(b)所示,变厚罩的测量结果如表 2(a)和表 2(b)所示。

由实验结果可知,无论是等厚还是变厚药型罩,罩上质点速度均随时间 t 和形成线 l 而变化。同一时刻, l 增大, v 减小,同时 l 增大, δ 减小。 l 不变, v 和 δ 随 t 的变化均具有指数曲线特征。但等壁厚比变壁厚罩的 v 、 δ 随 l 变化快些。

表 2(a) 变厚罩的变形速度

Table 2(a) Projection velocity of changing thick covering

l/mm	$v/(\text{mm}/\mu\text{s})$					
	$t/\mu\text{s}$					
	0.528	1.584	2.640	3.696	4.752	5.808
7.20	0.366	0.901	1.252	1.482	1.633	1.732
8.30	0.359	0.885	1.225	1.449	1.595	1.690
13.70	0.338	0.821	1.126	1.319	1.441	1.518
14.80	0.331	0.804	1.097	1.284	1.401	1.475

表 2(b) 变厚罩的变形角

Table 2(b) Projection angles of changing thick covering

l/mm	$\delta(^{\circ})$					
	$t/\mu\text{s}$					
	0.528	1.584	2.640	3.696	4.752	5.808
7.20	1.255	3.133	4.399	5.237	5.811	6.198
8.30	1.255	3.122	4.371	5.208	5.767	6.142
13.70	1.243	3.102	4.350	5.189	5.686	6.003
14.80	1.221	3.084	4.342	5.099	5.575	5.876

5 讨 论

(1) 本文测试原理的探讨及测试系统的建立,使过去限于一维高速运动研究的狭缝摄影,拓展到二维运动。

(2) 对于图 3 所示的测试系统,每得到一组数据从而得到质点速度,需要重复做两次实验,由于试件加工的差别、药量及装药的差别、标记的不对应,由此而产生最后结果误差是必然的,事实上是不可能测得质点真实速度的。对于图 4 所示的测试系统,在一张胶片上得到的两个像是一个质点在一个方向上运动而在两个方向的投影,这就从根本上消除了以上系统误差。

(3) 图 3 所示系统拍摄到的运动投影的两个分量处在两张底片之上,因此判读时间不可能完全对应。而图 4 所示系统的一个质点在一个底片上同时成两个像,因此系统 4 消除了系统 3 导致的时间不对应误差,从而也消除了由此引起的其它误差。

(4) 测试系统 4 与测试系统 3 相比,实验损耗小,效率高。

(5) 从实验结果可知,速度大小 v 和变形角 δ 均随 l 增大而减小。

(6) 同样从实验结果可知, l 一定, v 和 δ 随 t 的变化而均具有指数规律。

(7) 等厚罩的 v 和 δ 随 l 的变化快;变厚罩 v 和 δ 随 l 变化慢。

参考文献:

- [1] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用[M]. 北京:国防工业出版社, 1979.
- [2] 孟吉复, 惠鸿斌. 爆破测试技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 1990.
- [3] John F P. Data Reduction from Cylinder Expansion tests[A]. Joseph E B Jr. 6th Int Symp on Ballistics[C]. Orlando Florida: American Defense Preparedness Association, 1981. 135—141.
- [4] Bjarnholt G. Effects of Aluminum and Lithium Fluoride Admixture on Metal Acceleration Ability of Comp B[A]. David J E. The 6th Symp Int on Detonation[C]. Arlington, Virginia: Office of Naval Research—department of the Navy, 1976. 510—520.
- [5] 李世宏. 二维拉氏光测法对药型罩压垮的研究[D]. 北京:北京理工大学, 1986.
- [6] 言志信. 爆炸驱动的实验研究和理论分析[D]. 北京:北京理工大学, 1991.

Improvement of High Pressure Driveing Research Method and Study on Velocity of Article Motion

YAN Zhi-xin^{1,2}, WU De-lun¹, WANG Hou-yu¹, ZHENG Zhou-lian¹

(1. *Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;*

2. *Faculty of Civil Engineering of CSFU, Changsha 410000, Hunan, China*)

Abstract: By analysing the testing principle of two dimensional particle motion and applying the technology of high speed narrow gap scanning photography, a new testing system has been established. This system can acquire the locus and velocity of two dimensional particle motion. Thus the new testing system has widen the studying field of high speed narrow gap scanning photography from one dimension to two dimension. The author has compared two kinds of testing systems and gotten the photographs of body movement by using new testing system. Article motion has been studied under high pressure. At the same time, projection velocity and projection angles have been acquired.

Key words: testing; scanning photogaphy; particle motion