文章编号：1001-1455(2002)01-0026-04

爆炸驱动下飞板运动速度的实验研究

黄风雷，段卫东，恽寿榕
（北京理工大学爆炸灾害预防控制国家重点实验室，北京　100081）

摘要：在理论分析的基础上，建立了双反射镜法实验测量系统，设计了一套实验装置和闪光灯充电电路，解决了双反射镜实验中被测试件的安装精度和外照明光源问题。实验测量了滑移爆轰作用下，不同爆炸焊接复板材料的运动速度，结果表明该方法有效实用。

关键词：爆炸焊接；高速摄影；滑移爆轰
* 中图分类号：O383　　文献标识码：A

1　引　言

爆炸焊接是通过两块金属板的斜碰撞实现的，复板与基板碰撞时速度的大小及方向直接影响到爆炸焊接的质量。因此爆炸驱动下复板的运动规律一直是人们关注的对象，许多国家的科学工作者都对此进行过大量的研究[1-4]。目前用于测量爆炸驱动下飞板运动的方法主要有二种[5]：一种是电测法，一种是光测法。利用电测法测量时，一般假定抛体的运动方向是已知的，然后在假定的抛体运动方向上安装探针。实际爆炸驱动下飞板的运动方向在不断地变化，具体位置事前很难确定，因此，电测法实际测得的是爆炸驱动下飞板上不同点的近似平均速度，而不是飞板上某一点的真实运动速度。光测法又分为可见光照像和射线照像两种。可见光照像主要是指利用高速摄影机进行分幅或狭缝扫描记录下抛体的运动过程。高速相机能使高速瞬间过程在空间的时间上展开，有利于对现象的全过程进行详细观察。高速摄影克服了电探针法和 X 光照像法只能作间歇测量的缺陷，能够连续记录质点的运动过程，可提供任意时刻质点运动的有关信息。我们建立的双反射镜测量系统，成功地测量了爆炸驱动下飞板的运动速度。

2　双反射镜法测试原理

双反射镜法是一种直接测量抛体表面质点运动轨迹的拉氏方法，如图 1 所示。它利用平面镜成像原理，将一个抛体用两个与水平面成不同角度放置的平面镜，生成两个与水平面成不同角度的虚像。图中 α_1、α_2 分别表示平面镜 1、2 与水平面的夹角，α_3 为抛体与水平面的夹角，$1'$、$2'$分别表示抛体在平面镜 1、2 中的成像，θ_1、θ_2 分别表示 $1'$、$2'$与水平面的夹角，根据简单的光学成像理论可知

$$\theta_1 = 180^\circ - 2\alpha_1 - \alpha_3 \qquad \theta_2 = 180^\circ - 2\alpha_2 - \alpha_3 \tag{1}$$

当高速摄影机对准两个反射镜时，就可以将记录一个抛体在爆炸驱动下的运动变为记录两个不同角度像的运动。双反射镜法只要一发实验，就可以得到同一个点的两个不同像，完全消除了不同试件两次实验带来的误差，同时因为两个像成在同一张底片上，保证了对应点时间的一致，减小了判读误差。

双反射镜法是对抛体的同一质点测量其两个不同角度所成的像的运动轨迹，如图 2 所示。$\boldsymbol{v}_1$、$\boldsymbol{v}_2$ 是抛体上同一质点对应成像 $1'$、$2'$的速度，它们大小相等，但方向不同，即

$$|\boldsymbol{v}_1(t)| = |\boldsymbol{v}_2(t)| = \boldsymbol{v}(t) \tag{2}$$

* 收稿日期：2001-11-18；
作者简介：黄风雷(1965－　)，男，博士，教授，博士生导师。

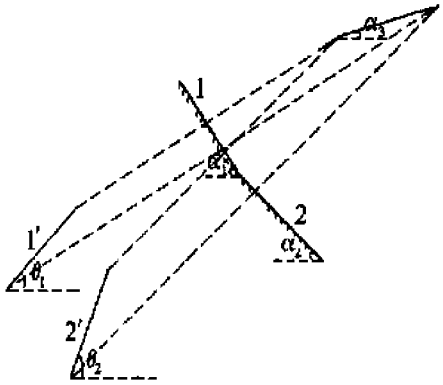


图 1　双反射镜成像示意图

Fig.1　Sketch of double-illuminator imaging

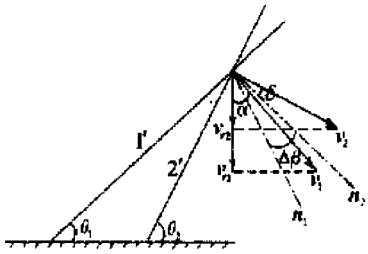


图 2　质点运动速度图

Fig.2　Sketch of particle moving velocity

$\boldsymbol{v}_1(t)$与 $\boldsymbol{v}_2(t)$相差一个角度 $\Delta\beta = \theta_2 - \theta_1$。

$\boldsymbol{n}_1$ 是成像 $1'$上被测质点的法线方向，$\boldsymbol{n}_2$ 是成像 $2'$上被测质点的法线方向；δ是定义的抛掷角，它是指 $\boldsymbol{v}_1$ 与 $\boldsymbol{n}_1$ 或 $\boldsymbol{v}_2$ 与 $\boldsymbol{n}_2$ 之间的夹角；α 为$\boldsymbol{v}_1$ 与垂直方向的夹角。$v_{y1}(t)$、$v_{y2}(t)$分别为 $v_1(t)$、$v_2(t)$在垂直方向上的投影。从图 2 中可知

$$\alpha(t) = \delta(t) + \theta_1 \tag{3}$$

即

$$v_{y1}(t) = |\boldsymbol{v}_1|\cos\alpha = |\boldsymbol{v}_1|\cos(\theta_1 + \delta(t)) \tag{4}$$

$$v_{y2}(t) = |\boldsymbol{v}_2|\cos(\alpha + \Delta\beta) = |\boldsymbol{v}_2|\cos(\theta_2 + \delta(t)) \tag{5}$$

由公式(4)、(5)得

$$\frac{v_{y1}(t)}{v_{y2}(t)} = \frac{|\boldsymbol{v}_1|\cos(\theta_1 + \delta(t))}{|\boldsymbol{v}_2|\cos(\theta_2 + \delta(t))} \tag{6}$$

将式(2)代入式(6)有

$$\frac{v_{y1}(t)}{v_{y2}(t)} = \frac{v(t)\cos(\theta_1 + \delta(t))}{v(t)\cos(\theta_2 + \delta(t))} = \frac{\cos\theta_1 - \sin\theta_1\tan\delta(t)}{\cos\theta_2 - \sin\theta_2\tan\delta(t)} \tag{7}$$

令 $a(t) = v_{y1}(t)/v_{y2}(t)$，代入式(7)整理，可得

$$\delta(t) = \arctan\left[\frac{\cos\theta_1 - a(t)\cos\theta_2}{\sin\theta_1 - a(t)\sin\theta_2}\right] \tag{8}$$

将式(8)代入式(4)得

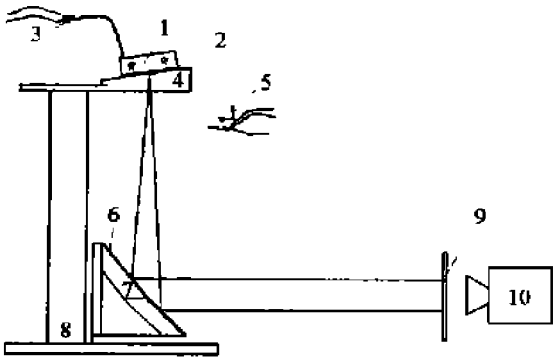
$$v(t) = v_{y1}(t)/\cos(\theta_1 + \delta(t)) \tag{9}$$

利用高速摄影测得质点上任一时刻的 $v_{y1}(t)$和 $v_{y2}(t)$，根据公式(8)和(9)就可以算出任一时刻抛体表面被测质点运动速度的方向和大小。

3　测试系统

为了确保得到清晰图像，提高测试精度，并且保证测试过程中不损坏高速摄影机和其它设备，本实验建立了如图 3 所示的测试系统。

选用工业上爆炸焊接使用最广泛的 2#岩石炸药作为实验用药。实验中分别以爆炸焊接使用最多的黄铜、不锈钢、钛和 A3 钢板作为被测试件，测试每一种材料在四种不同的装药量作用下的运动情况。



1. Explosive; 2. Sample; 3. Detonator; 4. Supporting plate; 5. Flash lamp; 6. Reflecting mirror; 7, 8. Supports of reflect mirror and sample; 9. PMMA window; 10. High speed camera

图 3　测试系统示意图

Fig.3　Sketch of measurement system

为了对被测试件表面质点的运动进行有效测量，必须对试件表面的质点位置作标记。试验采用在试件表面用油漆绘制等间距黑白条纹的方法来作标记点。

在实验中，被测试件是不发光的，为了获得被测试件理想的运动图像，需要一个足够强的外发光光源来为被测试件提供照明。为此，实验研究了碘钨灯、爆炸光源、闪光灯等作为外光源的可能性。用1kW 碘钨作光源，亮度远远不够，不能使高速摄影机中的胶片感光；用爆炸光源作外光源时，光源强度够，但存在成像质量较差、有剧毒等问题。经过反复试验、比较，实验采用闪光灯作为辅助光源，并设计了闪光灯电路。

图4为采用闪光灯作辅助外光源时被测试件的静止像。从静止像上可以看到，标记条纹黑白分明，边界清晰，成像质量很高。采用双反射镜法时，被测试件的运动是通过反射镜改变光路后，以反射镜中成像的运动形式由高速相机记录下来的。因此，反射镜的质量对成像效果有很大影响。

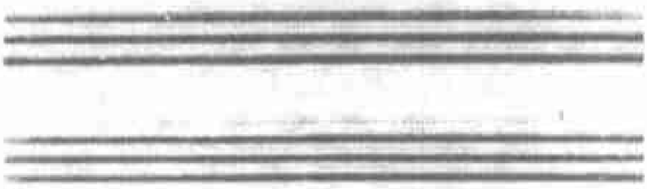


图4 被测试件静止像

Fig.4 Station ary image of testing

实验中使用国产GSJ转镜式高速相机。GSJ的转速从5～75kr/min连续可调，因为复板运动速度较慢，测试时选用转速为7.5kr/min。

4 实验结果与分析

图5是各种材料的典型高速摄影照片。照片中的黑白条纹与试件上的黑白条纹相对应，照片上方的三条黑白条纹记录的是测点在反射镜1中的成像1′的运动迹线，照片下方的三条黑白条纹记录的是测点在反射镜2中的成像2′的运动迹线。

将高速摄影底片在投影仪上放大20倍，根据成像1′或成像2′中三条黑白条纹运动的不同起始位置，可以得出各种实验装药条件下2#岩石炸药的爆速，如表1所示。

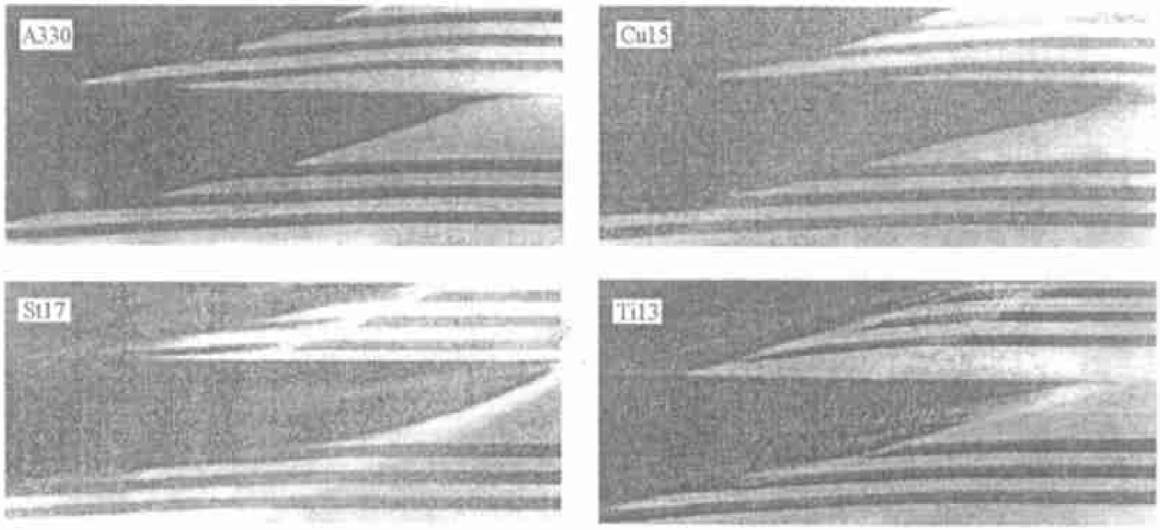


图5 不同材料的高速摄影照片

Fig.5 High speed scanning records of several materials

表1 不同实验装药条件下2#岩石炸药的爆速

Table 1 Blasting velocity of 2# rock explosive under various conditions m/s

A315	A320	A325	A330	Stl7	Stl10	Stl13	Stl16	Cu10	Cu15	Cu20	Cu25	Ti9	Ti13	Ti17	Ti21
1286	2536	2658	2769	2114	2223	2324	2415	2223	2398	2521	2647	2184	2327	2458	2560

通过对实验结果进行分析可以发现，滑移爆轰作用下，飞板运动具有以下特点：

(1)在同一时间 t 下，反射镜 1 中成像的运动速度 v_{y1} 大于反射镜 2 中成像的运动速度 v_{y2}。这是因为反射镜 1 与水平面所成的夹角 θ_1 小于反射镜 2 与水平面所成的夹角 θ_2。

(2) 在爆轰波到达到测点的初期，飞板速度几乎呈线性迅速增长，但随着时间的增加，飞板运动的增长速度越来越小，飞板速度在几到十几微秒的时间内达到一个稳定值。

(3)同一种试件，装药量越多，即装药质量比 R 越大，飞板的加速段时间、最大运动速度 v_{max} 和最大变形角 δ_{max} 也越大。

(4) 对装药质量比 R 不同的同一种试件，在爆轰波到达测点的初始几微秒的时间内，飞板运动速度增加的快慢程度，即复板的加速度基本相同；对不同的试件，在爆轰波到达测点的初始几微秒的时间内，飞板的加速度与单位面积飞板的质量成反比，即复板越厚、密度越大，飞板速度增加越缓慢。

(5) 爆炸作用下，飞板到达稳定运动速度所需要的时间 t_{up}，随装药厚度的增加而增加，装药质量比 R 对 t_{up} 的影响不大。实际上，飞板加速段的时间主要由装药表面产生的稀疏波到达飞板表面的时间 t' 决定，而 t' 主要与炸药的爆速和装药厚度有关。

(6) 与高爆速炸药相比，低爆速炸药爆炸驱动下飞板达到同一运动速度所需的加速段时间大约要多一倍。

(7) 爆炸驱动下，飞板运动的变形角 δ不大，最大变形角 δ_{max} 一般不会超过 10°；飞板运动过程中，变形角的变化规律与飞板运动速度的变化规律基本相同，即爆轰波到达初期增加较快，后期逐渐趋于稳定。

5 结　论

复板运动速度的大小和方向是影响爆炸焊接质量的关键因素，而实验测量是研究复板运动最直观、最可靠的途径。本实验利用高速摄影技术，采用双反射镜法，对滑移爆轰作用下复板的运动速度进行了 Lagrangian 测量，结果表明该方法可有效测量爆炸驱动下飞板的运动速度。

参考文献：

[1] 朱兆祥，蒋大和．炸药爆炸作用下飞片的运动[J]．应用数学和力学，1980，1：275-279.

[2] 张凯，金小石．滑移爆轰时计算飞板飞行姿态的理论发展及其应用[J]．爆炸与冲击，1984，4(3)：20-26.

[3] Held M. Theoretical and Practical Aspect of Explosive Welding[A]. 7th Int Conf on High Energy Rate Fabrication[C]. Park Ridge, New Jersey: Noyes Data Corporation, 1981: 113-131.

[4] 杨文彬．滑移爆轰下飞行速度测试的实验方法[J]．爆炸与冲击，1986，6(1)：39-47.

[5] 邵丙璜，张凯．爆炸焊接原理及其工程应用[M]．大连：大连工学院出版社，1987：78-82

Experimental Investigation on Flying-plate Velocity under Blasting Driving

HUANG Feng-lei, DUAN Wei-dong, YUN Shou-rong

(*State Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disasters, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: A experimental measuremental system of double-illuminator method was suggested on the basis of theoretical analysis. A experimental setup and a flashlight charging circuit that solve the problem of installing precision and exterior lighting were described in details in this paper. The moving velocities of various explosive-welding materials were measured under sliding detonation.

Key words: explosive-welding; high speed scanning; sliding detonation