

# 滑移爆轰下飞板飞行速度测量的实验方法

杨文彬

(1985年4月25日收到)

本文所述滑移爆轰下,飞板飞行速度的测试方法“电阻丝—探针”法,综合了电阻丝和探针的测量技术,应用阶跃信号处理技巧,应用快速信号采集仪器和计算机数据处理系统,提高了时间间隔的测量精度。从而能较准确地给出飞板在等速区和准等速区的弯折角 $\beta$ 、板速 $V_p$ 及滑移爆轰速度 $V_s$ ,也可以用连续电阻丝测量飞板飞行姿态。

在恒流源设计上,本文简略给出放电电容和限流电阻的估算方法。

## 一、概 述

爆炸焊接时,要想得到良好的焊接质量,必须严格控制炸药的爆速 $V_s$ 、飞板与基板的碰撞角 $\beta$ 和板速 $V_p$ 。有些金属材料之间的爆炸焊接窗口很窄,当然这些参数的准确测量就更为重要了。

近二十年来,发展了好几个计算 $V_p$ 的一维和二维近似方法,如何验证这些近似公式的正确性,也需要在实验中对这些焊接参数进行准确地测量。

探针法是出现较早的一种测量方法,简便可靠,但不能测量飞板飞行姿态,只能给出等速区的某些参数。

闪光X射线照相法可以拍摄飞板某瞬间的飞行姿态。但由于照相图的轮廓线比较模糊,在数据处理和量取角度时都有较大的误差。

六十年代末,国际上出现了测量 $V_p$ 的斜电阻丝法<sup>(1)</sup>,目前这种方法逐步得到完善<sup>(2)</sup>。国内有些单位用斜电阻丝法进行了大量的测试工作<sup>(3)</sup>。在记录电阻丝两端电压信号时,大多使用示波器照相或记忆示波器,这样得到的连续电阻丝电压曲线,常常因拐点不明显而影响了时间间隔的测量精度。

本文提出的“电阻丝—探针”法,既可以测量飞板飞行的连续过程,也可以像探针测量那样,清晰地看到飞板与探针相碰时曲线的拐点。在实验中,可根据测试内容,安装多组探针,或其间安装电阻丝。

## 二、实验基本原理

图1是测试系统方框图,电阻丝两端由恒流源供电,电阻丝电压信号由TCH瞬态记录仪记录并存贮,通过专用接口与微型计算机相连。实验数据经过程序处理后在数字绘图仪上给出实验曲线和计算结果。为了保存数据,可以用磁盘进行存贮。

图2是以三探针测试为例画出的安装图,图3是相对应的理想记录曲线。

炸药引爆后,随着爆轰波的向前推进,爆轰压力驱动飞板向下飞行。在飞板与基

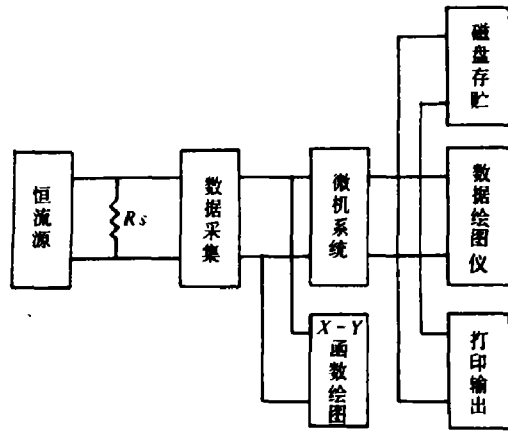


图1 测试系统框图

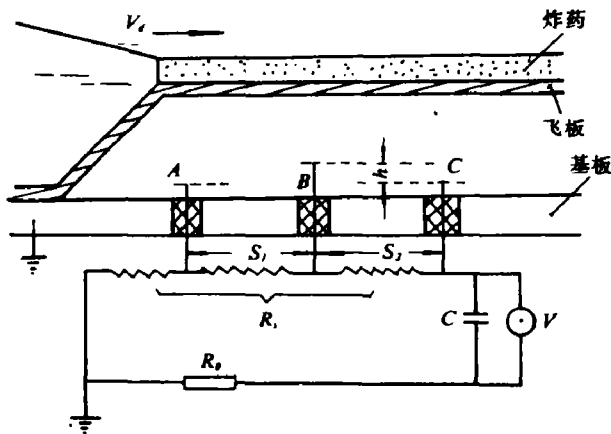


图2 测试安装简图(一)

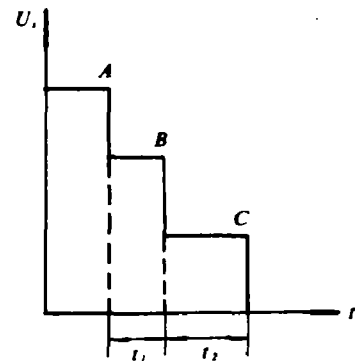


图3 理想的电压曲线(三探针)

板不断闭合过程中,飞板依次与探针A、B、C的顶端接触(图2),从而将电阻丝(或固定阻值的电阻)分段瞬间短路,得到的电阻丝电压信号如图3所示。在等速区(或准等速区)飞板弯折角 $\beta$ 由下式联立求解

$$V_d = \frac{s_1 + s_2}{t_1 + t_2} \quad (1)$$

$$\beta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{h}{s_1 - V_d \cdot t_1} \right) \quad (2)$$

板速 $V_d$ 由下式求得

$$V_d = 2 \cdot V_d \cdot \sin \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

式中: $h$ 为B探针与A(或C)探针顶端高度差(A、C两探针等高); $s_1$ 为A-B两探针间距; $s_2$ 为B-C两探针间距; $t_1$ 为飞板与A、B两探针接触的时间间隔; $t_2$ 为飞板与B、

C 两探针接触的时间间隔； $V_a$  为 A - C 段平均爆速。

图 4 是电阻丝 - 探针测试安装示意图,图 5 是对应这种安装方式得到的理想实验曲线(经数字绘图仪画出)。图中 A、B、C 三个探针可测量飞板飞行到某一距离  $y$  处的弯折角,电阻丝可以测得某飞行距离内的连续过程。安装探针时,应保持 A、C 两探针等高(距飞板),电阻丝 DE 与飞板平面的夹角  $\alpha$  需小于飞板在这个区间的弯折角  $\beta$  (设飞板与图 4 中基板平行安装)。

有时为了测量实验药盒(药盒底部为飞板)在爆轰过程中爆速的变化,也可在离开引爆端某一距离  $x$  处安装二个等高探针,在电阻丝后边安装三个探针,同时测得飞板弯折角和另一组爆速,如图 6、图 7 所示。当然,探针和电阻丝的安装方式是多种多样的,可由实验内容决定。

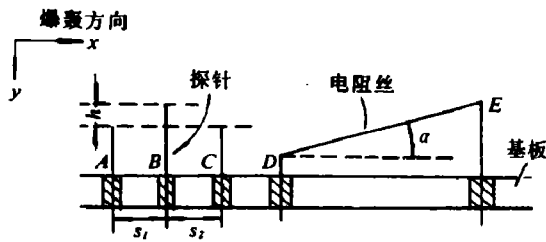


图 4 安装示意图(二)

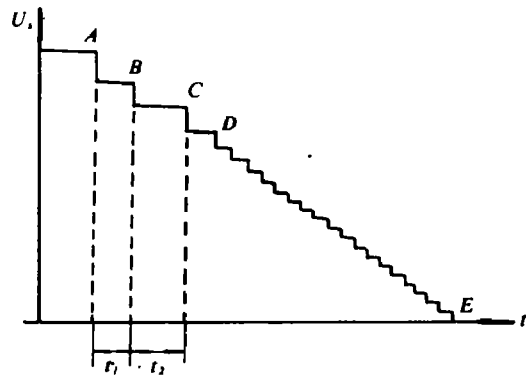
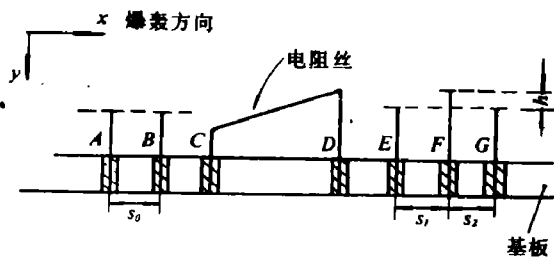


图 5 示意图(二)实验曲线



A、B、E、F、G 是探针,C、D 是电阻丝

图 6 安装示意图(三)

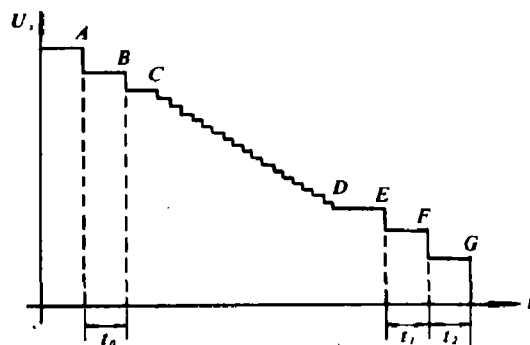


图 7 示意图(三)实验曲线

### 三、恒流源

对电阻丝 - 探针的供电电路可以采用简单的电容放电电路,图 8 是等效电路简图。图中

$C$  为放电电容,  $E_0$  为放电初始电压,  $R_0$  为放电回路等效限流电阻,  $R_s$  为测试电路电阻 (包括电阻丝电阻和探针间电阻, 我们统称为电阻丝电阻),  $I$  是放电电流。若适当选取这些参数, 就可以在测量时间内, 得到一个恒定的供电电流, 即放电电路的电流 (流过电阻丝的电流) 应满足下式

$$\Delta I(t) < \frac{\Delta U_T}{R_s(t)} \quad (4)$$

式中:  $\Delta I(t)$  为  $t$  时刻流过电阻丝电流的波动量;  $\Delta U_T$  为 TCH 记录仪输入电压分辨率;  $R_s(t)$  为  $t$  时刻电阻丝阻值。

在采用多探针测试时, 电容端电压在放电过程中不断降低, 会造成放电电流的减少, 但随着飞板与基板的不断闭合, 电阻丝阻值也不断减少, 这又有使放电电流增加的趋势。我们设电阻丝被分成  $n$  段间断地瞬间短路, 那么电容端电压有如下表达式

$$E_{i+1} = E_i \cdot e^{-\frac{T/n}{(R_0 + R_s^0(n-i))C}} \quad i = 0, 1, 2, \dots, (n-1) \quad (5)$$

式中:  $R_s^0 = (R_s/n)$  为每段电阻值;  $E_i$  为对应第  $i$  段电阻被短路时电容端电压;  $R_s$  为电阻丝总阻值;  $T$  为测试时间;  $R_0$  为放电回路等效限流电阻。

在测试过程中, 由于放电电流的波动使得电阻丝两端电压也相应地产生一个波动量, 设对应每段电阻被短路前后电阻丝端电压波动为  $\Delta U_1^i(i)$  和  $\Delta U_2^i(i)$ , 则有下面表达式

$$\Delta U_1^i(i) = \left[ \frac{E_0}{R_0 + R_s} - \frac{E_i}{R_0 + R_s^0(n-i)} \cdot e^{-\frac{T/n}{(R_0 + R_s^0(n-i))C}} \right] \cdot R_s^0(n-i) \quad (6a)$$

$$\Delta U_2^i(i) = \left[ \frac{E_0}{R_0 + R_s} - \frac{E_i}{R_0 + R_s^0(n-i-1)} \cdot e^{-\frac{T/n}{(R_0 + R_s^0(n-i-1))C}} \right] \cdot R_s^0(n-i) \quad (6b)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$$

如果始终满足

$$|\Delta U_1^i(i)| < \Delta U_T, \quad |\Delta U_2^i(i)| < \Delta U_T$$

那么, 就可以认为该供电电路是恒流。TCH 记录仪是数字存贮记录,  $\Delta U_T$  是随着输入电压选择范围的改变而变化的。我们可以根据探针安装方式、滑移爆轰速度、测试时间 (估算一个范围) 等实验条件, 用迭代法由 (6a) 和 (6b) 两式计算出电容  $C$  的取值范围。当 TCH 输入端配接传输线的匹配电阻时, 两式的右边还应乘以分压系数  $K$ 。

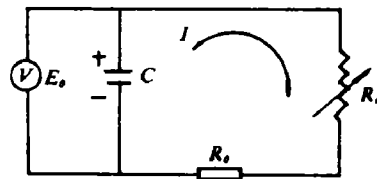


图8 等效放电电路简图

#### 四、放电回路限流电阻 $R_0$ 的实验确定

选定了 TCH 输入电压  $U_T$  之后,  $R_0$  的最小取值为

$$R_0^{min} > \frac{E_0 \cdot R_s}{U_T} - R_s \quad (7)$$

由于放电回路各种不定因素的影响,  $R_0$  的数值需要通过放电实验曲线来确定, 如图9。若曲线初读数为  $n$  (放电初始时刻电阻丝两端电压值), 则有

$$R_0 = \frac{E_0 \cdot R_s}{n \cdot \Delta U_T} - R_s \quad (8)$$

$$(n-1)\Delta U_T = \frac{E_0 R_s}{R_0 + R_s} e^{-\frac{T_{\text{H}}}{(R_0 + R_s) \cdot C}} \quad (9)$$

由(8)式减(9)式得

$$\Delta U_T = \frac{E_0 R_s}{R_0 + R_s} (1 - e^{-\frac{T_{\text{H}}}{(R_0 + R_s) \cdot C}}) \quad (10)$$

$$T_{\text{H}} = -\ln \left( 1 - \frac{\Delta U_T (R_0 + R_s)}{E_0 \cdot R_s} \right) \cdot (R_0 + R_s) \cdot C \quad (11)$$

理论计算值  $T_{\text{H}}$  应该与实验曲线中的  $T_{\text{H}}$  基本吻合。

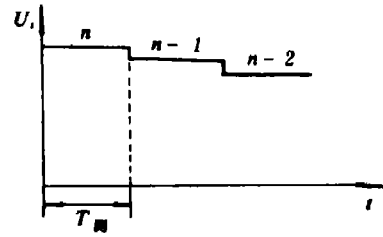


图9 放电实验曲线

### 五、实测中的考虑

#### (1) 爆轰不稳定性

炸药加工中, 经常使用的是低爆速炸药, 如铵油炸药, 其极限药厚约100mm左右, 而实际使用的药厚一般在20~80mm范围内。因此, 随着药厚的改变, 爆速也在变化。在实测中还发现, 即使药厚不变, 炸药在爆轰过程中爆轰速度也在不断地变化, 特别是引爆端效应影响更大, 在远离引爆端处还发现有爆速的不稳定增长, 适当控制探针间距, 就能观察到这一现象。因此, 实验测试时必须重视对爆速的测量, 否则将会给其他参数的计算带来较大的误差。

#### (2) 探针安装

为了避开引爆端影响和实验药盒末端稀疏效应, 必须考虑飞板与探针相触时爆轰波头的位置。如图10, 飞板与探针C接触时, 爆轰波头已处于药盒的末端, 是稀疏效应影响的临界状态。

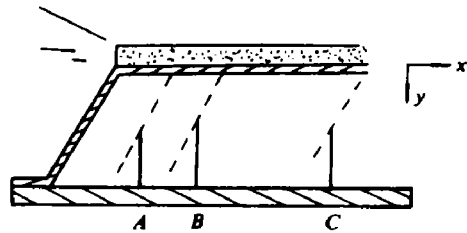


图10 波头位置对探针测量的影响

探针间距须兼顾爆速和记录仪的采样时间等因素, 以保证测试误差较小。

#### (3) 采样时间

从误差分析的角度来看, 采样时间越短越好, 但这受到仪器性能的限制。当使用的炸药确定以后, 先初估一个爆速, 再根据探针间距和记录仪存贮容量, 适当调整采样时间, 以保证时间间隔的测量精度, 也可以先选定采样时间去调整探针间距。

### 六、实验数据分析

表1是用“电阻丝—探针”法测得的实验数据。其中  $\beta_r$  是用Richter二维近似计算公式将实验数据代入后反推求得的飞板最终弯折角,  $\beta_s$  是用邵炳璜关于复板运动二维近似解<sup>(4)</sup>, 对实验参数计算后求得的飞板飞行到某一距离  $y$  处时飞板的弯折角<sup>(5)</sup>。  $\beta_c$  是陈火金在长期爆轰焊接实践中, 在大量实验数据基础上总结得出的相应条件下飞板最终弯折角。从中可以看

表 1

序号	药厚 $t_c (mm)$	多方指数 $\gamma$	质量比 $R$	距离 ( $mm$ ) $y$	爆速 $V_d (m/s)$	$\beta_{测}^{(o)}$	$\beta_R^{max (o)}$	$\beta_c^{max (o)}$	$\gamma_0$	$\gamma_H$	$\beta_y^{(o)}$
1	41	1.78	0.49	20	2232	10.7	11.2	11.3	1.65	2	10.6
2	20	1.72	0.87	20	2270	15.9	16.2	17.4	1.75	2	16.0
3	48	1.82	0.942	20	3126	13.6	14.2	15.8	1.8	2.5	13.7
4	40	2.07	0.994	20	2567	13.1	13.4	14.6	2.1	2.5	13.3
5	40	1.78	1.019	30	2041	17.6	18.1	17.6	1.65	2	17.9
6	40	2.07	1.056	20	2822	14.0	14.5	14.6	2.1	2.5	13.9
7	40	2.07	1.057	20	2895	13.7	14.1	14.6	2.1	2.5	13.8
8	30	2.01	1.97	20	2461	23.3	24.0	22.8	1.7	2.5	23.4

注：表 1 中  $\beta_{测}$  是实测飞板  $y$  处弯折角。

出，在同样药厚、质量比相近时，随着爆速的增加，飞板最终弯折角或飞行到某一距离  $y$  处的弯折角将减小。这说明  $\beta$  不仅取决于质量比  $R$ ，还和爆速有关<sup>[6]</sup>。

图 11 到图 14 是对应不同的安装形式所测得的实验记录曲线 (WX-4675 输出)。在图 12 中可以看到，在用电阻丝测试飞板姿态时，由于飞板对电阻丝的冲击作用，在电阻丝中产生了弯曲波干扰和末端支撑点反射波效应，使得在电阻丝连续与飞板闭合的过程中发生记录曲线

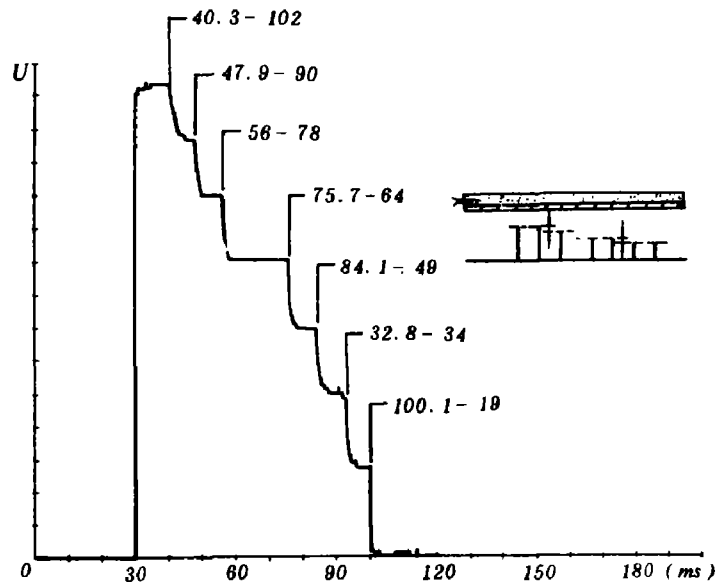


图 11 实验曲线

的抖动。图 14 中，由于飞板与电阻丝闭合速度超过电阻丝声速，记录曲线中没有发生抖动现象。可见，在用连续电阻丝测试飞板飞行姿态时，受到电阻丝中弯曲波干扰的限制，在某些

低爆速爆轰情况下，只能定性观察飞板的闭合过程。

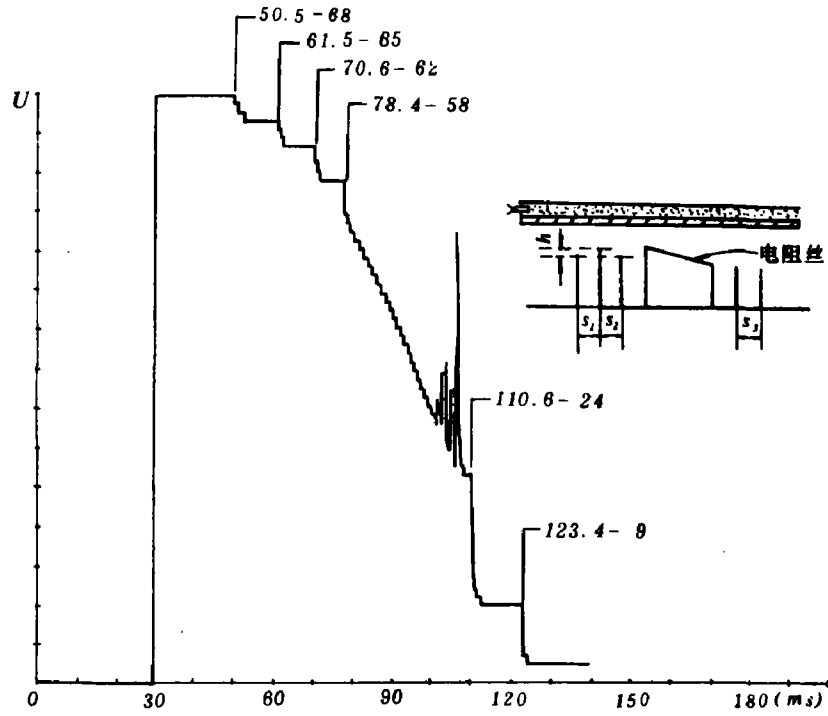
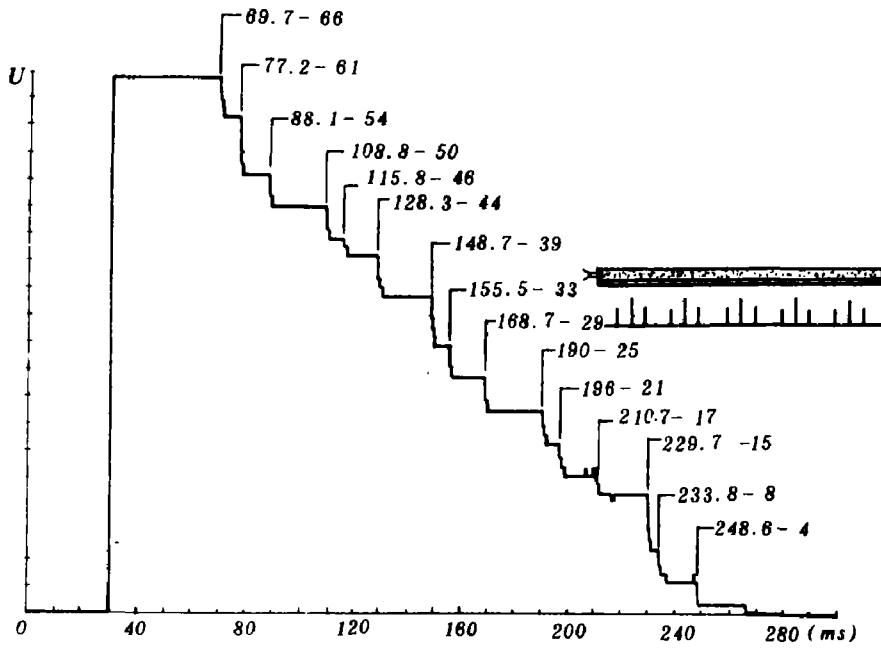


图12 实验曲线



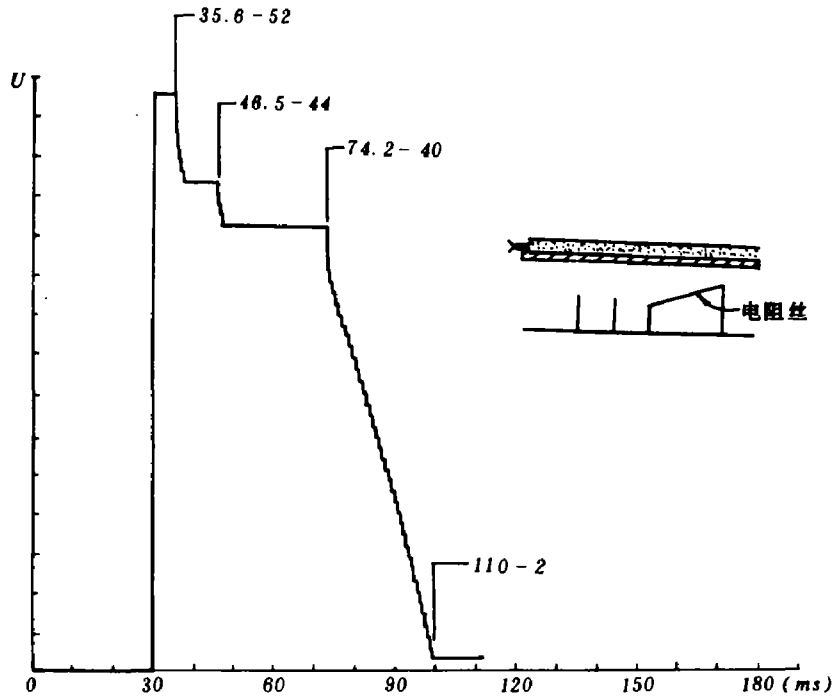


图14 实验曲线

本文得到张凯付教授和陈火金高级工程师的指导，大连造船厂爆炸加工研究所郑本玉，赵安德，李东航，高玉顺等同志给予的大力协助，在此表示感谢。

## 参 考 文 献 参

- (1) Дерibas, A. A., Ф. Г. В. (1967) 291 - 298.
- (2) Held, M., 7th international Conference on High Energy Rate Fabrication (1981), 113.
- (3) 陈生玉、王诚洪，电阻丝测试技术，待发表。
- (4) 邵丙瑞等，滑移爆轰作用下复板运动速度的二维近似解，全国第四届爆炸加工会议文集 (1982)。
- (5) 陈火金，铍油系炸药爆炸性能的试验研究，全国第四届爆炸加工文集 (1982)。
- (6) 张凯、金小石，爆炸与冲击·3(1984), 20.



## EXPERIMENTAL METHOD OF MEASURING THE VELOCITY OF A FLYER ON SLIPING DETONATION

Yang Wenping

### Abstract

In this paper, a method of measuring the velocity of a flyer on slipping detonation is described. This method synthesises the measuring techniques of resistance wire and electrical pins, with application of the step signal treatment technique and fast signal collective apparatus as well as computer data treatment system. Thus the measuring precision of the time interval is increased, and the bending angle  $\beta$ , flyer velocity  $V_f$  as well as slipping detonation velocity  $V_p$  both in uniform velocity and quasi-uniform velocity regions can be given more accurately. By means of continuous resistance wire, it can be used to measure the flying posture of the plate.

The estimating methods of the values of the discharge capacitor and limiting resistance in design of the constant current source are also given.