

# 爆炸焊接飞板运动的研究

张登霞

(中国科学院力学研究所)

## 摘 要

本文通过量纲分析指出,爆炸焊接飞板运动是几何相似的。不过,由于起爆端端部稀疏波的作用,飞板运动存在着非稳定运动段,在该段内确定飞板极大动态弯折角的相似参数有两个:一个是 $R$ ;一个是炸药厚度与爆轰波波阵面距起爆端距离之比 $he/V_Dt$ 。在稳定运动段内,确定飞板极大动态弯折角的相似参数只有一个 $R$ 。试验结果证明,量纲分析的结论是正确的;并确定了 $he/V_Dt=0.04$ 是稳定运动和非稳定运动的分界,它是制定大厚度板焊接方案的依据之一。

## 一、序 言

在爆炸冲击力驱动下,两块金属板高速倾斜碰撞后焊接在一起即谓之爆炸焊接。在焊接过程中,金属板的飞行速度 $V_p$ 和动态弯折角 $\theta$ 是确定焊接质量的两个重要参数。因此,爆炸冲击力驱动飞板的运动规律是爆炸焊接中一个很重要的问题。根据 Birkhoff 的假设<sup>[1]</sup>, $V_p$ 和 $\theta$ 之间的关系应根据下式计算:

$$V_p = 2V_D \sin \frac{\theta}{2}$$

式中 $V_D$ 是爆轰波的传播速度,它由炸药性质决定,于是在炸药确定时,决定飞板运动的独立参数就只有一个 $\theta$ 。

在爆炸焊接研究中,计算飞板动态弯折角的公式大体上有三类:即经验公式,借用一维抛体公式,二维近似计算公式。虽然建立这些公式的理论依据不同,但它们有一个共同点,这就是 $\theta$ 和 $R$ (单位面积上的炸药质量和飞板质量之比)的单值函数关系,或者说只要 $R$ 相同, $\theta$ 也相同, $\theta$ 和 $R$ 之间的单值关系意味着爆炸焊接中飞板运动是几何相似的。

近几年来,国内外发表了若干关于飞板运动参数的测量数据,例如,日本的 Takizawa 等人<sup>[2]</sup>1975年发表了工业用低爆速炸药推动不锈钢板、铝板、钛板的测量数据。1975

年中国刘北锁等人发表了由钝感黑索金推动紫铜板的测量数据。他们都认为飞板运动不服从几何相似律，即 $\theta$ 和 $R$ 之间的关系不是单值的。

本文用量纲分析和试验的方法研究了这个问题。结果表明，由于爆炸焊接用的飞板为有限长板，端部条件的影响使飞板的极大动态弯折角 $\theta_{极大}$  ( $\theta_{极大}$ 指的是运动后飞板的直线段与飞板原始位置的夹角)随 $V_D t$  (爆轰波波阵面距起爆端的距离)增加而增加，当 $V_D t$ 增加到某值时， $\theta_{极大}$ 到达了 $\theta_{最大值}$ 。此后，虽然 $V_D t$ 继续增加，然而 $\theta_{极大}$ 仍保持为常数。本文把 $\theta_{极大}$ 随 $V_D t$ 变化而变化的运动称之为非稳定运动，把 $\theta_{极大}$ 保持为常数的运动称之为稳定运动。

在非稳定运动段内，飞板仍服从几何相似律，只是这时确定 $\theta_{极大}$ 的无量纲参数有两个，一个是 $R$ ，另一个是 $he/v_D t$  (炸药厚度与爆轰波波阵面距起爆端距离之比)。对于相同的 $R$ 值，不同的炸药厚度，在 $V_D t$ 等于常数的条件下测量 $\theta_{极大}$ ，得到的 $\theta_{极大}$ 随 $he$ 增加而减小。因此认为文献〔2〕、〔3〕给出的数据是在飞板非稳定运动段内测得的极大动态弯折角，测量时又没有注意到使 $he/V_D t$ 保持为常数，得到的结果必然不是几何相似的。在稳定运动段内，飞板运动同样是几何相似的，确定 $\theta_{极大}$ 的无量纲参数就只有 $R$ ，这个结论与爆炸焊接研究中常用的 $\theta-R$ 单值关系是一致的。

## 二、量纲分析

图1是飞板飞行过程示意图。从图中可知由于起爆端端部稀疏波的作用，飞板运动存在着一个非稳定运动段。另外，还有一个稳定运动段。在这两个运动段内，飞板的运动都是几何相似的。

图2是爆炸焊接用的飞板示意图，令与爆轰波传播方向一致的一边为板长，与爆轰波传播方向垂直的一边为板宽。同图中还给出采用的坐标系， $X$ 轴沿板的长度方向，爆轰波的前进方向为 $X$ 轴的正方向， $Y$ 轴沿板的宽度方向， $Z$ 轴沿板的厚度方向，设 $Z$ 轴的正方向指向上，坐标原点取在起爆端。

这里只讨论飞板的加速运动，并且忽略空气阻力对飞板运动的影响。若飞板足够宽，更确切地说，若飞板的宽度 $b \gg \frac{2C_L X_L}{V_D}$  (式中 $X_L$ 为飞板加速段的长度， $C_L$ 为飞板材料的纵波速度， $V_D$ 为爆速)，就可以忽略来自飞板侧向边界的稀疏波对飞板加速运动的影响。因此，只要取出单位宽度的飞板来讨论就可以了。

按照上述提法，影响飞板运动的物理量及其量纲有如下几方面。

炸药方面：

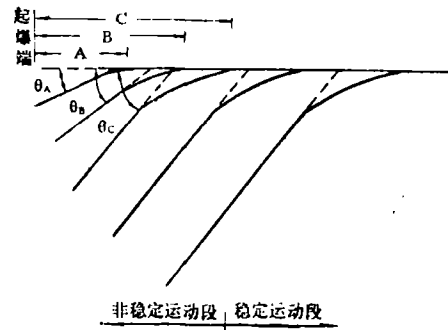


图1 飞板飞行过程示意图

$$\theta_A < \theta_B < \theta_C, \theta_C = \theta_{最大}$$

密度 $\rho_e$	$[\rho_e] = ML^{-3}$
爆速 $V_D$	$[V_D] = LT^{-1}$
多方指数 $\gamma$	$[\gamma] = M^0 L^0 T^0$
炸药厚度 $hc$	$[hc] = L$

对小于极限厚度的炸药,其爆速不是常数,它随炸药厚度增加而增加,直至炸药厚度达到极限值时,爆速才变为常数。如果试验中采用小于极限厚度的炸药时,描述炸药的物理量中还应该包括反映爆速随炸药厚度变化的物理量。

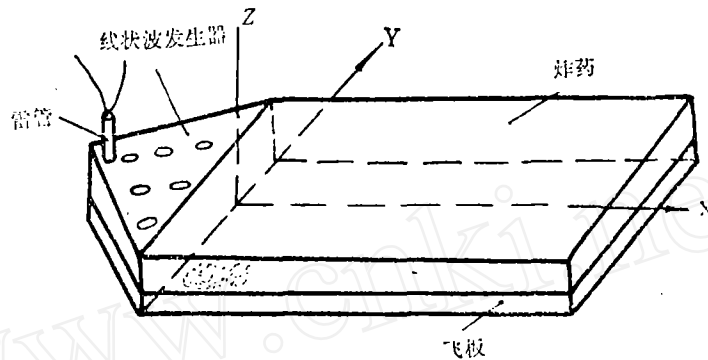


图2 爆炸焊接飞板示意图

板材方面:

密度 $\rho_P$	$[\rho_P] = ML^{-3}$
飞板厚度 $h_P$	$[h_P] = L$
飞板长度 $L$	$[L] = L$
板材强度 $\sigma_b$	$[\sigma_b] = ML^{-1}T^{-2}$
纵波速度 $C_L$	$[C_L] = LT^{-1}$
横波速度 $C_S$	$[C_S] = LT^{-1}$

自变量方面:

测点位置 $X$	$[X] = L$
爆轰波波阵面的位置 $V_D t$	$[V_D t] = L$

表征飞板运动的参数有两个,如前所述,其中只有一个是独立的,这里取飞板动态弯折角  $\theta$  做为待定量:

$$\text{飞板动态弯折角 } \theta \quad [\theta] = M^0 L^0 T^0$$

可以预见飞板动态弯折角  $\theta$  是上述各独立物理量的函数,即:

$$\theta = f(\rho_e, hc, V_D, \gamma, \rho_P, h_P, L, \sigma_b, C_L, C_S, X, V_D t) \quad (1)$$

根据  $\pi$  定理可知,方程(1)中的物理量可以组成10个独立的无量纲参数,于是有:

$$\theta = f_1\left(\frac{\rho_e}{\rho_P}, \frac{hc}{h_P}, \gamma, \frac{C_L}{V_D}, \frac{C_S}{V_D}, \frac{hc}{V_D t}, \frac{X}{hc}, \frac{L}{h_P}, \frac{\sigma_b}{\rho_P V_D^2}\right) \quad (2)$$

其中无量纲参数  $L/h_P$  表示飞板刚度对飞板弯折角的影响,分析板的抗弯能力可知,若;

$$\frac{\sigma_b h_P^2}{q X_L^2} \ll 1$$

(其中 $\sigma_b h_P^2$ 表示飞板的抗弯能力,  $q = \rho V_D^2$ 为爆轰波波阵面上的压力,  $X_L$ 为爆炸冲击力作用的长度,  $q X_L^2$ 为作用在飞板上的弯矩), 则无量纲参数 $L/h_P$ 对飞板运动的影响可以忽略不计。我们知道, 爆炸焊接中所使用的炸药,  $q$ 为数万巴至数十万巴的数量级, 于是上述不等式可以改写为:

$$\frac{h_P}{X_L} \ll (3 \sim 10)$$

实验中观察到 $X_L$ 总是大于炸药的厚度。而在爆炸焊接常用的动态参数范围内, 最小的炸药厚度也几乎等于 $h_P$ , 因而上述不等式总可以成立。方程(2)可以改写为:

$$\theta = f_2 \left( \frac{\rho_e h_e}{\rho_P h_P}, \frac{\rho_e}{\rho_P}, \gamma, \frac{C_L}{V_D}, \frac{C_S}{V_D}, \frac{\sigma_b}{\rho_P V_D^2}, \frac{h_e}{V_{Dt}}, \frac{X}{V_{Dt}} \right) \quad (3)$$

如前所述, 若不计空气阻力, 对于某一给定的 $V_{Dt}$ , 飞板动态弯折角随离爆轰波波阵面的距离增加而增加, 直至某位置处, 其动态弯折角达到极大值后保持为常数, 于是有:

$$f_2 \left( \frac{\rho_e h_e}{\rho_P h_P}, \frac{\rho_e}{\rho_P}, \gamma, \frac{C_L}{V_D}, \frac{C_S}{V_D}, \frac{\sigma_b}{\rho_P V_D^2}, \frac{h_e}{V_{Dt}}, \frac{X}{V_{Dt}} \right) = \text{常数}$$

求解上式, 可以得到计算飞板加速段长度的数学表达式:

$$\frac{X_L}{V_{Dt}} = f_3 \left( \frac{\rho_e h_e}{\rho_P h_P}, \frac{\rho_e}{\rho_P}, \gamma, \frac{C_L}{V_D}, \frac{C_S}{V_D}, \frac{\sigma_b}{\rho_P V_D^2}, \frac{h_e}{V_{Dt}} \right) \quad (4)$$

(4)式表明, 当其它条件不变时, 飞板加速段的长度与爆轰波波阵面到达的位置有关。把(4)式代入(3)式后即可得到计算飞板极大动态弯折角的数学表达式:

$$\theta_{\text{极大}} = f_4 \left( \frac{\rho_e h_e}{\rho_P h_P}, \frac{\rho_e}{\rho_P}, \gamma, \frac{C_L}{V_D}, \frac{C_S}{V_D}, \frac{\sigma_b}{\rho_P V_D^2}, \frac{h_e}{V_{Dt}} \right) \quad (5a)$$

分别用黄铜板、铝板、低碳钢板进行试验, 试验时保持 $R$ 不变, 炸药厚度不变, 在爆轰波波阵面位置不变的条件下, 测量了飞板极大动态弯折角。测量结果表明, 材料性质对飞板运动的影响很小。因此, 在研究飞板运动时, 表征材料性质的无量纲参数可以不引入方程中。上式可以改写成:

$$\theta_{\text{极大}} = f_4 \left( \frac{\rho_e h_e}{\rho_P h_P}, \gamma, \frac{h_e}{V_{Dt}} \right) \quad (5b)$$

(5b)式表明, 在炸药性质、 $R = \frac{\rho_e h_e}{\rho_P h_P}$ 不变的条件下, 若 $h_e$ 变化 $\alpha$ 倍, 只有 $V_{Dt}$ 变化 $\alpha$ 倍,

$\theta_{\text{极大}}$ 才能保持不变。若 $h_e$ 保持不变, 只改变 $V_{Dt}$ , 则 $\theta_{\text{极大}}$ 随 $V_{Dt}$ 变化而变化。这表明由于端部条件的影响, 飞板运动存在着非稳定运动段, 在非稳定运动段内飞板运动加速段的长度, 极大动态弯折角均随 $V_{Dt}$ 变化而变化。

当 $V_{Dt}$ 增加到某值时,  $\theta_{\text{极大}}$ 达到 $\theta_{\text{最大}}$ , 此后飞板动态弯折角不再随 $V_{Dt}$ 增加而变化, 于是有:

$$f_s\left(\frac{\rho_e h_e}{\rho_P h_P}, \gamma, \frac{h_e}{V_{Dt}}\right) = \text{常数}$$

解上式可以得到:

$$\frac{h_e}{V_{Dt}} = f_s\left(\frac{\rho_e h_e}{\rho_P h_P}, \gamma\right) \quad (6)$$

这里  $V_{Dt}$  表示飞板非稳定运动段的长度, 它与炸药厚度成正比, 把式 (6) 代入式 (5b) 后即可得到确定飞板最大动态弯折角的表达式:

$$\theta_{\text{最大}} = f_s\left(\frac{\rho_e h_e}{\rho_P h_P}, \gamma\right) \quad (7)$$

(7) 式表明, 当炸药品种不变时, 飞板最大动态弯折角只是  $R = \frac{\rho_e h_e}{\rho_P h_P}$  的函数。

### 三、试验结果

试验是在爆炸洞内进行的, 飞板是低碳钢板, 尺寸为  $300 \times 100 \times h_P$  mm, 炸药为 80/20 板状塑性炸药, 密度  $\rho_e = 1.47 \text{ g/cm}^3$ , 爆速  $V_D = 6500 \text{ m/s}$ , 炸药板的尺寸为  $300 \times 100 \times h_e$  mm ( $h_e$  和  $h_P$  的数值见表 1 和表 2)。

为了使爆轰波在传播过程中其波阵面沿板的宽度方向保持为直线, 起爆用线状波发生器。飞板动态弯折角是从脉冲 X 闪光照片上测得的, 测量误差小于  $0.25^\circ$ 。图 3 是飞板运动测量装置示意图。用细线将飞板悬挂在铁丝上, 飞板中心距 X 射线管表面为 1.8m, 离地面 1.5m, 离底片盒中心为  $500 \sim 700$  mm, 底片盒用铁丝悬挂在支架上, 这种漂移式的装置可以减轻爆炸气体对底片的冲击作用。X 光机为 MX-400 型, 出光时间长度为  $40 \times 10^{-9}$  s, 同步系统时间误差为  $\pm 1 \mu\text{s}$ 。

改变脉冲 X 闪光机的拍摄时间, 可以得到随着爆轰波的前进在爆炸冲击力作用下飞板运动的全过程。图 4 是飞板运动的 X 闪光照片。

表 1 是飞板极大动态弯折角随爆轰波波阵面位置的变化。

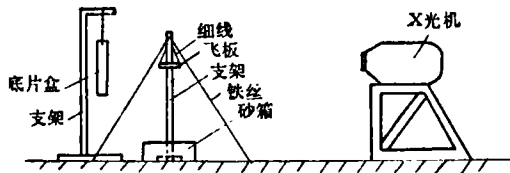


图3 飞板运动测量装置示意图



图4 X闪光照片

表 1 所列数据表明, 爆炸焊接飞板运动存在着一个非稳定运动段, 而且它的长度随炸药厚度增加而增加。在非稳定运动段内, 随着  $V_{Dt}$  的增加,  $\theta_{\text{极大}}$  值也增加, 例如, 在  $h_e = 5 \text{ mm}$  的条件下, 当  $V_{Dt} = 182 \text{ mm}$  时,  $\theta_{\text{极大}} = 9.6^\circ$ ; 当  $V_{Dt} = 228 \text{ mm}$  时,  $\theta_{\text{极大}}$  达到了  $\theta_{\text{最大}}$ , 等于  $11.0^\circ$ 。在  $h_e = 10 \text{ mm}$  的条件下, 当  $V_{Dt} = 169 \text{ mm}$  时,  $\theta_{\text{极大}} = 8.0^\circ$ ; 当  $V_{Dt}$

=325mm时,  $\theta_{\text{极大}}=10.0^\circ$ , 它还未达到最大动态弯折角。另外, 在非稳定运动段内, 在 R 保持常数的条件下, 改变炸药厚度, 当  $V_{Dt}$  等于常数时, 测得的  $\theta_{\text{极大}}$  值随炸药厚度增加而减小, 例如, 当  $hc=5\text{mm}$  时,  $\theta_{\text{极大}}=11.0^\circ$ ;  $hc=10\text{mm}$  时,  $\theta_{\text{极大}}=10.0^\circ$ 。上述这些结论证明了量纲分析的结论是正确的。

表 1 不同  $V_{Dt}$  时的  $\theta_{\text{极大}}$ 

R	0.90	0.89	0.89	0.91	0.91
hc mm	5.0	5.0	5.0	10.0	10.0
$V_{Dt}$ mm	182	228	325	169	325
$h_P$ mm	1.05	1.05	1.05	2.07	2.07
$\theta_{\text{极大}}^\circ$	9.6	11.0	11.0	8.0	10.0

表 2 和图 5 是飞板极大动态弯折角随 R 的变化规律。

表 2 飞板极大动态弯折角随 R 的变化规律

板 材 $\rho_P \text{ g/cm}^3$	$h_P$ mm	炸 药 $\rho_e \text{ g/cm}^3$	hc mm	R	$V_{Dt}$ mm	$\frac{he}{V_{Dt}}$	$\theta_{\text{极大}}^\circ$
7.8	3.5	1.47	3.6	0.19	208	0.017	3.0
	2.5		3.0	0.23	176	0.017	3.6
	3.5		4.7	0.25	208	0.022	4.0
	3.5		5.5	0.29	234	0.024	4.5
	3.3		6.0	0.33	227	0.026	5.0
	2.5		5.2	0.39	195	0.026	5.5
	2.5		5.0	0.38	175	0.028	5.0
	3.4		8.0	0.44	260	0.031	5.7
	2.5		6.0	0.45	175	0.034	6.0
	2.5		7.0	0.52	175	0.040	5.5
	2.1		6.0	0.54	228	0.026	7.5
	2.0		6.0	0.57	195	0.030	7.3
	2.0		6.0	0.57	273	0.022	7.5
	1.5		7.0	0.88	228	0.030	9.5
	2.1		10.0	0.91	325	0.031	10.0
2.1	10.0	0.91	169	0.059	8.0		

图 5 中铁板时  $\frac{he}{V_{Dt}} < 0.03$  的数据, 它们可以被连成一条光滑的曲线, “O” 点为  $\frac{he}{V_{Dt}} > 0.030$  的数据, 这些值均在光滑曲线的下方。R 值较小时, 它们偏离曲线的数值在试验允许的误差范围内; R 较大时, 这种偏离明显地增加。从图示曲线可以看到, 在爆炸焊接常用的参数范围内, 非稳定段的长度可用  $\frac{he}{V_{Dt}} = 0.04$  估算。同图中还给出铝

板、铜板的最大动态弯折角，它们均在曲线的附近，这表明研究飞板运动规律时，材料强度可以忽略不计。

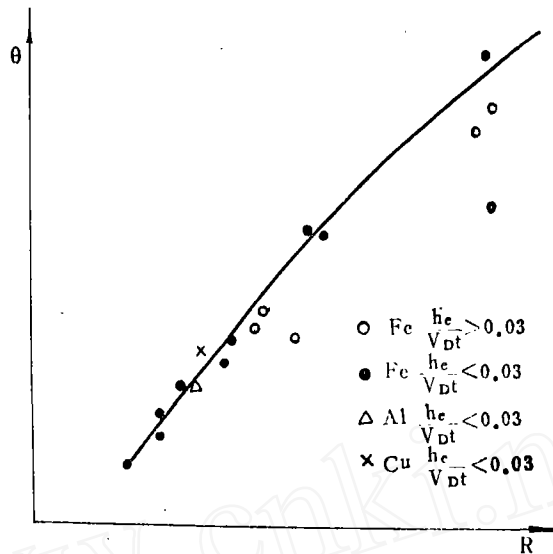


图 5  $\theta$ 和R的关系

#### 四、分析和讨论

80/20板状塑性炸药极限直径为 3 mm，从炸药起爆到爆轰波达到稳定爆轰经过的距离只有几个毫米。因此本文试验是在炸药稳定爆轰的条件下进行的。爆轰波的传播速度是与炸药厚度无关的恒定值。这就表明爆炸焊接飞板的非稳定运动特征不是炸药非稳定爆轰引起的。

量纲分析指出，在非稳定运动段内，飞板极大动态弯折角由式(5b)决定。若飞板为无限长，则在影响飞板运动的独立物理量中不引入爆轰波距起爆端的距离  $V_d t$ ，于是式(5b)变成

$$\theta_{\text{极大}} = f\left(\frac{\rho_0 h_c}{\rho_p h_p}, \gamma\right)$$

此式和式(7)相同，也和经验公式的基本规律相同。

上述分析表明，飞板的非稳定运动是有限长板起爆端端部条件引起的。在有限长板中，炸药从一端起爆后，除来自炸药上、下表面的稀疏波使爆轰波波阵面后的高压气体中的压力降低外，还有来自起爆端的稀疏波的作用，此稀疏波的作用随爆轰波波阵面距起爆端的距离增加而减弱，直至某距离后，端部稀疏波的作用弱到可以忽略不计，此后飞板运动进入稳定运动段。

试验给出，爆炸焊接飞板非稳定运动段的长度大约  $V_d t = 0.04h_c$ 。若炸药厚度为 20mm，则飞板非稳定运动段的长度可达 500mm。在工业生产中，爆炸焊接使用低爆速炸药，炸药厚度大于 20mm，对于 1000mm 长的复合板，则至少在 500mm 的范围内，爆炸



焊接工艺参数是变化的,这将导致焊接界面质量的不均匀性,界面波的波长、波幅随距起爆端的距离增加而增加,在焊接窗口较窄的金属间结合中,甚至观察到界面的熔化层。因此,在大板焊接中,如果不考虑飞板的非稳定运动段的影响,则势必导致焊接界面结合率的降低。由此可见,爆炸焊接飞板非稳定运动段运动规律的进一步研究是提高大厚板焊接质量的一个环节。

## 五、结 论

量纲分析和试验结果表明,在爆炸焊接中,由于炸药起爆端端部条件的影响,飞板运动存在着非稳定运动段,该段的长度与炸药厚度成正比。在非稳定运动段内,飞板运动仍服从几何相似律,只是这时确定飞板极大动态弯折角的相似参数有两个,一个是  $R$ , 另一个是  $\frac{he}{V_{dt}}$ 。对于给定的  $R$  值,若  $\frac{he}{V_{dt}}$  保持相同,则得到的  $\theta_{\text{极大}}$  也相同,若只保持  $he$  不变,则得到的  $\theta_{\text{极大}}$  随  $V_{dt}$  增加而增加。反之,若保持  $V_{dt}$  不变,则得到的  $\theta_{\text{极大}}$  随  $he$  增加而减小。基于这种认识,则第一部分里引用的测量数据不是飞板的最大弯折角,而是在非稳定运动段内飞板的极大动态弯折角。测量时又只注意了  $R$  的相似性,而未注意到  $\frac{he}{V_{dt}}$  的相似性,所以得到的结果不服从几何相似律。至于在稳定运动段内,  $\theta$  和  $R$  之间是单值关系,这和爆炸焊接中常用公式的基本规律是一致的。

爆炸焊接界面波的波长、波幅取决于飞板的飞行速度和动态弯折角。在飞板非稳定运动段内,界面波的波纹是不均匀的,它随距起爆端的距离增加而增加,在焊接窗口较窄的金属间结合时,甚至观察到界面的熔化层,所以在制定大厚板焊接方案时,必须考虑飞板的非稳定运动段。

(1982年3月23日收到)

本文X光摄影工作是金辉、黄良佐、边小兵等同志作的;炸药是陈维波、周一以、石成等同志制造的;参加本试验工作的还有李立国同志;本文还得到了谈庆明同志的帮助;在这里一并表示感谢。



## 参 考 文 献

- (1) Birkhoff G. et al., Journal Applied Physics 19 (1948), P563.
- (2) Takizawa yu. et al., An experimental study of the acceleration zone and the terminal velocity of flyer plate driven by explosive, 5th international conference on high energy rate fabrication, (1975).
- (3) Седов Л.И., Методы подобия и размерности в механике.

更正：83年第2期第81页第1行“……，长度一般超过0.5mm，”应为“……，长度一般不超过0.5mm，”

RESEARCH ON MOVEMENT OF FLYER PLATE IN  
EXPLOSIVE WELDING

*Zhang Dengxia*

*(Institute of Mechanics, Academia Sinica)*

**Abstract**

By dimensional analysis, the author comes to the conclusion that the movement of flyer plate in explosive welding is on geometric analogy. However, due to the rarefaction effect from the initiating end, there is an unsteady range in addition to the steady range of the movement. In the steady range, the maximum dynamic bent angle of flyer plate depends only on one dimensionless parameter  $R$ , whilst in the unsteady range the limiting dynamic bent angle depends on two dimensionless parameters,  $R$  and  $\frac{he}{V_D t}$  (ratio of explosive thickness to distance of detonation wave front from initiating end). The above conclusion has been verified by experiment. A value of  $\frac{he}{V_D t} = 0.04$  as the threshold is given,