

# 滑移爆轰作用下多层金属平板的 爆炸复合参数的计算方法

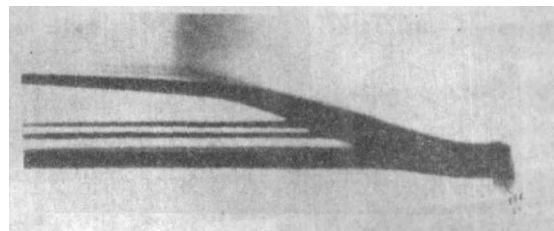
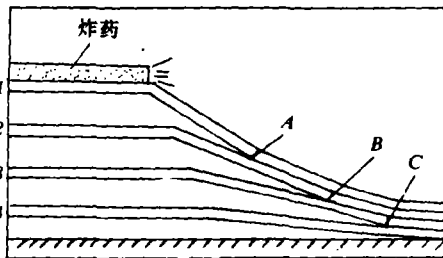
邵丙璜 周之洪 李国豪

(1984年10月26日收到)

本文建立了多层金属平板在滑移爆轰作用下，各层间存在不同程度加速运动时的二维计算公式。根据材料性质所事先给定的各层最佳碰撞角 $\beta$ ，可计算出各层相应的最佳飞行间距。计算结果和实验对比表明：在多达10层铝板复合的各层 $\beta$ 角和X光实测值仍相当一致。

## 前 言

在爆炸焊接的报导中，迄今大量介绍的是两层金属板的复合，涉及多层焊接的较少，多层复合是爆炸焊接应用中的一个重要方面。在一些电工原件中需要四层甚至六层不同合金的爆炸复合，由于多层复合的每层都要满足最佳焊接参数，这使得用试验方法确定可焊接参数的工作量大大增加。EL-Sobky, H.和Blazynsky, T. Z.<sup>(2)</sup>和Al-Hassani, T. S., Salem, S. A. L.<sup>(3)</sup>，在1981年七届国际高能加工会议上分别发表了两篇从理论上预报各层焊接参数( $\psi$ 和 $\beta$ )的论文。但是Sobky的计算模型认为各层复板在碰撞前已经发生弯曲，这和我们从脉冲X光照片上所观察到的现象并不一致。图1a为Sobky的计算模型，图1b为四层爆



a) Sobky的多层复合模型其特征是各层板(2,3,4)在碰撞前已发生弯曲，A、B、C为碰撞点

图1

b) 多层爆炸复合时的瞬态X光照片  
1—第一层复板2mm不锈钢 2—第二层复板1mm紫铜  
3—第三层复板1mm黄铜 4—第四层复板1mm铝板  
5—支承木板 6—铍油炸药 7—爆炸产物

炸复合的瞬态X光照片,不难看到各层复板在碰撞复合前看不到有显见的弯曲现象。Hassani所采用的是“驱动板”的理论计算模型,即爆炸复合的全部能量储存在第一层复板(即驱动板)中,在以后各层复板的焊接过程中不再接受爆炸产物压力的作用。显然这种计算模型只有在第一层复板的质量远大于其余各层的总和时,才能接近实际的物理过程。当各层复板具有相同的质量( $M$ )时,根据这种理论计算模型,随着复合层的层数增加,动态角 $\beta$ 不断减小,波状界面的波幅将逐层下降如图2所表示。因此很难实现各层之间有均衡一致的焊接质

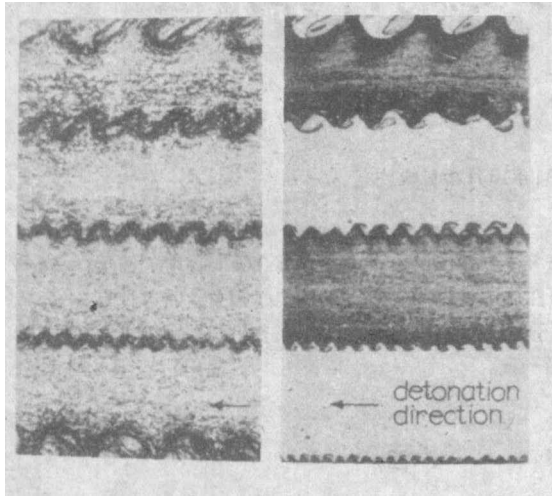


图2 多层复合金相照片

a) 铜/铜复合片,第1层驱动板厚0.9 mm,第2~5层厚度为0.5 mm,第1~2层间距8.5 mm,其余层间距1.4 mm,炸药厚15 mm,第6层为刚性基础。

b) 铜/黄铜复合。第1层驱动板(铜)厚0.9 mm,第3层、第5层为铜厚0.5 mm,第2层、第4层、第6层为黄铜厚0.5 mm,第1~2层间距8.5 mm,其余层间距1.4 mm,炸药厚15 mm。

量(例如 $\beta$ 角)。本文的工作在于指出:实际的多层复合过程中,由于采用小间隙装置,则设计时必须考虑爆炸产物压力对多层复合过程中的加速作用,并且认为这种作用是实现各层之间获得最佳焊接参数的重要因素。文中给出了计算各层焊接参数(来流速度 $V$ 和动态碰撞角 $\beta$ )的计算公式。并与X光脉冲照片的实测结果进行对比。其弯曲角 $\beta$ 的误差约 $\pm 1^\circ$ ,和测量误差大致相当。

## 二、多层复板的运动特性分析

图1b为四层金属复板在一次爆炸复合的脉冲X光照片,从中不难看到

1. 在滑移爆轰作用下,各层复板在复合过程中由水平位置转为某一特定弯曲角 $\beta$ ,都存在不同程度的加速过程,即弯曲角由零值逐渐增大到 $\beta$ 值。
2. 各层复板在碰撞前,没有观察到弯折现象,即弯曲波的效应即便在亚音速的扰动中也可以忽略,因此可近似认为在碰撞发生前,复板始终为平面。
3. 各层复合时,复合板的运动加速度是不同的。若各层密度、厚度相同,则第一、二层复合时,爆炸产物压力大,复板加速度快,所需加速间隙小。而最后几层复合时,由于爆炸压力大大衰减,复板加速缓慢,所需加速间隙大,因此各层之间要得到合适的焊接参数,必须通过调整间隙来实现。

### 三、多层复板爆炸焊接参数的确定

#### 1. 各层之间无加速度运动的多层复合

首先我们讨论一种最简单的简化过程，即各层之间无加速运动的 Hassani 模型的结果，即复合能量全部由第一层复板即驱动板所提供。复合过程中其截面呈折线 ABC 如图 3a 所表示。从图中我们看到动态角  $\beta$  将逐层下降，由于波长和  $\beta^2$  成正比，因此界面波幅也将逐层减小。

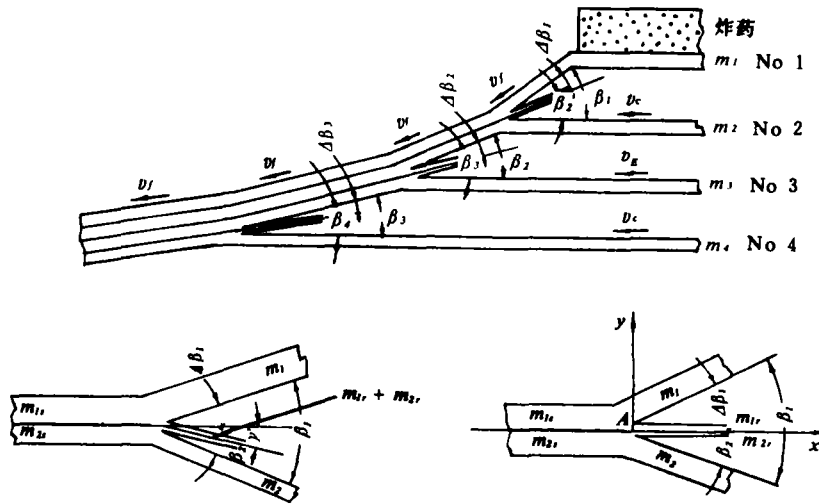


图 3 多层复合示意图

通常的平行法爆炸复合过程中，驻点压力为材料强度的几十倍，因此在碰撞区附近近似认为不可压缩流体。根据经典的流体力学的复变函数方法或平面速度法<sup>[4]</sup> Taylor, Robinson, Уткин 等给出了复板互相碰撞时，在碰撞点附近流场  $V_f$  的变化规律。计算表明来流速度  $v_f$  只是在驻点附近存在急剧的变化，而在 1 ~ 2 个复板厚度以外， $v_f$  趋近于无穷远处的来流速度  $v_{f\infty}$ 。这表明在多层复合时，每层的碰撞点实际上是独立而不相互干扰的。它可以独立地建立各自的动量、质量守恒方程，而不必求解各点之间的联立方程，这样就大大简化了计算方程。假设碰撞点已远离引爆端，则上述问题可以认为是定常的。

置坐标原点于碰撞点上。图 3b 给出了在碰撞点 A 附近，复板 1、2 对称碰撞示意图。但通常是不对称的如图 3c 所表示。这时再入射流不二等分动态角  $\beta$ ，令  $\gamma$  角为再入射流  $\overline{Aj}$  与水平轴  $x$  之间的夹角。由于通常  $\gamma$  是一个小角度，因此在讨论  $\gamma$  对“出流”的质量影响时，可近似令  $\cos \gamma \approx 1$ 。我们假定碰撞点附近满足不可压流体模型。令  $m_i$  表示各层复板的单位面积质量， $\beta_i$  表示相应的碰撞角， $i = 1, 2, \dots, n$ 。如图 3a 中所表示。

现讨论第 1、2 两层碰撞时的守恒方程。在水平轴  $x$  上的动量、质量守恒方程为

$$v_f m_i \cos \Delta \beta_i = (m_i - m_{i'} \cos \gamma) v_f \quad (1)$$

$$m_4 = m_{1s} + m_{1r} \quad (2)$$

$$v_c m_2 \cos \beta_2 = (m_{2s} - m_{2r} \cos \gamma') v_c \quad (3)$$

$$m_2 = m_{2s} + m_{2r} \quad (4)$$

这里脚注  $s$  表示出流,  $r$  表示再入射流,  $v_c$  为碰撞点移动速度, 在平行爆炸装置中  $v_f = u$ 。

在垂直轴  $y$  上的动量、质量守恒方程为

$$v_f m_4 \sin \Delta \beta_1 = v_c m_2 \sin \beta_2 + (m_{1r} + m_{2r}) v_f \sin \gamma' \quad (5)$$

$$\beta_1 = \beta_2 + \Delta \beta_1 \quad (6)$$

这里有七个未知数  $m_{1s}$ 、 $m_{1r}$ 、 $m_{2s}$ 、 $m_{2r}$ 、 $\Delta \beta_1$ 、 $\beta_2$  和  $\gamma'$ , 而方程只有六个, 因此是一个不能确定的问题。但这种困难不是原则性的, 因为  $\gamma'$  角不可能大于  $\beta_1$ , 因此如前所述, 在讨论  $\gamma'$  对“出流”质量影响时, 可忽略它的影响。令  $\cos \gamma' \approx 1$ , 而在 (5) 中则  $(m_{1r} + m_{2r}) v_f \sin \gamma' = 0$ , 这样上述方程有解。由 (5) 式得到

$\sin \beta_2 = \frac{m_4 v_f}{m_2 v_c} \sin \Delta \beta_1$ , 利用 (6) 式  $\Delta \beta_1 = \beta_1 - \beta_2$  代入, 则得

$$\beta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{m_4 v_f \sin \beta_1}{m_2 u + m_1 v_f \cos \beta_1} \right] \quad (7)$$

在平行装置中, 众所周知  $u = v_f = u$ ,  $u$  为爆速, 又若复板质量相等,  $m_4 = m_2$ , 则  $\beta_2$  可简化为

$$\beta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{\sin \beta_1}{1 + \cos \beta_1} \right] \quad (8)$$

如果复合时为小动态碰撞角, 则  $\cos \beta_1 \approx 1$ ,  $\sin \beta_1 \approx \beta_1$ 。则  $\beta_2 \approx (1/2)\beta_1$ , 即再入射流平分  $\beta_1$  角, 也即由 1、2 两层复板所构成的“复合板”与第 3 层复板的碰撞动态角为  $\beta_2$  角, 如图 3a 所示。

相应地可求得第 3、4 层碰撞时, 即由 1、2、3 层所构成的“复合板”与第 4 层碰撞的动态角  $\beta_3$  为

$$\beta_3 = \tan^{-1} \frac{[m_4 v_f (1 + \cos \Delta \beta_1) + m_2 u (1 + \cos \beta_2)] \sin \beta_2}{[m_3 (1 + \cos \Delta \beta_1) v_f + m_2 u (1 + \cos \beta_2)] \cos \beta_2 + 2 m_3 u} \quad (9)$$

依次求得与第 5 层碰撞时的动态角  $\beta_4$  为

$$\beta_4 = \tan^{-1} \frac{\{(1/2)[m_4 v_f (1 + \cos \Delta \beta_1) + m_2 u (1 + \cos \beta_2)](1 + \cos \Delta \beta_2) + m_3 u (1 + \cos \beta_3)\} \sin \beta_3}{\{(1/2)[m_4 v_f (1 + \cos \Delta \beta_1) + m_2 u (1 + \cos \beta_2)](1 + \cos \Delta \beta_2) + m_3 u (1 + \cos \beta_3)\} \cos \beta_3 + 2 m_4 u} \quad (10)$$

其中  $\Delta \beta_2 = \beta_2 - \beta_3$ 。相应地与第 6 层碰撞时的  $\beta_5$  为

$$\beta_5 = \frac{\{1/2\} \{ (1/2) [m_4 v_f (1 + \cos \Delta \beta_1) + m_2 v_c (1 + \cos \beta_2)] (1 + \cos \Delta \beta_2) + m_3 v_c (1 + \cos \beta_3) \} (1 + \cos \Delta \beta_3) + m_4 u (1 + \cos \beta_4) \} \sin \beta_4}{\{ (1/2) \{ (1/2) [m_4 v_f (1 + \cos \Delta \beta_1) + m_2 v_c (1 + \cos \beta_2)] (1 + \cos \Delta \beta_2) + m_3 v_c (1 + \cos \beta_3) \} (1 + \cos \Delta \beta_3) + m_4 u (1 + \cos \beta_4) \} \cos \beta_4 + 2 m_4 u} \quad (11)$$

其中  $\Delta \beta_3 = \beta_3 - \beta_4$ 。

上面给出的是一般条件下动态角  $\beta$  的计算公式。如果问题同样简化为平行装置、各层复板质量相等 ( $m_4 = m_2 = \dots = m_1$ ), 以及动态角  $\beta_i (i = 1, 2, \dots, n)$  较小, 则可以看到一种近似的规律, 即

$$\beta_2 \doteq (1/2)\beta_1, \quad \beta_3 \doteq (1/3)\beta_1, \quad \dots \quad \beta_n \doteq (1/n)\beta_1$$

这一计算表明：用驱动板形式传递爆炸有效能量，实现多层复合将引起动态角 $\beta_i$ 的逐层迅速衰减，因此难以保证各层之间有均衡一致的焊接质量。所以利用驱动板原理来实现多层焊接是不理想的。下面讨论我们设计多层复合所采用的方法。

2. 各层之间存在加速运动的多层爆炸复合的参数(层间间距或碰撞角)的计算公式

图4中给出了存在加速度运动的多层复合示意图。其特征是复合瞬间的复板运动姿态是 $\widehat{OA}$ 、 $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{BC}$ 等弧线组成。和上节驱动板模型图3，所呈现折线 $\overline{AB}$ 、 $\overline{BC}$ ...不同。如果考虑到加速运动，则多层爆炸复合的数学表达式是非常复杂的。现在我们利用滑移爆轰作用下复板运动的二维近似解<sup>[1]</sup>，并在其基础上发展多层复合的计算方法。有关该近似解的推演过程请参看文献[1]。本文仅直接引用其方程式，即

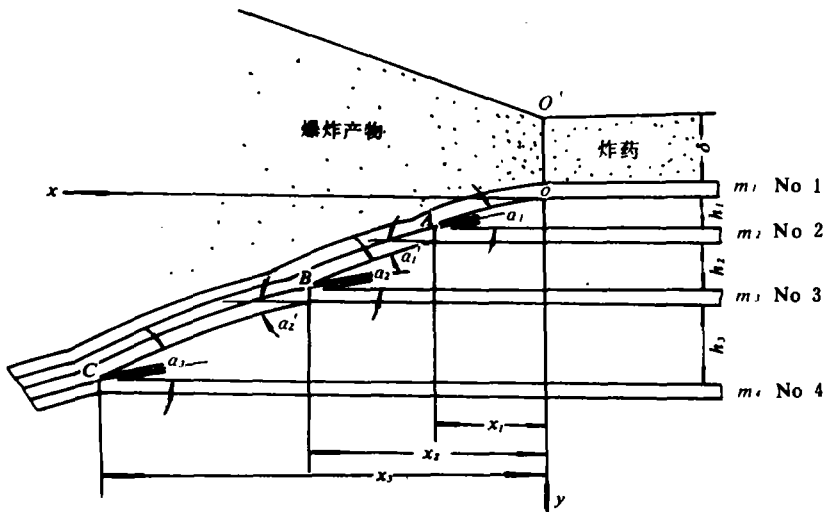


图4 在爆炸产物驱动下，复板运动存在加速度运动时的多层复合示意图

$$d \sin a = \frac{\rho_0 \delta}{m} \frac{1}{1 + \gamma_H} \left\{ \cos \left( \sqrt{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0 + 1}} \tan^{-1} \frac{x}{\delta} \right) - \frac{\gamma_0 - 1}{2} \frac{\Delta q}{C_H} \right\}^{\frac{2\gamma_0}{\gamma_0 - 1}} d \left( \frac{x}{\delta} \right) \quad (12)$$

式中 $\rho_0$ 、 $\delta$ 分别表示炸药密度和厚度， $m$ 为复板面密度， $a$ 为复板弯曲角， $\gamma_H$ 、 $\gamma_0$ 分别为爆轰波头和爆炸产物的多方指数， $x$ 为离爆轰阵面 $O-O'$ 的水平距离。其中 $(\Delta q/C_H)$ 为

$$\frac{\Delta q}{C_H} = \sqrt{\frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0 - 1}} \left\{ 1 - \frac{2}{\gamma_0 - 1} \cos^2 \left[ \sqrt{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0 + 1}} \tan^{-1} \frac{x}{\delta} \right] \right\}^{1/2}$$

$$\cdot \left\{ \cos \left[ \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0 - 1}} \tan \left( \sqrt{\frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0 + 1}} \tan^{-1} \frac{x}{\delta} \right) \right) + \tan^{-1} \frac{\delta}{x} \right] + \sin a \right\} \quad (13)$$

表示复板的存在和弯曲运动所产生的稀疏作用所引起在 $y$ 轴向上的速度增量 $(\Delta q)$ ，和波头声

速  $C_H \left( = \frac{\gamma_H v_a}{1 + \gamma_H} \right)$  比值。

在复板上作用压力为

$$\frac{p}{p_0} = \left[ \cos \left( \sqrt{(\gamma_0 - 1)/(\gamma_0 + 1)} \tan^{-1} \frac{x}{\delta} \right) - \frac{\gamma_0 - 1}{2} \frac{\Delta q}{C_H} \right]^{\frac{2\gamma_0}{\gamma_0 - 1}} \quad (14)$$

(12)、(14) 式原则上也适用于多层复合过程。

将坐标原点放在爆轰波头  $0-0'$  上, 如图 4 所表示。图中  $h_i$  表示待求的各层之间距离,  $x_i$  表示各碰撞点与爆轰波头距离。  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

计算过程如下

第一步, 先确定第 1 ~ 2 两层的复合参数  $h_1$ 、 $a_1$ 。若已知质量比  $R_1 = \frac{\rho_0 \delta}{m_1}$  和由 1 ~ 2 层材料所决定的最佳碰撞角  $\alpha_1^* = a_1$ , 则通过简便的数值计算可求解方程 (12), 得到和  $a_1^*$  相应的水平距离  $x_1^*/\delta$  和最佳间隙  $y_1^*/\delta = \int_0^{x_1^*/\delta} \tan a d \left( \frac{x}{\delta} \right)$ ,  $y_1^*$  即为图 4 中  $h_1$ 。其方程的边界条件为:  $\frac{x}{\delta} = 0$  处, 弯曲角  $a = 0$ 。

第二步确定第 2 ~ 3 层复板碰撞时的最佳飞行距离  $h_2$ 。

第 1 ~ 2 层复板在爆炸复合后结合在一起, 然后在爆炸产物驱动下加速运动, 直到与第 3 层发生碰撞。显然复合板在加速过程中同样可以应用 (12) ~ (14) 式来描写, 不过这时的质量比  $R_2$  和边界条件, 有所变化。

从图 4 中可以看到在  $x_1^*/\delta$  处, 1 ~ 2 层复合板的弯曲角  $a_1'$ 。由 (7) 式可知在平行装置中 ( $v_c = v_f$ ),  $a_1' = \tan \left( \frac{m_1 \sin a_1}{m_2 + m_1 \cos a_1} \right)$ , 此处  $a_1$  在平行装置中等于  $\beta_0$ 。相应的质量比  $R_2 = \frac{\rho_0 \delta}{m_1 + m_2}$ , 此处  $m_2$  表示第 2 层复板质量。同样根据第 2 ~ 3 层复板的材料性质, 事先确定了相应的最佳碰撞角  $\alpha_2^*$ 。则由 (12) ~ (14) 式不难用数值解求得相应的  $x_2^*/\delta$  和  $y_2^*/\delta$ 。此处  $y_2^*$  就是第 2 ~ 3 层之间的最佳间隙  $h_2$ 。

依次根据质量比  $R_i = \frac{\rho_0 \delta}{m_i + m_2 + \dots + m_n}$  和弯曲角  $a_i$  ( $a_i$  的表达式如 (9) ~ (11) 式所表示), 通过 (12) ~ (14) 式不难计算出相应间距  $h_i$ 。

如果多层复合中各层材料相同, 厚度一样, 则各层之间应具有相同的碰撞角  $\alpha_i^*$ ; 和相同的波状界面的形貌, 也即有均衡一致的焊接质量。为了验证我们的计算公式, 进行了多层铝的爆炸复合, 最多达到十层复合。并利用脉冲 X 光照相以校验瞬态的实际碰撞角是否与计算相一致, 以及对比多层复合中的各层波状界面形貌是否相同。

对比结果表明, 计算和实测的误差约在  $1^\circ \sim 2^\circ$  左右, 这为工程应用提供了一种有效的方法。

## 四、举 例

### 1. 多层铝的复合

Wylie<sup>(4)</sup> 的试验指出: 铝—铝爆炸复合在  $v_0 = 500 \sim 970 \text{ m/s}$ ,  $\alpha^\circ = 14 \sim 18^\circ$  间有良好波状

结合。

我们采用爆速为 $2300\text{ m/s}$ ， $\gamma_H = 2$ ， $\gamma_0 = 1.65$ 的多孔铵油炸药，对铝进行多层复合，选用各层碰撞角均为 $12^\circ$ ，进行十层一次爆炸复合，图5为复合过程中的瞬态X光照片。由于前

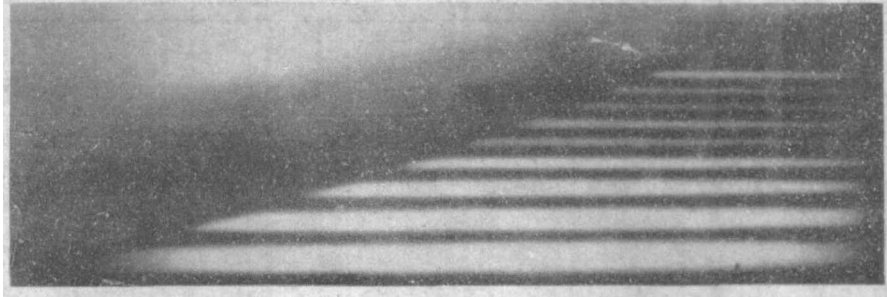


图5 十层铝板一次爆炸复合的瞬态脉冲X光照片  
(铝板厚 $1.5\text{ mm}$ ，各层设计碰撞角 $\alpha = 12^\circ$ )

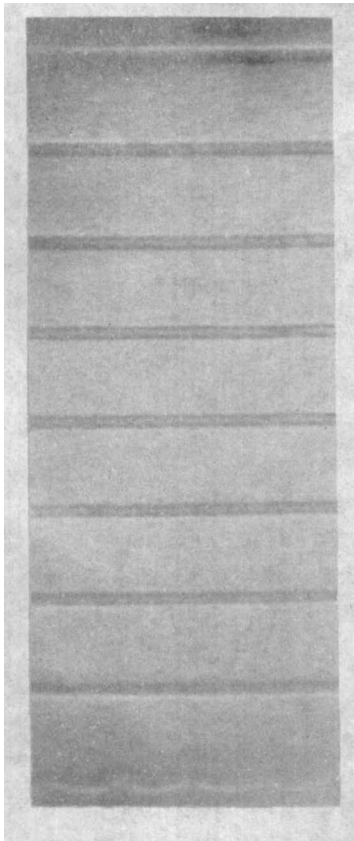


图6 10层铝复合金相照片

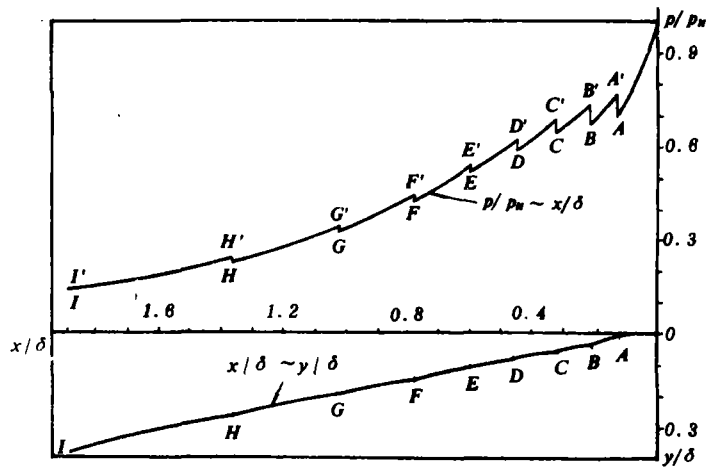


图7 10层铝板一次爆炸复合时，复合运动姿态 $y/\delta$ 曲线和压力 $P/P_H \sim x/\delta$ 曲线，每层 $\alpha = 12^\circ$

几层的间隙较小和X光的绕射现象，因此动态角 $\beta$ 不易测量，从第8~9和第9~10这两层的照片来看，计算和实际观察到的误差约在 $\pm 1^\circ$ 左右，也即和测量误差为同一量级。图6为10层（每层铝板厚 $1.5\text{ mm}$ ，碰撞角 $\alpha = 12^\circ$ ，最后一层置于准刚性基础上）。复合时的金相照片，图内黑色粗线为爆炸复合界面。由于各层的碰撞角 $\beta$ 较小，均为 $12^\circ$ ，因此为均匀一致的平直界面。表1为10层复合时的层间间距的计算值。图7为10层铝板一次爆炸复合的爆炸产物压力 $P/P_H \sim$

表 1

间距序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
间距 $R$ (mm)	0.68	0.66	0.87	0.98	1.19	1.5	1.92	2.73	4.37
碰撞角 $\alpha_i$	$12.2^\circ$	$12.01^\circ$	$12.09^\circ$	$12.03^\circ$	$12.01^\circ$	$12.03^\circ$	$12.01^\circ$	$12.00^\circ$	$12.01^\circ$

$x/\delta$  分布和运动姿态  $y/\delta \sim x/\delta$  曲线的理论计算结果。不难看到每当复板层之间碰撞时（碰撞点  $A, B \cdots I$ ）由于复板运动速度突然减慢，作用于复板背面的爆炸产物压力  $p/p_0$  突然上升，其值为  $AA', BB' \cdots$ ，并随复板运动移向下游而逐渐下降。从运动姿态曲线看到在每一碰撞点处  $\alpha \approx 12^\circ$ 。

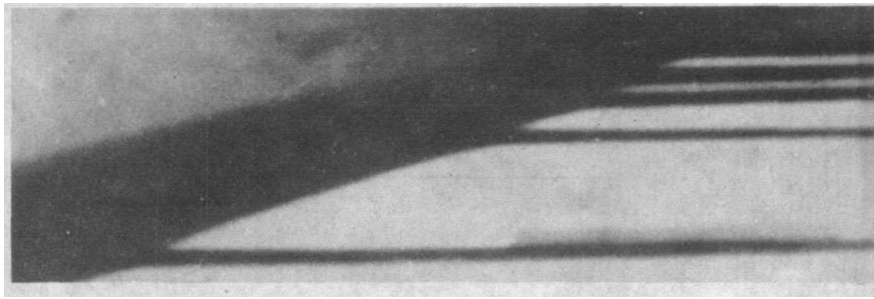


图 8 五层铝合金 Ly12 爆炸复合，瞬态 X 光照片  
(第 3~4 层碰撞角计算值  $\alpha = 14.88^\circ$ ，测量值  $\alpha = 14.5^\circ$ ，第 4~5 层碰撞角计算值  $\alpha = 15.75^\circ$ ，测量值  $\alpha = 15.5^\circ$ ，炸药 ANFO， $\rho = 0.75 \text{ g/cm}^3$ )

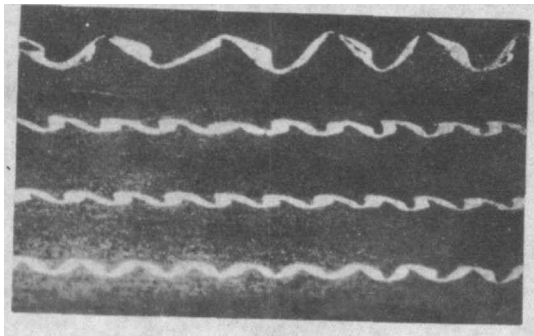


图 9 五层铝复合时的波状界面金相照片，  
各层碰撞角  $\alpha = 14^\circ$ ， $x = 6.5 \text{ mm}$   
(炸药为铍油，爆速  $2300 \text{ m/s}$ ，药厚  $30 \text{ mm}$ ，  
铝板厚  $2 \text{ mm}$ ，试件置于准刚性基础上)

图 8 为  $\alpha = 14^\circ$  时，5 层铝合金 Ly12 一次爆炸复合的 X 光照片。图 9 为其金相照片。由于各层碰撞角  $\alpha$  相同，板厚相同，因此可以看到从第 1 层到第 4 层的波形相当一致。第五层复板放在准刚性基础上，对这一层复板而言，由于第 1~4 层复板所构成的“复合板”的厚度远小于刚性基础的厚度，因此，碰撞时的  $\alpha$  角，由“复合板”弯曲所形成。众所周知，碰撞角  $\alpha$  相同时，界面波长和复板厚度成正比。复合板由四层复板组成，因此，其波长应大致等于第 1~4 层复合时界面波长的 4 倍。由于基础为准刚性，所以实际上的波长约为 2 倍。



表2为五层铝合金复合时理论计算的碰撞角 $\alpha_{\text{计}}^{\circ}$ 和X光照片实测的 $\alpha_{\text{测}}^{\circ}$ 对比。其偏差大约在 $\pm 1^{\circ}$ 左右,其值与测量误差大致相同。

表 2

层数 $N$	质量比 $R_i$	水平距离 $x$ (mm)	层间间距 $y$ (mm)	$\alpha_{\text{计}}^{\circ}$	$\alpha_{\text{测}}^{\circ}$
1~2	4.16	6.5	1.0	14.4°	测不准
2~3	2.08	10.5	1.0	12.6°	测不准
3~4	1.387	23.5	3.0	14.88°	14.5°
4~5	1.04	56	12.5	15.75°	15.5°

从图6、图9的复合界面的金相照片中不难看到,当各层的碰撞角 $\alpha_i$ 相同时,焊接质量比较一致,具有相同的平直界面和波状界面,从而表明本文采用的多层计算方法比较合理和可靠。

## 2. 不同金属(或合金)的多层爆炸复合

如果需要多层的不同金属爆炸复合在一起,而且事先已经用实验方法确定了每两层之间的最佳碰撞角 $\alpha_m$ ,则同理也可以计算出相应的各层之间的最佳间距 $h_i$ 。

图10为不锈钢—紫铜—黄铜—紫铜—黄铜五层金属一次爆炸复合的界面形貌。

多层爆炸复合也可以使不锈钢—W18Cr4V1高速钢—不锈钢,或不锈钢—65Mn(弹簧钢)—不锈钢一次爆炸复合。各层碰撞角取 $12^{\circ}$ 。复合后的材料经受热锻,轧制和热处理,所制成的刀子兼有锋利刀刃和防锈蚀的优点。

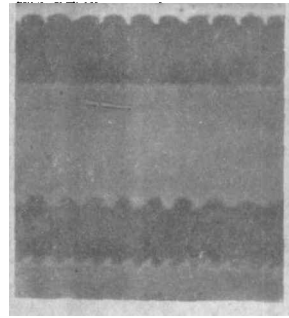


图10 不锈钢(1)—紫铜(2)—黄铜(3)—紫铜(4)—黄铜五层一次爆炸复合

## 结 束 语

金属(或合金)的多层爆炸复合进一步扩大了以双金属复合为主要形式的爆炸复合技术的应用范围,使金属材料的特性更为丰富多采。但复合层数增加,给用实验方法或理论计算来确定各层焊接参数带来很大困难。本文的贡献在于提出了一种比较行之有效的理论计算模型和数学表达公式。特别是它考虑到了多层复合过程中爆炸产物对各层复板运动的加速过程的影响,这样使多层复合有了可能实现均匀一致的焊接质量。实验和计算对比表明其误差约 $\pm 1^{\circ}$ 左右。

本工作得到李国豪同志、石成、欧秀芝等同志在实验中所给予的帮助和支持,有关X光照片是黄良佐、边小兵同志拍摄的,作者对此深表感谢。

## 参 考 文 献

- (1) 邵丙瑛、张登霞、李国豪、周之洪, 爆炸与冲击, 5 (3) (1985), 1.  
(2) H. El-Sobky, Blazynski, T. Z., 7th Inter. Conf. High Energy Rate Fab. (1981), Leeds, 100.  
(3) S. T. S. Al-Hassani, Salem, S. A. L., 7th Inter. Conf. High Energy Rate Fab. (1981) Leeds, 208.  
(4) Wylie, H. K., 3rd Inter. Conf. Center High Energy Form. (1971) 1.3.1.

**CALCULATING METHOD OF THE EXPLOSIVE  
CLADDING PARAMETERS OF MULTILAMINATES  
UNDER SLIPING DETONATION**

Shao Binghuang Zhou Zhihong Li Guohao

**Abstract**

In this paper, a two-dimensional calculating formula of the accelerating motion of each layer under slipping detonation over multilaminates is given. According to the characteristics of metal, given an optimum collision angle  $\beta$  for each layer, the optimum flying distance of the corresponding layer can be calculated. The calculated results are in good agreement with the experimental even in the case of ten layers of aluminum plates. The calculated  $\beta$  angle of each layer is in good accord with that determined by Xray photograph.