

材料强度在爆炸焊接界面波 形成过程中的作用

张登霞 李国豪 周之洪 邵丙璜

(中国科学院力学研究所)

提要 本文给出了爆炸焊接界面波形成机理的几组试验结果。这些结果表明: 1. 界面波的比波长是与粘性无关的恒值; 2. 在低碰撞速度段, 界面波的比波长随板材强度而变化, 在高碰撞速度段, 界面波的比波长是与板材强度无关的恒值。因此, 爆炸焊接界面波形成机理的流体弹塑性模型是合理的。

本文还给出确定界面波波长的经验公式。

一、前言

爆炸焊接界面波形成机理的研究不仅能为确定最佳焊接工艺参数提供可靠的理论依据, 而且, 界面波的形成和发展过程也是固体材料高速倾斜碰撞的稳定性问题, 具有一定的学科价值。

关于界面波纹形成机理的提法很多, 六十年代提出了刻入机理、Helmholtz 不稳定性机理、涡脱落机理和应力波机理^[1]。七十年代较多的文章用流体动力学稳定性的方法研究焊接界面波。如 Robinson^[2] 和 Уткин^[3] 认为, 若碰撞速度较低, 材料的粘性抑制了波的发生, 焊接界面为平直界面; 若碰撞速度足够高, 金属板可以被看做为理想不可压缩流体, 焊接界面为波状界面。但是这种说法和一些试验结果发生了矛盾。

郑哲敏教授估计, 在爆炸焊接过程中, 材料强度和材料粘性相比较, 强度是主要因素。当碰撞速度足够高时, 材料强度和金属板碰撞点动压力相比较, 前者可以忽略不计, 于是, 金属板可以被看做为理想不可压缩流体, 这时焊接界面波的波长与材料强度无关。若碰撞速度较低, 材料强度成为不可被忽略的因素, 焊接界面波的波长随板材的强度而变化。所以爆炸焊接界面波的形成机理应属于流体弹塑性的范畴。

为了鉴别粘性流体、理想不可压缩流体和流体弹塑性模型, 我们做了几何放大试验和变强度试验。

二、界面波形参数的量纲分析

两块被焊金属板在爆炸载荷驱动下倾斜碰撞后即在碰撞点处焊接在一起。由于碰撞条件的不同, 焊接界面呈平直状或波浪状。如果把坐标原点放在碰撞点上, 那么相互倾斜碰撞的金属板就象两块以速度 V , 向碰撞点流动的金属板。

本文于 1983 年 2 月 8 日收到。

在爆炸焊接过程中,表征界面波纹特征的一个主要参数是波长 λ , 影响特征参数的物理量有

金属板密度	ρ, ρ'	$[\rho] = ML^{-3}$
金属板厚度	h, h'	$[h] = L$
纵波速度	C_L, C'_L	$[C_L] = LT^{-1}$
横波速度	C_S, C'_S	$[C_S] = LT^{-1}$
常温常压下金属板的屈服应力	σ_y, σ'_y	$[\sigma_y] = ML^{-1}T^{-2}$
金属板的粘性系数	η, η'	$[\eta] = ML^{-1}T^{-1}$
金属板熔点	T_M, T'_M	$[T_M] = \Theta$
金属板的比热	C_v, C'_v	$[C_v] = L^2T^{-2}\Theta^{-1}$
碰撞速度	V_f, V'_f	$[V_f] = LT^{-1}$
碰撞角	β	$[\beta] = M^0L^0T^0$

以上共有 19 个有量纲的独立的物理量, 其中长度 L 、质量 M 、时间 T 和温度 Θ 为独立量纲。根据 π 定理, 它们可以构成 15 个独立的无量纲量, 即:

$$\rho/\rho', h/h', C_L/C'_L, C_S/C'_S, \sigma_y/\sigma'_y, \eta/\eta', T_M/T'_M, C_v/C'_v, V_f/V'_f, \\ \beta, \sigma_y/\rho C_L^2, \sigma_y/\frac{1}{2}\rho V_f^2, \rho V_f h/\eta, C_L/(C_v T)^{1/2}, C_L/C_S$$

本试验系采用同一种材料进行对称爆炸焊接, 因此, 控制试验的无量纲参数就只剩下三个 β 、 $\sigma_y/\frac{1}{2}\rho V_f^2$ 和 $\rho V_f h/\eta$, β 是两块金属板碰撞时刻的夹角; $\bar{\sigma} = \sigma_y/\frac{1}{2}\rho V_f^2$ 是碰撞点动压力与材料强度之比; $Re = \rho V_f h/\eta$ 是雷诺数。于是

$$\frac{\lambda}{h} = \bar{\lambda} = f(\beta, \bar{\sigma}, Re)$$

试验时只要改变其中任一个无量纲参数而保持其它参数为常数, 就可以得到比波长 $\bar{\lambda}$ 随该参数的变化规律。

三、试验方案和试验方法

1. 试验方案

试验共分三类, 即几何放大试验, 变强度试验, 变碰撞角试验。

几何放大试验通过改变金属板厚度的办法改变雷诺数。为了考察不同比强度 ($\bar{\sigma}$) 时材料粘性对界面波的影响, 我们在碰撞角 $\beta = 22^\circ$ 的条件下做了三种比强度的几何放大试验, 这三种比强度值分别为: $1/\bar{\sigma} = 33$ 、 $1/\bar{\sigma} = 60$ 、 $1/\bar{\sigma} = 97$ 。金属板的厚度由 1.5mm 变至 15mm。

变强度试验 通过改变碰撞速度 V_f 的办法改变比强度。几何放大试验证明了界面波长与雷诺数无关, 所以进行变强度试验时只要保持 β 为常数即可。为了考察不同碰撞角时材料强度对界面波的影响, 我们做了两种碰撞角条件下的变强度试验, 这两种碰撞角分别为 26° 和 13° , 比强度的倒数由 6.0 变至 110。

变碰撞角试验 和变强度试验一样, 这里只要保持比强度 $\bar{\sigma}$ 不变即可。试验时采用的参数为 $1/\bar{\sigma} = 92$, β 由 12.0° 变至 29.2° 。

2. 试验方法

试验是在爆炸洞内进行的. 试验用含碳量为 0.147% 的低碳钢板, 板材的静屈服强度 $\sigma_y = 2800\text{kg/cm}^2$, 静抗拉强度 $\sigma_b = 3900\text{kg/cm}^2$. 焊接前板材的被焊接表面在磨床上磨光, 大部分金属板的内表面在起爆端附近预先铣出一条适当宽度的槽. 试验用的炸药为 80/20 板状塑性炸药, 爆轰速度为 6500m/s , 密度 $\rho = 1.47\text{g/cm}^3$, 这种炸药的极限厚度小, 性能稳定, 能保证试验的精度.

爆炸焊接前金属板组件如图 1 所示, 图 1a 是对称爆炸焊接组件, 图 1b 是准对称爆炸焊接组件.

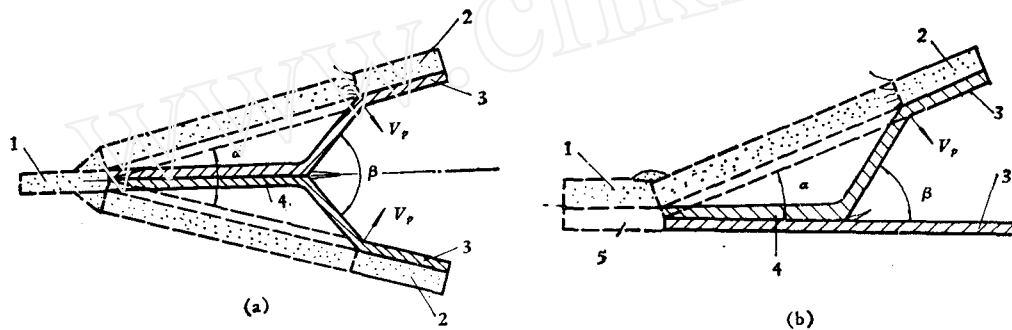


图 1 被焊金属板组件

1 线状波发生器 2 炸药 3 金属板 4 焊件 5 木板

当炸药从一端起爆后, 在高压气体的作用下金属板被压垮后碰撞在一起. 金属板压垮过程中瞬时的几何形状如图 1 中实线所示. 可以根据理想不可压缩流体模型估算金属板相对于碰撞点的运动速度 V_f , 计算公式如下^[4]:

在对称爆炸焊接中

$$V_{f(\text{对})} = 2V_D \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{1}{2}(\beta - \theta) / \sin \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

在准对称爆炸焊接中, 飞板相对于碰撞点的流动速度为

$$V_{f(\text{准})} = 2V_D \sin \frac{\theta}{2} \cos \left(\beta - \frac{\theta}{2} \right) / \sin \beta \quad (2)$$

基板相对于碰撞点的流动速度为

$$V_b = 2V_D \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} / \sin \beta \quad (3)$$

上述各式中 V_D 是炸药的爆轰速度; θ 是金属板的动态弯折角, 它是药量的函数; β 是碰撞角.

分析式(1)和式(2)可知, 在相同的碰撞速度 V_f 的条件下, 准对称焊接所需要炸药的厚度大于对称焊接时炸药的厚度. 为了保证在低碰撞速度 ($1/\sigma = 6, 10$) 段内使用的炸药厚度在极限厚度以上, 我们在该段内采用了准对称焊接组件. 其它均用对称焊接组件.

由式(2)和(3)计算这两种条件下的 V_b 和 V_f , 计算结果表明, $(|V_b - V_f|/V_f) < 10\%$, 这个差值在我们控制的试验误差范围内. 表 1 是在相同无量纲参数条件下的对称

表 1

Re	$1/\bar{\sigma}$	β	$\bar{\lambda}$	\bar{a}
537(1/\eta)	64	13	0.54	0.25
531(1/\eta)	64	13	0.54	0.25

和准对称爆炸焊接试验结果,它表明,联合使用对称和准对称爆炸焊接的方法是可行的。

为了使爆炸焊接能在动态参数保持不变(在整个焊接过程中 β 和 V_f 都等于常数)的条件下进行,引爆用的炸药长度必须大于或等于 $h_c/c.625^{[9]}$ 。

碰撞角 β 和初始安装角 α 是通过脉冲X光照相直接测得的,精度为10%。图2是这种测试装置的平面布置图。用细线将试件悬挂在铁丝上,试件中心距X射线管表面为1.8m,离地面为1.5m,离底片盒中心约为50—70cm,底片盒用铁丝悬挂在支架上,采用这种漂移式的方法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 40×10^{-9} 秒,同步时间误差为 $\pm 1 \mu s$ 。

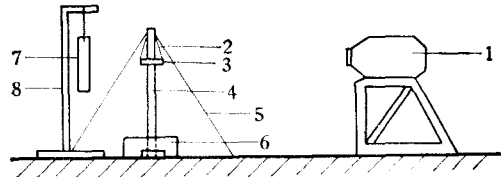


图 2 测动态参数装置示意图

1 X光机 2 细线 3 金属板组件 4、8 支架 5 铁丝 6 砂箱, 7 底片盒

界面波的波长是用两种方法测得的,其一是直接从保证定常焊接条件的焊件上读平均值,其二是在被观察的范围内,在 $h_c/V_D t$ (炸药厚度与爆轰波波阵面距起爆端的距离之比)相等的位置处取样,经过抛光、腐蚀后在金相显微镜下读值。

四、试验结果

1. 几何放大试验 界面比波长 $\bar{\lambda}$ 随雷诺数的变化关系如图3,曲线I对应 $L/\bar{\sigma} = 33$, $\beta = 22^\circ$ 的条件,曲线II对应 $1/\bar{\sigma} = 60$, $\beta = 22^\circ$ 的条件。由图可见,这两组的 $\bar{\lambda}$ 都不随Re变化。曲线III对应 $1/\bar{\sigma} = 97$, $\beta = 22^\circ$ 的条件,在这种条件下, $\bar{\lambda}$ 随Re增加略有下降,当Re增加10倍时, $\bar{\lambda}$ 约减小10%,这是在我们控制的试验误差范围内,所以可认为在这种条件下界面波的 $\bar{\lambda}$ 也不随Re变化。

照片1是一组几何放大试验的波形照片,由图可见,界面波的波形也是几何相似的。

我们在试验中也观察到一些几何不相似的现象,例如,当爆炸焊件出现层裂时,界面波长就不是几何相似的。另外,在大碰撞角($\beta = 27^\circ$)的一组试验中有的界面有波、有的界面则无波。

2. 变强度试验 界面比波长随材料比强度的变化关系如图4,其中 σ_s 取板材的静抗拉强度。照片2是对应几种 $\bar{\sigma}$ 的界面波形。由图4和照片2可见,界面波随板材的比强度

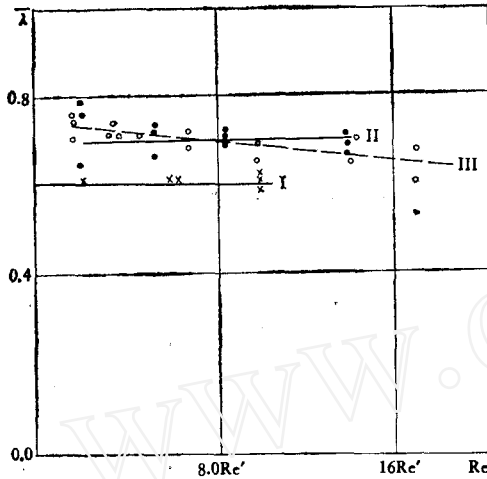


图 3 $\beta = 22^\circ$ 时 $\bar{\lambda}$ -Re 关系

I— $1/\bar{\sigma} = 33$ II— $1/\bar{\sigma} = 60$ III— $1/\bar{\sigma} = 97$

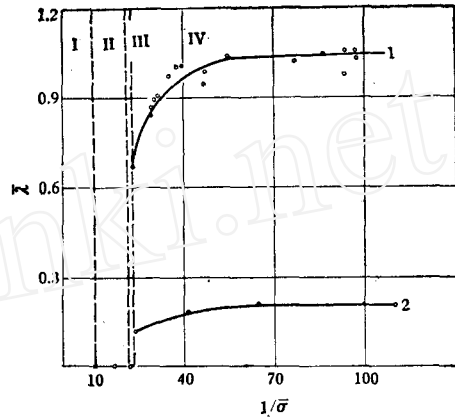


图 4 $\bar{\lambda}$ - $\bar{\sigma}$ 关系曲线

I—未焊合区 II—无波纹区 III—正弦波区
IV—带有前、后旋涡的波纹区
曲线 1 $\beta = 26^\circ$
曲线 2 $\beta = 13^\circ$

$\bar{\sigma}$ 的变化规律为： $1/\bar{\sigma}$ 在 10 至 23 的范围内，焊接界面无波纹； $1/\bar{\sigma} = 23$ ，焊接界面为正弦波状；增加 $1/\bar{\sigma}$ ，界面上出现了前后旋涡，且 $\bar{\lambda}$ 也随 $1/\bar{\sigma}$ 增加而增加，当 $1/\bar{\sigma} = 50$ 时，界面波长达到了最大值，在这段内波长的相对增加量 $\left(\frac{(\bar{\lambda})_{1/\bar{\sigma}=50} - (\bar{\lambda})_{1/\bar{\sigma}=23}}{(\bar{\lambda})_{1/\bar{\sigma}=23}} \right)$ 约为 50%； $1/\bar{\sigma}$ 在 50 至 100 的范围内， $\bar{\lambda}$ 是与 $\bar{\sigma}$ 无关的恒值。

整理试验结果给出界面波的比波长随板材比强度的变化规律为

$$(\bar{\lambda})_{\beta=26^\circ} \sim \exp(-13.6\bar{\sigma}) = G(\bar{\sigma}) \quad 23 \leq 1/\bar{\sigma} \leq 50$$

$$(\bar{\lambda})_{\beta=26^\circ} = \text{常数} \quad 1/\bar{\sigma} \geq 50$$

3. 变碰撞角试验 界面比波长随碰撞角的变化规律如图 5，由图示曲线得到 $\bar{\lambda}$ 与 β 的关系为

$$\bar{\lambda} \sim (\beta/2)^{2.1} = F(\beta)$$

五、试验结果分析

1. 变强度试验指出，界面波的比波长随板材比强度的变化规律大致可以分为三个区，即：在 $10 \leq 1/\bar{\sigma} \leq 23$ 范围内，焊接界面为平直的； $1/\bar{\sigma}$ 在 23 至 50 范围内，界面波的比波长随板材的比强度增加而增加，我们称这个区为强度影响区； $1/\bar{\sigma}$ 在 50 至 100 范围内，界面波的比波长是与材料强度无关的恒值，我们称这个区为强度无影响区。由此可见，在爆炸焊接界面波纹的形成和发展过程中，材料强度是一个有主要影响的物理量。

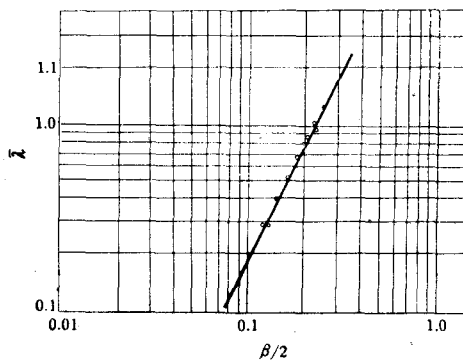


图 5 $\bar{\lambda}$ - β 关系 ($1/\bar{\sigma} = 92$)

2. 几何放大试验给出, 在三种 $1/\bar{\sigma}$ 的条件下, 界面波长 $\bar{\lambda}$ 都是与雷诺数 Re 无关的常数, 只是当 $1/\bar{\sigma} = 33$ 时, 界面比波长的数值小于其它两组的数值. 由变强度试验结果可以说明引起这种差别的原因, $1/\bar{\sigma} = 33$ 的一组几何放大试验是在强度影响区内, 考虑到强度的影响, 我们根据

$$(\bar{\lambda})_{1/\bar{\sigma}=50, \beta=22^\circ} = \frac{\exp(-13.6 \times 50)}{\exp(-13.6 \times 33)} \times (\bar{\lambda})_{1/\bar{\sigma}=33, \beta=22^\circ}$$

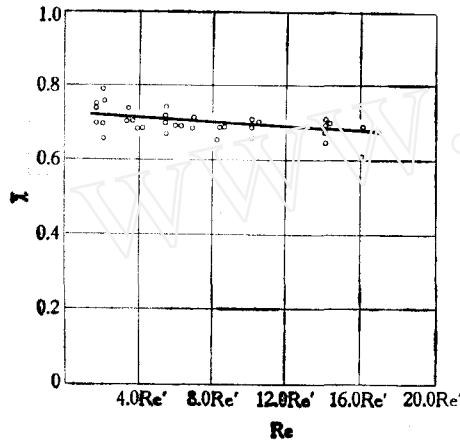


图 6 $\bar{\lambda}$ - Re 关系

把 $1/\bar{\sigma} = 33$ 一组试验中得到的 $\bar{\lambda}$ 值换算到强度无影响区内. 把这组值和另外两组几何放大的试验值一并画在图 6 中. 可以看出三组几何放大试验得到的 $\bar{\lambda}$ 值均落在一条线上, 三组几何放大试验又一次证明了板材强度是影响界面波长的重要物理量. 图 6 表明, 当金属板厚度变化 10 倍时, $\bar{\lambda}$ 随 Re 的变化只有 8%, 它小于试验误差, 这就是说材料的粘性对界面波的比波长影响不大. 因此, 用粘性流体模型研究界面波纹的形成过程是不合适的.

数.

假定界面波的比波长随各无量纲参数的变化规律可以写成如下形式

$$\bar{\lambda} = R(Re)F(\beta)G(\bar{\sigma})$$

把 $F(\beta)$ 、 $G(\bar{\sigma})$ 、 $R(Re)$ 代入上式后即得

$$\bar{\lambda} = k \left(\frac{\beta}{2} \right)^{2.1} \exp(-13.6\bar{\sigma}) \quad 23 \leq 1/\bar{\sigma} \leq 50$$

$$\bar{\lambda} = k_1 \left(\frac{\beta}{2} \right)^{2.1} \quad 1/\bar{\sigma} \geq 50$$

根据试验数据确定

$$k = 31, k_1 = 22$$

3. 金属材料屈服以后, 在应力作用下会发生流动. 应变率对流动应力的影响就是金属材料的粘性效应. 动载荷作用下材料力学性质的试验指出, 当应变率为 $10^3 - 10^4$ $1/s$ 时许多金属的粘性效应彼此差别不大, 我们可以判断, 这里得到的规律性结论也适用于其它金属材料.

六、结 论

1. 几何放大试验结果证明了材料粘性对界面波波长基本没有影响, 因此, 用粘性流体模型研究爆炸焊接界面波的形成和发展是不合适的.

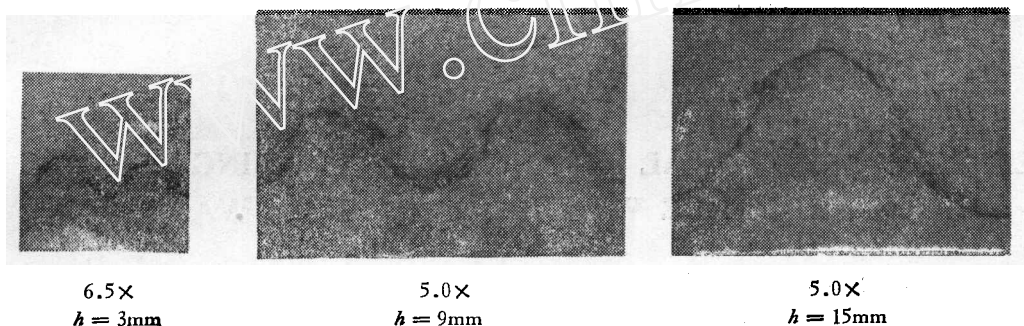
2. 变强度试验证明了在低碰撞速度段, 界面波的波长随板材强度而变化; 在高碰撞速度段, 界面波的波长与板材强度无关. 因此, 爆炸焊接界面波的形成机理应属于流体弹塑性的范畴.

3. 整理试验数据得到确定界面波波长的经验公式为

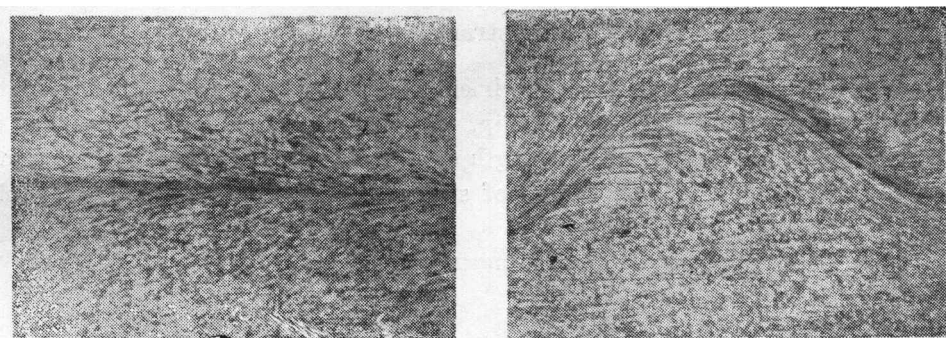
$$23 \leq 1/\bar{\sigma} \leq 50 \quad \bar{\lambda} = 31 \left(\frac{\beta}{2}\right)^{2.1} \exp(-13.6\bar{\sigma})$$

$$50 \leq 1/\bar{\sigma} \leq 100 \quad \bar{\lambda} = 22 \left(\frac{\beta}{2}\right)^{2.1}$$

4. 本试验虽采用 80/20 板状塑性炸药做为能源驱动金属板运动，但上述结果是以金属板的碰撞角 β 、碰撞速度 V_f 做为自变量，因之，试验结果可以推广使用到其它能源(例如：低爆速炸药、气炮、电磁等)驱动金属板的碰撞焊接中。

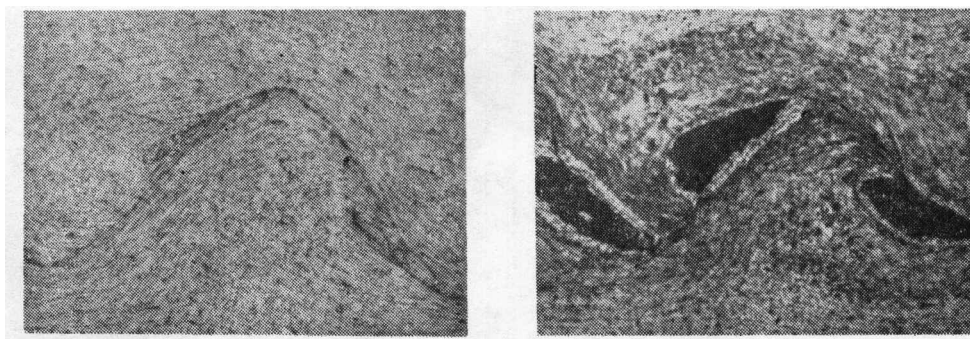


照片 1 几何放大的波形 ($\beta = 22^\circ$)



(a) $1/\bar{\sigma} = 16$
60x

(b) $1/\bar{\sigma} = 23$
40x



(c) $1/\bar{\sigma} = 29$
40x

(d) $1/\bar{\sigma} = 92$
25x

照片 2 不同 $\bar{\sigma}$ 的波形 ($\beta = 26^\circ$)

本工作是在郑哲敏教授指导下进行的,作者仅表示衷心感谢。对谈庆明、郭汉彦的帮助表示感谢。对力学研究所第二研究室七组同志、李立国同志、吴锡祥同志,霍俊清同志在试验中的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Reid, S. R., *Int. J. Mech. Sci.*, **16**, 6(1974).
- [2] Robinson, J. L., *Phil. Mag.*, **31**, 3(1975).
- [3] Уткин, А. В. Дремин, А. Н., Михайлов, А. Н., Гордолов, Ю. А., Ф. Г. В., **16**, 4(1980).
- [4] Birkhoff, G. et al., *J. A. P.*, **19**, 593 (1948).
- [5] 张登霞,焊接学报, 3(1983).

EFFECT OF MATERIAL STRENGTH ON FORMING PROCESS OF EXPLOSIVE WELDING INTERFACE WAVE

Zhang Dengxia Li Guohao Zhou Zhihong Shao Binghuang

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

Abstract

This paper presents a series of experimental results. It is shown that the interface wave length is geometrically similarity, and that in lower velocity range, the interfacial wave length varies with strength of material, and in higher velocity range, the interface wave length is independant of strength. Therefore the fluid-elastic-plastic model is acceptable.

Also an empirical formula for estimating interfacial wave length is given.