

# 低碳钢爆炸焊接界面波与板材无量纲强度关系的试验研究

张登霞 李国豪

(1982年9月22日收到)

本文叙述了低碳钢爆炸焊接界面波随板材无量纲强度  $\frac{1}{2} \frac{\rho V_f^2}{\sigma_s}$  ( $\rho$ —板材密度,  $\sigma_s$ —板材拉伸强度,  $V_f$ —飞板相对于碰撞点的运动速度) 变化规律的试验结果, 结果表明, 当  $\frac{1}{2} \frac{\rho V_f^2}{\sigma_s} < 22.5$ , 焊接界面为直线结合, 当  $22.5 < \frac{1}{2} \frac{\rho V_f^2}{\sigma_s} < 50$ , 焊接界面波比波长 ( $\frac{\lambda}{h}$ ) 随比强度增加而增加, 当  $50 < \frac{1}{2} \frac{\rho V_f^2}{\sigma_s} < 100$ , 焊接界面波比波长是与比强度无关的恒值。金相观察表明, 在  $\frac{1}{2} \frac{\rho V_f^2}{\sigma_s} = 22.5$  附近, 焊件质量较好。

## 一、概 述

近二十年来, 爆炸焊接界面波纹形成机理的研究引起了爆炸加工界和力学工作者的重视和兴趣, 这不仅因为爆炸焊接界面波纹形成机理是决定爆炸焊接工艺参数的重要环节, 而且也因为它是力学中的一个有意思的课题。迄今国外许多研究者认为, 在爆炸焊接过程中, 金属板可以被看作为流体, 在波的形成和发展过程中, 粘性起主导作用。郑哲敏同志估计, 在爆炸焊接过程中, 材料强度和粘性相比较, 强度是主要因素, 爆炸焊接界面波纹形成机理属于流体弹塑性稳定性范畴的问题。根据这一估计, 我们在量纲分析的基础上进行了一系列低碳钢板的爆炸焊接试验, 取得了若干结果, 为建立力学模型提供了较重要的依据。

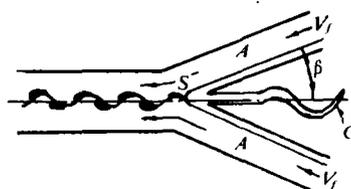


图1 爆炸焊接过程示意图

图1是爆炸焊接过程中金属板的流动图案, 如果 A—未焊接钢板, C—再入射流, S—碰撞点

## 二、量纲分析

把坐标原点放在碰撞点上,那么相互碰撞的金属板就像两块以速度  $V_f$  向碰撞点流动的金属板,它们在碰撞点相遇后即焊接在一起。表征界面波纹的特征参数为波长  $\lambda$ , 波幅  $a$ 。影响这些参数的物理量有

金属板的密度	$\rho_p$ $\rho_f$	$[\rho] = M L^{-3}$
金属板的厚度	$h_p$ $h_f$	$[h] = L$
纵波速度	$C_p$ $C_f$	$[C] = L T^{-1}$
横波速度	$C_{s,p}$ $C_{s,f}$	$[C_s] = L T^{-1}$
常温常压条件下金属板的屈服应力	$\sigma_{y,p}$ $\sigma_{y,f}$	$[\sigma] = M L^{-1} T^{-2}$
金属板的粘性系数	$\eta_p$ $\eta_f$	$[\eta] = M L^{-1} T^{-1}$
特征温度	$T_{M,p}$ $T_{M,f}$	$[T] = \Theta$
金属板的定容比热	$C_{v,p}$ $C_{v,f}$	$[C_v] = L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
金属板的碰撞速度	$V_{f,p}$ $V_{f,f}$	$[V_f] = L T^{-1}$
碰撞角	$\beta$	

以上共有 19 个有量纲的物理量,根据  $\pi$  定理,可以组成 15 个独立的无量纲量。即:  $\rho_p/\rho_f$ 、 $h_p/h_f$ 、 $C_p/C_f$ 、 $C_{s,p}/C_{s,f}$ 、 $\sigma_{y,p}/\sigma_{y,f}$ 、 $\eta_p/\eta_f$ 、 $T_{M,p}/T_{M,f}$ 、 $C_{v,p}/C_{v,f}$ 、 $V_{f,p}/V_{f,f}$ 、 $\beta$ 、 $V_{f,p}/C_p$ 、 $(1/2)\rho V_{f,p}^2/\sigma_y$ 、 $\rho C h/\eta$ 、 $C_p^2/C_{v,p} T_{M,p}$ 、 $C_p/C_{s,p}$ 。试验时采用同一种材料的对称碰撞装置,于是控制试验的无量纲参数就只有四个

$$\beta, V_f/C, \frac{1}{2}\rho V_f^2/\sigma_y, \rho C h/\eta$$

这四个无量纲参数的物理意义是:  $\beta$  是两块金属板碰撞时刻的夹角;  $V_f/C$  代表金属板流动速度与金属板声速的比,也就是马赫数;  $(1/2)\rho V_f^2/\sigma_y$  代表碰撞点的动压力与材料强度之比,叫作比强度;  $\rho C h/\eta$  是雷诺数。于是得到

$$\left(\frac{a}{h}\right) \frac{\lambda}{h} = f\left(\beta, \frac{V_f}{C}, \frac{1}{2} \frac{\rho V_f^2}{\sigma_y}, \frac{\rho C h}{\eta}\right)$$

试验是在亚音速范围内进行,式中  $V_f/C$  即为一个不重要的物理量。本文是研究波长(波幅)随强度的变化规律。试验时只改变  $(1/2)\rho V_f^2/\sigma_y$  而使  $\beta$ 、 $\rho C h/\eta$  保持为常数。

### 三、试验装置和试验方法

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  $\sigma_s = 2800 \text{ kg/cm}^2$ , 静抗拉强度  $\sigma_B = 3900 \text{ kg/cm}^2$ 。板材的被焊接表面在磨床上磨光。大部分焊件的内表面在起爆端附近予先铣一条适当宽度的槽。试验用的炸药为 80/20 板状塑性炸药,爆轰速度为 6500 M/s, 密度  $\rho_v = 1.47 \text{ g/cm}^3$ 。这种炸药的极限厚度小,性能稳定,能保证试验的精度。

焊接过程的动态参数(被焊金属板的动态弯折角  $\theta$  及碰撞角  $\beta$ ) 和初始安装角  $\alpha$  是通过脉冲 X 光照相直接测得的,精度为 10%。图 2 是这种测试装置的示意图。

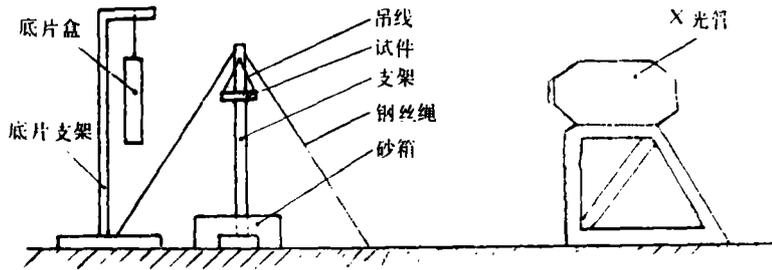


图 2 动态参数测示装置示意图

爆炸焊接前被焊金属板组合如图 3 所示,图 3a 是对称碰撞组件,图 3b 是准对称碰撞组件,联合使用对称碰撞和准对称碰撞是为了在炸药稳定爆轰的条件下能在较宽的范围内改变比强度 $\left(\frac{1}{2} \frac{\rho V_0^2}{\sigma_y}\right)$ 值 根据 Birkhoff 的假设分别计算对称碰撞和准对称碰撞条件下的碰撞速度 $V_1$ :

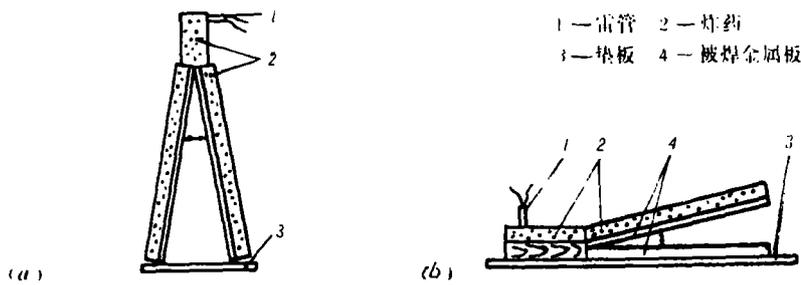


图 3 焊前金属板组件, (a) 是对称碰撞, (b) 是准对称碰撞

对称碰撞中, 金属板相对于碰撞点的流动速度为

$$V_2 = 2V_0 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{1}{2} (\beta - \theta) / \sin \frac{\beta}{2}$$

准对称碰撞中, 复板相对于碰撞点的流动速度为

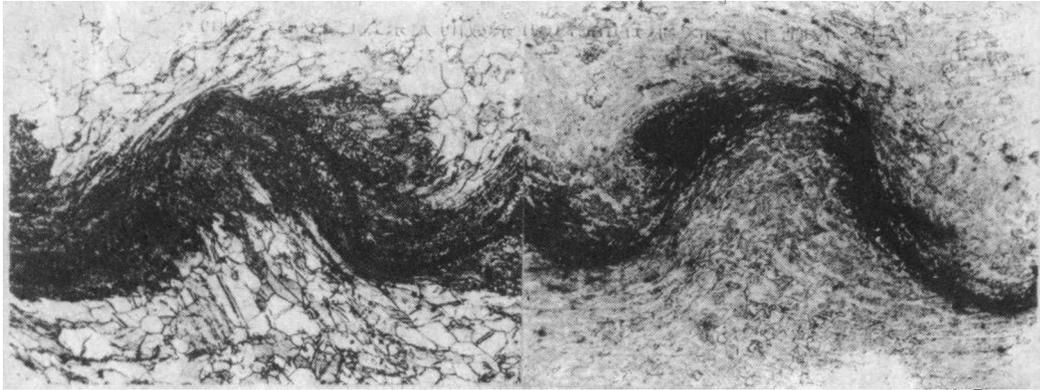
$$V_1 = 2V_0 \sin \frac{\theta}{2} \cos (\beta - \frac{\theta}{2}) / \sin \beta$$

基板相对于碰撞点的速度为

$$V_0 = 2V_0 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} / \sin \beta$$

上述各式中 $V_0$ 是炸药的爆轰速度,  $\theta$ 是金属板的动态弯折角,  $\beta$ 是碰撞角 当 $\beta = 26$ 时, 计算结果表明, 在准对称碰撞中 $|V_0 - V_1| / V_1 < 10\%$ , 这个差值在试验误差范围内 图 4 是准对称碰撞和对称碰撞 (所有无量纲参数基本相同) 条件下焊接界面的形貌 两次试验所用的参数和取得的结果列入表 1 由表 1 和图 4 可见, 两次试验的结果基本一致, 这说明联合使用对称碰撞和准对称碰撞的方法是可行的

为了使焊接界面波纹沿板长方向基本均匀, 把炸药引出被焊金属板外的长度约为 $h_0 / 0.025$ 即可



(a) 准对称碰撞

(b) 对称碰撞

图4 对称碰撞和准对称碰撞焊接界面形貌

表1 对称和准对称焊接界面形貌

照片号	$h$	$V_1$ (M/s)	$\beta$	$\lambda/h$	$a/h$
4a	2.5	2570	12	0.54	0.25
4b	3.0	2382	12	0.54	0.26

界面波的波长、波幅是用两种方法测量的。其一是直接从保证定常焊接条件下的焊件上读波长的平均值，其二是在被观察的范围内，在  $h_1/V_1 t$  相等的位置取样，经过磨光、腐蚀后在金相显微镜下读值。

金相组织观察提供了几种碰撞速度对焊接界面的形貌及金相组织的变化。

#### 四、试验结果

表2是比波长  $\lambda/h$  随比强度的变化规律，图5是比波长  $\lambda/h$ 、细化带比宽度  $b/h$  随比强度的变化规律，其中  $\sigma_s$  取板材的静抗拉强度。

图中曲线I是  $\beta = 26^\circ$  的  $\frac{\lambda}{h} \sim \frac{1}{2} \frac{\rho V_1^2}{\sigma_s}$  曲线，曲线II是  $\beta = 12^\circ$  的  $\frac{\lambda}{h} \sim \frac{1}{2} \frac{\rho V_1^2}{\sigma_s}$  曲线，曲线III是  $\frac{b}{h} \sim \frac{1}{2} \frac{\rho V_1^2}{\sigma_s}$  曲线。

根据试验资料整理得到

$$\text{当 } 25 < \frac{1}{2} \frac{\rho V_1^2}{\sigma_s} < 50 \text{ 时,} \quad \frac{\lambda}{h} = 31 \left( \frac{\beta}{2} \right)^{2.1} \exp \left( -13.64 \frac{2\sigma_s}{\rho V_1^2} \right)$$

$$\text{当 } 50 < \frac{1}{2} \frac{\rho V_1^2}{\sigma_s} < 100 \text{ 时,} \quad \frac{\lambda}{h} = 22 \left( \frac{\beta}{2} \right)^{2.1}$$

图6分别对应  $\frac{1}{2} \frac{\rho V_1^2}{\sigma_s} = 16.0, 22.5, 29.0, 92.5$  的金相照片。

表2 比波长随比强度的变化

序号	板厚 $h_s (mm)$	碰撞速度 $V_f (M/s)$	碰撞角 $\beta (度)$	碰撞点压力与强度之比 $(1/2) \rho V_f^2 / \sigma_s$	比波长 $\lambda = \frac{\lambda}{h}$
1	3.50	770	26.0	6.0	未焊合
2	3.65	1000	26.0	10.0	无波
3	3.60	1270	26.0	16.0	无波
4	3.48	1440	26.0		无波
5	3.50	1500	26.0	22.5	0.67
6	2.50	1710	26.0	29.0	0.84
7	2.50	1710	26.0	29.0	0.86
8	2.60	1720	26.0		0.89
9	3.50	1800	26.0	32.4	0.89
10	2.50	1800	26.0	32.4	0.90
11	3.54	2000	26.0	40.0	0.97
12	2.64	2080	26.0	43.0	1.00
13	3.50	2100	26.0	44.0	1.00
14	2.50	2170	26.0	47	0.94
15	2.50	2170	26.0	47	0.98
16	3.30	2320	26.0	54	1.03
17	2.50	2750	26.0	76	1.02
18	3.40	2930	26.0	86	1.04
19	2.70	3045	25.6	92.5	0.97
20	2.50	3045	26.0	92.5	1.05
21	2.50	3120	26.0	97.3	1.05
22	2.50	3120	26.0	97.3	1.03
23	2.50	3350	26.0	112.0	0.96
24	2.50	3440	26.0	118.0	1.00
25	2.50	3440	26.0	118.0	1.06
26	2.50	3440	26.0	118.0	0.90
27	2.50	3910	26.0	152.0	0.91
28	2.50	3910	26.0	152.0	0.97

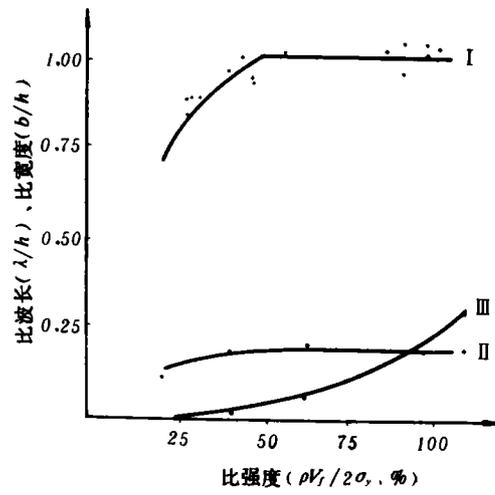


图5 比波长、细化带比宽度 ~ 比强度关系曲线

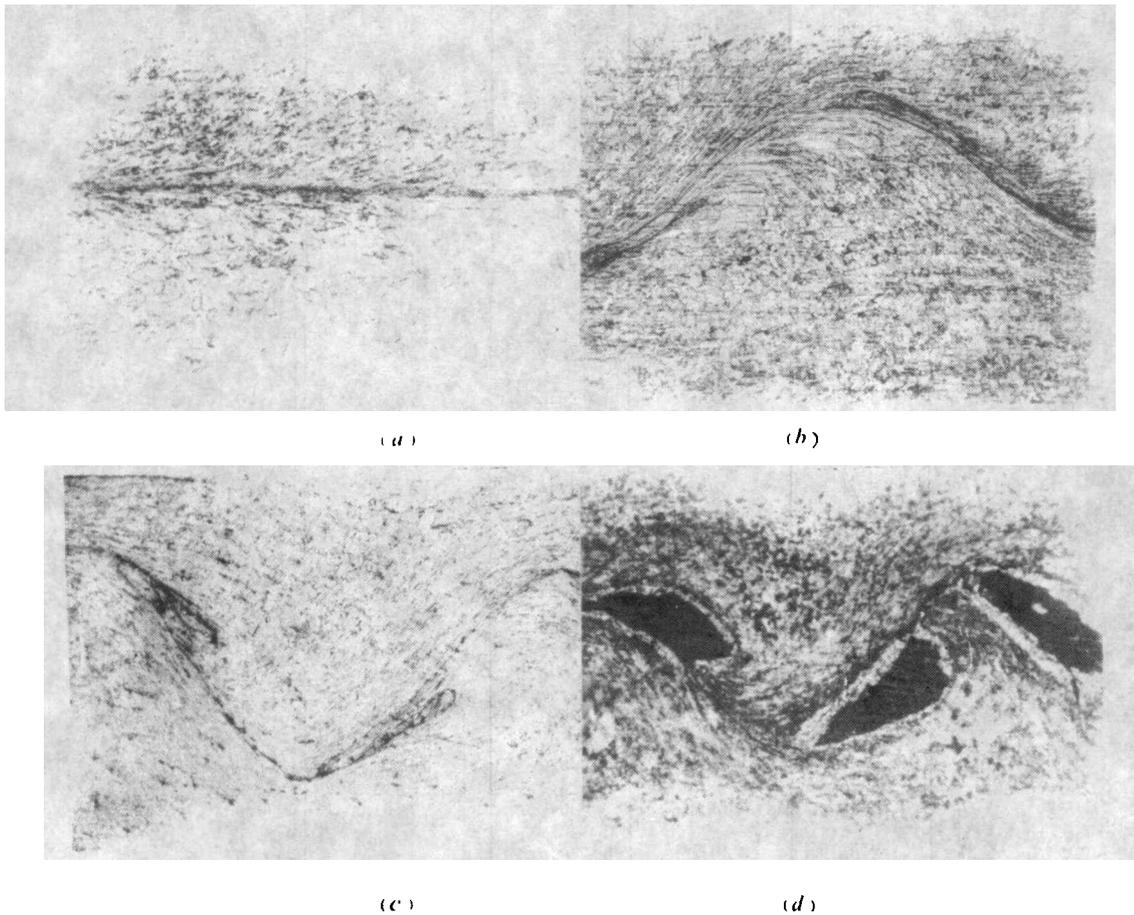


图6 对应几种比强度的界面波形貌

## 五、讨论和结论

如图5所示, 低碳钢板焊接界面波的比波长随比强度的变化关系可分为三个区: 1) 在  $10 < (1/2)\rho V_f^2/\sigma_s < 25$  的范围内, 焊接界面为直线; 2) 在  $25 < (1/2)\rho V_f^2/\sigma_s < 50$  的范围内, 界面波的比波长随比强度增加而增加; 3) 在  $50 < (1/2)\rho V_f^2/\sigma_s < 100$  的范围内, 界面波的比波长是与强度无关的恒值。这表明材料强度是一个对界面波的形成和发展有影响的因素。

如图6所示, 随比强度的增加, 低碳钢板焊接界面由直线经正弦波而发展为带有前、后旋涡的波。具有直线或正弦波的焊接界面, 其焊缝为一条焊接质量较好的细化带。具有前、后旋涡的波, 其界面有随机分布的孔洞和熔化槽, 焊合质量较差。

# AN EXPERIMENTAL RELATION BETWEEN INTERFACE WAVE FORM OF EXPLOSION WELDING MILD STEEL AND MATERIAL DIMENSIONLESS STRENGTH

Zhang Dengxia Li Guohao

### Abstract

This paper presents an experimental relation between interface wave form of explosion welding mild steel and material dimensionless strength  $(1/2)\rho V_f^2/\sigma_s$  ( $\rho$ —material density,  $\sigma_s$ —material tension strength,  $V_f$ —velocity of flyer plate which is relative to collision point). Results show that when  $(1/2)\rho V_f^2/\sigma_s < 22.5$  the explosion welding interface is straight, when  $22.5 < (1/2)\rho V_f^2/\sigma_s < 50.0$ , the interface is wavy and the dimensionless wave length  $\lambda/h$  ( $\lambda$ —wave length,  $h$ —plate thickness) increases with the material dimensionless strength, when  $50 < (1/2)\rho V_f^2/\sigma_s < 100.0$ , the interface is wavy also and the dimensionless wave length is a constant, independent upon the material dimensionless strength. Metallography observations indicate that when  $(1/2)\rho V_f^2/\sigma_s$  is about 22.5, the welding quality is excellent.