

## 双金属爆炸焊接上限

李晓杰

(大连理工大学工程力学所)

**摘要** 本文根据热传导理论给出了爆炸焊接时双金属结合区附近的温度场解析解。并利用该解初步研究了双金属的爆炸焊接上限。

**关键词** 爆炸焊接 爆炸焊接复合板

### 一、引言

在爆炸焊接过程中,炸药驱动飞板高速打击基板。这样在焊接界面附近会产生高温、高压,对双金属来说,甚至会出现反应,生成金属键化合物。如果界面温度过高就会造成过度熔化或产生大量的脆性金属键化合物,从而影响焊接质量。同时,根据“过熔”理论,爆炸焊接参数的上限与温度场直接有关。通常对中厚板、低熔点材料及两种易生成脆性化合物的金属的爆炸焊接都必须考虑上限问题。迄今为止,已有许多学者对温度场和上限进行了研究<sup>[1]-[2]</sup>。文献[3]考虑了基板的影响,提出了二维温度场理论,并在一定的近似条件下证明二维热源与一维热源理论所获得的结果是等价的。但上述文献所研究的均是同种材料的温度场和可焊上限,在实际应用中会造成较大的误差。本文通过一维热源理论推导出了不同材料的界面附近的温度场及可焊上限,并进行了一定的实验验证。

### 二、双金属结合区附近的温度场解析解

在爆炸焊接时,由于飞板与基板的高速斜碰撞,在两板之间会形成射流(如图1);通常射流厚度仅为板厚的百分之一到百分之三左右。驻点附近的应变率高达 $10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ ,在稍离驻点处的应变率会急剧下降。一般在离驻点3~5个射流厚度处应变率会降至只有驻点处的 $1/10 \sim 1/100$ 量级<sup>[3]</sup>。因此我们可以近似地把热源看成是瞬时产生的;并在研究界面附近温度场时忽略板厚对传热的影响,把板作无限大域来考虑。同时,由于驻点的移动速度为 $10^4 \text{ m/s}$ 的量级,因此可忽略沿板长度方向的传热。

根据上述分析,最终可以把结合区附近的热传导问题简化为一维无限大域瞬态热源的问题;如图2,上半平面为材料1,下半平面为材料2, $x$ 轴即是焊接界面,在其上存在有热量为 $Q \text{ (J/m}^2\text{)}$ 的平面热源。因此,在上、下半平面内必须满足热传导方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 T_1(y, t)}{\partial y^2} + \frac{1}{k_1} g_1(y, t) &= \frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1(y, t)}{\partial t} & (y > 0^-) \\ \frac{\partial^2 T_2(y, t)}{\partial y^2} + \frac{1}{k_2} g_2(y, t) &= \frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2(y, t)}{\partial t} & (y < 0^-) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$g_1(y, t) + g_2(y, t) = Q \cdot \delta(y, t)$$

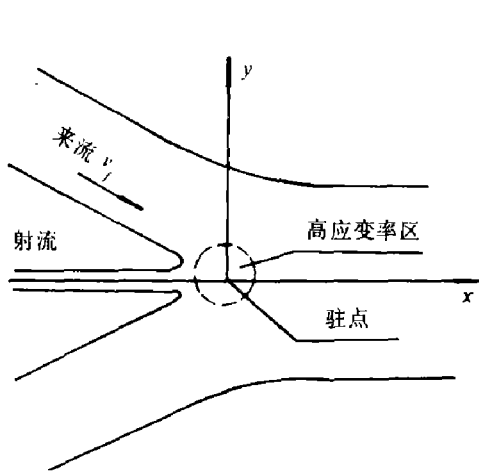


图1 爆炸焊接过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of explosive welding

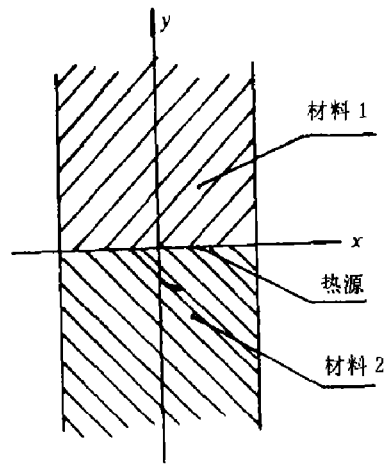


图2 双金属一维导热模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of bimetal one-dimensional heat-conduction model

并在边界上满足

$$T_1(0, t) = T_2(0, t) \tag{2}$$

$$-k_1 \frac{\partial T_1(y, t)}{\partial y} \Big|_{y=0} = -k_2 \frac{\partial T_2(y, t)}{\partial y} \Big|_{y=0} \tag{3}$$

上式中  $k_1$ ,  $a_1$  和  $k_2$ ,  $a_2$  分别是两种材料的热传导系数和热扩散系数;  $g_1(y, t)$ ,  $g_2(y, t)$  分别是两种材料中的热源形式。

由于不知道  $g_1(y, t)$  和  $g_2(y, t)$  的具体形式, 要解上述方程是不可能的。但我们知道如果上下两个半平面的材料相同, 也即是在无限大域中的解为如下形式<sup>[3]</sup>

$$T = \frac{Q}{\rho c_p} \cdot \frac{1}{2\sqrt{a\pi t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right) \tag{4}$$

上式中  $k = a\rho c_p$ , 其中  $\rho$  是材料密度,  $c_p$  是定压比热。对式(4)求导可以发现

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \tag{5}$$

根据上述条件, 如果构造一个如下的解作为双金属的温度场

$$\begin{cases} T_1 = \frac{Q_1}{\rho_1 c_{p1}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{a_1\pi t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4a_1 t}\right) & (y \geq 0^+) \\ T_2 = \frac{Q_2}{\rho_2 c_{p2}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{a_2\pi t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4a_2 t}\right) & (y \leq 0^-) \end{cases} \tag{6}$$

显然上式不仅满足条件式(3), 而且可以保证在  $y=0$  处光滑过渡。只是尚须进一步满足

$$\begin{cases} Q_1/2 + Q_2/2 = Q \\ T_1(0, t) = T_2(0, t) \end{cases} \tag{7}$$

将式(6)代入上式,解出 $Q_1$ 和 $Q_2$ 后代回式(6)得

$$\begin{cases} T_1 = Q / [\sqrt{\pi t} (\rho_1 c_{p1} \sqrt{a_1} + \rho_2 c_{p2} \sqrt{a_2})] \cdot \exp[-\frac{y^2}{4a_1 t}] & (y \geq 0^+) \\ T_2 = Q / [\sqrt{\pi t} (\rho_1 c_{p1} \sqrt{a_1} + \rho_2 c_{p2} \sqrt{a_2})] \cdot \exp[-\frac{y^2}{4a_2 t}] & (y \leq 0^-) \end{cases} \quad (8)$$

这样我们就获得了双金属结合区附近的温度场解。显然式(8)作为方程组(1)的解是有条件的,首先焊接时由于撞击而产生的热量必须按一定比例瞬时地分布于两种材料之中;其次界面在以后的热传导过程中其上的热流必须为零。第二个条件看来是过于苛刻,但实际上只要满足第一个条件,第二个条件将自然会满足。而在我们一开始的假设中就已假定热源是瞬时产生的,这样热量以一定比例瞬时分布于两种材料之中就不难理解了。总之式(8)作为双金属的温度场是适合的。

### 三、焊接上限公式

焊接上限的“过熔”理论认为<sup>[4]</sup>,如果焊接时在界面处热量沉积过多,就会使复合界面熔化,而在界面脱离高压区后,界面仍然处于熔化或热软化状态,这时从自由面上反射回来的拉伸波到达界面时,焊接界面就会开裂。如果界面已凝固,并冷却到了有足够的抗拉强度,则认为是可焊的。这个条件就称为“可焊窗口上限条件”。

根据上述理论,用式(8)就可以导出双金属的焊接上限。但首先必须解决沉积在界面上的热量值。

在同种材料碰撞时,文献[3]认为焊接界面上的热量应为

$$Q = N \left( \frac{v_c}{c_*} \right)^2 \cdot \rho \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \sin^2(\beta/2) \cdot v_j^2 \quad (9)$$

其中 $c_*$ 为材料的体波声速; $v_c$ 为碰撞点的移动速度; $h_1, h_2$ 为上,下板厚; $\beta$ 为碰撞角; $v_j$ 称为来流速度;在平行焊接时 $v_c = v_j = v_d$ , $v_d$ 为炸药的爆速; $N$ 为常数。

我们将式(9)写为如下形式

$$Q = N \left( \frac{v_c}{c_*} \right)^2 \cdot 2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \rho \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} \sin^2(\beta/2) \cdot v_j^2 \right]$$

上式中的 $[\rho h_1 h_2 / 2(h_1 + h_2)] \sin^2(\beta/2) v_j^2$ 是理论射流能量,而 $(v_c/c_*)^2$ 代表射流能量损失与 $v_c$ 的关系。而对不同材料板碰撞时射流能量可以写为

$$E_j = \frac{1}{2} \frac{(\rho_1 h_1)(\rho_2 h_2)}{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2} \cdot \sin^2(\beta/2) \cdot v_j^2$$

这样可以设在双金属焊接时界面上的热量为

$$Q = K \cdot v_c^2 \cdot \frac{(\rho_1 h_1) \cdot (\rho_2 h_2)}{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2} \cdot \sin^2(\beta/2) \cdot v_j^2 \quad (10)$$

其中 $K$ 是与两种材料体波声速有关的常数,其量纲为 $s^2/m^2$ 。

将式(10)代入方程(8),并只研究界面处的情况( $y=0$ ),得出

$$T_1 = T_2 = [K \cdot v_c^2 \frac{(\rho_1 h_1)(\rho_2 h_2)}{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2} \cdot \sin^2(\beta/2) v_p^2] / [(\rho_1 c_p \sqrt{a_1} + \rho_2 c_p \sqrt{a_2}) \cdot \sqrt{\pi l}] \quad (11)$$

反射的拉伸波到达界面时的最短时间为

$$t_{\min} = \min \left( \frac{2h_1}{c_1}, \frac{2h_2}{c_2} \right) \quad (12)$$

其中  $c_1$ ,  $c_2$  为两种材料的体波声速。

显然在  $t_{\min}$  时刻内界面必须冷却到低于两种材料中熔点最低的材料熔点  $T_{mp\min}$ , 才能保证界面不被拉开。将这些条件代入式 (11), 并由  $v_p = 2v_f \sin(\beta/2)$  可得, 碰撞速度最大值为

$$v_{p\max} = \frac{2}{(\pi)^{1/4}} \sqrt{(\rho_1 c_p \sqrt{a_1} + \rho_2 c_p \sqrt{a_2}) \cdot T_{mp\min} / K} \cdot \frac{\sqrt{4(t_{\min})}}{v_c} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho_1 h_1} + \frac{1}{\rho_2 h_2}} \quad (13)$$

由于“过熔”理论所限, 上式作为爆炸焊接窗口上限是没有考虑双金属之间的化学反应的, 而脆性金属键化合物的生成对上限是有相当大的影响的。幸好化学反应对温度有相当大的依赖性, 因而式 (13) 可在一定程度上反映出易生成化合物的双金属的焊接上限。为了证实这一点我们进行了如下实验。

众所周知, 铝与钢的爆炸焊接很容易出现金属键化合物, 为此我们进行了一些实验。实验是采用纯铝作为飞板, 普通钢作为基板。实验说明式 (13) 的确可作为铝钢的上限, 参见表1。

表1 铝—钢爆炸焊接上限

Table 1 Explosive welding upper limit for aluminium-mild steel

| 序号 | 铝厚度/(mm)<br>$\rho_1 = 2.7 \text{ g/cm}^3$ | 钢厚度/(mm)<br>$\rho_2 = 7.85 \text{ g/cm}^3$ | $v_c$ /(m/s) | 理论上限<br>$v_{p\max}$ /(m/s) | 实验结果<br>$v_p$ /(m/s) |
|----|---|--|--------------|----------------------------|----------------------|
| 1  | 20.0                                      | 20.0                                       | 2250         | 360                        | 360(焊)               |
| 2  | 20.0                                      | 20.0                                       | 2280         | 429                        | 430(未焊)              |
| 3  | 29.0                                      | 1.0  | 2317         | 402                        | 373(焊)               |
| 4  | 29.0                                      | 0.5  | 2760         | 392                        | 396(未焊)              |
| 5  | 29.0                                      | 0.5  | 2150         | 504                        | 400(焊)               |

#### 四、结 论

(1) 通过对爆炸焊接过程中热传导现象的讨论, 利用热传导的基本解构造出了双金属焊接界面附近的温度场解。

(2) 利用温度场导出了双金属的爆炸焊接上限。从理论上讲该上限只适于无化学反应的双金

属, 而不适用于易生成脆性金属键化合物的金属。但由于化学反应速率一般与温度成正比, 反应物的数量与高温持续时间成正比, 所以该上限也可用于有反应的双金属, 但理论上和实验上尚还缺少依据。

(3) 铝钢焊接的实验数据证明该上限用于铝钢有一定的精度。是否可用于其它有反应的金属尚需进一步的实验验证。

### 参 考 文 献

- [1] Bernard Crossland. Explosive Welding of Metals and Its Application. Clarendon Press, Oxford (1982), 84.
- [2] 布拉齐恩斯基, T. Z 编 (李富勤等译), 爆炸焊接、成形与压制, 机械工业出版社 (1988), 184.
- [3] 邵丙寅, 张凯, 爆炸焊接原理及其工程应用, 大连工学院出版社, (1987), 205.

## THE UPPER LIMIT OF BIMETAL EXPLOSIVE WELDING PARAMETERS

Li Xiaojie

*(Research Institute of Engineering Mechanics, Dalian  
University of Technology)*

**ABSTRACT** Based on the heat conduction theory, an analytic solution of the temperature-field nearby the bimetallic bonding zone when explosive welding is proceeding is derived in this paper, and the upper limit of the bimetallic explosive welding is preliminarily studied through the above analytic solution.

**KEY WORDS** explosive welding, explosive welding bimetal sheet