第21卷 第2期
2007年6月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 21, No. 2
June, 2007

文章编号：1000-5773(2007)02-0199-06

复板静载弯曲挠度对爆炸焊接参数的影响*

付艳恕[1]，孙宇新[1,2]，王金相[1]，荣 光[1]

(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室，江苏南京 210094；
2. 中国科学技术大学近代力学系，安徽合肥 230026)

摘要：爆炸焊接是利用炸药爆轰压力工作的固态焊接技术，广泛应用于制造层状金属复合材料。但对薄复板施焊安装过程中，薄板在自重及炸药重量作用下将发生弯曲。基于弹性力学薄板理论，得出了复板受均布载荷作用下产生的挠度及转角表达式；又通过分析爆炸焊接过程中的基、复板的运动参数，结合再入射流形成的声速限条件、流动限条件，推导出爆炸焊接时射流形成的预置角范围；最后将两者结合推导出在给定复板材料及长、宽的条件下，成功施焊所要求的复板最小厚度。

关键词：爆炸焊接；挠度；转角；厚度

中图分类号：TG456.6 **文献标识码**：A

1 引 言

爆炸焊接作业中，很难保证复板的绝对平整，对应复板凹凸不平区域，经常会出现脱焊现象。特别是在对大面积金属薄板施焊时，即使安装之前处理很平整的复板，在安装后也会由于炸药与自身的重力而导致变形，产生一定的挠度，从而不可避免地产生不平整度，以致可能超出允许的范围，导致基复板碰撞将不能形成金属射流。而爆炸焊接过程中是否有金属射流形成，是判断爆炸焊接质量的重要标准。在工业工程中，经常需要对薄板进行爆炸焊接作业。Richman 等[1]以及 Zimmerlyt[2]分别报导了 NiTi-steel、NiTi-Low Carbon Steel 的爆炸焊接以制造流体机械耐气蚀叶轮，其中 NiTi 复板厚度分别在 0.36～0.97 mm、0.4～1.0 mm 之间；Hokamoto 等[3]研究了复板厚度仅为 0.1 mm 的 Al-ZrO_2 爆炸焊接，但都未阐明针对薄板受静载的弯曲克服方法，且其所得复合板面积较小，难以推广到工程实际中的大面积薄板爆炸焊接。事实上在对类似于此的薄板爆炸焊接设计中，复板受静载弯曲变形不能再忽略。本文对爆炸焊接射流形成的临界条件和复板挠度导致的不平整度之间的关系从理论上进行了探讨，试图得出已知面积的大块金属板爆炸焊接时，可焊复板最小厚度的公式。

2 大板挠度的计算

在大面积板的爆炸焊接工程中，由于复板的厚度 h 比它的其它尺寸小很多，通常可看成薄板。克希霍夫[4]在 1850 年指出，当薄板受到寻常大小的、垂直于它的平面的横向载荷时，薄板便要发生弯曲。这种弯曲作用是薄板能承受载荷的主要原因。在横向载荷不很大时，也就是薄板的弯曲不很大时，因弯曲而产生的“薄板张力”可以略去不计。

因此采用弹性力学中的克希霍夫薄板小挠度理论平衡方程

$$D\left(\frac{\partial^4\omega}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4\omega}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4\omega}{\partial y^4}\right)=q \tag{1}$$

* **收稿日期**：2006-04-25；**修回日期**：2006-09-20

基金项目：国家自然科学基金(10402041)；国防科工委国防基础科研项目(A2620061131)；总装备部武器装备预研基金项目(9140C3008020606)

作者简介：付艳恕(1982—)，男，博士研究生，主要从事高能率物理及终点弹道研究. E-mail: yshfu@126.com

式中：D 是薄板的抗挠刚度，它只与厚度及弹性系数有关

$$D=\frac{E}{1-\nu^2}\int_{-h/2}^{h/2}z^2\mathrm{d}z=\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \tag{2}$$

式中：q 为薄板所受的载荷，ν 为材料的泊松比，ω 为挠度，h 为复板厚度，E 为复板弹性模量。

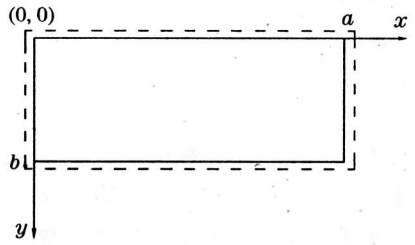


图1 大板简支示意图

Fig. 1 Schematic of simple support

由爆炸焊接工程中复板的安装情况，可以将复板简化为四边简支的情形，如图1所示。长为 a、宽为 b 的矩形薄板四边简支的边界条件为

当 $x=0$ 和 $x=a$ 时

$$\omega=0,\quad \partial^2\omega/\partial x^2=0 \tag{3}$$

当 $y=0$ 和 $y=b$ 时

$$\omega=0,\quad \partial^2\omega/\partial y^2=0 \tag{4}$$

采用矩形薄板的李维解法，用三角级数表示挠度

$$\omega=\sum_{m=1}^{\infty}Y_m(y)\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \tag{5}$$

求出适合边界条件和方程(1)的解。于是在均匀载荷下，四边简支矩形板的解可写成

$$\omega(x,y)=\frac{2a^4q_0}{\pi^5D}\sum_{m=1,3,5,\cdots}^{\infty}\frac{1}{m^5}\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\left\{2-2\mathrm{ch}\left(\frac{m\pi y}{a}\right)+\frac{\mathrm{ch}(m\pi b/a)-1}{\mathrm{sh}^2(m\pi b/a)}\cdot\left[2\mathrm{sh}\left(\frac{m\pi b}{a}\right)-\frac{m\pi b}{a}\right]\cdot\mathrm{sh}\left(\frac{m\pi y}{a}\right)-\left[\mathrm{ch}\left(\frac{m\pi b}{a}\right)-1\right]\cdot\frac{m\pi y/a}{\mathrm{sh}(m\pi b/a)}\cdot\mathrm{ch}\left(\frac{m\pi y}{a}\right)+\frac{m\pi y}{a}\cdot\mathrm{sh}\left(\frac{m\pi y}{a}\right)\right\} \tag{6}$$

这个级数收敛很快。

在爆炸焊接工程实践中，复板所受载荷可视为均布载荷，其值为单位面积上复板自重与炸药的重量之和，即

$$q_0=(1+R)\rho_1hg\cos\alpha \tag{7}$$

式中：ρ_1 为复板密度，g 为重力加速度，R 为装药质量比，α 为薄板初始倾角。

由于级数收敛很快，取前三项进行计算就足够了。

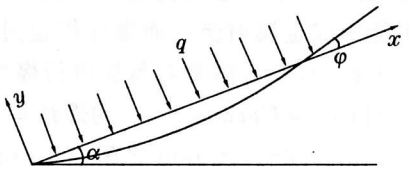


图2 薄板受载扰动横截面示意图

Fig. 2 Deflection of fly plate

3 因挠动而产生的转角的计算

图2为薄板受载扰动横截面示意图。在弹性力学小变形情况下，x 方向挠度与转角有如下关系

$$\varphi(x,y)=-\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}x}=-\frac{2a^4q_0}{\pi^5D}\sum_{m=1,3,5,\cdots}^{\infty}\frac{\pi}{am^4}\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\left\{2-2\mathrm{ch}\left(\frac{m\pi y}{a}\right)+\frac{\mathrm{ch}(m\pi b/a)-1}{\mathrm{sh}^2(m\pi b/a)}\cdot\left[2\mathrm{sh}\left(\frac{m\pi b}{a}\right)-\frac{m\pi b}{a}\right]\cdot\mathrm{sh}\left(\frac{m\pi y}{a}\right)-\left[\mathrm{ch}\left(\frac{m\pi b}{a}\right)-1\right]\cdot\frac{m\pi y/a}{\mathrm{sh}(m\pi b/a)}\cdot\mathrm{ch}\left(\frac{m\pi y}{a}\right)+\frac{m\pi y}{a}\cdot\mathrm{sh}\left(\frac{m\pi y}{a}\right)\right\} \tag{8}$$

式中：φ 为在 x 方向因挠度产生的转角。

4 爆炸焊接过程的运动参数

在工程实践中，平板爆炸焊接常采用平行放置爆炸焊接法和倾斜放置爆炸焊接法，其中平行放置法可看成倾斜放置角度 $\alpha=0$ 时的特例，下面以倾斜放置法为例进行讨论。倾斜放置法工作示意图如图3所示。假设在厚为 h_0 的复板上铺设了厚为 h_1 的炸药，复板初始安装位置与基板成 α 角。采用左端引爆炸药，在经过一段距离之后形成稳定的右传爆轰波，在爆轰波作用下，复板达到的稳定运动速度为

$\boldsymbol{v}_p$,$\boldsymbol{v}_p$ 和复板初始位置法线方向 $\boldsymbol{n}_0$ 所形成的夹角(抛掷角)为 δ(图 4 所示),δ 一般为 4°～8°。v_p 的计算采用一维格尼飞板运动公式[5]

$$v_p = \frac{v_d}{\sqrt{k^2-1}}\left(\frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R}\right)^{1/2} \tag{9}$$

式中:v_d 为炸药的爆速,k 为爆轰产物多方指数。

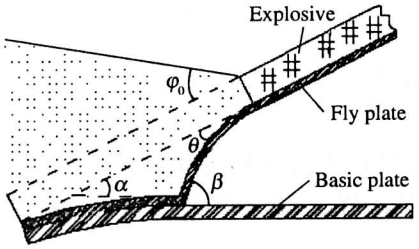


图 3　倾斜放置条件下的碰撞示意图

Fig. 3　Schematic of the explosive welding set-up

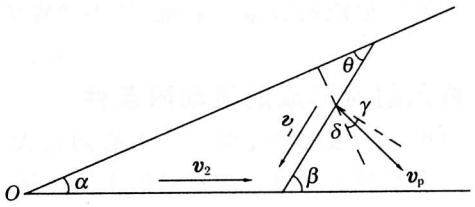


图 4　运动参数示意图

Fig. 4　Schematic of motorial parameter

复板与基板碰撞时,在碰撞点处与初始位置所成的角 θ 可由下式计算得到[6]

$$\theta = 2\arcsin\left(\frac{1}{2\sqrt{k^2-1}}\sqrt{\frac{3R^2}{R^2+5R+4}}\right) \tag{10}$$

动态碰撞角 β 为

$$\beta = \alpha + \theta \tag{11}$$

复板的运动速度 $\boldsymbol{v}_p$ 可以分解为沿复板的切向速度 $\boldsymbol{v}_{rp}$ 和法向速度 $\boldsymbol{v}_{np}$ 两个分量,即

$$\boldsymbol{v}_p = \boldsymbol{v}_{rp} + \boldsymbol{v}_{np} \tag{12}$$

图 4 为复板的运动参数示意图[7]。由图中简单的几何关系可知

$$v_{rp} = v_p \sin\gamma \tag{13}$$

$$v_{np} = v_p \cos\gamma \tag{14}$$

式中:γ 为 $\boldsymbol{v}_p$ 与复板法线方向 $\boldsymbol{n}_0$ 的夹角

$$\gamma = \theta - \delta \tag{15}$$

由图示关系可以得出,碰撞点 O 在实验室坐标系中的视速度 v_2 为

$$v_2 = v_{np}/\sin\beta \tag{16}$$

在原点随 O 点运动的动坐标系中

$$\boldsymbol{v}_1 = \boldsymbol{v}_p - \boldsymbol{v}_2 \tag{17}$$

式中:$\boldsymbol{v}_1$ 为动坐标系中复板的运动速度。

$$|\boldsymbol{v}_{np} - \boldsymbol{v}_2| = v_{np}\cot\beta \tag{18}$$

$$v_1 = v_{rp} + v_{np}\cot\beta \tag{19}$$

5　射流形成的临界条件

5.1　再入射流形成的声速限条件

为保证形成焊接射流,焊接流动必须是亚声速的,可简单认为碰撞点移动速度须小于材料体波声速 c,即由图 4 所示有

$$v_1 < c_1 \tag{20}$$

$$v_2 < c_2 \tag{21}$$

式中:c_1 为复板的体波声速,c_2 为基板的体波声速。

由(19)式、(20)式联立可得

$$\beta_{min} > \arctan\left(\frac{v_{np}}{c_1 - v_{rp}}\right) \tag{22}$$

由 $\beta=\alpha+\theta$ 得

$$\alpha_{\min 1} > \arctan\left(\frac{v_{np}}{c_1 - v_{rp}}\right) - \theta \tag{23}$$

同理，由(16)式、(21)式联立可得

$$\alpha_{\min 2} > \arcsin\left(\frac{v_{np}}{c_2}\right) - \theta \tag{24}$$

为确保能同时形成两股金属射流，最小预置角度 $\alpha_{\min}$ 应满足

$$\alpha_{\min} = \max(\alpha_{\min 1}, \alpha_{\min 2}) \tag{25}$$

5.2 再入射流形成的流动限条件

碰撞射流形成的理论驻点压力必须远大于材料强度，使材料表面达到流动状态，顺利形成金属射流。这一限制规定了爆炸焊接时的来流速度 v_f 所须达到的最小值 $v_{f,\min}$，一般认为理论驻点压力应大于材料静止屈服强度 σ_b 的 10 倍，材料才会呈现出流动状态，即

$$\rho v_f^2 \geqslant 20\sigma_b \tag{26}$$

式中：σ_b 为 $\max(\sigma_{b1}, \sigma_{b2})$，则 ρ 为材料屈服强度较大板的密度。v_f 的计算式可采用[5]

$$v_f = \frac{2v_d \sin(\theta/2)\cos[\beta - (\theta/2)]}{\sin\beta} \tag{27}$$

由(11)式、(26)式和(27)式得

$$\alpha_{\max} \leqslant \arctan\left[\frac{1}{\frac{\sqrt{20\sigma_b/\rho}}{v_d \sin\theta} - \tan\frac{\theta}{2}}\right] - \theta \tag{28}$$

6 最小可焊厚度公式的推导

令炸药在 x 方向引爆，在 x 方向因挠度产生的转角 φ 与初始安装角 α 之和

$$\psi = \alpha + \varphi \tag{29}$$

由图 2 显然可以得出，在初始端一直到中点，转角为负，则 $0 \rightarrow x/2$ 段，(29)式的 ψ 值将有可能小于(25)式，即

$$\psi \leqslant \alpha_{\min} \tag{30}$$

而在 $x/2 \rightarrow x$ 段，转角为正，则(29)式的 ψ 值将有可能大于(28)式，即

$$\psi \geqslant \alpha_{\max} \tag{31}$$

也就是说复板产生转动后，角度值 ψ 将可能不处在爆炸焊接窗口所要求的范围内，从而导致施焊失败。

爆炸焊接作业时，为预留复板加速空间而被简支的边界将对挠度产生一定的影响，在本计算中，仅关心转角的最值，由图 2 可得出转角的最小值发生在 $(0, b/2)$ 点，而转角的最大值发生在 $(a, b/2)$。因此，为了避免施焊失败，必须有

$$\psi_{0,b/2} \geqslant \alpha_{\min} \tag{32}$$

$$\psi_{a,b/2} \leqslant \alpha_{\max} \tag{33}$$

式中：$\psi_{0,b/2}$ 为 $(0, b/2)$ 处复板转角与预置角之和，$\psi_{a,b/2}$ 为 $(a, b/2)$ 处复板转角与预置角之和。

由于级数收敛很快，在计算(32)式、(33)式时取前三项。因此，由(8)式和(32)式得

$$\alpha - \alpha_{\min} \geqslant \frac{2a^3 q_0 12(1-\nu^2)}{\pi^4 E h^3} \cdot \xi \tag{34}$$

式中：

$$\xi = \sum_{m=1,3,5} \frac{1}{m^4}\left\{2 - 2\mathrm{ch}\left(\frac{m\pi b}{2a}\right) + \frac{\mathrm{ch}(m\pi b/a) - 1}{\mathrm{sh}^2(m\pi b/a)} \cdot \left[2\mathrm{sh}\left(\frac{m\pi b}{a}\right) - \frac{m\pi b}{a}\right] \cdot \mathrm{sh}\left(\frac{m\pi b}{2a}\right) - \left[\mathrm{ch}\left(\frac{m\pi b}{a}\right) - 1\right] \cdot \frac{m\pi b/2a}{\mathrm{sh}(m\pi b/a)} \cdot \mathrm{ch}\left(\frac{m\pi b}{2a}\right) + \frac{m\pi b}{2a} \cdot \mathrm{sh}\left(\frac{m\pi b}{a}\right)\right\} \tag{35}$$

由(8)式和(33)式得

$$\alpha_{\max}-\alpha \geqslant \frac{(2a^3q_0)12(1-\nu^2)}{\pi^4 Eh^3}\cdot\xi \tag{36}$$

因此,在确定了复板材料及长度、宽度的情况下,厚度的选择可由以下讨论求得。由(34)式得

$$h_2 \geqslant \left[\frac{12(1-\nu^2)}{(\alpha-\alpha_{\min})E}\,\frac{2a^3(1+R)\rho_1 g\cos\alpha}{\pi^4}\cdot\xi\right]^{1/2} \tag{37}$$

由(36)式得

$$h_3 \geqslant \left[\frac{12(1-\nu^2)}{(\alpha_{\max}-\alpha)E}\,\frac{2a^3(1+R)\rho_1 g\cos\alpha}{\pi^4}\cdot\xi\right]^{1/2} \tag{38}$$

为了能够同时满足,必有

$$h=\max(h_2,h_3) \tag{39}$$

即厚度必须大于一个最小值,才不至于转角过大,从而避免施焊失败。

7　算　例

按(36)式、(37)式、(38)式计算两个算例,采用平行铺设时 $v_f=v_d$,结果列于表 1。结果表明,薄板的爆炸焊接设计存在着厚度的极小值。

表 1　两个算例计算结果

Table 1　Calculational results of samples

Material	E /(GPa)	a /(mm)	b /(mm)	Lay style	v_d /(m/s)	R	ρ_1 /(g/cm^3)	σ_b /(MPa)	k	h /(mm)
Al-Al	70	2 000	800	Parallel	3 200	0.74	2.71	130	2.7	0.930
Steel-Steel	200	2 000	800	Parallel	3 200	0.86	7.83	235	2.7	0.925

8　结　论

(1) 利用弹性力学薄板理论导出了复板受静载弯曲挠度解,结合爆炸焊接金属射流形成的声速限与流动限条件,阐明在对薄板的爆炸焊接作业中,静载弯曲产生的转角不能忽略。

(2) 在确定复板材料的力学性能、长及宽的条件下,根据爆炸焊接设计要求,得出了成功施焊所要求的复板最小厚度计算公式。

(3) 爆炸焊接设计中复板预留加速间隙的多点支承导致挠度计算时的复杂初始、边界条件,本文中算例结果是在简化为四边简支情况下得到的,其结果与工程实际的吻合仍有待进一步的实验验证。

References:

[1] Richman R H, Rao A S, Kung D. Cavitation Erosion of NiTi Explosively Welded to Steel [J]. Wear, 1995, 181-183: 80-85.

[2] Zimmerlyt C A, Ina O T. Explosive Welding of a Near-Equiatimic Nickel-Titanium Alloy to Low-Carbon Steel [J]. Mater Sci Eng, 1994, A188: 251-254.

[3] Hokamoto K, Fujita M. A New Method of Explosive Welding of Al/ZrO_2 Joint Using Regulated Underwater Shock Wave [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 85: 175-179.

[4] Chien W C. Elastic Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1980: 253-274. (in Chinese)
钱伟长. 弹性力学 [M]. 北京:科学出版社, 1980: 253-274.

[5] Shao B H, Zhang K. Explosive Welding Principle and Its Application [M]. Dalian: Dalian University of Science and Technology Press, 1987: 8-16. (in Chinese)
邵丙璜, 张　凯. 爆炸焊接原理及其工程应用 [M]. 大连:大连工学院出版社, 1987: 8-16.

[6] Wang J H. Two-Dimension Unsteady Flow and Shock Wave [M]. Beijing: Science Press, 1994: 492-501. (in Chinese)
王继海. 二维非定常流和激波 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 492-501.

[7] Duan W D, Xiong Z Z, Ma J J. Critical Condition of Jet Forming and Allowed Uneven Degree of Flyer Plate in Explosive Welding [J]. J Wuhan Univ Sci & Tech (Natural Science Edition), 2003, 26, (2): 149-151. (in Chinese)
段卫东, 熊祖钊, 马建军. 爆炸焊接中射流形成的临界条件和复板允许的不平整度 [J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2003, 26(2): 149-151.

Influence of the Parameter of Explosive Welding Caused by the Slope of Fly Plate at Static Load

FU Yan-Shu[1], SUN Yu-Xin[1,2], WANG Jin-Xiang[1], RONG Guang[1]

(1. *National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*;
2. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Heifei* 230026, *China*)

Abstract: Explosive welding is a solid state fusion welding process in which the joining of two metals is accomplished by the application of the pressure released by the detonation of an explosive layer. It is widely used to manufacture material sandwich components. But when explosive was set on a thin fly plate, the deflection would take place because of the weight of explosive and the fly plate itself. In this paper, based on the analysis of the deflection of the big and thin plate which is supported by smooth cylindrical pin at four boundaries, the slope of the fly plate which endured uniform pressure of weight was developed. Combined with the explosive welding subsonic speed limit and fluid limit, the minimal thickness was calculated to make sure explosive welding can be successful. At last, the formula of the minimal thickness was gained in the conditions that the material, length, width of fly plate were all confirmed.

Key words: explosive welding; deflection; slope; thickness