

文章编号: 1001-1455(2012)01-0051-04

大幅板爆炸焊接脱焊问题的数值模拟*

张之颖¹, 彭磊¹, 刘润生², 杨政¹, 赵福兴¹

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘要: 为了解决大面积钛钢板爆炸焊接工程应用中复合板边界区的局部脱焊现象, 利用动力非线性数值模拟, 考察了大幅板爆炸焊接的动态过程, 通过分析爆炸过程中不同时刻复板飞行姿态, 发现了在大幅板爆炸焊接过程中存在褶皱变形, 发生位置与实际工程中大幅板的脱焊位置一致, 指出应特别注意复板的褶皱变形, 并解释了褶皱变形出现的原因, 为爆炸焊接工艺技术的改进和发展提供了参考。

关键词: 固体力学; 褶皱变形; 有限元; 爆炸焊接; 大幅板

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

爆炸焊接是利用炸药在爆炸瞬间释放的巨大能量推动金属复板高速运动并与基板发生剧烈倾斜碰撞, 使碰撞界面产生局部高温和塑性变形, 在巨大的压力下实现金属间结合的一种焊接技术。它集熔化焊、扩散焊和压力焊为一体, 被称为以炸药为能量的一种特殊压力焊^[1]。爆炸焊接解决了常规焊接方法因金属熔点、热膨胀系数或硬度等相差太大而无法焊接的难题, 能够在几微秒内将同种或不同种的金属材料强固地焊接在一起, 施工工艺十分简单。

虽然爆炸焊接的出现开辟了焊接工艺的新领域, 但由于爆炸焊接的瞬时性与爆炸过程的复杂性, 过程涉及焊接学、爆炸物理学、流体力学和动力学等, 而且整个过程的高速、高温和高压特征, 爆炸焊接实验研究比较困难^[2]。爆炸焊接中许多现象的影响因素尚不能确定, 也阻碍了理论研究的发展。例如: 实际工程中 6 m 以上大幅钛钢复合板一次性焊接成功率依然很低, 工程技术人员采用各种方法对焊接进行改善^[3-5], 试图提升大幅板焊接质量, 但焊接缺陷依然存在。可见, 对影响爆炸焊接质量的一些重要因素有待进一步研究。

对爆炸过程中许多难以解决的问题, 数值模拟已成为研究爆炸焊接中存在的一些难题的重要手段。学者们^[6-7]开展了这方面的工作, 但目前的模型都忽略了地基对爆炸焊接过程动力相互作用效应的影响, 得出的结论只是中小幅板爆炸焊接过程中的一些规律, 尚未解决大幅板爆炸焊接中所遇到的问题。

目前, 大幅钛钢复合板爆炸焊接脱焊情况比较严重, 或者焊合后焊接强度达不到标准要求, 这种情况下常需通过二次爆炸焊接对焊接缺陷部位进行修复。本文中, 采用数值模拟方法分析大幅板焊接缺陷的成因, 根据复板的飞行姿态在整个爆炸焊接过程中的变化, 研究复板褶皱变形的发展过程及其对焊接质量的影响。

1 大幅钛钢爆炸复合数值模拟方法

根据大幅钛钢复合板爆炸焊接实际工艺过程, 利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立数值分析实体模型和有限元模型。实体模型采用了实际工艺过程的足尺模型, 并考虑地基影响效应。

复板材料为钛 TA2, 复板尺寸为 6.54 m × 3.54 m × 3 mm (四周边界各增加了 20 mm 的外延); 基板材料为钢 Q345, 尺寸为 6.50 m × 3.50 m × 60 mm; 复板、基板间距为 6 mm。复合板材料参数见表 1, H_V 为维氏硬度, a 为热扩散率。

* 收稿日期: 2010-10-13; 修回日期: 2011-02-21

作者简介: 张之颖(1962—), 女, 博士, 副教授。

炸药密度为 640 kg/m^3 , 爆速为 2.0 km/s , 药高为 27 mm 。

表 1 钛、钢材料参数

Table 1 Material parameters of Ti and steel

材料	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	$c_v/(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	$c/(\text{km/s})$	T_m/K	H_V/GPa	$a/(\text{mm}^2/\text{s})$	ν
TA2	4 510	519	4. 695	1 943	1. 60	7. 353	0. 34
Q345	7 830	460	4. 595	1 793	1. 78	17. 9	0. 33

动力非线性分析中, 钛和钢本构关系选用 Johnson-Cook 模型^[8]

$$\sigma_y = (A + B(\epsilon^p)^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) (1 - (T^*)^m) \quad (1)$$

式中: σ_y 为 Von Mises 流动应力; ϵ^p 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率, 取 1.0 s^{-1} ; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, T_m 、 T_r 分别为材料的熔点和室温。该模型可描述材料在高速碰撞和爆炸作用下的大应变及在高应变率和高温时的力学性能, 能够反映应变率强化效应和温升软化效应。复合板材料本构模型参数见表 2。

表 2 钛、钢本构模型参数

Table 2 Constitutive model parameters of Ti and steel

材料	G/GPa	E/GPa	A/MPa	B/MPa	n	C	m
TA2	42	110	822	0	0	0. 011	0. 7
Q345	77	200	792	510	0. 26	0. 014	1. 03

爆轰产物的压力与体积应变之间的关系采用 JWL 材料模型^[9]

$$p = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中: p 为爆轰产物的压强; V 为爆轰产物的相对比容, $V = v/v_0$, v 是爆轰产物的比容, v_0 为炸药爆炸前的初始比容; E_0 为爆轰产物的初始比内能。炸药 JWL 模型参数分别为: $A_1 = 132.75 \text{ GPa}$, $B_1 = 423 \text{ MPa}$, $R_1 = 5.3$, $R_2 = 1.2$, $\omega = 0.21$, $E_0 = 2.48 \text{ GPa}$, $V_0 = 1.0$ 。炸药采用了中心点引爆的起爆方式。

数值模型采用了 3D Solid 164 单元, 不仅研究复板与基板的碰撞接触, 还考虑了地基土与基板的相互作用, 接触边界都采用用于描述焊接过程中大应变率条件下的高速碰撞的侵彻接触边界条件。考虑应力波在实体界面的反射, 在焊接模型的空气层边界处定义了应力波吸收, 其余实体边界默认为应力波反射。地基土层模型尺寸根据工程要求, 平面尺寸按基板尺寸向四周延伸 1 m , 厚度为 1 m 。

2 数值计算结果分析

图 1 给出了不同时刻大面积钛钢爆炸复合的复板变形俯视图。为了清楚观察复板褶皱变形, 文中仅截取复板局部模型结果。爆炸焊接的整个过程持续时间约 2 ms 。从图 1(a)可见, 在爆炸焊接的初期和中期, 复板的飞行姿态平稳, 大幅板中部区域焊接效果良好; 由图 1(b)可见, 复板长边边界处开始出现褶皱变形; 图 1(c)表明, 随爆轰发展, 褶皱区域不断扩大; 图 1(d)所示随后的过程中, 复板褶皱现象逐渐

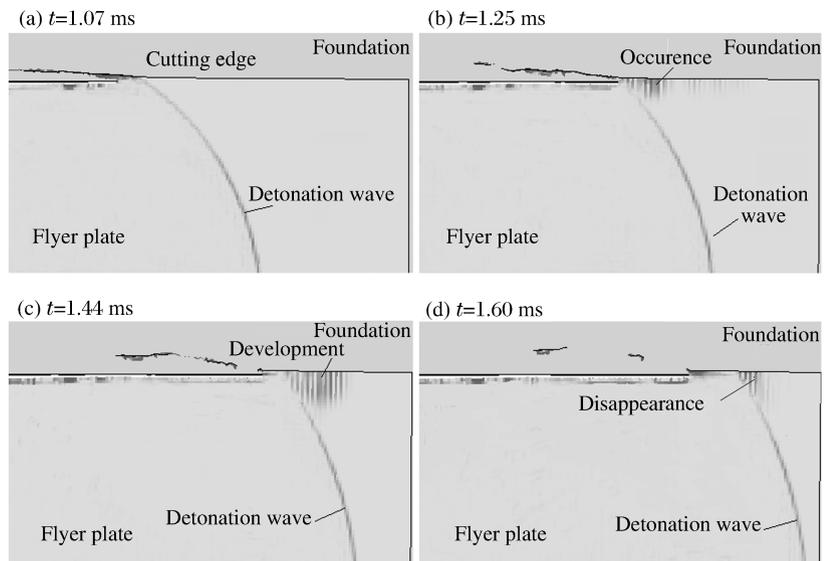


图 1 爆炸焊接过程中的复板褶皱现象

Fig. 1 Folding deformation phenomena in explosive welding process



图 2 复板边缘褶皱区域侧视图($t=1.44\text{ ms}$)

Fig. 2 Side sectional view for folding deformation at $t=1.44\text{ ms}$

消失。图 1 清楚地反映了大幅板爆炸焊接过程中复板褶皱现象的产生、发展和消失的全过程。图 2 从侧面给出了 1.44 ms 时褶皱区域的变形情况，从图中可以明显看到复板的波状变形。图 3 为 1.44 ms 时复板褶皱的局部放大图，数据显示出复板褶皱区域最大进深约 28 cm 。

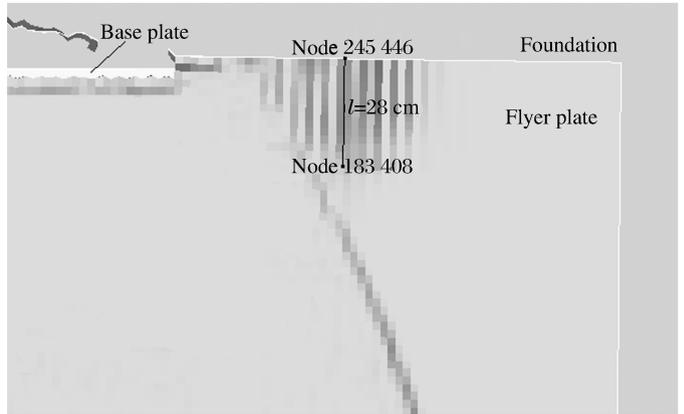


图 3 复板褶皱变形图($t=1.44\text{ ms}$)

Fig. 3 Folding deformation of flyer plate at $t=1.44\text{ ms}$

大幅板爆炸焊接过程中，随着爆轰波传递和发展，常在纵向边界的后面部分出现原因不明的脱焊区。如 $6.5\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ 大幅钛钢复合板的实际爆炸焊接过程中，常在距纵向边端 $1.3\sim 1.4\text{ m}$ 的区域内出现脱焊区，进深为 $20\sim 30\text{ cm}$ 。这类脱焊现象一直无法得到解释。本文中，数值模拟结果与爆焊中脱焊发生的实际位置及区域尺寸大小十分吻合。这表明在炸药的爆轰波传递到大幅板的后部分区域时，复板在上述特定区域位置产生了波状褶皱，由于复板褶皱的出现和形成，使间隙层中的气体无法全部排出，导致脱焊现象的形成，并由于残余空气的高速绝热压缩，使焊接界面伴随着过熔现象。

复板边界褶皱的产生，主要是由钛材特性、起爆方式和板幅尺寸三方面因素共同作用造成的。首先，钛材具有很好的延展性，在爆炸荷载(滑移爆轰波)的作用下，沿炸药爆轰波的传递方向，钛板发生塑性延伸变形。其次，大幅板爆炸焊接一般采用中心点起爆的方式，复板延伸变形是以起爆中点为圆心向不同的方向逐渐发展，使复板同一横截面处产生不同步纵向变形：相对于复板边界区域，中部区域沿长度方向的变形时间更早、变形量更大，这种延伸变形的不均匀性为边界区褶皱的出现提供了条件。再者，复板褶皱的形成是钛板塑性变形累积的体现，板幅尺寸小，复板变形小，褶皱效应不明显，足够大的板幅尺寸成为褶皱产生的必要条件。在爆炸焊接过程中，复板的积累变形及沿长度方向的不均匀性随着爆轰的发展而逐渐累积，由于爆炸焊接整个过程只持续 $1\sim 2\text{ ms}$ ，这种不均匀塑性积累变形沿爆轰方向得不到充分释放。因此，如果幅板尺寸足够大，当复板在纵向不均匀变形累积到一定程度时，宏观上会以褶皱的形式表现出来，使大幅板复板和基板在特定位置产生脱焊。

3 结 论

数值模拟表明，大幅板爆炸焊接过程存在褶皱变形效应，发生的位置与实际工程中的大幅板的脱焊位置一致，复板褶皱效应是大幅板产生脱焊缺陷的重要原因。复板边界褶皱的产生是钛材料特性、炸药起爆方式和板幅尺寸三方面因素共同作用的结果。

参考文献：

[1] 郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2002.

- [2] 王建民,朱锡,刘润泉. 爆炸焊接的应用与发展[J]. 材料导报,2006,20(1):42-45.
WANG Jian-min, ZHU Xi, LIU Run-quan. Application and development of explosive welding[J]. Materials Review, 2006,20(1):42-45.
- [3] 史长根,王耀华. 爆炸焊接边界效应的产生、发展和消除[J]. 焊接技术,1998(2):2-4.
SHI Chang-gen, WANG Yao-hua. Emergence, development and elimination of boundary effect in explosion welding[J]. Welding Technology, 1998(2):2-4.
- [4] 冯健,史和庆,谢佩城,等. 爆炸焊接间隙与复合界面缺陷形成机理的试验研究[J]. 压力容器,2009(9):12-15.
FENG Jian, SHI He-qing, XIE Pei-cheng, et al. Analysis & experimental research of defects in interface caused by gap pillars in explosive welding[J]. Pressure Vessel Technology, 2009(9):12-15.
- [5] 刘鹏,陆明,田涛,等. 钛/钢复合板爆炸焊接试验及结合界面研究[J]. 热加工工艺,2010(7):30-33.
LIU Peng, LU Ming, TIAN Tao, et al. Experimental and interfacial research on titanium/steel explosive welding composite plates[J]. Hot Working Technology, 2010(7):30-33.
- [6] 薛治国,李付国,吕利强. 大面积钛/钢复合板爆炸焊接过程的数值模拟[J]. 焊接技术,2007,36(6):12-15.
XUE Zhi-guo, LI Fu-guo, LÜ Li-qiang. Numerical simulation to the explosive process of the large acreage Ti/steel composite plate[J]. Welding Technology, 2007,36(6):12-15.
- [7] 王建民,朱锡,刘润泉. 爆炸焊接三维数值模拟[J]. 焊接学报,2007,28(5):109-112.
WANG Jian-min, ZHU Xi, LIU Run-quan. Three dimensional numerical simulation for explosive welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007,28(5):109-112.
- [8] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strains rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985,21(1):31-48.
- [9] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual[Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003:796-800.

A study on explosion welding defects of large-sized plates*

ZHANG Zhi-ying¹, PENG Lei¹, LIU Run-sheng², YANG Zheng¹, ZHAO Fu-xing¹

(1. *Institute of Human Settlement and Civil Engineering,*

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

2. *Baoji Titanium Industry Group Ltd., Baoji 721014, Shaanxi, China)*

Abstract: In engineering application of explosion welding of large-sized Ti/steel plates, welding defects are always found in the particular area of plate's boundary. In order to solve this problem, the dynamic process of explosion welding is investigated by the numerical simulation. Folding deformation can be discovered during the explosion welding based on the research on the morphological changes of the flyer plate at different times. The calculation results are in good agreement with the experiments. The studies show that folding deformation is a crucial problem which should be noticed in the process of explosive welding. The reasons for the folding deformation are discussed in the paper. The conclusion can provide a reference for the development of explosion welding technology.

Key words: mechanics of explosion; folding deformation; finite element; explosion welding; large-sized plates

* Received 13 October 2010; Revised 21 February 2011

Corresponding author: ZHANG Zhi-ying, zhangzhy@mail.xjtu.edu.cn