



双面爆炸焊接的数值模拟

缪广红, 李 亮, 江向阳, 刘文震, 李雪交, 汪 泉, 余 勇, 沈兆武

引用本文:

缪广红, 李亮, 江向阳, 等. 双面爆炸焊接的数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(4): 045202.

MIAO Guanghong, LI Liang, JIANG Xiangyang, et al. Numerical Simulation of Double-Sided Explosive Welding [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(4): 045202.

[当期更多内容>>](#)

您可能感兴趣的其他文章:

[爆炸胀接铝/钢复合管的研究](#)

余勇, 马宏昊, 沈兆武, 缪广红, 李战军

DOI: 10.11858/gywlxb.2016.02.007

[爆炸复合边界效应的数值模拟](#)

缪广红, 王章文, 李亮, 江向阳, 刘文震, 程扬帆, 汪泉, 余勇, 马宏昊, 沈兆武

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.01.014

[玻璃微球基乳化炸药及其在爆炸焊接中的应用](#)

李雪交, 汪泉, 马宏昊, 杨明, 沈兆武, 毕志雄

DOI: 10.11858/gywlxb.20170651

[高铝含量铝箔膜炸药与铝粉炸药水下爆炸性能的对比分析](#)

万晓智, 马宏昊, 沈兆武, 陈伟

DOI: 10.11858/gywlxb.2016.01.007

[柴油云雾最小点火能量的实验研究](#)

黄勇, 解立峰, 鲁长波, 安高军, 熊春华, 朱英中

DOI: 10.11858/gywlxb.2015.02.010

双面爆炸焊接的数值模拟^{*}

缪广红¹, 李亮¹, 江向阳¹, 刘文震¹, 李雪交², 汪泉², 余勇³, 沈兆武⁴

(1. 安徽理工大学力学与光电物理学院, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001;

3. 安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230022;

4. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 双面爆炸焊接一次起爆可同时焊接两组复合板, 而且使炸药临界厚度显著降低, 提高了炸药的能量利用率, 解决了爆炸焊接现存的高噪低效问题。借助 ANSYS/LS-DYNA 动力学分析软件, 运用光滑粒子流体动力学方法 (SPH) 与有限元 (FEM) 耦合算法, 对双面爆炸焊接进行了三维数值模拟, 并将模拟结果与实验结果和理论计算结果进行了对比。结果表明, 数值模拟结果与实验结果较吻合, 且与 Deribas 的理论计算结果一致性较好, 说明 Deribas 公式和 SPH-FEM 耦合方法对双面爆炸焊接具有较好的指导意义。

关键词: 双面爆炸焊接; SPH-FEM 耦合; 数值模拟; 低能高效

中图分类号: O389; TJ55

文献标识码: A

光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法中的搜索算法较耗时, 即每个时间步都要对领域粒子进行搜索, 粒子越多, 耗时情况越突出, 与有限元法相比, SPH 方法的计算效率要低得多。为了解决 SPH 方法计算效率低的问题, Johnson 等^[1-2] 和 Attaway 等^[3] 将有限元与 SPH 方法相结合, 提出了 SPH-FEM 耦合的算法, 即: 在小变形区域使用有限元法, 大变形区域仍使用 SPH 方法。该方法不仅提高了计算效率, 而且适应性较强。

目前, 采用 SPH 方法对爆炸焊接进行数值模拟的相关报道较少, 而且多采用二维 SPH 方法。Tanaka^[4] 采用 SPH 方法对爆炸焊接的斜碰撞过程进行了数值模拟, 成功地模拟出射流、波形和涡旋, 波长的模拟结果相对实验结果偏大。李晓杰等^[5] 采用 SPH 方法及热塑性流体力学模型对爆炸复合板的斜碰撞过程中出现的界面波进行了数值模拟, 模拟结果与张登霞等^[6-7] 实验结果的一致性较好。刘江等^[8] 利用 AUTODYN 软件中的 SPH 方法模拟了爆炸复合的斜碰撞, 结合模拟中有效塑性变形、温度及剪切应力呈现的变化规律发现, 爆炸复合的结合机理集塑性变形、熔化和扩散为一体。本研究将采用三维 SPH 方法对双面爆炸焊接过程进行模拟, 将其结果与实验及理论结果进行对比, 分析 SPH-FEM 耦合方法对爆炸焊接模拟的有效性。

1 计算模型及参数选取

1.1 计算模型

以前期 45 钢/Q235 钢双面爆炸焊接实验^[9] 为基础, 考虑到计算效率, 利用 LS-DYNA 建立如图 1 及图 2 所示的两组双面爆炸焊接 SPH-FEM 耦合的三维真实计算模型, 选用的炸药为乳化炸药 (玻璃微

^{*} 收稿日期: 2018-02-01; 修回日期: 2018-03-02

基金项目: 国家自然科学基金 (51374189, 11502001); 安徽省高校自然科学基金重点项目 (KJ2017A089, KJ2018A0090); 安徽省自然科学基金 (1708085QA17, 1808085QA06)

作者简介: 缪广红 (1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事含能材料、爆炸复合及爆炸力学相关领域研究。

E-mail: miaogh@mail.ustc.edu.cn

球的质量分数为 5%), 计算模型中基板和复板的材料、尺寸、间隙(δ)及药厚如表 1 所示。起爆方式为点起爆。

基、复板采用 3D Solid 164 实体单元, 单元边长为 0.1 cm; 炸药划分为光滑粒子, 粒子的大小 Δr 取为 0.1 cm。考虑到模型的对称性, 为了提高计算效率, 采用 1/2 模型进行计算。单位制为 cm-g- μ s。

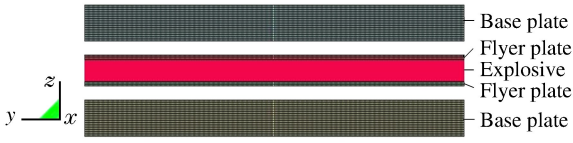


图 1 计算模型 I (10 mm 药厚)
Fig. 1 Calculation model I with
explosive thickness of 10 mm



图 2 计算模型 II (5 mm 药厚)
Fig. 2 Calculation model II with
explosive thickness of 5 mm

表 1 计算模型中材料的相关参数

Table 1 Related parameters of materials in calculation models

Calculation model	Flyer plate		Base plate		Gap δ/mm	Size of explosive/ (mm $\times$ mm $\times$ mm)
	Material	Size/(mm $\times$ mm $\times$ mm)	Material	Size/(mm $\times$ mm $\times$ mm)		
I	45 steel	300 $\times$ 150 $\times$ 2	Q235	300 $\times$ 150 $\times$ 16	6	300 $\times$ 150 $\times$ 10
II	45 steel	300 $\times$ 150 $\times$ 2	Q235	300 $\times$ 150 $\times$ 16	6	300 $\times$ 150 $\times$ 5

1.2 材料模型及参数设定

数值计算中乳化炸药采用高能燃烧模型^[10-11]及 JWL 状态方程^[12]。JWL 状态方程表达式为

$$p = A_{\text{JWL}} \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B_{\text{JWL}} \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega E_0}{v} \quad (1)$$

式中: A_{JWL} 、 B_{JWL} 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料参数; p 为爆轰产物压力, GPa; E_0 为初始比内能, kJ/cm³; v 为爆轰气体产物的相对比容, 为无量纲量。炸药的相关参数见表 2, 其中: ρ 为密度, D 为炸药爆速。

表 2 乳化炸药的 JWL 状态参数^[13]

Table 2 JWL equation-of-state parameters of emulsion explosives^[13]

$\rho/$ (g $\cdot$ cm ⁻³)	$D/$ (m $\cdot$ s ⁻¹)	$A_{\text{JWL}}/\text{GPa}$	$B_{\text{JWL}}/\text{GPa}$	R_1	R_2	ω	$E_0/$ (kJ $\cdot$ cm ⁻³)
1.12	4 510	326.42	5.808 9	5.80	1.56	0.57	3.323

数值计算中, 基、复板均采用 Mie-Grüneisen 状态方程^[14]和 Johnson-Cook 材料模型^[15]。Johnson-Cook 材料模型的形式如下

$$\sigma = (A + B\epsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}_p^*) (1 - T^{*m}) \quad (2)$$

式中: ϵ_p 为有效塑性应变; $\dot{\epsilon}_p^* = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_p^0$ 为有效塑性应变速率, 其中 $\dot{\epsilon}_p^0$ 为参考应变速率; A 、 B 、 C 、 m 及 n 为与材料相关的常数; 无量纲温度 T^* 表示为 $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, 其中 T_r 为室温, T_m 为熔点。45 钢选用与 Q235 钢相同的 Johnson-Cook 材料模型参数, 具体参数如表 3 所示。

表 3 Q235 钢的 Johnson-Cook 模型参数^[16]

Table 3 Johnson-Cook parameters of Q235 steel^[16]

$\rho/$ (g $\cdot$ cm ⁻³)	$G/$ GPa	$A/$ GPa	$B/$ GPa	C	n	m	T_m/K	T_r/K
7.83	77	0.792	0.51	0.014	0.26	1.03	1 793	294

2 模拟结果与分析

2.1 10 mm 药厚的模拟结果

2.1.1 碰撞点位移

图 3 所示是爆炸焊接结束时复板的竖向位移云图。由图 3 可看出,复板的位移大致均为 6 mm,表明基、复板已完全复合。为了更直观地观察复板单元位移的变化情况,在复板上选择 3 个特征单元(431 806、437 359、444 788),输出其位移-时间曲线,如图 4 所示。由图 4 可看出,特征单元的竖向位移均略大于间隙(6 mm),这是由于在爆炸载荷作用下复板有一定程度的减薄率所致。

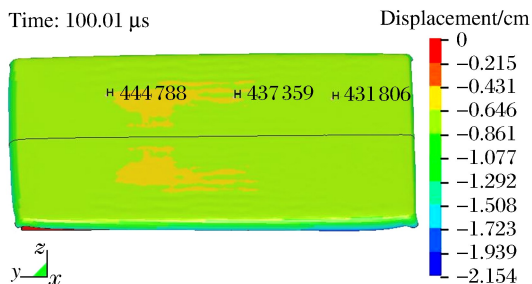


图 3 10 mm 药厚下爆炸焊接结束时复板的 z 向位移云图

Fig. 3 z -direction displacement contour of flyer plate with explosive thickness of 10 mm at the end of explosive welding

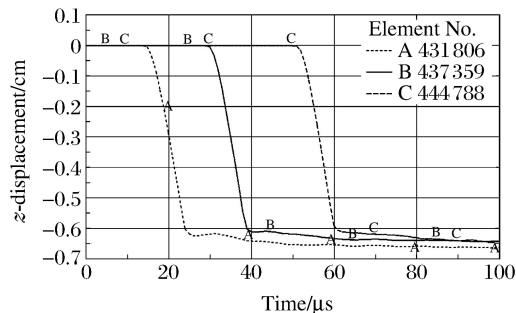


图 4 10 mm 药厚下复板上 3 个特征单元的 z 向位移-时间历程

Fig. 4 z -direction displacement histories of 3 characteristic elements with explosive thickness of 10 mm

2.1.2 复板碰撞速度

图 5 所示是一对分别取自基板与复板结合界面处的特征单元(基板单元:798 751;复板单元:416 251),特征单元的选取与前期实验^[9]中金相试样的取样位置一致。

图 6 所示是对这对特征单元的速度-时间曲线。可以看出,基板在碰撞前有一个正的速度峰;该现象的产生如文献[17]所述,是由于爆轰产物不断堆积以及前碰撞点在待复合区产生的振动能所致。复板上所取单元的最大碰撞速度为 897 m/s。

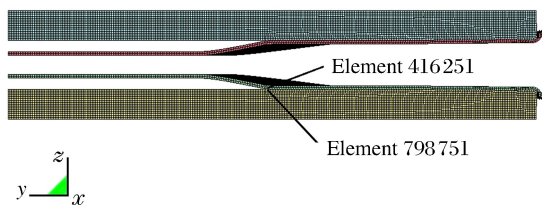


图 5 10 mm 药厚下的一对特征单元

Fig. 5 A pair of characteristic elements with explosive thickness of 10 mm

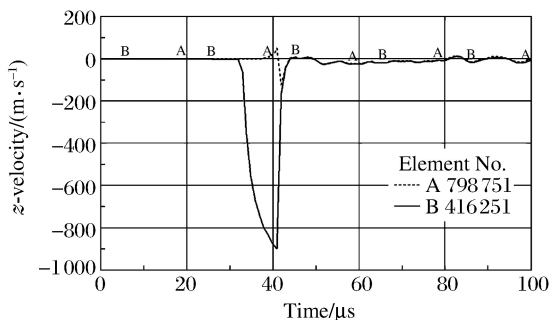


图 6 一对特征单元(见图 5)的速度-时间曲线

Fig. 6 Velocity-time curves of the pair of characteristic elements (see Fig. 5)

图 7 所示是在复板结合界面处所选取的 3 个特征单元(410 476、416 251、420 976)。图 8 所示是这 3 个特征单元的速度-时间曲线。

由图 8 可以看出,随着距起爆端距离的增加,复板的碰撞速度增大。由文献[17]的结论可知,该现象是由于基板与复板的碰撞在金属板的待复合区产生了强烈振动引起的。

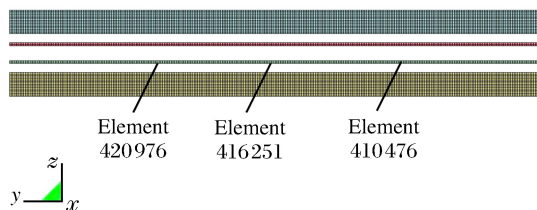


图7 10 mm 药厚下复板结合界面处的3个特征单元
Fig. 7 3 characteristic elements at the bonding interface of flyer plate with explosive thickness of 10 mm

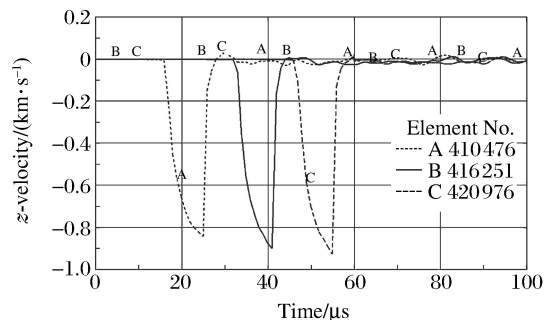


图8 10 mm 药厚下3个特征单元的速度-时间曲线
Fig. 8 Velocity-time curves of 3 characteristic elements with explosive thickness of 10 mm

2.1.3 碰撞点压力分布

图9所示是在结合界面处选取的3个特征单元(415576、418051、419776),单元415576取在复板中心处,与前期实验^[7]中取样做金相观察的位置一致。图10所示是3个特征单元的压力历程。

由图10可以看出,随着距起爆端距离的增加,复板的碰撞压力增大。由文献[17]的结论可知,该现象是爆轰产物不断堆积以及前碰撞点在金属板待复合区振动能不断增加的共同作用结果。

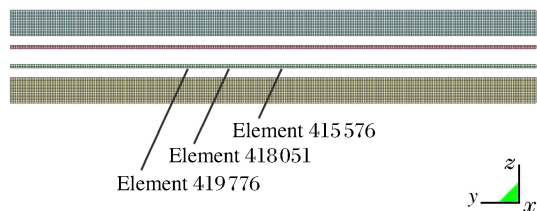


图9 10 mm 药厚下复板结合界面处的3个特征单元
Fig. 9 3 characteristic elements at the bonding interface of flyer plate with explosive thickness of 10 mm

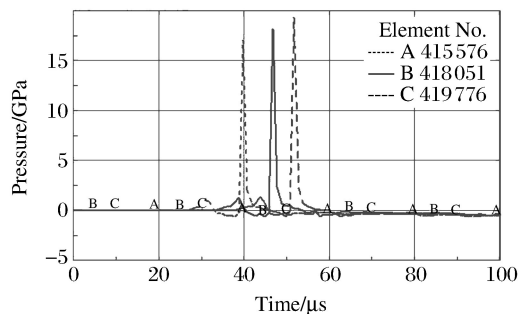


图10 10 mm 药厚下3个特征单元的压力-时间曲线
Fig. 10 Pressure-time curves of 3 characteristic elements with explosive thickness of 10 mm

2.2 5 mm 药厚的模拟结果

2.2.1 碰撞点位移

图11所示是爆炸焊接结束时复板的竖向位移云图。由图11可看出,复板的位移大致均为6 mm,表明基、复板已完全复合。为了更加直观地观察复板单元位移的变化情况,在复板上选择3个特征单元(432182、438034、443960),输出其位移-时间曲线,如图12所示。由图12可看出,特征单元的竖向位移均略大于6 mm,但较10 mm 药厚下的竖向位移小。这是由于5 mm 药厚下的爆炸载荷作用比10 mm 药厚下小,导致5 mm 药厚下的复板减薄率比10 mm 药厚下低。

2.2.2 复板碰撞速度

图13所示是一对分别取自基板与复板结合界面处的特征单元(基板单元:799201;复板单元:416701),特征单元的选取与前期实验^[9]中金相试样的取样位置一致。

图14所示是这对特征单元的速度-时间曲线,可以看出,基板在碰撞前也有一个正的速度峰。复板上所取单元的最大碰撞速度为565 m/s。

图15所示是在复板结合界面处所选取的3个特征单元(411976、417001、423826)。图16所示是这3个特征单元的速度-时间曲线。由图16可以看出,随着距起爆端距离的增加,复板的碰撞速度增大。

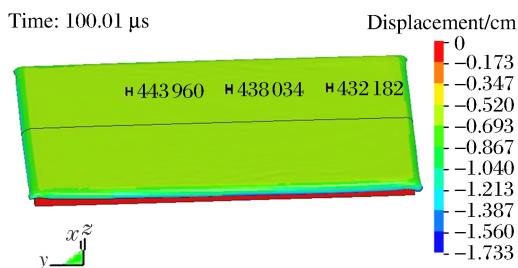


图 11 5 mm 药厚下爆炸复合结束时
复板的 z 向位移云图

Fig. 11 z -displacement contour of flyer plate with explosive thickness of 5 mm at the end of explosive welding

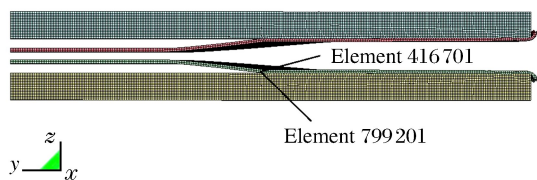


图 13 5 mm 药厚下的一对特征单元
Fig. 13 A pair of characteristic elements with explosive thickness of 5 mm

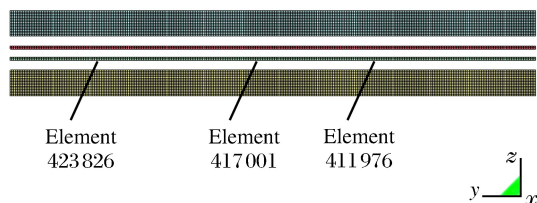


图 15 5 mm 药厚下复板结合界面处的 3 个特征单元
Fig. 15 3 characteristic elements at the bonding interface of flyer plate with explosive thickness of 5 mm

2.2.3 碰撞点压力分布

图 17 所示是在结合界面处选取的 3 个特征单元(416 326、418 801、422 776),单元 416 326 取在复板中心处,与前期实验^[7]中取样做金相观察的位置一致。图 18 所示是这 3 个特征单元的压力历程。由图 18 可以看出,随着距起爆端距离的增加,复板的碰撞压力增大。

2.3 分析与讨论

由图 6 可以看出,10 mm 药厚下复板的最大碰撞速度为 897 m/s。由图 14 可以看出,5 mm 药厚下复板的最大碰撞速度为 565 m/s。利用前期工作^[18]中提到的 3 种理论公式(Gurney 公式、Aziz 公式、Deribas 公式)计算了复板的碰撞速度,如表 4、表 5 所示,并与数值模拟结果进行了比较。由表 4 和表 5

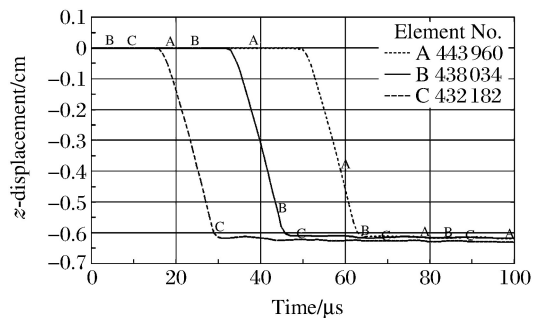


图 12 5 mm 药厚下复板上特征单元的
 z 向位移-时间历程

Fig. 12 z -displacement histories of 3 characteristic elements with explosive thickness of 5 mm

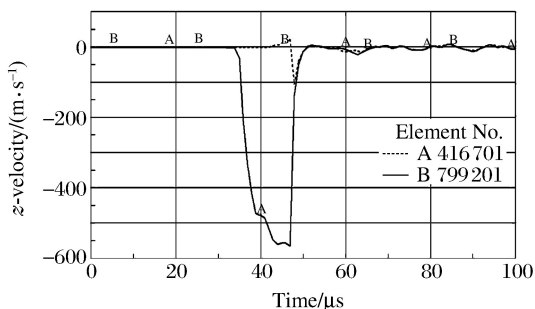


图 14 一对特征单元(见图 13)的速度-时间曲线
Fig. 14 Velocity-time curves of the pair of characteristic elements (see Fig. 13)

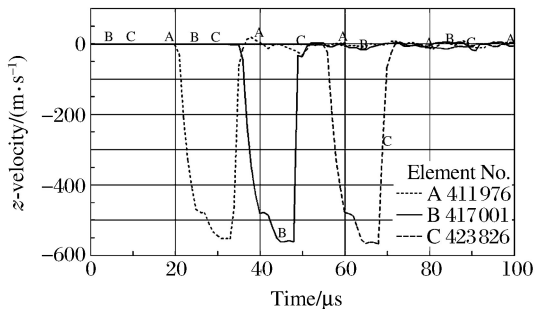


图 16 5 mm 药厚下 3 个特征单元的速度-时间曲线
Fig. 16 Velocity-time curves of 3 characteristic elements with explosive thickness of 5 mm

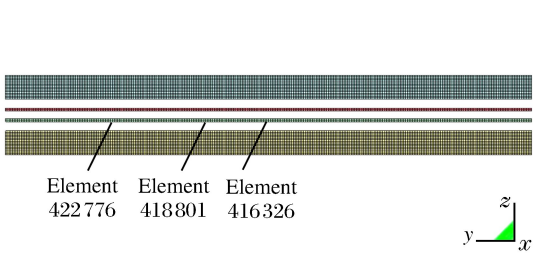


图 17 5 mm 药厚下复板结合界面处的 3 个特征单元
Fig. 17 3 characteristic elements at the bonding interface of flyer plate with explosive thickness of 5 mm

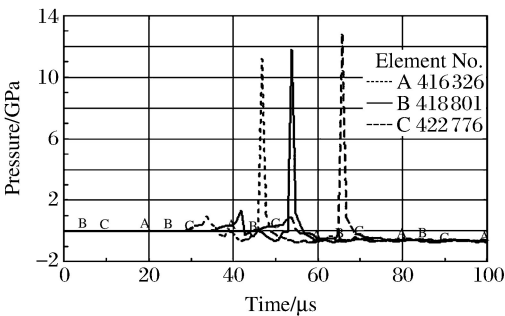


图 18 5 mm 药厚下 3 个特征单元的压力历程
Fig. 18 Pressure histories of 3 characteristic elements with explosive thickness of 5 mm

可以看出:Gurney 公式和 Aziz 公式的计算结果均存在较大的偏差;而由 Deribas 公式计算的两组结果与数值模拟结果较接近,误差均未超过 5%,且与前期实验结果较吻合,证明了 SPH-FEM 耦合算法的可靠性。

表 4 10 mm 药厚下碰撞速度理论计算结果与数值模拟结果的比较

Table 4 Comparison of collision velocity between theoretical calculation and numerical simulation with explosive thickness of 10 mm

Theoretical formula	Mass fraction	Collision velocity/(m · s ⁻¹)		Error/%
		Theoretical calculation ^[18]	Simulation	
Gurney	0.75	1 089	897	−21.0
Aziz	0.75	711	897	20.0
Deribas	0.75	853	897	4.9

表 5 5 mm 药厚下碰撞速度理论计算结果与数值模拟结果的比较

Table 5 Comparison of collision velocity between theoretical calculation and numerical simulation with explosive thickness of 5 mm

Theoretical formula	Mass fraction	Collision velocity/(m · s ⁻¹)		Error/%
		Theoretical calculation ^[18]	Simulation	
Gurney	0.45	863	565	−52.7
Aziz	0.45	480	565	15.0
Deribas	0.45	576	565	−1.9

由图 10 可以看出,10 mm 药厚下复板单元 415 576 处的碰撞压力为 17.08 GPa。由图 18 可以看出,5 mm 药厚下复板单元 416 326 处的碰撞压力为 11.25 GPa。

Ezra 等提出的碰撞压力的计算公式为^[16]

$$p = \frac{\rho_1 v_{s,1} v_p}{1 + \frac{\rho_1 v_{s,1}}{\rho_2 v_{s,2}}}$$

(3)

式中: $v_{s,1}$ 、 $v_{s,2}$ 分别表示复板、基板的声速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ_1 、 ρ_2 分别表示复板、基板的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; v_p 表示复板的碰撞速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

结合表 4 和表 5 中 3 种理论公式计算得到的碰撞速度,通过(3)式可得到复板的碰撞压力,表 6 及表 7 为其理论计算值与数值模拟结果的比较。可见:Gurney 公式和 Aziz 公式的计算结果均存在较大的偏差;而由 Deribas 公式计算的两组结果与数值模拟结果较接近,误差均未超过 5%,说明 Deribas 公式和 SPH-FEM 耦合方法对双面爆炸焊接具有较好的指导意义。

表 6 10 mm 药厚下碰撞压力理论计算结果与数值模拟结果的比较

Table 6 Comparison of collision pressure between theoretical calculation and numerical simulation with explosive thickness of 10 mm

Theoretical formula	Collision pressure/GPa		Error/%
	Calculation	Simulation	
Gurney	22.08	17.08	-29.3
Aziz	14.42	17.08	15.6
Deribas	17.30	17.08	-1.3

表 7 5 mm 药厚下碰撞压力理论计算结果与数值模拟结果的比较

Table 7 Comparison of collision pressure between theoretical calculation and numerical simulation with explosive thickness of 5 mm

Theoretical formula	Collision pressure/GPa		Error/%
	Calculation	Simulation	
Gurney	17.50	11.25	-55.6
Aziz	9.73	11.25	13.5
Deribas	11.68	11.25	-3.8

3 结 论

利用 LS-DYNA 软件和 SPH-FEM 耦合方法对前期双面爆炸焊接实验进行了三维数值模拟,并将模拟结果与实验及理论计算结果进行了对比,得到如下结论。

(1) 10 mm 药厚和 5 mm 药厚下复板位移均略大于间隙值 6 mm,这是由于爆轰载荷作用下复板有一定的减薄率所致。

(2) 10 mm 药厚下,复板中部的最大碰撞速度为 897 m/s,碰撞压力为 17.08 GPa;5 mm 药厚下,复板中部的最大碰撞速度为 565 m/s,碰撞压力为 11.25 GPa。通过与 3 种理论公式(Gurney 公式、Aziz 公式、Deribas 公式)计算得到的碰撞速度进行比较发现,数值模拟结果与 Deribas 公式的计算结果较接近,误差较小,且与实验结果较吻合,证明了 SPH-FEM 耦合方法用于双面爆炸复合模拟的有效性,同时 Deribas 公式和 SPH-FEM 耦合方法对双面爆炸复合具有较好的指导意义。

(3) 10 mm 药厚和 5 mm 药厚下复板的碰撞速度及碰撞压力均随着距起爆端距离的增加而增大,该现象是由于爆轰产物的不断堆积和前碰撞点在金属板待复合区振动能的不断增加共同作用的结果。

参考文献:

[1] JOHNSON G R,PETERSON E H,STRYK R A. Incorporation of an SPH option into the EPIC code for a wide range of high velocity impact computations [J]. International Journal of Impact Engineering,1993,14(1/2/3/4):385-394.

[2] JOHNSON G R,STRYK R A,BEISSEL S R,et al. An algorithm to automatically convert distorted finite elements into meshless particle during dynamics deformation [J]. International Journal of Impact Engineering,2002,27(10):997-1013.

[3] ATTAWAY S W,HEINSTEIN M,SWEGLE J. Coupling of smoothed particle hydrodynamics with the finite element method [J]. Nuclear Engineering and Design,1994,150(2/3):199-205.

[4] TANAKA K. Numerical studies on the explosive welding by smoothed particle hydrodynamis [J]. Materials Science Forum,2007,566:61-64.

[5] 李晓杰,莫非,闫鸿浩,等. 爆炸焊接界面波的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击,2011,31(6):653-657.

LI X J,MO F,YAN H H,et al. Numerical simulation of interface waves in steel explosive welding [J]. Explosion and Shock Waves,2011,31(6):653-657.

[6] 张登霞,李国豪. 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 [J]. 爆炸与冲击,1983,3(2):23-29.

ZHANG D X,LI G H. An experimental relation between interface wave form of explosion welding mild steel and material [J]. Explosion and Shock Waves,1983,3(2):23-29.

[7] 张登霞,李国豪,周之洪,等. 材料强度在爆炸焊接界面波形成过程中的作用 [J]. 力学学报,1984,16(1):73-80.

ZHANG D X,LI G H,ZHOU Z H,et al. Effect of material strength on forming process of explosive welding inter-face wave [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,1984,16(1):73-80.

[8] 刘江,郑远远,沈宗宝. 基于 SPH 方法的爆炸焊接过程模拟 [J]. 焊接技术,2013,42(12):17-20.

LIU J,ZHENG Y Y,SHEN Z B. Simulation of explosive welding process by using of the SPH [J]. Welding Tech-

- nology, 2013, 42(12): 17-20.
- [9] 缪广红, 马宏昊, 沈兆武, 等. 蜂窝结构炸药及其应用 [J]. 含能材料, 2014, 22(5): 693-697.
MIAO G H, MA H H, SHEN Z W, et al. Explosives with structure of honeycomb and its application [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(5): 693-697.
- [10] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [11] 肖定军, 郭学彬, 蒲传金. 单孔护壁爆破数值模拟 [J]. 化工矿物与加工, 2008(7): 22-24.
XIAO D J, GUO X B, PU C J. Numerical simulation for single hole-unilateral blasting [J]. Industrial Minerals & Processing, 2008(7): 22-24.
- [12] 李裕春, 时党勇, 赵远. ANSYS11.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [13] 宋锦泉. 乳化炸药爆轰特性研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2000.
SONG J Q. Research on detonation characteristics of emulsion explosives [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2000.
- [14] LIU G R, LIU M B. 光滑粒子流体动力学——一种无网格粒子法 [M]. 韩旭, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005.
- [15] 程国强, 李守新. 金属材料在高应变率下的热粘塑性本构模型 [J]. 弹道学报, 2004, 11(6): 18-22.
CHENG G Q, LI S X. A thermo-viscoplastic constitutive model of metallic materials at high strain rates [J]. Journal of Ballistics, 2004, 11(6): 18-22.
- [16] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [17] 缪广红, 李亮, 江向阳, 等. 爆炸复合界面波形变化的数值模拟研究 [J]. 煤矿爆破, 2017(3): 1-4.
MIAO G H, LI L, JIANG X Y, et al. Numerical simulation on interface waves variation in explosive welding [J]. Coal Mine Blasting, 2017(3): 1-4.
- [18] 缪广红, 王章文, 周任俊, 等. 双面爆炸复合理论计算与实验结果的对比研究 [J]. 爆破, 2017, 34(2): 117-120.
MIAO G H, WANG Z W, ZHOU R J, et al. Comparative study on theoretical calculation and experimental results of double-sided explosive cladding [J]. Blasting, 2017, 34(2): 117-120.

Numerical Simulation of Double-Sided Explosive Welding

MIAO Guanghong¹, LI Liang¹, JIANG Xiangyang¹, LIU Wenzhen¹,
LI Xuejiao², WANG Quan², YU Yong³, SHEN Zhaowu⁴

(1. School of Mechanics and Optoelectronic Physics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

3. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, 230022, China;

4. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The high noise and low efficiency of explosive welding can be improved by the double-sided explosive welding which can clad two composite plates simultaneously and significantly reduce the critical thickness of stable detonation of explosives. In this study, we simulated the double-sided explosive welding using the explicit finite element program LS-DYNA combined with the SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) and FEM (Finite Element Method) coupling, and compared the simulation results with the experiment and the calculation results. The results showed that the simulation results were in good agreement with the experiment results as well as the theoretical calculation results of Deribas's. It shows that the Deribas's formula and SPH-FEM coupling method can provide theoretical guidance for the engineering application of double-sided explosive welding.

Keywords: double-sided explosive welding; SPH-FEM coupling; numerical simulation; low energy consumption and high efficiency