文章编号: 1001-1455(2014)06-0716-07 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)06-0716-07

爆炸焊接界面波物质点法三维数值模拟*

王宇新,李晓杰,王小红,闫鸿浩,孙 明
(大连理工大学工程力学系,辽宁 大连 116024)

摘要: 基于冲击动力学和爆炸焊接理论,采用物质点法对爆炸焊接界面波的形成进行三维数值模拟。通过数值模拟结果与爆炸焊接实验结果的对比,对复合界面材料的塑性流动变形以及界面波形成的机理进行探讨。结果表明:界面波是因为在碰撞点处的金属材料发生熔化并产生涡旋流动形成的;同时也说明采用物质点法模拟爆炸焊接界面波的形成是可行的。

关键词: 爆炸力学;界面波;物质点法;爆炸焊接
中图分类号: O389 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

在近几十年中,对于爆炸焊接的理论研究以及工业应用得到了迅速发展[1-2]。在炸药爆轰载荷作用下,2 金属板之间高速碰撞形成金属射流和周期性波纹状的复合界面,通常被称为界面波。金属复合板强度以及复合率与界面波状态密切相关,金属爆炸焊接只有在复合界面上形成大小适当的波纹才能保证复合板的结合强度。关于爆炸焊接复合界面波的形成机理[3-4]有 4 种经典理论:(1)复板侵彻刻入机理,复板的周期性刻入基板并在驻点前沿形成驼峰而形成波状界面的特征;(2)亥尔姆霍尔兹失稳模型,复板再入射流和基板之间存在速度差而形成界面波;(3)应力波模型,在复板与基板的碰撞点处的可压缩冲击波与在自由边界反射的稀疏波相互作用而形成界面波;(4)卡门涡街模型,在金属板碰撞点附近材料的卡尔曼涡街流动形成界面波。然而,这些界面波理论模型还不完善,迄今为止,爆炸焊接界面波的形成机理仍没有统一的认识。

由于界面波的形成涉及多种物理现象,单纯使用固体力学计算模型对此很难进行分析,而采用爆炸焊接实验又难以观察到界面波的动态形成过程,因此,本文中基于冲击动力学和物质点法[5]对爆炸焊接界面波的形成过程进行三维数值模拟,并开展相关的爆炸焊接实验。

1 物质点法基本理论

采用物质点法求解冲击动力学问题时,首先定义背景网格,然后在背景网格内将连续体剖分为具有集中质量的离散质点,再利用形函数实现质点和背景网格节点之间的 2 次映射,通过求解连续方程和运动方程以及材料本构方程计算所有质点的应变和应力值[5],在计算过程中背景网格固定不变。与其他数值计算方法相同,物质点法满足的连续方程、运动方程和能量方程分别为:

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}+\rho\nabla\cdot\boldsymbol{v}=0 \tag{1}$$

$$\rho\boldsymbol{a}=\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}+\rho\boldsymbol{b} \tag{2}$$

$$\rho\dot{e}=\boldsymbol{\sigma}:\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \tag{3}$$

式中:ρ 为质量密度,$\boldsymbol{a}$ 为加速度,$\boldsymbol{b}$ 为单位体积力,$\boldsymbol{v}$ 为速度,$\boldsymbol{\sigma}$ 为柯西应力张量,e 为质量热力学能,应变率 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}=\frac{1}{2}[\nabla\boldsymbol{v}+(\nabla\boldsymbol{v})^{\mathrm{T}}]$。

将连续体离散为 N_p 个质点后,为了利用这些质点来描述连续体的变形过程,假定质点 p($p=1,2,$

* **收稿日期**: 2013-04-01; **修回日期**: 2013-07-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(10972051,11272081)
作者简介: 王宇新(1972—),男,博士,副教授。

…，N_P）在 t 时刻位置为$x_p^{(t)}$，质量为 M_p，密度为 $\rho_p^{(t)}$，速度为 $\boldsymbol{v}_p^{(t)}$，柯西应力张量为 $\boldsymbol{\sigma}_p^{(t)}$，将每个质点看作集中质量点，并且每个离散质点的质量保持不变，那么连续方程自然满足。为了求解运动方程则需要采用弱形式[6]：

$$\int_\Omega \rho \boldsymbol{w} \cdot \boldsymbol{a}\,\mathrm{d}\Omega = -\int_\Omega \rho \boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{s}} : \nabla \boldsymbol{w}\,\mathrm{d}\Omega + \int_{\partial\Omega_c} \rho \boldsymbol{c}^{\mathrm{s}} \cdot \boldsymbol{w}\,\mathrm{d}S + \int_\Omega \rho \boldsymbol{w} \cdot \boldsymbol{b}\,\mathrm{d}\Omega \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{s}}$ 为比应力张量，$\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{s}} = \boldsymbol{\sigma}/\rho$；$\Omega$ 为当前连续体构形，$\partial\Omega_c$ 为指定应力边界；$\boldsymbol{w}$ 为试函数；假设边界上应力为 $\boldsymbol{c}$，且 $\boldsymbol{c}^{\mathrm{s}} = \boldsymbol{c}/\rho$，$\boldsymbol{w}$ 在指定位移边界上为零。这样每个质点密度写成 δ 函数形式[6]：

$$\rho(\boldsymbol{x},t) = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_p^{(t)}) \tag{5}$$

背景网格节点包含了多个参量，坐标 $\boldsymbol{x}_i^{(t)}$、位移 $\boldsymbol{u}_i^{(t)}$、速度 $\boldsymbol{v}_i^{(t)}$ 和加速度 $\boldsymbol{a}_i^{(t)}$ 以及试函数 $\boldsymbol{w}_i^{(t)}$ 等，统一使用变量 $\boldsymbol{r}_i^{(t)}$（$i=1,2,\cdots,N_n$）表示，则有[7]：

$$\boldsymbol{r}_p^{(t)} = \sum_{i=1}^{N_n} \boldsymbol{r}_i^{(t)} N_i(\boldsymbol{x}_p^{(t)}) \tag{6}$$

利用形函数实现从背景网格节点到质点的映射，更新质点的位移、速度、应变等参量。由于物质点法采用显式积分算法，将网格节点插值得到的参数代入式(4)可得：

$$\sum_{i=1}^{N_n} \boldsymbol{w}_i^{(t)} \cdot \sum_{j=1}^{N_n} m_{ij}^{(t)} \boldsymbol{a}_j^{(t)} = -\sum_{i=1}^{N_n} \boldsymbol{w}_i^{(t)} \cdot \sum_{p=1}^{N_p} M_p \boldsymbol{\sigma}_p^{(\mathrm{s},t)} \cdot \nabla N_i(\boldsymbol{x})\big|_{x_p^{(t)}} + \sum_{i=1}^{N_n} \boldsymbol{w}_i^{(t)} \cdot (\boldsymbol{c}_i^{(t)} + \boldsymbol{b}_i^{(t)}) \tag{7}$$

$$m_{ij}^{(t)} = \sum_{p=1}^{N_p} M_p N_i(\boldsymbol{x}_p^{(t)}) N_j(\boldsymbol{x}_p^{(t)}) \tag{8}$$

$$\boldsymbol{c}_i^{(t)} = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \boldsymbol{c}_p^{(\mathrm{s},t)} N_i(\boldsymbol{x}_p^{(t)})/h \tag{9}$$

$$\boldsymbol{b}_i^{(t)} = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \boldsymbol{b}(\boldsymbol{x}_p^{(t)},t) N_i(\boldsymbol{x}_p^{(t)}) \tag{10}$$

将运动方程(7)写成以下形式：

$$\sum_{j=1}^{N_n} m_{ij}^{(t)} \boldsymbol{a}_j^{(t)} = (f_i^{(t)})^{\mathrm{int}} + (\boldsymbol{f}_i^{(t)})^{\mathrm{ext}} \qquad i=1,2,\cdots,N_n \tag{11}$$

$$(\boldsymbol{f}_i^{(t)})^{\mathrm{int}} = -\sum_{p=1}^{N_p} M_p \boldsymbol{\sigma}_p^{(\mathrm{s},t)} \cdot \nabla N_i\big|_{x_p^{(t)}} \tag{12}$$

$$(\boldsymbol{f}_i^{(t)})^{\mathrm{ext}} = \boldsymbol{b}_p^{(t)} + \boldsymbol{c}_p^{(t)} \tag{13}$$

采用行求和方式获得对角质量阵，这样式(8)和式(10)分别变为：

$$m_i^{(t)} = \sum_{p=1}^{N_p} M_p N_i(\boldsymbol{x}_p^{(t)}) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{b}_i^{(t)} = m_i^{(t)} \boldsymbol{b}(\boldsymbol{x}_p^{(t)},t) \tag{15}$$

从而式(11)变为：

$$m_i^{(t)} \boldsymbol{a}_i^{(t)} = (\boldsymbol{f}_i^{(t)})^{\mathrm{int}} + (\boldsymbol{f}_i^{(t)})^{\mathrm{ext}} \qquad i=1,2,\cdots,N_n \tag{16}$$

基于材料本构模型对质点应力进行更新，计算应力增量为：

$$\Delta\boldsymbol{\sigma}_p^{(t+\Delta t)} = \boldsymbol{E} : \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_p^{(t+\Delta t)} \tag{17}$$

式中：E 是切线刚度张量。计算质点当前时刻的应力张量为：

$$\boldsymbol{\sigma}_p^{(t+\Delta t)} = \boldsymbol{\sigma}_p^{(t)} + \Delta\boldsymbol{\sigma}_p^{(t+\Delta t)} \tag{18}$$

计算当前时刻质点内能为：

$$e_p^{(t+\Delta t)} = e_p^{(t)} + \boldsymbol{\sigma}_p^{(t+\Delta t)} : \Delta\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p^{(t+\Delta t)} / [\rho_p^{(t+\Delta t)} \Delta t] \tag{19}$$

物质点法的理论模型以及数值计算方法都较成熟，对于爆炸冲击问题通常采用显式积分算法完成。关于物质点法的具体计算步骤和求解过程可以参考文献[8-12]。

2 爆炸焊接数值计算模型

2.1 爆炸焊接布置形式

实际爆炸焊接工程中，一般采用飞板与基板平行的方式进行爆炸焊接，2 金属板之间保持一定间距，为了避免飞板上表面被炸药烧伤，还要加一薄缓冲层，如图 1 所示，爆炸焊接装置主要由雷管、炸药层、缓冲层、飞板、支撑以及基板等组成。

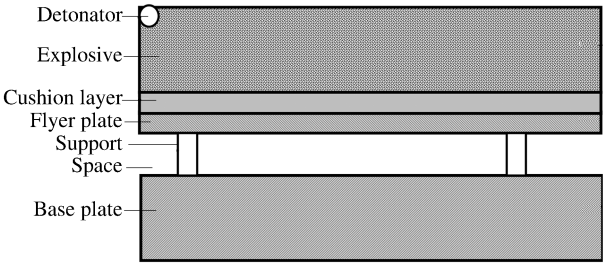

图 1 爆炸焊接布置简图

Fig. 1 Distribution pattern of explosive welding

在爆炸焊接过程中，雷管起爆后，炸药会在起爆端不远处达到稳定的爆轰状态，爆轰波以 v_d 的速度向炸药未起爆区域传播，如图 2 所示。

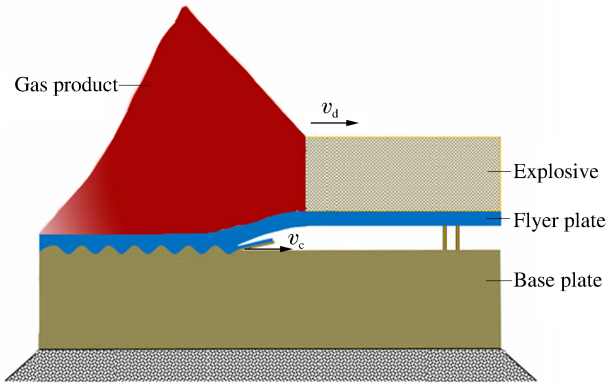

图 2 爆炸焊接过程示意图

Fig. 2 The process of explosive welding

炸药爆炸产物驱动飞板向下运动，在预置间隙中经历加速过程，与基板发生碰撞之前获得较高的飞行速度 v_p，称为碰撞速度。随着炸药稳定爆轰的推进，碰撞点会以稳定速度 v_c 向未焊合区域行进，该速度称为碰撞点移动速度，平行布置时 $v_c = v_d$。在碰撞点附近会产生高压，同时金属复合界面会受到剧烈的剪切作用，进而发生强烈的塑性变形，导致界面材料升温，甚至发生熔化流动，并形成向前的微喷射射流使界面完成自清理，最终实现爆炸焊接。由于应用物质点法对爆炸焊接界面波的模拟研究计算量很大，不可能对炸药爆轰、基板与飞板碰撞、焊接界面形成的全部过程进行模拟。同时，基于爆炸焊接的实际情况，炸药爆轰驱动飞板，飞板在预置间隙加速后，爆轰产物对飞板背面施加的压力已经下降为 0.1～1 GPa 量级，飞板以一定速度与基板碰撞后的压力却高达 10～100 GPa 量级，远大于炸药爆轰对飞板的压力，爆轰压力在 2 金属板接触后对爆炸焊接界面的影响已经很小。因此，在对爆炸焊接界面的数值模拟过程中可忽略炸药爆炸驱动过程，单独对高速碰撞过程进行建模，爆炸焊接的计算模型如图 3 所示。

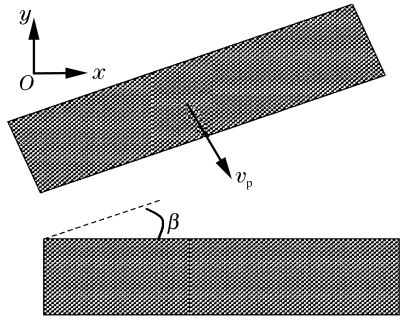

图 3 爆炸焊接数值计算模型示意图

Fig. 3 Calculation model of explosive welding

飞板向下以一定速度和倾斜角度 β 碰撞基板，选择飞板与基板的倾斜角度应该在爆炸焊接窗口上下限的最大与最小弯折角之间，焊接窗口上下限是指保证爆炸焊接可以复合的飞板碰撞基板的最大与最小速度，很多金属的爆炸焊接窗口上下限已经通过实验测定。在已知炸药爆速的前提下，由飞板碰撞点速度计算公式[13]：

$$v_p = 2v_d \sin(\beta/2) \tag{20}$$

可以获得本文计算模型飞板的初始倾斜角度，这样设计的计算模型与轻气炮加速、电磁加速碰撞焊接情况是完全相符的。当确定了飞板与基板材料的爆炸焊接窗口碰撞点速度的上下限以及炸药的爆轰速度

后，由式(20)就能够计算出飞板与基板的碰撞角，飞板的初始速度、倾斜角度和垂直向下的初始速度也可以由此确定。

2.2　爆炸焊接材料模型

确定爆炸焊接的计算模型后，假定飞板和基板材料都为普通碳钢，普通碳钢的爆炸焊接窗口下限为 272 m/s，飞板的初始速度设计为 300 m/s，碰撞点速度处于焊接窗口中间。由于爆炸焊接整个过程历时较短，在微秒量级范围内，所以忽略热传导并假定为绝热过程。2 块金属板碰撞过程中，复合界面材料发生塑性流动。采用物质点法计算与有限元法类似，为了描述爆炸焊接复合界面处的金属塑性流动变形，材料模型采用 Johnson-Cook 塑性模型[14]：

$$\sigma_y=[A+B(\varepsilon_e^p)^n](1+C\ln\dot{\varepsilon}^*) \tag{21}$$

式中：σ_y 为 Von Mises 流动应力，ε_e^p 为等效塑性应变，$\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}_e^p/\dot{\varepsilon}_0$ 为相对等效塑性应变率，取 $\dot{\varepsilon}_0=1\ \mathrm{s}^{-1}$，$B$、$n$ 为材料应变硬化特性参数，C 为材料应变率敏感特性参数；式中第 1 个乘积因子表示当 $\dot{\varepsilon}^*=1.0$ 时流动应力同等效塑性应变之间的关系，第 2 个乘积因子表示应变率强化效应。

爆炸焊接过程还涉及到材料在高压条件下的力学行为，所以对其还要运用相应的状态方程进行描述，这里材料状态方程选用 Mie-Grüneisen 状态方程。当材料处于拉伸膨胀状态时，状态方程形式为：

$$p=\rho_0 c_g^2\mu+(\gamma_0+a\mu)E \tag{22}$$

当材料处于压缩状态时，状态方程形式为：

$$p=\frac{\rho_0 c_g^2\mu\left(1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right)}{\left(1-(s_1-1)\mu-s_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-s_3\frac{\mu^3}{\mu+1}\right)^2}+(\gamma_0+a\mu)E \tag{23}$$

式中：c_g、a、s_1、s_2 和 s_3 是与材料冲击压缩特性有关的常数，c_g 是冲击波速度(u_s)-质点速度(u_p)曲线的截距，s_1、s_2 和 s_3 是 u_s-u_p 曲线斜率的系数，a 是一阶体积修正系数，γ_0 是 Grüneisen 系数，E 为材料比内能，体积变化率 $\mu=\rho/\rho_0-1$。

本文中普通钢状态方程模型参数[15-16]为：$\rho=7\ 850\ \mathrm{kg/m^3}$，$a=0.43$，$G=124$ MPa，$A=400$ MPa，$B=220$ MPa，$n=0.08$，$C=0.025$，$c_g=4\ 573$ m/s，$s_1=1.33$，$s_2=0$，$s_3=0$，$\gamma_0=1.07$。

3　爆炸焊接界面波形成数值模拟

假设爆炸焊接计算模型的尺寸板 X 方向板长 100 mm，Y 方向板厚 20 mm，Z 方向板宽 16 mm，在 Z 方向的板两侧面施加固定约束条件。利用物质点法对本文中设计的爆炸焊接计算模型进行三维数值模拟之前，需要划分背景网格和质点单元等，三维背景网格单元为六面体立方体单元，网格单元大小为 2 mm，在 X、Y、Z 3 个方向划分的背景网格单元数量分别为 100、100 和 50，每个背景网格单元内的质点数量划分为 8 个，飞板和基板的材料模型选择 Johnson-Cook 模型，材料在高压下的力学行为选用 Mie-Grüneisen 状态方程进行描述。爆炸焊接计算模型的三维前处理结果见图 4。

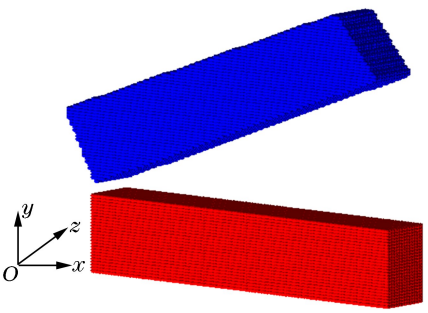

图 4　爆炸焊接数值计算模型前处理

Fig. 4　Preprocess of explosive welding

爆炸焊接数值模拟是利用自主研发的物质点法程序 SPS2.0 完成的，该程序是应用 C++编制实现的，并提供了基本的后处理功能，图 5 给出了爆炸焊接数值模拟的三维变形图，图 6 给出了爆炸焊接数值模拟的中间剖面变形图。爆炸焊接中间剖面的等效应力 σ_e 后处理云图，见图 7。爆炸焊接中间剖面的压力 p 场后处理云图，见图 8。

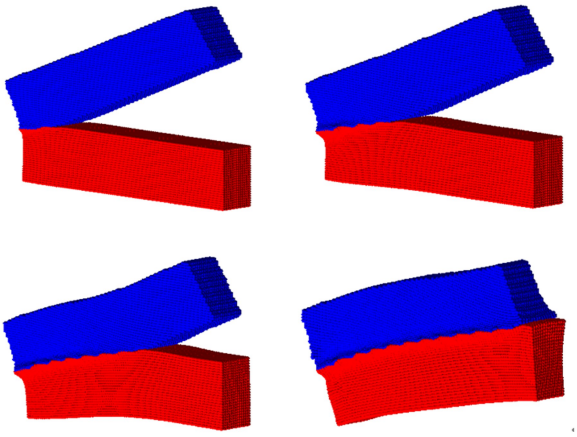

图 5 爆炸焊接复合界面波的形成

Fig. 5 Interfacial wave formation of explosive welding

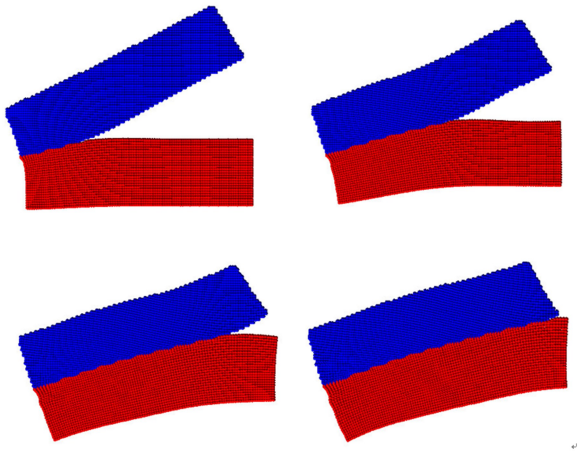

图 6 爆炸焊接复合界面波 x-y 中间剖面

Fig. 6 Interfacial wave formation of explosive welding at x-y section

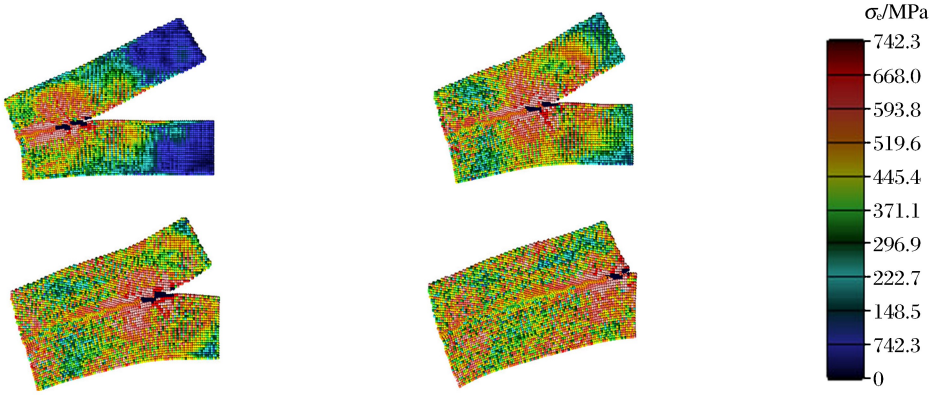

图 7 爆炸焊接 x-y 中间剖面等效应力

Fig. 7 Effective stress of explosive welding at x-y section

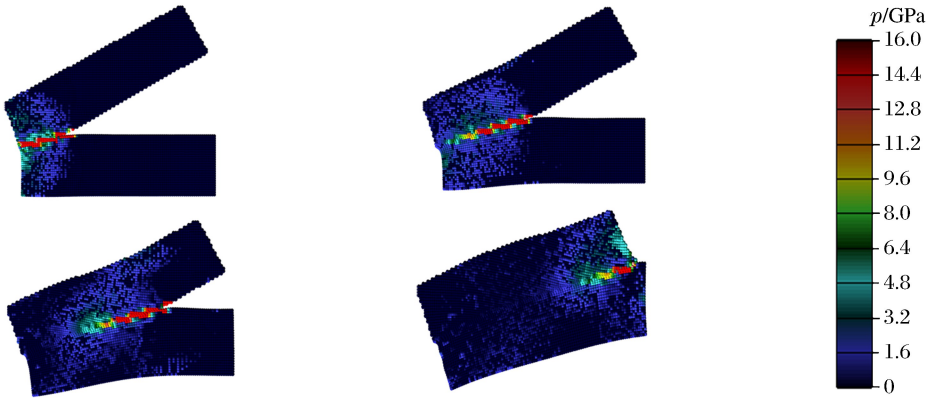

图 8 爆炸焊接 x-y 中间剖面压力

Fig. 8 Pressure of explosive welding at x-y section

为了验证物质点法计算的准确性，本文中设计了普通钢板爆炸焊接实验：飞板和基板采用平行布置，基板和飞板的长度均为 1 000 mm，宽度均为 400 mm，厚度均为 20 mm；炸药采用铵油，爆速为

2 400 m/s；2 金属板之间的支撑间距为 10～12 mm，保证飞板碰撞速度 v_p 在爆炸焊接窗口内，约 300 m/s。爆炸焊接实验后，取复合板中间部分做为试样进行研磨，利用电子金相显微镜获得复合界面金相显微组织照片，如图 9 所示。

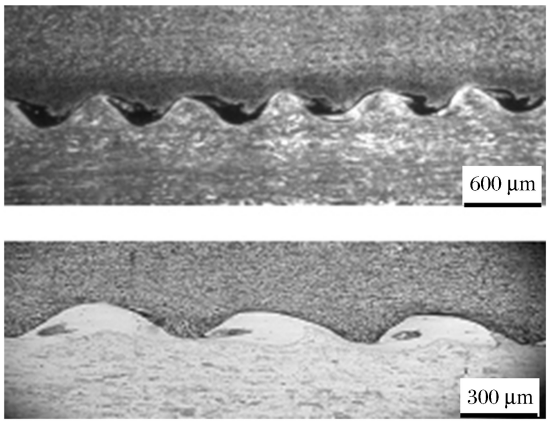

图 9 爆炸焊接复合界面波状态金相照片

Fig. 9 Metallograph of interfacial wave formation

将爆炸焊接复合界面的金相组织以及界面波纹形状（图 9）与数值模拟结果（图 6）进行比较可知，两者的界面波形状基本一致，由此说明采用物质点法对爆炸焊接界面波形成问题的模拟结果具有一定的准确性和可靠性。

分析复合界面的金相照片，可以发现界面处的金属材料有熔化现象，这与数值模拟结果（图 7）是相符的。在飞板与基板碰撞点位置附近计算的等效应力等于零，说明飞板与基板在冲击碰撞位置的材料几乎处于流体状态。为什么在碰撞点附近区域出现熔化流体现象，其中重要原因是该处的压力最高。数值计算获得的压力大小在 12 GPa 以上，远高于材料强度。通过数值模拟得到的爆炸焊接压力分布图（图 8）可以直观地说明这一点。

4　结　论

（1）爆炸焊接界面波的形成机理是由于飞板与基板的高速碰撞，在碰撞点处压力最高，材料发生熔化形成流体涡旋变形并且迅速冷却而复合为一体，这个过程随着碰撞点的移动不断地向前推进，使得 2 金属板复合形成周期性波状界面。

（2）物质点法的三维数值模拟结果与爆炸焊接实验结果比较符合，由此说明物质点法用于模拟爆炸焊接界面波的形成过程具有实际工程应用价值。

（3）此外，基于本文数值模拟结果也证明了物质点法用于爆炸焊接和冲击动力学问题计算具有突出的优点：一是避免了有限元法在复合界面处难以克服的网格畸变问题；二是与其他无网格法相比，物质点法计算效率更高，本文数值模拟质点数量 10 万多，台式机计算时间约 1 h，而利用光滑粒子流体动力学法则需要几天时间。因此，物质点法在爆炸焊接、高速冲击、塑性大变形等力学问题计算中具有广泛的应用前景。

参考文献：

[1] 邵丙璜，张凯. 爆炸焊接原理及工业应用[M]. 大连：大连工学院出版社，1987：1-5.

[2] Grignon F, Benson D, Vecchio K S. Explosive welding of aluminum to aluminum: Analysis, computations and experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004,30(10):1333-1351.

[3] Kahraman N, Gülenc B, Findik F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005,169(2):127-133.

[4] 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 Deng-xia, Li Guo-hao, Zhou Zhi-hong, et al. Effect of material strength on forming process of explosive welding interface wave[J]. Acta Mechanica Sinica, 1984,16(1):73-80.

[5] Sulsky D, Chen Z, Schreyer H L. A particle method for history-dependent materials[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1994,118(1/2):179-186.

[6] Chen Z, Hu W, Shen L. An evaluation of the MPM for simulating dynamic failure with damage diffusion[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002,69(17):1873-1890.

[7] Wang Y X, Beom H G, Sun M, et al. Numerical simulation of explosive welding using the material point method [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011,38:51-60.

[8] Wiezckowski Z. The material point method in large strain engineering problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004,193(39/40/41):4417-4438.

[9] Hu W, Chen Z. Model-based simulation of the synergistic effects of blast and fragmentation on a concrete wall using the MPM[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(12):2066-2096.

[10] 黄鹏,张雄,马上.基于 OpenMP 的三维显式物质点法并行化研究[J].计算力学学报,2010,27(1):21-27.
Huang Peng, Zhang Xiong, Ma Shang. Parallelization of 3D explicit material point method using OpenMP[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010,27(1):21-27.

[11] Zhang D Z, Zou Q S, VanderHeyden W B. Material point method applied to multiphase flows[J]. Journal of Computational Physics, 2008,227(6):3159-3173.

[12] Sulsky D, Schreyer L. MPM simulation of dynamic material failure with a decohesion constitutive model[J]. European Journal of Mechanics: A/Solids, 2004,23(3):423-445.

[13] Li X J, Mo F, Wang X H. Numerical study on mechanism of explosive welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012,17(1):36-41.

[14] Daridon L, Oussouaddi O, Ahzi S. Influence of the material constitutive models on the adiabatic shear band spacing: MTS, power law and Johnson-Cook models[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004,41(11/12):3109-3124.

[15] Steinberg D J. Equation of state and strength properties of selected materials[R]. Livermore: Livermore National Laboratory, 1996.

[16] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985,21(1):31-48.

Numerical simulation on interfacial wave formation in explosive welding using material point method*

Wang Yu-Xin, Li Xiao-Jie, Wang Xiao-Hong, Yan Hong-hao, Sun Ming

(*Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *Liaoning*, *China*)

Abstract: Based on the impact dynamics and the basic theory of explosive welding, the material point method was applied to study the wave formation at the compounded interface by explosive welding, and the corresponding three-dimensional numerical simulations were presented. The interfacial wave formation and plasticity flowing deformation were explored, and the simulated results by the material point method were compared with the explosive welding experiments. The above investigations display that the formation of the interfacial wave in explosive welding result from melting of the metal material and flowing of the eddy at the impact point. Furthermore, the material point method presents an outstanding advantage in the numerical simulation for the interfacial wave formation in explosive welding.

Key words: mechanics of explosion; interfacial wave; material point method; explosive welding

* Received 1 April 2013; Revised 15 July 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (10972051,11272081)
Corresponding author: Li Xiao-Jie, dymat@163.com

(责任编辑 张凌云)