文章编号：1000-5773(2011)02-0173-04

爆炸焊接斜碰撞过程的数值模拟*

李晓杰，莫　非，闫鸿浩，张程娇

（大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室，辽宁大连　116023）

摘要：借助动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA 11.0，建立了考虑材料强度的流体弹塑性力学模型，运用光滑粒子流体动力学(SPH)方法，对爆炸焊接斜碰撞过程进行了数值模拟。界面波和射流的模拟结果与爆炸焊接生产实际中的现象较为吻合，说明采用 SPH 方法对爆炸焊接斜碰撞过程进行模拟研究是有科学价值的。

关键词：爆炸焊接；斜碰撞；界面波；光滑粒子流体动力学方法；流体弹塑性力学模型；射流

中图分类号：O347.1；TG456.6　　**文献标识码**：A

1　引　言

爆炸焊接是利用炸药推动金属体，使其以高速撞击基体，从而产生焊接效应的一门技术。图 1 为爆炸焊接装置图。爆炸焊接过程可以分为两个阶段：第一阶段，炸药的爆炸产物作用于飞板，使飞板获得较高的运动速度；第二阶段，飞板与基板发生高速斜碰撞。



图 1　爆炸焊接装置示意图

Fig. 1　Sketch of the explosive welding set-up

在爆炸焊接理论中，金属射流是用来判断焊合与否的重要标志，而结合界面波形貌是用来评判焊接质量好坏的主要指标，两者的形成过程都发生在斜碰撞阶段。因此，对斜碰撞过程的相关研究直接关系到爆炸焊接技术的应用和发展，具有重要的实用意义。许多学者对爆炸焊接高速斜碰撞过程进行了数值模拟[1-3]，其中大多采用有限元法。

光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics，SPH)方法是一种拉格朗日描述下的无网格粒子法。1993 年，Libersky 等人[4]对高速碰撞问题的模拟研究表明，运用 SPH 方法模拟具有材料强度的动力学问题是行之有效的。本研究借助大型商用动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA 11.0，运用 SPH 方法，对爆炸焊接斜碰撞过程进行数值模拟，证明运用 SPH 方法对爆炸焊接斜碰撞过程进行模

* **收稿日期**：2010-03-09；**修回日期**：2010-06-09

基金项目：国家自然科学基金(10972051，10902023，10872044，10172025)

作者简介：李晓杰(1963－)，男，教授，博士生导师，主要从事爆炸力学、冲击力学、爆炸加工及特种爆破技术研究. E-mail：robinli@dlut.edu.cn

通讯作者：莫　非(1985－)，男，博士研究生，主要从事爆炸焊接机理研究. E-mail：feimo1985@163.com

拟研究是非常有科学意义的。

2 模型建立与参数设定

基于流体弹塑性力学理论,建立考虑材料强度的流体动力学封闭方程组。含有材料强度的流体动力学控制方程是连续介质力学中的守恒方程[5]。其中,能量守恒方程不考虑传热和生成热效应。材料模型采用 Johnson-Cook 模型,状态方程选用 Grüneisen 方程。初始条件以初始速度的形式给出。其中,飞板的初始速度由第一阶段炸药驱动飞板飞行的相关理论进行计算。边界条件则主要考虑结合界面的不可穿透因素。

建立二维的平面应变计算模型,沿焊接行进方向选取截面。爆炸焊接两金属板碰撞的数值模型见图 2。其中:单元类型选用 SPH 单元,基板与飞板均选用 4340 钢,几何尺寸均为 10 mm×3 mm。粒子近似方法采用适用于流体粒子的方法,相应的参数由关键字 * CONTROL_SPH 中的 FORM 项设定,其值选为 5。同时,运用人工粘度来防止接触界面粒子的相互穿透。

基板和飞板均采用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程,具体表达式为[8-9]

$$\sigma_y = [A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n](1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \tag{1}$$

式中:A、B、C、m、n 为材料常数;$\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变;$\dot{\varepsilon}^*$ 为等效应变率;$T^* = (T - T_{\text{room}})/(T_{\text{melt}} - T_{\text{room}})$,其中 T_{melt} 为熔化温度,T_{room} 为室温。

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu[1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - \alpha\mu^2/2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2\mu^2/(\mu + 1) - S_3\mu^3/(\mu + 1)^3]^2} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E \tag{2}$$

式中:ρ_0 为初始密度,c 为 v_s-v_p 曲线截距,S_1、S_2、S_3 为 v_s-v_p 曲线斜率的调控系数,E 为单位体积内能,γ_0 为 Grüneisen 系数,α 为Grüneisen 方程的修正系数,$\mu = \rho/\rho_0 - 1$。4340 钢的 Johnson-Cook 材料参数[6]、Grüneisen 状态方程参数[7]见表 1、表 2。

飞板的初始速度 $\boldsymbol{v}_p$ 由炸药驱动平行飞板的 Taylor 公式进行计算,即 $\boldsymbol{v}_p = 2\boldsymbol{v}_d \sin(\beta/2)$,其中:$\boldsymbol{v}_d$ 为炸药的爆轰速度,它是炸药的性能参数;β 为碰撞角。$\boldsymbol{v}_p$ 的方向垂直于碰撞角 β 的角分线,因此 $\boldsymbol{v}_p$ 的分量可以表示为

$$v_{px} = 2v_d \sin^2(\beta/2) \tag{3}$$

$$v_{py} = v_d \sin\beta \tag{4}$$

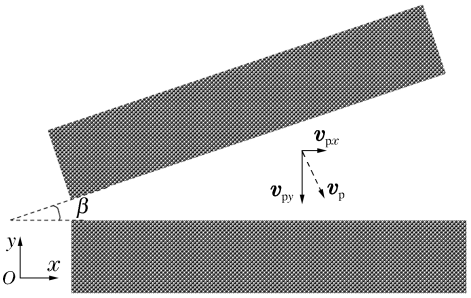


图 2 计算模型

Fig. 2 The calculation model

模拟过程中,采用 cm-g-μs 单位制。

表 1 4340 钢的 Johnsen-Cook 材料模型参数

Table 1 The 4340 steel parameters of Johnson-Cook model

ρ_0/(g/cm³)	G/(GPa)	A/(GPa)	B/(GPa)	C	n	m	T_{melt}/(K)	T_{room}/(K)	c_V/[J/(kg·K)]
7.83	77	0.792	0.51	0.014	0.26	1.03	1 793	294	477

表 2 4340 钢的 Grüneisen 状态方程参数

Table 2 The 4340 steel parameters of Grüneisen state equation

c/(km/s)	S_1	S_2	S_3	γ_0	α
4.569	1.49	0	0	2.17	0.46

3 模拟结果

图 3 为模拟得到的 $\beta = 16°$、$v_d = 3\,600$ m/s 时不同时刻金属板之间斜碰撞的状态图像。从图 3 可以看出:随着时间的推移,界面波经历了从无到有、从产生到发展成为周期性稳定波形的过程;在碰撞接触初期,并没有产生射流粒子,随着界面波的衍生,射流粒子数量逐渐增多。

图 4 显示了爆炸焊接界面波的形成过程。图 4 中界面波的形貌为带有前后涡旋的波形,这与较高爆速情况下爆炸焊接的生产实际相符[10-11]。

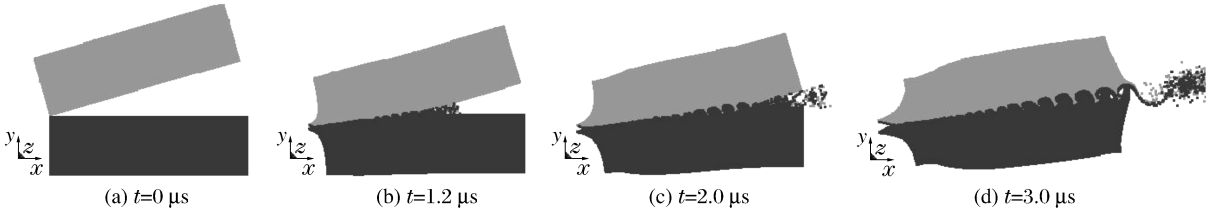


图 3 爆炸焊接斜碰撞过程模拟结果

Fig. 3 The simulation results of the oblique collision formation process

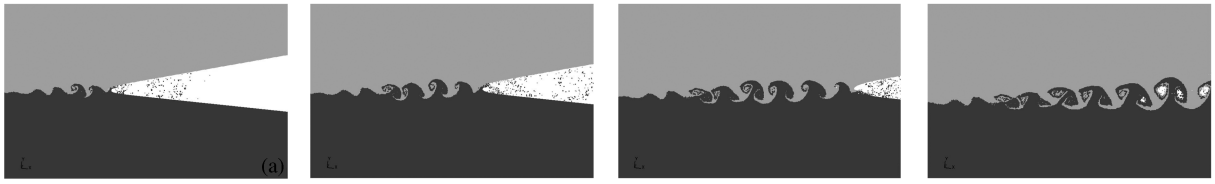


图 4 界面波形成过程模拟结果

Fig. 4 The simulation results of the interface wave formation process

根据图 3(d)可以得到金属射流的形貌和射流来源,如图 5 所示。通过对时间回放的控制,可以实现对射流粒子的追踪。从图 5 可以看出,金属射流较为分散,容易与空气接触,发生摩擦效应,这在一定层面上解释了实际生产中观察到的焊接过程中金属板间喷出发光雾状物质的焊接现象。此外,由图 5(b)可知,射流粒子来源于金属板的表层,其厚度约为板厚度的 1%,这与实际情况较为相近[12]。

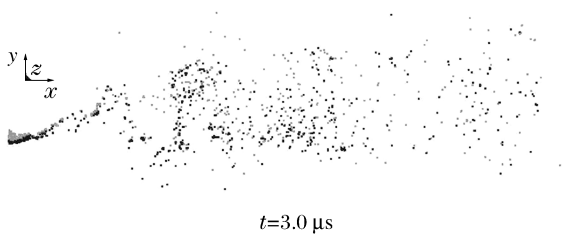


图 5(a) 金属射流形貌

Fig. 5(a) The pattern of the metal jet

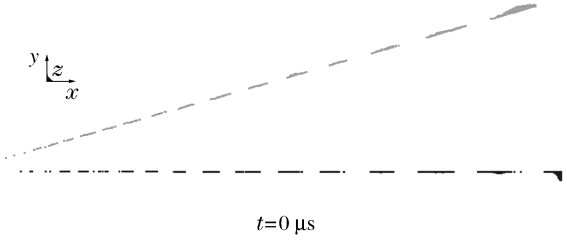


图 5(b) 金属射流来源

Fig. 5(b) The original location of the metal jet

4 结 论

借助动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA 11.0,建立了考虑材料强度的流体弹塑性力学模型,采用 SPH 方法,对爆炸焊接斜碰撞过程进行了数值模拟。模拟结果表明:借助 SPH 方法,可以实现界面波和射流等焊接现象的计算机模拟重现,这对难以观测的爆炸焊接形成过程以及爆炸焊接机理的相关研究有所帮助。

References:

[1] Akbari Mousavi A A, Al-Hassani S T S. Numerical and Experimental Studies of the Mechanism of the Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding [J]. J Mech Phys Solids, 2005, 53(11): 2501-2528.

[2] Wang H H. Study of Experiment and Numerical Simulation for Tube vs Plate Explosive Welding [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2009. (in Chinese)
王呼和. 管板爆炸焊接实验研究及数值模拟 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2009.

[3] Chen Z P. Numerical Analysis of Cladding Process of Monel Alloy/Cu Explosive Cladding Bar [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
陈忠平. Monel/Cu 爆炸复合棒的制备及复合过程数值模拟研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.

[4] Libersky L D, Petschek A G. High Strain Lagrangian Hydrodynamics: A Three-Dimensional SPH Code for Dynamic Material Response [J]. J Comput Phys, 1993, 109(1): 67-75.

[5] Liu G R, Liu M B. Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method [M]. Translated by Han X, Yang G, Qiang H F. Changsha: Hunan University Press, 2005: 295-297. (in Chinese)
Liu G R, Liu M B. 光滑粒子流体动力学——一种无网络粒子法 [M]. 韩 旭, 杨 刚, 强洪夫, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005: 295-297.

[6] Johnson G R, Cook W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures [J]. Eng Fract Mech, 1985, 21(1): 31-48.

[7] Shi D Y, Li Y C, Zhang S M. Dynamic Analysis Based on ANSYS/LS-DYNA 8.1 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 117-118. (in Chinese)
时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显示动力分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 117-118.

[8] LS-DYNA Keyword User's Manual [Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.

[9] LS-DYNA Theory Manual [Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2005.

[10] Wang B Q. Investigation on Bonding Interface of Explosive Welding Dissimilar Metal [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)
王保奇. 异种金属爆炸焊接结合界面的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005.

[11] Zhang D X, Li G H. An Experimental Relation between Interface Wave Form of Explosion Welding Mild Steel and Material Dimensionless Strength [J]. Explosion and Shock Waves, 1983, 3(2): 23-29. (in Chinese)
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.

[12] Shao B H, Zhang K. Principle and Practice of Explosive Welding [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1987: 188-189. (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: 188-189.

Numerical Simulation of the Oblique Collision in Explosive Welding

LI Xiao-Jie, MO Fei, YAN Hong-Hao, ZHANG Cheng-Jiao

(*State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian* 116023, *China*)

Abstract: Using the software of ANSYS/LS-DYNA 11.0 and the method of smoothed particle hydrodynamics (SPH), the formation process of the oblique collision in explosive welding was simulated, where the elastic-plastic hydrodynamic model with the material strength was used. The simulation results showed that the shapes of the interface wave and the metal jet were consistent with the practical phenomena of explosive welding. Therefore, it is valuable to research the formation process of the oblique collision in explosive welding with SPH method.

Key words: explosive welding; oblique collision; interface wave; SPH method; elastic-plastic hydrodynamic model; jet