文章编号：1000-5773(2010)05-0383-05

应用 SPH 方法对平板铅飞层对碰凸起动载行为的数值模拟研究*

袁 帅，胡海波，张崇玉，李 平

（中国工程物理研究院流体物理研究所，冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室，四川绵阳 621900）

摘要：采用光滑粒子流体动力学(SPH)方法，模拟研究了两点起爆圆柱炸药驱动组合飞层(铝＋铅)的动载行为，得到了爆轰波对碰区铅飞层类似射流状超前凸起的计算图像。模拟结果表明，对碰凸起呈现与实验结果相同的分层结构，且凸起头部具有散碎特征，根部相对密实。因此，SPH 方法能够较好地模拟铅这类低熔点、低强度金属在对碰区中出现的散碎等破坏现象。

关键词：光滑粒子流体动力学；组合飞层；对碰凸起；铅

中图分类号：O347 **文献标识码**：A

1 引 言

被誉为下一代数模技术的光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics，SPH)方法是近几十年来逐步发展起来的一种无网格方法[1-2]。其基本思想是将连续体用相互作用的物质点来描述，各个物质点上承载各种物理量，包括质量、速度等，通过求解质点组的动力学方程及跟踪每个质点的运动轨迹，求得整个系统的力学行为。由于物质点之间不存在网格关系，因此它避免了极度大变形时因网格扭曲而导致的计算异常终止等问题。同时，SPH 方法是一种纯 Lagrange 方法，能够避免 Euler 方法处理材料时网格间的流动问题，极大地减少了应用的限制，在高速侵彻[3]、爆炸冲击[4]、微喷射流[5]、两相流[6]等问题的数值模拟中得到了广泛应用。

在爆轰驱动研究中，常常会遇到两个爆轰波相互碰撞驱动飞层的情况。两个爆轰波碰撞后在很窄的区域内产生高压(约为炸药 CJ 压力的 2.3～2.4 倍[7])，该区域称为爆轰波对碰区。爆轰波对碰后驱动组合飞层，在相应的飞层对碰区内压力和温度急剧升高，可能会引起材料特殊的动力学响应，如表面喷射、变形失稳、断裂破坏等。对于爆轰波对碰驱动材料的动载行为，由于其独特的力学行为特征以及重要的工程应用背景，近年来逐渐引起研究人员的关注。

Sing 等人[8]、陈军等人[9]以及张崇玉等人[10-11]先后对爆轰波对碰驱动金属圆管的膨胀特性进行了实验研究。结果表明，在爆轰波对碰驱动金属圆管的对碰区内出现超前现象，且该部位壳体较邻近部位更易发生断裂。Zhiembetov 等人[12]用铅、铜、锡、铁等材料开展了对碰实验研究，发现采用铅、铜、锡这类低强度、低熔点金属进行实验时，对碰区突起部位会出现多孔断裂、崩溃以及材料的破碎和雾化等现象。Иванов 等人[13]采用 X 光照相技术对炸药对碰驱动平板铝飞层对碰区的行为特性进行了实验研究，获得了铝飞层对碰区凸起的形貌及其随时间变化的图像，并认为借助合适的材料模型和不断发展的

* **收稿日期**：2009-09-03；**修回日期**：2009-12-17

基金项目：冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金(9140C6713030706)

作者简介：袁 帅(1972－)，男，博士研究生，主要从事爆炸力学计算研究. E-mail：yscaep01@sina.com

计算机技术可以对此类现象进行量化描述。张崇玉等人[14]完成了铅飞层的对碰实验，采用高速光学照相和脉冲 X 光照相两种测试技术对平面铅飞层在爆轰波对碰驱动下的动载行为进行了观测，观察到了铅飞层对碰区中出现的多分层、散碎雾化的凸起结构特征，认为这除了与材料强度和冲击熔化有关外，可能还与对碰爆轰波剖面的结构细节有直接的对应关系。

本研究基于平板铅飞层的爆轰波对碰驱动实验模型，采用 SPH 法对爆轰波对碰驱动平面组合飞层实验进行数值模拟，以期获得爆轰波对碰区铅飞层类似射流状超前凸起的计算图像，验证 SPH 方法在模拟铅这类低熔点、低强度金属的对碰动载行为时的有效性。

2 实验模型

实验装置如图 1 所示，选用 PETN 炸药，尺寸为∅32 mm×22 mm，铅飞层和铝飞层的厚度均为 2.0 mm。在药柱柱面中间两点对称安装雷管，对炸药进行同时起爆。

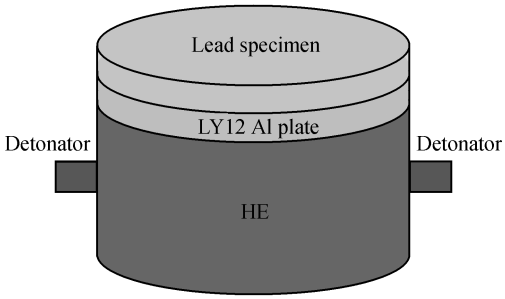


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

3 计算模型

计算模型和观测点示意图见图 2。炸药粒子的直径为 0.3 mm，飞层粒子的直径为 0.1 mm。在铅飞层自由面上设置 7 个观测点(1# 位于铅飞层的自由面中心，其它观测点相距 2.0 mm)，用于记录自由面的速度历史。

采用 SG 材料模型和 Grüneisen 状态方程模拟铝和铅飞层，采用程序燃烧法描述炸药爆轰波的传播，爆轰产物用 JWL 状态方程描述。

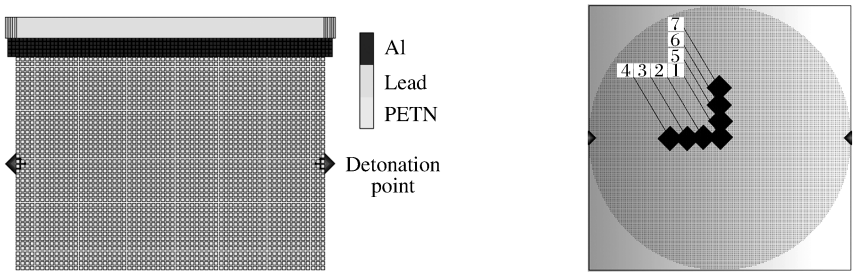


图 2 计算模型及观测点示意图

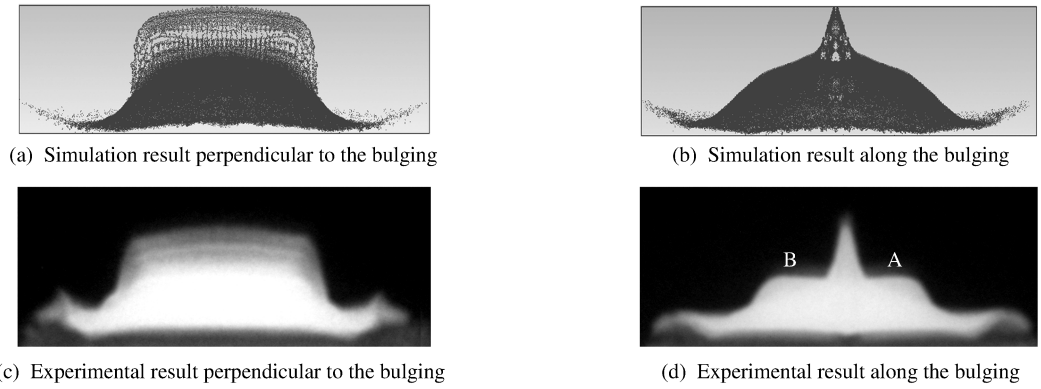
Fig. 2 Schematic of simulation setup

4 计算结果与分析

两点起爆后，形成两个散心爆轰波，向圆柱炸药的旋转轴传播。在起爆后 2.4 μs 两爆轰波对碰，对碰时轴上压力约为 36 GPa，对碰后沿旋转轴向两端传播。大约在 2.9 μs 时爆轰波在铝飞层处碰撞，此

时爆轰波与轴的夹角为 34.5°,爆轰波对碰后没有发生马赫反射,相对于炸药的 CJ 压力(30 GPa),爆轰压力增加了 6 GPa。飞层在爆轰波的直接作用下产生冲击波,碰撞时铝飞层中的冲击波波阵面与旋转轴的夹角约为 45.5°,而铅飞层中波阵面与旋转轴的夹角约为 73.3°。飞层在对碰区域内的受力状态非常复杂:首先是冲击波碰撞产生的高压作用,随后是从自由面和边侧传来的稀疏波作用,在此过程中铅飞层受到的冲击压缩时间相比受到的稀疏拉伸时间要短很多。由于铅的熔点和强度都较低,因此对碰区内铅飞层涉及的物理机制非常复杂,可能存在冲击熔化、卸载熔化以及破坏散碎等。本研究使用 SPH 方法就是要利用其易于处理材料破坏散碎的优点。

图 3 和图 4 给出了采用 SPH 方法模拟得到的 14.1 μs 和 23.7 μs 时铅飞层对碰区凸起的模拟图像和实验结果[14]。从图中可以看出:垂直于对碰凸起方向的计算结果与实验结果符合较好(外形相似),计算结果中铅飞层的凸起呈现分层结构,且凸起顶部粒子分布稀少,根部相对密实;沿对碰凸起方向的计算结果与实验结果在凸起高度上比较一致,但在凸起宽度上则存在差异,表现为计算结果中对碰凸起两侧没有像实验结果那样的平台,而是光滑的过渡,见图 3(d)和图 4(d)中的 A、B 区域,说明计算中使用的 SG 模型以及材料的熔化、成孔、断裂等机制对模拟结果的影响较大。

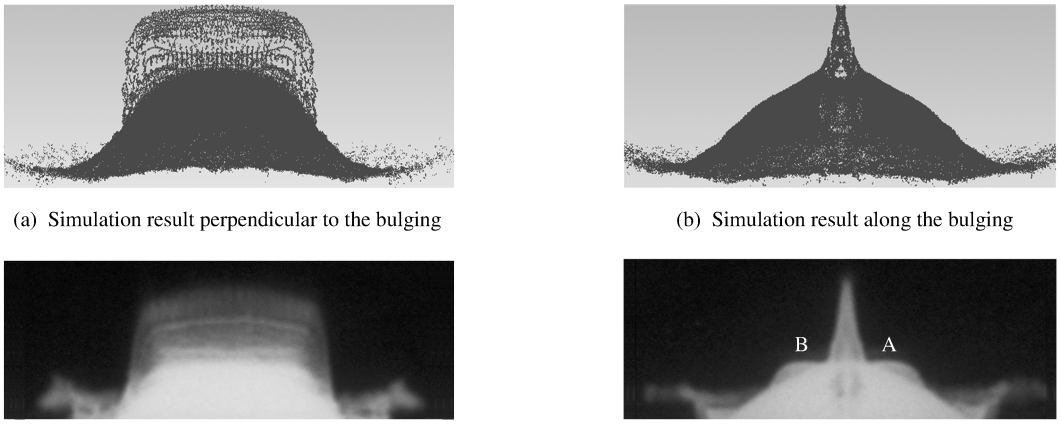


(a) Simulation result perpendicular to the bulging　(b) Simulation result along the bulging

(c) Experimental result perpendicular to the bulging　(d) Experimental result along the bulging

图 3　14.1 μs 时计算结果和实验结果的比较

Fig. 3　Comparison between experimental and simulation results at about 14.1 μs



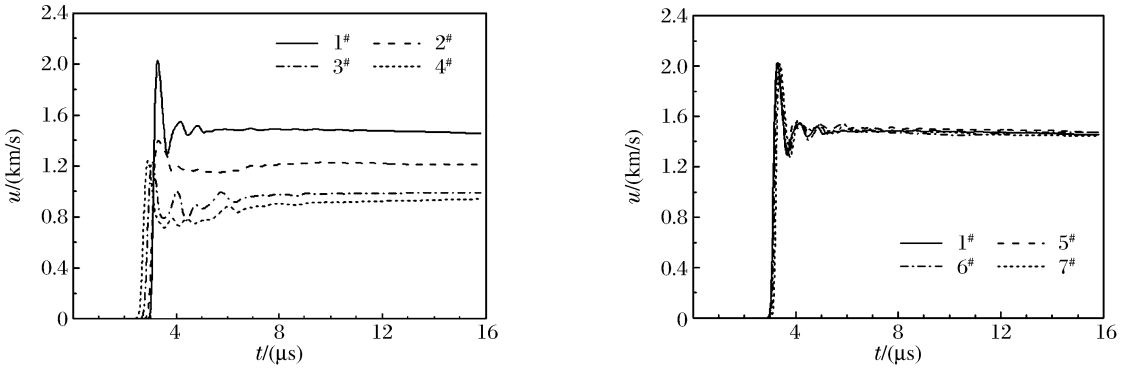
(a) Simulation result perpendicular to the bulging　(b) Simulation result along the bulging

(c) Experimental result perpendicular to the bulging　(d) Experimental result along the bulging

图 4　23.7 μs 时计算结果和实验结果的比较

Fig. 4　Comparison between experimental and simulation results at about 23.7 μs

图 5 给出了图 2 中 7 个观察点的速度历史。由图 5 可知:垂直于对碰方向上(观测点 1#、5#、6#和 7#),各观测点的速度-时间曲线几乎一致,粒子自由飞散时的速度为 1.5 km/s;沿对碰凸起方向(观测点 1#、2#、3#和 4#),距离对碰凸起越远,速度值越小,依次为 1.50、1.20、0.97 和 0.87 km/s。这与张崇玉等人[14]采用高速摄影照片得到的结果(凸起头部、中间夹层、凸起根部的平均速度分别为 1.55、1.27和 0.97 km/s)基本一致。



(a) Along the bulging (b) Perpendicular to the bulging

图 5 自由面速度历史

Fig. 5 The velocity-time histories of free surface

5 结 论

采用 SPH 方法,对爆轰波对碰驱动铅飞层进行了数值模拟,在不考虑材料熔化、成孔、断裂等破坏影响的情况下,得到了与实验结果较为一致的图像。分析发现:垂直于对碰方向上铅飞层的对碰凸起呈现与实验结果相同的分层结构,且凸起头部具有散碎特征,根部相对密实;沿对碰方向上,计算结果与实验结果在凸起高度上较为一致,但在凸起宽度上存在差异,即实验结果中对碰凸起两侧出现了 2 个平台,而计算结果却只是光滑的过渡,说明计算中使用的 SG 模型以及材料的熔化、成孔、断裂等机制对模拟结果有较大的影响。研究结果表明,SPH 方法能较好地模拟铅这类低熔点、低强度金属在对碰区中出现的散碎等破坏现象。

References:

[1] Zhang S C. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Method (A Review) [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1996, 13(4): 385-397. (in Chinese)
张锁春. 光滑质点流体动力学(SPH)方法(综述) [J]. 计算物理, 1996, 13(4): 385-397.

[2] Song S C, Cai H N. SPH Algorithm for Projectile Penetrating into Concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 56-60. (in Chinese)
宋顺成, 才鸿年. 弹丸侵彻混凝土的 SPH 算法 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 56-60.

[3] Zhang X, Song K Z, Lu M W. Research Progress and Application of Meshless Method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 20(6): 730-742. (in Chinese)
张 雄, 宋康祖, 陆明万. 无网格法研究进展及其应用 [J]. 计算力学学报, 2003, 20(6): 730-742.

[4] Pang M H, Sun R Y. Analysis of Blast off Phenomena in SPH Method [J]. Mechanical Research & Application, 2008, 21(2): 27-33. (in Chinese)
逄明华, 孙若尧. SPH 方法在冲击破坏中的爆炸现象分析 [J]. 机械研究与应用, 2008, 21(2): 27-33.

[5] Wang P, Qin C S, Zhang S D, et al. Simulated Microjet from Free Surface of Aluminum Using Smoothed Particle Hydrodynamics [J]. Chinese Journal of High Pressure Physic, 2004, 18(2): 149-156. (in Chinese)
王 裴, 秦承森, 张树道, 等. SPH 方法对金属表面微射流的数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2004, 18(2): 149-156.

[6] Han X, Yang G, Long S Y. Typical Application of SPH Method to Two-Phase Flow Problems [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2007, 34(1): 29-32. (in Chinese)
韩　旭,杨　刚,龙述尧. SPH 方法在两相流动问题中的典型应用 [J]. 湖南大学学报(自然科学版),2007,34(1):29-32.

[7] Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Applied Detonation Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 534-543. (in Chinese)
孙承纬,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京:国防工业出版社,2000:534-543.

[8] Singh M, Suneja H R, Bola M S, et al. Dynamic Tensile Deformation and Fracture of Metal Cylinders at High Strain Rates [J]. Int J Impact Eng, 2002, 27(9): 939-954.

[9] Chen J, Sun C W, Pu Z M, et al. Expansion of Metallic Tubes Driven by Detonation Product behind Two Head-on Colliding Detonation Waves [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(5): 442-447. (in Chinese)
陈　军,孙承纬,蒲正美,等. 爆轰波对碰区产物驱动金属圆管的研究 [J]. 爆炸与冲击,2003,23(5):442-447.

[10] Zhang C Y, Gu Y, Zhang S W, et al. Study on Expanding Characteristic of Steel Tube Driven by Two Head-on Colliding Detonation Waves [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(3): 222-226. (in Chinese)
张崇玉,谷　岩,张世文,等. 爆轰波对碰驱动下金属圆管膨胀变形特性研究 [J]. 爆炸与冲击,2005,25(3):222-226.

[11] Zhang C Y. The Experimental Study and Simulation on Expanding Characteristic of Metallic Cylinder Protected by Guard-Ring under Two Detonation Waves Collided [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005. (in Chinese)
张崇玉. 爆轰波对碰驱动下保护环对金属圆管保护的实验和数值模拟研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2005.

[12] Zhiembetov A K, Mikhaylov A L, Smirnov G S. Experimental Study of Explosive Fragmentation of Metals Melts [J]. AIP Conference Proceedings, 2002, 520: 547-550.

[13] Иванов А Г, Новиков С А. Сотлкиновеие Детонационных Волн На Поверхности Материала [J]. Физика Горения и Взрыва, 1976.

[14] Zhang C Y, Hu H B, Li Q Z, et al. Experimental Study on Dynamic Behavior of Lead Plate Driven by Two Head-on Colliding Detonation Waves [J]. Chinese Journal of High Pressure Physic, 2009, 23(4): 283-287. (in Chinese)
张崇玉,胡海波,李庆忠,等. 爆轰波对碰驱动下平面铅飞层对碰区动载行为实验研究 [J]. 高压物理学报,2009,23(4):283-287.

Simulation on Head-on Bulging Dynamic Behavior of Lead Flyer with SPH Method

YUAN Shuai, HU Hai-Bo, ZHANG Chong-Yu, LI Ping

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, the dynamic behavior of assembly flyers (Al+Pb) driven by cylindrical explosive ignited at two opposite points of the surface was simulated numerically. The calculated images for the generation and evolvement of jet-like bulge of lead sample at collision zone were obtained. The bulge emerges multi-layer structures observed in the simulated graphs, which consist of scatter fragments in the head and relatively condense structure in the rear, are in agreement with the experimental results. Accordingly, the SPH method can well deal with the failure of the metals with low melting point and low strength in the counter strike region, such as lead.

Key words: smoothed particle hydrodynamics (SPH); assembled plates; bulging of collision; lead