

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.04.006

SPH 方法在圆柱型装药与钢板接触爆炸分析中的应用*

蒋振华^{①②} 龙 源^① 刘健峰^① 周 辉^① 路 亮^①

①解放军理工大学野战工程学院(江苏南京,210007)

②中国人民解放军 92057 部队(广东湛江,524000)

[摘 要] 基于显式动力分析软件 LS-DYNA,利用 SPH 方法对圆柱型装药爆炸问题进行了数值模拟,计算结果表明 SPH 方法可以准确模拟炸药爆轰及产物膨胀飞散过程。在此基础上建立了圆柱型装药与钢板接触爆炸的三维数值计算模型,分析了接触爆炸荷载作用下钢板的动力响应问题,模拟结果直观显示了接触爆炸作用下钢板发生层裂和穿孔破坏的过程;进行了等比例圆柱型装药与钢板接触爆炸试验,数值计算结果与试验结果符合较好,说明 SPH 方法可以准确描述爆炸作用下结构的动力响应。

[关键词] SPH 方法;爆轰;接触爆炸;数值模拟

[分类号] O383

引言

SPH(smoothed particle hydrodynamics)全称光滑粒子流体动力学方法,是一种特殊的无网格粒子方法,最初被应用于天体物理学领域^[1]。随后该方法被引入到水下爆炸问题的研究,开始了其在爆炸领域的应用^[2-4]。Liu 等^[5]对 SPH 方法及其衍生方法作了全面介绍;强洪夫等^[6]利用 SPH 方法成功进行了三维 TNT 聚能装药爆轰过程数值试验;Kobashi 等^[7]运用 SPH 方法对爆炸作用下结构的动态响应进行了研究。但目前,有关 SPH 方法对圆柱型装药与钢板接触爆炸方面的研究较少。

本文应用 SPH 方法,对炸药爆轰和接触爆炸作用下钢板的动力响应问题进行了三维数值模拟,并设计了等比例圆柱型装药与钢板接触爆炸试验。

1 SPH 方法的基本方程

在 SPH 方法中,设任意宏观变量(如压力、密度、温度等) $f(r)$, r 为位置矢量,则在计算域 Ω 中, $f(r)$ 的核估计可以表示为:

$$\langle f(r) \rangle = \int_{\Omega} f(r') W(r-r', h) dr'. \quad (1)$$

式中: $W(r-r', h)$ 称为核函数; h 为定义核函数影响区域的光滑长度。

核函数应满足 3 个条件:

1) $\int_{\Omega} f(r) W(r-r', h) dr' = 1$, 正则化条件,即在

计算域 Ω 内,核函数的积分值为 1,也称为归一化条件;

2) 当 h 趋向于零时, W 将成为 Dirac delta 函数, $\lim_{h \rightarrow 0} W(r, h) = \delta(r)$;

3) 紧支性条件, W 只在其支持域内有非负值,在支持域外为零。

由式(1)可求得函数 $f(r)$ 的梯度 $\nabla f(r)$ 的核估计,将 $f(r)$ 代之以 $\nabla f(r)$,得到:

$$\langle \nabla f(r) \rangle = \int_{\Omega} \nabla f(r') W(r-r', h) dr'. \quad (2)$$

将式(2)写成求和形式,则有:

$$\langle \nabla f(r) \rangle = \sum_{j=1}^N m_j f_j \nabla W_{ij} / \rho_j. \quad (3)$$

式中: N 为紧支域内的粒子总数; m_j 为粒子 j 的质量; f_j 为待求参数; ρ_j 为粒子 j 的密度; W_{ij} 为核函数。

连续介质力学中的质量、动量及能量守恒方程经 SPH 方法离散后可表示为:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\beta - v_j^\beta) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}; \quad (4)$$

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}; \quad (5)$$

$$\frac{de_i}{dt} = \frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} \sum_{j=1}^N m_j (v_j^\alpha - v_i^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta}. \quad (6)$$

式(4)~式(6)中: v^α 、 v^β 为粒子速度矢量分量; α 、 β 表示空间坐标轴方向。

* 收稿日期:2013-12-14

作者简介:蒋振华(1984~),男,硕士研究生,研究方向为爆炸与毁伤作用机理研究及其应用。E-mail:939992458@qq.com

通信作者:龙源(1958~),男,博导,教授,研究方向为爆破器材应用技术。E-mail:long_yuan@sohu.com

2 圆柱型装药爆轰的三维 SPH 方法数值分析

2.1 计算模型

计算模型如图 1 所示,圆柱型装药底面直径为 3cm,高 7cm,共离散成 2240 个粒子。装药为 TNT 炸药,采用高能炸药材料模型,其爆轰产物的膨胀采用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程^[8] 进行描述,该方程的参数可以由试验方法确定。TNT 炸药材料参数见文献[6]。

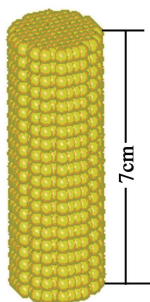
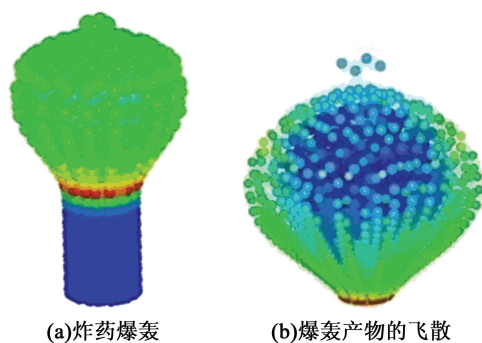


图 1 炸药模型

Fig.1 Model of the charge

2.2 数值模拟结果与分析

装药被引爆后,爆轰波沿药柱传播,冲击压缩炸药各组分,使其发生化学反应,释放爆轰产物。高温高压的爆轰产物迅速向周围膨胀飞散,对周围介质做功。由图 2 可以看出,圆柱型装药一端起爆时,在装药内部形成一近似平面的爆轰波,爆轰波所到之处压力急剧上升,伴随着爆轰产物的膨胀,压力又迅速衰减。爆轰产物不仅沿轴向飞散,也存在径向飞散,与瞬时爆轰理论不同,具有显著的端部效应。图 3 为装药轴向爆轰压力的三次多项式拟合曲线,随着爆轰波的传播,装药轴向不同位置处爆轰压力逐渐增大,最终趋近于 21GPa。由经典爆轰理论得到的 C-J 压力为 19.69GPa,文献[9]中给出的由试验方法测得的 C-J 压力为 21GPa,模拟值与试验值非常接近,说明上述材料参数的选取较为合理,SPH 方法可以准确模拟炸药爆轰及产物膨胀飞散过程。



(a)炸药爆轰

(b)爆轰产物的飞散

图 2 爆轰现象模型

Fig.2 Model of detonation

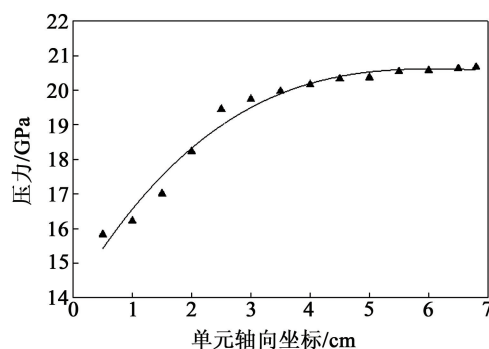


图 3 爆轰压力增长曲线

Fig.3 Curve of detonation pressure at different distances

3 接触爆炸作用下钢板层裂和穿孔破坏的数值分析

3.1 计算模型

如图 4 所示,圆柱型装药位于钢板中心接触爆炸,钢板平置,四边不受外界约束。炸药模型与上述算例相同。钢板采用 Q235 钢,尺寸为 20 cm × 20 cm × 1 cm。材料本构选用 Johnson-cook 本构模型^[10],参数有: A 为 366 GPa、 B 为 510 GPa、 C 为 0.014、 m 为 1.03、 n 为 0.26,物态变化选用 Grüneisen 状态方程来描述。

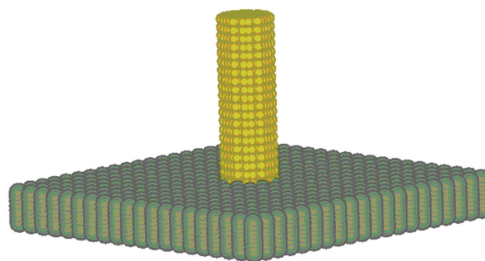


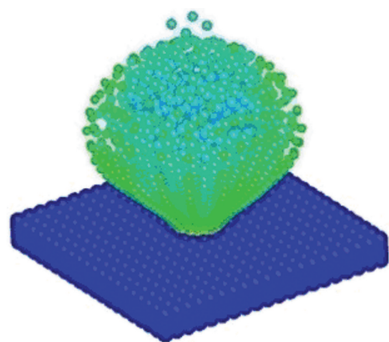
图 4 接触爆炸计算模型

Fig.4 Calculating model of contact explosion

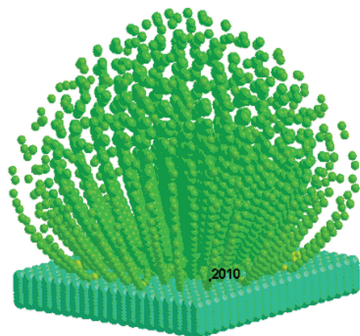
3.2 数值模拟结果与分析

接触爆炸可近似看作装药在半无限空间爆炸。一方面,爆轰产物的飞散受到接触构件的限制;另一方面,接触构件也受到爆轰产物的冲击作用。由图 5 可知,装药起爆后,爆轰产物向外膨胀飞散,遇钢板后发生反射回弹,钢板表面受到爆炸产物作用,压力升高。图 6 是粒子 No. 2010 的压力时程曲线,当爆轰波传播到该粒子时,粒子压力升高,随着爆轰产物的飞散,其压力又迅速下降。当爆轰产物飞散遇钢板受阻时,大量爆轰产物积聚在钢板表面附近,粒子压力再次升高。最终因产物的膨胀飞散以及钢板受爆轰产物作用发生位移,粒子压力下降。在 SPH 方法中,计算域内物质的所有信息都记录在各个粒子上,当粒子的运动超出计算域时,粒子将不再参与计算,并保存原有信息不变。

炸药爆轰对钢板产生强烈冲击作用,在钢板中



(a) 接触爆炸起初



(b) 爆炸产物遇钢板反射回弹

图 5 接触爆炸模型

Fig. 5 Model of contact explosion

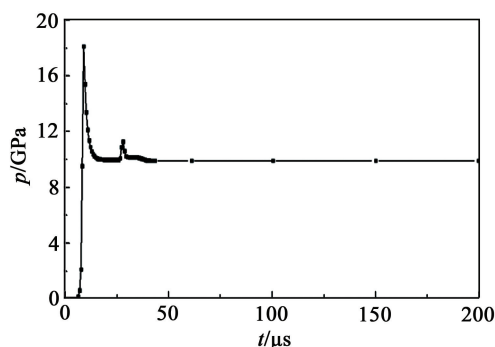


图 6 粒子 No. 2010 的压力时程曲线

Fig. 6 History of pressure of the No. 2010 particle

产生压力脉冲形式的应力波。应力波传播到钢板背面时发生反射,反射波与入射波相互作用,在钢板中产生拉应力区。当拉应力达到一定强度并持续作用一段时间,钢板背面成层地断裂,出现层裂现象。图 7 表示不同时刻钢板发生层裂破坏的情况。从图中可以看到,钢板发生两次层裂破坏,且第一次层裂破片飞散速度大于第二次层裂破片飞散速度。图 8 表示钢板发生凹坑和穿孔的情况。在爆炸产物气流作用下,钢板内部的应力超过其强度极限,钢板发生凹坑和穿孔破坏,凹坑形状与装药形状有关。本算例采用圆柱型装药,凹坑直径与装药直径大致相等。由于钢板四边不受外界约束,在爆炸产物气流驱动作用下钢板被整体抛射,在运动过程中,钢板发生翘曲变形。需要指出的是,为了节省计算机时,模型粒

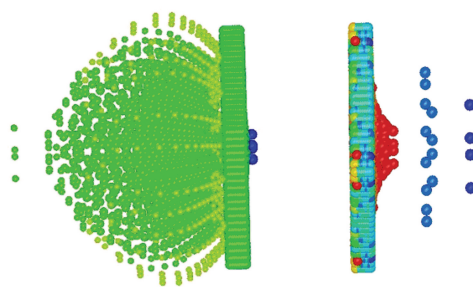
(a) 26.060 μ s(b) 86.617 μ s

图 7 钢板层裂破坏

Fig. 7 Spallation of steel plate

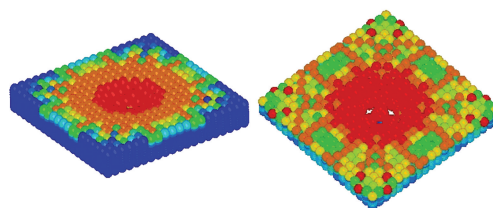
(a) 26.795 μ s(b) 86.617 μ s

图 8 钢板的凹坑和穿孔破坏

Fig. 8 Pit and punching in the steel plate

子划分较少,模拟中粒子大小未能反映破片的真实尺寸。

4 试验验证

为检验数值模拟的可靠性,设计了等比例圆柱型装药与钢板接触爆炸试验。试验设置如图 9 所示,钢板选用 Q235 钢,板厚 1 cm,炸药为军用制式 75 g TNT 药柱,直径 3 cm,高 7 cm,用瞬发电雷管引爆。图 10(a)为钢板在圆柱型装药接触爆炸作用下的凹坑现象,凹坑为圆形,直径 R_1 为 3 cm,与药柱底面直径相同,这与数值模拟结果是一致的。图 10(b)是钢板背面的层裂和穿孔现象,从图中可以看到层裂区直径 R_2 为 3.8 cm,穿孔直径 R_3 为 2.0 cm。图 10(c)为钢板穿孔后形成的翻唇,由于装药为圆柱型装药,翻唇呈圆形对称分布,该图与图 7(b)符合较好,表明 SPH 方法非常适合处理大变形问题。

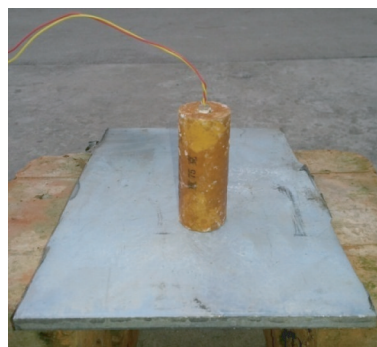
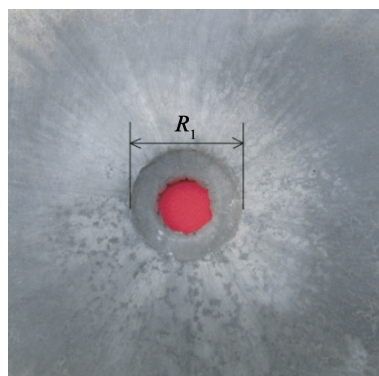
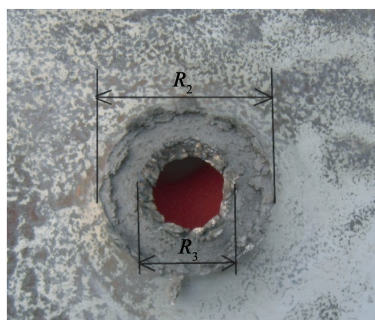


图 9 试验布置

Fig. 9 Experimental arrangement



(a) 钢板正面凹坑



(b) 钢板背面层裂与穿孔



(c) 穿孔翻唇

图 10 试验结果

Fig. 10 Test results

5 结论

1) 本文应用 SPH 方法成功模拟了圆柱型装药爆轰及爆轰产物的飞散过程,与瞬时爆轰理论不同,爆轰产物的飞散具有显著的端部效应。

2) 对圆柱型装药与钢板接触爆炸的数值模拟,直观显示了钢板在接触爆炸作用下发生层裂、翘曲变形、穿孔破坏等动力响应,为研究钢质板状构件在爆炸作用下的损伤破坏规律积累了经验。

3) 等比例试验结果表明:数值计算结果与试验现象吻合较好,SPH 方法可以准确描述爆炸作用下结构的动力响应,为研究炸药爆炸及其作用规律提供了一种十分有效的方法。

参 考 文 献

- [1] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. Astronomical Journal, 1977, 82(12): 1013-1024.
- [2] Swegle J W, Attaway S W. On the feasibility of using smoothed particle hydrodynamics for underwater explosion calculations [J]. Computational Mechanics, 1995, 17: 151-168.
- [3] 明付仁, 张阿漫, 杨文山. 近自由面水下爆炸冲击载荷特性三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(5): 508-514.
- Ming Furen, Zhang Aman, Yang Wenshan. Three-dimensional simulations on explosive load characteristics of underwater explosion near free surface[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(5): 508-514.
- [4] 杨文山, 孟晓宇, 王祖华. SPH 方法模拟水下爆炸研究进展[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(12): 3-6, 14.
- Yang Wenshan, Meng Xiaoyu, Wang Zuhua. Review of applied researches in warship underwater explosion[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(12): 3-6, 14.
- [5] 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, 杨刚, 强洪夫, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005.
- [6] 强洪夫, 王坤鹏, 高巍然. 基于完全变光滑长度 SPH 方法的高能炸药爆轰过程数值试验[J]. 含能材料, 2009, 17(1): 27-31.
- Qiang Hongfu, Wang Kunpeng, Gao Weiran. Numerical simulation of high explosive detonation process using SPH method with fully variable smoothing lengths[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(1): 27-31.
- [7] Kobashi W, Matsuo A, Murata K, et al. Explosion simulation including a coupled fluid-structure interaction problem using smoothed particle hydrodynamics [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Nevada, 2006.
- [8] 成凤生, 宋浦, 顾晓辉, 等. TNT 装药爆炸波在刚性平面上方传播反射的数值研究[J]. 爆破器材, 2011, 40(4): 1-4.
- Chen Fengsheng, Song Pu, Gu Xiaohui, et al. Numerical investigation into the propagation and the flection of TNT blast ware about rigid plane [J]. Explosive Materials, 2011, 40(4): 1-4.
- [9] 张守中. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993: 1-400.
- [10] 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.

(下转第 31 页)

- [R]. California: Naval Postgraduate School, AD-A009988, 1975.
- [6] 李亚智, 陈钢. 充液箱体受弹丸撞击下动态响应的数值模拟[J]. 机械强度, 2007, 29(1):143-147.
Li Yazhi, Chen Gang. Numerical simulation of liquid-filled tank response to projectile impact [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(1):143-147.
- [7] Varas D, López-Puente J, Zaera R. Experimental analysis of fluid-filled aluminium tubes subjected to high-velocity impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009(36):81-91.
- [8] Varas D, Zaera R, López-Puente J. Experimental study of CFRP fluid-filled tubes subjected to high-velocity impact [J]. Composite Structures, 2011 (93): 2598-2609.
- [9] Lecysyn N, Bony-Dandrieux A, Aprin L. Experimental study of hydraulic ram effects on a liquid storage tank: Analysis of overpressure and cavitation induced by a high-speed projectile [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010(178):635-643.
- [10] Chen L, Song B F, Pei Y. Simulation aynalsis of hydrodynamic ram phenomenon in composite fuel tank to fragment impact [C]// 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2011.
- [11] Sauer M. Simulation of high velocity impact in fluid-filled containers using finite elements with adaptive coupling to smoothed particle hydrodynamics [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011 (38):511-520.
- [12] Varas D, López-Puente J, Zaera R. Numerical modelling of partially filled aircraft fuel tanks submitted to Hydrodynamic ram [J]. Aerospace Science and Technology, 2012(16): 19-28.
- [13] Disimile P J, Swanson L A, Toy N. The hydrodynamic ram pressure generated by spherical projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009(36): 821-829.

Numerical Simulation Study on Hydrodynamic Ram Due to the Penetration of Fuel Tank by High Energy Fragments

YANG Yanshi^①, XIAO Zhihua^②, LI Xiangdong^①

^①School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

^②No. 9631 Factory (Hu'nan Zhuzhou, 412007)

[ABSTRACT] Numerical simulation was employed in the study of hydrodynamic ram formed during the penetration of fuel tank by single or multiple fragments to understand the damage mechanism of fuel tank impacted by high-energy fragments. It was then used to analysis the tank distortion brought in by changes in impacting velocity and the distance between the impacting points. The results show that the distortion height of the fuel tank will increase by 4.3% with the increase of impacting velocity by 100 m/s for single fragment penetration; the distortion of the fuel tank will increase with the decreased distance between the impacting points for multiple fragments penetration at a constant impacting velocity of 1400 m/s and reach to the maximum when the distance between the impacting points is 8.3 times the diameter of fragment.

[KEY WORDS] damage mechanism; hydrodynamic ram; fuel tank; numerical simulation

(上接第 25 页)

Application of SPH Method in the Analysis of Cylinder Charge and Steel Plate Contact Explosion

JIANG Zhenhua^{①②}, LONG Yuan^①, LIU Jianfeng^①, ZHOU Hui^①, LU Liang^①

^①College of Field Engineering, PLA University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

^②92057 PLA Troops (Guangdong Zhanjiang, 524000)

[ABSTRACT] Based on the finite element analysis software LS-DYNA, the detonation of cylinder charge was analyzed by the SPH method. The simulation results show that the SPH method could simulate the process of detonation and the process of dispersion of the detonation products efficiently. The 3D model of the cylinder charge and the steel plate in contact with the explosive load was set up, and the dynamic response of the steel plate was analyzed. The results show the destruction process of the slabbing and the punching of the steel plate explicitly. Same-sized experiment of the steel plate under the contact explosion load was performed. The results of the simulation and the experiment data are in good agreement, indicating that the SPH method can accurately describe the explosion and the dynamic responses of the structure under the explosion load.

[KEY WORDS] SPH method; detonation; contact explosion; numerical simulation