文章编号：1000-5773(2009)02-0111-06

内部爆炸载荷作用下混凝土动力响应的数值模拟*

冷冰林[1,2]，许金余[1,3]，孙惠香[1]，徐 杰[4]

（1. 空军工程大学工程学院，陕西西安 710038；
2. 95080 部队，广东汕头 515823；
3. 西北工业大学，陕西西安 710000；
4. 95538 部队，四川新津 611430）

摘要：目前，采用实验方法对爆炸载荷破坏效应进行全面、准确描述仍是一个难题。运用 ANSYS/LS-DYNA 非线性显式动力学有限元程序，采用流固耦合算法，对混凝土在内部爆炸载荷作用下的空腔形成和发展规律等动力响应问题进行了数值模拟。通过实际算例，比较研究了混凝土敷设钢板与否对成坑大小、损伤区、压力云图以及应力时程曲线等的影响，进一步研究了有钢板加固时混凝土在爆炸荷载作用下的破坏机理。研究表明：采用流固耦合算法可以避免由于物质的大变形引起的单元畸变和网格消蚀等问题，提高了计算效率；很好地模拟了混凝土内部爆炸时，中心爆炸空腔压缩面和自由面的拉伸层裂破坏过程，且与理论计算值吻合较好；通过表面敷设钢板，可以减小混凝土的拉应力峰值，抑制混凝土中裂纹的发展，从而提高其防震塌能力以及结构的完整性。

关键词：爆炸；混凝土；数值模拟；有限元；爆炸空腔
中图分类号：O383.2 **文献标识码**：A

1 引 言

关于爆炸的研究一直是一个很活跃的领域，随着高毁伤武器技术的发展，常规武器在爆炸作用条件下对混凝土防护结构的接触爆炸毁伤破坏效应研究已经成为热点。2003 年，美国应用研究合作公司的研究人员对恐怖分子使用炸弹爆炸时产生的冲击波和破片造成附近建筑物和人员的严重灾害进行了一系列实验研究[1]。2006 年，印度的 A. K. Pandey 和 Ram Kumar 等进行了爆炸载荷作用下钢筋混凝土容器结构中的非线性响应问题进行了分析，给出了不同装药量条件下对钢筋混凝土容器壳体最小临界作用距离[2]。新加坡南洋理工大学的 K. Xu 和 Y. Lu[3] 对不同当量爆炸载荷作用下的钢筋混凝土板层裂现象进行了数值模拟，给出了不同层裂条件下的层裂准则。然而，目前关于钢板加固混凝土在爆炸荷载作用下的破坏机理研究还并不成熟。

由于整个爆炸过程时间极短，实验研究很难对整个过程进行全面地、准确地分析。而且炸药爆炸反应的高温、高压等复杂因素的影响，爆炸效应也很复杂。爆炸将产生持续时间很短而且峰值很高的脉冲荷载。当其沿着结构向内传播遇到结构的自由内表面时，会产生拉伸波，拉伸波与压缩波发生相互作用，当合成后的拉应力大于结构的临界抗拉强度时，混凝土结构的内表面就会发生层裂或震塌，严重地

* **收稿日期**：2008-02-26；**修回日期**：2008-06-20
基金项目：国家自然科学基金(10372084)
作者简介：冷冰林(1984－)，男，硕士研究生，主要从事防护工程研究. E-mail：mrcold19843112002@yahoo.com.cn
通讯作者：许金余(1963－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事结构工程和防护工程研究. E-mail：jinyuxu@263.net

危及结构的安全性能。本研究利用非线性显式动力学有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 对混凝土在爆炸荷载作用下的破坏效应、整体变形特征进行研究。对比分析了有无钢板加固时混凝土中的应力变化等情况，进一步研究了混凝土钢板组合结构的破坏机理，并分析了混凝土钢板组合结构在爆炸荷载作用下的受力行为和破坏形态。为改进防护结构设计方法及促进防护技术发展提供参考依据。

2 材料模型

2.1 炸药模型

炸药单元选用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型，用 JWL 状态方程描述爆轰过程中压力、内能和相对体积的关系，该方程形式如下[4]

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V} \tag{1}$$

式中：p 为爆轰产物的压力，V 为相对体积，E 为单位体积炸药内能，A、B、R_1、R_2、ω 为 JWL 状态方程的参数。对于 TNT 炸药，$A=371$ GPa，$B=7.43$ GPa，$R_1=4.15$，$R_2=0.95$，$\omega=0.3$，$E=7.0$ GPa。材料参数见文献[5]。

2.2 混凝土模型

混凝土靶采用 Johnson-Holmquist-Concrete 累积损伤材料模型[6]。该模型考虑了高压、高应变率以及损伤效应，其中等效强度表示为压力、应变率以及损伤程度的函数；压力则表示为体积应变的函数，其体积应变包括了永久性损伤效应；累积损伤表示为塑性体积应变、等效塑性应变和压力的函数。归一化等效应力 σ^* 定义为

$$\sigma^*=[A(1-D)+Bp^{*N}](1-c\ln\varepsilon^*) \tag{2}$$

式中：A 为归一化内聚强度；D 为损伤系数($0\leqslant D\leqslant 1$)；B 为归一化压力硬化系数；$p^*=p/f'_c$ 为归一化压力，其中 p 为实际压力，f'_c 为混凝土准静态单轴压缩强度；N 为压力硬化指数；c 为应变率系数；$\varepsilon^*=\varepsilon/\varepsilon_0$ 为无量纲的应变率，其中 ε 为实际应变率，ε_0 为参考应变率。

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon_p+\Delta\mu_p}{D_1(p^*+T^*)^{D_2}} \tag{3}$$

式中：$\Delta\varepsilon_p$ 为等效塑性应变增量；$\Delta\mu_p$ 为塑性体积应变增量；D_1 和 D_2 为材料常数；$T^*=T/f'_c$，其中 T 为混凝土最大抗拉强度。模型的状态方程根据加载和卸载两种情况分为 3 个区域：线弹性区域、塑性过渡区及完全密实材料区。材料参数见文献[7]。

2.3 钢板模型

钢板采用 MAT-STINBERG 材料模型来描述材料在大变形、高应变率和高温条件下的本构关系，其屈服强度是温度和压力等的函数。材料参数见文献[8]。

3 计算模型

混凝土靶体为 80 cm×80 cm×80 cm 的立方体；炸药为 10 cm×10 cm×10 cm 的立方体，位于混凝土靶的中心，其质量为 1.63 kg，采用中心起爆；敷设于混凝土表面的钢板厚度为 2 cm。考虑到问题的对称性，为了节约计算机时，只建立 1/8 对称模型。另外，为了避免 Lagrange 单元网格形状畸变可能导致的计算中断问题，将混凝土靶体和炸药划分为 Euler 网格，采用多物质 ALE 方法进行计算，钢板划分为 Lagrange 网格。采用单点积分和沙漏控制以更好地反映大变形和材料失效等非线性问题[9]。钢板与炸药及混凝土之间采用流固耦合算法，通过关键字 * CONTRAINED_LAGRANGE 定义流固耦合，耦合方式采用罚函数的方法。用关键字 * CONTROL_ALE 来控制流固耦合时的相关参数设置。图 1 为数值模型的网格划分图，其中 2 个对称面均施加法向的位移约束条件，另外 2 个侧面为无反射边界，上下底面为自由边界。根据实验的测量数据，混凝土中爆炸空腔的形成及扩展过程持续时间一般在 1.0 ms左右，故此模型的求解时间设置为 2.0 ms，这样可以清楚地看到爆炸扩腔的整个过程。

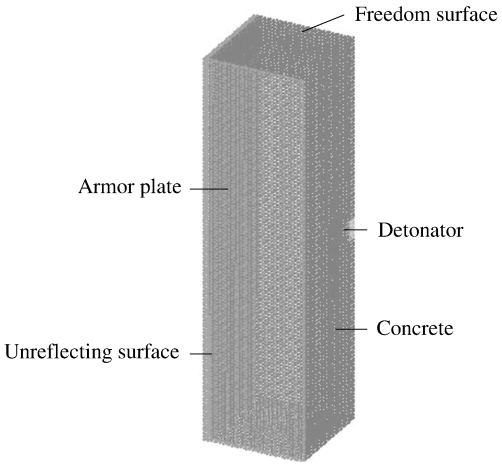

图 1　数值模型

Fig. 1　Numerical model

4　计算结果与分析

4.1　不同时刻压力波的传播过程

炸药爆炸后,瞬间形成的空腔里面充满了高温高压爆炸气体。炸药的整个爆轰过程仅仅持续了大约 10 μs,爆轰结束时,空腔的压力还很高。图 2 和图 3 是爆炸荷载作用下有无钢板加固时混凝土的空腔形成过程。爆轰结束后,有无钢板加固对压碎圈大小没有明显影响,其压碎圈的半径分别约为 27.3 cm和 26.9 cm,比经验公式[10]计算值(25.6 cm)稍大。从图中可以看出,由于高温高压气体的作用,空腔中的压力波开始以近似于球对称的形式向四周扩张,同时空腔以球对称的形式向四周迅速扩张,随后由于柱面波的影响,压力波不是球面波,而是两者兼有。当离爆心位置较近时,爆炸冲击波荷载幅值非常大,会激发起足够强的应力波,直接导致混凝土材料破坏;当离爆心位置较远时,混凝土的变形和破坏则是由入射波与反射波共同作用的结果。

从图 2、图 3 中还可以看出:有无钢板加固对于混凝土的成坑大小没有多大的影响,但是有钢板加固的混凝土爆炸形成的裂缝较无钢板加固时的混凝土少,而且裂缝宽度要小很多。这是因为在爆炸过

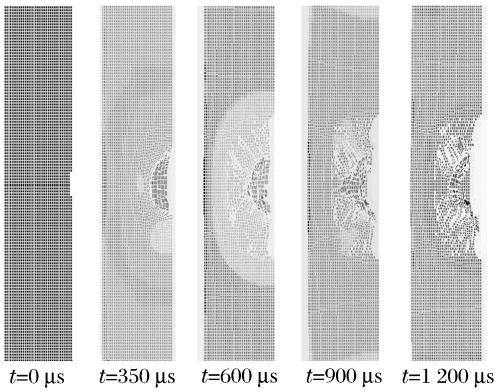

图 2　有钢板加固时混凝土的爆腔形成过程及压力云图

Fig. 2　Development of explosion cavity and pressure contours in the concrete with steel plate reinforcement

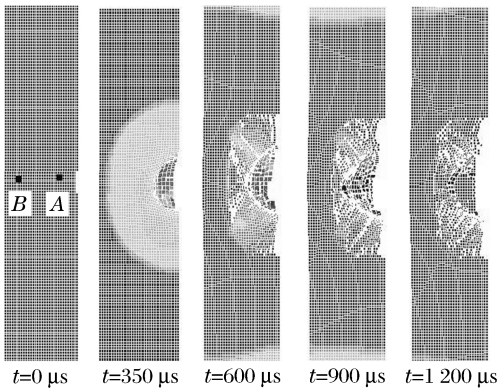

图 3　无钢板加固时混凝土的爆腔形成过程及压力云图

Fig. 3　Development of explosion cavity and pressure contours in the concrete without steel plate reinforcement

程中，钢板提供给混凝土一个横向约束力，这个约束力限制了裂缝的发展，而且钢板还能够吸收一部分爆炸产生的能量。离爆心越近，其压力值越大。压力值在很短的时间内开始出现衰减，当 $t=168\ \mu s$ 时，爆炸中心的压力值骤减到 2.5 GPa；$t=200\ \mu s$ 时，压力值减小到 0.98 GPa；随后一直衰减到零。

图 4 为压力峰值沿 x 轴的衰减曲线，其中的经验公式参见文献[11]。从图中可以看出，压力峰值的衰减速度沿 x 轴是不同的。其中，离爆心越近，压力峰值越大，但衰减的速度也越快。有无钢板加固对压力峰值的影响不大，当 $x<20$ cm 时，无钢板时的压力峰值略大于有钢板时的压力峰值；当 $x\geqslant 20$ cm 时，有钢板的压力峰值略大于无钢板加固时的压力峰值。经验公式计算的曲线与两条曲线都可以较好地吻合，当 $x<10$ cm 时，与无钢板加固时的压力峰值几乎重合。

图 5 为离爆心 x 方向距离 15 cm 处结点的压力时程曲线。从图中不难看出，整个爆炸的过程相当短。第 1 个峰值是由于炸药的爆轰所引起的，随后压力的降低是由空腔体积的扩大和温度的降低所引起的。但压力并没有随时间逐渐变小，而是出现了一个较小的峰值，这个现象在整个爆轰形成的空腔里面均会出现。这是因为：在爆轰过程中，混凝土碎块会朝远离炸药的方向飞溅并形成负压，当碎块达到最大位移的时候，碎块才停止并积累了部分势能；由于势能的作用，被压缩的混凝土碎块会朝着爆心的方向反弹回去，这样爆轰所形成的空腔体积便会减小，压力随之增大，出现第 2 个峰值。这种过程会反复进行，但压力会由于阻尼作用和塑性变形造成的能量损失而衰减。从图 5 可以看出，这个衰减过程进行得相当快，第 2 个波峰值只有第 1 个波峰值的 40%，第 3 个波峰值仅为第 1 个波峰值的 8%。

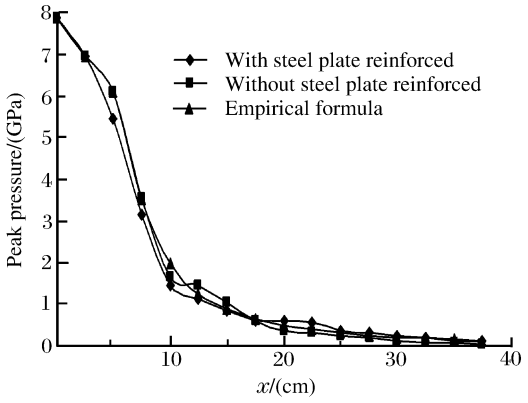

图 4 压力峰值沿 x 轴的衰减曲线

Fig. 4 Curves of peak pressure with distance along x-axis

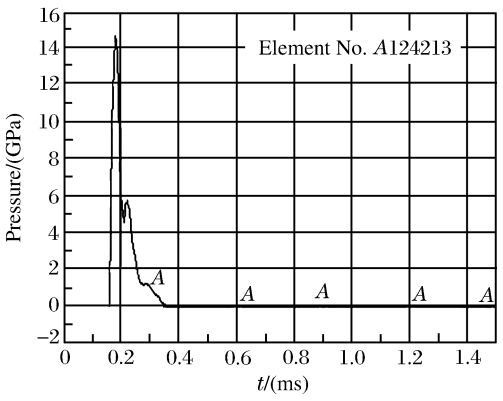

图 5 无钢板加固时混凝土结点 124213 的压力时程曲线

Fig. 5 Pressure-time relation on the element 124213 of the concrete without steel plate composite

4.2 有无钢板加固时混凝土中应力对比分析

无钢板加固的混凝土在爆炸荷载作用下，应力通常会经历 3 个阶段。第 1 阶段：爆炸产生入射波到达某点 P 后继续向前一直到混凝土的交界面，而后会产生一个透射波和反射波，当反射波没有到达 P 点之前，P 点的应力值仍为入射波的应力值；第 2 阶段：反射波已经到达 P 点，此时的应力值是入射波与反射波叠加的结果，当叠加应力值比较大时，往往会产生裂缝或层裂，严重时还会发生震塌；第 3 阶段：入射波经过 P 点，只剩下反射波，这时的应力值为反射波的应力值。

图 6 和图 7 分别为有无钢板加固时混凝土在同一位置处（距爆心 x 方向 35 cm 处）的主应力时程曲线。从图中可以看出，当 $t\leqslant 280\ \mu s$ 时，两条曲线的形状几乎相同，这是因为遇到钢板或交界面的入射波还没有反射回来。而后由于反射波的影响，有钢板加固的混凝土的应力值反而增大，这是由于钢板的声阻抗比混凝土高，入射波经钢板反射时波的叠加反而增强。随后，两条曲线几乎同时达到拉应力的最大值，结点 62220 的峰值为 180 MPa，结点 124213 的峰值为 300 MPa。此时，若拉应力超过混凝土的抗拉强度，就会出现裂缝，甚至剥落的现象。从图中可以看出，经过钢板加固后，拉应力峰值降低了约 40%。这就可以说明钢板能够有效地提高混凝土的防震塌能力。当 $t>280\ \mu s$ 时，拉应力开始逐渐减

小并转化为压应力。有钢板加固时的结点压应力较大,其峰值约为 300 MPa。这时混凝土也会出现剥落等现象,被剥落的混凝土同时也会冲击钢板,引起钢板变形。而无钢板加固时的结点峰值约为 170 MPa,相差约 43.3%。有钢板加固时的峰值到达时间较无钢板加固时慢 0.06 ms。

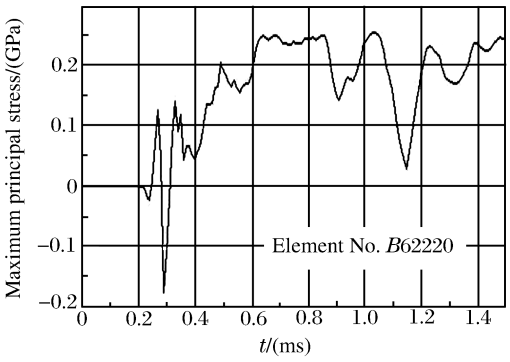

图 6　有钢板加固时混凝土单元 62220 的主应力时程曲线

Fig. 6　The time-history of principal stress on the element 62220 of the concrete with steel composite

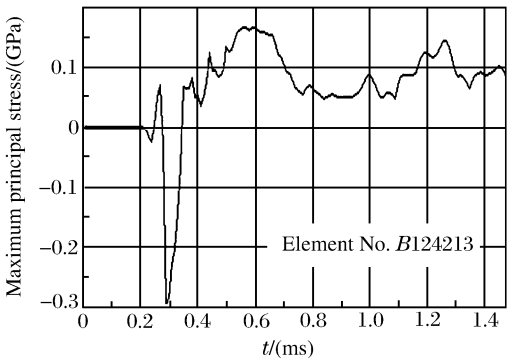

图 7　无钢板加固时混凝土结点 124213 的主应力时程曲线

Fig. 7　The time-history of principal stress on the element 124213 of the concrete without steel composite

5　结　论

(1) 通过表面敷设钢板,可以改变爆炸荷载作用下的混凝土应力场,减小其拉应力的峰值,抑制混凝土中裂纹的发展,提高其防震塌能力以及结构的完整性。

(2) 钢板的约束作用有效地限制了混凝土碎块的运动,使得在装药量比较大的时候,混凝土的破坏有可能由局部破坏变为结构性整体破坏。

(3) 由于钢板的存在,会对混凝土内的压力波和应力波产生较大的影响,使得压力波和应力波在混凝土内的传播非常复杂,而这些还有待于进一步研究。

References:

[1] Pandey A K, Ram K, Paul D K, et al. Non-Linear Response of Reinforced Concrete Containment Structure under Blast Loading [J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 23(6): 993-1002.

[2] Bowles P K. Update of the Vehicle Bomb Mitigation Guide (VBMG) Safe Distances for Secondary Fragmentation [A]//11th International Symposium on Interactions of the Effects of Munitions with Structures [C]. Mannheim, Germany, 2003: 334-339.

[3] Xu K, Lu Y. Numerical Simulation Study of Spallation in Reinforced Concrete Plates Subjected to Blast Loading [J]. Computer & Structures, 2006, 84(6): 431-438.

[4] Deng C M, Xu J Y, Shen L J. Deformation and Damage Characteristics Analysis of Underground Arch Structure Subjected to Subsurface Blast [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(5): 532-537. (in Chinese)
邓春梅,许金余,沈刘军. 装药爆炸下地下拱形结构变形及破坏特征分析 [J]. 解放军理工大学学报, 2007, 8(5): 532-537.

[5] Shang X J, Su J Y. Dynamic Analysis and Project Example of ANSYS/LS-DYNA [M]. Beijing: Chinese Water Conservancy and Electricity Press, 2005. (in Chinese)
尚小江,苏建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.

[6] Dong X Y, Xia C P, Duan Z P, Numerical Analysis of Plane Explosive Wave Propagation with Its Attenuation Be-

havior in Semi-Infinite Medium [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 60-65. (in Chinese)
董香永, 夏昌平, 段祝平. 平面爆炸波在半无限混凝土介质中传播与衰减特性的数值分析 [J]. 工程力学, 2006, 23(2): 60-65.

[7] Wang D W, Gao H Q, Du H X, et al. The Analysis and Simulation of Penetrating Movement of Oblique Projectile [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(3): 121-123. (in Chinese)
汪德武, 高洪泉, 杜海霞, 等. 斜侵彻弹体运动分析与仿真 [J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(3): 121-123.

[8] Yang Q S, Wei X Y, Zhao J H, et al. Numerical Simulation of Steel-Fiber Concrete Slab Subjected to Blasting Load [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 8(5): 530-533. (in Chinese)
杨青顺, 魏雪英, 赵均海, 等. 钢纤维混凝土板抗爆数值模拟 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(5): 530-533.

[9] Wang C, Fu X L, Ning J G. Numerical Simulation of Cylindrical Charge Damaging Concrete Medium [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(3): 318-322. (in Chinese)
王 成, 付晓磊, 宁建国. 柱形装药爆炸破坏混凝土的数值模拟分析 [J]. 计算力学学报, 2007, 24(3): 318-322.

[10] Dai J. Calculation of Radii of the Broken and Cracked Areas in Rock by a Long Charge Explosion [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2001, 20(4): 144-147. (in Chinese)
戴 俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(4): 144-147.

[11] Wang Z Q, Zhang Q, Bai C H. Numerical Simulation on Influence of Hole Depth on Explosion Effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 550-553. (in Chinese)
王仲琦, 张 琦, 白春华. 孔深影响爆炸应力波特性的数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 550-553.

Numerical Simulation of Dynamic Response of Concrete Subjected to Internal Load of Blast

LENG Bing-Lin[1,2], XU Jin-Yu[1,3], SUN Hui-Xiang[1], XU Jie[4]

(1. *The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an* 710038, *China*;
2. *PLA Unit* 95080, *Shantou* 515823, *China*;
3. *Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710000, *China*;
4. *PLA Unit* 95538, *Xinjin* 611430, *China*)

Abstract: It is still difficult to give the all-sided and accurate description of explosion damaging effects according to experiment. In this paper, by using nonlinear dynamic finite-element program ANSYS/LS-DYNA, which can deal with fluid-solid coupling algorithm, dynamic response of concrete subjected to internal blast loading such as development of cavitations was simulated. The size of the blast pit, the damage area, pressure contour and stress-time curve in concrete with or without steel composite were analyzed. Also, the damage mechanism of concrete-steel plate composition under explosive loading was studied. Research showed that the fluid-solid coupling algorithm can avoid element abnormality and mesh vanishing, and also improve the efficient. The calculated results described the concrete breakage of the center blasting cavity compression and the free surface tension spalling, which were in agreement with the theoretical results. Synchronously, due to the steel plain reinforcing, the steel plate composite can decrease the pull stress and restrain the development of crack, thereby the capability of the prevent-collapse and integrality of the structure will be improved.

Key words: blast loading; concrete; numerical simulation; finite-element method; explosive cavitation