

文章编号: 1000-4750(2009)09-0225-06

内部爆炸荷载作用下钢筋混凝土板碎片 抛射速度的预测

*龚顺风, 金伟良

(浙江大学结构工程研究所, 杭州 310058)

摘 要: 大型地上军火库由于发生偶然的爆炸, 相应的钢筋混凝土结构在内部爆炸荷载作用下的动力响应特别是碎片的大小和抛射速度将会对周围的人造成巨大的伤害。因此, 合理地预测钢筋混凝土结构的损伤破坏及碎片形成和抛射速度已成为军火库安全性能评估的重要关注问题。该文对箱型封闭空间内钢筋混凝土板在内部爆炸荷载作用下的动力响应进行了数值模拟研究, 模型考虑了应变率对钢筋和混凝土材料动力本构特性的影响以及空气-结构之间的流固耦合相互作用, 数值分析结果展示了钢筋混凝土板在内部爆炸冲击波和气体压力荷载作用下从损伤破坏、碎片形成到抛射的动态演变过程, 混凝土碎片大小和抛射速度与试验结果吻合较好。研究结果表明: 爆炸冲击波影响钢筋混凝土板的开裂破坏和碎片的大小, 而气体压力荷载对碎片的形成和抛射速度起着重要的作用。

关键词: 内部爆炸荷载; 钢筋混凝土板; 动力响应; 本构模型; 抛射速度

中图分类号: TU352; O383 **文献标识码:** A

PREDICTION OF DEBRIS LAUNCH VELOCITY OF REINFORCED CONCRETE SLAB SUBJECTED TO INTERNAL BLAST LOADING

*GONG Shun-feng, JIN Wei-liang

(Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Due to the accidental explosion of a large-scale aboveground ammunition storage magazine, the dynamic response under internal blast loading, especially the size and launch velocity of debris of reinforced concrete structures, can cause huge damage to surrounding persons and buildings. Therefore, predicting accurately the debris formation and launch velocity of RC structures has become an important issue for the safety assessment of ammunition storage magazine. In this paper, a numerical model of RC slab bolted to the cubic steel box at the four ends is established with the explosive charge placed at the centre of the chamber. The numerical model adopts a three-curve concrete strength model to account for the effect of strain rate on the concrete and reinforcement dynamic strength. The air-structure coupled interaction is also considered. With the numerical model, the whole evolving process is simulated including break-up, debris formation and launching of RC slab. The simulation results are compared with experimental results, and good agreements are observed in the launch velocity and sizes of debris. It is also found that the shock wave load is responsible for the development of damage zone in the concrete material and the subsequent debris size distribution, and the gas pressure load plays an important role in the separation of crack pattern and in the subsequent throw of the debris.

Key words: internal blast loading; RC slab; dynamic response; constitutive model; launch velocity

收稿日期: 2008-01-14; 修改日期: 2009-05-18

基金项目: 浙江大学国防预研基金项目; 浙江省“钱江人才”计划项目(QJD0702006)

作者简介: *龚顺风(1975—), 男, 浙江人, 副教授, 博士, 从事钢筋混凝土结构的抗爆性能研究(E-mail: sfgong@zju.edu.cn);

金伟良(1961—), 男, 浙江人, 教授, 博士, 从事工程结构的可靠性研究(E-mail: jinwl@zju.edu.cn).

大型地上军火库由于发生偶然的爆炸,将产生强大的爆炸冲击波荷载,军火库结构在内部复杂的爆炸荷载作用下将发生破坏,钢筋混凝土碎片的大小和抛射速度将对周围临近的建筑物和人造成巨大的伤害。因此,合理地预测内部爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的损伤破坏及碎片的形成和抛射速度已成为大型军火库结构安全性能评估的重要关注问题。钢筋混凝土结构在内部爆炸荷载作用下的动力响应过程涉及许多非常复杂的因素,如爆炸荷载的模拟、气体和结构间的流固耦合作用、高加载速率下钢筋和混凝土材料的力学性能等方面^[1-4]。以往的研究主要通过相似比例模型试验,现场试验研究工作不仅危险而且费用高昂,观测数据资料也不够充分全面,不同的结构形式和爆炸当量对结构的动力响应存在着较大的差异。为了避免大量重复烦琐的试验研究工作,数值模拟技术为研究结构的爆炸和冲击问题提供了强有利的手段,不仅可以减少费用,缩短研发周期,而且能在时间和空间上获取更加全面的数据信息。本文应用 LS-DYNA 显示动力有限元分析软件^[5],对箱型封闭空间内钢筋混凝土板在内部爆炸荷载作用下的动力响应进行了数值模拟研究,数值模型考虑了应变率对钢筋和混凝土材料动力本构特性的影响以及炸药-空气-结构之间的流固耦合相互作用,展示了钢筋混凝土板在内部爆炸冲击波和气体压力荷载作用下从损伤破坏、碎片形成到抛射的动态演变过程,并与试验结果进行了比较分析,以进一步验证数模参数选取的可靠性,将为爆炸荷载作用下大型军火库和防护工程结构的安全性提供合理的评估。

1 空气和炸药的状态方程

通常采用线性多项式状态方程来描述爆炸后空气的性能。根据 Gama 准则,空气的状态方程可以表示为^[5]:

$$p_a = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_a} E \quad (1)$$

式中: p_a 为气体压力; γ 为比热比,理想气体取值为 1.4; 初始时刻的空气密度 $\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3$; E 为空气单位体积的内能,其初始值 $E_0 = 2.5 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ 。

一般采用 JWL 状态方程来模拟炸药爆轰过程中压力和内能及体积的关系^[6-7]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega \psi}{V} \quad (2)$$

式中: p 为爆炸产生的压力; V 为当压力为 p 时的体积与初始体积的比值; ψ 是炸药的比内能,材料常数 $A = 540.94 \text{ GPa}$, $B = 9.3726 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.5$, $R_2 = 1.1$, $\omega = 0.35$ 。此外,该数值模型中炸药初始密度 $\rho_0 = 1.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,炸药的爆轰速度 $VOD = 7.53 \times 10^3 \text{ m/s}$,炸药单位体积的初始内能 $\psi_0 = 8.1 \times 10^3 \text{ MJ/m}^3$ 。

2 材料的动力本构模型

2.1 钢筋

钢筋材料采用分段线性塑性模型(Piecewise Linear Plasticity)^[5],该模型适合模拟各向同性的非线性硬化材料,并可以考虑应变率对材料强度的影响。钢筋各参数取值如下:初始弹性模量 $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu_s = 0.3$,屈服强度 $\sigma_y = 300 \text{ MPa}$,极限应变 $\varepsilon_f = 0.12$,硬化模量 $E_p = 2.0 \times 10^3 \text{ MPa}$,密度 $\rho_s = 7800 \text{ kg/m}^3$ 。

在爆炸荷载作用下,已有的研究成果^[8]表明应变率对钢筋的弹性模量和极限应变影响很小,屈服应力和应变、极限应力随应变率的增加都有不同程度的增强,材料强度的动力增强系数(DIF)通常表示为应变率的函数,Marlvar^[8]通过对钢筋在不同应变率下大量试验数据的统计分析,得到相应的 DIF 表达式为:

$$DIF = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10^{-4}} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中, $\alpha = 0.009$,主要考虑应变率对钢筋断裂时极限强度的影响。

2.2 混凝土

Malvar^[9]提出的虚张量混凝土/地质模型(Pseudo Tensor Concrete/Geological Model)是当前最适合用来模拟混凝土材料在爆炸冲击荷载作用下的动力特性。在经典材料的塑性理论,材料的屈服跟静水压力是不相关的,因此静水压力张量可以从应力张量分离出来,应力张量分解为静水压力张量和偏应力张量。静水压力张量改变材料的体积变形,偏应力张量将影响材料的剪切变形,应变率增强材料的强度。

2.2.1 状态方程

在静水压力作用下,紧密模型的材料内能是线性的,该模型适合模拟混凝土和岩石等材料的受力状态,在加载过程中静水压力定义为:

$$p = C(\varepsilon_v) + \gamma T(\varepsilon_v) E \quad (4)$$

式中: E 为材料单位体积的内能; γ 为比热比; 体

积应变 ε_v 为相对体积的自然对数。模型如图 1 所示, 包含了从张拉截矩到弹性极限点 T 的线弹性加载路径。如果拉应力超过张拉截矩, 混凝土材料将发生张拉破坏。当体积应变大于 T 点, 混凝土材料在静水压力作用下将开始密实, 随着静水压力的进一步增大, 体积应变开始快速增长, 直至体积应变不能再继续增加, 混凝土变成粒状材料。

卸载沿着卸载体积模量到张拉截矩, 重新加载总是沿着卸载路径加载到原先的卸载点, 接着继续沿着图 1 所示的加载路径。卸载和加载体积模量由初始加载体积模量和粒状材料体积模量之间线性插值得到。

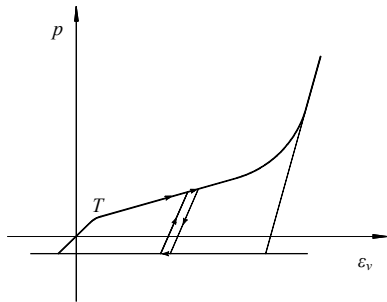


图 1 静水压力与体积-应变关系曲线

Fig.1 Pressure vs. volumetric strain curve

2.2.2 三个应力面定义

混凝土材料在拉力和剪力作用下通常发生脆性破坏, 在较大静水压力作用下将表现为延性特性, 而且材料性能和本构参数与应变率相关。经过与经典的屈服假定 Von Mises 和 Drucker Prager 的比较, 混凝土材料在三向受力状态下可以用 3 个不同的面来表示, 以分析材料在不同静水压力作用下的偏应力张量。

$$\Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \quad (\text{最大应力面}) \quad (5)$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1f} + a_{2f} p} \quad (\text{残余应力面}) \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y} p} \quad (\text{屈服应力面}) \quad (7)$$

3 个应力面如图 2 所示, 最上面曲线为最大应力面, 最下面曲线为残余应力面, 中间曲线为屈服应力面, 总共需要 8 个参数来定义。

$\Delta\sigma$ 可定义为上述两个不同应力面的线性组合, 当加载在初始屈服应力面和最大应力面之间时, 可表示为:

$$\Delta\sigma = \eta\Delta\sigma_m + (1-\eta)\Delta\sigma_y \quad (8)$$

同样在最大应力面和残余应力面之间, $\Delta\sigma$ 通过线性插值得到:

$$\Delta\sigma = \eta\Delta\sigma_m + (1-\eta)\Delta\sigma_r \quad (9)$$

式中: $\Delta\sigma = \sqrt{3J_2}$; 系数 $\eta(\lambda)$ 是变量 λ 的函数, 当 $\lambda=0$ 时, $\eta(0)=0$, η 随着变量 λ 的增大从 0 增加到 1, 接着随着 λ 的继续增大, η 又从 1 减小到 0。 $p = -(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$ 是静水压力, 应力受拉为正, 压力 p 受压为正。 $J_2 = (s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)/2$ 为偏应力张量的第二不变量, s_1 、 s_2 和 s_3 分别为第一主偏应力、第二主偏应力和第三主偏应力。

如果 $\Delta\sigma > \Delta\sigma_y$, 混凝土材料将产生塑性流, 应用 Prandtl-Reuss 流动准则来实施径向返回卸载, 偏应力的加卸载路径如图 2 所示, 图 3 为典型的混凝土在单轴受压状态下的应力-应变关系曲线。

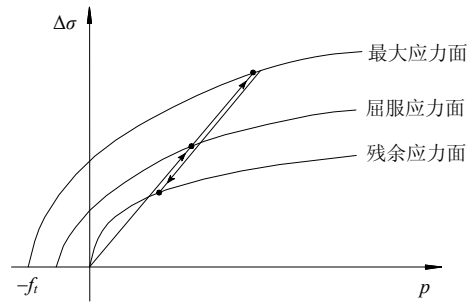


图 2 三个应力面

Fig.2 Three stress surfaces

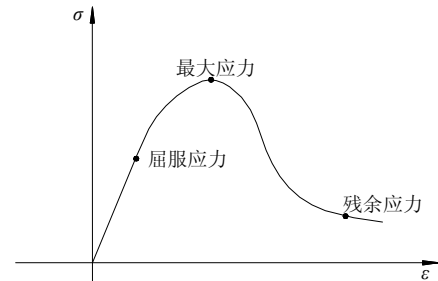


图 3 混凝土的应力-应变关系曲线

Fig.3 Relationship of stress with strain for concrete

2.2.3 应变率影响

在爆炸或冲击荷载作用下, 混凝土材料的受力性能比较复杂, 应变率对材料的弹性模量、抗拉和抗压强度都有不同程度的影响。引进与等效偏应变率相关的材料强度增强系数 r_f , 来考虑混凝土在不同加载速率下对材料强度的影响。材料强度的变化是通过图 2 所示的径向加载路径来实施, 为了得到静水压力为 p 时增强后的混凝土材料强度 $\Delta\sigma_e$, 需要通过不考虑应变率影响的静水压力 p/r_f 的偏应力乘以相应的增强系数 r_f 来计算得到:

$$\Delta\sigma_e = r_f \Delta\sigma(p/r_f) \quad (10)$$

式(10)可以沿着任意径向加载路径考虑应变率对材料强度的影响,包括混凝土材料的单轴受拉、单轴受压、双轴拉压和三轴受压等不同的加载路径。文献[10—11]给出了混凝土单轴抗拉和抗压强度的增强系数 r_f 关于应变率的拟合曲线。

混凝土的抗压强度 $f_c=35\text{MPa}$,弹性模量 $E_c=27\text{GPa}$,泊松比为0.2,密度 $\rho=2.55\times 10^3\text{kg/m}^3$,抗拉强度 $f_t=4.0\text{MPa}$ 。

3 数值模拟分析

为了研究内部爆炸作用下钢筋混凝土板破坏后碎片的抛射速度,Dörr等人^[12]做了一系列在钢箱内部不同当量爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的试验,如图4(a)所示,通过高速摄像机观测钢筋混凝

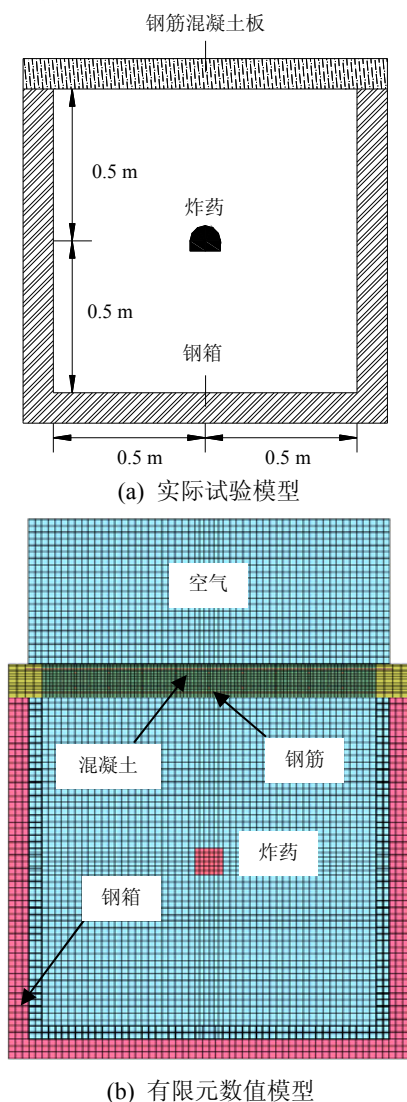


图4 模型构造示意图

Fig.4 Schematic illustration of the model configuration

土板碎片的抛射速度,并得到了预测碎片抛射速度的经验公式。Xu等人^[13]基于能量守恒原理推导了箱形封闭空间内爆炸荷载作用下钢筋混凝土板碎片抛射速度的理论公式。对于不同的结构形式,上述预测碎片抛射速度的公式不可避免地存在局限性,而且其适用条件和范围也受到限制。

本文根据Dörr等人^[12]做的实际试验模型,应用LS-DYNA软件对炸药、空气、钢箱、混凝土和钢筋分别进行建模,如图4(b)所示。通过对大量的不同网格尺寸进行了试验性模拟分析,炸药和空气用Euler网格模拟,网格大小最终选为2cm,分别有216个和253800个单元;Lagrange网格用来模拟钢箱、混凝土和钢筋等实体,10cm厚的钢筋混凝土板被划分为16层,长度方向单元大小为1cm,分别有153252个混凝土单元和3708个钢筋单元。上述网格划分保证了气体与周围结构间的流固耦合相互作用,避免了钢箱内部气体逃逸而导致的爆炸荷载失真。在爆炸冲击荷载作用下,由于作用的时间非常迅速短暂,通常可以假定钢筋和混凝土之间的粘结是完好的。

图5为钢箱内部0.3kg Pentolite炸药作用下试验和数值模拟得到的钢筋混凝土板碎片的分布,从板的裂缝开展和碎片大小及分布规律可以看出两者具有较好的一致性,说明了本文数值模拟参数选取的合理性。图6分别给出了0.5kg、1kg、2kg和3kg Pentolite炸药作用下钢筋混凝土板的最终破坏效果,可以观测到低加载密度下如0.5kg和1kg钢筋对板的破坏和碎片的形成起到主要的控制作用,板四边与钢箱连接的钢筋没有发生断裂,混凝土受钢筋网的影响被分割成比较小的碎片;在2kg和3kg的爆炸当量荷载作用下,钢筋混凝土板的四边发生剪切破坏,与钢箱相连的钢筋达到极限拉应变而断裂,在强大的气体压力荷载作用下板整体高速向上抛射。图7为数值模拟得到的钢箱内部不同爆炸当量产生的爆炸荷载时程曲线,冲击波荷载的峰值随时间不断的衰减,由于在封闭的钢箱内部,爆炸产生的能量不能立即释放,导致气体压力荷载不断的增强,当钢筋混凝土板破碎或脱离钢箱后,内部积聚的能量可以向外逃逸,气体压力荷载随即开始衰减。结合板在内部爆炸荷载作用下的动力响应过程,爆炸冲击波荷载影响钢筋混凝土板的开裂破坏和碎片的大小,而气体压力荷载对碎片的形成和抛射速度起重要作用。

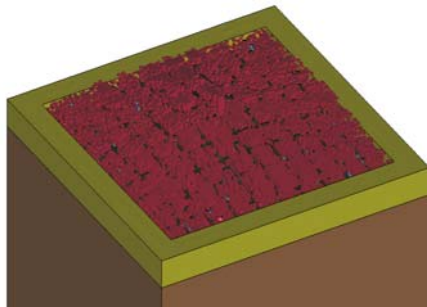


图5 0.3kg 内部爆炸荷载作用下钢筋混凝土板试验和数值模拟碎片的比较

Fig.5 Comparison of experimental and simulated debris sizes for 0.3 kg charge

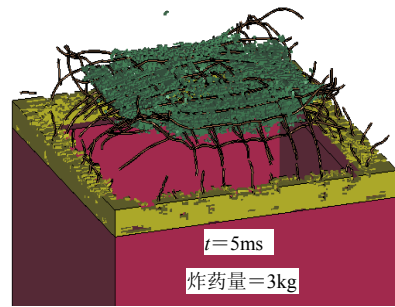
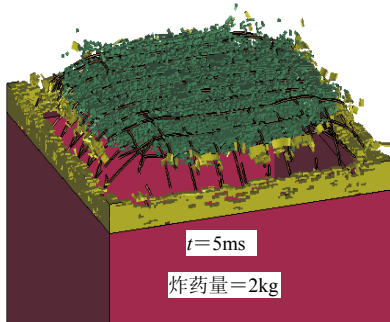
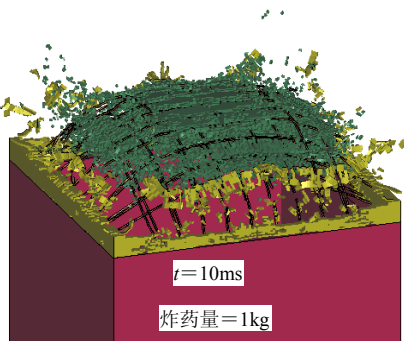
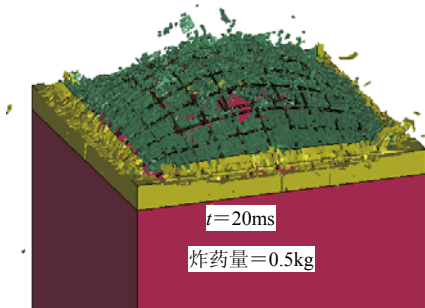


图6 不同爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的碎片分布

Fig.6 Break-up of RC slab for different charge loading density at the different time

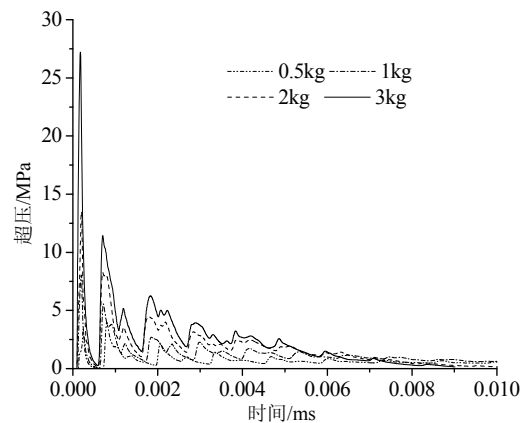


图7 不同爆炸当量下的压力时程曲线

Fig.7 Overpressure time history curves for different charge loading density

图8为不同爆炸荷载作用下钢筋混凝土板碎片抛射速度的时程曲线,是由板跨中、1/4跨上的9个点取平均得到,从图8中可知对于不同的爆炸当量,钢筋混凝土板碎片到达最大速度的时间也不一致;随着炸药量的增加,钢筋混凝土板碎片速度时程曲线的斜率增大,到达最大速度的时间变短,这主要是由于作用在钢筋混凝土板上的爆炸荷载明显增强。图9分别给出了本文数值模拟得到的不同爆炸当量下钢筋混凝土板碎片的抛射速度及相应的拟合曲线、Dörr^[12]实测的碎片抛射速度和根据Xu^[13]提出的理论公式计算得到的碎片抛射速度。在钢箱内部爆炸当量小于1kg的时候,理论公式计算的碎片抛射速度与实测值比较接近,随着爆炸当量的增加,理论值明显小于实测值,原因主要在于Xu^[13]在推导碎片抛射速度时钢箱内部的爆炸冲击荷载用的是简化的经验公式,没有完全考虑峰值衰减的多个脉冲荷载,不可避免的存在误差,特别是爆炸当量越大,钢箱内部的爆炸脉冲荷载反射增强,误差也就越明显。在爆炸当量为1kg时,数值模拟得到的碎片抛射速度与实测值几乎一致,爆炸

当量小于 1kg 时,数值模拟结果小于实测值,由于在低加载密度下,钢筋的作用明显增强,在数值模型里考虑钢筋和混凝土之间的粘结是完好的,不会发生滑移,一定程度上抑制了混凝土碎片的抛射;爆炸当量大于 1kg 时,数值模拟结果略高于实测值,主要是因为数值模拟时,当混凝土单元达到极限拉应变,侵蚀算法就把该混凝土单元从模型中删除,钢筋混凝土板失去了一部分混凝土单元,减轻了板的重量,导致数值模拟得到的板抛射速度比试验观测值要偏大。同时在高加载密度情况下,板四边与钢箱连接的钢筋迅速发生断裂,钢筋的约束作用明显减弱,板以整体破坏为主。

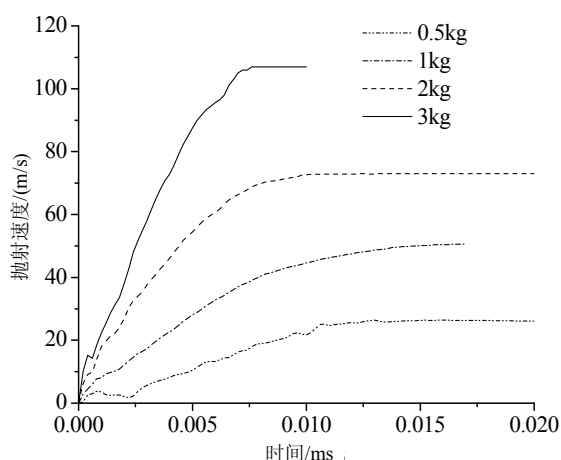


图 8 钢筋混凝土板碎片抛射速度的时程曲线

Fig.8 Time history of debris launch velocity of RC slab for different charge loading density

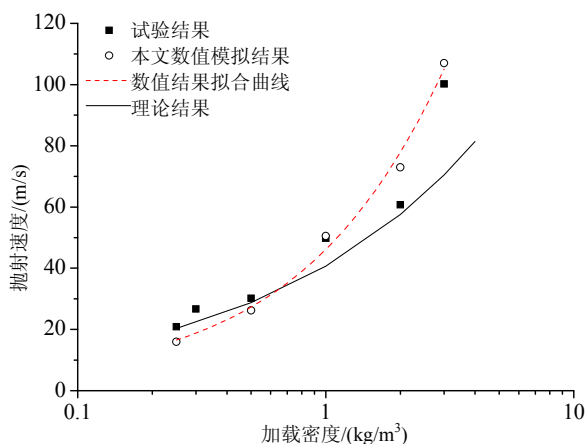


图 9 不同爆炸当量下钢筋混凝土板碎片的抛射速度

Fig.9 Debris launch velocity of RC slab for different charge loading density

4 结论

本文运用 LS-DYNA 显示动力有限元分析软件,对箱型封闭空间内钢筋混凝土板在内部爆炸荷

载作用下的动力响应进行了数值模拟分析,模型考虑了应变率对钢筋和混凝土材料动力本构特性的影响以及炸药-空气-结构之间的流固耦合相互作用,分析展示了钢筋混凝土板在内部爆炸冲击波和气体压力荷载共同作用下从损伤破坏、碎片形成到抛射的动态演变过程。计算得到的钢箱内部不同爆炸当量作用下钢筋混凝土板碎片的大小和抛射速度与试验及理论结果进行了比较分析,进一步验证了数模参数选取的可靠性,将为爆炸荷载作用下大型军火库和防护工程结构的安全性提供合理的评估。

参考文献:

- [1] Gong Shunfeng, Lu Yong, Jin Weiliang. Simulation of airblast load and its effect on RC structures [J]. Transactions of Tianjin University, 2006, 12(Supplement): 165—170.
- [2] Yuan Lin, Gong Shunfeng, Jin Weiliang. Spallation mechanism of RC slabs under contact detonation. Transactions of Tianjin University, 2008, 14(6): 464—469.
- [3] 龚顺风, 金伟良, 何勇. 内部爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的动力响应研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(5): 516—520.
- [4] 袁林, 龚顺风, 金伟良. 含泡沫铝防护层钢筋混凝土板的抗爆性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(2): 376—379.
- [5] LS-DYNA keyword User's Manual, Version 970 [M]. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, April, 2003.
- [6] Baker W E. Explosions in Air [M]. Austin, TX: University of Texas Press, 1973.
- [7] Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products [R]. UCRL-50422, Lawrence Radiation Laboratory, University of California, 1968.
- [8] Malvar L J. Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars [J]. ACI materials Journal, 1998, 95(5): 609—616.

(参考文献[9]—[13]转第 250 页)

- [11] Leguillon D. Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch [J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2002, 21: 61—72.
- [12] 王启智, 汪坤. U形切槽三点弯曲梁的应力集中系数[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, 39(3): 1—6.
Wang Qizhi, Wang Kun. Stress concentration factors for three-point bending beam with single-edge U-shaped notch [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, 39(3): 1—6. (in Chinese)
- [13] Gomez F J, Guinea G V, Elices M. Failure criteria for linear elastic materials with U-notches [J]. *International Journal of Fracture*, 2006, 141: 99—113.
- [14] 张盛, 何江达, 王启智. 用圆孔平台巴西圆盘确定岩石拉伸强度的非局部应力方法[J]. *应用力学学报*, 2008, 25(3): 503—507.
Zhang Sheng, He Jiangda, Wang Qizhi. Nonlocal stress method for determination of rock tensile strength holed-flattened Brazilian disc specimen [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2008, 25(3): 503—507. (in Chinese)
- [15] Smith E. Underpinning of a simple blunt flaw fracture initiation relation [J]. *International Journal of Fracture*, 2005, 131: 401—415.
- [16] GB/T 50266-1999, 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
GB/T 50266-1999, Standards for tests method of engineering rock masses [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [17] SL264-2001, 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
SL264-2001, Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering [S]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese)

(上接第 230 页)

- [9] Malvar L J, Crawford J E, Wesevich J W. A plasticity concrete material model for DYNA3D [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(9-10): 847—873.
- [10] Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. *ACI Material Journal*, 1998, 95(6): 735—739.
- [11] Lu Yong, Xu Kai. Modelling of dynamic behaviour of concrete material under blast loading [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41: 131—143.
- [12] Dörr A, Michael K, Gürke G. Experimental investigations of the debris launch velocity from internally overloaded concrete structures [R]. Final Report DLV4-2002, Institut Kurzzeitdynamik Ernst-Mach-Institut, 2002.
- [13] Xu Kai, Lu Yong. Debris velocity of concrete structures subjected to explosive loading [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 30: 917—926.