

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.05.007

# 爆炸作用下板壳结构响应特性研究\*

施 龙 李建平 王 川

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室(北京,100081)

[摘 要] 对简单的板壳结构在爆炸载荷作用下的塑性响应特性进行了试验和数值仿真。运用 Hyperworks 和 LS-DYNA 程序,对基于两种不同钢材料模型建立的数值仿真模型进行计算,以试验结果为标准衡量不同材料模型在本试验条件下适用性,结果表明分段线性弹塑性模型适用于钢材料变形研究。得到不同空气域尺度对流固耦合数值仿真结果的影响,在保证计算精度并提高计算效率基础上,计算尺度应当为钢结构尺寸的 3~5 倍,计算尺度为钢结构尺寸 3 倍时,计算与测量结果偏差为 2.5%;计算尺度为钢结构尺寸 5 倍时,计算结果几乎与试验值相当。

[关键词] 板壳结构;动态响应;流固耦合;材料模型;计算尺度

[分类号] TD77+4;X932

## 引言

在对矿用救生舱、安全防爆门等大型矿用设备结构进行抗爆性能安全设计时,确定设备的抗爆性能如何就必须研究其在爆炸冲击载荷作用下结构的响应特性<sup>[1-3]</sup>。直接进行抗爆试验,经费十分昂贵,且由于爆炸的不可重复性导致试验难度较大<sup>[4]</sup>,目前主要依靠数值仿真技术,缺乏足够的试验支撑。救生舱等矿用钢结构由板、壳、梁等基本构件组成,这些构件在爆炸载荷作用下,会产生塑性变形甚至发生破坏,尤其在板壳梁相互接触的位置容易发生剪切破坏或者拉伸破坏而导致结构失效,从而无法保证实现其原有的功能<sup>[5-7]</sup>。因此,研究爆炸载荷作用下板壳等构件的动态响应特性,对优化结构的安全设计,提高其抗爆性能具有重要的现实意义<sup>[8-9]</sup>。

本文对简单的板壳钢结构进行试验和数值仿真,以试验为标准优化仿真模型,以获得更为合适的材料模型和计算方法。在此基础上,运用数值仿真技术对大型救生舱等矿用设备进行抗爆性能安全分析,为其结构的安全设计和优化提供指导和依据。

## 1 试验研究

采用长径比为 10:4 的柱装 8701 炸药,其炸药轴心对准钢板的正中心,分别对厚度 1 mm 和 2 mm 的 Q235 方形钢板进行试验,钢板边长均为 400 mm。钢板利用支架四周的 16 只螺钉及上下法兰将靶板的四边夹紧。单端起爆,在钢板中心布置一路传感器来测中心位置的反射超压,试验现场如图 1(a)。

钢板在爆炸冲击波作用下产生了较大的塑性变形和相应的弹性变形,载荷卸载后,其弹性变形恢复。典型的钢板变形如图 1(b)所示。

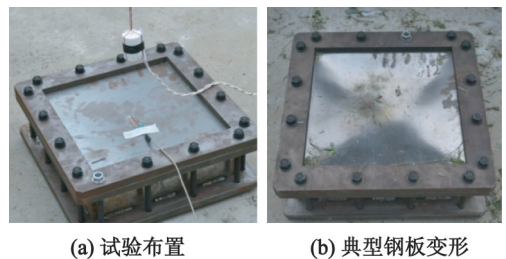


图 1 试验装置

Fig. 1 Test unit

最大塑性拉伸变形发生在钢板的中心位置,从中心向四周,塑性变形逐渐减小,随着钢板厚度的增加,最大塑性变形呈非线性减小。钢板在与上下法兰接触处容易发生剪切破坏,在最大位移以及焊接节点处容易发生拉伸破坏,有效试验结果见表 1。

表 1 钢板的最大塑性变形

Tab. 1 The maximum plastic displacement of steel plate

钢板厚度/mm	炸药 8701/g	炸高/mm	最大变形/mm
1	200	500	51.2
2	200	500	27.6

## 2 数值仿真

基于 Hyperworks 和 LS-DYNA 显式动力有限元

\* 收稿日期:2014-01-02

作者简介:施龙(1988~),男,硕士,主要从事矿用救生舱抗爆性能研究。E-mail: shlong2088@163.com

通信作者:李建平(1963~),男,讲师,主要从事爆炸力学研究。E-mail: ljping@bit.edu.cn

程序,通过建立试验条件下的数值仿真模型来实现对爆炸冲击作用下钢结构的动态响应的研究<sup>[10]</sup>。对于不同的模型,比较研究钢板在爆炸冲击载荷下的动态响应特性,并以试验结果为标准优化数值仿真模型,来获得更为合适的材料模型和计算方法。

2.1 不同材料模型的对比

对于钢材料模型的选择,有一般金属常用的双线性各向同性模型和钢材料常使用的分段线性塑性模型。分别基于这两种材料模型来建立数值仿真模型,通过与试验结果的对比对照,可以判断哪个材料模型更加适合本试验由钢材料 Q235 所构建的钢结构在爆炸冲击载荷作用下的动态响应。

2.1.1 模型的建立

炸药和空气单元采用 ALE 算法,钢结构采用 Lagrange 算法,Lagrange 材料和 ALE 材料间进行流固耦合。考虑钢结构和爆炸冲击波的空间对称性,建立 1/4 的有限元模型(图 2)。炸药 8701 质量 200 g,炸高 500 mm,长径比 10:4。钢板厚度 1 mm。钢板选用壳单元,炸药和空气选择三维实体单元,法兰间的连接采用 Hyperbeam 梁单元结构,上下法兰建立面对面的接触,整个模型共 816955 个节点,1595 个壳单元,8 个梁单元,787641 个实体单元。

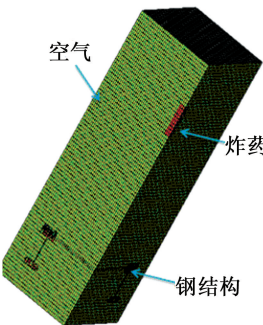


图 2 数值计算有限元模型  
Fig.2 Numerical finite element model

法兰与地接触的面,采用固定约束的边界条件,将空气模型的对称面设置对称边界条件,对其他的 4 个空气界面分别设定无反射边界条件。根据需要计算总时间均为 2 ms,计算时间步长为 0.01 ms。

2.1.2 材料模型

空气选用空材料模型 MAT-NULL 来描述,相应参数(g-cm-μs 单位制)为:密度  $\rho = 0.00125 \text{ g/cm}^3$ ,压力截断值为 0,动力黏性系数  $\mu = 0.001$ 。

炸药 8701 选用高能材料炸药模型 MAT-HIGN-EXPLOSIVE-BURN,并结合 JWL 方程<sup>[11]</sup>来描述。炸药 8701 的相关材料参数见表 2。

双线性各向同性模型是使用两种斜率来表示材

表 2 炸药 8701 相关参数

Tab. 2 Material parameters of explosive 8701				
$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$D/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$p_{\text{CJ}}/$ GPa	$E/$ GPa	$A/$ GPa
1.70	8315	29.5	8.5	8.545
$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	
0.2049	4.6	1.35	0.25	

料应力应变行为的经典双线性各向同性硬化模型。运用材料卡片 MAT-PLASTIC-KINEMATIC 来定义 Q235 材料,相应的参数如表 3 所示。

表 3 双线性材料模型相关参数

Tab. 3 Material parameters of bilinear isotropic plasticity model				
$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$E/$ GPa	$\mu$	屈服应力/ GPa	失效应变
7.83	2.07	0.3	0.005	0.4

分段线性弹塑性材料模型,运用 3 点生成相应的应力应变曲线,Q235 钢材料屈服极限 235 MPa,强度极限取 410 MPa,相应参数选取如表 4 所示。

表 4 分段线性弹塑性材料模型参数

Tab. 4 Material parameters of piecewise linear plastic model				
$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$E/$ GPa	$\mu$	$\sigma_s/$ MPa	$\sigma_b/$ MPa
7.83	2.070	0.3	235	410

2.1.3 数值计算结果

分别对基于分段线性材料模型和双线性材料模型的 1 mm 钢板进行数值计算,得到了钢板在 2 种情况下的典型时刻位移云图(图 3、图 4)。

模拟现象与试验现象很吻合:钢板的最大塑性拉伸变形,发生在钢板的中心位置,从中心向四周,塑性变形逐渐减小。钢板在爆炸冲击作用下发生了

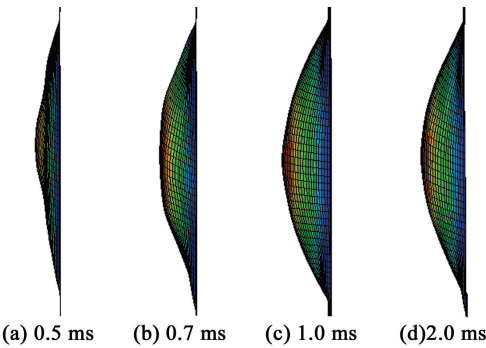


图 3 不同时刻分段线性模型的钢板位移云图  
Fig.3 Resultant displacement of piecewise linear plastic model

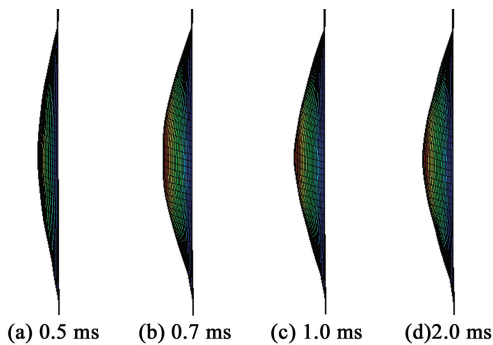


图 4 不同时刻双线性模型的钢板位移云图

Fig.4 Resultant displacement of bilinear isotropic plasticity model

弹性变形和塑性变形,两种模型在 0.9 ms 左右,达到最大变形位移,而后弹性位移恢复,最终变形为不可恢复的塑性变形。分别取两个模型钢板中心处节点,研究其位移随时间的变化关系,如图 5 所示。

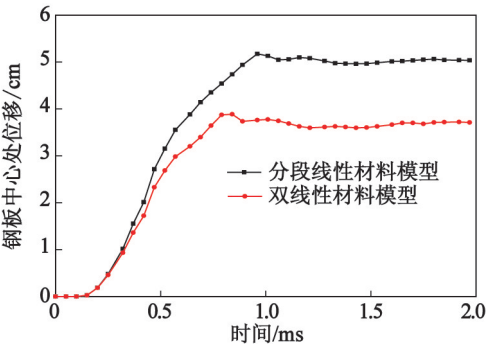


图 5 1 mm 钢板不同材料模型最大位移时程曲线

Fig.5 History of maximum displacement of different material models of 1mm plate

对比不同材料模型的中心点位移时程曲线发现,两种情况下的变形历程相似,分段线性模型的最大位移比双线性模型出现得晚一些,但其最大位移值较大,其最终的塑性变形位移较大。

按同样的方法,对基于分段线性材料模型和双线性材料模型的 2 mm 钢板进行数值计算,得到钢板中心处的位移动态响应(图 6)。以最大塑性变形为标准来衡量钢材料模型适用性,发现基于分段线性弹塑性模型的数值分析结果非常接近于试验值,1 mm 钢板的最大变形误差仅为 2.5%,2 mm 钢板为 6.5%;而基于双线性各向同性弹塑性模型分析的偏差较大,1 mm 钢板和 2 mm 钢板的最大变形偏差分别为 27.9% 和 55.4%,不在可接受范围之内(表 5)。由此,分段线性弹塑性模型非常适用于本试验爆炸冲击载荷作用下钢结构的动态响应。

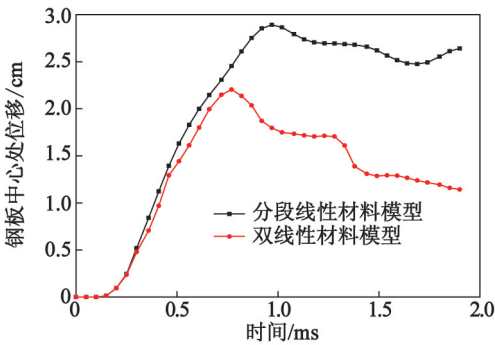


图 6 2 mm 钢板不同材料模型最大位移时程曲线

Fig.6 History of maximum displacement of different material models of 2 mm plate

表 5 不同材料模型的数值计算结果与试验值的比较

Tab.5 Comparison of the results between test and numerical calculation of different material models

不同钢材料模型		试验值/ mm	模拟结果/ mm	与试验值对比/ %
1mm	分段线性	51.2	49.9	偏小 2.5
	双线性		36.9	偏小 27.9
2mm	分段线性	27.6	25.8	偏小 6.5
	双线性		12.3	偏小 55.4

2.2 计算空气区域尺度对计算影响

在流固耦合的数值仿真中,设置模型界面的无反射边界条件来模拟无限空间,计算尺度过小可能会影响计算结果的精确度。通过比较 3 种不同计算尺度的数值模型的计算结果,根据最大变形准则,以试验结果为标准,选择更为合适的计算尺度。

2.2.1 不同计算尺度的计算结果

炸药中心处到钢板的距离为 500 mm,炸药 8701 质量为 200 g,其长径比为 10 : 4,选用钢板的厚度为 1 mm。对 850 mm × 850 mm × 850 mm、850 mm × 650 mm × 650 mm 和 850 mm × 260 mm × 260 mm 3 种空气域尺度进行了数值计算。其中 850 mm × 850 mm × 850 mm 和 850 mm × 650 mm × 650 mm 的模型计算尺度分别为钢结构尺寸的 5 倍和 3 倍。根据计算结果分别取目标钢板中心处节点,研究其位移随时间的变化,如图 7 所示。

通过比较发现,数值模型计算区域尺度的大小,影响计算结果的精确度。空气域尺度最大的数值模型的计算结果几乎与试验值相当,偏差为 1.2%,其计算尺度为钢结构尺寸的 5 倍;小尺度的计算结果比试验值偏大 12.7%;较大尺寸的计算结果相对于试验值偏差 2.5%,如表 6 所示。



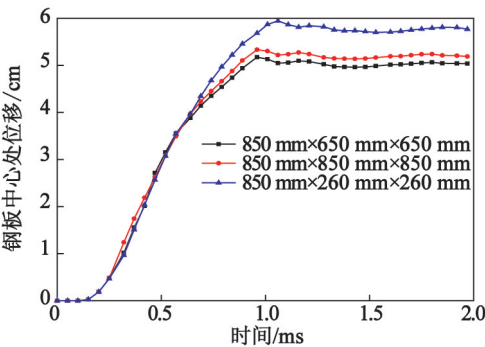


图 7 不同计算尺寸最大位移时程曲线

Fig. 7 History of maximum displacement of different calculation scales

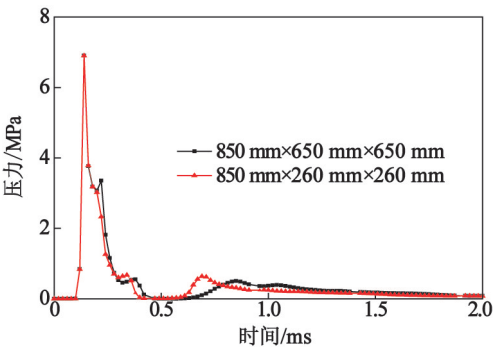


图 9 不同计算尺寸时单元 659495 的压力时程曲线

Fig. 9 History of pressure of element 659495 of different calculation scale

表 6 不同计算尺度数值计算结果和试验值的比较  
Tab. 6 Comparison of the results between numerical calculation and test of different calculation scales

计算尺度/ mm × mm × mm	模拟结果/ mm	试验值/ mm	与试验值对比/ %
850 × 260 × 260	57.7		偏大 12.7
850 × 650 × 650	49.9	51.2	偏小 2.5
850 × 850 × 850	51.6		偏大 1.2

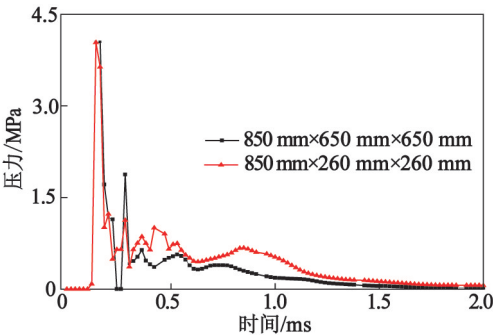


图 10 不同计算尺寸时单元 685918 的压力时程曲线

Fig. 10 History of pressure of element 685918 of different calculation scale

2.2.2 计算尺度对结果的影响分析

为研究计算空气域尺度如何影响结果,比较计算尺度分别为 850 mm × 260 mm × 260 mm 和 850 mm × 650 mm × 650 mm 模型中典型单元的压力时程曲线。在钢板最中心处偏上方取 659495 号实体单元,该单元内将会有冲击波的反射。另外选择自由场中 685918 号实体单元,此单元比较靠近小尺度模型的边界(图 8)。对单元 659495 和 685918 的压力时程曲线进行比较,分别如图 9 和图 10 所示。分别将单元 659495 和单元 685918 的压力时程曲线对时间积分得到不同模型相应位置处的冲量。

钢板中心位置上方的单元 659495 压力随时间变化的几乎完全相同,曲线反射最大超压均为 6.9 MPa,该单元处的冲量也几乎相同;比较靠近边缘处

的单元 685918 处的压力曲线则有巨大的不同,即单元处的冲量会有明显的差距;通过积分得到小尺度计算域模型和大尺度计算域模型在该位置处的冲量分别为 807 Pa · s 和 598 Pa · s,小尺度计算域模型在该单元处冲量比大尺度计算域模型中的冲量大 34.9%。小尺度模型从中心位置到边界,其相应的冲量与试验值偏差逐渐增大,直接影响到了钢板的最大的变形,导致最终变形比试验值偏大 12.7%。

小尺度模型受无反射边界条件引起能量不守恒导致流场中冲击波压力偏离实际情况的影响更明显。为避免无反射边界条件对计算结果的影响并提高数值计算的精确度,应尽量增大数值计算的尺度。本文中空气与钢结构的流固耦合模型计算中,为保证计算精度、减少数值计算量和提高计算效率,空气域的计算尺度应当至少为钢结构尺寸的 3 ~ 5 倍。

3 结论

1) 建立了钢材料变形数值仿真模型,钢材料基于分段线性弹塑性模型的数值分析结果接近其实测值,1 mm 厚钢板的最大变形误差计算值与实测值的误差为 2.5%,2 mm 钢板的最大变形误差在 6.5%,表明分段线性弹塑性模型非常适用于本试验爆炸冲击载荷作用下钢结构的动态响应。

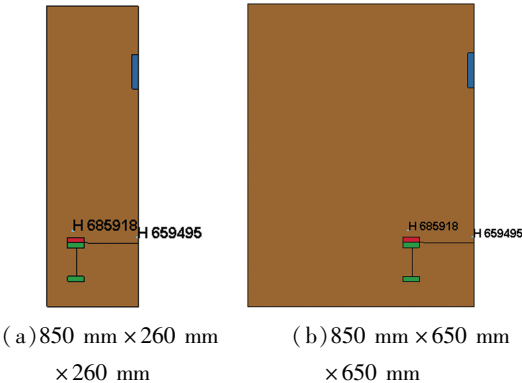


图 8 所选单元位置示意图

Fig. 8 Place of selected elements

2)通过建立不同计算尺度的数值模型,利用无反射边界条件近似无限区域,计算尺度越大其计算结果的精确度越高;本文流固耦合模型最大尺度的计算结果与试测值偏差 1.2%。在保证计算精度和提高计算效率下,计算空气域尺度的范围应当至少为钢结构尺寸的 3~5 倍左右。

### 参 考 文 献

- [1] 曾一鑫,白春华,李建平,等. 巷道救生舱抗冲击数值仿真[J]. 煤炭学报,2012,37(10):1705-1708.  
Zeng Yixin, Bai Chunhua, Li Jianping, et al. Numerical simulation of rescue cabin under blasting in the tunnel [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1705-1708.
- [2] 赵焕娟,黄平,钱新明. 救生舱板壳结构抗冲击结构安全分析及优化对策[J]. 煤炭学报,2013,38(6):1095-1100.  
Zhao Huanjuan, Huang Ping, Qian Xinming. Structure safety analysis and optimization of refuge chamber shell under explosion load[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 1095-1100.
- [3] 李志强,白博,谢青海,等. 冲击载荷下矿用移动式救生舱动态响应的数值模拟[J]. 振动与冲击,2013,32(16):146-151.  
Li Zhiqiang, Bai Bo, Xie Qinghai, et al. Numerical simulation on the dynamic response of movable mine rescue chamber subjected to impact loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16): 146-151.
- [4] 樊小涛. 矿用救生舱抗爆性能试验研究[J]. 矿业安全与环保,2010,37(3):25-26,30.
- [5] 吴义田,张庆明. 近距离爆炸下不同厚度靶板的动态响应分析[J]. 北京理工大学学报,2007,27(7):568-571.  
Wu Yitian, Zhang Qingming. Dynamic response of plates of varied thickness subjected to close range explosion[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(7): 568-571.
- [6] 王芳,冯顺山,俞为民. 爆炸冲击波作用下靶板的塑性大变形响应研究[J]. 中国安全科学学报,2003,13(3):58-61.  
Wang Fang, Feng Shunshan, Yu Weimin. Study on large plastic deformation response of target plate under explosive blast wave[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(3): 58-61.
- [7] 石磊,杜修力,樊鑫. 爆炸冲击波数值计算网格划分方法研究[J]. 北京工业大学学报,2010,36(11):1465-1470.  
Shi Lei, Du Xiuli, Fan Xin. A study on the mesh generation method for numerical simulation of blast wave[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(11): 1465-1470.
- [8] 侯俊亮,蒋建伟,门建兵,等. 不同形状装药爆炸冲击波场及对靶板作用效应的数值模拟[J]. 北京理工大学学报,2013,33(6):556-561.  
Hou Junliang, Jiang Jianwei, Men Jianbing, et al. Numerical simulation on blast wave field and deformation of thin plate under different-shape charge loading [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(6): 556-561.
- [9] 侯满义,范惠林. 爆炸波对靶板冲击损伤的动力有限元模拟[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(5):142-144.  
Hou Manyi, Fan Huilin. Dynamic finite-element simulation on panel impact damage subjected to blast[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(5): 142-144.
- [10] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [11] 杨亚东,李向东,王晓鸣. 爆炸冲击波空中传播特征参量的优化拟合[J]. 爆破器材,2014,43(1):13-18.  
Yang Yadong, Li Xiangdong, Wang Xiaoming. Optimum fitting for Characteristic parameters of blast shockwaves traveling in air[J]. Explosive Materials, 2014, 43(1): 13-18.

## Response Characteristic Research of Shell Structures under Blasting

SHI Long, LI Jianping, WANG Chuan

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

[ABSTRACT] The elastoplastic response of shell structures under blasting was researched by experiment as well as numerical simulation. Based on the software of Hyperworks and LS-DYNA, numerical models on two different steel materials were set up and simulated. The applicability of different material under the experimental conditions was evaluated according to the experimental standard and the results indicate that piecewise linear elastic plastic model is applicable for the study of the deformation of steel material. The effect of different simulation scale on fluid solid coupling numerical simulation was clarified. To ensure the calculation accuracy and improve the calculation efficiency, the scale of numerical simulation should be about 3-5 times larger than the size of the steel structure. The calculation deviates 2.5% from the experiment result when the size is 3 times, while the calculation is similar to the test data when it is 5 times.

[KEY WORDS] shell structures; dynamic response; fluid solid coupling; material model; calculation scale