

# 内爆炸下球面钢网壳结构的 冲击波超压计算分析

段雷琳, 高轩能, 江媛

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 采用通用有限元 LS-DYNA 程序,建立内爆炸下大跨球面钢网壳结构数值模拟计算模型,用于大跨空间结构的内爆炸数值模拟计算和分析.通过研究大跨球面钢网壳结构在内爆炸下的冲击波传播、反射和峰值出现规律,发现炸药在结构内爆炸下,球面钢网壳结构受到的爆炸冲击效应更为复杂,可能需要同时承受入射冲击波和反射波或复合波的冲击作用.最后,应用所建模型对爆炸冲击波超压的数值进行计算分析,得出内爆炸下不同跨度和矢跨比大跨球面网壳结构的冲击波超压计算公式.

**关键词:** 内爆炸; 球面钢网壳; 冲击波; 超压; 数值模拟

**中图分类号:** O 383.2; TU 393.3

**文献标志码:** A

大跨空间钢结构在我国公共建筑中得到广泛应用并逐渐成为主要的结构形式之一.这些建筑内人员活动密集,一旦遭遇爆炸袭击,就有可能造成重大人员财产损失,而造成建筑物破坏的最主要因素是爆炸冲击波<sup>[1-3]</sup>.因此,有必要对大跨空间钢结构在内爆炸作用下的冲击波传播特性和超压峰值进行定量化研究,为确定作用在结构上的爆炸荷载提供依据.与室外爆炸相比,炸药在结构内的爆炸效应要复杂得多.内爆炸情况下,冲击波遭遇地面、墙面和刚性屋面等刚性物体有可能产生碰撞和反射,形成反射冲击波,使结构经受二次或多次冲击<sup>[4-5]</sup>.对于球面钢网壳等全封闭大跨空间结构,在内爆炸作用下还有可能产生顶部冲击波压力的积聚,不利于结构的防爆和抗爆<sup>[6]</sup>.由此可见,炸药在结构内爆炸后,爆炸冲击波的传播规律和超压峰值与外爆炸有很大差异,对结构的作用也与外爆炸迥然不同<sup>[7-8]</sup>.关于结构在爆炸作用下的动力效应和结构抗爆研究,已有的成果主要涉及军事工程领域,对民用工程研究不多<sup>[9-10]</sup>.在国外,关于内爆炸作用下大跨空间钢结构的响应研究迄今仅见 Raftoyiannis 等<sup>[11]</sup>报告.在国内,宋卫东等<sup>[12]</sup>通过建立机库三维数值模型,对战斗部在机库内爆炸的冲击波流场进行数值模拟计算,并分析讨论冲击波超压峰值和爆炸点距离的关系.高轩能等<sup>[13-14]</sup>对空间钢柱壳结构在内爆炸荷载作用下的动力效应、冲击波压力场分布和泄爆措施等进行了研究,获得冲击波压力场在大跨空间结构表面上的具体分布.本文在此基础上,应用通用有限元 LS-DYNA 程序,对不同跨度和矢跨比的大跨球面钢网壳结构在内爆炸作用下的全过程演变、爆炸冲击波压力传播特性和超压峰值进行数值模拟计算分析.

## 1 球壳钢结构内爆炸数值模型的建立

### 1.1 材料参数取值

爆炸数值模拟计算的可靠性和准确性受材料参数的影响较大.文中采用 ANSYS/LS-DYNA,通过空爆数值实验确定各材料参数的合理取值.炸药和空气设为均匀连续介质,采用 3D 实体单元 SOLID 164 建模.炸药采用 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型和 JW1(Jones-Wilkins-Lee)状态控

**收稿日期:** 2012-12-27

**通信作者:** 高轩能(1962-),男,教授,主要从事钢结构及工程结构灾害控制的研究. E-mail:gaoxn117@sina.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51278208);福建省自然科学基金资助项目(2011J01319);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(JB-JC1005)

制方程<sup>[13]</sup>,爆炸冲击压力的计算式为

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V}) \exp(-R_1 V) + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V}) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E_0}{V}.$$
 (1)

式(1)中: $A, B, R_1, R_2, \omega$  均为输入参数; $V$  为相对体积; $E_0$  为初始内能. 炸药的材料参数取值,如表 1 所示. 表 1 中: $D$  为炸药的爆速; $P_{CJ}$  为爆压; $\rho$  为炸药的密度; $V_0$  为初始相对体积. 空气采用 MAT\_NULL 空材料模型和线性多项式状态方程 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL,即

$$p = c_0 + c_1 \mu + c_2 \mu^2 + c_3 \mu^3 + (c_4 + c_5 \mu + c_6 \mu^2) E, \quad \mu = \rho / \rho_0 - 1.$$
 (2)

式(2)中: $E$  为单位体积内能; $\rho$  为质量密度; $\rho_0$  为参考质量密度. 线性多项式状态方程遵守 Gamma 定律, $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$  均为实常数. 空气的材料输入参数,如表 2 所示.

表 1 炸药的材料参数

Tab. 1 Material parameters of dynamite

$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$D/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$P_{CJ}/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$	$V_0$
1 630	6 713	18.5	540.9	9.4	4.5	1.1	0.35	$8 \times 10^9$	1.0

表 2 空气的材料参数

Tab. 2 Material parameters of air

$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$E_0/\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$	$V_0$
1.290	0	0	0	0	0.4	0.4	0	$2.5 \times 10^5$	1.0

模型的冲击波超压和正压作用时间及其与经验公式结果的比较如图 1 所示. 从图 1 可知:对于冲击波超压,总体而言,比例距离  $\bar{R} \geq 1.0$  后,各个经验公式的计算结果比较接近并随着  $\bar{R}$  的增大误差越来越小. 文中的计算结果与经验公式结果吻合较好,而与 Henrych 公式的计算结果最为接近. 对于冲击波正压作用时间,总体而言,比例距离  $\bar{R} \geq 0.5$  后,文中的计算结果与经验公式结果吻合较好,而与 Sadovskyi 公式结果最为吻合. 由此可见,文中的计算模型及各参数的取值合理,计算结果可信.

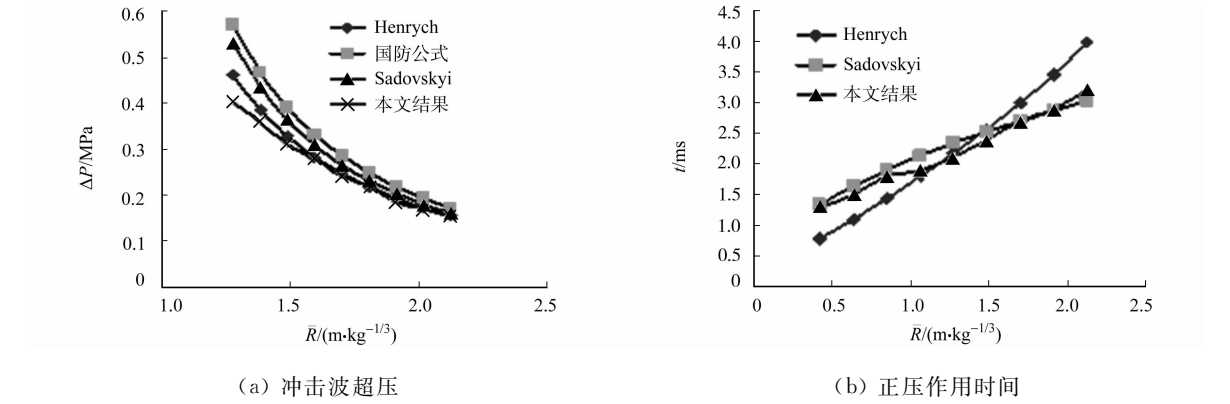


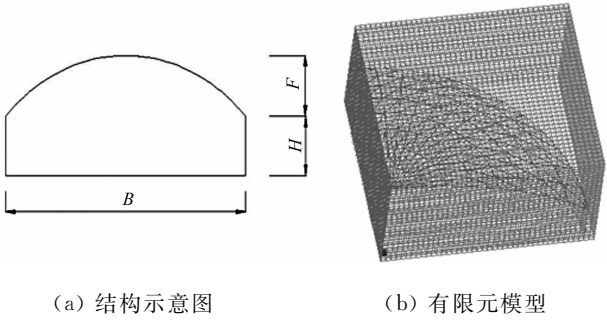
图 1 数值模拟与经验公式结果的比较

Fig. 1 Comparison of the results between numerical simulation with the empirical formula

1.2 球壳钢结构模型

图 2(a)为单层球面钢网壳结构,周边刚性支座. 结构矢高  $F$  为 8 m,跨度  $B$  为 40 m,墙体高度  $H$  为 10 m,矢跨比  $F/B$  分别取 1/4,1/5 和 1/6. 单层钢网壳结构的杆件选用 Q235 钢  $\phi 83 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  无缝钢管,焊接球节点.

内爆炸有限元数值计算模型取 1/4 结构实体建模,如图 2(b)所示. 考虑到空气、炸药、结构体和地面之间的相互作用,炸药和空气选用单元 SOLID 164,结构体和地面选用单元 SHELL 163. 采用 ALE(arbitrary lagrange-euler)算法,取 ALE 空间为  $42 \text{ m} \times 42 \text{ m} \times 26 \text{ m}$ ,边界条件为透射. 炸药采用  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  立方体,置于结构中心距地面 1.2 m 处,整个结构包裹在空气中. 分析计



(a) 结构示意图 (b) 有限元模型

图 2 单层球面网壳结构

Fig. 2 Spherical reticulated shells

算结构内爆炸作用下的冲击波压力场分布时,壳体结构、地面和墙体视为刚体,考虑杆件及节点自重.

2 结构内的冲击波超压计算与分析

2.1 炸药在结构内爆炸的全过程模拟

炸药在结构内爆炸后,爆炸冲击波急剧向四周膨胀.随着传播距离的增大,冲击波以球面波的形式向外扩张,并随着正压区波阵面的不断拉宽,入射波阵面压力不断衰减.冲击波遇到地面和墙面等刚体后,在结构内部形成复杂的反射波,与入射波汇聚并形成复杂运动.炸药在单层球面钢网壳结构中爆炸的全过程演变模拟计算结果,如图 3 所示.

从图 3 可知:在爆炸的初始阶段,爆炸冲击波的运动方式与自由空爆相同,但在  $t=0.022\ 420\ \text{s}$  后,入射冲击波对网壳屋顶产生冲击作用并穿越屋面.入射波继续向外扩张将遇到墙面等刚体反射,从而在结构内形成爆炸冲击波的复杂运动.

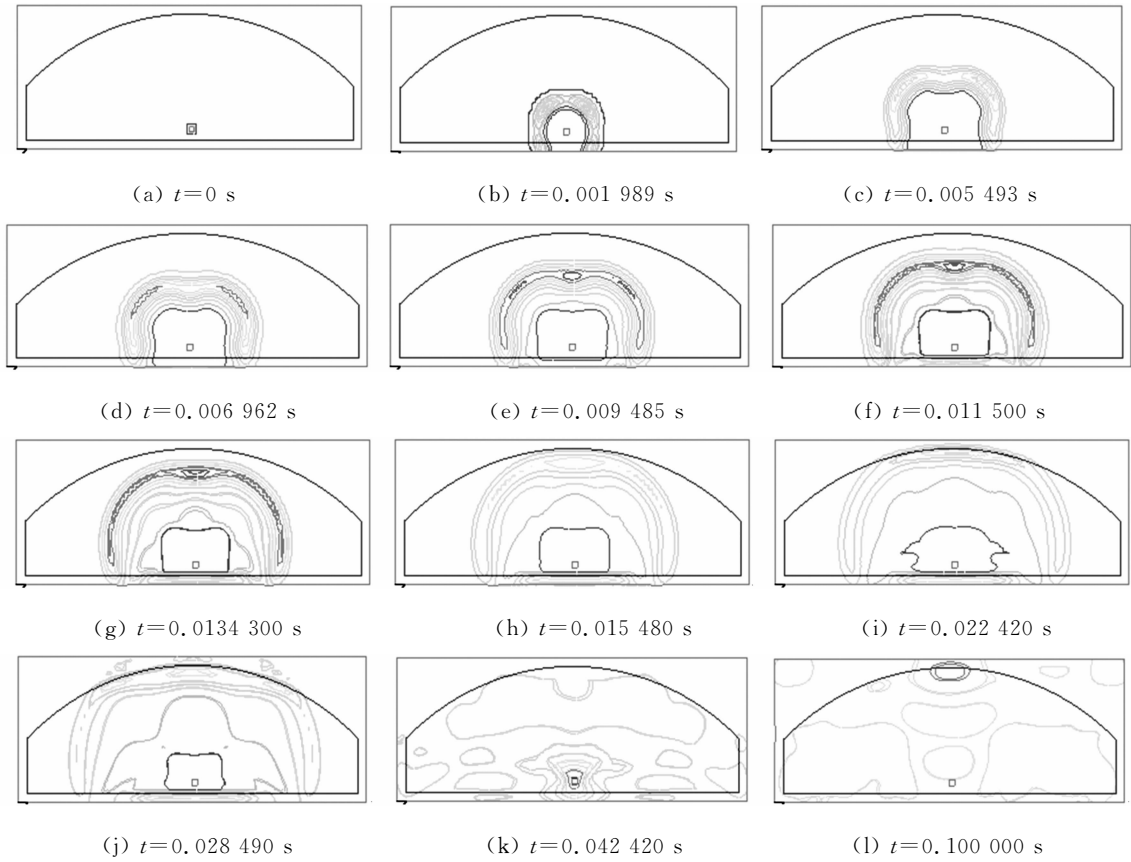


图 3 炸药在结构中心内爆炸的全过程演变图

Fig. 3 Whole process evolution diagram of internal explosion in the structural center

2.2 内爆炸冲击波传播规律

爆炸点地面处的空气压力历程图,如图 4 所示.图 4 中: $\Delta P$  为冲击波超压; $t$  为历程时间.从图 4 可知:爆炸点下方地面处只承受马赫反射波 1 次冲击作用,冲击波压力达到峰值后急速衰减,冲击波压力-时间曲线呈现典型的爆炸冲击波运动状态.按文献[15]的公式计算,超压峰值为 0.92 MPa,而本文结果为 0.91 MPa,仅相差 1.08%.

爆心上方 11 m 处的空气压力历程图,如图 5 所示.从图 5 可知:爆炸冲击波经过地面多次反射,冲击波压力时程曲线出现了多个波峰,第 1 个波峰为入射波效应,其他波峰为反射波效应;入射波超压峰值为 0.287 MPa,反射波峰值为 0.193 MPa.在遇到四周墙体和屋面形成反射波之前,仅有地面反射冲击波.此时,按文献[9]的经验公式计算的反射波超压峰值为 0.175 MPa,比本文数值模拟计算结果小 0.018 MPa,仅相差 9.3%.这表明,本文数值模拟计算结果可信.

从图 5 还可知:爆炸冲击波在有围护的结构内传播后,出现多个反射波峰值,波形更复杂,其中最大

的反射波峰值为 0.159 MPa,表明距离爆心越远,冲击波的运动规律越复杂.

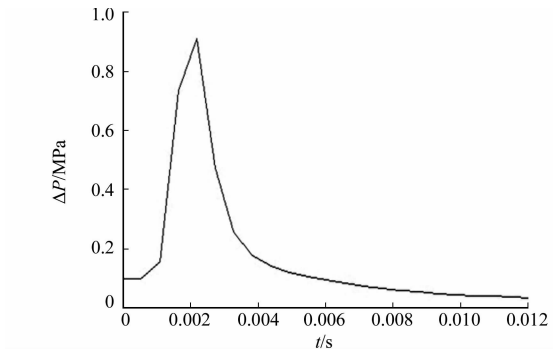


图 4 地面处爆炸压力-时程图  
Fig. 4 Explosive pressure-time curve near ground surface

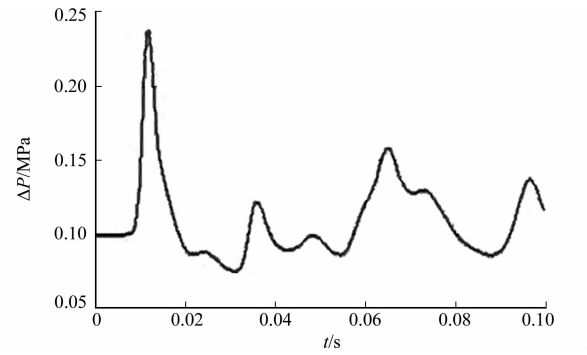


图 5 爆心上方 11 m 处爆炸压力-时程图  
Fig. 5 Explosive pressure-time curve 11 m above the explosion center

2.3 结构内的冲击波超压计算

按前述内爆炸有限元模型,对大跨球面钢网壳结构在内爆炸下的冲击波压力进行数值模拟计算,即可得到球壳结构内空间任意点处的冲击波超压值. 由于爆炸冲击波在结构内的传播呈现出时空不同步的复杂特性,使其定量计算困难. 为简化计算,对于不同跨度和矢跨比的球面钢网壳结构,取结构内部距爆心不同距离的 22 个测点,提取其冲击波超压,得到各测点的超压时程曲线,如图 6 所示.

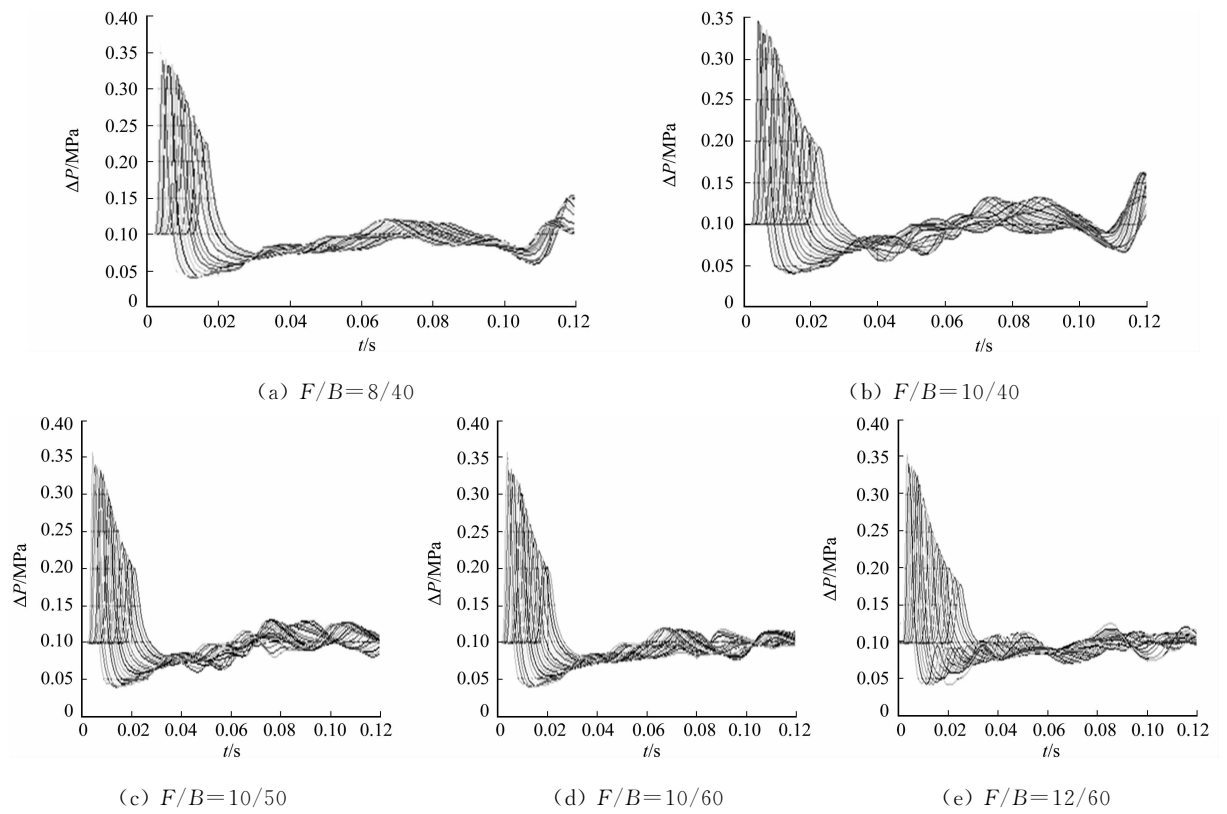


图 6 不同矢跨比下的结构内冲击波压力-时程图

Fig. 6 Explosive pressure-time curve inside the spherical reticulated shell with different height-to-span ratios

然后,对各个测点的超压峰值,以对比距离为函数变量进行拟合,可得到不同跨度和矢跨比的球面钢网壳结构在内爆炸作用下的冲击波超压计算公式. 根据冲击波超压与对比距离的关系,设内爆炸冲击波超压的拟合公式为

$$\Delta P_i = k_1/\bar{R} + k_2/\bar{R}^2 + k_3/\bar{R}^3 + k_4, \tag{3}$$

$$\bar{R} = R/\sqrt[3]{W}. \tag{4}$$

式(3)~(4)中: $k_i(i=1,2,3,4)$ 为拟合曲线系数; $W$ 为 TNT 当量; $R$ 为计算点距爆心的距离; $\bar{R}$ 为对比

距离; $\Delta P_i$  为爆炸冲击波超压峰值. 式(3)的拟合曲线系数,如表 3 所示. 表 3 中: $\delta_{\max}$ 为最大误差; $k^2$  为拟合度.

表 3 拟合曲线系数  
Tab.3 Coefficients of fitting curve

$F/B$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$ \delta_{\max} $	$k^2$	$\bar{R}$ 适用范围
8/40	0.152 4	0.248 3	0.530 2	-0.022 5	0.051 8	0.999 7	$0.50 \leq \bar{R} \leq 2.71$
10/40	0.433 5	-0.020 4	0.606 9	-0.107 0	0.164 0	0.998 6	
10/50	0.439 3	-0.032 7	0.611 9	-0.106 9	0.128 7	0.999 0	
10/60	0.190 6	0.211 5	0.540 5	-0.033 6	0.039 0	0.999 8	
12/60	0.273 1	0.142 3	0.557 5	-0.060 7	0.124 9	0.999 3	

不同矢跨比下的爆炸冲击波超压拟合曲线,分别如图 7 所示.

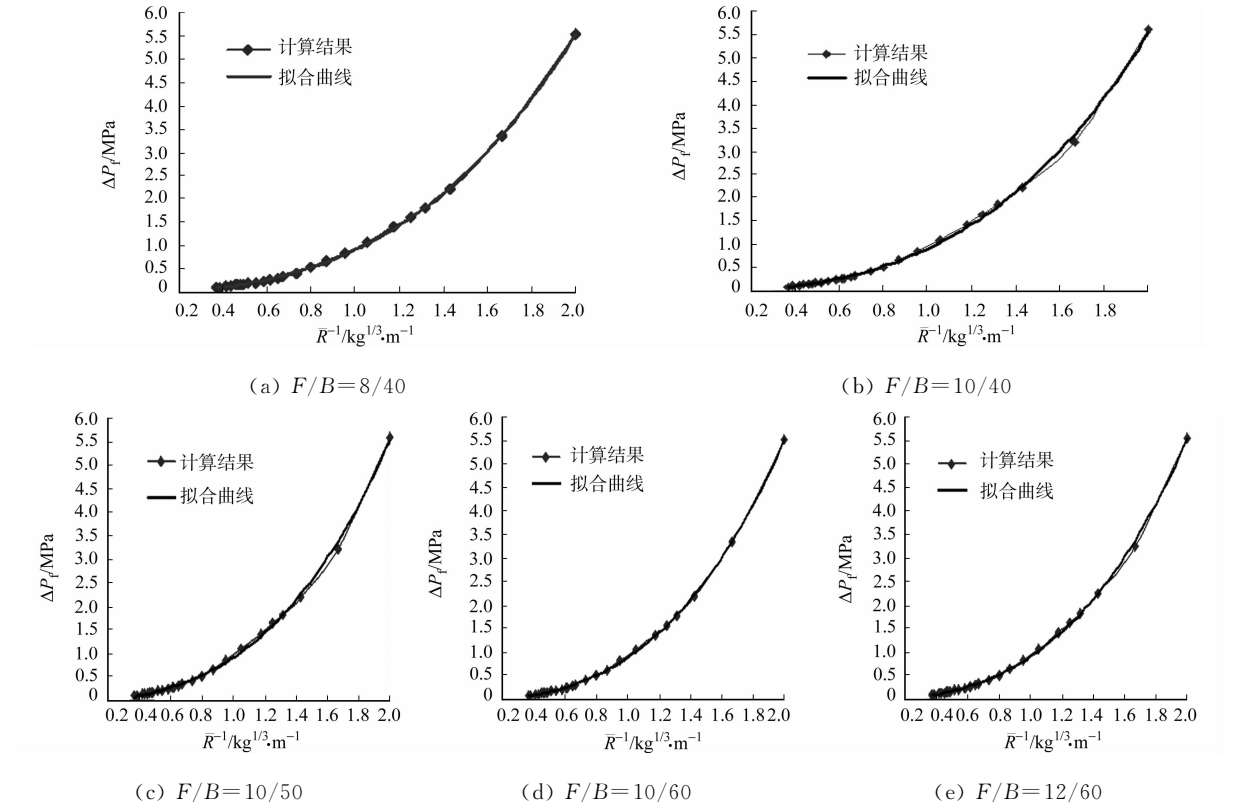


图 7 不同矢跨比下的结构内冲击波超压拟合图

Fig. 7 Explosive overpressure fitting curve inside the spherical reticulated shell with different height-to-span ratios

3 结论

上述研究表明,采用通用有限元 LS-DYNA 程序建立的内爆炸下大跨球面钢网壳结构数值模拟计算模型,可用于大跨空间结构的内爆炸数值模拟计算和分析. 通过研究大跨球面钢网壳结构在内爆炸下的冲击波传播、反射和峰值出现规律,可以发现,炸药在结构内爆炸下,球面钢网壳结构受到的爆炸冲击效应更为复杂,可能需要同时承受入射冲击波和反射波或复合波的冲击作用.

应用所建模型对爆炸冲击波超压的数值计算分析,给出了内爆炸下不同跨度和矢跨比结构的冲击波超压计算公式,为量化确定内爆炸下大跨钢网壳结构的爆炸荷载提供了依据,并可供球壳钢结构防爆设计参考.

参考文献:

[1] MLAKAR P F,CORLEY W G,SOZEN M A,et al. The Oklahoma city bombing: Analysis of blast damage to the murray building[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,1999,12(3):113-119.

[2] 金丰年,贾金刚,徐迎,等. 恐怖爆炸下建筑物连续性倒塌研究进展[J]. 工业建筑,2007,37(12):113-118.

[3] 杜修力,廖维张,田志敏,等. 爆炸作用下建(构)筑物动力响应与防护措施研究进展[J]. 北京工业大学学报,2008,34(3):277-287.

[4] ZAPATA B J, WEGGEL D C. Collapse study of an unreinforced masonry bearing wall building subjected to internal blast loading[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2008, 22(2): 92-100.

[5] 高轩能,刘颖,王书鹏. 基于 LS-DYNA 的大空间柱壳结构爆炸波压力场分析[J]. 振动与冲击,2011,30(9):70-75.

[6] 高轩能,王书鹏,江媛. 爆炸荷载下大空间结构的冲击波压力场分布及泄爆措施研究[J]. 工程力学,2010,27(4): 226-233.

[7] 杨科之,杨秀敏,王年桥. 内爆荷载作用下结构等效静载计算方法[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2002,3(4):31-33.

[8] 李忠献,刘杨,田力. 单侧隧道内爆炸荷载作用下双线地铁隧道的动力响应与抗爆分析[J]. 北京工业大学学报, 2006,32(2):173-181.

[9] TM5-1300. Structures to resist the effects of accidental explosion[M]. [s. l. ]; Department of the Navy Publication NAVFAC P-397, 1969:1-9.

[10] ISHIKAWA N, BEPPU M. Lessons from past explosive tests on protective structures in Japan[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(9): 1535-1545.

[11] RAFTOYIANNIS I G, SPYRAKOS C C, MICHALTSOS G T. Behavior of suspended roofs under blast loading [J]. Engineering Structures, 2007, 29(1): 88-100.

[12] 宋卫东,吴开腾,宁建国. 机库内爆炸效应的数值模拟研究[J]. 兵工学报,2007,28(11):1329-1334.

[13] 高轩能,王书鹏. 大空间柱面网壳结构在爆炸荷载下的动力响应[J]. 振动与冲击,2009,28(10):68-73.

[14] 高轩能,王书鹏. 大空间柱壳结构爆炸动力响应的 Ritz-POD 数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(2):64-70.

[15] 李翼祺,马素贞. 爆炸力学[M]. 北京:科学出版社,1992:275-284.

# Analysis for Shock Wave Overpressure of Spherical Steel Reticulated Shell under Internal Explosion

DUAN Lei-Lin, GAO Xuan-neng, JIANG Yuan

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Using LS-DYNA FEM software, a numerical model simulating internal blast in the large-space spherical steel reticulated shell was established for the numerical simulation of the explosion inside the shells. Investigating the propagation, reflection and overpressure peak of the shock waves within the large-space spherical steel reticulated shell under internal blast, it is found that the shock effects to the spherical steel reticulated shell are complicated and that the reticulated shell may be simultaneously subjected to the impact of incident shock waves and reflected waves or combination waves under the internal explosion. Based on the results of the explosive shock wave overpressure by the numerical model, the formulae for shock wave overpressure of the large-space spherical reticulated shell with the different spans and height-to-span ratios under internal explosion are obtained.

**Keywords:** internal explosions; spherical steel reticulated shell; shock waves; overpressure; numerical simulation

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 方德平)