

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.04.017



空间高度对球面网壳结构内爆炸响应的影响

高轩能, 付诗琪

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:基于修正后的 Johnson-Cook 材料模型,应用 ANSYS/LS-DYNA 建立 K8 型单层球面网壳计算模型,对内爆炸下不同空间高度的结构爆炸响应进行计算和分析。首先,分析结构内爆炸冲击波传播规律,验证模型参数选取的可行性;其次,讨论内爆炸作用下球面网壳的动力响应,对比分析不同本构模型对爆炸响应的影响;最后,定义下部支承结构所围体积占结构所围总体积的比值为空间高度系数,讨论空间高度系数对墙面未开洞和墙面开洞球面网壳动力响应的影响。结果表明,爆炸冲击波在球面网壳结构角部有汇聚效应,与反射冲击波共同作用,严重影响球面网壳结构的动力响应;对于墙面未开洞的球面网壳,爆炸响应受反射冲击波影响较大;对于墙面开洞的球面网壳,爆炸响应受空间高度系数影响较大。基于研究结果给出了球面网壳结构在内爆炸下防爆和抗爆设计的合理空间高度系数建议值。

关键词:球面网壳;内爆炸;空间高度;动力响应;冲击荷载

中图分类号:TU312.3;O383.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)04-0107-08

Influence of space height on the internal explosion response of single-layer spherical reticulated shell

Gao Xuanneng, Fu Shiqi

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, P. R. China)

Abstract: Based on the modified Johnson-Cook material model, ANSYS / LS-DYNA was used to establish the model of K8 single-layer spherical reticulated shell, and the structural explosion responses were calculated and analyzed with different space heights. Firstly, the propagation law of the shock waves inside the structure was analyzed, and the feasibility of parameters selection was verified. Secondly, the dynamic responses of the spherical reticulated shell under the internal explosion were discussed, and the influence of different constitutive models on the explosion responses was comparative analyzed. Finally, the ratio of the volume enclosed by lower supporting structure to the total volume surrounded by the whole structure was defined as a space height coefficient. The influence of the space height coefficient on the dynamic responses of spherical latticed shell (with or without holes on wall) was studied and discussed. The results show that the shock waves have a converging effect at the corner of the spherical shell structure, combined with the

收稿日期:2016-11-10

基金项目:国家自然科学基金(51278208);福建省科技计划(2012Y4010)

作者简介:高轩能(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事工程结构灾害控制研究,(E-mail)gaoxn117@sina.com。

Received:2016-11-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51278208); Fujian Province Science and Technology Program (No. 2012Y4010)

Author brief: Gao Xuanneng (1962-), professor, doctoral supervisor, main research interest: disaster control of engineering structure, (E-mail)gaoxn117@sina.com.

reflected shock waves, which may seriously affect the dynamic responses of the spherical shell. For the spherical shell with wall no openings, the explosion responses were greatly affected by the reflected shock wave, and for the spherical shell with wall openings, the explosion responses were greatly affected by the space height coefficient. Based on the research results, the reasonable space height coefficient of explosion-resistant design on spherical shell structure under internal explosion was proposed.

Keywords: spherical reticulated shell; internal explosion; space height; dynamic response; impact load

单层球面网壳结构是一种典型的空问结构,多用于地标性建筑。此类建筑通常人员密集,一旦受到爆炸袭击,将造成极为恶劣的社会影响,故研究大空问结构在内爆炸作用下的动力响应,对于结构抗爆设计具有重要的工程价值^[1]。

爆炸冲击荷载是典型的动力荷载,具有作用时间短、峰值大的特点,建筑结构在爆炸冲击荷载作用下的结构响应十分复杂。高轩能等^[2-5]建立钢网壳结构数值计算模型,运用 POD 法分解钢网壳内表面的冲击波超压,解决了冲击波荷载的时空差异性,进而对单层球面钢网壳在内爆炸作用下的动力响应进行了数值模拟计算,探索了不同参数变化对结构动力响应的影响。李忠献等^[6-8]通过分析钢材的 J-C 本构模型,总结了爆炸荷载作用下钢结构的动力反应,在此基础上,分析损伤累积效应和应变率对钢材的影响,研究柱子以及整体结构的动力响应和破坏模式。Wu 等^[9-10]分析了比例距离对近地空爆作用下单层框架结构动力响应的影响,结果表明,当比例距离小时,冲击波对结构响应的影响较大;当比例距离大时,地震动对结构响应的影响较大。尽管研究者对钢结构在爆炸作用下的性能开展了很多研究,取得了一些有益成果,但尚未开展内爆炸下不同空问高度对球面网壳结构响应影响的研究。因此,有必要探索不同空问高度对球面网壳内爆炸的响应特性。

笔者采用显式动力分析软件 LS-DYNA 建立跨度为 40 m 的 K8 型单层球面网壳,进行结构内爆炸效应的数值模拟与计算,分析球面网壳结构内爆炸作用下的动力响应。从工程抗爆角度出发,提出空问高度的概念并定义空问高度系数,讨论该系数对球面网壳结构动力响应的影响,进而寻求最优的空问高度系数,为抗爆设计提供最优的结构型式。

1 数值计算模型

结构计算模型选用 K8 型单层球面网壳结构,按《空问网格结构技术规程》(JGJ 7—2010)^[11]进行设计。网壳跨度 B 取 40 m,矢高 f 取 8 m,杆件采

用 Q235 钢 $\phi 83 \times 10$ 无缝钢管,通过焊接球节点连接。网壳考虑周边支承,下部支承结构采用 H 型钢,柱子高度 H 为 10 m、柱距 6 m,柱子底端与刚性地面固结。屋面围护结构和墙面围护结构采用轻质金属材料,通过檩托与主体结构相连。建立 $42 \text{ m} \times 42 \text{ m} \times 42 \text{ m}$ 的空气域,包围整个结构,空气域边界为透射边界,以模拟无限区域爆炸。考虑球形装药,通过 LS-DYNA 中体积分数法定义炸药半径 0.353 m(相当于 300 kg 的 TNT 炸药量),炸点高度 1.4 m。空气和炸药按连续介质考虑,采用 8 节点 6 面体单元 Solid164;网壳杆件,檩托和下部支承柱均采用梁单元 Beam161;围护结构和地面采用壳体单元 Shell163,以考虑冲击波的反射作用。爆炸过程采用 ALE(Arbitrary Lagrange-Euler)算法,考虑流固耦合,即空气冲击波与围护结构和地面之间的相互作用。结构自重对内爆炸冲击有减小作用,为简化计算并偏于安全,忽略结构自重的影响。数值计算模型如图 1 所示。

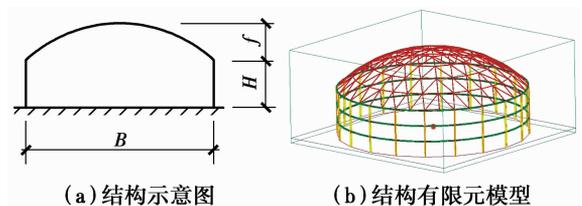


图 1 数值计算模型

Fig. 1 Numerical calculation model

采用显式动力分析软件 LS-DYNA 进行爆炸模拟,K8 型球面网壳结构材料采用 Johnson-Cook 本构模型^[12-15],其基本表达式为

$$\sigma = (A_1 + A_2 \epsilon^n)(1 + A_3 \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中: σ 为等效流动应力; ϵ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为相对应变率; T^* 为相对温度; A_1 、 A_2 、 A_3 、 n 、 m 为待定参数,可通过试验确定。

由于爆炸产生的冲击波是一种极强的冲击荷载,钢材在高速冲击荷载作用下,其力学性能和失效特性相较于静力荷载而言将发生显著变化,主要表现在材料强度和失效应变的提高,即应变率效应和

应变强化效应。通过霍普金森压杆试验对 J-C 本构模型进行参数标定,结果见表 1。

表 1 Q235 钢的 J-C 本构模型参数标定结果^[12]

Table 1 Q235 J-C constitutive model parameters calibration results

A_1	A_2	n	A_3
320.755 6×10 ⁶	582.102×10 ⁶	0.382 3	0.025 5

炸药采用高爆炸药模型 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 和 JWL (Jonse-Wilkins-Lee) 状态控制方程,爆炸冲击波压力为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为输入参数; V 为相对体积; E_0 为初始内能。TNT 炸药的材料参数见表 2。

空气采用空材料模型 MAT_NULL 和线性多项式状态控制方程 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL,即

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (3)$$

式中: $\mu = \frac{\rho}{\rho_0}$; E 为单位体积内能; ρ 为空气体积密度; ρ_0 为参考密度。空气的材料参数见表 3。

表 2 炸药的材料参数

Table 2 Material parameters of explosive

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

表 3 空气的材料参数

Table 3 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
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10 ⁵	1.0

2 球面网壳结构内爆炸响应分析

2.1 内爆炸冲击波

炸药在结构内部爆炸,空气冲击波以球面波的形式向外扩张。首先,冲击波波阵面与刚性地面相接处,发生反射现象,产生的反射波与入射波相叠加,出现马赫反射现象;随后,马赫波波阵面和入射波波阵面先后接触屋面围护结构或墙面围护结构,由于围护结构的阻挡,球面网壳顶部以及墙体上部角点处出现冲击波汇集现象;最后,围护结构与主体结构之间的连接构件因达到失效应变而退出工作,结构泄爆,一部分冲击波向结构外部传播,而另一部分冲击波经反射回到结构内部。此时,结构内部冲击波分布变得紊乱,冲击波相互叠加增强或者抵消减弱。事实上,对于结构内部冲击波的无规则运动,很难通过经验和理论模型进行预测,这是内爆炸问题复杂性的关键所在。ALE 算法可以有效地解决这一问题,尤其是当结构内部冲击波出现紊乱后,ALE 算法仍可以有效地模拟这一过程,这是经验和理论模型无法做到的^[16-17]。

分别选取弹性围护结构和刚性围护结构进行模拟计算,以对比分析结构内部冲击波超压。图 2(a)

为爆炸点正上方的冲击波压力时程曲线。该区域为规则反射区,受入射波与反射波共同作用,反射波大于入射波。第 1 波峰为入射波,理论上其不受围护结构刚度的影响,该峰值超压为 0.136 MPa,由经验公式计算可知该处冲击波超压为 0.186 MPa,模拟计算结果比经验公式小 27%,对爆炸冲击波来说,计算精度已经很好,表明本文模型的各项参数取值合理可信。从图 2(a)可以看出,第 2 波峰为反射波,考虑围护结构弹性时,冲击波超压峰值为 0.144 MPa,围护结构按刚性计算时,冲击波超压峰值为 0.202 MPa,是按弹性围护结构计算结果的 1.4 倍。图 2(b)为结构内近地面位置处提取的爆炸冲击波压力时程曲线,该处位于不规则反射区,只受到马赫波作用,围护结构按刚性计算和考虑弹性时,都仅有 1 个波峰,其峰值超压分别达到 0.212 MPa 和 0.163 MPa,分别是第 1 波峰入射波的 1.56 倍和 1.2 倍,表明冲击波的叠加效应显著,刚性围护结构更增强了这种叠加效应^[18]。

为研究爆炸冲击波在 K8 型单层球面网壳内部的传播特性,根据前述所建模型进行了结构内爆炸数值仿真模拟计算,并选取结构内表面特征测点 A 点、B 点和 C 点的冲击波压力时程进行分析。爆炸

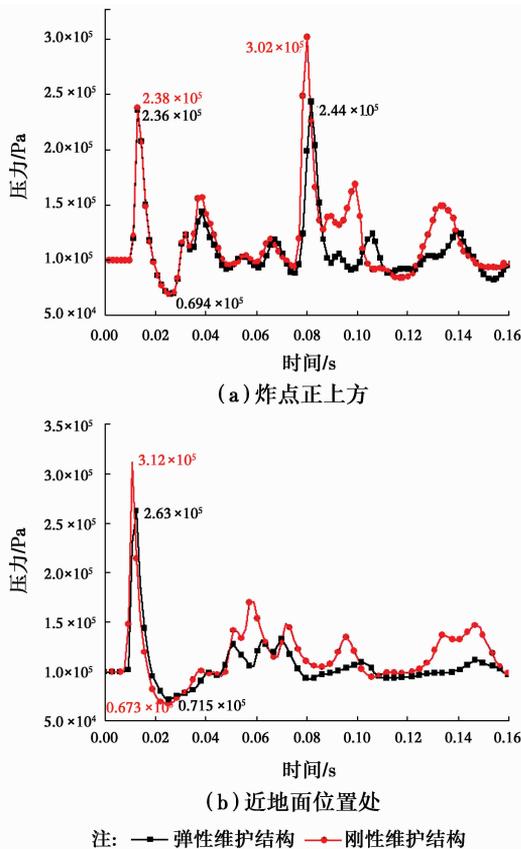


图 2 结构内的冲击波压力-时程曲线图

Fig. 2 Pressure-time curve of shock waves inside the structure

点位于结构中心,围护结构按弹性考虑,计算结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,球面网壳穹顶 A 点距离爆炸点最近,先受到入射冲击波作用,其后又受到反射波的二次冲击作用且峰值压力更大,随后还出现了冲击波负压。球面网壳与墙体交界处的 B 点和柱底位置 C 点,峰值压力明显比入射波大,表明主要受马赫波作用,冲击波的叠加效应和角部聚集效应显著,与文献[19]的结果类似。

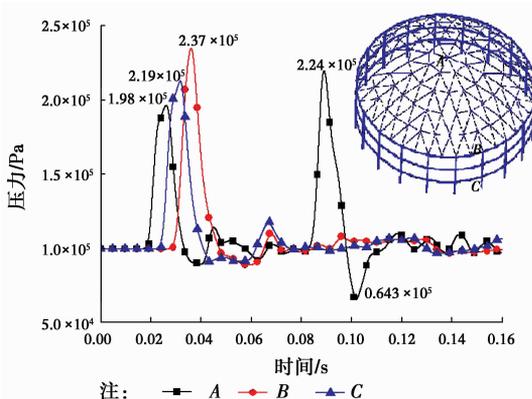


图 3 结构内表面测点 A、B、C 处的冲击波压力-时程曲线图

Fig. 3 Pressure-time curves of the measuring point A, B and C on the inner surface of the structure

2.2 结构的爆炸响应

为研究 K8 型单层球面网壳在内爆炸下的爆炸响应,选取典型杆件 R1、R2、R3、R4、R5 和典型节点 N1、N2、N10、N26、N50 为分析对象,具体位置如图 4 所示。

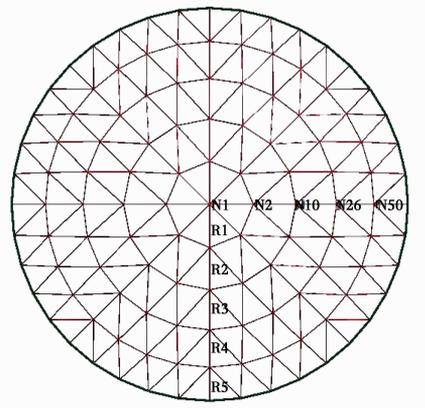


图 4 典型节点和杆件标记图

Fig. 4 Typical nodes and elements chart

2.2.1 杆件应力响应 图 5 为典型杆件 R1、R2、R3、R4、R5 的应力时程曲线图。从图 5 中可以看到,球面网壳杆件的爆炸应力响应总体上具有类似的变化规律,各杆件的应力增量响应以零为平衡位置,上下波动,但增量值都较小。临近跨中的杆件 R1、R2 和支座附近的杆件 R5 应力响应较大,其余杆件的应力响应较小。比较图 3 和图 5 的峰值时刻点还可以发现,杆件应力峰值的响应时刻明显滞后于冲击波峰值出现的时刻。

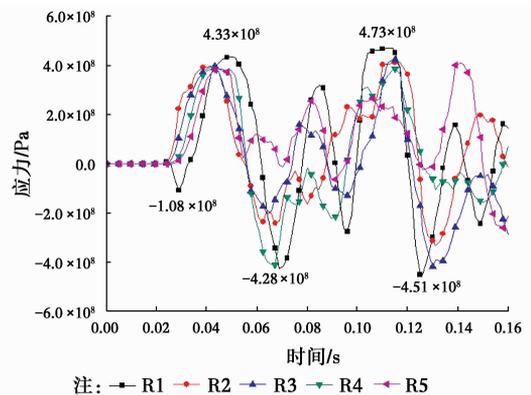


图 5 典型杆件的应力响应时程曲线图

Fig. 5 Axial stress responses of typical elements

2.2.2 节点位移响应 图 6 为典型节点 N1、N2、N10、N26、N50 的竖向位移时程曲线图。如图 6 所示,N1 节点位于球面网壳顶部,0.024 s 左右其竖向位移开始增大,随后 N2、N10、N26、N50 的竖向位移

陆续开始变化;0.045 s 左右汇聚在屋面与墙面之间的空气冲击波开始往结构内部反射,N26、N50 所处区域的结构内表面压力较外表面压力低,N26 和 N50 被拉回至原点,而 N1、N2、N10 远离角点位置,不受影响,竖向位移继续增加。

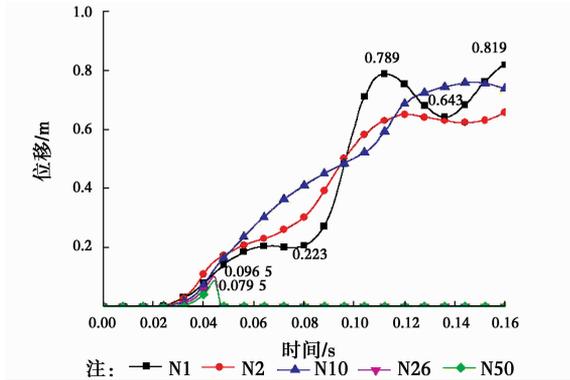


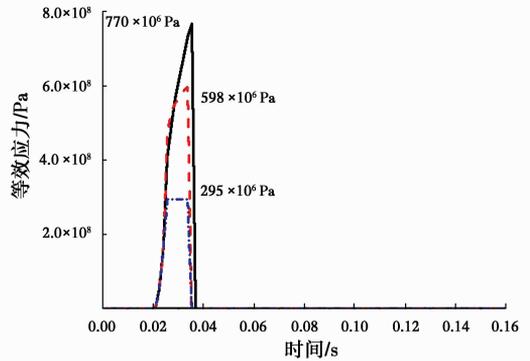
图 6 典型节点的竖向位移时程曲线

Fig. 6 Displacement responses of typical nodes

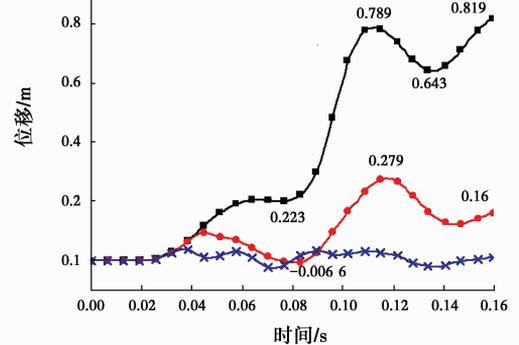
从图 6 中还可以很明显地看出,由于反射波的二次作用,N1、N2、N10 后期按波浪式增加,且增幅较大。尤其是球面网壳穹顶附近的节点 N1 和 N2 的位移响应,出现了两次快速增加,然后趋于稳定。N1、N2、N10 的位移响应可以达到 700~800 mm,远远超过结构的竖向位移设计限值。

2.3 本构模型对爆炸响应的影响

选择理想弹塑性模型、Cowper-Symonds 模型和 Johnson-Cook 模型,其准静态屈服强度由霍普金森试验测得为 295 MPa^[12]。分析不同本构模型对内爆炸下球面网壳动力响应的影响,结果如图 7 所示。理想弹塑性模型不考虑应变率效应和应变强化效应,连接构件失效时应力为准静态屈服强度。内部冲击荷载作用下,围护结构瞬间与主体结构分离,冲击波外泄,主体网壳受到“保护”,位移响应很微弱。Cowper-Symonds 模型仅考虑应变率效应,不计应变强化效应。内爆炸作用下,应变率效应使连接构件强度明显提高,失效时的应力超过理想弹塑性的 2 倍,但相较于同时考虑应变率效应和考虑应变强化效应的 Johnson-Cook 模型,连接构件强度仍较低。内爆炸冲击波使连接构件断裂,结构充分泄爆,因此,Cowper-Symonds 模型下球面网壳的位移响应较使用 Johnson-Cook 模型时减小近 3 倍。由此可见,若不考虑材料的应变率效应和应变强化效应,将大大低估球面网壳的动力响应,使计算分析结果偏于不安全。



注:—Johnson-Cook本构模型 - - - Cowper-Symonds本构模型
· · · 理想弹塑性本构模型
(a) N1处连接构件的等效应力-时间曲线



注:—Johnson-Cook本构模型 - - - Cowper-Symonds本构模型
· · · 理想弹塑性本构模型
(b) N1的竖向位移-时间曲线

图 7 不同本构模型的响应对比图

Fig. 7 Comparisons of responses of with different constitutive models

3 空间高度变化对结构爆炸响应的影响分析

3.1 结构空间高度系数

研究发现,爆炸冲击波的峰值压力及其对结构的作用效应与结构内部的空间大小密切相关。为探寻结构内部空间大小对内爆炸下结构响应的影响,定义结构空间高度系数 α 为

$$\alpha = \frac{\frac{B^2 \pi}{4} \cdot H}{\frac{B^2 \pi}{4} \cdot H + \frac{\pi}{3} \cdot (3R - f) \cdot f^2} \quad (4)$$

$$R = \frac{f^2 + \frac{B^2}{4}}{2f} \quad (5)$$

式中: α 为结构空间高度系数,为下部支承结构所围体积与整个结构所围总体积的比值; B 为结构跨度; f 为球面网壳矢高; H 为支承结构高度; R 为球面网壳半径。

采用前述所建数值计算模型,相关计算参数为:

球面网壳跨度 $B=40\text{ m}$ 、 $f=8\text{ m}$ 、矢跨比 $f/B=0.2$ 、TNT 炸药 300 kg 、炸点高度 1.4 m 、中心爆炸。取 α 分别为 0.487 、 0.587 、 0.655 、 0.704 、 0.740 、 0.769 ，相对应的支承结构高度 H 分别为： 4 、 6 、 8 、 10 、 12 、 14 m 。按上述参数对内爆炸下的球面网壳结构进行数值仿真计算，并分别考虑墙面不开洞和开洞两种情形。

3.2 墙面不开洞

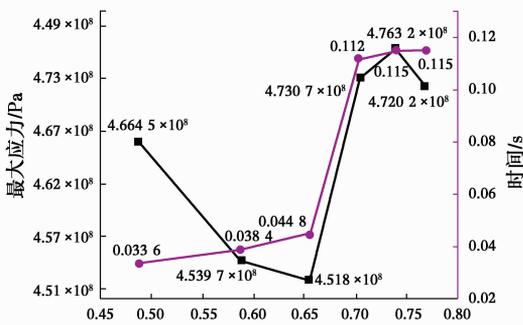
从图 5 和图 6 可知，内爆炸下球面网壳的最大应力响应和最大位移响应主要发生在穹顶附近。为此，取杆件 R1 和节点 N1 分别作为特征杆件和特征节点，分析空间高度系数变化对球面网壳动力响应的影响。图 8(a)为空间高度系数 α 与 R1 杆件最大应力响应峰值及响应时间关系图。从图 8(a)可以看出，随着空间高度系数增大，R1 杆件的应力响应先逐渐减小后迅速增大，在 α 为 0.7 左右，应力响应随 α 的增大迅速增大。结合响应时间曲线还可以看出， α 较小时，R1 杆件的应力响应峰值较大但响应时间较早，表明空间高度较小时，结构的应力响应主要由入射冲击波控制。当空间高度系数 α 为 $0.55\sim 0.70$ 时，R1 杆件的应力响应曲线出现极小值，且响

应时间较早，表明由于空间高度的增大，作用于结构上的作用是衰减后的入射波。当空间高度系数 α 大于 0.7 后，R1 杆件的应力响应峰值迅速增大，且响应时间较迟，表明反射冲击波起主要作用，由于反射波往往远大于入射波，因此，R1 杆件的应力响应反而增大。由此可见，选择适当的空间高度可有效降低球面网壳结构的内爆炸应力响应。

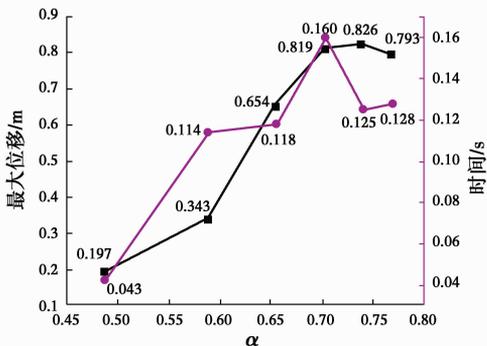
图 8(b)为空间高度系数 α 与 N1 节点最大位移响应峰值及响应时间关系图。从图 8(b)可以看出，空间高度系数 α 小于 0.6 时，N1 节点的位移响应较小，相应的响应时间较短，表明 N1 节点的位移响应主要由入射冲击波控制。空间高度系数 α 大于 0.6 后，N1 节点的最大位移响应随 α 的增大快速增大，表明此时结构的最大位移响应主要受反射冲击波的影响较大，但由于空间高度的增加，冲击波超压峰值不断衰减，N1 节点处的最大位移响应值增幅渐缓，甚至有所下降。

3.3 墙面开洞

为模拟实际结构，按图 9 所示在墙面开洞，分别提取 R1 杆件和 N1 节点的最大应力和最大位移，并与墙体未开洞情况进行对比，结果如图 10 所示。



注：—■— stress —●— time
(a) 空间高度系数 α -R1杆件应力响应图



注：—■— displacement —●— time
(b) 空间高度系数 α -N1节点位移响应图

图 8 墙面未开洞情形下球面网壳的动力响应

Fig. 8 Dynamic responses of spherical reticulated shell with wall no openings

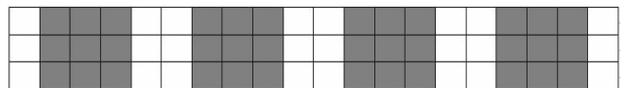


图 9 墙面开洞示意图

Fig. 9 Sketch map of the wall openings

图 10(a)和(b)分别为两种工况下 R1 杆件的最大应力响应对比图和 N1 节点的最大位移响应对比图。从图 10 可以看出，空间高度系数 α 小于 0.65 时，即结构高度 H 小于 8 m 时，墙面开洞与否对结构的响应影响不大，结构的最大应力响应和最大位移响应主要由入射冲击波控制。空间高度系数 α 大于 0.65 后，墙面开洞使应力响应峰值和位移响应峰值明显低于墙面未开洞情况，特别是当 α 大于 0.70 后，即结构高度 H 大于 10 m 时，墙面开洞可导致结构的最大应力响应和最大位移响应大幅降低，表明墙面开洞使结构产生了泄爆效应，使反射冲击波效应大幅减小。

由此可见，在内爆炸下，当单层球面网壳的空间高度系数不超过 0.65 ，即结构高度 H 小于 8 m 时，墙面开洞与否对结构的响应影响不大。但随着空间高度的增加，反射冲击波对球面网壳的爆炸响应影

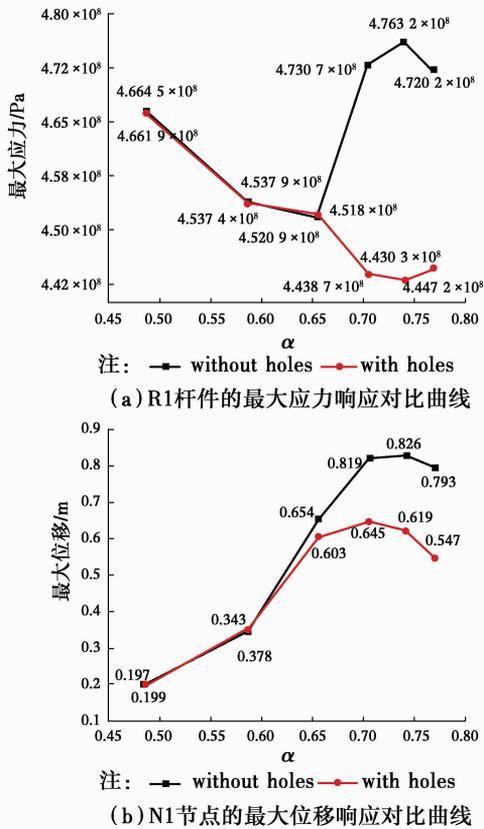


图10 墙体开洞与墙体未开洞的球面网壳动力响应对比图

Fig10 Comparisons of dynamic responses of spherical reticulated shell with wall openings and wall no openings

响越来越大,墙面开洞可有效降低反射冲击波对球面网壳的二次冲击作用。因此,对于未考虑泄爆效应的单层球面网壳结构,应按空间高度系数小于0.65,即结构高度 H 小于8 m设计较合理。而对于考虑泄爆效应的单层球面网壳结构,则取空间高度系数大于0.70,即取结构高度 H 大于10 m,墙面开洞的泄爆效应更有效。

4 结论

应用 ANSYS/LS-DYNA 并采用基于试验修正的 Johnson-Cook 材料模型,对不同空间高度的 K8 型单层球面网壳在内爆炸下的冲击波传播特性和爆炸响应进行了数值仿真计算,验证了建模参数选取的可行性,并得到以下结论:

1) 反射波超压可能大于入射波,并对结构产生不利的二次冲击作用。刚性围护结构会放大反射波,相较于弹性围护结构,增大的幅度可达到30%~40%。

2) 球面网壳与墙体交界处的角部和穹顶位置冲

击波叠加效应显著,刚性围护结构增强了这种叠加效应。

3) 最大爆炸响应主要发生在跨中附近和支座附近,结构角部的响应受汇聚冲击波的影响较大,相比应力响应,位移响应起控制作用。

4) 爆炸冲击作用下,钢材将产生应变率效应和应变强化效应,不利于结构泄爆,进而增大球面网壳动力响应,Johnson-Cook 本构模型可很好体现该问题。

5) 合适的空间高度取值可有效减小结构的爆炸响应。对于未考虑或不考虑泄爆的单层球面网壳结构,空间高度系数宜取小于0.65(H 小于8 m)。对于空间高度系数大于0.65的结构,应开设墙面泄爆洞口。实际工程的空间高度系数可取0.55~0.65。

参考文献:

- [1] 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.
DU X L, LIAO W Z, TIAN Z M, et al. State of the art in the dynamic responses and blast resistant measures of the buildings under explosive loads [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(3): 277-287. (in Chinese)
- [2] 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.
GAO X N, WANG S P. Dynamic response of a large space cylindrical reticulated shell under blast loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(10): 68-73. (in Chinese)
- [3] 高轩能,王书鹏,江媛. 内爆炸作用下钢网壳结构动力响应的数值模拟[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2010, 31(6): 573-580.
GAO X N, WANG S P, JIANG Y. Numerical simulation of dynamic response of steel-reticulated shell structure under internal explosion [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2010, 31(6): 573-580. (in Chinese)
- [4] 高轩能,李超,江媛. 单层球面网壳结构在内爆炸作用下的动力响应[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(S1): 102-109.
GAO X N, LI C, JIANG Y. Dynamic response of single-layer reticulated shell structure under internal explosion [J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Edition), 2015, 48(S1): 102-

109. (in Chinese)
- [5] 唐文勋,高轩能. 内爆炸下单层球面网壳的动力响应研究[J]. 低温建筑技术,2014, 36(9): 67-70.
TANG W X, GAO X N. Dynamic response of single-layer spherical reticulated shells under internal explosion [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014, 36(9): 67-70. (in Chinese)
- [6] 李忠献,刘志侠,丁阳. 爆炸荷载作用下钢结构的动力响应与破坏模式[J]. 建筑结构学报,2008,29(4): 106-111.
LI Z X, LIU Z X, DING Y. Dynamic responses and failure modes of steel structure under blast loading [J]. Journal of Building Structure, 2008, 29(4): 106-111. (in Chinese)
- [7] 李忠献,刘志侠,HAO HONG. 爆炸荷载作用下钢结构的动力反应分析[J]. 建筑结构,2006,36(Sup1): 729-732.
LI Z X, LIU Z X, HAO H. Dynamic response analysis of steel structure under blast loading [J]. Journal of Building Structure, 2006, 36(Sup1): 729-732. (in Chinese)
- [8] 李忠献,路建辉,师燕超,等. 不确定爆炸荷载作用下钢梁的可靠度分析[J]. 工程力学,2014,31(4): 112-118.
LI Z X, LU J H, SHI Y C, et al. Reliability analysis of steel beam under uncertain blast load [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 112-118. (in Chinese)
- [9] WU C, HAO H. Numerical simulation of structural response and damage to simultaneous ground shock and airblast loads [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(3): 556-572.
- [10] WU C, HAO H. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions [J]. International Journal of Impact Engineering. 2005, 31(6): 699-717.
- [11] 空间网格结构技术规程:JGJ 7—91 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Technical Specification for Space Frame Structures: JGJ 7-91 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [12] 李超. 柱面网壳结构在内爆炸下的失效机理和防爆方法 [D]. 厦门:华侨大学,2016.
- LI C. Failure mechanism and explosion protection method of cylindrical reticulated shell structures under internal explosion [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2016. (in Chinese)
- [13] LS-DYNA Keyword user's manual [Z]. Version 971, LSTC, March, 2005.
- [14] 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.
- [15] 金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2010 [S].
Metallic materials tensiletesting at Part 1: Test method at room temperature: GB/T228. 1-2010 [S]. (in Chinese)
- [16] 李翼祺,马素贞. 爆炸力学[M]. 北京:科学出版社,1992.
LI Y Q, MA S Z. Mechanics of explosion [M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
- [17] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承纬,译. 北京:科学出版社,2011.
Orlienko. Explosive Physics [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [18] 陈鑫,高轩能. 炸药近地爆炸的数值模拟及影响参数的分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2014,35(5): 570-575.
CHEN X,GAO X N. Numerical simulation of explosive near-ground explosion and analysis of its influence [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2014, 35(5): 570-575. (in Chinese)
- [19] WANG W B, GAO X N. Propagation law of shock waves in single layer spherical lattice shell under internal explosion [J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2016, 19(3): 527-547.
- [20] 李国豪. 工程结构抗爆动力学[M]. 上海:科学技术出版社,1989.
LI G H. Anti-explosion dynamics of engineering structures [M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1989. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)