内部爆炸荷载下网壳结构的抗爆防护措施

翟希梅[1], 黄 明[2]

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 中国中元国际工程公司,100089 北京)

摘 要: 为进行内部爆炸荷载作用下网壳结构的抗爆防护措施研究,运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了包含网壳杆件、檩托、檩条、铆钉、屋面板、墙体和地面在内的精细化 K8 型单层球面网壳模型,通过流固耦合算法使爆炸冲击波与结构相互作用,分析了局部杆件加固、屋面板的选取及墙体开洞等抗爆防护措施的效果,结果表明内部爆炸荷载作用下,通过对网壳外环杆件进行加固、选择轻质的薄屋面板、增大墙体开洞面积、增高墙体洞口位置及减小墙体洞口间距等措施,能够有效降低网壳结构的动力响应.

关键词: 网壳;内部爆炸;抗爆防护措施;数值模拟
中图分类号: TU393.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)02-0001-07

Protective measures for reticulated shell subjected to internal blast loading

ZHAI Ximei[1], HUANG Ming[2]

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. China IPPR International Engineering Corporation, 100089 Beijing, China)

Abstract: To know the function of protective measures for reticulated shell subjected to internal blast loading, a fine finite element model for Kiewitt8 single-layer reticulated shell which contained reticulated shell member, purlin hanger, purlin, rivet, roof boarding, wall and ground was established by using finite element software ANSYS/LS-DYNA. The effect of reinforcement for reticulated shell member, selection of roof boarding and openings in the wall was studied by using ALE (Arbitrary-Lagrange-Euler) algorithm. The results showed that by selecting the outer-loop members to reinforce, choosing light roof boarding or thin roof boarding, increasing the opening rates and the height of position, and reducing the opening spacing, the dynamic response of the reticulated shell under internal blast loading could be reduced effectively.

Key words: reticulated shell; internal blast loading; protective measures; numerical simulation

美国俄克拉荷马政府大楼爆炸案及"9.11"等恐怖袭击事件表明,随着恐怖主义的猖獗,民用建筑遭受爆炸袭击的概率大大增加. 在众多建筑结构中,大跨空间结构以其优美的建筑造型和良好的力学性能而广泛用于体育馆、火车站、展览馆、机场等公共建筑中,且时常是一个地区标志性建筑所采用的结构形式;然而,由于其人流密集、意义特殊,大跨空间结构也往往是恐怖分子重要的袭击对象. 在爆炸荷载作用下,如何采取有效的抗爆防护措施,降低结构的破坏,减轻人民生命财产损失,成为工程设计人员面临的一项重要课题[1]. 相比于框架形式结构抗爆防护措施的日渐成熟[2-6],大跨空间结构的抗爆防护措施研究目前处于起步阶段[7-9]. 本文以一典型 K8 型单层球面网壳为研究对象,对内部爆炸荷载下,网壳杆件加固、屋面板选取及墙体开洞等抗爆、泄爆措施的防护作用进行了数值模拟和分析,相关结果可为网壳结构抗爆防护设计提供参考.

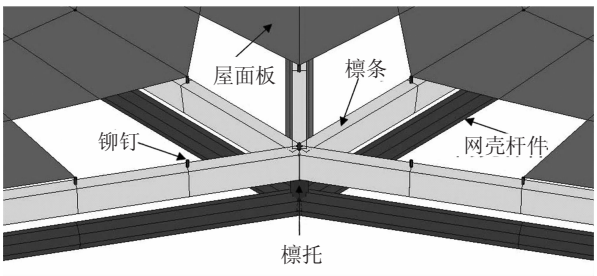
收稿日期: 2012-07-13.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978077).
作者简介: 翟希梅(1971—),女,教授,博士生导师.
通信作者: 翟希梅, xmzhai@hit.edu.cn.

1 有限元模型的建立及材料参数取值

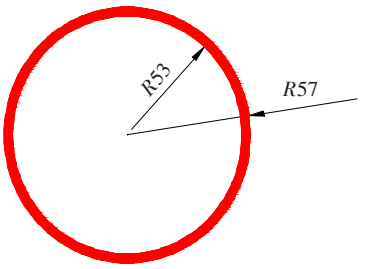
1.1 有限元模型的建立

运用 ANSYS/LS-DYNA 建立了一个 40 m 跨度、矢跨比为 1/5、分频数为 6 的 K8 型单层球面网壳模型,为同实际工程中的网壳结构相近,在

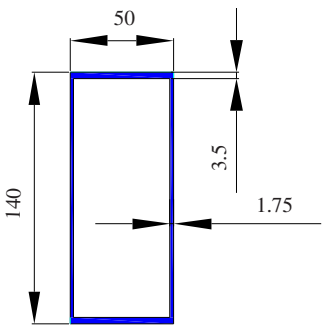
有限元模型中,自上而下依次建立了屋面板、铆钉、檩条、檩托、网壳杆件等构件(图 1(a)),根据实际工程中常用的杆件截面,选取主杆、纬杆和斜杆的截面尺寸皆为 Φ114 ×4.0 mm 圆钢管(图 1(b)),檩托为 Φ76 ×4.0 mm 圆钢管. 实际工程中的檩条一般为槽钢,本文为建模方便,采用的是方钢管(图 1(c)),其强轴惯性矩和 140 mm(高) ×50 mm(宽) ×3.5 mm(壁厚)的冷弯薄壁槽钢[10] 强轴惯性矩相等. 每根檩条上均匀布置了 7 个直径为 12 mm 的铆钉以固定屋面板,屋面板厚度 1 mm. 下部墙体高 10 m,考虑爆炸对结构的不利影响,将地面和四周的墙体设置为刚体. 建模时考虑结构的对称性,取 1/2 有限元模型进行计算分析. 空气域尺寸为 42 m ×21 m ×21 m,除对称面及地面外,其他边界采用无反射边界条件来模拟无限空气域,有限元模型及细部构造见图 1.



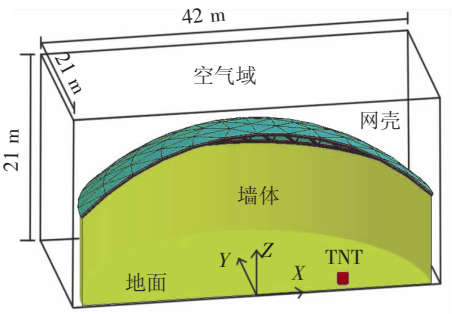
(a) 精细化网壳模型构造示意



(b)网壳杆件截面



(c)檩条截面(mm)



(d)结构有限元模型

图 1　结构有限元模型及细部构造

网壳杆件、檩托、檩条、铆钉采用梁单元 Beam161,屋面板、墙体和地面采用壳单元 Shell163,炸药和空气采用实体单元 Solid164. 炸药和空气采用 Euler 网格建模,其他结构构件采用 Lagrange 网格建模. 通过流固耦合算法使 Euler 单元和 Lagrange 单元发生作用.

为考虑结构自重的作用,在有限元程序中添加了 LS - DYNA 提供的 LOAD_BODY_Z 关键字,得到模拟的重力场,从而在有限元分析中考虑了结构自重的影响.

1.2　材料模型及参数

1.2.1　TNT 炸药

炸药采用 MAT_HIGH_EXP LOSIVE_BURN 材料模型和 JWL 状态方程进行描述[11],其形式为

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)\mathrm{e}^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)\mathrm{e}^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}.$$

式中 P 为静水压力,其他参数的物理意义及取值见表 1.

1.2.2　空气

空气采用 MAT_NULL 和 EOS_LIN EAR_POLYNOMIAL 状态方程描述[11],其形式为

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

式中 $\mu = \rho/\rho_0 - 1$,其他参数的物理意义及取值见表 2.

1.2.3　钢材

在爆炸荷载作用下需要考虑材料的应变率效应,本文选择的是多段线性塑性模型 PIECEWISE_LINER_PLASTICITY[11],见表 3,该模型可根据实际情况输入与应变率相关的应力应变曲线并根据塑性应变定义失效,其形式为

$$\sigma_y(\varepsilon_{\mathrm{eff}}^P, \dot{\varepsilon}_{\mathrm{eff}}^P) = \sigma_y(\varepsilon_{\mathrm{eff}}^P)\left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{eff}}^P}{c}\right)^{\frac{1}{P}}\right].$$

式中:$\dot{\varepsilon}$ 是有效塑性应变率,C 和 P 是应变率参数,$\sigma_y(\varepsilon_{\mathrm{eff}}^P)$ 是未考虑应变率影响的屈服应力.

本文作者在文献[12]中对爆炸冲击波在自由空气域中的传播规律进行了研究,并提取了峰值超压的有限元计算结果,该结果与多个经验公式进行了对比,验证了本文上述材料模型及参数的适用性.

表 1　TNT 炸药材料参数

炸药密度 ρ/（kg·m^{-3}）	炸药起爆速度 D/（m·s^{-1}）	爆轰压力 P_{CJ}/ GPa	爆轰初始内能 E_0/（GJ·m^{-3}）	JWL 状态方程参数				
				A/ GPa	B/ GPa	R_1	R_2	ω
1 630	6 930	21	7	371.2	3.23	4.15	0.95	0.3

表 2　空气材料参数

初始密度 ρ_0/（kg·m^{-3}）	材料内能 E/ MPa	初始压力 C_0/ MPa	多项式方程系数						初始相对体积 V_0
			C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	
1.290	0.250	−0.1	0	0	0	0.4	0.4	0	1.0

表 3　钢材材料参数[13]

密度 ρ_0/（kg·m^{-3}）	初始屈服应力/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	应变速率影响系数 C	应变速率影响系数 P	失效应变
7 850	207	206	0.3	40	5	0.25

2　网壳结构的抗爆防御措施

在内部爆炸荷载作用下，对于网壳杆件等主要受力构件，可采取增强加固措施，提高结构抗力，使结构有效抵抗爆炸荷载作用；而对于墙板等大面积围护构件，应采取有效泄爆措施，让爆炸冲击波迅速消失，以减小其对主要受力构件的作用.

2.1　网壳杆件加固

文献[12]研究表明增大杆件截面能够提高结构抗爆性能，减小结构动力响应，因此在网壳的抗爆防御措施中，增大杆件截面是一个有效手段.

2.1.1　加固方案

取 88 kg TNT 炸药，设置在 $X-0-Z$ 平面（见图 1(d)）：X = 0 m（X 为炸药距网壳中心水平距离），Z = 1.2 m（Z 为炸药距地面高度）处，结构的塑性发展及分布见图 2. 有限元计算时，每根网壳杆件截面有 4 个积分点，数字和圆圈分别代表杆件进入塑性的积分点个数和塑性应变值的大小，圆圈越大，表示此杆件的塑性应变值越大. 由图 2 可知，网壳外环杆件的动力响应大于内环杆件，这是因为在内部爆炸荷载作用下，由于墙体对爆炸冲击波的反射影响，靠近墙体的网壳外环杆件受到更大的爆炸冲击波作用，其塑性发展程度较内环杆件塑性发展程度更深.

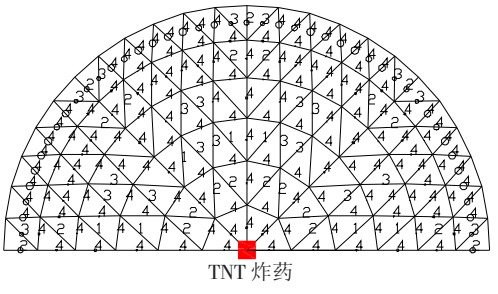


图 2　结构塑性发展及分布

通过上述分析，本文确定了图 3 的局部加固方案：网壳第 6 环杆件截面为 Φ140 × 4.0，第 5 环杆件截面为 Φ133 × 4.0，其他杆件仍采用 Φ114 × 4.0 圆钢管（图中未加粗部分）.

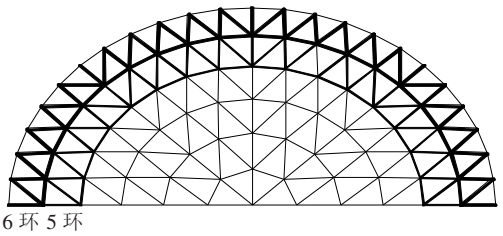


图 3　局部加固方案

2.1.2　加固效果

为获得局部加固方案的抗爆效果，将局部加固方案与未加固网壳（所有网壳杆件截面为 Φ114 × 4.0）及整体加固方案（所有网壳杆件截面增大至 Φ140 × 4.0）的动力响应进行对比分析，结果见表 4，其中 1P 表示杆件截面上 4 个积分点中至少有一个进入塑性，4P 表示杆件全截面进入塑性；平均塑性应变 $\bar{\varepsilon}_p$ 是指网壳结构各组成部分塑性应变的算术平均值. 结果表明：和未加固的结构相比，局部加固后的结构节点最大位移 D_{max}（节点 x 向、y 向和 z 向的最大合位移）下降了 15.6%，网壳杆件平均塑性应变下降了 33.1%；而整体加固方案的结构节点最大位移下降了 23.4%，网壳杆件平均塑性应变下降了 37.2%；对比局部加固和整体加固的结果，可以发现根据内爆下结构动力响应确定的局部加固方案，在增加用钢量不多的情况下，能够有效降低结构的动力响应.

表 4　动力响应统计

算例	网壳杆件 $\bar{\varepsilon}_p$/10^{-2}	D_{max}/cm	网壳杆件		增加用钢量/%
			1P 比例/%	4P 比例/%	
未加固	0.145	7.7	85.90	65.38	0
局部加固	0.097	6.5	84.19	64.53	10.85
整体加固	0.091	5.9	82.05	63.68	23.64

2.2　屋面板对泄爆的影响

文献[8,12]研究表明,在较小的TNT炸药当量条件下,由于爆炸荷载对结构的作用有限,因此:

1)屋面板厚度的增加,使得屋面板发生塑性应变时会消耗更多的能量,传递到其他结构组成部分的力相对减小,结构的响应程度有降低趋势;

2)屋面荷载增加时,由于屋面板重力方向与结构受到的爆炸荷载方向相反,重屋面能较好地抵消一部分作用到结构上的爆炸荷载,使结构响应降低.

但是在较大内部爆炸荷载作用下,爆炸冲击波对结构的作用较大,由于屋面板对爆炸冲击波的阻挡,使得结构内部爆炸冲击波压力增大,结构受到爆炸荷载作用增强,如果屋面板的破坏相对于爆炸荷载的持时而言很快,则爆炸冲击波很快衰减并消失,此时施加到网壳杆件上的爆炸荷载很少. 因此在网壳的抗爆防御设计过程中,在较大爆炸荷载作用下,应当考虑屋面板对泄爆的影响,本文从屋面板厚度及屋面荷载两方面进行分析.

2.2.1　屋面板厚度

取0.5 mm和2.0 mm两种不同屋面板厚的结构进行分析,炸药当量选取1 056 kg,设置在$X-0-Z$平面:$X=10$ m,$Z=1.2$ m.

不同屋面板厚度结构的计算结果见表5,随着屋面板厚度的增加,网壳杆件平均塑性应变及节点最大位移提高,且网壳杆件进入1P和4P的比例也随之增大,这是因为在1 056 kg的较大TNT炸药当量下,屋面板发生破坏成为泄爆途径,此时屋面板厚度的增加,虽然降低了本身破坏程度(屋面板的平均塑性应变明显降低),但泄爆能力被限制,从而使得网壳杆件的响应增大.

表5　不同屋面板厚度下结构动力响应统计

屋面板厚度/mm	$\bar{\varepsilon}_p/10^{-2}$ 网壳杆件	$\bar{\varepsilon}_p/10^{-2}$ 屋面板	D_{max}/m	网壳杆件 1P比例/%	网壳杆件 4P比例/%
0.5	1.596	5.066	1.68	98.29	94.44
2.0	1.887	0.721	2.37	98.72	97.44

2.2.2　屋面荷载

取轻屋面(屋面荷载30 kg/m^2)和重屋面(屋面荷载150 kg/m^2)两种情况进行分析比较,炸药当量选取792 kg,设置位置同2.2.1.

轻、重屋面的计算结果见表6,重屋面结构的动力响应较轻屋面的大,可见由于爆炸冲击波难以将重屋面掀开,不利于泄爆,使得施加到网壳杆件上的爆炸荷载作用较大,结构的响应增大.

表6　不同屋面荷载下结构动力响应统计

屋面荷载/(kg·m^{-2})	$\bar{\varepsilon}_p/10^{-2}$ 网壳杆件	$\bar{\varepsilon}_p/10^{-2}$ 屋面板	D_{max}/m	网壳杆件 1P比例/%	网壳杆件 4P比例/%
30	2.139	1.574	2.55	97.44	96.58
150	2.908	0.668	3.04	99.15	97.86

综上结果,可见在设计中,如果考虑屋面板的泄爆作用,应优先选择轻质的薄屋面板,使其在网壳遭受内部爆炸时优先破坏,从而减少爆炸冲击波对主要构件的作用.

2.3　墙体洞口对泄爆的影响

内部爆炸时,由于墙体对爆炸冲击波的阻挡影响,导致结构内部的爆炸冲击波压力增大,使得网壳结构的动力响应增加. 因此在进行内部爆炸的抗爆防御设计时,在墙体上设置洞口可以使爆炸冲击波从洞口泄漏,从而起到有效的泄爆作用. 本节对内爆时墙体开洞面积、洞口位置及开洞数量对泄爆的影响展开研究. 除特殊情况外,等效TNT炸药当量均为264 kg,设置位置同2.2.1.

2.3.1　墙体开洞面积的影响

建筑中的门窗洞口往往是根据建筑功能及采光等要求确定的,洞口分布存在一定交错,为了研究需要,简化了洞口的开设,在墙体上均匀开设洞口,开洞率R分别为16%、32%、48%、64%,洞口分布见图4.

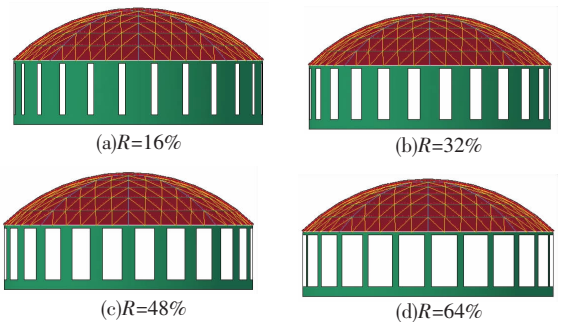


图4　墙体开洞率分布

不同开洞率情况下,网壳最大位移节点位移时程曲线、网壳节点最大位移、全截面塑性(4P)的网壳杆件比例、网壳杆件平均塑性应变分别见图5~8. 随着开洞率的增加,节点最大位移、全截面塑性杆件比例及网壳杆件的平均塑性应变不断下降. 与无开洞的算例相比,当开洞率$R=64\%$时,节点最大位移下降的幅度达到了50.8%,网壳杆件平均塑性应变降低的幅度也达到了48.9%.

不同开洞率下,网壳的塑性发展程度和分布情况见图9,可以看到,无开洞的情况下,爆炸点上方区域杆件和网壳外环杆件的塑性发展程度较深,随着开洞率的增加,这两处杆件的塑性发展深

度逐步降低，在开洞率为 64% 时，炸点上方区域杆件和外环杆件的圆圈直径显著减小. 可见，墙体开洞将减小爆炸荷载对结构的作用，有效地降低了结构的塑性发展程度.

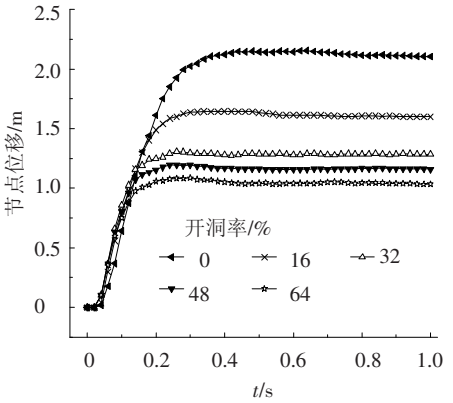


图 5　不同墙体开洞率下最大位移节点位移时程曲线

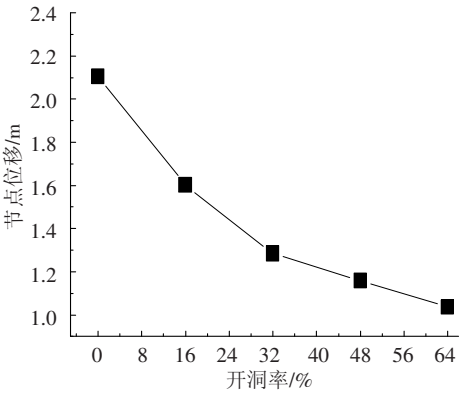


图 6　不同墙体开洞率下节点最大位移 D_{max}

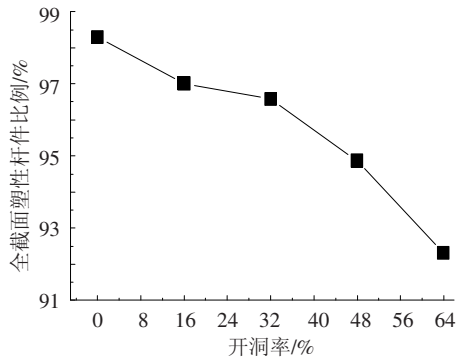


图 7　不同墙体开洞率下全截面塑性杆件比例

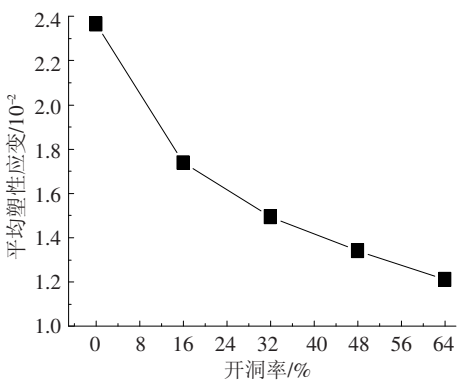


图 8　不同墙体开洞率下网壳杆件平均塑性应变

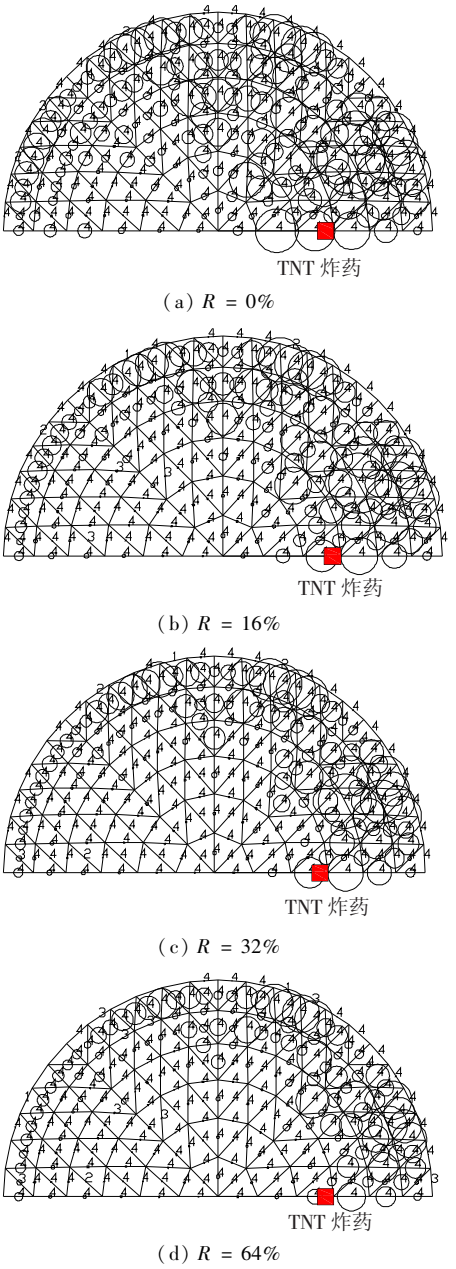


图 9　不同墙体开洞率下网壳塑性发展及分布

2.3.2　墙体开洞位置的影响

为研究相同开洞率下洞口位置对泄爆的影响，进行 4 个算例的分析：洞口中心距地面高度 H 分别为 2、4、6、8 m，开洞率 R 统一为 27%，洞口分布见图 10.

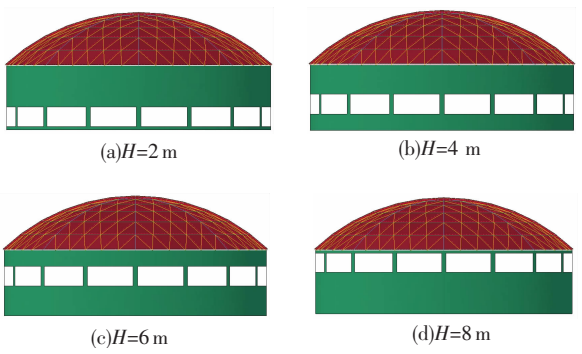


图 10　墙体开洞位置分布

不同开洞位置下,网壳节点最大位移、全截面塑性(4P)的网壳杆件比例、网壳杆件平均塑性应变分别见图11~13. 随着高度的增加,节点最大位移、全截面塑性网壳杆件的比例、网壳杆件平均塑性应变基本呈下降趋势(节点最大位移在 H = 8 m 时有微小的反弹);与洞口高度 H = 2 m 相比, H = 6 m 时, 节点最大位移下降了26.3%,网壳杆件平均塑性应变下降了20.7%,降幅显著;当 H 从6 m增加8 m时,结构动力响应变化不大. 可见在墙体洞口的开设位置对泄爆会产生一定的影响,墙体洞口开设位置较高时其泄爆效果较好,但超过一定高度后,泄爆的效果不会产生太大的变化. 这是因为:

1)爆炸冲击波作用到墙体上形成反射波,距地面较高墙体产生的反射波对网壳的作用更强烈,因此在较高墙体处开设洞口其泄爆效果更好;

2)洞口开设位置较高时,离地面较近墙体产生的反射波在传播路径中会遇到这部分洞口,从而使反射波泄露,减小网壳受到的荷载作用.

而当洞口位置超过地面一定距离后,上述两种影响减弱,爆炸荷载作用到网壳上的作用力变化不大,因此泄爆效果相差不多.

综上所述,墙体洞口开设的位置对泄爆效果有较大影响,墙体洞口开设位置较高时其泄爆效果较好,当超过地面一定高度后,泄爆效果较为接近. 在结构设计过程中,如果考虑泄爆效果,在满足功能需求时,应把洞口开设在墙体较高处.

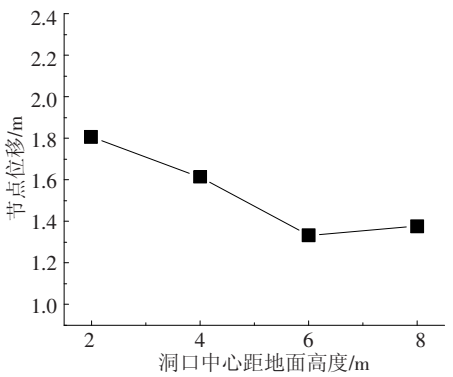


图11　不同墙体开洞位置下节点最大位移 D_{max}

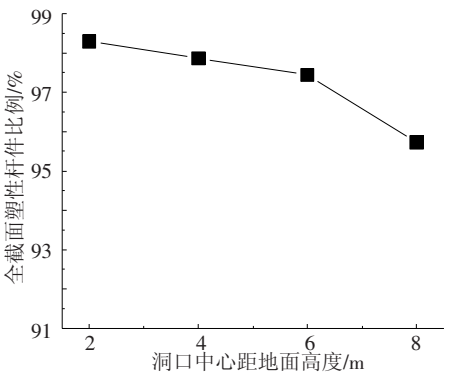


图12　不同墙体开洞位置下全截面塑性杆件比例

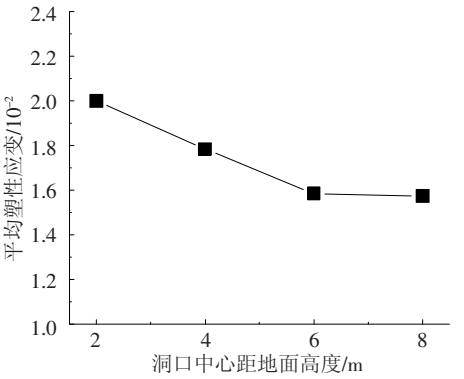


图13　不同墙体开洞位置下网壳杆件平均塑性应变

2.3.3　墙体开洞数量的影响

为研究相同开洞率下洞口数量对泄爆产生的影响,本文进行4个算例有限元模拟:洞口数量 N 分别为2、6、12、24,开洞率统一为48%,洞口分布见图14.

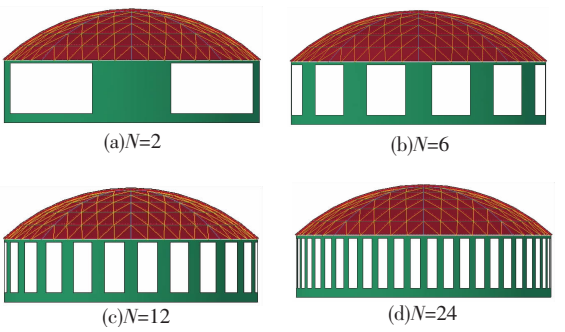


图14　墙体开洞数量分布

不同洞口数量下,网壳节点最大位移、网壳杆件平均塑性应变分别见图15、16. 可以看出随着开洞数量的增加,节点最大位移、网壳杆件平均塑性应变基本呈下降趋势:当洞口数量从2个增加到6个时,网壳节点最大位移和杆件平均塑性应变分别下降了10.8%和6.0%;此后随着洞口数量的增加,网壳节点最大位移和杆件平均塑性应变逐步下降,但是下降的幅度相对较小.

上述现象出现的原因和爆炸冲击波与墙体间的相互作用有关[14],图17列出了爆炸冲击波和墙体作用的过程示意图,爆炸冲击波与墙体碰撞产生反射,导致超压陡然增加,而从洞口穿过的冲击波由于没有遇到阻碍,波中的超压没有增加,于是形成了超压差,在墙体高压区的空气向边缘外的低压区流动的同时,高压区的空气由边缘向内部逐渐得到稀释,即形成了稀疏波. 在相同的开洞率下,洞口数量越少,则洞口之间墙体宽度越大,墙体前高压区空气被稀释的效果则相对降低,所以洞口数量少的算例,网壳动力响应相对较大.

综合看,墙体开洞面积对泄爆效果影响最显著,洞口开设位置和开洞数量对泄爆效果有一定影响,但其效果和开洞面积的作用相比,则相对偏弱.

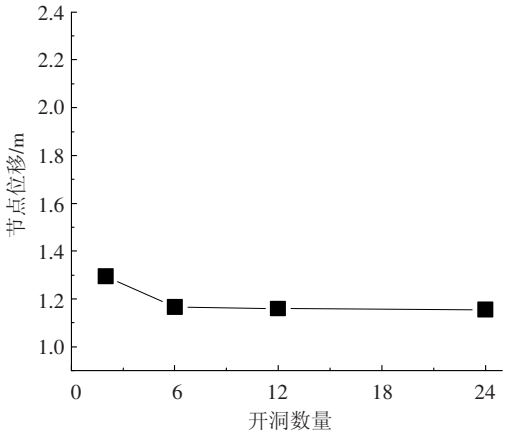


图 15　不同墙体开洞数量下节点最大位移 D_{max}

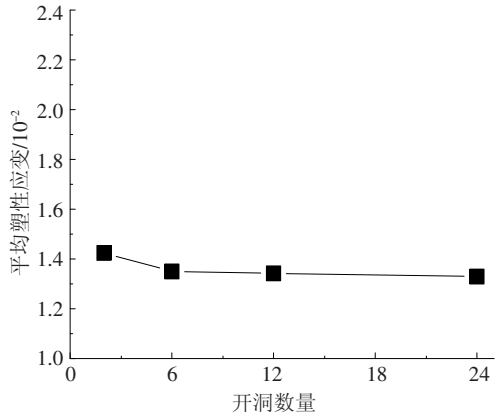


图 16　不同墙体开洞数量下全截面塑性杆件比例

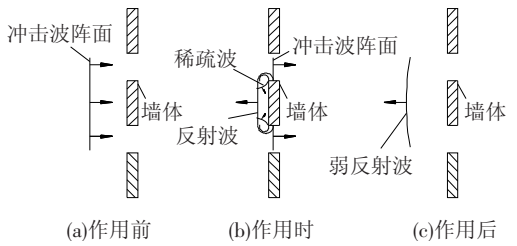


图 17　爆炸冲击波与墙体的作用过程

3　结　论

1）根据内爆下网壳杆件的动力响应规律，对网壳外环杆件进行加固，在增加用钢量不多的情况下，能够有效降低结构的动力响应，减轻结构的破坏.

2）在内部爆炸荷载作用下，考虑屋面板的泄爆作用时，应优先选择轻质的薄屋面，从而减少爆炸冲击波对主要受力构件的作用.

3）墙体开洞是有效的泄爆措施：增加墙体开洞的面积有助于减少爆炸荷载对结构的作用；洞口开设位置距地面较高时，泄爆效果较好，但当洞口开设位置超过地面一定高度后，泄爆效果相差不大；同样的开洞率下，增加洞口数量，减少洞口之间的距离对泄爆有利.

参考文献

[1] LI Z X, DU H, BAO C X. Review of current researchs on blast load effects of building structures in China[J]. Transaction of Tianjin University, 2006, 12 (sup): 35 – 41.

[2] MOHAMMED E, ROBERT S, TOD R. Blast resistant design of commercial buildings[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 1996, 1(1): 31 – 39.

[3] CORLEY W G, MLAKAR P F, SOZEN M A, *et al.* Oklahoma city bombing: summary and recommendations for multihazard mitigation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1998, 12(3): 100 – 112.

[4] WU C Q, HAO H, LU Y, *et al.* Numerical simulation of structural responses on a sand layer to blast induced ground excitations [J]. Computers and Structures, 2004, 82(9/10): 799 – 814.

[5] HAMBURGER R, WHITTAKER A. Design of steel structures for blast-related progressive collapse [J]. Modern Steel Construction, 2004, 44(3): 45 – 51.

[6] 叶列平，陆新征，李易，等. 混凝土框架结构的抗连续性倒塌设计方法研究[C]//既有建筑综合改造关键技术研究与示范项目交流会论文集. 北京：中国建筑科学研究院，2009：177 – 187.

[7] 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.

[8] 王永辉，翟希梅，支旭东，等. 爆炸荷载下 K8 型单层球面网壳的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报，2011，43(4)：12 – 16.

[9] 翟希梅，王永辉. 爆炸荷载下网壳结构的动力响应及泄爆措施[J]. 爆炸与冲击，2012，32(4)：404 – 410.

[10] 中华人民共和国国家标准. GB 50018—2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2002.

[11] Livermore Software Technology Corporation. LS – DYNA Keyword User's Manual [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2003.

[12] 黄明. K8 型单层球面网壳在爆炸荷载下的动力响应及防护措施[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2012.

[13] FAN F, WANG D Z, ZHI X D, *et al.* Failure modals for single-layer reticulated domes under impact loads [J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14 (sup): 545 – 550

[14] 李翼祺，马素贞. 爆炸力学[M]. 北京：科学出版社，1992.

（编辑　赵丽莹）