

# 爆炸荷载下 K8 型单层球面网壳的数值模拟

王永辉, 翟希梅, 支旭东, 范峰

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150001 哈尔滨, lisiyonghui@yahoo.com.cn)

**摘要:** 为了解大跨度空间结构在爆炸荷载下的响应特征, 用 ANSYS/LS-DYNA 动力有限元软件, 建立 40 m 跨度 K8 型单层球面网壳在爆炸荷载作用下的有限元分析模型. 在材料参数设置、材料本构关系选择、网格尺寸选择与划分方式、结构对称性的应用方面首先进行对比分析, 并将爆炸冲击波峰值超压的模拟值与经验公式值进行对比, 验证数值模拟的适用性. 分析不同爆炸荷载及炸药距离下的 K8 型单层球面网壳的内力和变形, 并总结了中心爆炸荷载作用下网壳结构的失效模型: 结构无损伤、结构轻度损伤、结构中度破坏 I、结构中度破坏 II 和结构严重破坏, 给出炸药当量与炸点距离对结构动力响应的影响程度与规律.

**关键词:** 网壳; 爆炸; 动力响应; 数值模拟; 失效模式; 建模

**中图分类号:** TU393.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2011)04-0012-05

## Numerical simulation of Kiewitt8 single-layer reticulated shell subjected to blast loading

WANG Yong-hui, ZHAI Xi-mei, ZHI Xu-dong, FAN Feng

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, lisiyonghui@yahoo.com.cn)

**Abstract:** To know the response characteristic of long-span spatial structure subjected to blast loading, finite element software ANSYS/LS-DYNA was used to set up the analytical model of Kiewitt8 single-layer reticulated shell with span of 40 m. The selection and determination of material parameter and constitutive model, element type, mesh dimension and generation and application of symmetric structure for saving computer burden were analyzed. The simulative and experiential values from several references about the peak overpressure of blast wave were compared, and the results verified the creditability and applicability of numerical simulation. Based on the finite element analysis of Kiewitt8 single-layer reticulated shell with varied TNT blast loading and standoff distance, the internal force and deformation for shell members were obtained; The failure characteristics and types of reticulated shell subjected to central explosive blast loading were summarized: no damage, mild impairment, moderate destruction I, moderate destruction II and severe destruction; And the effects of TNT equivalent weight and standoff distance on the structural dynamical response degree and rule were investigated.

**Key words:** reticulated shell; blast; dynamic response; numerical simulation; failure type; modelling

目前国内外对建筑物承受爆炸荷载所做的研究中, 一些学者分析了爆炸冲击波在空气中的传播规律, 并提取了峰值超压和比例距离关系的经验公式<sup>[1-5]</sup>, 中国后勤工程学院的杨鑫等对爆炸

冲击波在空气中传播规律的经验公式与数值模拟进行了对比<sup>[6]</sup>. 文献[7-9]对承受爆炸荷载的钢框架结构进行了研究, 得到了钢框架结构在爆炸荷载下的响应规律. 美国宾夕法尼亚大学的学者 Tapan Sabuwala 等<sup>[10]</sup>对承受爆炸荷载的钢梁柱节点进行了有限元分析. 南非学者 H. H. Jama, M. R. Bambach 等<sup>[11]</sup>对承受横向爆炸荷载的方钢管梁进行了数值建模分析, 另有 Lee Kyungkoo 等<sup>[12]</sup>

收稿日期: 2009-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978077).

作者简介: 王永辉(1986—), 男, 博士研究生;

范峰(1971—), 男, 教授, 博士生导师.

对承受爆炸荷载的 W 型钢的局部响应进行了研究. 对于体型丰富的大跨空间钢结构在爆炸荷载下的动力响应分析, 至今尚无人涉足, 主要是因为: 其空间结构的复杂性难于建立合理而有效的有限元模型; 爆炸波的传播将受到周围介质的影响, 地形、周围建筑物的分布以及建筑本身的形状都将改变爆炸波的传播规律, 对于结构的作用分布规律也变得比较复杂<sup>[13]</sup>.

本文利用 ANSYS/LS - DYNA 软件建立了合理有效的有限元模型, 并利用流固耦合的方法对 K8 型单层球面网壳承受爆炸荷载进行了数值模拟. 首先, 对爆炸冲击波在自由空气中的传播进行了模拟, 并提取出峰值超压与经验公式对比, 进而验证了数值模拟的有效性; 其次, 建立了 40 m 跨 K8 型网壳的有限元模型, 通过参数分析, 定义了 K8 型网壳结构在中心爆炸荷载作用下的失效模式, 并了解炸药当量和炸药距离对结构响应的影响程度及规律.

## 1 爆炸冲击波的数值模拟

### 1.1 空气和炸药模型介绍

选用有限元软件 ANSYS/LS - DYNA 对爆炸冲击波在空气中的传播进行数值模拟. 由于大跨度网壳结构所形成的空间巨大, 为减少计算工作量, 以炸药为中心取 1/4 模型进行分析, 简化后的空气域范围为 20.4 m × 20.4 m × 19.8 m, 等效 TNT 装药量为 104.32 kg. 单元类型采用 8 节点的 SOLID164, 炸药和空气采用 ALE (Arbitrary Lagrange - Euler) 算法, 此算法结合了 Lagrange 算法和 Euler 算法的优点, 克服了固体大变形引起的有限元网格严重畸变问题, 更适合于模拟爆炸冲击波在空气中的传播.

由于冲击波的峰值超压随比例距离  $Z$  ( $Z = R^3/\sqrt{m}$ ,  $R$  为测点到炸药中心点距离 (m);  $m$  为

等效 TNT 药量 (kg)) 的增加而迅速降低<sup>[1-5]</sup>, 在进行网格划分时采用渐变网格划分方法, 比例距离小的地方网格划分较细 (0.04 m), 随着比例距离的增加, 空气网格越来越粗, 到一定比例距离后保持不变 (0.3 m), 有限元模型如图 1 所示. 这种划分方法既可以保证在峰值超压急剧变化的地方满足计算精度, 又可以减少单元数量, 进而减少计算时间.

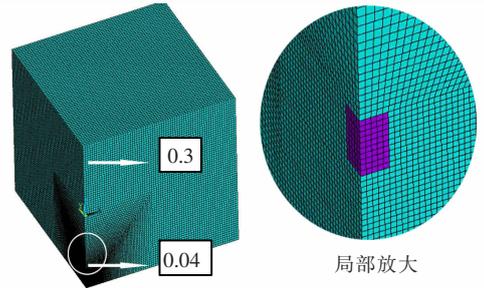


图 1 空气和炸药的有限元模型

### 1.2 材料参数

炸药采用 Mat - High - Explosive - Burn 材料模型, 并用 JWL 状态方程作为炸药爆轰产物的控制方程<sup>[14]</sup>, 其形式如下:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为 JWL 状态方程参数;  $p$  为静水压力;  $V$  为相对体积;  $E$  为单位体积炸药的初始内能. 表 1 给出了 TNT 炸药的主要材料参数.

空气采用 Mat - Null 材料模型和线性多项式状态方程 Eos\_Linear\_Polynomial<sup>[14]</sup> 描述, 即

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

式中:  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ , 如果式中  $\mu < 0$ , 则  $C_2 \mu^2$  和  $C_6 \mu^2$  两项设置为 0;  $\rho$  为当前密度;  $\rho_0$  为初始密度;  $E$  为材料的内能;  $C_0 \sim C_6$  为状态方程参数. 表 2 给出了空气材料参数.

表 1 TNT 炸药材料参数

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$p_{\text{CJ}} / \text{GPa}$	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0 / (\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3})$
1 630	6 930	21	374	7.33	4.15	0.95	0.3	7

注:  $\rho$  为炸药密度;  $v$  为炸药起爆速度;  $p_{\text{CJ}}$  为爆轰压力;  $E_0$  为爆轰初始内能.

表 2 空气材料参数

$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_0 / \text{MPa}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E / \text{MPa}$	$V_0$
1.290	-0.1	0	0	0	0.4	0.4	0	0.253	1.0

注:  $V_0$  为初始相对体积.

### 1.3 模拟结果分析

爆炸冲击波在无阻碍场中的传播规律如图 2 所示. 爆炸冲击波在无阻碍场中以爆心为球心, 以

球面波的形式向外传播. 随着冲击波在空气中传播, 压力迅速衰减, 在开始时刻衰减很快, 达到一定距离后衰减速度减慢.

目前国际上对爆炸冲击波峰值超压进行了大

量的研究,得出了一些经验公式,较为典型的有 Baker 等<sup>[1]</sup>、Brode 等<sup>[2]</sup>、Henrych 等<sup>[3]</sup>、Mills 等<sup>[4]</sup>、Chengqing Wu 等<sup>[5]</sup>以及萨多夫斯基等<sup>[3]</sup>提出的经验公式. 为验证模拟值的有效性,将峰值超压的模拟结果和各经验公式进行对比分析. 图 3 给出了不同比例距离处峰值超压的模拟值与经验公式的对比结果,可以看出:随比例距离增大,峰值超压迅速降低,在比例距离大于 2 以后,降低速度减缓. 模拟值的曲线形式及变化趋势和经验公式接近,符合较好. 此外,又将本文模拟的峰值超压与文献[6]中的模拟结果进行对比,如图 4 所示. 可以看出:本文模拟值和文献[1]的模拟值比较接近,但是都低于经验值;随比例距离的增加,误差逐渐减少.

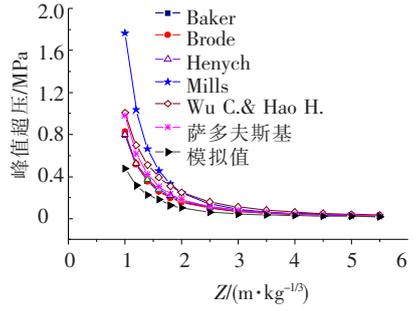


图 3 峰值超压的模拟值与经验公式的对比

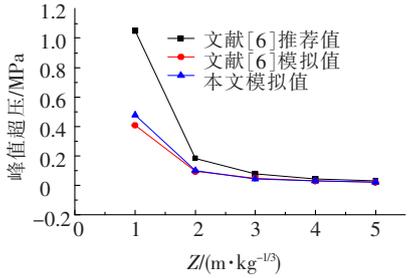


图 4 峰值超压与文献[6]的模拟值对比

将本文峰值超压的模拟值与各经验公式的相对误差列于表 3 中,通过对比可以发现:当比例距离为 1.0 ~ 5.5 时,各经验公式之间也存在较大的误差,最大相对误差为 54.70%. 本文的模拟峰值与各经验公式的相对误差也不相同,模拟值均低于经验公式值.

由于爆炸冲击波峰值超压的经验公式具有较大的离散性,本文对冲击波的模拟值与经验公式之间存在一定的误差,但误差值在可接受的范围内. 而且,如图 3 所示,随比例距离的改变,模拟的峰值超压曲线与经验公式曲线是相符的. 另外,对于承受中心爆炸荷载的 K8 型网壳结构,当等效 TNT 装药量为 104.32 kg 时,其结构到炸点的比例距离大于 3.5,相对误差基本控制在 30% 左右,所以,本文对冲击波的数值模拟可以应用到网壳结构模型的爆炸计算中.

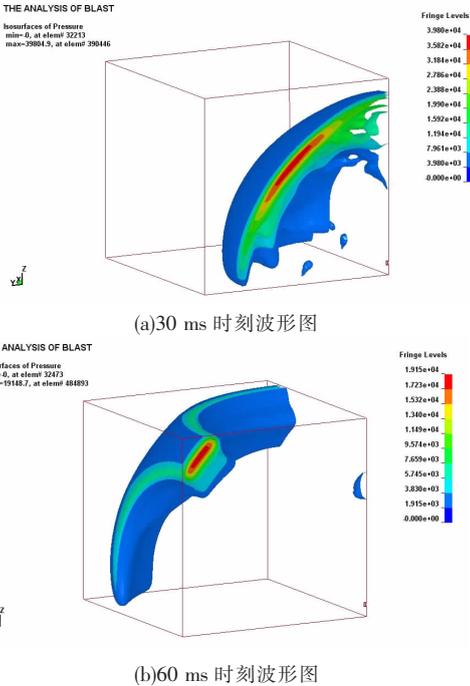


图 2 爆炸冲击波在无阻碍场中的传播过程

表 3 峰值超压模拟值与各经验公式的相对误差

%

$\frac{Z}{m \cdot kg^{-1/3}}$	Baker 公式 <sup>[1]</sup>	Brode 公式 <sup>[2]</sup>	Henrych 公式 <sup>[3]</sup>	Mills 公式 <sup>[4]</sup>	Wu & Hao 公式 <sup>[5]</sup>	萨多夫斯基公式 <sup>[3]</sup>
1.0	40.4	42.4	40.5	73.1	52.8	51.5
1.2	38.9	39.5	40.4	69.7	55.1	49.1
1.4	37.5	36.9	40.1	66.3	56.3	46.8
1.6	31.6	30.0	35.3	60.3	53.8	40.8
1.8	38.7	36.7	42.7	62.0	59.6	46.2
2.0	37.9	35.4	42.4	59.1	59.6	44.8
2.5	39.3	36.3	44.5	55.0	61.0	44.8
3.0	40.8	37.9	46.4	52.2	61.6	45.3
3.5	34.9	32.0	41.3	44.3	56.9	39.3
4.0	29.1	26.3	36.2	36.9	51.7	33.5
4.5	28.4	26.0	35.5	34.7	49.6	32.5
5.0	22.5	20.3	30.2	28.2	43.5	26.8
5.5	23.2	21.3	30.7	28.4	42.0	27.4

## 2 K8 型网壳爆炸荷载下失效模式

### 2.1 结构模型介绍

炸药和空气的模型建立同上一节的介绍. 网壳杆件、檩托和檩条采用 BEAM161 单元, 该单元考虑了横向剪切应变的影响. 屋面板、墙体和地面采用 SHELL163 单元, 屋面荷载通过质量单元加到节点上, 质量单元采用 MASS166. 空气和炸药之间仍采用 ALE 算法, 结构和空气之间采用流固耦合算法. 结构选取 K8 型单层球面网壳, 主杆、纬杆和斜杆均采用  $\Phi 114 \times 4.0$ , 跨度为 40 m, 矢跨比为 1/5, 屋面荷载为  $1\ 200\ \text{N/m}^2$ . 檩托采用  $\Phi 76 \times 4.0$ , 长度为 0.2 m, 檩条采用空心矩形截面. 屋面板是由钢板和保温材料两种材料组成的 (80 mm 保温材料 + 2 mm 钢板), 由于保温材料刚度和极限强度相对钢材来说均比较低, 为简化计算, 在计算中没有考虑保温材料的影响. 檩托和檩条以及屋面板和檩条之间均采用共节点的连接方式. 将地面和四周墙体 (高 10 m) 设置为刚性体, 以模拟爆炸针对网壳的最不利影响. 为减少计算量, 对结构同样只取 1/4 模型, 结构的有限元模型如图 5 所示.

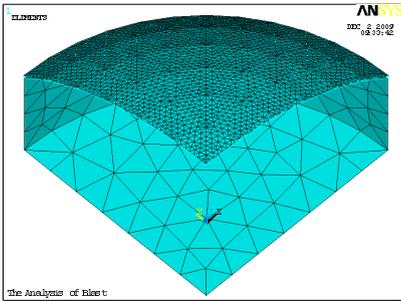


图 5 结构的有限元模型

### 2.2 钢材的材料模型

承受爆炸荷载作用的结构要考虑几何非线性 (大位移、大转动、大应变) 和材料非线性的影响. 整个爆炸完成的过程时间是短暂的, 大概在 100 ms 内就能完成, 所以, 结构在短时间内承受高强度的压力, 使得构件的应变率很高. 需选择考虑应变率影响的钢材本构模型, 本文选择的是多段线性塑性模型 (Piecewise Linear Plasticity)<sup>[14]</sup>. 该模型可以根据实际情况, 自定义有效真应力与有效塑性应变, 以及应变率对屈服应力影响的比例因子, 材料模型如下:

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

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为有效塑性应变率;  $c$  和  $P$  为应变率参数;  $\sigma_y(\varepsilon_{\text{eff}}^P)$  为未考虑应变率影响的屈服应力.

钢材的初始屈服应力为 207 MPa; 弹性模量为 206 GPa; 泊松比为 0.3; 钢材失效由塑性应变控制, 失效时的有效塑性应变为 0.25<sup>[15]</sup>. 即当钢材的有效塑性应变达到 0.25 时, 钢材出现断裂, 且已断裂的单元在后续的有限元计算中被删除.

### 2.3 爆炸荷载下结构的破坏类型

选用 12 种不同的炸药量, 分别为 1.63、13.04、104.32、203.75、352.08、559.09、1 091.97、1 630.2 816.64、6 676.48、13 040、28 649 kg. 部分炸药量下的 1 节点 (位于网壳正中心) 竖向位移的时程曲线图 6 所示, 可以看出, 结构进入塑性后, 1 节点在塑性变形后形成的新平衡位置上下振动.

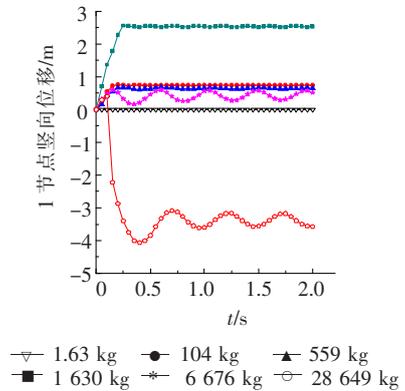


图 6 节点 1 竖向位移时程曲线

网壳结构的破坏类型分为 5 类 (见表 4): (1) 结构无损伤是指整个结构都处于弹性阶段, 没有任何塑性发展的出现, 而且 1 节点的竖向位移很小. (2) 结构轻度损伤是指结构部分或全部进入塑性, 但是没有杆件断裂, 1 节点的竖向位移有所增加. (3) 结构中度破坏 I 是指部分檩托受拉破坏, 其他部分进入塑性, 而且 1 节点的位移进一步增加. (4) 结构中度破坏 II 是指全部檩托受拉破坏, 其他部分进入塑性, 但是没有出现断裂现象, 1 节点的竖向变形迅速增加. (5) 结构严重破坏是指结构除了檩托全部受拉破坏外, 檩条和屋面板也发生断裂, 1 节点的竖向位移先逐渐降低后反向增加. 另外随等效 TNT 药量的增加, 网壳的塑性发展首先发生在 6 环, 然后依次向内环发展.

### 2.4 炸药位置对结构的影响

在中心位置选择距离地面不同的 5 个点 (炸药中心距地面的距离为 1.2、4.8、8.4、10、12 m) 进行参数分析, TNT 炸药等效当量为 104.32 kg. 结构的响应统计见表 5. 可以看出: 在相同 TNT 炸药当量 (104.32 kg) 情况下, 不同炸药位置对结构的影响不同. 檩条、屋面板的最大塑性应变和 1 节

点的竖向位移基本上都是增加的,这是因为炸点离结构越来越远的原因. 随炸点距离的临近(即炸药位置的上移)结构的爆炸响应愈加明显,但这一规律也会受到其他因素的影响,表 5 中网壳

和檩托的最大塑性应变表现出先增加后减小的现象,在炸药高度为 8.4 m 处达到最大值,说明地面和墙壁对冲击波的反射作用等因素也会对结构的爆炸响应产生作用.

表 4 结构的破坏类型

类型	炸药当量/kg	塑性发展		结构响应	
		位置	网壳	断裂部分	1 节点竖向位移/cm
结构无损伤	1.63	-	-	-	0.295
结构轻度损伤	13.04 ~ 203.75	A, B, C, D	R5, R6	-	0.868 ~ 9.540
结构中度破坏 I	352.08, 559.09	A, C, D	R4 ~ R6	B(部分)	24.4 ~ 67.8
结构中度破坏 II	1 091.97	A, C, D	R1 ~ R6	B(全部)	256
结构严重破坏	1 630 ~ 28 649	A	R1 ~ R6	B, C, D	259 ~ -407

注: A: 网壳; B: 檩托; C: 檩条; D: 屋面板; R1 ~ R6: 第 1 环 ~ 第 6 环; 1 节点: 网壳中心节点.

表 5 不同炸药位置结构的响应

炸药高度/m	最大塑性应变/ $10^{-2}$				1 节点竖向位移/cm
	网壳	檩托	檩条	屋面板	
1.2	0.972	13.19	1.328	0.367	6.26
4.8	1.308	16.28	1.243	0.510	7.26
8.4	1.351	18.17	1.984	1.056	9.23
10.0	1.257	18.10	2.724	1.067	12.42
12.0	1.095	17.51	3.912	2.948	16.63

### 3 结 论

1) 现有计算峰值超压的经验公式互相之间存在误差,而且比例距离越小差别越大;本文峰值超压的模拟值小于经验公式值,但是峰值超压 - 比例距离曲线型式与经验公式一致,而且误差范围可以接受,因此,本文的数值模拟具有合理性.

2) 将承受不同等效 TNT 炸药当量的 40 m 跨 K8 型网壳结构的破坏类型分为 5 类: 结构无损伤、结构轻度损伤、结构中度破坏 I、结构中度破坏 II 和结构严重破坏.

3) 炸药距离结构越近(即比例距离越小)结构的响应越强烈;地面和墙壁对爆炸冲击波的反射作用对结构响应的影响不能忽略.

### 参 考 文 献:

[1] 顾文彬,孔劲松,吴腾芳,等. 环状分布装药容器中爆炸荷载研究[J]. 爆破器材, 1999, 28 (5): 19 - 22.

[2] BRODE H L. Blast wave from a spherical charge [J]. Phys Fluids, 1959(2): 217.

[3] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用(1979 年版) [M]. 熊建国,译. 北京: 科学出版社, 1987.

[4] AHMED Fahmy Farag Tolba. Response of FRP - retrofitted rein - forced concrete panels to blast loading [D]. Ottawa: Carleton University, 2002.

[5] 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.

[6] 杨鑫,石少卿,程鹏飞,等. 爆炸冲击波在空气中传播规律的经验公式对比及数值模拟[J]. 四川建筑, 2007, 27(5): 71 - 73.

[7] ZHANG Xiuhua, DUAN Zhongdong, ZHANG Chunwei. Numerical simulation of dynamic response and collapse for steel frame structures subjected to blast load [J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14: 523 - 529.

[8] 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.

[9] LIEW J Y R. Survivability of steel frame structures subject to blast and fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64 (7/8): 854 - 866.

[10] SABUWALA T, LINZELL D, KRAUTHAMMER T. Finite element analysis of steel beam to column connections subjected to blast loads [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31: 861 - 876.

[11] JAMA H H, BAMACH M R, NURICK G N, et al. Numerical modeling of square tubular steel beams subjected to transverse blast loads [J]. Thin - Walled Structures, 2009, 47: 1523 - 1534.

[12] KYUNQKOO L, TAEJIN K, JINKOO K. Local response of W - shaped steel columns under blast loading [J]. Structure Engineering and Mechanics, 2009, 31 (1): 25 - 38.

[13] REMENNIKOY A M, ROSE T A. Modeling blast loads on buildings in complex city geometries [J]. Computers and Structures, 2005, 83: 2197 - 2205.

[14] LS - DYNA. Keyword user's manual [M]. [S. 1]: Livermore Software Technology Corporation, 2003.

[15] FAN Feng, WANG Duozhi, ZHI Xudong, et al. Failure modals for single - layer reticulated domes under impact loads [J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14 (sup): 545 - 550. (编辑 刘 彤)