

# 点支式玻璃板在爆炸与冲击荷载下的动力特性\*

葛 杰<sup>1</sup>, 李国强<sup>2</sup>, 陈素文<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院 上海, 200092) (2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室 上海, 200092)

**摘要** 为了研究点支式玻璃板在动态荷载下的性能, 基于玻璃板的动态响应理论, 利用 LS-DYNA 有限元程序, 对点支式玻璃板在冲击荷载及常规爆炸荷载下的抗爆性能进行分析, 讨论了冲击荷载与常规爆炸荷载对点支式玻璃板动力响应的影响, 以及玻璃板的动力放大系数及其与荷载峰值之间的关系, 并与试验结果进行了对比分析。结果表明: 近似于静力加载及冲击荷载下玻璃板的性能响应与试验结果吻合较好; 加载时间对玻璃板的动态响应影响显著; 不同的荷载作用方式, 即冲击荷载和爆炸荷载对点支式玻璃板的位移响应不同; 缓解点支式玻璃板支座处孔边应力集中能显著提高玻璃板的抗爆性能。

**关键词** 爆炸荷载; 冲击荷载; 动力响应; 点支式玻璃板; 动力放大系数

**中图分类号** O347.3; TU524; TH113

## 引 言

建筑物中的结构及构件的抗爆性能日益受到人们的关注<sup>[1-2]</sup>, 而玻璃门窗及玻璃幕墙位于建筑物外表面, 爆炸及冲击荷载对其造成的后果极其严重。大量研究表明, 爆炸引起的玻璃碎片是造成建筑物内居民伤亡的主要原因<sup>[3-4]</sup>。点支式玻璃板由于其具有破坏后碎片不脱落的特点而在现代建筑中广泛使用, 因此需要准确地分析点支式玻璃板在爆炸和冲击等荷载下的动力特性, 以评估建筑物门窗及玻璃幕墙对居民的危害。

考虑静力荷载对玻璃的作用, Vallabhan 等<sup>[5]</sup>用试验和解析的方法对建筑夹层玻璃在静态水平压力下的应力分布进行了研究; 殷永伟等<sup>[6]</sup>对夹层玻璃在均布荷载下的承载性能进行了试验研究。考虑风荷载的作用, Reed 等<sup>[7]</sup>研究了玻璃幕墙在脉动风荷载下的性能; 结合玻璃板的尺寸、厚度的影响, Kameswara Rao<sup>[8]</sup>分析了玻璃板在风荷载下的安全性能; 基于布朗积分方程, Holmes<sup>[9]</sup>研究了脉动风压荷载对玻璃板的作用。静力荷载及风压荷载与爆炸荷载具有显著不同的特征, 分析建筑玻璃板及玻璃幕墙在爆炸冲击荷载下的性能具有十分重要的意义。近几年国外学者<sup>[10-12]</sup>利用有限元程序对玻璃板在爆炸冲击荷载下的承载性能进行了一些分析, 研究了四边支撑的玻璃板在冲击波荷载下的动态性

能。Krauthammer 等<sup>[13]</sup>就爆炸荷载负压段对玻璃板动态反应的影响进行了研究, 结果表明在考虑冲击波负压段的影响及炸药当量和对比距离的影响时, 玻璃板具有向荷载作用方向相反的方向, 即向建筑物内变形、破坏或飞溅的可能。高轩能<sup>[14]</sup>利用有限元分析对夹层玻璃在长期、短期静力和爆炸冲击荷载作用下的变形进行了模拟, 大量的有限元分析表明, 夹层玻璃具有很好的抵抗爆炸冲击波的特性, 调整夹层玻璃的厚度、改善边界支撑条件等措施能有效提高夹层玻璃的抗爆性能。

笔者结合文献<sup>[15]</sup>, 利用 LS-DYNA 有限元程序对点支式玻璃板进行了数值模拟, 研究了点支式玻璃板在常规爆炸荷载下的动态响应特征。

## 1 玻璃板的控制方程及变形理论

### 1.1 动态分析控制方程

Hallquist<sup>[16]</sup>给出了用于动态分析的基本控制方程, 动态方程中应力分量可以表达为

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - p\delta_{ij} \quad (1)$$

$$p = -\sigma_{kk}/3 \quad (2)$$

其中:  $\sigma_{ij}$  为应力分量;  $S_{ij}$  为偏应力分量;  $p$  为平均压力;  $\delta_{ij}$  为克罗内克函数。

在分析中, 玻璃板被模拟为线弹性材料, 有

$$S_{ij} = \left[ \frac{E\nu\epsilon_{kk}}{(1+\nu)(1-2\nu)} + p \right] \delta_{ij} + \frac{E\epsilon_{ij}}{1+\nu} \quad (3)$$

\* 收稿日期: 2011-05-05; 修改稿收到日期: 2011-07-15

$$p = -E\varepsilon_{kk}/3(1 - 2\nu) \quad (4)$$

其中： $\varepsilon_{ij}$ 为应变分量； $E$ 为杨氏模量； $\nu$ 为泊松比。

## 1.2 玻璃板的大变形理论

根据 Karman 理论<sup>[17-18]</sup>，玻璃板的运动方程可以表达为

$$D\nabla^4 w = P + h(\tau_{,xx}F_{,yy} - 2\tau_{,xy}F_{,xy} + \tau_{,yy}F_{,xx}) \quad (5)$$

$$\nabla^4 F = E(w_{,xy}^2 - w_{,xx}w_{,yy}) \quad (6)$$

其中： $w$ 为玻璃板的变形； $P$ 为作用在玻璃板上的水平压力； $F$ 为艾里应力函数； $D$ 为玻璃板的抗弯刚度， $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$ ； $E$ 为玻璃板的弹性模量； $h$ 为玻璃板的厚度， $\nu$ 为泊松比。

Karman 理论的基本假定参见文献[19]。

玻璃板中的应力由两部分组成，即薄膜应力和弯曲应力。根据艾里函数得到薄膜应力为

$$\sigma_x^m = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}, \sigma_y^m = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}, \tau_{xy}^m = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \quad (7)$$

弯曲应力为

$$\begin{cases} \sigma_x^b = \pm 6D/h^2(\tau_{,xx} + \nu w_{,yy}) \\ \sigma_y^b = \pm 6D/h^2(\tau_{,yy} + \nu w_{,xx}) \\ \tau_{xy}^b = \pm 6D/h^2(1 - \nu)w_{,xy} \end{cases} \quad (8)$$

Vallabhan<sup>[20]</sup>根据达朗伯原理在 Karman 方程中引入惯性力来考虑玻璃板的动态反应，得到玻璃板的运动方程为

$$D\nabla^4 w = P + h(\tau_{,xx}F_{,yy} - 2\tau_{,xy}F_{,xy} + \tau_{,yy}F_{,xx}) - \rho\ddot{w} - c\dot{w} \quad (9)$$

其中： $\rho$ 为玻璃板单位面积上的质量； $c$ 为玻璃板单位面积上的阻尼系数。

## 2 有限元模型及验证

### 2.1 计算模型的建立

国外某冲击研究中心进行了点支玻璃板的试验研究<sup>[15]</sup>，动态荷载的施加是通过测试构件两边的压力荷载容器冲击荷载的释放来实现的，如图1所示。

测试的玻璃板在4个角点通过螺栓杆连接到刚性托架上。在玻璃板上施加压力波分为4个步骤：a. 两边的压力容器同时施压，并保持相等；b. 其中一边的压力迅速释放；c. 一定时间之后，另一边的压力也迅速释放；d. 当荷载施加结束后，玻璃板两边又恢复到大气压状态。整个冲击压力施加过程如图2所示。

根据实际试验模型采用 LS-DYNA 软件对玻璃板及与玻璃相连的螺栓杆建模，根据模型的对称

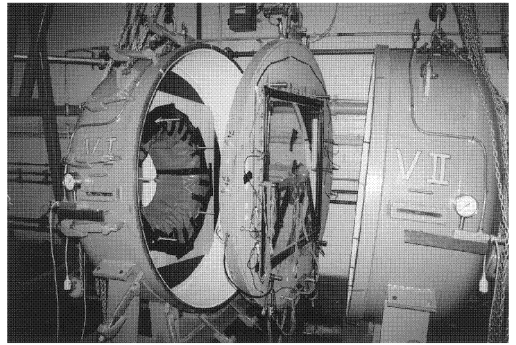


图1 冲击压力荷载设备

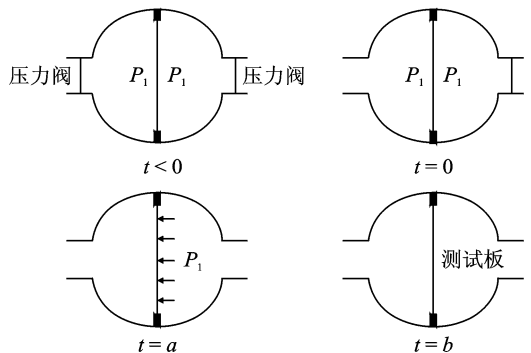


图2 冲击压力荷载的施加

性建立 1/4 模型，如图3所示。模型的单元类型取为 3-D 实体单元，采用 Lagrange 网格划分玻璃板及螺栓杆，分别有 2 816 和 694 个单元，玻璃板与螺栓杆之间通过接触算法进行连接。玻璃板及螺栓杆被模拟成线弹性材料，材料属性和几何参数见表1。

表1 材料和玻璃板参数

材料	参数
玻璃	$E = 72 \text{ GPa}$ , $\nu = 0.22$ , $\rho = 2\,560 \text{ kg/m}^3$
螺栓杆	$E = 206 \text{ GPa}$ , $\nu = 0.30$ , $\rho = 7\,850 \text{ kg/m}^3$
玻璃板尺寸	$a = b = 1\,000 \text{ mm}$ , $t = 10 \text{ mm}$

$a$  和  $b$  为玻璃板边尺寸； $t$  为玻璃板厚度

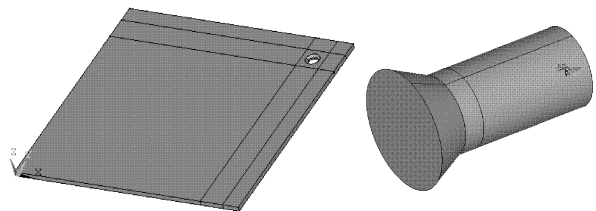


图3 玻璃板及螺栓杆模型

板面上的压力荷载考虑静力荷载、冲击荷载及常规爆炸荷载等几种类型，冲击荷载采用与文献[15]中相同的形式，如图4所示。常规爆炸荷载冲击波形状如图5(a)所示，在分析中按照等冲量的原则简化成等效三角形荷载，如图5(b)所示。

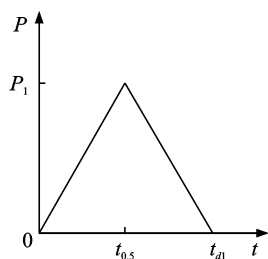


图4 冲击荷载

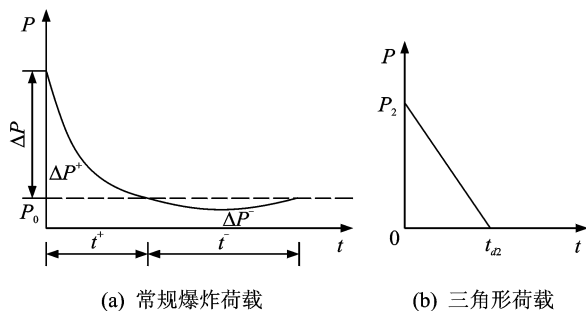


图5 爆炸荷载及其简化波形图

## 2.2 计算模型的验证

通过文献[15]的试验结果来验证模型的可靠性。考虑静力荷载,数值模拟中作用在玻璃板上的平均压力采用与试验中相同的加载速率 500 Pa/s,并且压力荷载作用在玻璃板的前表面,即离爆炸源近的一面。图6给出了静力荷载下玻璃板中心处压力-位移时程曲线的试验结果与数值结果。由图6可知,在静力荷载作用下,压力值与玻璃板的位移成线性关系,且数值结果与试验结果接近。

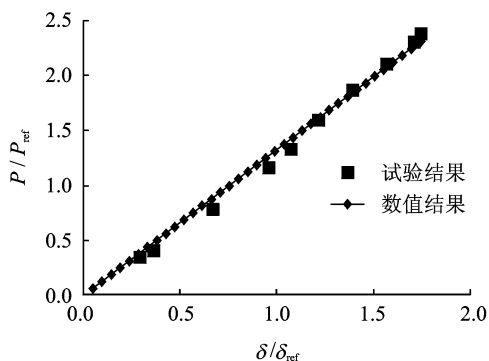


图6 静力荷载下的压力-位移结果

考虑冲击动力荷载,试验中荷载持时为 75 ms,压力为 25.7 kPa,板中最大位移试验结果为 31 mm。按照图4的冲击荷载形式进行数值模拟,以近似于试验中的加载方法,得到玻璃板中最大位移值为 22.5 mm。其计算结果与试验结果接近。

通过以上静力荷载和动力荷载下的分析比较可知,笔者建立的有限元模型的计算结果与试验结果

吻合较好,表明所采用的计算模型和材料参数的选取合适,验证了该模型的合理性。

## 3 计算结果分析

在玻璃板的动力响应分析中,考虑爆炸荷载与冲击荷载两种加载条件,改变不同的荷载作用时间,分析其对玻璃板中心位移的影响,研究两种荷载形式下玻璃板的应力和位移,分析常规爆炸荷载下玻璃板的动力放大系数及荷载峰值的影响。

### 3.1 跨中位移与荷载持续时间的关系

图7给出了常规爆炸荷载作用下玻璃板位移与荷载持续时间之间的关系,从图中可以看出,在压力峰值一定的情况下,荷载持续时间对玻璃板的动态响应影响显著。强冲击波、短持时会使破碎前的玻璃板产生简单的谐运动;如果荷载持续时间相对于玻璃板的自振周期较长,或接近于静力荷载,则玻璃板的整体位移会偏向于力的作用方向。

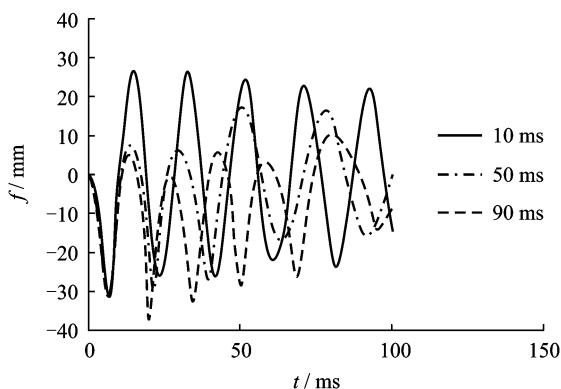


图7 玻璃板位移与持续时间的关系

### 3.2 冲击荷载与爆炸荷载下的位移时程

在荷载持续时间及冲量相等的情况下,冲击荷载与常规爆炸荷载对玻璃板的位移响应有着显著不同的特点。为便于比较分析,数值模拟时荷载作用时间取与试验中相同的持时 75 ms,压力取为 25.7 kPa,在计算模型验证时已经得到冲击荷载下板中最大位移为 22.5 mm;在爆炸荷载下分析得到玻璃板中最大位移为 39.4 mm。

图8给出了相同的荷载作用时间、等冲量情况下的两种加载方式的位移时程曲线。

### 3.3 冲击荷载与爆炸荷载下的应力

在冲击荷载及爆炸荷载作用下,玻璃板最大主应力均出现在孔洞边缘。在持时为 75 ms、压力为

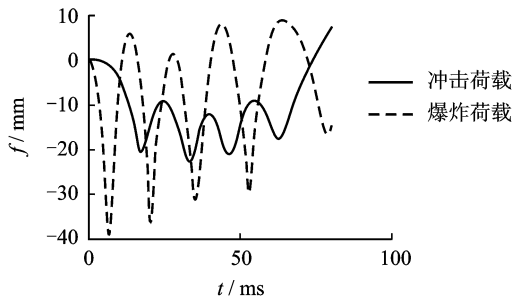


图8 典型位移时程曲线

25.7 kPa 的冲击荷载作用下,玻璃板的最大主应力值为 817.2 MPa,出现在 32.8 ms;在等冲量常规爆炸荷载下,板的最大主应力值为 2 032.4 MPa,出现在 6.4 ms。冲击荷载下与等冲量常规爆炸荷载下玻璃板孔边应力云图如图 9、图 10 所示。

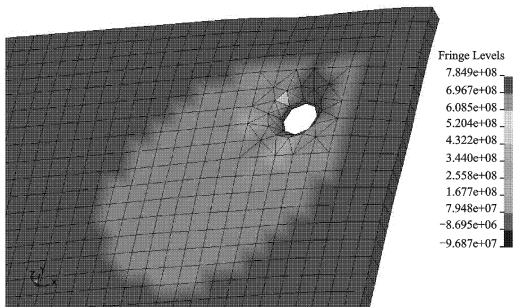


图9 冲击荷载下的孔边应力云图

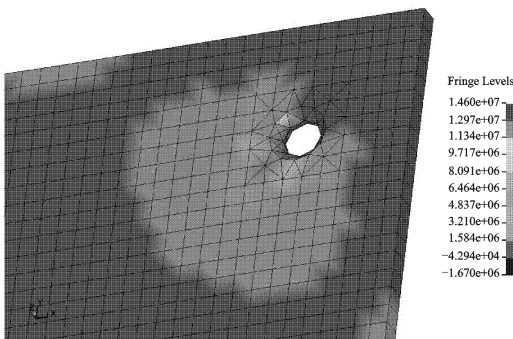


图10 爆炸荷载下的孔边应力云图

### 3.4 常规爆炸荷载下的动力放大系数

假定玻璃板在弹性范围,静载荷集度与动载荷峰值相同的情况下,定义其动力放大系数  $K_d$  为跨中最大动位移  $\delta_d$  与最大静位移  $\delta_s$  之比。取玻璃板的荷载峰值  $P=18$  kPa,弹性基本周期  $T=32.2$  ms,  $t_d$  为荷载持续时间,图 11 给出了玻璃板的动力放大系数  $K_d$  的变化趋势。从图 11 可以看到,当  $t_d/T < 1$  时,爆炸冲击荷载对玻璃板的动力响应影响较显著;当  $t_d/T$  比较大,或者加载方式趋近于静力荷载时,玻璃板的动力系数趋近于 1,与试验结果一致。

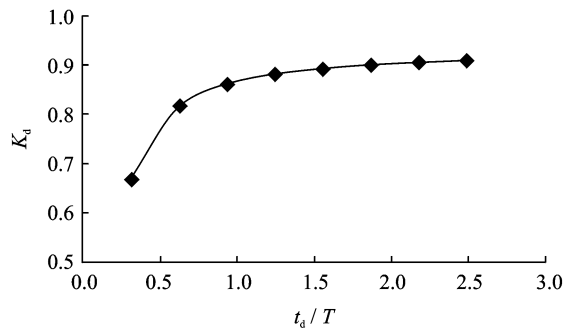


图11 玻璃板的动力放大系数

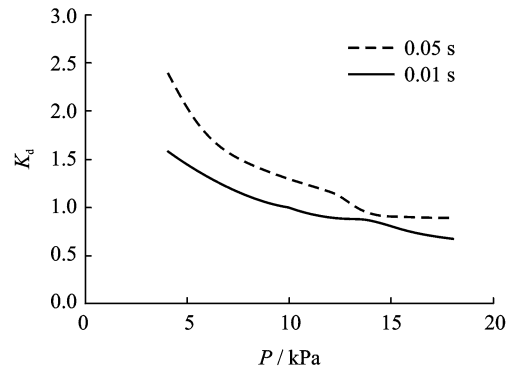


图12 动力放大系数与荷载峰值的关系

### 3.5 荷载峰值对放大系数的影响

图 12 给出了动力放大系数  $K_d$  与爆炸荷载峰值  $P$  之间的关系。从图中可以看到,在爆炸冲击压力较小范围内,动力放大系数随着峰值压力的增大而减小。荷载持续时间为 0.05 s 时,动力放大系数由  $P=4$  kPa 时的 2.39 减小为  $P=18$  kPa 时的 0.89,而长持时  $t_d=0.01$  s 时,动力放大系数由  $P=4$  kPa 时的 1.58 减小为  $P=18$  kPa 时的 0.67。

## 4 结论

1) 加载时间对点支式玻璃板的动态响应影响显著,强冲击波、短持时,玻璃板会有明显的谐运动;而随着荷载作用时间的加大,玻璃板的变形特点趋近于静力荷载下变形特点。

2) 在荷载持续时间相同、等冲量的情况下,常规爆炸荷载与冲击荷载对点支式玻璃板产生的位移响应不同,而且得到的玻璃板中的最大位移差别也很大。

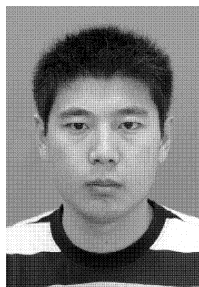
3) 玻璃板的动力放大系数与荷载持续时间及荷载峰值压力密切相关,随着爆炸荷载持续增长,玻璃板的动力放大系数趋近于 1,在峰值压力较小范围内,动力放大系数随着压力的增大而减小。

4) 荷载作用方式对于点支式玻璃板的支座处

孔边应力影响也不尽相同,爆炸荷载下产生的孔边应力要远大于冲击荷载下的孔边应力,应力差值达到了2倍多。所以缓解玻璃板支座处孔边应力集中,特别是爆炸荷载作用的情况下,可以大大提高玻璃板的抗爆性能。

### 参 考 文 献

- [1] Shi Yanchao, Hao Hong, Li Zhongxian. Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(1): 1213-1227.
- [2] 孙建运,李国强,陆勇.爆炸荷载作用下SRC柱中混凝土的断裂破坏原理[J].振动、测试与诊断,2008,28(2):168-171.  
Sun Jianyun, Li Guoqiang, Lu Yong. Concrete fracture mechanisms of steel-reinforced-concrete columns subjected to blast loading[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 168-171. (in China)
- [3] Norville H S, Harvill N, Conrath E J, et al. Glass-related injuries in oklahoma city bombing[J]. ASCE: Journal of Performance of Constructed Facilities, 1999, 13(2): 50-56.
- [4] Norville H S, Conrath E J. Considerations for blast-resistant glazing design[J]. ASCE: Journal of Architectural Engineering, 2001, 7(3): 80-86.
- [5] Vallabhan C V G, Das Y C, Magdi M, et al. Analysis of laminated glass units[J]. ASCE: Journal of Structural Engineering, 1993, 119(5): 1572-1585.
- [6] 张其林,殷永炜,黄庆文.点支式中空和夹层玻璃承载性能的试验研究[J].建筑结构学报,2004,25(1):93-98.  
Zhang Qilin, Yin Yongwei, Huang Qingwen. Experimental study on load bearing capacity of point-supported mid-hollow and laminated glasses[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 93-98. (in Chinese)
- [7] Reed D E, Simiu E. Wind loading and strength of cladding glass[J]. ASCE: Journal of Structural Engineering, 1984, 110: 715-729.
- [8] Kameswara Rao C V S. Safety of glass panels against wind loads[J]. Engineering Structures, 1984, 6: 232-234.
- [9] Holmes J D. Wind action on glass and Brown's integral[J]. Engineering Structures, 1985, 7: 226-230.
- [10] Dharani L R, Wei Jun, Ji Fangshen. Failure analysis of laminated architectural glass panels subjected to blast loading[C]//Structures Under Shock and Impact VII. Southampton: WIT Press, 2002: 37-46.
- [11] Wei Jun, Mahesh S S, Lokeshwarappa R D. Failure analysis of architectural glazing subjected to blast loading[D]. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Missouri-Rolla, 2006.
- [12] David C W, Brian J Z. Laminated glass curtain walls and laminated glass lites subjected to low-level blast loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(3): 466-477.
- [13] Krauthammer T, Altenberg A. Negative phase blast effects on glass panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(1): 1-17.
- [14] 高轩能,王书鹏.建筑夹层玻璃在静力及爆炸荷载下的挠度[J].硅酸盐学报,2008,36(10):1477-1483.  
Gao Xuanneng, Wang Shupeng. Deflection of architectural laminated glasses under static and explosive loads[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(10): 1477-1483. (in Chinese)
- [15] Goodfellow A M, Schleyer G K. Experimental investigation of corner-supported architectural glazing under pulse pressure loading[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2003, 38(5): 469-481.
- [16] Hallquist J O. LS-DYNA3D theoretical manual[R]. Livermore California: Livermore Software Technology Corporation, 1993.
- [17] Bauer H F. Nonlinear response of elastic plates to pulse excitations[J]. Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, 1968, 3: 47-52.
- [18] Teng T L, Liang C C, Liao C C. Transient dynamic large-deflection analysis of panel structure under blast loading[J]. JSME International Journal, Series A, 1996, 39(4): 591-597.
- [19] Vallabhan C V G. Iterative analysis of nonlinear glass plates[J]. ASCE: Journal of Structural Engineering, 1983, 109(2): 489-502.



**第一作者简介:**葛杰,男,1977年7月生,博士研究生。主要研究方向为建筑结构和防护工程的抗爆性能。曾发表《建筑夹层玻璃在冲击荷载下的破坏研究概述》(《结构工程师》2010年第26卷第4期)等论文。

E-mail: gj3258899@126.com