DOI: 10.11883/bzycj-2017-0018
文章编号: 1001-1455(2018)01-0119-05

爆炸载荷下中空夹层玻璃的动力响应影响因素*

史 博[1,2],张晓颖[1,2],李 阔[1,2],李志强[1,2]
(1. 太原理工大学力学学院应用力学与生物医学工程研究所,山西 太原 030024;
2. 太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室,山西 太原 030024)

摘要: 利用 LS-DYNA 有限元软件,基于多物质 ALE 算法,模拟中空夹层玻璃在爆炸载荷下的动力学响应,通过变化 PVB 夹层属性和中空气体层厚度分析了其改变对玻璃板板心最大挠度的影响。结果表明:(1)随气体层厚度的增加,中空钢化夹层玻璃上层玻璃板挠度减小而下层玻璃板挠度增加;(2)一定气体层厚度下,随夹层杨氏模量的增加,上、下玻璃板的挠度减小。

关键词: 爆炸载荷;中空夹层玻璃;动力响应;最大挠度
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

中空玻璃以其隔热保温、隔音、抗冷凝等特性得到了很好的应用。在建筑行业中,中空玻璃由于透光性能好,能够减轻建筑物结构质量等优点,是一种优良的节能环保结构,并且在建筑行业中得到了很广泛的应用[1-2]。

对于夹层玻璃的研究有多种模型,Hidallana-Gamage 等[3]比较二维壳模型和三维固体模型后,认为都能很好地模拟夹层玻璃受爆炸载荷的行为。邓龙兵等[4-6]等采用 LS-DYNA 中的多物质 ALE 算法真实再现了考虑框架边界条件的中空夹层玻璃幕墙在爆炸载荷作用下的三维动力学响应,并利用高性能计算机模拟爆炸冲击波与中空夹层玻璃之间的相互耦合行为,得到玻璃失效形式,并与相应的实验比较,得到了较好的结果。吕卫东等[7]从玻璃所处的的环境、玻璃幕墙的设计以及有效的碎片阻挡系统等方面讨论了减小玻璃因爆炸造成损失的方法,对玻璃幕墙建筑结构的抗爆设计具有重要意义。由于中空夹层内部因素对中空夹层玻璃动力响应影响的研究尚比较缺乏,本文中通过 LS-DYNA 有限元软件,对四边夹支的中空夹层玻璃面板进行数值分析,通过改变中空气体层厚度和 PVB 材料杨氏模量分析其对中空夹层玻璃板动态响应的影响,以期为中空夹层玻璃设计提供高效和经济的设计方案。

1 有限元模拟

1.1 有限元模型

采用 LS-DYNA 有限元软件分析中空夹层玻璃在爆炸载荷作用下的动态响应。中空夹层玻璃板采用 100 cm×100 cm×0.6 cm 的玻璃板,为了提高计算效率取其 1/4 模型来研究,相应的对称面采用对称边界条件。其中,上、下两块夹层玻璃中预留一定厚度的干燥气体,边界由 1 cm 的密封胶密封。采用 0.6 cm 厚的玻璃板,根据夹层玻璃 PVB 膜层厚度选用准则,选用厚度为 0.114 cm 的 PVB 胶层。中空夹层玻璃板模型如图 1 所示。

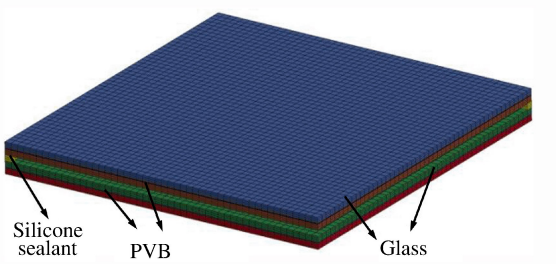


图 1 中空夹层玻璃有限元模型

Fig. 1 Finite element model of hollow laminated glass

* **收稿日期**: 2017-01-13; **修回日期**: 2017-04-10。 “第十一届全国爆炸力学学术会议”推荐论文。
基金项目: 国家自然科学基金项目(11672199);山西省自然科学基金项目(201601D011011)
第一作者: 史 博(1992—),男,硕士研究生; **通信作者**: 李志强,380966503@qq.com。

在整体的有限元模型中加入空气和 TNT 炸药网格，如图 2 所示。空气域大小为 50 cm×50 cm×50 cm，网格尺寸为 1.5 cm。其中 TNT 炸药质量为 35 g，呈圆柱体，半径为 2 cm，高度为 4 cm。TNT 炸药网格与空气网格共节点，为使 TNT 炸药与空气接触处网格一致，在空气与炸药接触处加密网格。中空气体层不建模，认为玻璃板之间密封干燥的惰性气体。

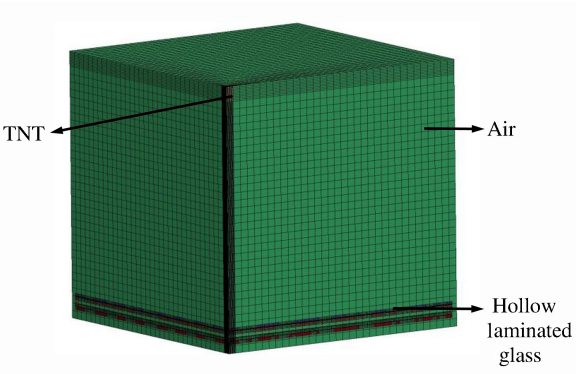


图 2 空气和 TNT 炸药有限元模型

Fig. 2 Finite element model of air and TNT explosive

中空钢化夹层玻璃上下层玻璃与密封胶之间的接触采用简单的面对面接触，为避免上层玻璃因变形过大侵入下层，除了玻璃与密封胶定义此接触外，上、下两层玻璃也用此接触定义。考虑到流体与固体之间的相互作用情况，空气区域与玻璃板之间采用流固耦合定义[8]，使用基于罚函数的耦合方式定义流体与固体的相互作用，能够保证耦合过程中能量守恒且稳定性好。

1.2 材料模型参数

玻璃材料是一种典型的脆性材料，有比较高的冲击压缩强度，但其抗拉强度较其抗压强度相对较低[9]。采用应用较广的 JH-2 材料模型，并通过 MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS 关键字来定义。该模型主要用来模拟脆性材料如玻璃、陶瓷等高速冲击下的破坏行为。玻璃的材料参数为：$\rho=2.53$ g/cm^3 为玻璃密度，$G=30$ GPa 为剪切模量，$\varepsilon=10^{-6}$ 为应变，$T_m=0.1$ GPa 为最大拉伸强度，$H=5.95$ GPa 为弹性极限，$H_p=2.92$ GPa 为弹性极限的压力分量，$\beta=1$ 为弹性能与静水能的转换比例；$A=0.93$，$B=0.2$，$C=0.003$，$M=0.35$，$N=0.77$，$D_1=0.043$，$D_2=0.85$，$K_1=45.4$，$K_2=-138$，$K_3=290$ 等表示玻璃模型相关参数值，单位制均采用 cm-g-μs 。

中空玻璃边缘采用硅酮胶密封，由于硅酮胶在接触空气后会固化成橡胶类的材料，因此本文中硅酮胶采用材料模型 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 定义，此模型为弹塑性模型，其相关的材料参数为：密度为 1.1 g/cm^3，弹性模量为 2.3 MPa，泊松比为 0.495，屈服应力为 2.3 MPa。

空气的材料模型通过使用 MAT_NULL 来定义，此模型在模拟的过程中将应力与应变忽视掉，只去考虑该材料的真实运动情景。为了简便，将空气视为理想气体处理，状态方程为：

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

式中：$C_0=0$，$C_1=0$，$C_2=0$，$C_3=0$，$C_4=0.4$，$C_5=0.4$，$C_6=0$；空气的密度为 1.18×10^{-3} g/cm^3，多方指数为 1.4，空气的初始能量密度为 0.253 3 MPa，初始压力为 1 kPa。

TNT 炸药采用通用炸药模型 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN，该模型采用 JWL 状态方程：

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V}$$

式中：p 为爆压，A、B、R_1、R_2 和 ω 分别为该方程的相关参数，E 与 V 分别为炸药单位体积的初始内能跟初始相对体积。该模型对应的状态方程用 EOS_JWL 定义，其相关参数参考文献[10]。

PVB 胶是工业上常用的聚合物，具有一定的黏性和良好的柔韧性。本文中 PVB 胶采用材料模型同上述密封胶材料模型一致，其相关参数参考文献[11-12]。

2 计算结果与讨论

2.1 中空夹层玻璃位移模式

在不考虑玻璃与 PVB 胶层失效，炸药质量为 35 g，爆距为 50 cm 时利用 LS-DYNA 分别模拟了 4 组不同气体层厚度和 5 组不同 PVB 胶层杨氏模量值下的中空钢化夹层玻璃，并分析其结果。分以下两种情况讨论：(1)当确定 PVB 杨氏模量为 250 MPa 时，变化气体层厚度分别为 6、9、12 和 15 mm；(2)确定气体层厚度为 6 mm，变化杨氏模量分别为 250、375、500、625 和 750 MPa。

取中空夹层玻璃模型中间气体层为 6 mm，PVB 胶层杨氏模量为 250 MPa 的模型作为基本研究参照，其板心的压力随时间变化关系如图 3 所示，变形云图见图 4。其中 A 点为上层玻璃板心，B 点为下层玻璃板心。

从图 4 中可以看出当爆炸冲击波传播玻璃时，下层玻璃板率先向下振动，经过 3 ms 后，中空夹层玻璃上下两层振动到最低值。3～8 ms 中空夹层玻璃板回弹，到 8 ms 时，向上振动到最大，上层玻璃板回弹程度较大而下层玻璃板仅回弹到初始位置附近。当爆炸后 10 ms 时，上层玻璃板回到起始位置，而下层玻璃板开始继续向下振动。由上述表明，中空夹层玻璃的下层玻璃板主要在起始位置的下方振动，而上层夹层玻璃板在起始位置上下范围振动幅度都较大。

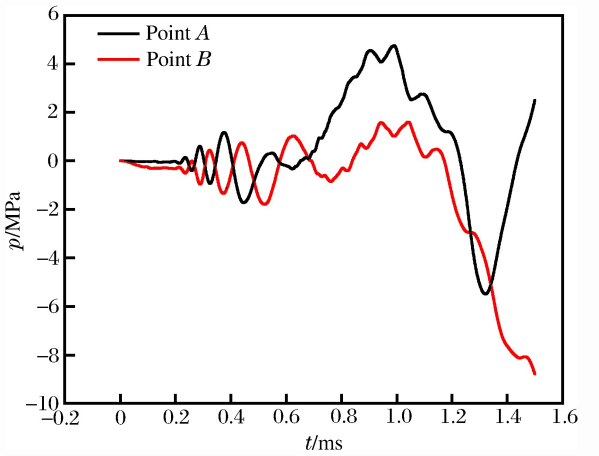


图 3　板心单元压力时程曲线

Fig. 3　Histories of pressure at the pane center

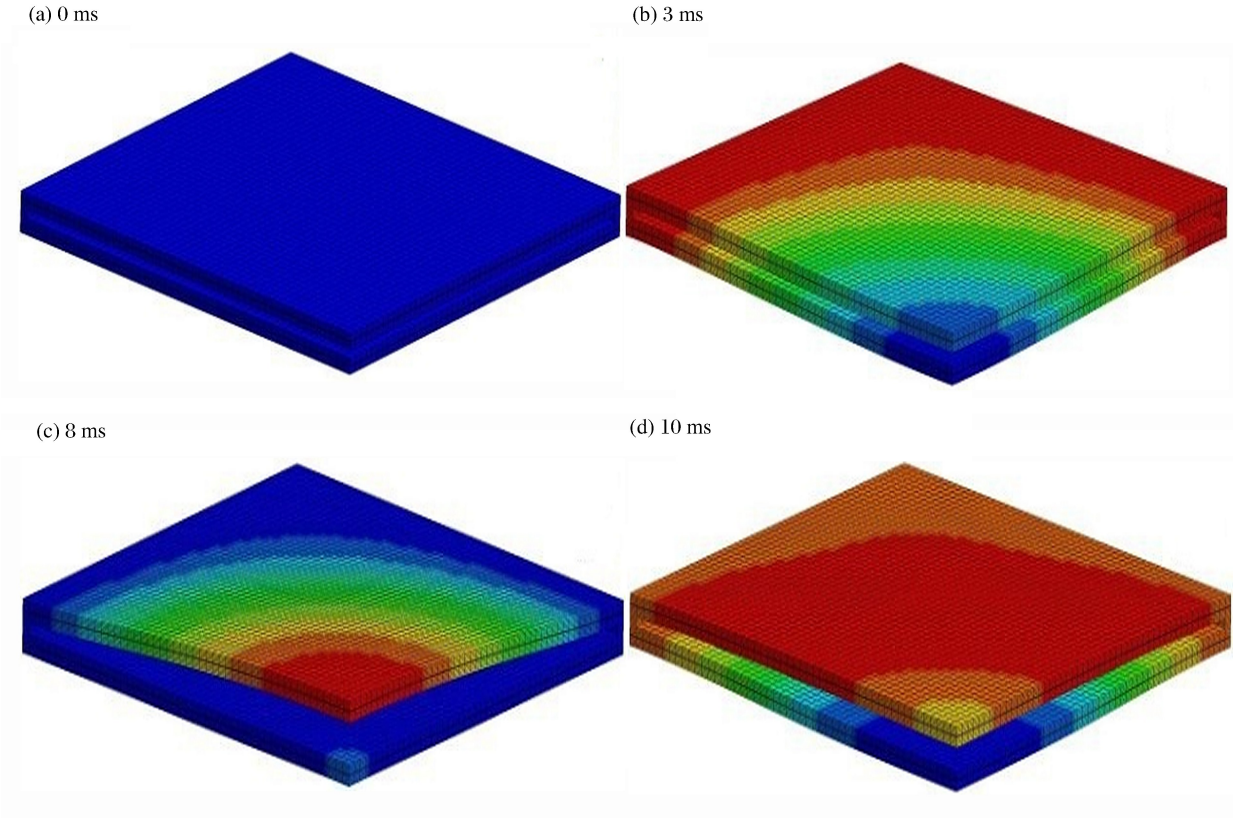


图 4　中空夹层玻璃位移模式分布云图

Fig. 4　Displacement distribution of hollow laminated glass

2.2　中空气体层厚度的影响

图 5 所示为不同气体层厚度与玻璃板板心最大位移关系，从图中可以看出，随着气体层厚度的增大，受爆炸载荷作用的中空钢化夹层玻璃的上层玻璃板的最大位移逐渐减小，而下层玻璃板的最大位移逐渐增大。再对比 A、B 两点的位移大小，表明下层玻璃板受到的影响更大。且在气体层厚度达到 12 mm时，最大位移变化率发生突变，因此选择气体层厚度时最好不超过 12 mm。

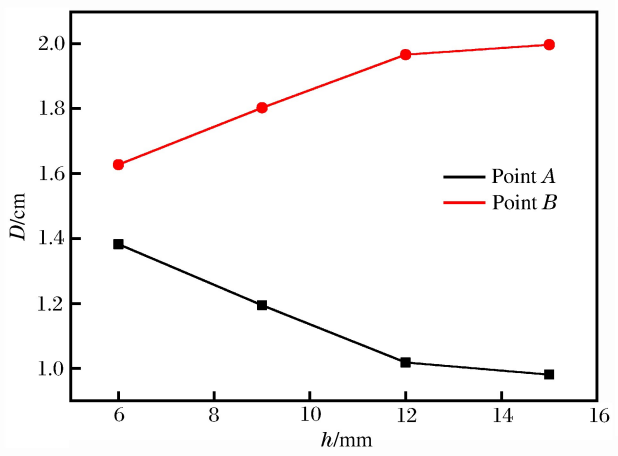


图 5 不同气体层厚度下玻璃板板心最大位移变化

Fig. 5 Maximum displacement of pane center varying with different thicknesses of glass

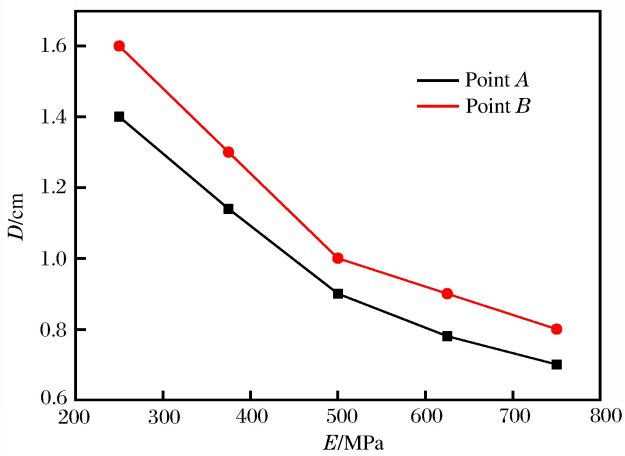


图 6 板心最大位移随夹层杨氏模量变化曲线

Fig. 6 Maximum displacement of pane center varying with Young's modulus of interlayer

2.3 PVB 杨氏模量大小的影响

在其他情况不变且确定中空气体层厚度为 6 mm 时，改变 PVB 杨氏模量的大小，得到上、下层板心的最大位随杨氏模量的变形趋势如下图 6 所示。

由图 6 中可以看出 PVB 杨氏模量的变化对中空玻璃板心的最大挠度变化有显著的影响。随 PVB 杨氏模量的增大，中空钢化夹层玻璃上下板的最大位移均逐渐减小，且 PVB 夹层杨氏模量在 250～500 MPa区间内的变化率较 500～750 MPa 区间内的大，在 500 MPa 时其变化率发生突变。因此在其他条件一定的情况下选择杨氏模量约为 500 MPa 的 PVB 夹层较合适。

3 结 论

本文中在考虑空气模型的情况下，采用多物质单元的 ALE 算法，利用 LS-DYNA 有限元软件模拟了中空钢化夹层玻璃在爆炸载荷下的动力学响应。并通过变化中空气体层厚度和 PVB 夹层杨氏模量大小来分析其对玻璃的响应，结果表明：

(1)在确定中空气体层厚度为 6 mm 和 PVB 夹层杨氏模量为 250 MPa 时，爆炸载荷下的中空夹层玻璃下板心的挠度较上板心的挠度大。因此表明受爆炸载荷的中空夹层玻璃，其下板受到的影响较上板明显。

(2)其他条件不变的情况下，改变中空气体层厚度和 PVB 夹层杨氏模量对中空夹层玻璃有显著的影响。随气体层厚度的增大，中空夹层上玻璃板的挠度减小，而下层玻璃板的挠度变大，中空气体层越厚，其下层玻璃越容易破坏，且在 12 mm 时，板心最大挠度变化率发生突变，因此中空气体层厚度在选择时最好不要超过 12 mm。随 PVB 夹层杨氏模量的增大，中空夹层上下玻璃板的挠度均减小，在约 500 MPa时，板心最大挠度变化率发生突变。

参考文献：

[1] 邱永忠. 中空玻璃在建筑节能中的应用[J]. 上海建材，2009(2)：15-17.
QIU Yongzhong. Application of insulating glass in building energy saving[J]. Shanghai Building Materials, 2009(2):15-17.

[2] 戚永河. 中空玻璃节能概述[J]. 门窗，2007(3)：25-28.
QI yonghe. Summary of energy saving of insulating glass[J]. Doors & Windows, 2007(3):25-28.

[3] HIDALLANA-GAMAGE H D. Computational analysis of laminated glass panels under blast loads: A comparison of two dimensional and three dimensional modelling approaches[J]. International Journal of Engineering and Sci-

ence, 2013(2):69-79.

[4] 邓荣兵，金先龙，陈峻. 爆炸流场与玻璃幕墙动力响应的仿真计算方法[J]. 振动与冲击，2011，30(3)：14-17.
DENG Rongbing, JIN Xianlong, CHEN Jun. Numerical simulation method for blast flow and dynamic response of glass curtain wall[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(3):14-17.

[5] 邓荣兵，金先龙，陈峻，等. 爆炸冲击波对玻璃幕墙破坏作用的多物质 ALE 有限元模拟[J]. 高压物理学报，2010，24(2)：81-87.
DENG Rongbing, JIN Xianlong, CHEN Jun, et al. Application of ALE multi-material formulation for blast analysis of glass curtain wall[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010,24(2):81-87.

[6] 邓荣兵，金先龙，陈峻. 中空夹胶玻璃幕墙爆炸响应的三维数值模拟[J]. 上海交通大学学报，2010，44(10)：1456-1459.
DENG Rongbing, JIN Xianlong, CHEN Jun. Three-dimensional numerical simulation for blast response of double laminated insulating glass curtain wall[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010,44(10):1456-1459.

[7] 吕卫东，黄华，甘露，等. 玻璃幕墙抗爆防护设计研究[J]. 钢结构，2011，26(12)：20-24.
LÜ Weidong, HUANG Hua, GAN Lu, et al. Anti-blast protective design of glass curtain wall[J]. Steel Construction, 2011,26(12):20-24.

[8] 何联格. 液力减振器流固耦合仿真与结构异响分析[D]. 重庆：重庆大学，2011.

[9] 李胜杰. 爆炸载荷下夹层玻璃的动态响应及裂纹扩展的研究[D]. 太原：太原理工大学，2015.

[10] 薛再清，徐更光. 用修正的 KHT 状态方程预报炸药爆轰性能[J]. 北京理工大学学报，1998(3)：269-273.
XUE Zaiqing, XU Gengguang. Using revised KHT equation of state to predict explosives' detonation property[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 1998(3):269-273.

[11] HIDALLANA-GAMAGE H D, THAMBIRATNAM D P, PERERA N J. Numerical modelling and analysis of the blast performance of laminated glass panels and the influence of material parameters[J]. Engineering Failure Analysis, 2014,45(8):65-84.

[12] HIDALLANA-GAMAGE H D, THAMBIRATNAM D P, PERERA N J. Failure analysis of laminated glass panels subjected to blast loads[J]. Engineering Failure Analysis, 2014,36(1):14-29.

Influencing factors of dynamic response of hollow laminated glass subject to blast loads

SHI Bo[1,2], ZHANG Xiaoying[1,2], LI Kuo[1,2], LI Zhiqiang[1,2]

(1. *Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan* 030024, *Shanxi, China*;
2. *Shanxi Key Laboratory of Material Strength & Structural Impact, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan* 030024, *Shanxi, China*)

Abstract: This paper simulated the dynamic responses of hollow tempered laminated glass under the blast load based on a multi-material ALE algorithm using the software LS-DYNA, and analyzed the effect of changing the PVB interlayer property and the thickness of the hollow gas layer on the maximum deflection of the glass plate. The result shows that, with the increase of the thickness of the gas layer, the upper glass plate deflection of the hollow laminated glass decreases, while the lower glass plate deflection increases. However, the deflection of the upper and lower glass plates decreases with the increase of the Young's modulus of the interlayer. The results provide a reference for the safe and efficient design of the hollow laminated glass.

Keywords: blast loads; hollow laminated glass; dynamic response; maximum deflection

（责任编辑　王易难）