文章编号：1001-1455(2014)02-0229-06

爆炸冲击波对 3 种建筑玻璃的作用过程*

江 祺[1]，刘 彤[1,2]，王汝恒[1]，潘 婷[3]

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院，四川 绵阳 621010；
2. 中国工程物理研究院培训中心，四川 绵阳 621999；
3. 内江师范学院工程技术学院，四川 内江 641000)

摘要：借助 ANSYS/LS-DYNA 程序，采用 ALE 方法描述炸药和空气场，采用 Lagrange 方法描述玻璃，玻璃除考虑拉应力失效外，还增加了切应变失效判据，并给出了针对不同玻璃的建模方法和计算参数。利用建立的模型对爆炸冲击波对钢化夹胶玻璃、普通夹胶玻璃和浮法玻璃 3 种常用建筑玻璃的作用过程进行了数值模拟。计算结果可较好地反映实验中玻璃出现的冲切破坏现象，发生破坏时的冲击波超压也与实验结果吻合。研究表明，钢化玻璃比普通玻璃具有更强的抗爆性能，夹层玻璃中的 PVB 能有效地阻止玻璃的飞溅。

关键词：爆炸力学；抗爆性能；冲击波超压；建筑玻璃；失效判据

中图分类号：O383.2 **国标学科代码**：1303520 **文献标志码**：A

建筑玻璃的抗爆性能已成为人们日益关注的一个重要课题[1]，纯理论方法难以量化分析，而实验研究又存在费用昂贵和具有一定危险性的问题。近年用数值模拟对玻璃抗爆性能的研究取得了一定进展。M. Larcher 等[2]建立了分层壳单元的夹层玻璃模型，定义了 PVB 胶的弹塑性失效准则，并通过实验验证了模型的正确性。T. Krauthammer 等[3]评估了爆炸冲击波负压阶段对玻璃板的影响。邓荣兵等[4]通过 LS-DYNA 软件，采用多物质的 ALE 有限元法，研究了玻璃幕墙在爆炸冲击波作用下的动态响应过程，分析了玻璃幕墙的破坏情况。上述研究中，玻璃模型只是通过线弹性材料模型来模拟，并没有建立不同种类玻璃在爆炸冲击波作用下的计算模型，对玻璃的失效准则也只是定义了拉应力失效。

本文中，建立 3 种常用建筑玻璃在近场爆轰作用下的有限元分析模型，以冲击波超压对玻璃面板作用产生的拉应力和剪切应变为失效判据，并通过实验对模型进行对比验证。空气冲击波超压有自由场超压和壁面超压 2 种[5]。壁面超压是指初始冲击波到达壁面(主要是地面)产生反射后壁面所承受的压力，该压力比自由场压力高。由于爆炸的破坏作用等原因，要测定自由场超压很困难，故本文中的超压值为壁面超压值。

1 数值模拟

选用 ANSYS/LS-DYNA 作为计算工具。采用 LS-DYNA 对空气冲击波传播规律的模拟包括 TNT 炸药的起爆、爆轰波及空气冲击波的形成及传播、冲击波的相互作用等复杂的物理化学过程，几何模型如图 1 所示。

1.1 几何模型和计算方法

建立的几何模型主要包括 TNT 炸药、空气和玻璃。考虑到问题的对称性，为减少计算量，取 1/2 实体进行建模。其中，炸药采用柱形结构；空气场为长 1.2 m、宽为 0.25 m 与玻璃同宽的矩形结构。模型中对称面采用对

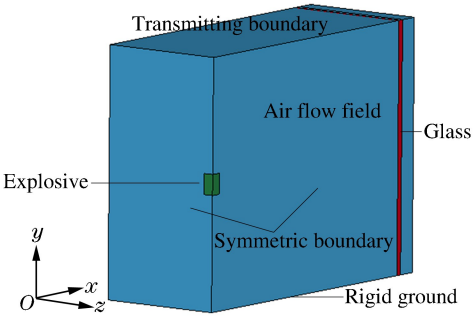


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculational model

* **收稿日期**：2012-09-24；**修回日期**：2013-01-07
基金项目：国家自然科学基金项目(10972187)
作者简介：江 祺(1988—)，男，硕士研究生。

称边界,非对称面采用透射边界,使用刚性壁面来模拟地面。模拟整个爆炸过程的数值方法主要包括 Lagrange 法、Euler 法、ALE(arbitrary Lagrange-Euler)法、SPH(smoothed particle hydrodynamics)法[6]。本文中采用 ALE 法实现炸药与空气场的耦合作用。首先,在结构边界运动的处理上,引进了 Lagrange 法的特点,能有效跟踪物质结构边界的运动;其次,在内部网格的划分上,吸收了 Euler 法的长处,使内部网格单元独立于物质实体,可以根据定义的参数,在求解过程中适当调整网格位置,使网格不出现严重畸变。

1.2 有限元模型

模型中全部采用 SOLID164 八节点实体单元。为了模拟玻璃的裂纹扩展情况,用 Lagrange 单元描述玻璃,用多物质 ALE 单元描述空气和 TNT 炸药,采用 Van Leer(二阶精度)方法进行计算。空气场与玻璃相连接的一层网格为 ALE 网格到 Lagrange 网格的过度层网格,实为 Lagrange 网格。当载荷过大时,会发生网格畸变,导致计算无法正常进行。本模拟中采用当过渡层网格变形在可控范围内并且冲击波正压段已作用到玻璃时,通过重启动删除炸药和空气场网格的方法保证计算正常进行,并且能提高计算效率,计算结果也在可接受范围。模拟中,通过命令 * ALE_MUITI-MATERIAL_GROUP 和 * SECTION_SOLID_ALE 定义空气和炸药的耦合及其算法;通过命令 * CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID_TITLE 定义空气与玻璃面板之间的耦合作用。

1.3 材料模型和状态方程

1.3.1 炸药

炸药为 60 g TNT,采用 * HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型作为炸药的材料模型,采用 JWL 状态方程描述 TNT 炸药[7],通过命令 * INITIAL_DETONATION 来控制炸药起爆的时间和爆心。JWL 状态方程的表达式为:

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega e_0}{V} \tag{1}$$

式中:p 为爆轰压力;V 为爆轰产物体积相对于初始体积的比值;e_0 为初始体积内能;ω、A、B、R_1 和 R_2 均为方程系数。该状态方程通过反应爆炸气体压力-体积关系来描述炸药的爆轰过程。

具体参数值为:炸药密度 $\rho=1.631\ \mathrm{g/cm^3}$,爆速 $D=6.717\ \mathrm{km/s}$,爆轰波阵面压力 $p_{\mathrm{CJ}}=18.5\ \mathrm{GPa}$,$e_0=7\ \mathrm{GPa}$,$V_0=1.0$,$A=540.9\ \mathrm{GPa}$,$B=9.373\ \mathrm{GPa}$,$R_1=4.5$,$R_2=1.1$,$\omega=0.35$。

1.3.2 空气

对空气采用 * MAT_NULL 材料模型以及线性多项式 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程加以描述[8]。线性多项式状态方程为:

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

式中:$C_0\sim C_6$ 为常量,e 为初始体积内能,$\mu=1/V_0-1$,V_0 为相对体积。具体参数值为:空气密度 $\rho=0.001\ 3\ \mathrm{g/cm^3}$,$C_0=-0.1\ \mathrm{MPa}$,$C_1=C_2=C_3=0$,$C_4=C_5=0.4$,$C_6=0$,$E=0.25\ \mathrm{MPa}$,$\mu=1$。

1.3.3 玻璃

对玻璃面板采用框支约束,对玻璃材料四周采用固端约束。通过命令 * MAT_ADD_EROSION 实现对玻璃材料失效准则的定义。由于是近场的爆轰作用,玻璃除了拉应力失效,应该还会有冲切破坏,因此采用拉应力和切应变来控制玻璃材料的破坏。玻璃单元达到破坏后,即从模型中删除,从而得到玻璃的裂纹扩展情况。

对普通玻璃和钢化玻璃采用线弹性材料模型 * MAT_ELASTIC[9]。具体参数值为:密度 $\rho=2.56\ \mathrm{g/cm^3}$,弹性模量 $E=72\ \mathrm{GPa}$,泊松比 $\nu=0.2$。

对浮法玻璃采用 * MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS (JH-2)模型[10]。材料未发生损伤时,JH-2 本构模型中材料的状态方程可表示为:

$$p=K_1\mu+K_2\mu^2+K_3\mu^3 \tag{3}$$

式中:K_1 为材料的体积模量,K_2、K_3 为材料常数,p 为静水压力,μ 为体应变。

JH-2 强度模型是将材料的等效应力表示成静水压力的幂函数形式并且与应变率和损伤因子 δ 相关，其中定义的量纲一材料强度模型表示为：

$$\sigma^* = \sigma_i^* - \delta(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \tag{4}$$

当材料未发生损伤($\delta=0$)时，量纲一等效应力表示为：

$$\sigma_i^* = A(p^* + \sigma_{t,m}^*)^N[1 + C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \tag{5}$$

当材料完全破碎($\delta=1$)时，量纲一等效应力表示为：

$$\sigma_i^* = Bp^{*M}[1 + C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \tag{6}$$

同时等效破碎强度应小于材料的最大破碎强度 $\sigma_{f,max}^*$。强度模型中引入的材料常数为 A、B、C、M、N、$\sigma_{t,m}$ 以及 $\sigma_{f,max}^*$。p^* 为量纲一静水压力，$p^* = p/p_{HEL}$，$\sigma_{t,m}^* = \sigma_{t,m}/p_{HEL}$，其中 p_{HEL} 为材料处于 Hugoniot 弹性极限时的压力分量，$\sigma_{t,m}$ 为材料能承受的最大静水拉应力，$\dot{\varepsilon}$ 为真实应变率，$\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。

具体参数值为：密度 $\rho=2.53$ g/cm^3，剪切模量 $G=30.4$ GPa，相对应变率 $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0=1.0$，抗拉强度 $T=0.15$ GPa，最大裂缝强度 $\sigma_{f,max}^*=0.5$，Hugoniot 弹性极限 $\sigma_{HEL}=5.95$ GPa，作用在 Hugoniot 弹性极限上压力 $p_{HEL}=2.92$ GPa，损伤因子 $D_1=0.053$，损伤因子 $D_2=0.85$，体积模量 $K_1=45.4$ GPa，$A=0.93$，$B=0.088$，$C=0.003$，$M=0.35$，$N=0.77$，$\beta=1.0$，$K_2=-138$ GPa，$K_3=290$ GPa。

1.3.4　PVB 胶

对玻璃夹层的 PVB 胶采用线性黏弹性模型 * MAT_VISCOELASTIC。通过定义玻璃与 PVB 胶之间的自动面-面接触来实现相互的粘结作用[4]。PVB 胶的具体参数为：密度 $\rho=1.1$ g/cm^3，弹性体积模量 $K=20$ GPa，短期剪切模量 $G_0=0.33$ GPa，长期剪切模量 $G_\infty=0.69$ MPa，衰减常数 $\beta=12.6$ s^{-1}。

2　模型验证

为了验证计算模型的合理性，对建筑玻璃的抗爆性能进行了实验研究，实验的工况条件与数值模型相同。在半径为 4 m 的爆轰实验塔内对 3 种框支玻璃开展爆轰实验。利用压力传感器测得不同爆距处的冲击波超压值，通过高速摄影机捕捉 3 种不同建筑玻璃在爆炸冲击波作用下的破坏情况，并通过反复计算得到符合本实验所用炸药的冲击波超压公式：

$$\Delta p_f = 0.01\frac{\sqrt[3]{W}}{R} + 0.084\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^2 + 0.21\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^3 \tag{7}$$

对计算模型进行校验和调试。式中：W 为炸药质量；R 为爆距。

通过实验不仅验证了计算模型，还与数值模拟结果进行了对比，并得到了建筑玻璃在爆炸冲击波作用下破坏的一些认识。

空气中爆炸冲击波超压峰值会受炸药和空气网格尺寸的影响，不同尺寸的网格会导致计算结果差异较大[11]，所以网格划分和网格数量的合理性对模拟结果至关重要。为观察玻璃的破坏形态，必须保证玻璃的网格数量，本文中玻璃 1/2 边长(25 cm)网格数量为 70，即玻璃全边(50 cm)网格数量为 140。

沿模型 x 方向(冲击波传播方向)网格数量对超压峰值的结果会有很大的影响，因此模型沿 x 方向网格数量的选择也尤为重要。模型沿 x 方向网格数量分别取为 150、180、200、220 进行计算。结果表明，沿模型 x 方向网格数量取 220 时，超压峰值最接近实验值，如图 2(a)所示。通过反复的调试

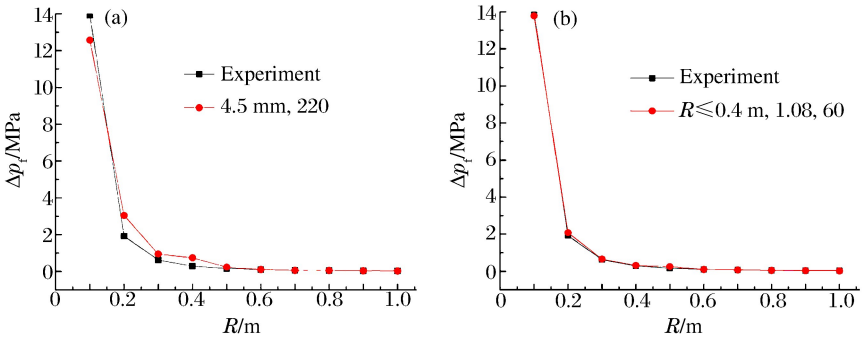


图 2　不同情况下冲击波超压峰值随爆距的变化

Fig. 2　Peak overpressures varied with explosion distance under different conditions

发现，爆距小于 0.5 m 时，超压峰值对网格尺寸的敏感度很高。，离爆源越近，单元越小时，冲击波超压峰值的计算值与实验值的偏差也越小，但相应会增加计算时间。为了更好地提高计算效率，在爆距 R 小于 0.5 m 的范围内采用渐进的网格划法[12]，以期计算所得冲击波超压峰值的衰减规律更符合常理。分别取渐进比例系数 1.02、1.05、1.08 和 1.10 进行计算。通过计算发现，当爆距小于 0.4 m、渐进比例系数为 1.08 时，计算得到的冲击波超压峰值最接近于实验值，如图 2(b)所示。

3 数值模拟与实验结果的对比

目前基于有限元方法还没有能够准确描述玻璃材料破坏的损伤模型，通常只能通过删除失效材料单元来实现玻璃裂纹扩展，并通过失效节点的分离实现玻璃碎片飞溅，所以数值模拟中玻璃的破坏形态与实验结果有一定差别。

3.1 钢化夹胶玻璃

R=0.4 m 时，数值模拟得到的 6 mm+6 mm 钢化夹胶玻璃的破坏特征与实验结果如图 3 和表 1 所示。钢化玻璃本身的性质决定其裂纹呈规则的放射状，碎块较均匀，且无明显棱角。实验中，钢化夹胶玻璃由于自身材料强度和 PVB 胶的作用，在爆距为0.4 m处才由于冲切作用，玻璃面板中部发生了局部飞溅，其余部分呈放射状开裂。数值模拟中正面破坏特征图表明，玻璃面板中部也明显出现了由冲切作用造成的裂纹。其余正面的四周和背面的裂纹均是由于玻璃面板受拉造成的。

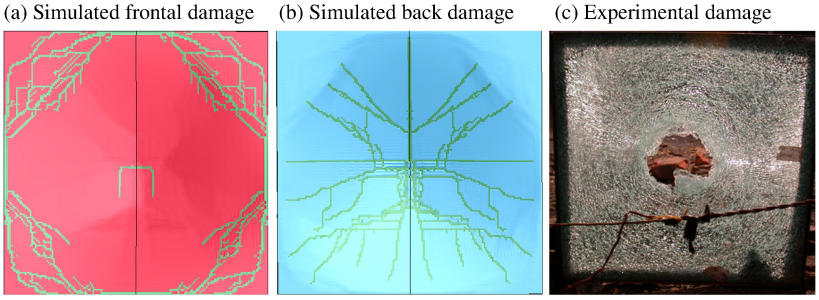


图 3 钢化夹胶玻璃的破坏特征

Fig. 3 Damage of toughened PVB-laminated glass

表 1 钢化夹胶玻璃的冲击波超压

Table 1 Shock overpressure of toughened PVB-laminated glass

R/m	Δp_f/MPa		破坏情况	
	数值模拟	实验	数值模拟	实验
0.6	0.098 6	0.100 6	未破坏	未破坏
0.5	0.247 0	0.160 1	破坏	破坏
0.4	0.419 0	0.287 1	破坏	局部飞溅

3.2 普通夹胶玻璃

R=0.6 m 时，数值模拟得到的 6 mm+6 mm 普通夹胶玻璃的破坏特征和实验结果的比较如图 4 和表 2 所示。普通玻璃本身的性质决定其裂纹呈不规则状，破坏后大小不均，且有明显棱角。实验中，普通夹胶玻璃由于 PVB 胶的作用未发生飞溅，破坏后玻璃面板呈不规则状开裂，且由于壁面的反射作用面板下部开裂较严重。数值模拟中，玻璃面板正面四周和背面下部由于受拉作用开裂较严重，与实验吻合。

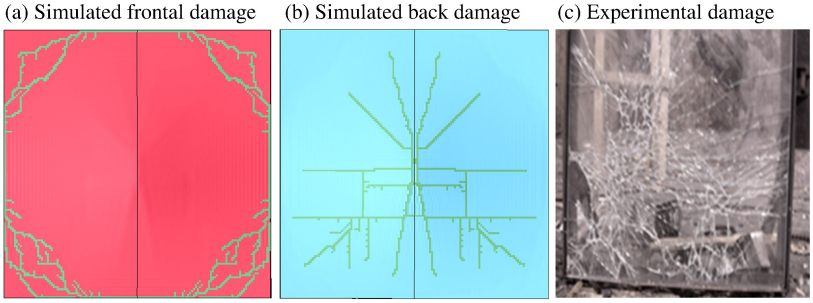


图 4 普通夹胶玻璃的破坏特征

Fig. 4 Damage of common PVB-laminated glass

表 2 普通夹胶玻璃的冲击波超压

Table 2 Shock overpressure of common PVB-laminated glass

R/m	Δp_f/MPa		破坏情况	
	数值模拟	实验	数值模拟	实验
0.8	0.048 3	0.049 6	未破坏	未破坏
0.7	0.067 4	0.068 6	破坏	破坏
0.6	0.098 6	0.100 6	破坏	破坏

3.3　单层浮法玻璃

$R=0.6$ m 时，数值模拟得到的 12 mm 单层浮法玻璃的破坏特征与实验结果的比较如图 5 和表 3 所示。由于没有 PVB 胶的保护，单层的浮法玻璃破坏后就发生了飞溅，玻璃碎块大小不均，且有明显的棱角。数值模拟结果展示了玻璃面板在破坏时的受力状态，并且反映玻璃面板纵向的变形和破坏状况较其他 2 种玻璃严重。

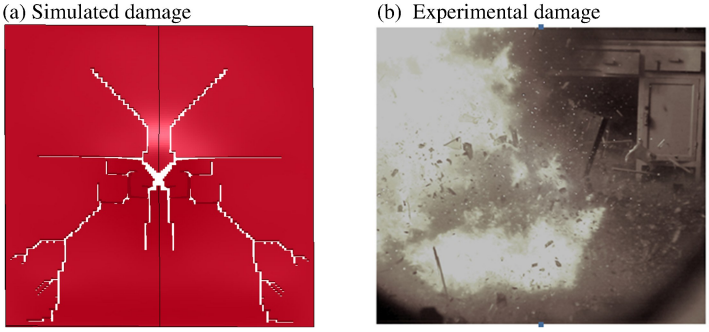


图 5　浮法玻璃的破坏特征

Fig. 5　Damage of float glass

表 3　浮法玻璃的冲击波超压

Table 3　Shock overpressure of float glass

R/m	Δp_i/MPa		破坏情况	
	数值模拟	实验	数值模拟	实验
0.8	0.048 3	0.049 6	未破坏	未破坏
0.7	0.067 4	0.068 6	破坏	整体飞溅
0.6	0.098 6	0.100 6	破坏	整体飞溅坏

4　结　论

借助 LS-DYNA 软件建立了 3 种建筑玻璃在近场爆轰冲击波作用下的数值模型，通过数值模拟和实验研究得到了以下结论：

(1)数值模拟结果与实验结果基本吻合，说明本文中所建立的计算模型和方法符合实际情况；

(2)爆距越大，计算得到的冲击波超压峰值越接近实验值；

(3)通过对 3 种建筑玻璃破坏结果的比较可知，同种玻璃材料在厚度相同的情况下，夹胶玻璃的抗爆性能优于单层玻璃的抗爆性能，钢化玻璃的抗爆性能优于其他 2 种玻璃的抗爆性能；

(4)模拟得到的玻璃破坏特征与实验结果有一定的差距，因为对玻璃材料这种脆性材料的破坏过程还没有一个较准确的数值描述方法，需在今后的工作中继续研究。

参考文献：

[1]　张青松，陈峻，李兴华，等. 高层建筑玻璃幕墙冲击波防护问题的研究[J]. 建筑科学，2007，23(6)：53-56.
Zhang Qing-song，Chen Jun，Li Xing-hua，et al. Research on blast protection issues of glazing curtain wall in high-level buildings[J]. Building Science，2007，23(6)：53-56.

[2]　Larcher M，Solomos G，Casadei F，et al. Experimental and numerical investigations of laminated glass subjected to blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering，2012，39(1)：42-50.

[3]　Krauthammer T，Altenberg A. Negative phase blast effects on glass panels[J]. International Journal of Impact Engineering，2000，24(1)：1-17.

[4]　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 Rong-long，Jin Xian-long，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.

[5]　仲倩，王伯良，黄菊，等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J]. 火炸药学报，2010，33(4)：32-35.
Zhong Qian，Wang Bo-lian，Huang Ju，et al. Study on the similarity law of TNT explosion overpressure in air[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants，2010，33(4)：32-35.

[6]　李裕春，时党勇，赵远. ANSYS10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践[M]. 北京：中国水利水电出版社，2006：235-

236.

[7] LS-DYNA keyword user's manual: Version 970[Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.

[8] 杨鑫,石少卿,程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J]. 爆破,2008,25(1):15-18.
Yang Xin, Shi Shao-qing, Cheng Peng-fei. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in the air[J]. Blasting, 2008,25(1):15-18.

[9] JGJ 102-2003 玻璃幕墙工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003:28-32.

[10] Cronin D S, Bui K, Kaufmann C, et al. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-DYNA[C]// Proceedings of the 4th European LS-DYNA User Conference. Stuttgart, Germany: DYNAmore GmbH, 2003.

[11] 石磊,杜修力,樊鑫. 爆炸冲击波数值计算网格划分方法研究[J]. 北京工业大学学报,2010,36(11):1465-1470.
Shi Lei, Du Xiu-li, Fan Xin. A study on the mesh generation method for numerical simulation of blast wave[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010,36(11):1465-1470.

[12] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实践分析[M]. 北京:科学出版社,2005:74-100.

Action of explosion shock wave on three kinds of architectural glass*

Jiang Qi[1], Liu Tong[1,2], Wang Ru-heng[1], Pan Ting[3]

(1. *School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621010, *Sichuan, China*;
2. *Training Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*;
3. *Engineering and Technology College, Neijiang Normal University, Neijiang* 641000, *Sichuan, China*)

Abstract: Based on ANSYS/LS-DYNA, the ALE method was used to describe the explosive and the air flow field, and the Lagrange method was used to describe the glasses. And the tensile stress failure of the glasses was considered as well as the shear-strain failure criterion. The corresponding calculation models and parameters were given for three kinds of architectural glass, respectively. Moreover, the numerical simulations were carried out to analyze the action processes of the explosion shock waves on the toughened PVB-laminated glass, the common PVB-laminated glass and the float glass, respectively. And the anti-explosion experiments were performed on these three glasses to compare with the numerical simulations. The comparisons show that the numerical results can reflect the punching failure phenomena of the glasses in the experiments. When the glasses occur to failure, their shock wave overpressures by numerical simulation are in agreement with the experimental results. Furthermore, the investigated results display that the toughened PVB-laminated glass has a higher explosion resistance than the common PVB-laminated glass and the PVB in the laminated glass can effectively prevent the glass from splashing.

Key words: mechanics of explosion; explosion resistance; shock wave overpressure; architectural glass; failure criterion

* Received 24 September 2012; Revised 7 January 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (10972187)
Corresponding author: Jiang Qi, jq_1587@163.com

(责任编辑 张凌云)