文章编号：1000-5773(2010)02-0081-07

爆炸冲击波对玻璃幕墙破坏作用的多物质 ALE 有限元模拟*

邓荣兵[1]，金先龙[1,2]，陈 峻[3]，沈建奇[1]，陈向东[1]

(1. 上海交通大学高性能计算中心，上海 200240；
2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室，上海 200240；
3. 华东建筑设计研究院有限公司，上海 200002)

摘要：应用 LS-DYNA 显式程序，基于多物质的 ALE 有限元法，利用罚函数实现了爆炸冲击波与玻璃幕墙结构间的耦合作用，重现了玻璃幕墙防爆炸实验中爆炸荷载的产生及其与玻璃幕墙相互作用的三维动态过程。研究了爆炸冲击波作用下幕墙结构的动态响应行为，分析了幕墙内外层玻璃的破坏情况。研究表明，数值模拟结果与实验结果一致，这为玻璃幕墙的抗爆设计及改进提供了重要的参考依据。

关键词：爆炸力学；玻璃幕墙；ALE 方法；数值模拟
中图分类号：O383.2 **文献标识码**：A

1 引 言

玻璃幕墙在高层建筑中得到了广泛应用。近年来，针对世界各地高层标志性建筑的恐怖活动频繁发生，建筑物的抗爆炸性能日益受到关注。玻璃幕墙作为建筑物外围护结构，其抵抗爆炸冲击波破坏的防护能力直接关系到整个建筑物的安全性，是建筑抗爆炸设计首先要考虑的问题[1]。

由于爆炸冲击波具有传播速度快、峰值大、作用时间短等特点，使得爆炸冲击荷载作用下玻璃幕墙结构的动力响应十分复杂。国内外对于玻璃幕墙的研究主要集中在抗风和抗震领域，对于爆炸荷载下建筑幕墙的响应及破坏机制，近年来逐步取得进展。J. Wei 等人[2]将爆炸荷载简化为均布静载，分别运用经典的板壳小挠度、大挠度理论和有限元方法求解了冲击波作用下矩形夹层玻璃的响应。S. Zhao 等人[3]利用显式软件 ABAQUS，分析了二维夹层玻璃板在爆炸荷载下的失效和破坏行为。D. C. Weggel 等学者[4]将爆炸荷载以均布的三角形脉冲荷载形式施加在玻璃面板壳单元上，对小型炸药爆炸荷载作用下的夹层玻璃幕墙进行了研究。上述研究中爆炸荷载均简化成节点力直接施加到玻璃面板上，没有考虑爆炸荷载与结构物的耦合作用。特别是当幕墙玻璃为中空玻璃时，无法通过直接加载的方式分析爆炸冲击波和玻璃板块间的气体层对玻璃的共同作用。另一方面，建筑幕墙的分析模型多局限于玻璃面板，不能准确地描述实际情况中爆炸波对整个玻璃幕墙结构物的冲击破坏作用。

在这种背景下，本研究基于某玻璃幕墙防爆炸实验，建立了爆炸冲击波作用于玻璃幕墙的整体精细有限元分析模型，其中炸药和空气采用多物质 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)描述，玻璃幕墙结

* **收稿日期**：2009-09-25；**修回日期**：2009-12-07
基金项目：国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA11Z234)；国家自然科学基金(60970049，50875166，50705058)
作者简介：邓荣兵(1981－)，女，博士研究生，主要从事爆炸冲击效应的数值模拟与高性能计算研究. E-mail：rbdeng@sjtu.edu.cn
通讯作者：金先龙(1961－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事爆炸冲击效应的数值模拟与高性能计算研究. E-mail：jxlong@mail.sjtu.edu.cn

构采用拉格朗日描述,通过罚函数法实现爆炸冲击波与结构间的耦合作用,结合显式动力学软件LS-DYNA,研究玻璃幕墙在爆炸冲击波作用下的破坏情况,并与实验结果进行对比验证。

2 ALE 有限元法

ALE 方法是在材料域和空间域外引入参考域,在参考网格上进行控制方程的求解。它综合了拉格朗日方法与欧拉方法的优点,既解决了拉格朗日方法下材料的严重变形,又克服了欧拉方法下移动边界引起的复杂性问题[5],为解决爆炸冲击波与结构的相互作用问题提供了较好的方法。并且,当 ALE 方法的网格固结在材料上时,ALE 方法退化为拉格朗日方法;而当网格固定在空间不动时,ALE 方法退化为欧拉方法。

针对 ALE 方法的控制方程(质量、动量和能量守恒方程)为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}=-\rho\frac{\partial v_i}{\partial x_i}-w_i\frac{\partial \rho}{\partial x_i} \tag{1}$$

$$\rho\frac{\partial v_i}{\partial t}=\sigma_{ij,j}+\rho b_i-\rho w_i\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\rho\frac{\partial E}{\partial t}=\sigma_{ij}v_{i,j}+\rho b_i v_i-\rho w_j\frac{\partial E}{\partial x_j} \tag{3}$$

式中:ρ 为密度,$\boldsymbol{v}$ 为物质速度,$\boldsymbol{w}$ 为对流速度,$\boldsymbol{b}$ 为单位体力,$\boldsymbol{\sigma}$ 为柯西应力张量,E 为能量。

ALE 方法分为单物质 ALE 方法和多物质 ALE 方法。多物质 ALE 方法容许在一个网格中包含多种物质材料,通过跟踪每种材料的边界,在相应的单元中进行物质交换和输送。本研究就是利用该方法处理空中爆炸问题,使得炸药起爆后生成的爆轰气体和空气可以同时在一个 ALE 单元中进行爆炸冲击波传播。

爆炸冲击波与结构的耦合方式对模拟结果的准确性具有重要影响。本研究采用基于罚函数的耦合方式完成爆炸冲击波与结构间的动态交互,保证了耦合接触过程中的能量守恒,并具有计算稳定性。耦合过程如图 1 所示。当结构单元穿透多物质 ALE 单元时,在结构与爆炸流场间引入一个较大的耦合力,分别作用于结构和流体上。该力的大小与穿透深度 d、接触刚度成正比,称为罚函数值,其物理意义相当于在结构和爆炸流场之间放置一系列弹簧来限制穿透。同时,在 ALE 方法中,采用二阶精度的 van Leer 输运算法进行计算,以保证较高的精确度。

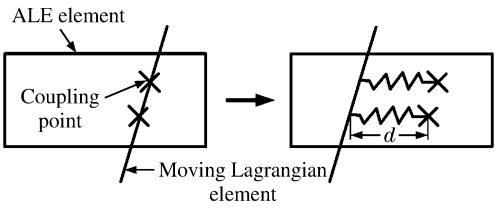


图 1 基于罚函数的耦合

Fig. 1 Penalty coupling concept

3 模 型

3.1 几何模型

玻璃幕墙防爆炸实验的几何模型如图 2 所示。地面搭建测试室,左右两个幕墙单元板块通过支撑钢结构固定于测试室前壁。炸药质量为 100 kg,放置于玻璃幕墙中轴线上,爆心距离玻璃幕墙结构 12.5 m,距离地面 0.5 m。幕墙玻璃为中空玻璃,由两层夹层玻璃隔开空气层并周边密封制成。夹层玻璃配置均为:半钢化玻璃-PVB-半钢化玻璃。整个玻璃试件尺寸为 3 m×5 m,由 2 个 1∶1 实体单元板块通过铝合金立柱连接构成。幕墙公母立柱连接处的横向节点如图 3 所示。

3.2 有限元模型

空气的有限元模型及炸药处网格划分的局部放大模型如图 4 所示。在求解过程开始前,采用 *INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 方式,将 100 kg 炸药自动填充到空气网格中。根据装药结构的对称性以及爆炸冲击波传播情况预估,在无限域中取出尺寸为 8 m×15.5 m×20 m 的空

气,通过加无反射边界条件来模拟炸药在无限空气域中的爆炸。考虑到炸药距离结构物较远,为了保证计算精度同时缩短计算时间,根据球形装药爆炸冲击波在空气中的传播性质,在炸药与结构物之间的传播区域采用圆弧网格划分,并且炸药附近的单元网格尺寸较小,同时爆炸冲击波传播到结构物的区域网格划分密集,其它区域稀疏。

玻璃幕墙结构的有限元模型及对应于图 3 横向节点的有限元局部放大模型如图 5 所示。为了准确描述玻璃幕墙受到爆炸冲击后的动力响应,建立的玻璃幕墙有限元模型对实际结构基本不作简化,模拟仿真尺寸采用该玻璃幕墙结构的实际尺寸。玻璃与 PVB 之间定义面-面自动接触,模拟相互粘结作用。地面假定为刚体。整个幕墙防爆炸测试系统的有限元模型节点数为 884 484,单元数为 663 097。

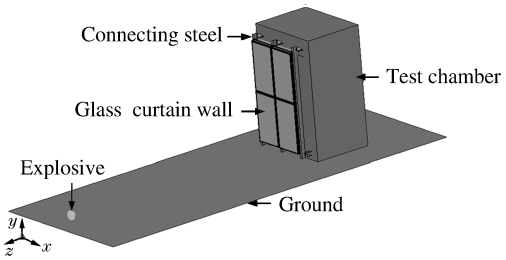


图 2　玻璃幕墙防爆炸实验几何模型

Fig. 2　Geometric model of blast test for curtain wall

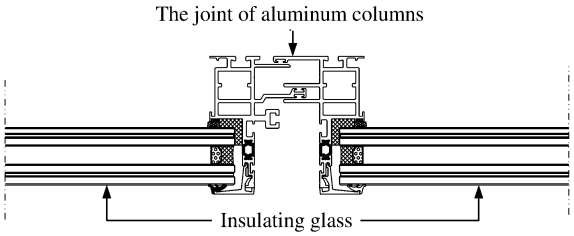
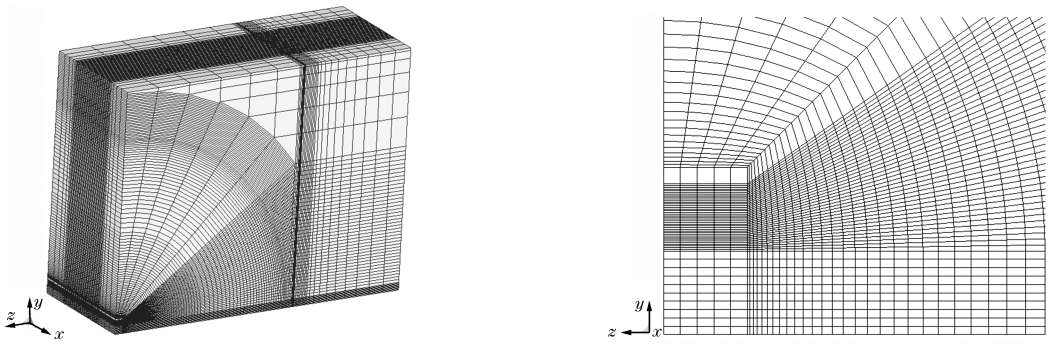


图 3　玻璃幕墙横向节点

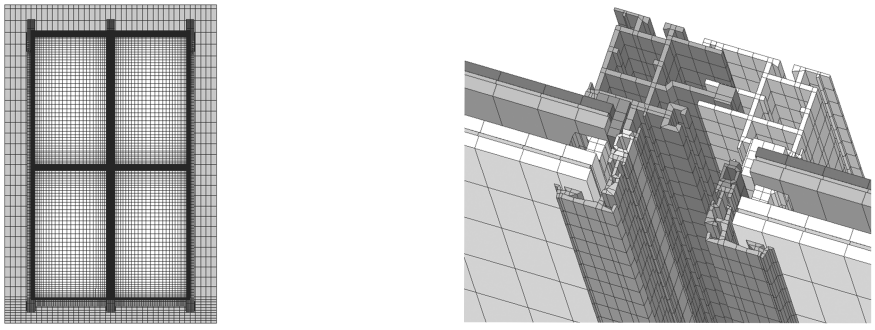
Fig. 3　Transverse detail of glass curtain wall



(a) Mesh of whole air　　(b) Mesh of zoomed air

图 4　空气有限元模型

Fig. 4　The finite element model of air



(a) Mesh of curtain wall　　(b) Cross section of zoomed curtain wall

图 5　玻璃幕墙有限元模型

Fig. 5　The finite element model of curtain wall

3.3 材料模型

3.3.1 炸药

TNT 炸药采用高能炸药材料模型,爆轰产物的膨胀采用 JWL 状态方程,并假定爆轰前沿以常速率传播。以炸药爆轰产物压力表示的 JWL 状态方程[6]为

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1 v}\right)\mathrm{e}^{-R_1 v}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2 v}\right)\mathrm{e}^{-R_2 v}+\frac{\omega e}{v} \tag{4}$$

式中:p 为压力,v 为相对体积,e 为单位体积炸药内能,A、B、R_1、R_2、ω 为实验确定的常数。计算中,炸药密度 $\rho=1.631\ \mathrm{g/cm^3}$,爆速 $D=6\,717\ \mathrm{m/s}$,爆轰波阵面压力 $p_{\mathrm{CJ}}=18.5\ \mathrm{GPa}$。炸药的 JWL 状态方程中主要输入参数为:$A=540.9\ \mathrm{GPa}$,$B=9.373\ \mathrm{GPa}$,$R_1=4.5$,$R_2=1.1$,$\omega=0.35$。

3.3.2 空气

空气采用空材料模型(Null)。该模型在求解中不计算材料的应力和应变,而只是求解材料的运动情况。空气中的爆轰压力采用 Ideal Gas 状态方程[6],具体形式为

$$p=\rho(c_p-c_V)T \tag{5}$$

式中:p 为压力,c_p 为定压比热,c_V 为定容比热,ρ 为材料密度,T 为温度。具体的输入参数为:密度 $\rho=1.29\ \mathrm{mg/cm^3}$,$c_p=1\,005\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}$,$c_V=718\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}$,$T_0=273\ \mathrm{K}$。

3.3.3 玻璃幕墙

玻璃为脆性材料,采用线弹性模型(Elastic)。结合拉应力失效破坏模式[7],数值计算中通过将失效单元删除来实现对玻璃裂缝的扩展以及破碎的形成。铝合金型材和钢材采用弹塑性动力学模型(Plastic_Kinematic)。玻璃和型材的具体计算参数列于表 1,其中:ρ 为密度,E 为弹性模量,ν 为泊松比,σ_s 为屈服应力。

表 1 材料性能参数

Table 1 Material parameters

Material	ρ/(g/cm^3)	E/(GPa)	ν	σ_s/(MPa)
Glass	2.56	72	0.2	
Al	2.72	70	0.33	260
Steel	7.85	206	0.3	345

夹层 PVB 采用线性粘弹性模型(Viscoelastic),由应力偏量张量来表达

$$S_{ij}=2\int_0^t \varphi(t-\tau)\dot{\varepsilon}_{ij}(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{6}$$

式中:$\varphi(t)=G_\infty+(G_0-G_\infty)\exp(-\beta t)$,为剪切松弛模量;$p=K\ln V$,为弹性体积行为假设,通过增量积分得到。具体的计算参数为:密度 $\rho=1.1\ \mathrm{g/cm^3}$,体积模量 $K=20\ \mathrm{GPa}$,短期剪切模量 $G_0=0.33\ \mathrm{GPa}$,长期剪切模量 $G_\infty=0.69\ \mathrm{MPa}$,衰减常数 $\beta=12.6\ \mathrm{s^{-1}}$。

4 计算结果与实验验证

在上海超级计算中心曙光 4000A 计算平台上,使用显式动力学软件 LS-DYNA 完成了爆炸冲击波对玻璃幕墙的动态响应计算。利用基于区域分解的并行算法,解决了由于模型规模大以及爆炸冲击波与结构相互耦合带来的巨大计算量问题。数值模拟中,采用 cm-g-μs 单位制。问题求解时间为 60 ms。实际计算使用了 24 个 CPU,总共计算时间为 361 h。

4.1 爆炸载荷验证

模拟爆炸冲击波作用下玻璃幕墙结构的破坏效应,首先要保证作用在结构上的冲击波载荷的准确性。其中峰值超压是衡量冲击波的最重要参数。对于球形装药,空中爆炸冲击波传播已有成熟的经验公式,J. Henrych在大量实验基础上提出的公式[8]是其中的代表性公式。为了验证空气有限元模型的

可靠性,在整体有限元模型中去掉玻璃幕墙结构,分别模拟了 100 kg TNT 球形炸药空爆及距刚性地面 0.5 m 上方爆炸的情况。提取出原结构物处即爆距为 12.5 m 处的冲击波自由场及遇地面反射的压力时程曲线,如图 6 所示。从中可以看出,炸药在刚性地面上方爆炸时,由于地面的反射作用峰值压力大于空爆压力,且到达峰值所需的时间要短些,符合爆炸冲击波的传播规律。炸药空爆时,峰值压力为191.67 kPa,超压为(191.67－101) kPa＝90.67 kPa。J. Henrych 经验公式[8]得到的超压值为 97.26 kPa。数值仿真结果与经验值基本一致,验证了空气模型中爆炸冲击波的有效性和精度。

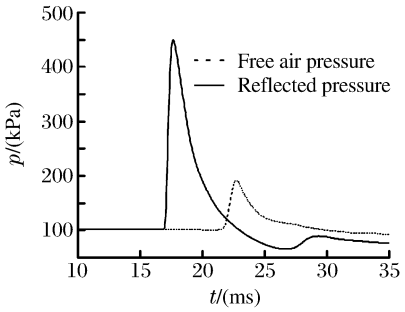


图 6　冲击波自由场及反射压力时程曲线

Fig. 6　Free air and reflected pressure-time histories

4.2　爆炸冲击波的传播

在爆炸冲击波对玻璃幕墙的动态响应仿真计算中,典型时刻爆炸冲击波的传播图像如图 7 所示。从中可以看到炸药起爆后在空气中生成冲击波,以及冲击波与玻璃幕墙相互作用并形成绕流的过程。

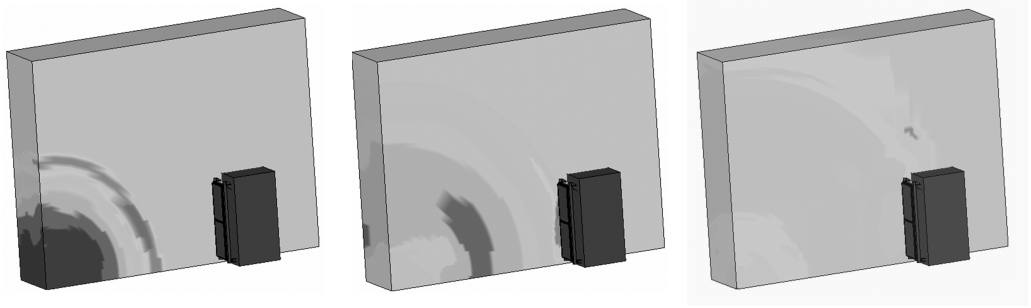


图 7　典型时刻爆炸冲击波的传播

Fig. 7　Propagation of blast waves at typical time

4.3　玻璃幕墙响应及实验对比

图 8 为玻璃幕墙测试系统 z 方向的位移云图。由图可见,位移较大处集中在玻璃幕墙下方的铝外罩板上,在 z 正向的最大值为 9.694 cm,即有弹出现象,这与实验中该处的破坏情况一致(见图 9),从而验证了玻璃幕墙计算模型的有效性。

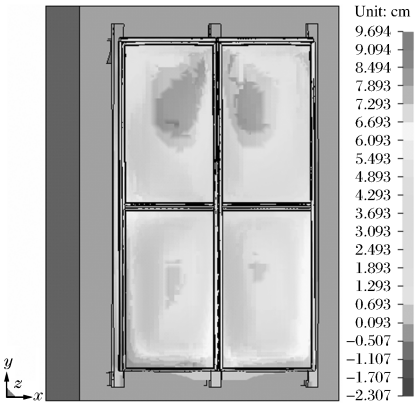


图 8　冲击波自由场及反射压力时程曲线

Fig. 8　Free air and reflected pressure-time histories



图 9　玻璃幕墙下部破坏情况

Fig. 9　Photograph of damage in lower part of curtain wall

玻璃为幕墙结构的主要部件，直接承受爆炸冲击波作用。幕墙玻璃的破坏情况是玻璃幕墙抗爆研究的主要内容。

图 10 为内外层玻璃的动能变化曲线比较。由图可见，在爆炸冲击波的作用下，内外层玻璃的动能均呈现先急剧增加后降低并振荡缓慢减小的趋势。外层玻璃位于迎爆面，动能先迅速增加，22.5 ms时刻达到动能极大值 2 113 J。内层玻璃位于背爆面，动能增加滞后于外层玻璃，23.7 ms 时刻达到极大值 2 377 J，比外层玻璃的动能还要大。这说明在本算例中内层玻璃比外层玻璃的冲击响应大。在 30 ms后，随着爆炸冲击波的减弱，内外层玻璃板块在铝合金框内振动，动能呈现振荡下降趋势，最后逐渐降低到零。

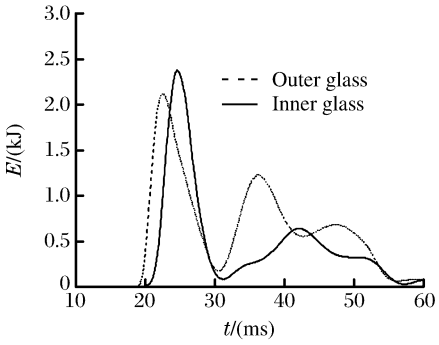


图 10 内外层玻璃的动能变化曲线比较

Fig. 10 Comparison of kinetic energy curves between outer glass and inner glass

图 11 给出了内外层玻璃在典型时刻的破坏情况。由图可见，在爆炸冲击波的作用下内外层玻璃均破碎，且边角区域有集中破裂现象，与实验中幕墙玻璃的破损情况一致，如图 12 所示。仿真计算模型中由于考虑了两个单元板块之间铝合金立柱连接结构的非对称性，玻璃的破碎情况并不完全相同。对比内外层玻璃破损情况，可以看出，内层玻璃比外层玻璃破裂严重，尤其在爆炸冲击波前沿首先到达的下方幕墙玻璃，该现象更为突出。这与实验现场情况一致。

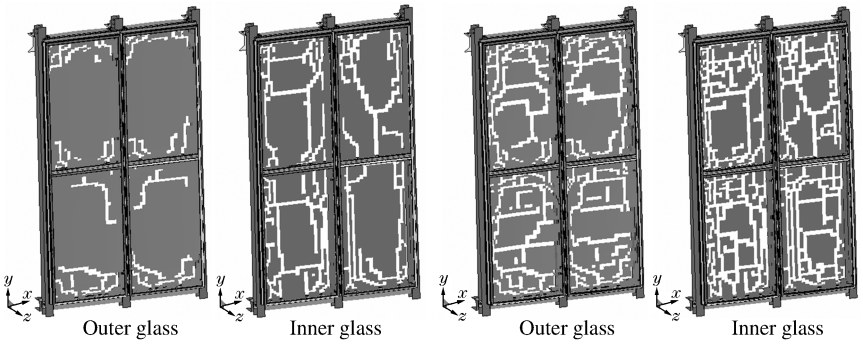


图 11 内外层玻璃破损情况对比

Fig. 11 Comparison of damage between outer glass and inner glass



图 12 幕墙玻璃破损情况

Fig. 12 Photograph of damaged curtain wall

5 结 论

利用显式有限元软件 LS-DYNA，对爆炸冲击波作用下玻璃幕墙的动态响应进行了数值模拟，可得出以下结论。

(1) 建立了包括炸药、空气、幕墙防爆炸测试系统、地面等多个对象在内的全三维整体精细分析模型，采用多物质的 ALE 有限元法，重现了玻璃幕墙防爆炸原型实验中爆炸冲击波与玻璃幕墙的相互作用过程。结果表明，由于该方法综合考虑了炸药起爆、爆炸冲击波在空气中传播及其与结构物的耦合作用，保证了爆炸荷载的真实性和正确性，较好地反映了实际情况中爆炸波对整个玻璃幕墙引起的破坏。

(2) 在验证计算模型的基础上，研究了幕墙玻璃的动力响应，考虑玻璃的脆性失效，实现了爆炸冲击波作用下内外层玻璃的破裂模拟，得到了与实验结果一致的数值模拟结果。数值模拟有助于理解实验现象，为玻璃幕墙抗爆设计及其改进提供了重要参考。

References:

[1] Chen J, Zhang Q S, Li X H, et al. Blast Protection Design of Glass Curtain Wall in High-Rise Building [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2007, 22(5): 387-390. (in Chinese)
陈　峻, 张青松, 李兴华, 等. 高层建筑玻璃幕墙的抗爆炸设计 [J]. 山东建筑大学学报, 2007, 22(5): 387-390.

[2] Wei J, Shetty M S, Dharani L R. Stress Characteristics of a Laminated Architectural Glazing Subjected to Blast Loading [J]. Comput Struct, 2006, 84(10-11): 699-707.

[3] Zhao S, Dharani L R, Liang X. Analysis of Damage in Laminated Architectural Glazing Subjected to Blast Loading [J]. Adv Struct Eng, 2008, 11(1): 129-134.

[4] Weggel D C, Zapata B J. Laminated Glass Curtain Walls and Laminated Glass Lites Subjected to Low-Level Blast Loading [J]. J Struct Eng, 2008, 134(3): 466-477.

[5] Hao L, Ning J G, Wang C. 2D Numerical Simulation of Explosive Damage Effect on Obstacles in Water [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(1): 39-45. (in Chinese)
郝　莉, 宁建国, 王　成. 水中障碍物爆炸毁伤效应的二维数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2006, 20(1): 39-45.

[6] LS-DYNA Keyword User's Manual (971) [Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.

[7] JGJ　102－2003. Technical Code for Glass Curtain Wall Engineering [S]. 2003. (in Chinese)
JGJ　102－2003. 玻璃幕墙工程技术规范 [S]. 2003.

[8] Li J Q, Ma S Z. Explosive Mechanics [J]. Beijing: Science Press, 1992: 260-261. (in Chinese)
李翼祺, 马素贞. 爆炸力学 [J]. 北京: 科学出版社, 1992: 260-261.

Application of ALE Multi-Material Formulation for Blast Analysis of Glass Curtain Wall

DENG Rong-Bing[1], JIN Xian-Long[1,2], CHEN Jun[3], SHEN Jian-Qi[1], CHEN Xiang-Dong[1]

(1. *High Performance Computing Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai* 200240, *China*;
2. *State Key Laboratory of Mechanical System & Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai* 200240, *China*;
3. *East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai* 200002, *China*)

Abstract: The multi-material arbitrary lagrangian-eulerian (ALE) formulation and the penalty-based coupling approach were applied to simulate the air explosion and the interaction between explosive blast and curtain wall in resistance test of curtain wall by using LS-DYNA software. The dynamic behavior of glass curtain wall under blast loading was analyzed. Including the brittle failure of glass material in the model, the damage regions of inner and outer glass were reappeared in the numerical simulation. The numerical results are in agreement with the experimental observations, which will provide an important reference for the blast resistance design and improvement of glass curtain wall.

Key words: explosion mechanics; glass curtain wall; ALE formulation; numerical simulation