

## 多层 SGP 夹层玻璃受刚体冲击作用的实验研究

张杨梅, 王星尔, 杨 健, 刘清风, 刘忻炜

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

**摘 要:** 多层 SentryGlas®Plus (SGP) 夹层玻璃在建筑行业被广泛作为承重材料, 玻璃在动态冲击下的脆性失效易导致夹层玻璃的承重性能大幅降低, 而目前对多层 SGP 夹层玻璃抗冲击性能的研究数据较少。本研究基于平均最小破坏速度(MMBV)测试方法, 对三层 SGP 夹层玻璃面板展开刚体冲击实验。首先采用高速相机追踪裂纹产生和扩展情况, 将夹层玻璃的开裂顺序分成三类, 并通过分析其冲击响应, 研究开裂顺序、支撑条件和玻璃面板构成对 SGP 夹层玻璃抗冲击性能的影响。实验结果显示, 边缘夹固式夹层玻璃需要更高的平均最小破坏速度来触发玻璃破损, 且与驳接点支式试样相比, 其碎裂前刚度提高了 44%。相比于钢化玻璃, 半钢化玻璃碎片在受压状态下可产生更强的锁合机制, 从而明显提高试样刚度, 平均最小破坏速度则稍有增加。研究还显示动态刚度在破坏后阶段将会显著降低。最后, 结合高速相片分析了两类动态脱层特征。

**关 键 词:** 夹层玻璃; SGP 夹层玻璃; 结构玻璃; 冲击实验; 动态荷载

**中图分类号:** TQ174 **文献标识码:** A

## Experimental Study of Multiple Layered SGP Laminated Glass under Hard Body Impact

ZHANG Yang-Mei, WANG Xing-Er, YANG Jian, LIU Qing-Feng, LIU Xin-Wei

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration (CISSE), State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Multiple layered SentryGlas®Plus (SGP) laminated glass (LG) is increasingly adopted in the construction sector. The brittle failure of glass under impact leads to the sudden loss of load bearing capacity, however, limited data has been reported to date concerning the impact resistance of multiple layered SGP laminated glass. This paper reports an experimental investigation on the impact performance of triple layered SGP LG panels under hard body impact using a mean minimum breakage velocity (MMBV) test approach. Three categories of breakage sequence were classified by tracing the crack initiation with high speed photos. The impact resistance of SGP LG was calculated by examining the effects of factors such as breakage sequence, support conditions and glass make-ups. The LG panel with the clamped edges required higher MMBV to trigger the glass breakage and had an increase of 44% pre-breakage stiffness than that with the bolted connection. The evident improvement in post-breakage stiffness due to the beneficial crack pattern of heat strengthened (HS) glass, compared to its counterpart of fully tempered (FT) glass, was also revealed, however, the increase in MMBV is modest. The results also showed that a significant degradation of dynamic stiffness can be found in the post breakage stage. Two types of delamination were

收稿日期: 2017-12-12; 收到修改稿日期: 2018-01-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806100); 国家自然科学基金(51378308); 上海市科委科研计划(17DZ1200306)  
National Key R&D Program of China (2017YFC0806100); National Natural Science Foundation of China (51378308);  
Research Program of the Shanghai Science and Technology Committee (17DZ1200306)

作者简介: 张杨梅(1993-), 女, 硕士研究生. E-mail: yangmeiyzz@163.com

通讯作者: 杨 健, 教授. E-mail: j.yang.1@sjtu.edu.cn

identified and the dependency of their delamination growth on the impact velocity was analyzed.

**Key words:** laminated glass; SGP laminated glass; structural glass; impact test; dynamic load

夹层玻璃广泛应用于建筑业, 在过去几十年中夹层玻璃的夹层成分以聚乙烯醇缩丁醛(PVB)为主。PVB 具有良好的黏结性、弹性和韧性, 使得夹层玻璃具有一定的抗冲击特性和吸能缓冲作用。然而, 研究表明 PVB 夹层玻璃的残余承载能力在玻璃破裂后较低<sup>[1]</sup>。因此工程中越来越多采用刚度和强度更高的 SentryGlas®Plus(SGP)<sup>[2]</sup>胶片作为夹层, 它可为夹层玻璃碎裂前后阶段提供更好的抗冲击物侵彻和静载性能。

早期国内外学者对于玻璃的研究主要集中在玻璃材料特殊性能<sup>[3-4]</sup>、单层玻璃和 PVB 夹层玻璃的理论分析<sup>[5]</sup>和静态力学性能实验<sup>[6-7]</sup>。近年来, 对玻璃逐步开展了在动态载荷作用下的实验<sup>[8-10]</sup>及数值分析研究<sup>[11-13]</sup>。Mohagheghian 等<sup>[10]</sup>基于同轴双环试验原理测量了化学强化硅酸铝玻璃面板的准静态弯曲性能, 并进行了化学强化玻璃面板在集中荷载和均布荷载作用下的准静态性能评估, 试验发现采用 PVB 胶层的夹层玻璃在峰值冲击力和能量吸收方面有较大改善。Van Dam 等<sup>[14]</sup>利用冲击试验研究并评估了不同粘结水平的夹层玻璃在冲击和爆炸作用下的机械性能, 并结合有限元数值模拟验证了夹层对其力学行为和性能的影响。

张其林等<sup>[15]</sup>对四边简支夹层玻璃面板进行了爆炸实验研究, 得到其在不同爆炸当量下的动力响应特征和破坏形态, 实验表明爆炸作用下玻璃裂纹在中心处呈环状, 由中心向四周均匀扩散, 整个裂纹呈放射状展开。葛杰等<sup>[16]</sup>采用 TNT 炸药爆炸冲击荷载, 利用压力传感器的数据采集及高速相机的过程抓拍, 得到不同冲击荷载下玻璃的破碎情况, 实验结果表明玻璃碎片的飞溅距离分布服从 Weibull 分布。Pyttel 等<sup>[17]</sup>对弯曲和平面夹层玻璃进行了头部冲击实验, 其中冲击速度设定为 5 到 12 m/s。随后提出了一种基于临界能量阈值概念的失效判据并嵌入有限元模型。陈素文等<sup>[18]</sup>对点支式夹层玻璃幕墙结构在爆炸荷载下的超压响应、位移响应和破坏模式进行了研究, 实验结果表明弹性实验阶段夹层玻璃面板未出现明显的残余应变, 破坏阶段首先在开孔处发生。欧迎春等<sup>[19]</sup>同样采用落球冲击法研究胶片材料和胶片-玻璃面板粘接界面性能对夹层玻璃抗冲击性能的影响。

然而, 上述针对夹层玻璃的测试主要集中于 PVB 夹层玻璃, 针对 SGP 夹层玻璃的研究多为静载

性能<sup>[20-22]</sup>, 而对其抗冲击性能研究极少。例如仅研究了由两层玻璃面板组成的夹层玻璃, 且未考虑混合的玻璃面板种类以及多层的夹层玻璃情况; 且实验测试的边界条件均单一采用四边固支或四点简支, 未把边界条件作为设计参数进行研究。

为研究两种设计参数(夹层玻璃面板构成和支撑条件)对多层 SGP 夹层玻璃抗冲击性能带来的影响, 本工作通过系列冲击实验研究 SGP 夹层玻璃在刚体低速冲击下的破坏响应。实验采用平均最小破坏速度(MMBV)测试方法对三层 SGP 夹层玻璃进行落锤冲击实验来获取每层玻璃面板破坏对应的冲击能量, 通过高速相机照片捕捉的裂纹触发和开展情况对试样开裂顺序进行分类, 并对 SGP 夹层玻璃动态刚度、峰值冲击力和胶合面动态脱层等响应进行分析。

## 1 实验方法

### 1.1 实验系统设置

SGP 夹层玻璃比 PVB 夹层玻璃具有更高的耐冲击性、承载力以及更好的通透性, 越来越多的应用在人行桥或全玻璃结构上, 但在其服役过程中会面临物体掉落、家具倒塌等状况, 易使其受到重物撞击。另外, 风致飞射物如瓷砖或玻璃碎片等的冲击也会使得玻璃幕墙遭受撞击。与夹层玻璃冲击损伤相关的设计规范和标准表明, 可用 2 g (ASTM E1996<sup>[23]</sup>)钢球模拟风致飞射物或 4.11 kg (BS EN 356<sup>[24]</sup>)钢球模拟硬物冲击。本研究采用具有更好冲击性能的 SGP 胶层, 为了在有限下落高度内实现更高的冲击能量, 实验使用重 13.5 kg 的冲击头, 其冲击端部为半径 40 mm 的半球形, 主体为圆柱体。在冲击端部和主体间放置 SA-CL400 力环型压电式力传感器来测量冲击力, 该传感器中间留有供冲击头尾杆穿过的圆孔, 尾杆穿过力传感器和螺纹板后, 用螺母配合尾杆拧紧, 压实并给予力传感器预压力(图 1(a)), 冲击头端部可以通过螺纹板安装于冲击头主体上(图 1(b))。

夹层玻璃冲击实验系统包括玻璃支撑台架、冲击导向管、高速摄像机、夹层玻璃试件、冲击头、加速度传感器、冲击力传感器和数据采集器八个部分, 如图 2 所示。

玻璃面板支撑台架为专门设计的钢制平台, 可

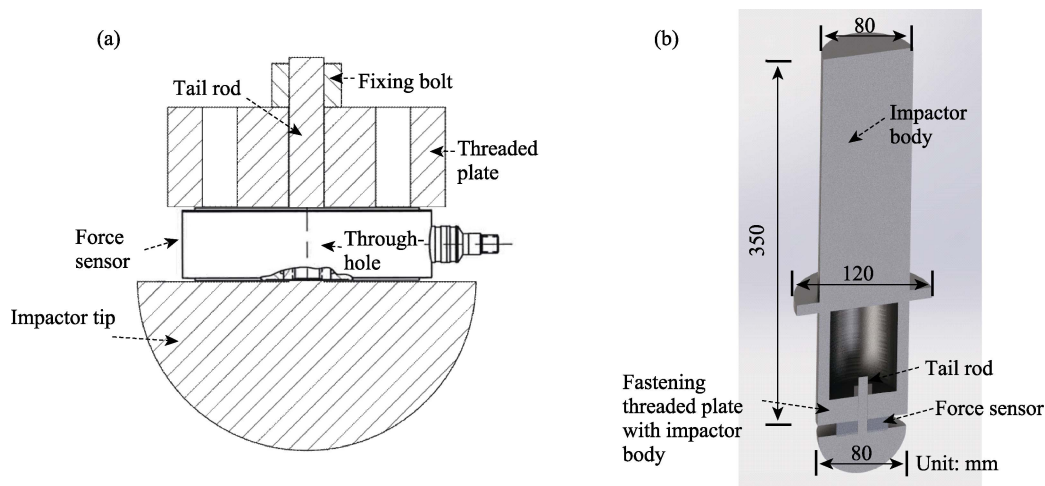


图 1 压电式冲击力计安装方式  
Fig. 1 Installation of piezoelectric force ring sensor  
(a) Installation with impactor tip; (b) Installation with impactor body

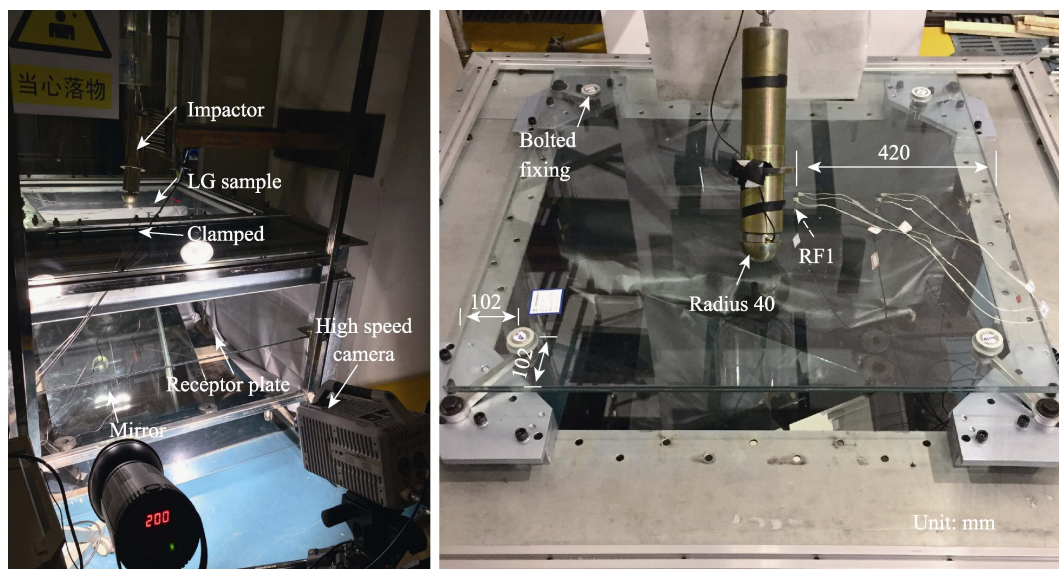


图 2 夹层玻璃冲击实验系统  
Fig. 2 Test apparatus of impact tests

为不同尺寸的试样提供边缘夹固和角部驳接连接的支撑条件。冲击头导向管长 6 m, 为增强观测效果, 采用透明聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料并标注刻度。在玻璃面板内表面使用高强结构胶粘附有压电式加速度传感器(图 2 中 RF1)。高速相机摄影速率为每秒 12500 帧, 分辨率为  $1024 \times 1024$ , 并通过斜置在试样下方的反光镜记录试样的冲击破碎过程。数据采集设备的采样率为 100 kHz。

## 1.2 实验试样设计

实验测试了 4 组采用三层玻璃面板的 SGP 夹层玻璃试样(表 1)。试样中混合使用半钢化(HS)和钢化(FT)玻璃面板制成了不同构型的夹层玻璃, 试件尺寸为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  正方形试件, 每层玻璃面板均厚 8 mm, SGP 中间胶层厚度均为 3 mm。在实验过程中,

前三组试样(No. 1~3)在四个角部利用沉头式驳接件固定在支撑台架上, 另一组试样(No. 4)通过四边的框架夹紧固定在支撑台架上, 在铝制框架和玻璃面板之间放置橡胶垫片以保护玻璃边缘(图 3)。

## 1.3 实验测试流程

实验采用平均最小破坏速度(MMBV)测试程序<sup>[25]</sup>来测定 SGP 夹层玻璃试样的每层玻璃面板在碎裂时对应的冲击碎裂能。该方法通过不断提高冲击头下落高度, 使玻璃面板逐次碎裂, 直到所有玻璃层破碎。冲击头端部与夹层玻璃试样外表面之间的落差初始高度设定为 0.8 m, 随后每次增加 0.2 m 直至玻璃面板碎裂; 当玻璃面板首次出现碎裂后, 破坏后阶段的冲击头初始冲击高度将被设置为比导致玻璃面板首次破裂的高度低 0.4 m。重复冲击时玻

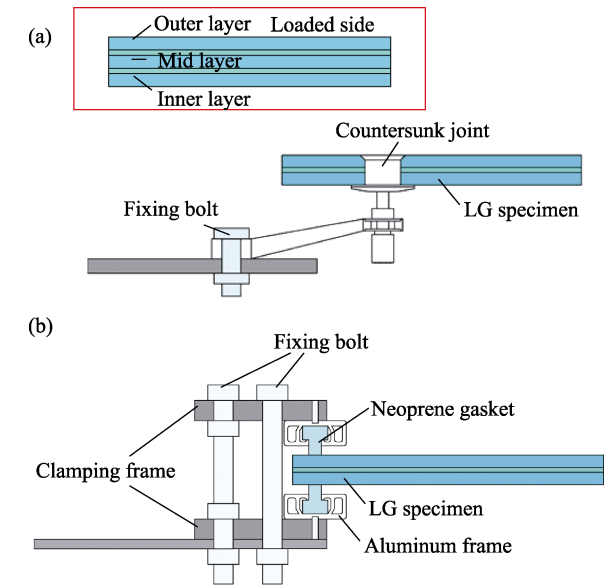


图 3 实验试样支撑条件示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of support conditions  
(a) Bolted; (b) Edged clamped

璃面板可能出现肉眼无法辨识的微裂纹, 为了研究该微裂纹可能导致的刚度退化情况, 在每次实验中, 将在初始下落高度测试三次。

2 结果与讨论

2.1 冲击速度拟合

实验中冲击头加速度、速度和位移等数据均是通过对冲击力传感器的数据进行积分等处理计算得到, 其计算方式可见下式:

$$V(t) = V_i + \int_0^T A(t)dt = V_i + gT - \int_0^T P(t)dt / m_i \tag{1}$$

$$S(t) = S_i + \int_0^T V(t)dt \tag{2}$$

式中,  $V$ 、 $A$  和  $S$  分别为某时刻  $t$  对应的冲击头速度、加速度和位移,  $P$  为冲击力,  $V_i$  和  $S_i$  分别为冲击头的入射速度和初始位移。积分上限  $T$  为冲击头彻底脱离夹层玻璃面板的时刻。 $m_i$  为冲击头质量。实验可通过冲击力传感器测得的冲击力数据得到  $P$ 、 $T$  的信息, 还需要得到反弹速度  $V_T$ (即  $V(T)$ )即可测定入射速度。此处认为冲击头撞击反弹后再次下坠二次

撞击玻璃的过程为无阻力状态(实验中这个过程基本为无约束的自由状态, 阻力可以忽略), 则可以通过定位第二次撞击玻璃的时间点  $T_2$  来间接得到反弹速度, 其计算方式如下式:

$$V_T = g(T_2 - T) / 2 \tag{3}$$

通过该流程可以得到对应下坠高度的入射冲击速度。本文选取 6 块双层 8 mm 玻璃面板夹合 3 mm SGP 胶层的夹层玻璃样本(FT/S/FT)的结果(该组样本测试方法同本文完全相同), 根据上述流程计算并得到其下坠高度和冲击速度的离散点, 通过对其进行二次回归方程的拟合得到下坠高度  $H$  和冲击速度  $V_{\text{impact}}$  的拟合公式。从图 4 中可以看出, 拟合公式为:

$$V_{\text{impact}} = 0.046 H^2 + 0.926 H + 1.501 \tag{4}$$

该公式相关系数  $R^2$  为 0.96355, 可见拟合公式的精度较高且上述计算冲击速度的流程稳定性较好, 因此下文的冲击速度均在此拟合公式的基础上进行计算。

2.2 实验结果概览

根据实验观察和对高速相片的分析, 实验试样破裂顺序(BS)分为三类:

- 1) BS1: 外层<sup>1</sup>-中间层<sup>2</sup>-内层<sup>3</sup>;
- 2) BS2: 外层<sup>1</sup>-中间层<sup>2</sup>&内层<sup>2</sup>;
- 3) BS3: 外层<sup>1</sup>-内层<sup>2</sup>-中间层<sup>3</sup>。

其中上标代表玻璃面板破裂先后顺序, 例如 BS2 是指在外部玻璃层破裂之后, 中间玻璃层和内部玻璃层再同时破裂。破坏后阶段则是指三层夹层玻璃在首次玻璃碎裂后的阶段, 包括第二次和第三次碎裂。

以开裂顺序为 BS2(外层先破裂, 之后中间层和内层同时破裂)的 1 号试样为例, 在外层碎裂后的破坏后阶段中, 当冲击速度达到 4.5 m/s 时, BS2 的中间层和内层同时碎裂, 该起裂时刻的高速相片如图 5 所示。相邻相片时间间隔为 0.08 ms, 各时刻放射型裂纹和涟漪型裂纹的外边缘位置分别用虚线和点划线圆圈表示。

根据实验观察及高速相机照片拍摄, 由图 5 可以看出, 1 号试样放射型裂纹首先在内玻璃层产生,

表 1 冲击测试的 SGP 夹层玻璃试样  
Table 1 SGP laminated glass specimens

No.	LG configuration	Thickness /mm	Support system	Dimension/(mm × mm)	Quantity	Parameter
1	FT/SGP/FT/SGP/FT	8/3/8/3/8	Bolted	1000 × 1000	3	Glass make-up
2	HS/SGP/HS/SGP/FT	8/3/8/3/8	Bolted	1000 × 1000	3	Glass make-up
3	HS/SGP/FT/SGP/FT	8/3/8/3/8	Bolted	1000 × 1000	3	Glass make-up
4	FT/SGP/FT/SGP/FT	8/3/8/3/8	Edge clamped	1000 × 1000	3	Boundary condition



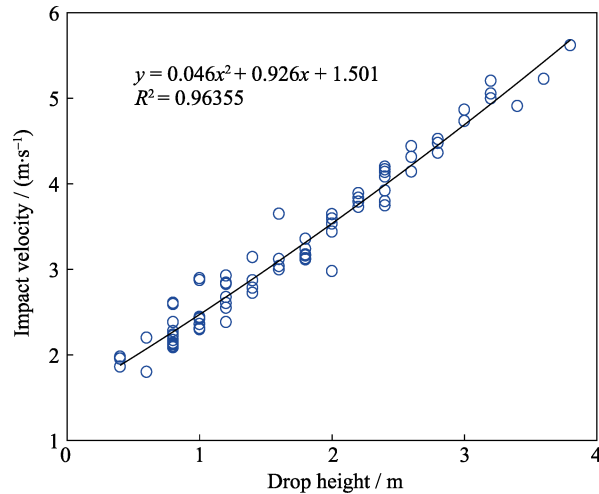


图 4 下坠高度和冲击速度的拟合结果  
Fig. 4 Regression results of drop height and impact velocity

放射型裂纹是由底面圆周方向的拉应力波引起。涟漪型裂纹随后出现在中间层冲击点位置,滞后时间小于 0.08 ms,涟漪型裂纹是由于钢化玻璃起裂后的内应力释放而引起玻璃的逐次断裂。

2.3 致裂冲击速度和碎裂刚度

表 2 统计了实验中各试样在不同玻璃面板破坏时刻的致裂冲击速度  $v_{\text{break}}$  的平均值和标准差,以及破坏发生时刻对应的碎裂刚度  $\beta_k$ ,即峰值冲击力与面板最大挠度的比值。

从表 2 中可看出,开裂顺序 BS2 的试样在第一次碎裂时,碎裂刚度相对 BS1 顺序样本更高,但这两种破坏顺序均是最外层玻璃面板先破坏;在第二次碎裂发生时,BS2 样本则呈现出更高的抗冲击性,需要更高的冲击速度来触发 BS2 试样未碎裂玻璃层的破坏。

支撑条件为边缘夹固式的 4 号试样在后破坏阶段的碎裂刚度明显降低,与驳接点支式的 1 号试样相比,4 号试样在第二次和第三次碎裂时的碎裂刚度分别降低 41%和 14%。但是 4 号试样的首次碎裂刚度比 1 号试样高出约 44 %,需要更高的冲击速度来破坏 4 号试样。从 4 号试样实验结果也可看出,它在不同开裂顺序下所需的致裂冲击速度较为一致,没有呈现出明显的相关性。

比较 1 号、2 号和 3 号试样在破坏后阶段的碎裂刚度,可以看到开裂顺序 BS1 和 BS2 试样中,含有半钢化玻璃的试样(2 号和 3 号试样)均比完全由钢化玻璃层组成的 1 号试样呈现出更高的碎裂刚度,这是由于当冲击碎裂发生时,外层或中层的玻璃碎片承受面板变形后带来的压应力,尺寸相对较大的半钢化玻璃碎片在受压状态下的碎片间咬合作用相比钢化玻璃碎片更高,继而产生更强的碎片间锁合机制,将会形成更有效的碎片间传力路径来形成受压侧,最终导致整体碎裂刚度的增加。

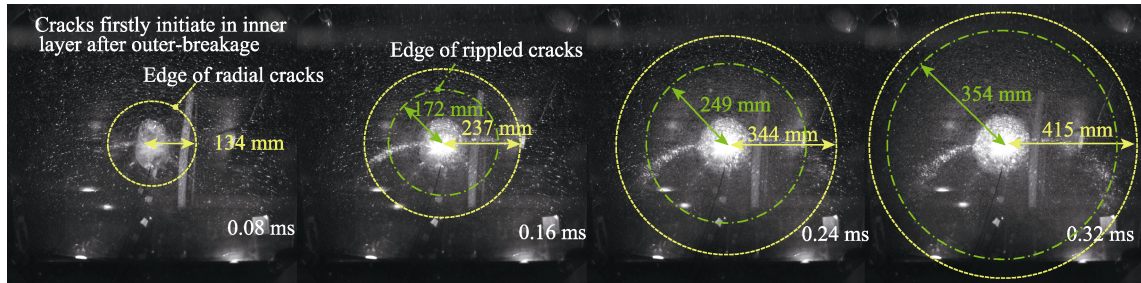


图 5 1 号试样组(BS2 破裂顺序)典型的裂纹产生和扩展(冲击速度为 4.5 m/s)  
Fig. 5 Typical crack initiation and propagation of No. 1 specimens (BS2) at impact velocity of 4.5 m/s

表 2 SGP 夹层玻璃试样致裂冲击速度和碎裂刚度  
Table 2 Breakage velocity and breakage stiffness of SGP laminated glass specimens

Breakage sequence	ID (No.)	1 <sup>st</sup> breakage		2 <sup>nd</sup> breakage		3 <sup>rd</sup> breakage		Quantity
		$v_{\text{break}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\beta_k/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	$v_{\text{break}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\beta_k/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	$v_{\text{break}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\beta_k/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	
BS1	1	1.9	34.4	2.9	24.9	3.1	3.7	1
	2	2.1 ± 0.2	37.7 ± 8.0	2.9 ± 0.4	32.9 ± 5.7	3.1 ± 0.2	4.5 ± 2.7	2
	3	1.9	32.0	2.5	37.3	2.9	6.0	1
	4	2.5 ± 0.2	49.4 ± 4.4	4.5 ± 0.5	14.6 ± 3.0	3.8 ± 0.2	3.2 ± 1.4	2
BS2	1	2.4 ± 0.1	51.2 ± 0.6	4.2 ± 0.2	5.4 ± 0.7	—	—	2
	2	2.3	47.3	2.7	9.6	—	—	1
	3	2.2 ± 0.1	41.8 ± 4.3	3.3 ± 0.4	6.9 ± 2.1	—	—	2
BS3	4	2.5	52.3	4.7	20.6	3.8	5.3	1

## 2.4 冲击力峰值和碎裂能

冲击碎裂能和相应峰值冲击力  $P_{\max}$  如图 6 所示。比较同种夹层玻璃在不同碎裂时刻的冲击碎裂能时可以发现, 对于夹层玻璃玻璃面板层的逐次破裂, 1 号、2 号和 3 号试样相比上一次的冲击碎裂能均需更高的冲击能量来触发后续的破裂(例如, 第二次或第三次破裂)。而 4 号试样在第二次碎裂时需要更高的冲击碎裂能。

比较开裂顺序 BS2 的驳接点支式试样碎裂能, 可以发现在首次碎裂时所有试样冲击碎裂能较为接近, 但在第二次冲击碎裂能性能差异很大, 其中三层玻璃面板均为钢化玻璃的 1 号组具有最高的破裂能, 其次是具有 2 个钢化玻璃层的 3 号组, 而仅具有 1 个钢化玻璃层的 2 号组破裂能是最低的。而在开裂顺序为 BS1 的试样中, 冲击碎裂能高低排序为 2 号、1 号和 3 号, 但三者结果较为接近。由此可以推断, 在两块玻璃面板同时碎裂时(BS2 开裂顺序的破坏后阶段)玻璃类型将会显著影响冲击碎裂能, 但是在逐次碎裂时影响则相对较小。

比较支撑条件对冲击碎裂能影响时, 可见在 BS1 开裂顺序时, 4 号试样的冲击碎裂能远大于 1 号试样, 两次碎裂分别高出 75%和 141%。因此, 相比玻璃类型导致的碎裂能差异, 支撑条件对于冲击碎裂能的影响更加显著。

比较不同碎裂时刻的冲击力大小可以发现, 各试件第二次破裂时峰值冲击力比第一次破裂时峰值冲击力大, 例如从 3 号试样在 BS1 和 BS2 开裂顺序中, 第二次破裂峰值冲击力比第一次破裂时峰值冲击力分别大 29%和 38%。大多数情况下, 第三次破裂时峰值冲击力是最低的, 其中 1 号试样(驳接点支式)和 4 号试样(边缘夹固式)第三次破裂时峰值冲击力相较于第一次破裂分别下降了 22%和 58%。在所有玻璃层失效时, SGP 胶层将承受张力, 整体碎裂刚度的下降将显著增加接触时间, 从而产生最小的冲击力。

通过实验结果也可以验证不同玻璃碎片类型的锁合机制对峰值冲击力的影响。当发生第二次碎裂时, BS1 中的外层和中间玻璃层破裂, 含有两个半钢化玻璃层的 2 号试样的破裂层具有最高峰值冲击力  $P_{\max}$ , 而仅含有一个半钢化玻璃层的 3 号试样对应的  $P_{\max}$  有所降低, 此刻具有两个破裂钢化玻璃层的 1 号试样具有最低的  $P_{\max}$ 。这种趋势同样也证实半钢化玻璃碎片在受压状态的锁合机制的影响相对钢化玻璃更为显著。值得注意的是 2 号试样组的第 3 次破裂的平均峰值冲击力低于 3 号试样组, 这与前面的结论不完全一致, 但是 2 号实验组的峰值冲

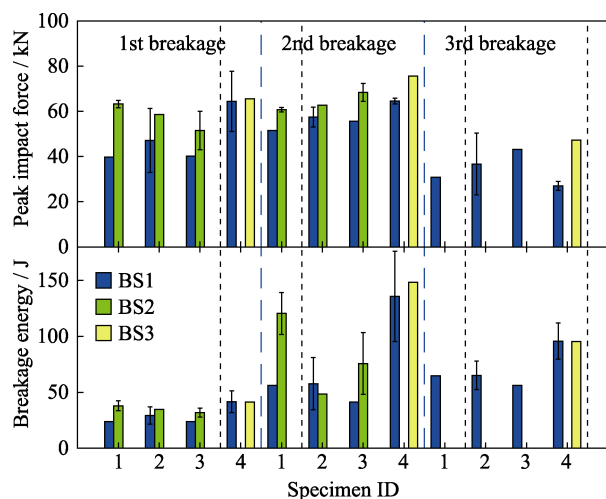


图 6 SGP 夹层玻璃试样的冲击力峰值和碎裂能

Fig. 6 Peak impact force and breakage impact energy of SGP laminated glass specimens

击力具有较大的标准偏差, 因此这种下降可能是由于重复测试中一个偶然结果所产生的。

## 2.5 动态刚度变化

各试样在往复撞击过程中冲击力和冲击速度关系曲线, 即动态刚度, 如图 7 所示。采用线性和二次回归拟合数据, 当动态刚度无明显降低趋势时采用线性拟合。线性拟合曲线的斜率用  $K$  表示, 而二次回归拟合曲线在曲线起点和终点的斜率分别由  $K_i$  和  $K_e$  表示。如图 7 所示, 所有试样展现出的共同趋势是: 破坏前阶段的冲击力与冲击速度成正比, 在破坏后阶段则均呈现明显的非线性特征, 当两层玻璃面板碎裂后,  $K$  值则明显下降。

在 BS1 开裂顺序的 1 号和 3 号试样组中, 没有显示破坏前阶段数据, 这是由于其破坏前阶段的冲击次数过少, 均在三次以内便导致玻璃面板的碎裂, 因此图 7 仅包含这两组破坏后阶段的动态刚度变化。在破坏前阶段, 2 号和 4 号试样组在不同开裂顺序时的  $K$  值几乎相同, 表明在破坏前阶段 SGP 夹层玻璃试样的动态刚度具有良好的一致性, 与开裂顺序无关, 因此可以对 1 号和 3 号试样进行合理的破坏前刚度假设, 即 BS1 碎裂前刚度和 BS2 碎裂前刚度相等。

BS1 开裂顺序中 1 号试样组最终碎裂阶段的  $K$  值, 分别比第一次碎裂和第二次碎裂阶段降低了 78%和 73%, 3 号试样组的  $K$  值也有相近的降低程度, 最终碎裂阶段的  $K$  值分别降低了 80%和 73%。与 BS1 较高的刚度降低率不同, BS3 中 4 号试样组最终碎裂阶段的  $K$  值仅下降了 36%。上述对比表明, 在外层和中层都破裂的情况下, 夹层玻璃面板刚度较低, 而中间层完好时, 夹层玻璃面板仍具有较高的

动态刚度。

图 7 显示, 有半钢化玻璃层的 2 号和 3 号试样组的动态刚度在破裂速度接近  $3.0\sim 3.2\text{ m/s}$  时进入快速下降阶段, 该下降阶段并未持续多久就出现了中间层的碎裂; 相反, 完全由钢化玻璃层制成的 1 号和 4 号试样组夹层玻璃面板的动态刚度则进入较长的下降阶段, 直到破裂速度接近  $3.5\sim 4.5\text{ m/s}$  时中间玻璃层才破裂。如 BS1 开裂顺序 4 号试样在外层碎裂后阶段结果所示, 其动态刚度在冲击速度增加时较为稳定,  $K$  值仅略有下降。这表明, 与含有半钢化玻璃层的混合玻璃构型相比, 完全由钢化玻璃层制成的三层夹层玻璃在外层玻璃面板破坏后阶段具有更好的抗多次冲击“延性”。

## 2.6 胶合面脱层行为

在实验中可以观察到两种类型的胶合面脱层, 即: 1) 最外层脱层; 2) 层间脱层, 其中最外层脱层发生于正对冲击点位置附近的最外侧胶合面, 以大量的外层或内层玻璃碎块的剥离脱落为特征。

此外还会出现发生在中间玻璃层和两个 SGP 胶层界面之间的层间脱层, 层间脱层现象在 1 号和 4 号试样组中尤为常见。图 8 分别给出了 1 号和 4 号试样典型脱层现象的普通照片和对应高速相片, 其中最外层脱层区边缘和层间脱层区边缘分别由点划线圆型区域 1 和虚线圆型区域 2 表示。边缘夹固式的 4 号试样组(图 8 (b))中脱层边缘内圆 1 和外圆 2 尺寸均明显大于驳接点支式的 1 号试样组(图 8 (a))。和脱层区域整体尺寸存在较大差异不同的是, 1 号和 4 号试样组的外圆 2 与内圆 1 之间圆环带宽度分别为 65 和 70 mm, 较为接近。

每个试样最外层脱层区域 1 和层间脱层区域 2 尺寸以及相应的冲击速度如图 9 所示, 从中可以看出, 驳接点支式(1、2、3 号)同一类别试件中的三个试样分别具有相同的最外层脱层区域 1 尺寸, 1、2、3 号实验组的圆盘型区域 1 平均直径分别为 100、93 和 74 mm, 在后续的冲击实验中, 这三组圆盘型区域 1 尺寸保持稳定并且与冲击速度无关。相

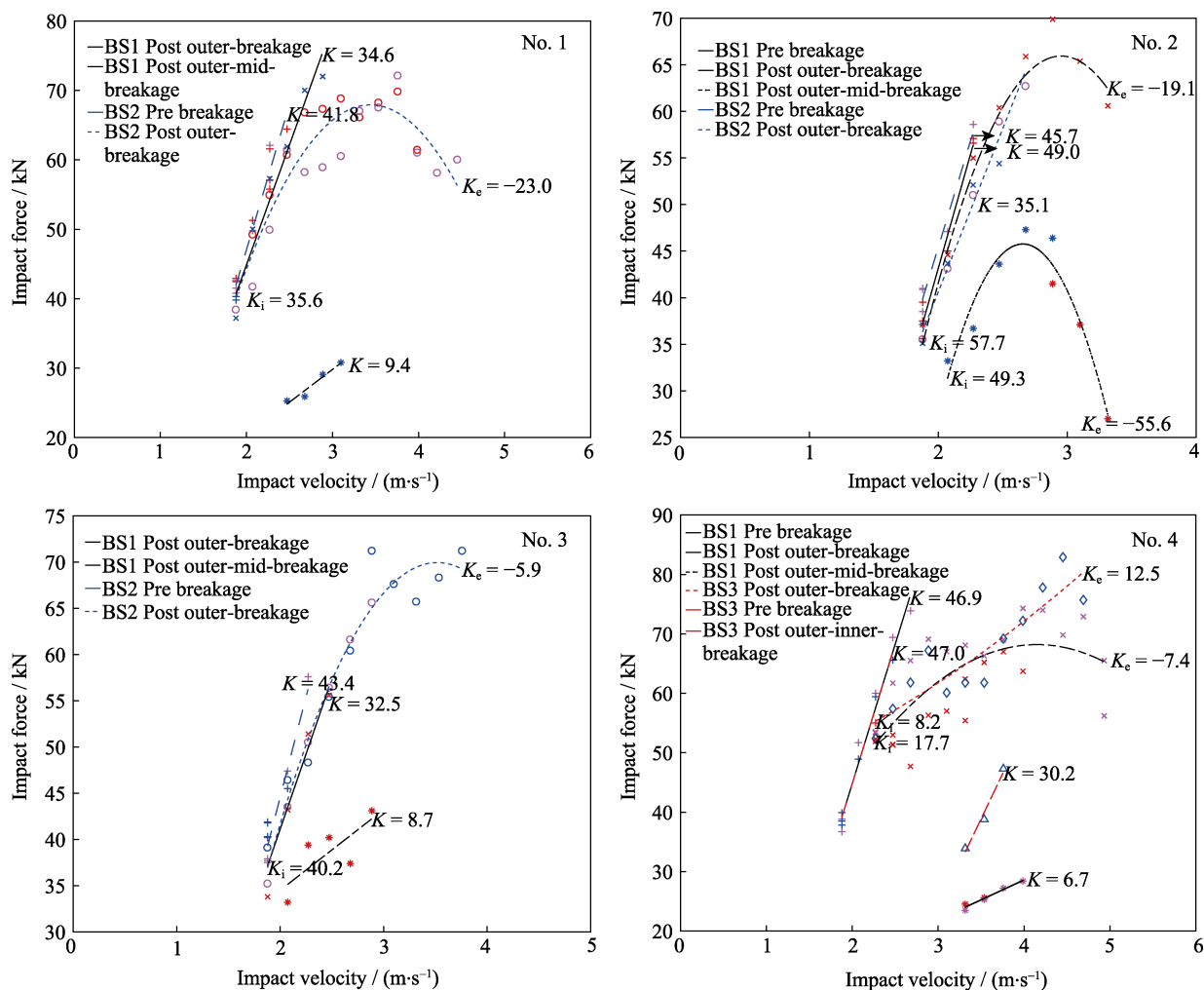


图 7 SGP 夹层玻璃试样动态刚度变化

Fig. 7 Dynamic stiffness variation of SGP laminated glass specimens



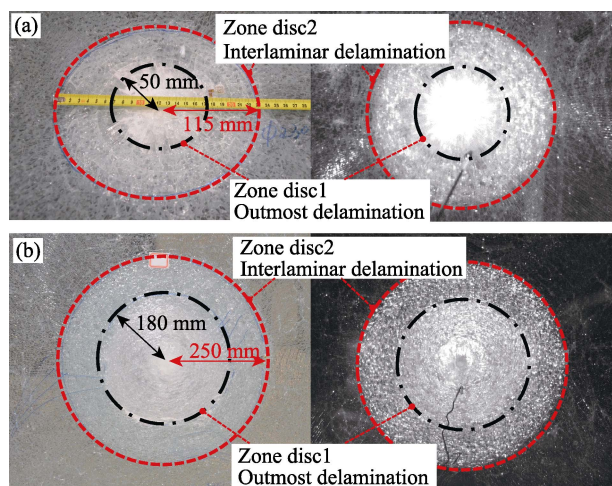


图 8 1 号和 4 号试样组的最外层脱层和层间脱层现象  
Fig. 8 Outmost and interlaminar delamination of No. 1 and No. 4 specimens  
(a) Specimen No.1 – bolted; (b) Specimen No.4 – edge clamped

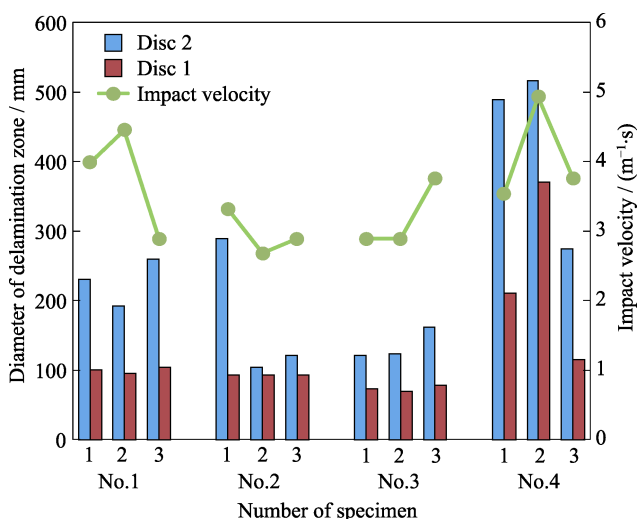


图 9 SGP 夹层玻璃试样脱层区域直径  
Fig. 9 Delamination zone sizes of tested specimens

反, 三层夹层玻璃的层间脱层区域 2 尺寸和边缘夹固式的 4 号试样组的最外层脱层区域 1 尺寸在多数情况下将受冲击速度影响, 层间脱层区边缘随着冲击速度的增加将持续向外扩张。由此表明, 由边缘夹紧产生的更强约束增加了夹层玻璃在往复冲击作用下发生连续脱层的可能性。

### 3 结论

通过实验研究了刚体冲击下多层 SGP 夹层玻璃的抗冲击性能。采用平均最小破坏速度(MMBV)方法测定了触发每层玻璃碎裂的冲击能, 并分析了开裂顺序、支撑条件及玻璃面板构成这三个因素对 SGP 夹层玻璃抗冲击性能的影响。测试结果表明:

1) 边缘夹固式的夹层玻璃面板需要更高的冲

击速度来触发玻璃碎裂, 其冲击碎裂能可能达到驳接点支式样本的 0.75 至 1.4 倍; 边缘夹固式支撑可为三层 SGP 夹层玻璃首次碎裂时提供高出驳接点支式 44% 的碎裂刚度, 但其后的冲击碎裂阶段的碎裂刚度却相对降低。

2) 玻璃类型在两块玻璃面板同时碎裂时将会显著影响冲击碎裂能, 采用的钢化玻璃面板越多将具备越高的碎裂能, 但是在逐次碎裂时玻璃类型对碎裂能影响则相对较小。

3) 半钢化玻璃碎片更有利的裂纹形态和碎片形状使破碎刚度相较钢化玻璃得到明显改善, 但仅能略微增加平均最小破坏速度。

4) 中层玻璃对三层夹层玻璃出现玻璃碎裂后的整体刚度贡献作用更大, 当外层和中层均碎裂时, 动态刚度将衰减 70% 以上; 仅中层玻璃完好时, 动态刚度衰减比例大幅降低至约 30%。

5) 三层 SGP 夹层玻璃动态刚度在破坏后阶段显著降低, 其中完全由钢化玻璃组成的夹层玻璃相较于含有半钢化玻璃的试样具备更好抵抗冲击的“延性”, 该“延性”在边缘夹固式的试样尤为明显。

最后, 本文研究了最外层脱层和层间脱层两种脱层现象, 研究发现, 如果冲击速度或冲击次数增加, 边缘夹固式夹层玻璃将更易发生连续脱层, 而驳接点支式的夹层玻璃试样最外层脱层区则将保持稳定。

### 参考文献:

- [1] BELIS J, DEPAUW J, CALLEWAERT D, *et al.* Failure mechanisms and residual capacity of annealed glass/SGP laminated beams at room temperature. *Engineering Failure Analysis*, 2009, **16**(6): 1866–1875.
- [2] BENNISON S J, SMITH C A, VAN DUSER A, *et al.* Structural Performance of Laminated Glass Made with a "Stiff" Interlayer. *Use of Glass in Buildings*. 2002: 57–65.
- [3] WANG XIN, LI KE-FENG, FAN SI-JUN, *et al.* Spectral properties of  $\sim 2 \mu\text{m}$  emission of  $\text{Tm}^{3+}$  doped  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-PbO}$  glass. *Journal of Inorganic Materials*, 2013, **28**(2): 165–170.
- [4] ZHAO XIU-LI, LIANG XIAO-JUAN, LUO HONG-YAN, *et al.* Third-order nonlinear optical properties of silver quantum dots doped in third-order nonlinear optical properties of silver quantum dots doped in sodium borosilicate glass. *Journal of Inorganic Materials*, 2013, **28**(9): 1003–1008.
- [5] YUAN YE, XU CHENG-LIANG, XU TINGNI, *et al.* An analytical model for deformation and damage of rectangular laminated glass under low-velocity impact. *Composite Structures*, 2017, **176**: 833–843.
- [6] XU XIAO-QING, XU JUN, CHEN JING-JING, *et al.* Investigation of dynamic multi-cracking behavior in PVB laminated glass plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, **100**: 62–74.
- [7] BAO YI-WANG, LIU ZHENG-QUAN. Mechanism and criterion



- of spontaneous breakage of tempered glass. *Journal of Inorganic Materials*, 2016, **31**(4): 401–406.
- [8] LIU BO-HAN, XU TING-NI, XU XIAO-QING, *et al.* Energy absorption mechanism of polyvinyl butyral laminated windshield subjected to head impact: experiment and numerical simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, **90**: 26–36.
- [9] ZHANG XI-HONG, HAO HONG, MA GUO-WEI. Laboratory test and numerical simulation of laminated glass window vulnerability to debris impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, **55**: 49–62.
- [10] MOHAGHEGHIAN I, WANG Y, JIANG L, *et al.* Quasi-static bending and low velocity impact performance of monolithic and laminated glass windows employing chemically strengthened glass. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2017, **63**: 165–186.
- [11] WANG XING-ER, YANG JIAN, LIU QING-FENG, *et al.* A comparative study of numerical modelling techniques for the fracture of brittle materials with specific reference to glass. *Engineering Structures*, 2017, **152**: 493–505.
- [12] ALTER C, KOLLING S, SCHNEIDER J. An enhanced non-local failure criterion for laminated glass under low velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, **109**: 342–353.
- [13] CHEN SHUN-HUA, ZANG MENG-YAN, WANG DI, *et al.* Finite element modelling of impact damage in polyvinyl butyral laminated glass. *Composite Structures*, 2016, **138**: 1–11.
- [14] VAN DAM S. Experimental Analysis of the Post-Fracture Response of Laminated Glass under Impact and Blast Loading. Ph.D Dissertation in Ghent University, 2017.
- [15] ZHANG QI-LIN, TAO ZHI-XIONG, WANG XUN, *et al.* Experimental study on dynamic response of laminated glass curtain wall under explosive action. *Journal of Building Structures*, 2013, **34**(4): 74–80.
- [16] GE JIE, LI GUO-QIANG, CHENG SU-WEN. Broken performance of building glass plate under blast loading (II) -experimental verification. *Journal of Civil Engineering*, 2014, **47**(3): 59–68.
- [17] PYTTEL T, LIEBERTZ H, CAI J. Failure criterion for laminated glass under impact loading and its application in finite element simulation. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, **38**(4): 252–263.
- [18] CHEN SU-WEN, ZHU CHEN-GUANG, LI GUO-QIANG, *et al.* Blast test and finite element analysis of point-supported glass curtain wall. *Journal of Building Structure*, 2012, **33**(12): 99–105.
- [19] OU YING-CHUN, ZANG SHU-GUANG, CHENG JI-SHOU, *et al.* Influence of interlayer to penetration resistance of laminated glass. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, **32**(22): 1–4.
- [20] BEDON C, BELIS J, LUIBLE A. Assessment of existing analytical models for the lateral torsional buckling analysis of PVB and SG laminated glass beams via viscoelastic simulations and experiments. *Engineering Structures*, 2014, **60**: 52–67.
- [21] LOUTER C, BELIS J, VEER F, *et al.* Durability of SG-laminated reinforced glass beams: effects of temperature, thermal cycling, humidity and load-duration. *Construction and Building Materials*, 2012, **27**(1): 280–292.
- [22] LOUTER C, BELIS J, VEER F, *et al.* Structural response of SG-laminated reinforced glass beams; experimental investigations on the effects of glass type, reinforcement percentage and beam size. *Engineering Structures*, 2012, **36**: 292–301.
- [23] ASTM E1996-14a, Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors and Storm Shutters Impact Protective Systems Impacted by Windborne Debris in Hurricanes. ASTM International, 2014.
- [24] BS EN 356, Testing and Classification of Resistance Against Manual Attack. British Standards Institution, 2000.
- [25] SAXE T, BEHR R, MINOR J, *et al.* Effects of missile size and glass type on impact resistance of “Sacrificial Ply” laminated glass. *Journal of Architectural Engineering*, 2002, **8**(1): 24–39.