

Review on Studies on Mechanical Properties of SGP

Xiao Shao¹, Suwen Chen^{1,2}

¹School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

²State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: shaoxiaotj@163.com

Received: May 7th, 2015; accepted: May 23rd, 2015; published: May 27th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Polyvinyl butyral (PVB) has been widely adopted for interlayer in laminated glass in the past decades. Nowadays, a new interlayer SentryGlas®Plus (SGP) has been developed, which has better stiffness and strength compared with PVB. SGP's application makes laminated glass not only to be shatterproof glass, but to be a part of the structure. Due to its superior mechanical properties, SGP gains more and more application in curtain wall structures, especially in super high-rise buildings and large-scale public buildings. Nevertheless, there is no systematic study on SGP's mechanical property, which causes some difficulties in the design of laminated glass. This paper reviews the present researches on mechanical performance of the SGP around the world.

Keywords

SGP, Mechanical Property, Temperature Sensitive, Experimental Study, Strain-Rate Dependence

SGP的力学性能研究综述

邵筱¹, 陈素文^{1,2}

¹同济大学土木工程学院, 上海

²同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海

Email: shaoxiaotj@163.com

收稿日期: 2015年5月7日; 录用日期: 2015年5月23日; 发布日期: 2015年5月27日

摘要

聚乙烯醇缩丁醛中间膜(PVB)在过去几十年被广泛应用于夹层玻璃中。如今新型的离子性中间膜(SGP)较之PVB具有更好的强度和刚度,SGP的采用使得夹层玻璃从之前的仅作为安全玻璃发展为结构的一部分。基于其良好的力学性能,SGP在幕墙结构中得到越来越广泛的应用,特别是一些超高层和大型城市公共建筑。然而,到目前为止,对SGP的力学性能尚未有系统的研究,这对夹层玻璃的设计造成了一定困难。本文主要介绍了国内外关于SGP力学性能的研究现状,并根据试验目的和方法的不同进行了归纳总结。

关键词

SGP, 力学性能, 温度敏感, 试验研究, 应变率相关

1. 引言

目前,夹层玻璃被广泛应用于幕墙结构,广泛采用的中间膜是聚乙烯醇缩丁醛,英文名称是 polyvinyl butyral, 简称 PVB。爆炸时,玻璃即使发生破碎,但也能粘附在 PVB 上,极大地减少飞溅的玻璃碎片,从而减少人员伤亡和经济损失。PVB 在幕墙结构中的使用已经有多年历史。但是,这种夹层膜最初是为汽车玻璃而开发的,富于弹性,比较柔软,剪切模量小,受力后两块玻璃间会有显著的相对滑移,承载力较小,弯曲变形较大。PVB 夹层玻璃可以用于一般玻璃幕墙,不适宜用于有高性能要求的玻璃幕墙。

现在,能满足建筑幕墙夹层玻璃高性能要求的夹胶膜—离子性中间膜已经由美国杜邦公司开发出来,并批量生产,称为 SGP。与 PVB 相比,SGP 具有更高的强度和刚度,因此已开始在大中型公共建筑和超高层建筑玻璃幕墙中使用。但 SGP 的力学性能尚未得到充分的研究,为此,需要研究 SGP 在静载和冲击荷载下的材性。本文简要总结了国内外研究 SGP 力学性能的进展以及主要的实验方法。

2. SGP 的基本特性

SGP 的撕裂强度是普通 PVB 的 5 倍,硬度是普通 PVB 的 100 倍[1]。SGP 夹层玻璃破损后保持有较高的残余承载力,一般不会整块坠落[2]。SGP 夹胶膜本身无色透亮,不容易泛黄,SGP 膜的泛黄系数小于 1.5,而 PVB 膜的泛黄系数为 6~12 [3],并且 SGP 夹层玻璃具有良好的耐光性,将样本置于亚利桑那州的沙漠的实验装置实验,得到相当于正常阳光照射下的 10 年后的玻璃样本,数据表明,以普通肉眼观察样本看不出颜色变化和风化痕迹[4]。SGP 夹层玻璃的紫外线透射率不到 1%,而普通的浮法玻璃高达 70% [5]。在苛刻的自然环境下随时间的风化作用可以反映夹层玻璃的耐久性,SGP 夹层玻璃边部外露于大气条件下,不会开胶、分离,因此在使用时无须采用专门的封边措施[6],即使在热带高温和暴风雨的极端气候情况下,SGP 夹层玻璃也具有良好的边缘稳定性[7]。SGP 夹层对密封胶、陶瓷色釉料和玻璃镀膜等都具有很好的粘结性[8] [9]。因此近几年 SGP 开始在大中型公共建筑和超高层建筑中推广应用。

3. 力学性能指标

目前,国外进行的 SGP 力学材性实验工作不是很多,已有的数据很少,表 1 [1] [10] [11]给出了 SGP 的一些基本材料参数,并与 PVB 参数值进行对比,可以看出抗拉强度和杨氏模量明显增大,SGP 具有很好的延性,伸长率可以达到 400%,玻璃化温度 T_g 范围为 55°C ~ 60°C ,因此在常温下 SGP 表现为玻璃态,其中弹性模量是在室温下的参考值,而 SGP 在不同温度下的弹性模量值并不相同[12]。因为 SGP 的粘弹

Table 1. Material parameters comparison between SGP and PVB
表 1. SGP 和 PVB 材料参数对比

项目	SGP	PVB
比重(g/m ³)	0.95	1.07
杨氏模量(MPa)	300	18
抗拉强度(MPa)	34.5	>20
伸长率	400%	>250
玻璃化温度 T _g	55℃~60℃	10℃~15℃

性特性, SGP 夹层玻璃的整体刚度随着温度的上升而下降, 温度不变时, 随着荷载持时的增加整体刚度下降[13]。

4. 试验研究

4.1. 小变形试验

在玻璃面板出现第一道裂纹前, 夹层玻璃都处在小变形条件下, 在玻璃之间的夹层主要起传递剪力的作用, 夹胶层的粘弹性特性主要表现为整体刚度依赖于负载时间和温度, 特别是在绕弱轴弯曲和扭转的情况下。

小应变下的 SGP 力学特性一般用动态力学试验方法(DMA), 进行试验可得到一个参考温度下的剪切模量关于时间函数的主曲线。根据 SGP 的负载时间和温度的等效相关的粘弹性特性可建立转换方程, 通过转换方程就能得到不同温度下的主曲线。2013 年中国建材检验认证集团股份有限公司和国家安全玻璃及石英玻璃质量监督检验中心公布的夹层玻璃中间层材料的剪切模量的测试的试验报告, 使用 DMA Q800 动态机械热分析仪得到 20℃~80℃ (间隔为 10℃) 的不同荷载持时下 SGP 剪切模量[14]。杜邦公司的 Stephen J. Bennison 在 2008 年用动态力学试验方法(DMA)得到了 SGP 在 10℃~80℃ 区间下的杨氏储能模量变化曲线, 并且做了蠕变试验, 得到了 10℃~80℃ (间隔为 10℃) 下的杨氏综合模量和泊松比在不同荷载持时的值[12]。

另外, 还可以通过夹层玻璃的松弛剪切试验得到 PVB 夹胶层的剪切模量和本构关系[15] [16], 对于 SGP 还没有此类相关研究。

4.2. 大变形试验

对结构玻璃进行设计, 需要知道夹层玻璃破碎后的性能和相关模型, 因此要关注夹胶层大变形直至破坏的力学行为。

Didier Delincé 在根特大学纺织系的实验室进行了常温下 SGP 的静力加载下轴心受拉实验。应力应变曲线见图 1 [11]。实验结果表明 SGP 在低应变下产生可恢复的弹性变形, 在屈服之后先软化产生在该实验温度时不可恢复的变形, 之后再度硬化直至破坏。论文指出 SGP 在低于玻璃化转变温度时适用弹性粘弹性模型。在温度高于玻璃化转变温度时, 高聚物呈现为高弹态, 变形完全可逆, 适用超弹性模型[11]。

4.3. 应变率相关试验

SGP 是一种粘弹性材料, 其力学性能受应变率影响很大。

J. Belisa 和 Didier Delincé 用 Instron 3369 万能试验机在 20℃ 时做了 5 种加载速度(5、10、20、50 和 100 mm/min)的 SGP 轴心拉伸试验。试件标距段长度为 20 mm, 厚度为 2.40 mm, 即在 5 种应变率(0.25、

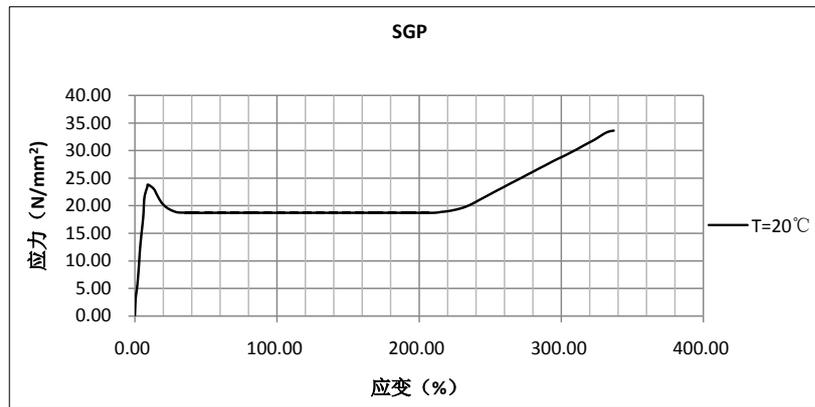


Figure 1. Tensile stress-strain curve of SGP under at room temperature
图 1. 常温下 SGP 的轴心受拉应力 - 应变曲线

0.5、1、2.5 和 5 min^{-1} 下的拉伸试验，属于低应变率范围。试验表明，随着应变率的增大，屈服强度变大(为 21~25 MPa)，屈服后有更显著的伸长率。极限强度(>32 MPa)受应变率影响较小并且未形成有规律的影响[17]。不同应变率下的实验值见表 2 [17]，其中 σ_y 、 ϵ_y 为屈服强度和对应的应变， σ_u 、 ϵ_u 为极限强度和对应的应变。

SGP 夹层玻璃的三点弯曲梁；在低应变率下，按照玻璃边缘设计强度值 14 MPa 的准则下，随应变率增大，力的设计值有所提高，但是变化幅值很小。40℃时，自重下的 SGP 夹层玻璃在长期作用下，变形基本稳定，松弛现象可以不考虑[18]。

Dieter Callewaert 博士用液动转动控制试验机做了常温下四种应变率分别为 0.1、1、12 和 125 s^{-1} 的轴心拉伸试验，其工程应力 - 工程应变的关系。见图 2 [19]，由图可见，SGP 初始模量对应变率不敏感，平均值为 500 MPa，随着应变率的增大，屈服强度和极限强度增大，但是破坏时的伸长率却减小[20]。

因为爆炸荷载作用时应变率能高达 1000 s^{-1} ，因此 Dieter Callewaert 博士的一篇论文中给出了 PVB 和 SGP 在 1000 s^{-1} 应变率下的应力 - 应变曲线(见图 3 [21])，在爆炸荷载中，PVB 开始为玻璃态，之后表现为高弹态，而 SGP 一直表现出弹塑性。论文中只提到了可以用高速拉力试验机或者根据时温等效原理通过低温下的应力 - 应变曲线得到高应变率下的力学性能，但未给出具体的过程[21]。

4.4. 夹层玻璃的受弯和扭转试验

Dieter Callewaert 博士完成了 5、20、35、50 和 65℃下的非破坏扭转试验和 20℃、65℃下的非破坏的绕弱轴的三点弯曲试验[22]。试验表明：1) SGP 具有明显的蠕变效应，并且随着温度升高蠕变加速。2) 扭转作用下，随着温度升高，扭转刚度明显降低，发生蠕变。3) 5℃时扭转刚度基本保持不变，20℃时扭转刚度随着荷载持时的增加而降低，但是蠕变值较小并且很缓慢。在低于 SGP 的玻璃化转变温度 T_g 时，随着温度的升高，蠕变值大、速度明显加快。在 65℃时，蠕变值变小，并且很快完成蠕变过程。4) 但是在 65℃时，三点弯曲下的抗弯刚度在 5 天后蠕变仍未结束，20℃时，长期荷载下，抗弯刚度基本保持不变，蠕变很小[22]。该文献未做完玻璃化转变温度 T_g (55℃~60℃)附近的试验，由于在 SGP 的玻璃化转变温度 T_g 附近的力学性能会发生很大变化，因此 Dieter Callewaert 博士又补充了 60℃下的非破坏扭转试验和 50℃下的非破坏的绕弱轴的三点弯曲试验，间接地得到了 SGP 的剪切模量。对于扭转试验，做了四组不同尺寸和材料的试验，详细参数见表 3 [4]。试验先得到 6 mm 厚的退后玻璃的扭转刚度和剪切模量。夹层玻璃实际扭转刚度与单独的玻璃面板扭转刚度之间存在一个比值 f [23]。而不同温度下夹层玻璃扭转刚度通过试验得到，见图 4 [4]。

Table 2. Results from axial tension test of The SGP at different loading rate
表 2. SGP 不同加载速率下的轴心受拉实验结果

加载速度(mm/min)	σ_y (N/mm ²)	ε_y (%)	σ_u (N/mm ²)	ε_u (%)
5	20.97	7.37	33.19	339.43
10	21.86	8.32	34.32	340.53
20	22.40	8.48	32.44	331.25
50	23.79	8.59	33.10	342.33
100	25.09	8.65	35.71	386.56

Table 3. Parameters of specimens
表 3. 四组不同试件的参数表

编号	数量	玻璃类型	长度(mm)	宽度(mm)	玻璃厚度(mm)	SGP 厚度
M	3	退火玻璃	1100	360	6	/
A	8	钢化玻璃	1100	360	6*2	1.52
B	4	退火玻璃	1100	180	8*2	1.52
C	4	钢化玻璃	3000	360	8*2	1.52

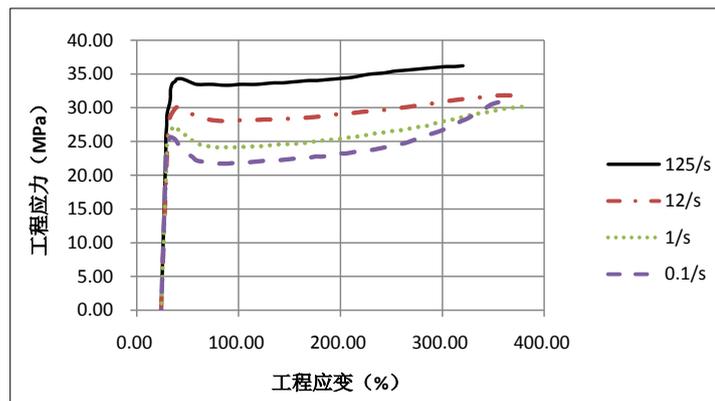


Figure 2. Engineering stress-strain relationships of SGP at different strain rates

图 2. 不同应变率的工程应力 - 应变关系

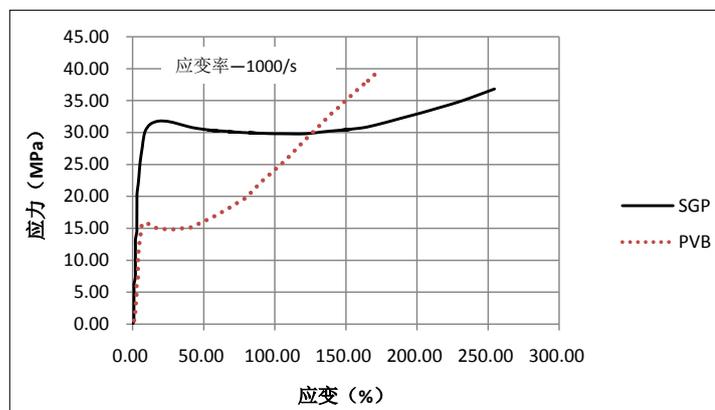


Figure 3. Stress-strain relationship of PVB and SGP

图 3. PVB 和 SGP 的应力 - 应变关系曲线

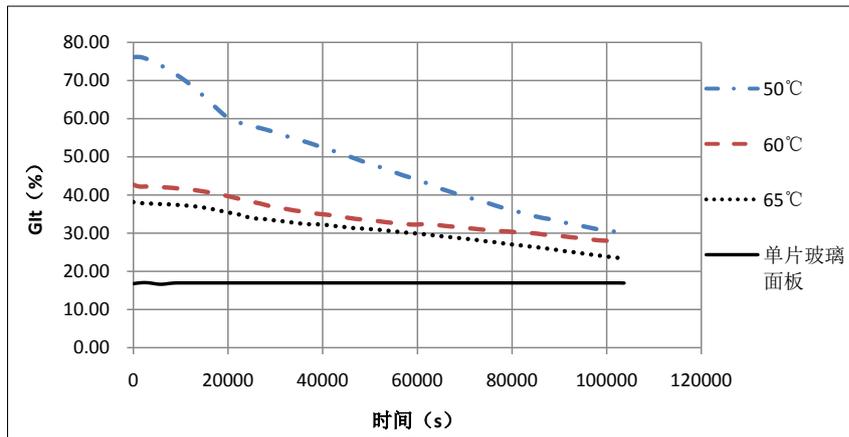


Figure 4. Torsional stiffness at different temperature
图 4. 不同温度的扭转刚度

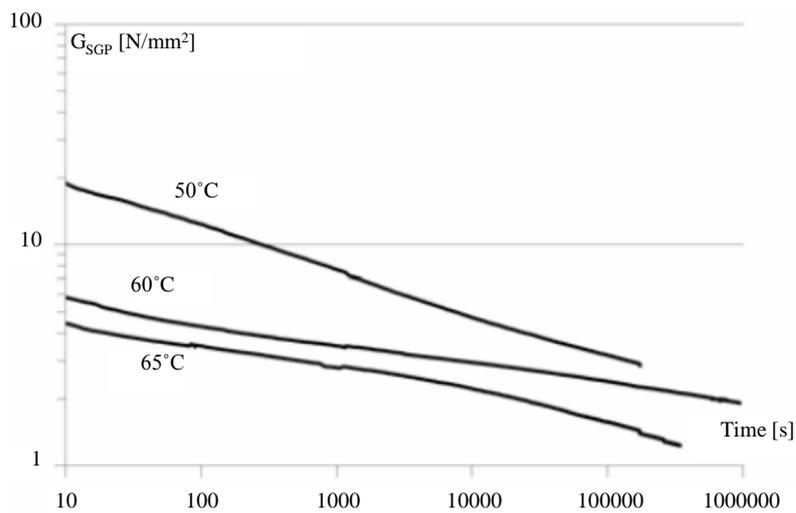


Figure 5. The relationship between the average shear modulus of SGP and loading duration at different temperature
图 5. 不同温度下 SGP 剪切模量平均值随荷载持时的变化曲线

$$(GI_t)_{laminated} = GI_{t, disconnected\ glass\ sheets} \cdot f$$

当满足试件长远大于宽且宽远大于厚度的条时, f 满足下式[24]。最终得到三个温度下的 SGP 剪切模量随荷载持时的变化曲线见图 5 [4]。

$$f = \frac{6t_{glass}^3 t_{SGP} + \frac{G_{SGP}}{G_{glass}} \cdot h^2 (4t_{glass}^2 + 6t_{glass} t_{SGP} + 3t_{SGP}^2)}{t_{glass}^2 \left(6t_{glass} t_{SGP} + \frac{G_{SGP}}{G_{glass}} \cdot h^2 \right)}$$

在国内, 受美国杜邦公司的委托, 中国建筑科学研究院在 2007~2009 年进行了 SGP 夹层玻璃性能的研究, 包括夹层玻璃常温受弯性能的研究和夹层玻璃高温受弯试验的研究。其中夹层玻璃常温受弯试验对比了 SGP 夹层玻璃、等厚 PVB 夹层玻璃和等厚单片玻璃的受力性能, 玻璃受弯试件分四边支承和两边简支两种形式[25] [26]; 夹层玻璃高温受弯试验的研究包括在 25°C~80°C 范围内单层退火玻璃和两种夹

层玻璃试件的短期受弯性能试验、长期受弯性能试验以及常温下中间层涂油“夹层玻璃”的短期受弯性能试验[27]。

5. 总结

SGP 是半晶态的热塑性高分子聚合物，具有明显粘弹性特性，其力学性能受温度和荷载持时影响，有蠕变和松弛现象。静力拉伸试验得到的结果表明低于玻璃化转变温度时，SGP 适用粘弹性模型，当高于玻璃化转变温度时，SGP 适用超弹性模型；对于小变形时，适用线性粘弹性模型。迄今为止未有大家公认的低应变和低应变率下的剪切模量和剪切强度值。而且，关于 SGP 在中高应变率的力学性能研究工作还很少，未有明确的力学性能描述。SGP 对比 PVB 的优异性能，使之将越来越多的应用到需要满足高性能要求的建筑结构中，因为非常有必要对 SGP 的力学性能进行全面的试验研究，进行不同应变率与温度下的拉伸试验、直接剪切试验与层间剪切试件，并通过动态力学试验研究 SGP 的粘弹性特性，进一步提出合理的本构模型，以应用于夹层玻璃的抗爆研究、结构设计等。

基金项目

自然科学基金课题(51278365): 爆炸作用下点支式玻璃幕墙的破损机制和模式研究和土木工程防灾国家重点实验室自主课题(SLDRCE 10-B-10)。

参考文献 (References)

- [1] (2005) DuPont™SentryGlas®-brochure. The USA. www.dupont.com/safetyglass
- [2] (2008) DuPont™SentryGlas® Post-breakage strength. The USA. www.dupont.com/safetyglass
- [3] (2008) DuPont™SentryGlas®-visual quality. The USA. www.dupont.com/safetyglass
- [4] DuPont™. http://www2.dupont.com/SafetyGlass/en_US/assets/pdfs/sgx_lightfastness.pdf
(2004) SentryGlas® Expressions™-Lightfastness. www.dupont.com/safetyglass
- [5] (2008) DuPont™SentryGlas®-UV control. The USA. www.dupont.com/safetyglass
- [6] (2011) DuPont™SentryGlas®-weathering. The USA. www.dupont.com/safetyglass
- [7] (2010) DuPont™SentryGlas®-edge stability. The USA. www.dupont.com/safetyglass
- [8] (2011) Ceramic frit compatibility with SentryGlas®. The USA. www.dupont.com/safetyglass
- [9] (2011) DuPont™SentryGlas®-sealant compatibility. The USA. www.dupont.com/safetyglass
- [10] Delincé, D., Sonck, D., Belis, J., et al. (2008) Experimental investigation of the local bridging behaviour of the interlayer in broken laminated glass. *ISAAG Conference Proceedings*, Munchen, 19-21.
- [11] Delincé, D., Callewaert, D., Belis, J. and Van Impe, R. (2008) Post-breakage behavior of laminated glass in structural applications. *Proceedings of the Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, Delft, 22-23 May 2008, 459-467.
- [12] Bennison, S.J., Qin, M.H.X. and Davies, P.S. (2008) High-performance laminated glass for structurally efficient glazing in innovative light-weight structures and sustainable facades. Hong Kong, May 2008, 1-12.
- [13] Callewaert, D. and Delincé, D. (2009) Laminated glass as a structural building material. *UGent-FirW Doctoraatssymposium*, **10e**, 160-161.
- [14] 中国建材检验认证集团股份有限公司和国家安全玻璃及石英玻璃质量监督检验中心 (2013) 层玻璃中间层材料的剪切模量的测试的试验报告.
- [15] Sobek, W., Kutterer, M. and Messmer, R. (1999) Shear stiffness of the interlayer in laminated glass. *Proceedings of the 6th International Conference on Architectural and Automotive Glass (Glass Processing Days)*, Tampere, 13-16 June 1999, 360-365.
- [16] 戎文杰 (2010) PVB 材性及其对玻璃幕墙抗爆性能的影响研究. 硕士学位论文, 同济大学, 上海.
- [17] Belis, J., Depauw, J., Callewaert, D., Delincé, D. and Van Impe, R. (2009) Failure mechanisms and residual capacity of annealed glass/SGP laminated beams at room temperature. *Engineering Failure Analysis*, **16**, 1866-1875.
- [18] Bennison, S.J., Smith, C.A., Van Duser, A., et al. (2001) Structural performance of laminated safety glass made with

- “Stiff” interlayers. *Proceedings of the Seventh International Conference on Architectural and Automotive Glass (Glass Processing Days)*, Tampere, 18-21 June 2001, 18-21.
- [19] Norville, H.S. and Conrath, E.J. (2001) Considerations for blast resistant glazing design. *Journal of Architectural Engineering*, **7**, 80-86.
- [20] Bennison, S., Sloan, J., Kistunas, D., Buehler, P., Amos, T. and Smith, C. (2005) Laminated glass for blast mitigation: Role of interlayer properties. *Proceedings of the 9th International Conference on Architectural and Automotive Glass (Glass Processing Days)*, Tampere, 17-20 June 2005, 17-20.
- [21] Bennison, S.J., *et al.* (2003) Expanding bomb blast performance of architectural glass. *Proceedings of the 8th International Conference on Architectural and Automotive Glass (Glass Processing Days)*, Tampere, 15-18 June 2003, 15-18.
- [22] Callewaert, D., *et al.* (2008) Temperature-dependent behavior of glass/ionomer laminates: Preliminary test results. *Proceedings of Challenging Glass—Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, Delft, 22-23 May 2008, 22-23.
- [23] Scarpino, P., Kasper, R. and Sedlacek, G. (2004) Saint venantsche torsionswiderstände von querschnitten in sandwichbauweise. *Bauingenieur*, Band 79/2004, 167-175.
- [24] Callewaert, D., Depaepe, J., De Vogel, K., Belis, J., Delincé, D. and Van Impe, R. (2008) Influence of Temperature and Load Duration on Glass/Ionomer Laminates: Torsion and Bending Stiffness. *Conference Proceedings of ISAAG2008*, Munich, 51-63.
- [25] 赵西安 (2011) SGP 夹层玻璃提高建筑幕墙安全性. *建设科技*, **23**, 60-63.
- [26] 赵西安 (2012) 离子性中间膜夹层玻璃. 2012 年全国铝门窗幕墙行业年会论文.
- [27] 刘刚, 赵西安 (2009) 夹层玻璃高温受弯性能试验研究报告. 中国建筑科学研究院建筑结构研究所, 北京.