

文章编号: 1000-5013(2008)03-0432-05

静力及冲击荷载下夹层玻璃的变形性能

高 轩 能¹, 王 书 鹏²

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021; 2. 石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041)

摘要: 采用有限元法, 对玻璃板厚变化的夹层玻璃在长、短期静力和冲击荷载作用下的变形性能进行模拟计算, 计算结果与相关文献试验结果符合较好. 进一步的计算分析表明, 荷载作用类型及持续时间、支承方式和内外层玻璃板厚变化, 是影响夹层玻璃整体变形性能的主要因素. 夹层玻璃在爆炸荷载作用下, 其弯曲刚度比静力荷载下的弯曲刚度大, 框支玻璃的抗爆性能好于点支承玻璃的抗爆性能. 根据模拟计算, 对现行规范夹层玻璃等效厚度的计算公式进行修正, 给出的夹层玻璃等效厚度计算公式适用于不同支承条件.

关键词: 夹层玻璃; 变形性能; 等效厚度; 冲击荷载; 有限元模型

中图分类号: TU 382.02

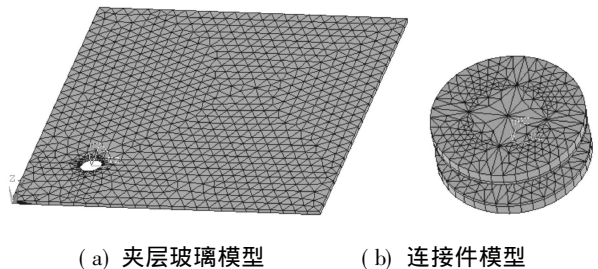
文献标识码: A

夹层玻璃用于房屋建筑时, 除了要考虑常规静力荷载作用外, 对于防爆建筑还需要考虑爆炸冲击荷载作用. 我国现行规范^[1]中, 尚没有爆炸荷载作用下夹层玻璃的设计计算方法和相关规定, 对于静力荷载作用, 则规定采用等效厚度方法将夹层玻璃看成单片玻璃进行分析. 如将夹层玻璃视为总厚度相同的均质玻璃, 则分析结果作为其承载性能的上限; 如忽略夹层作用, 则在整个弯曲过程中, 相邻两片玻璃板在面板的法线方向上始终保持接触, 每片玻璃分担的荷载按它们的弯曲刚度的比例分配, 分析结果作为夹层玻璃的承载性能的下限^[2]. 我国规范中等效厚度的取值就是按承载性能的下限确定的. 事实上, 夹层玻璃是由聚乙烯醇缩丁醛(PVB)胶片黏结在一起共同工作的, 按承载性能上限计算显然偏不安全, 而按承载性能的下限计算又必然会造成一定的浪费. 因此, 确定夹层玻璃的等效厚度是正确判断其承载性能的关键. 赵西安^[3]在总结相关研究成果的基础上, 给出了计算夹层玻璃等效厚度的建议公式. 张其林等^[4]对点支式夹层玻璃的承载性能做了短期加载和长期加载试验, 得到夹层玻璃的承载性能受荷载持续时间影响较大的结论. 本文主要研究夹层玻璃在静力及冲击荷载作用下的变形性能, 以及玻璃厚度变化对其性能的影响.

1 有限元分析模型的建立

1.1 计算模型的建立

采用有限元分析软件 ANSYS 程序建立计算模型. 模型的单元类型取为三维实体单元, 形状类似于三棱柱体, 以适用面内不规则网格的划分. 每个单元定义 15 个节点, 每个节点取 3 个自由度. 为简化计算, 利用结构的对称性取 1/4 玻璃板进行建模. 玻璃板及配件的计算模型如图 1 所示. 为了便于比较和验证本文有限元计算的准确性, 取与文[4]相同条件的点支式夹层玻璃构件进行分析计算. 构件的几何参数中, 长为 1 000 mm, 宽为



(a) 夹层玻璃模型 (b) 连接件模型

图 1 点支式夹层玻璃有限元模型

Fig. 1 Finite element model of point-supported glass

收稿日期: 2007-11-17

作者简介: 高轩能(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构灾害控制的研究. E-mail: gaoxn@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省重点科技计划项目(2006H0030); 厦门市科技计划项目(3502Z20073036); 福建省建设科技计划项目(闽建科 05-22-17); 江西省教育厅科技项目(2004)

1 000 mm, 外片厚为 6 mm, 内片厚为 6 mm, PVB 厚为 1.14 mm, 孔心边距为 100 mm.

计算模型中考虑的材料, 包括玻璃、PVB 夹层、金属连接件和起缓冲效应的密封垫层. 垫层与玻璃间的接触采用面-面接触单元进行模拟, 即将垫层设为接触面, 用 Contal 174 单元, 将玻璃设为目标面, 用 Target 170 单元. 玻璃与 PVB, 金属连接件与垫层之间通过体单元相互粘结来处理接触. 计算时考虑了接触面间的摩擦应力, 玻璃和垫层间的摩擦系数取为 0.4^[5]. 由于 PVB 为粘弹性材料, 为减少计算量并考虑荷载持续时间的影响, 参考文[6], 将其视作线弹性材料进行分析. 材料参数按不同的荷载作用情况(瞬时冲击荷载、短期荷载

表 1 材料常数表

和长期荷载)取值, 如表 1 所示. 表 1 中, E 为材料的弹性模量, μ 为材料的泊松比.

1.2 计算模型可靠性的验证
以文[4]的试验结果来验

证建模的可靠性和适用性. 文[4]分别对两块几何尺寸相同的钢化夹层玻璃试件 A 和 B 进行了短期加载(加载约 1 min 后量测)和长期加载(荷载持续 0.5 a)试验, 测得在不同类型荷载和不同荷载水平作用下的位移和应力. 对于短期加载试验, 文[4]分别测量了夹层玻璃在 0.6, 1.0, 1.4, 1.8, 2.2 kPa 等 5 个荷载级别下的挠度(δ)和应力(σ), 试验结果与本文有限元计算结果的比较, 如图 2 所示. 对于长期加载试验, 文[4]测量了夹层玻璃在均布荷载 2.2 kPa 持续作用 0.5 a 情况下的挠度和应力. 本文有限元模型的挠度和应力计算结果分别为 6.098 mm 和 14.900 MPa, 而试件 A, B 的挠度和应力

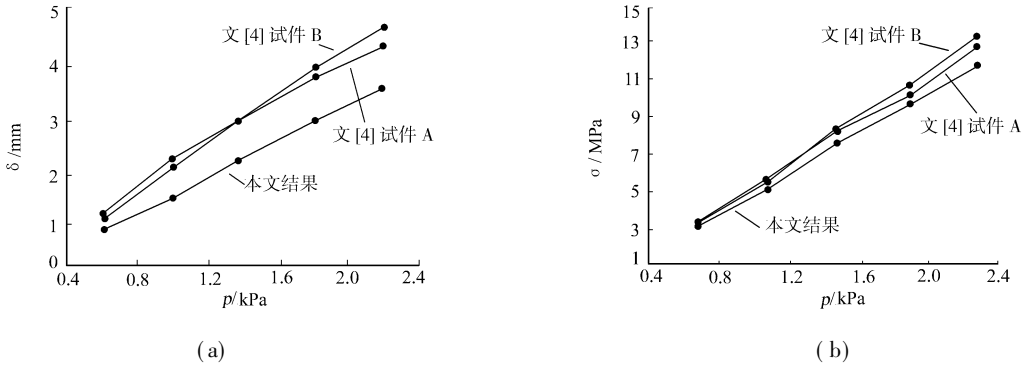


图 2 短期荷载下挠度和应力图

Fig. 2 Deflection and stress results under short-term load

试验结果分别为 6.169, 6.582 mm 和 15.162, 15.402 MPa. 从以上比较的结果可知, 无论是短期荷载作用还是长期荷载作用, 本文有限元模型的计算结果与试验结果吻合较好. 表明, 本文计算模型和材料参数的选取合适, 计算结果可信, 用于模拟计算夹层玻璃的力学性能是适用和可靠的. 此外, 由表 1 中的材料参数可以看出, 对于长期荷载作用, PVB 的黏结作用很小, 可以忽略不计.

2 夹层玻璃在静力荷载下的变形性能

2.1 PVB 厚度对夹层玻璃变形性能的影响

夹层玻璃的变形性能与荷载作用持续时间密切相关. 对于长期荷载作用, 如前所述可以不计 PVB 的黏结作用, 因此, 夹层玻璃的变形可以按承载性能的下限来计算. 此时, PVB 的厚度不影响夹层玻璃的变形性能. 对于短期荷载作用, 则不能忽略 PVB 的黏结作用. 为了研究夹层厚度对玻璃变形性能的影响, 本文仍采用前述计算模型并设材料参数不变. 即玻璃尺寸($l \times b$)为 1 000 mm \times 1 000 mm 和 1 500 mm \times 1 000 mm, 内、外层玻璃的厚度分别为 6, 15 mm, PVB 的厚度分别为 0.76, 1.14, 2.0 mm, 荷载仍然为 2.2 kPa 的均布荷载, 计算结果如表 2 所示. 表 2 中, $\delta_{0.76}$, $\delta_{1.14}$, $\delta_{2.0}$ 分别为 PVB 厚度为 0.76, 1.14, 2.0 mm 时的玻璃板中心的挠度.

从表 2 中可以看出, 随着 PVB 厚度的增大, 点支承夹层玻璃板心的挠度不断减小. 表明在短期荷载作用下, PVB 的黏结作用使玻璃与 PVB 能共同工作, 夹层玻璃的抗弯刚度增大, 变形减小. PVB 的厚

度越大, 夹层玻璃的短期刚度越大, 变形越小. 但总体来说, PVB 厚度变化对夹层玻璃的刚度影响较小, PVB 厚度从 0.76 mm 增大到 1.14 mm, 增大了 1.50 倍; 夹层玻璃板心的挠度最大仅减小 2.0% 左右, 增大到 2.0 mm, 增大了 2.63 倍, 夹层玻璃板心的挠度最大也仅减小约 7.0%.

为研究支承条件对夹层玻璃变形的影响, 将点支承改为框支, 其他条件不变, 计算结果如表 2 所示. 由表 2 结果可知, 对于框支玻璃, PVB 厚度增大时, 玻璃板心的挠度反而增大, 但增大的量很小, 其变形

表 2 PVB 厚度对玻璃变形性能的影响

Tab. 2 Influence of the thickness of PVB ply on the deflection of laminated glass

$l \times b \times d /$ mm \times mm \times mm	点支玻璃			框支玻璃		
	$\delta_{0.76} / \text{mm}$	$\delta_{1.14} / \text{mm}$	$\delta_{2.0} / \text{mm}$	$\delta_{0.76} / \text{mm}$	$\delta_{1.14} / \text{mm}$	$\delta_{2.0} / \text{mm}$
1 000 \times 1 000 \times 6	3.708	3.624	3.444	3.170	3.200	3.225
1 000 \times 1 000 \times 15	0.252	0.250	0.245	0.210	0.211	0.212
1 500 \times 1 000 \times 6	14.99	14.66	13.89	5.939	6.014	6.078
1 500 \times 1 000 \times 15	1.031	1.022	0.997	0.395	0.398	0.400

规律与点支承玻璃不同. 但在相同荷载水平下, 其总变形比点支承玻璃小, 与相同条件的点支承玻璃变形的误差也随 PVB 厚度增大而变小. 这表明点支承玻璃的配件和特殊构造使 PVB 与玻璃能更好地共同工作, 而框支玻璃仅靠夹层的黏结作用阻止玻璃相对滑移, 玻璃和夹层共同工作性不如点支承好, 但框支约束本身能够更有效地减小玻璃的挠度.

从以上计算结果可以得知, PVB 的厚度变化对夹层玻璃的变形性能有一定影响, 其影响程度主要与玻璃的支承方式有关. 总体来说, 由于 PVB 厚度很薄, 在计算夹层玻璃的挠度时可以忽略夹层厚度的影响.

2. 2 玻璃板不等厚对整体变形性能的影响

我国现行规范^[1]中, 采用等效厚度方法将夹层玻璃看成单片玻璃进行分析的. 该等效厚度公式是根据承载性能的下限确定的, 没有考虑夹层的黏结作用. 文[3]中的等效厚度公式考虑了夹层黏结作用. 本文通过有限元方法, 分析内外层玻璃板不等厚对整体变形性能的影响, 并验证文[1, 3]中等效厚度公式正确性. 对于长期荷载, 夹层玻璃的变形可以采用承载性能的下限来计算; 而对于短期荷载, 需要按点支承和框支两种不同支承情况来考虑.

对于点支式夹层玻璃, 本文以几何尺寸($l \times b$)为 1 000 mm \times 1 000 mm, PVB 厚度为 0.76 mm, 受均布荷载为 2.2 kPa 的夹层玻璃为对象进行分析计算, 材料参数如表 1 所示. 内外层玻璃厚度变化和计算结果, 如表 3 所示. 表 3 中, t_{eq} 为本文算法, t_{eq1} , t_{eq2} 分别为相同条件下根据文[1, 3]中的等效厚度公式计算, t_{eq3} 为采用公式 $t_{eq} = \sqrt[3]{t_1^3 + t_2^3 + 0.3(t_1 + t_2)^3}$ 的计算结果. 从表 3 可以看出, 对于点支承夹层玻

表 3 玻璃厚度对玻璃变形性能的影响

Tab. 3 Influence of the thickness of glass ply on the deflection of laminated glass

t_1 / t_2	点支玻璃							框支玻璃				
	t_{eq} / mm	t_{eq1} / mm	与本文 误差 / %	t_{eq2} / mm	与本文 误差 / %	t_{eq3} / mm	与本文 误差 / %	t_{eq} / mm	t_{eq1} / mm	与本文 误差 / %	t_{eq2} / mm	与本文 误差 / %
6 / 10	1.438	3.059	112.7	1.828	27.1	1.522	5.8	1.146	1.165	1.7	0.696	- 39.3
10 / 6	1.438	3.059	112.7	1.828	27.1	1.522	5.8	1.146	1.165	1.7	0.696	- 39.3
8 / 10	1.107	2.460	122.3	1.389	25.5	1.141	3.0	0.922	0.937	1.6	0.529	- 42.6
10 / 10	0.832	1.860	123.6	1.033	24.2	0.845	1.6	0.699	0.708	1.3	0.394	- 43.7
10 / 15	0.402	0.850	111.5	0.496	23.4	0.410	2.1	0.323	0.324	0.2	0.189	- 41.5
12 / 15	0.336	0.729	117.0	0.412	22.5	0.338	0.6	0.277	0.278	0.2	0.157	- 43.4
15 / 15	0.252	0.551	118.7	0.306	21.5	0.251	- 0.6	0.210	0.210	- 0.1	0.117	- 44.5

璃, 不同厚度的内外层玻璃板调换位置不影响其整体变形性能. 这也从另一个方面证明本文建模的可靠性. 采用文[1]等效厚度公式计算结果比本文大 111% 以上, 计算结果不可用. 采用文[3]等效厚度公式计算的挠度与本文结果比较接近, 两者相差不超过 30%, 计算结果可用但不够精确. 建议采用式 $t_{eq} =$

$\sqrt[3]{t_1^3 + t_2^3 + 0.3(t_1 + t_2)^3}$ 计算点支承玻璃的等效厚度. 采用该式计算结果与有限元计算结果符合很好.

两者误差不超过 ±6%, 精度好.

分析计算材料参数和内外层玻璃厚度变化同点支玻璃, 仅将支承条件改为框支, 计算结果如表 3 所示. 从表 3 结果可以看出, 对于等厚度的框支夹层玻璃, 采用文[1] 等效厚度公式计算的挠度与本文计算结果相当吻合, 误差不超过 2%. 表明规范公式可用于计算框支夹层玻璃的等效厚度, 并有较好的精度. 同时说明在框支承条件下, 夹层玻璃受力与其承载下限接近, 夹层的黏结作用很小, 其工作性能与点支承条件不同. 这也从另一方面证明支承条件不同影响 PVB 的工作性能. 采用文[3] 等效厚度公式计算的挠度则比本文结果小 39% 以上, 该式高估了 PVB 的黏结作用. 按文[3] 等效厚度公式进行框支式夹层玻璃的设计将不安全. 由此可见, 文[1] 的规范公式仅适用于框支夹层玻璃的变形计算, 而文[3] 等效厚度公式适用于点支夹层玻璃的变形计算, 且精度不够高.

综上所述, 计算夹层玻璃在静力荷载作用下的变形时, 可以忽略夹层厚度对玻璃整体变形的影响. 不论夹层玻璃是点支承还是框支, 玻璃的等效厚度为

$$t_{eq} = \sqrt[3]{1 + t_2^3 + \eta(t_1 + t_2)^3}.$$

式中, η 为夹层玻璃的支承条件修正系数. 当点支承时, 取 $\eta= 0. 3$; 而当框支承时, 取 $\eta= 0$.

3 夹层玻璃在冲击荷载下的变形性能

由于 PVB 夹层的黏结作用, 夹层玻璃常用作防爆玻璃. 但由于爆炸作用的瞬时性下冲击荷载持续时间极短, PVB 的力学性能与其在静力荷载作用不同, 因此, 夹层玻璃在冲击荷载的变形不能按静力荷载计算, 必须考虑荷载的冲击效应. 根据经典板壳动力理论, 夹层玻璃在爆炸冲击荷载下的挠度为

$$\delta = \alpha_d \delta_i \Delta_{pf}.$$

上式中, Δ_{pf} 为爆炸冲击波超压, 因为玻璃板面积较小, 常将作用在玻璃上的冲击波视为均布荷载考虑; δ 为夹层玻璃在爆炸冲击荷载下的挠度; δ_i 为夹层玻璃在单位等效均布静力荷载下的挠度, 与夹层玻璃的支承形式、玻璃板及夹层等参数有关, 与冲击波无关; α_d 为动力放大系数, 与玻璃固有频率及荷载持续时间有关, 求解较复杂. 限于篇幅, 动力放大系数的理论推导及求解另文介绍, 但为了和相同荷载水平的静力荷载下的挠度作比较, 本文将爆炸冲击荷载视为线性衰减的三角形脉冲荷载, 并参考文[7], 取 α_d 的最大值为 1. 76.

对于爆炸冲击荷载作用, 本文仍按点支和框支两种不同支承情况进行分析. 考虑爆炸荷载的瞬时性, PVB 夹层的材料参数按出厂值选取, 其他参数不变. 为方便与静力荷载

表 4 夹层玻璃在冲击荷载下的变形

Tab. 4 Deflection of laminated glass under impact load

t_1/t_2	点支玻璃		框支玻璃	
	本文结果	与静力荷载下挠度比较/ %	本文结果	与静力荷载下挠度比较/ %
6/ 10	1. 172	- 18. 50	0. 560	- 51. 13
8/ 10	0. 832	- 24. 84	0. 400	- 56. 62
10/ 10	0. 614	- 26. 20	0. 296	- 57. 65
10/ 15	0. 324	- 19. 40	0. 157	- 51. 39
12/ 15	0. 259	- 22. 92	0. 125	- 54. 87
15/ 15	0. 190	- 24. 60	0. 093	- 55. 71

下, 夹层玻璃在冲击荷载下的挠度比普通静力荷载小. 即对于点支玻璃, 其挠度减小 18% 以上, 而对于框支玻璃, 挠度减小 51% 以上, 框支玻璃比点支玻璃的挠度减小幅度大. 由于本文动力放大系数取最大值, 所以实际情况下的挠度比本文结果小, 实际减小幅度会更大. 表明在冲击荷载下, 由于荷载持续时间极短, 夹层的黏结作用比其在短期荷载下要强, 整体抗弯刚度增大. 相同荷载水平下, 框支玻璃的挠度比点支玻璃的小, 其抗弯刚度增加比例较大, 这也说明框支玻璃的抗爆性能要比点支玻璃好.

4 结论

PVB 夹层玻璃作为一种安全玻璃, 在防爆建筑和非防爆建筑中都得到大量使用, 但目前国内相关

研究不能满足工程需要. 本文根据夹层玻璃使用环境的不同将其分 3 种情况(受短、长期静力荷载及冲击荷载)考虑, 通过有限元方法分析其在各种情况下的变形性能, 得出以下 4 个结论.

(1) 夹层玻璃在长期受荷情况下, PVB 夹层的黏结作用很小, 可以忽略不计, PVB 厚度变化不影响其整体变形性能, 计算其在静力荷载下的变形时可以采用下限公式. 这也从另一方面说明夹层玻璃用作防爆玻璃之用时不能使其长期受荷.

(2) 夹层玻璃在短期荷载作用下, PVB 夹层的粘结作用不能被忽略, PVB 的厚度变化对夹层玻璃的变形性能有一定影响, 其影响程度主要与玻璃的支承方式有关. 但总体来说, 由于 PVB 厚度很薄, 在计算夹层玻璃的挠度时可以忽略夹层厚度的影响.

(3) 夹层玻璃在短期荷载作用下, 不同厚度的内外层玻璃板调换位置不影响其整体变形性能. 点支承和框支承夹层玻璃变形的等效厚度可按本文提出的通用公式计算.

(4) 在相同荷载水平下, 夹层玻璃在冲击荷载下的挠度比静力荷载下的挠度小, 其在冲击荷载下的抗弯刚度较之在静力荷载下有较大提高, 而框支玻璃的抗弯刚度提高比例更大, 框支玻璃的抗爆性能要比点支玻璃好.

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 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.
- [2] 董 聪. 点支承夹层玻璃的抗弯性能研究[J]. 工程力学, 2003(S1): 484-486.
- [3] 赵西安. 点支式玻璃幕墙设计[J]. 建筑技术, 1999, 30(9): 610-613.
- [4] 张其林, 殷永伟, 黄庆文. 点支式幕墙夹层玻璃承载性能的试验研究[J]. 结构工程师, 2003(3): 76-81.
- [5] 邹 宇, 石永久, 王元清, 等. 金属紧固件和垫层材料对点式支承玻璃板承载性能的影响分析[J]. 建筑结构, 2001, 31(12): 55-57.
- [6] WEI J, DHARANI L R. Response of laminated architectural glazing subjected to blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006(32): 2032-2047.
- [7] 克拉夫 R W, 彭 津 J. 结构动力学[M]. 王光远, 等译. 北京: 科学出版社, 1981: 1-64.

Deflection Behavior of Laminated Glass Under Static and Impact Load

GAO Xuan-neng¹, WANG Shu-peng²

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, China)

Abstract: The finite element model is used to simulate the deflection behavior of laminated glass with different thickness under short-term or long-term static load, and impact load, the calculation results conform well to the experimental data in references. Further study shows that the main factors affecting the deformation properties of laminated glass, are load type, load duration, support condition and glass ply. The flexural stiffness of laminated glass under blast load is larger than that under static load, and the performance of blast resistance of frame-supported glass is better than that of point-supported glass. According to the simulation, the equivalent thickness formula in current code is amended. The suggested formula is applicable for different support conditions.

Keywords: laminated glass; deflection behavior; equivalent thickness; impact load; finite element model

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)