

面板和PVB夹胶层厚度对单元式玻璃幕墙承载性能影响

张博¹, 周奎¹, 刘怡然¹, 王红生²

¹上海理工大学, 上海

²上海中铭建设发展有限公司, 上海

收稿日期: 2022年10月29日; 录用日期: 2022年11月23日; 发布日期: 2022年11月30日

摘要

中国已成为世界第一大幕墙生产国和使用国, 然而由幕墙引发的安全事故时有发生, 玻璃面板是超高层建筑幕墙结构在风荷载作用下最可能出现破坏的构件。在幕墙建造阶段选取承载性能良好的玻璃面板可以有效优化成本。本文以某超高层建筑玻璃幕墙为背景, 通过构建单元式中空夹胶玻璃幕墙整体体系的有限元模型, 分析玻璃厚度和聚乙烯醇缩丁醛(polyvinyl butyral, PVB)夹胶层厚度对玻璃面板应力的影响。研究表明, 在一定范围内, 随着玻璃厚度增加, 该层玻璃的应力增加, 挠度减小, 其他层玻璃应力减小; PVB夹胶层增加时, 各层玻璃的应力和挠度有微小增加。

关键词

中空夹胶玻璃幕墙, 玻璃厚度, PVB夹胶层厚度, 受力性能

Effect of Glass Panel and PVB Thickness on Bearing Capacity of Unit Curtain Wall

Bo Zhang¹, Kui Zhou¹, Yiran Liu¹, Hongsheng Wang²

¹University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Zhongming Construction Development Co., Ltd., Shanghai

Received: Oct. 29th, 2022; accepted: Nov. 23rd, 2022; published: Nov. 30th, 2022

Abstract

China has become the largest producer and customer of curtain wall in the world, but safety acci-

dents caused by curtain wall structure often occur. Selecting curtain wall with better strength during curtain wall construction stage can avoid accident risk effectively. This paper selects the curtain wall structure of a super high-rise building in Uzbekistan, and analyzes the influence of glass thickness and polyvinyl butyral (PVB) layer thickness on the stress of the glass curtain wall by constructing the finite element model of the whole system of the unit hollow laminated glass curtain wall. The results show that in a certain range, with the increase of glass thickness, the stress of this layer increases, the deflection decreases, and the stress of other layers decreases. When the PVB layer is increased, the stress and deflection of each layer of glass are slightly increased.

Keywords

Laminated Insulating Glass Curtain Wall, Glass Thickness, PVB Adhesive Layer Thickness, Mechanical Performance

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着建筑功能需求的提高,现代建筑中高大立面幕墙的应用越来越多[1]。然而我国建筑幕墙行业标准化工作仍有一些薄弱环节存在,近几年建筑玻璃幕墙结构在正常使用过程中时有发生玻璃面板损毁、坠落等安全事故。目前,幕墙结构相关研究大多针对玻璃面板、龙骨结构、结构胶等单方面的研究,通过提高单个构件的受力性能,从而保障幕墙体系的安全性。

陶志熊[2]等对四边简支夹层玻璃受弯承载力进行试验研究,分析聚乙烯醇缩丁醛(PVB)胶片的厚度对其承载能力的影响。刘强等[3]通过对夹层玻璃梁试件的受弯试验和试件整体稳定的有限元模拟分析,研究了不同夹层玻璃梁在无侧向支撑条件下的弯曲性能与整体稳定性能。张宗恒等[4]通过落锤试验,得到不同冲击能量下夹层玻璃的破坏模式,分析了玻璃厚度以及 PVB 夹层厚度对夹层玻璃抗冲击性能的影响。邓汉国等[5]研究了承受静态均布横向荷载的 PVB 夹层玻璃板的力学响应。苏铜军[6]采用非线性有限元法模拟出框支幕墙铝合金立柱的应力和挠度分布规律,并研究了立柱插芯长度对其受力性能的影响。

研究表明[7],幕墙各构件之间的相互作用可以提高幕墙的承载性能。尤其是单元式幕墙,是在工厂预制完成的,由面板和支承结构组成的完整独立的结构系统,相对于主体结构有足够的位移能力。因此,在单元式幕墙结构整体体系中,分析幕墙建造阶段各因素对其受力性能的影响,可以有效优化成本,规避风险。

2. 单元式幕墙结构的计算

2.1. 中空夹胶玻璃幕墙受力性能

中空夹胶玻璃一般有三块玻璃组成,外片玻璃与中片玻璃之间设置聚乙烯醇缩丁醛树脂(Polyvinyl Butyral, 简称为 PVB)夹胶层,中片玻璃与内片玻璃之间设置空气层,兼顾安全和保温性能。依据规范[8],玻璃的材料属性如表 1 所示。

PVB 胶片本构复杂,力学行为受胶层厚度、温度、加载时间等影响重大,力学性能参数难以选取。依据陶志雄[9] PVB 胶片剪切试验,本文依据实际工程情况,取 PVB 胶片的剪切模量为 1.1 MPa,泊松比为 0.49。

Table 1. Material properties of glass
表 1. 玻璃的材料属性

玻璃种类	钢化玻璃
弹性模量 E /(MPa)	7.2×10^4
泊松比 ν	0.20
重力密度 γ_g /(kN/m ³)	25.6×10^4
强度设计值 σ_g /(MPa)	84

中空夹胶玻璃的空气层可以传递垂直于玻璃面板表面的荷载，但不能阻止内片玻璃与中片玻璃之间的相对滑移，鉴于此特性，本文在两片玻璃间均匀设置弹簧来模拟空气层的压缩行为，弹簧单元的弹性模量由式(1)和式(2)计算[10]。

$$K = nk = \frac{(P_0 + P_i)A}{d_0} \quad (1)$$

$$P_i = P_s \frac{t_2^3}{t_1^3 + t_2^3} \quad (2)$$

式中， K 为弹簧单元的总弹性模量； k 为假设各处压缩性一致，每个弹簧的弹性模量； P_i 为 1 个标准大气压； A 为玻璃面板的面积； d_0 为空气层的初始厚度； P_i 为内片玻璃上的分配的外荷载由式计算； P_s 为外荷载； t 为玻璃厚度。

2.2. 有限元计算模型

本文选用 soild45 单元模拟玻璃材料和 PVB 夹胶材料。采用 combin14 单元模拟空气层，经计算，在中片玻璃和内片玻璃之间均匀设置 231 个 combin14 弹簧单元来模拟空气层的压缩行为，每个弹簧单元的刚度 $k = 164$ N/mm。采用 beam188 单元模拟幕墙的支承结构。幕墙玻璃面板规格为 6 mm + 1.52 PVB + 6 mm + 12 Air + 10 mm。单元式幕墙相邻板块间通过立柱及横梁插接连接，幕墙结构与主体结构之间通过

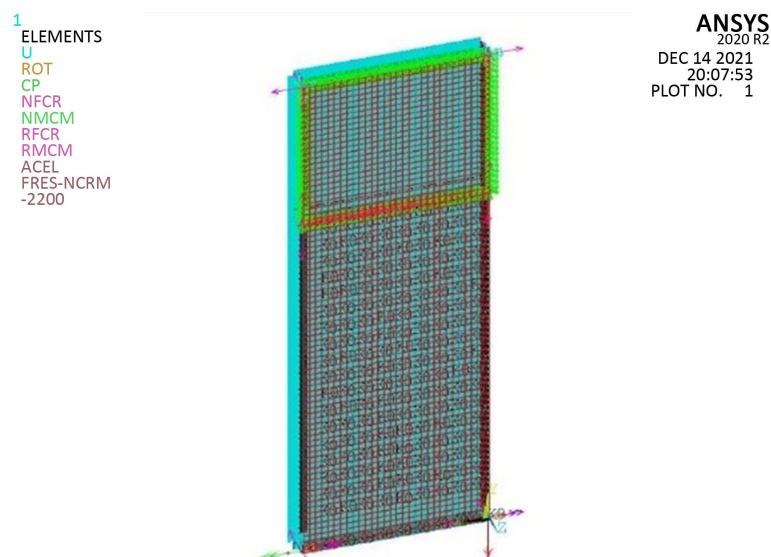


Figure 1. Analysis model of overall curtain wall system structure
图 1. 幕墙整体体系结构分析模型

挂件连接, 因此约束立柱结构 X、Y 方向的平动位移, 释放 Z 方向位移, 以满足幕墙相对主体结构有一定变形能力的要求。根据陶志雄[9]的试验结果, 约束中空夹胶玻璃短边 x、z 方向的平动位移, 约束长边 y、z 方向的平动位移。依据上述条件, 建立有限元模型如图 1 所示。

2.3. 有限元计算与规范对比

有限元计算所得玻璃面板最大应力和位移与规范对比如图 2 和图 3 所示。由于各构件之间的相互作用可以提高幕墙的承载力, 使有限元计算小于规范公式计算结果, 但差值在合理范围内。

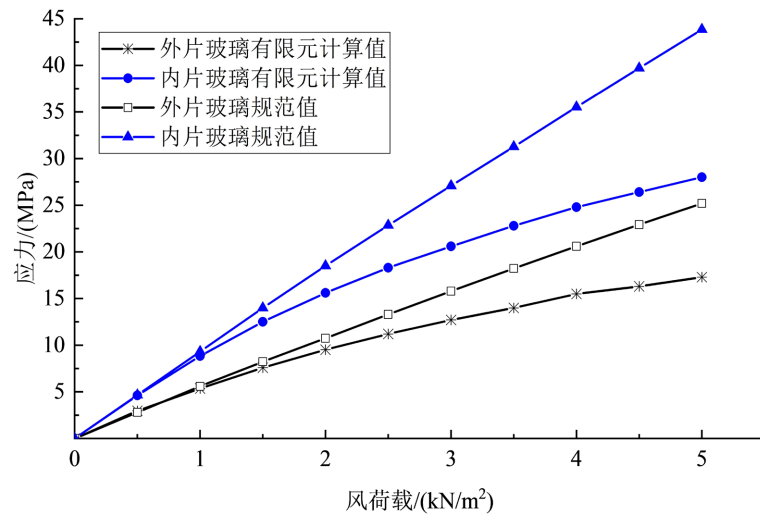


Figure 2. Maximum stress contrast diagram

图 2. 最大应力对比图

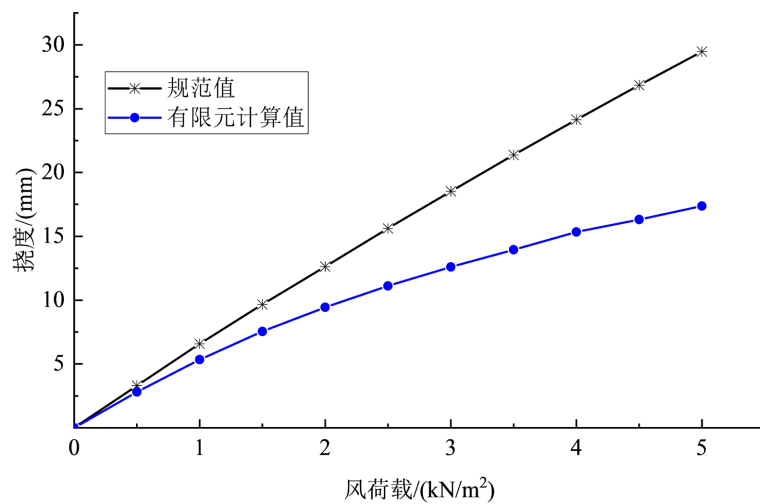


Figure 3. Comparison chart of maximum deflection

图 3. 最大挠度对比图

3. 受力性能影响因素分析

3.1. 玻璃厚度

本节选取表 2 所示的有限元分析试件, 研究玻璃厚度对玻璃幕墙抗风性能的影响。试件在均布风荷载的作用下, L1 及 LG1~LG5 中空夹胶玻璃外片、中片和内片玻璃的板心最大应力和挠度如图 4~7 所示。

Table 2. Material properties of glass
表 2. 玻璃的材料属性

编号	外片(mm)	PVB (mm)	中片(mm)	中空(mm)	内片(mm)
L1	6	1.52	6	12	10
LG1	8	1.52	6	12	10
LG2	6	1.52	8	12	10
LG3	8	1.52	8	12	10
LG4	6	1.52	6	12	12
LG5	8	1.52	8	12	12

从图 4~6 中可以看出, 其他条件相同的情况下, 外片和中片玻璃厚度增加, 会使本片玻璃板心最大应力随之增加, 另两片玻璃的板心最大应力减小, 且荷载越大, 应力差值越来越大。而当内片玻璃厚度增加时, 各层玻璃板心应力均减小。外片和中片玻璃应力减小程度较大, 内片玻璃应力减小程度较小, 且荷载越大, 玻璃板心应力差值越来越小。可以看出, 当玻璃厚度增加时, 其弯曲刚度增加, 承受的荷载会增大, 从而使得应力增大。但当承受荷载一定时, 玻璃厚度越大应力越小, 所以虽然 LG4 试件内片玻璃厚度大于 L1 试件, 但内片玻璃板心应力小于 L1 试件。

由于各层玻璃板心最大挠度相差较小, 因此取最大挠度平均值, 各试件板心最大挠度平均值如图 7 所示。从图中可以看出, 各层玻璃厚度增加时, 玻璃板心最大挠度均有所下降。LG1 试件和 LG2 试件的最大挠度平均值几乎相同, 与 L1 的差值在 7%~13%, LG3 试件与 L1 的差值在 13%~23%, LG4 较 LG1~LG3 试件挠度值更小, 与 L1 的差值在 17%~29%, 说明内片玻璃厚度增加对降低玻璃挠度, 提高玻璃抗弯性能的作用程度更大。

3.2. PVB 夹胶层厚度

本节选取表 3 所示的有限元分析试件, 研究 PVB 夹胶层厚度对玻璃面板抗风性能的影响。试件在均布风荷载的作用下, L1 及 LP1~LP3 中空夹胶玻璃外片、中片和内片玻璃的板心最大应力和挠度如图 8~11 所示。

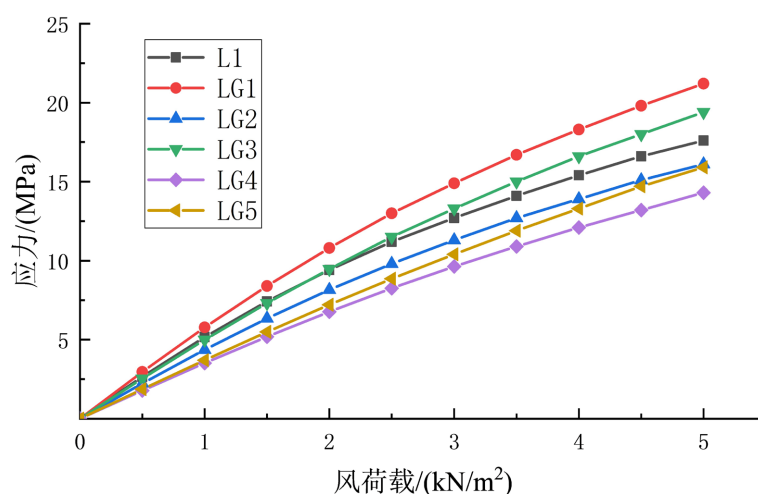


Figure 4. Maximum stress in the core of outer glass plate with different glass thickness

图 4. 不同玻璃厚度下外片玻璃板心最大应力

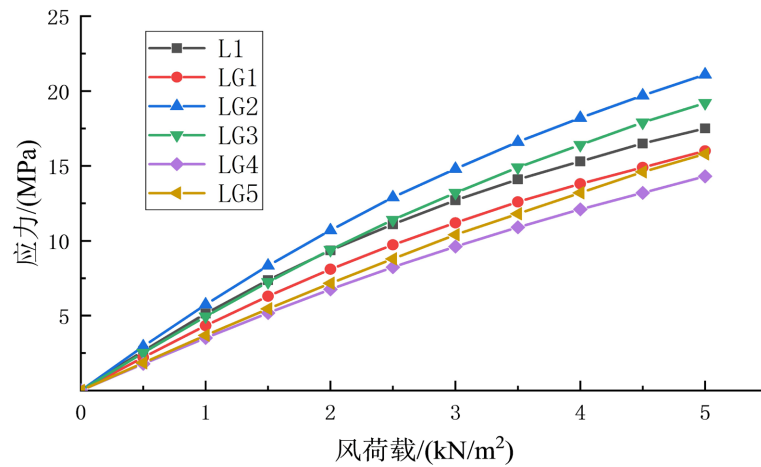


Figure 5. Maximum stress in the core of medium glass plate with different glass thickness

图 5. 不同玻璃厚度下中片玻璃板心最大应力

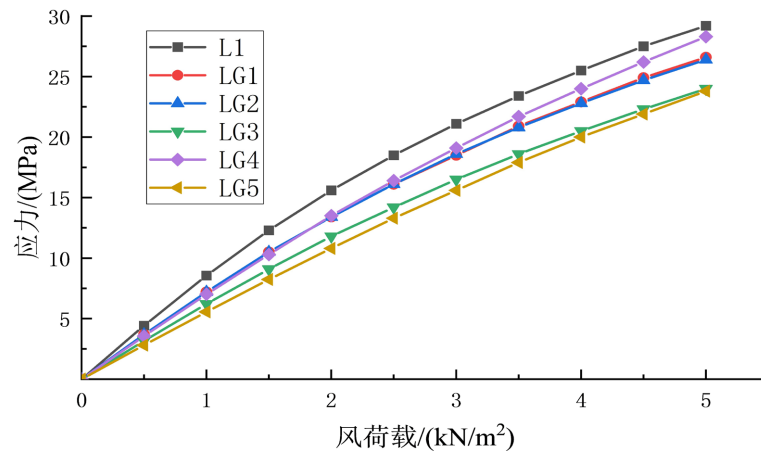


Figure 6. Maximum stress of inner glass plate core under different glass thicknesses

图 6. 不同玻璃厚度下内片玻璃板心最大应力

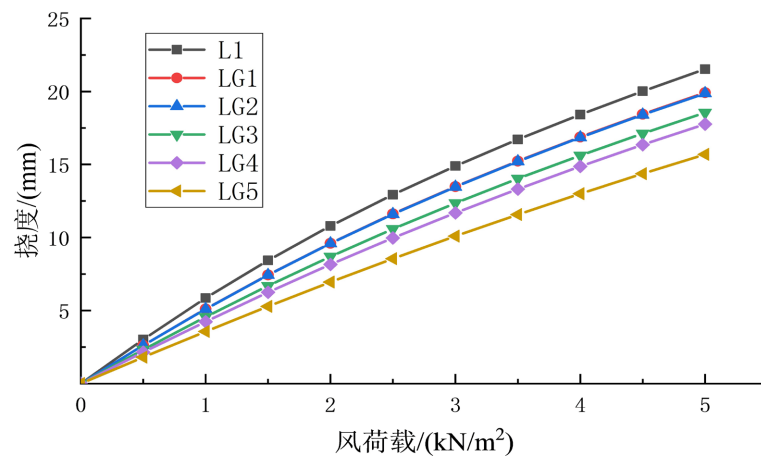


Figure 7. Average value of maximum deflection of glass plate core under different glass thicknesses

图 7. 不同玻璃厚度下玻璃板心最大挠度平均值

Table 3. Thickness change of adhesive layer of test piece
表 3. 试件夹胶层厚度变化

编号	外片(mm)	PVB (mm)	中片(mm)	中空(mm)	内片(mm)
LP1	6	0.76	6	12	10
LP2	6	1.14	6	12	10
L1	6	1.52	6	12	10
LP3	6	1.90	6	12	10

从图 8~10 中可以看出, PVB 夹胶层厚度增加时, 各层玻璃的板心最大应力随之增加。外片玻璃和内片玻璃应力增大幅度较小, 中片玻璃增幅较大, LP3、L1 试件应力差值为 2.7%~15.8%, LP1、LP2 试件应力差值为 11.8%~25%。可见 PVB 夹胶层厚度越大, 对玻璃强度影响越小。

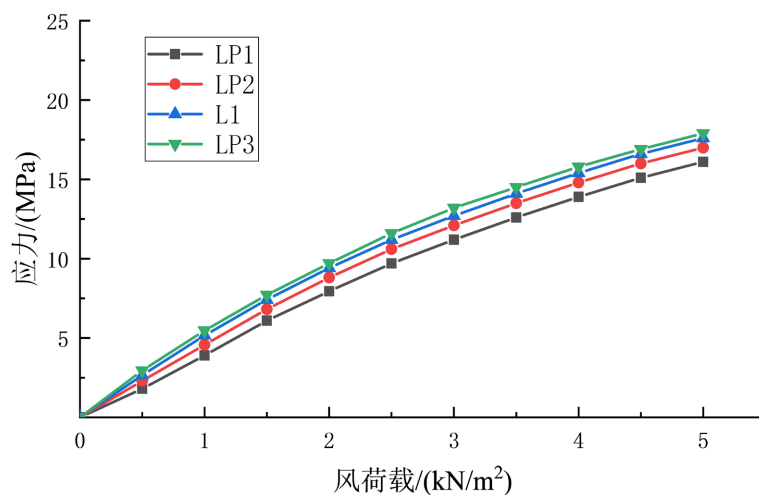


Figure 8. Maximum stress in the core of outer glass plate with different PVB sandwich thickness

图 8. 不同 PVB 夹胶厚度下外片玻璃板心最大应力

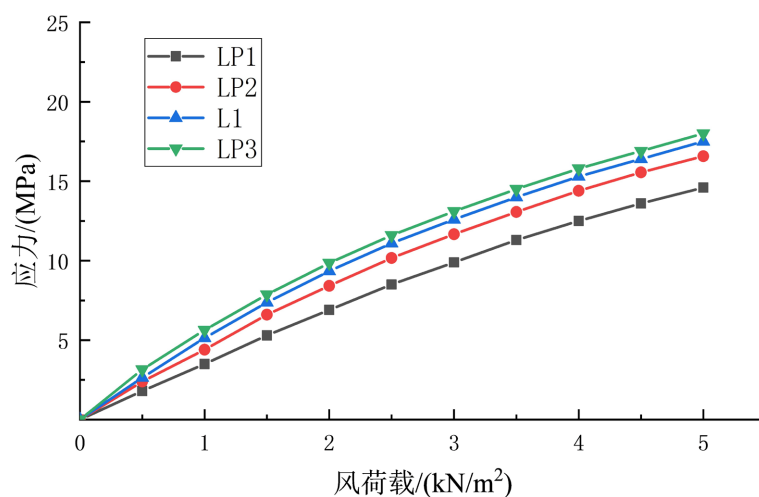


Figure 9. Maximum stress in the core of medium glass plate with different PVB sandwich thickness

图 9. 不同 PVB 夹胶厚度下中片玻璃板心最大应力

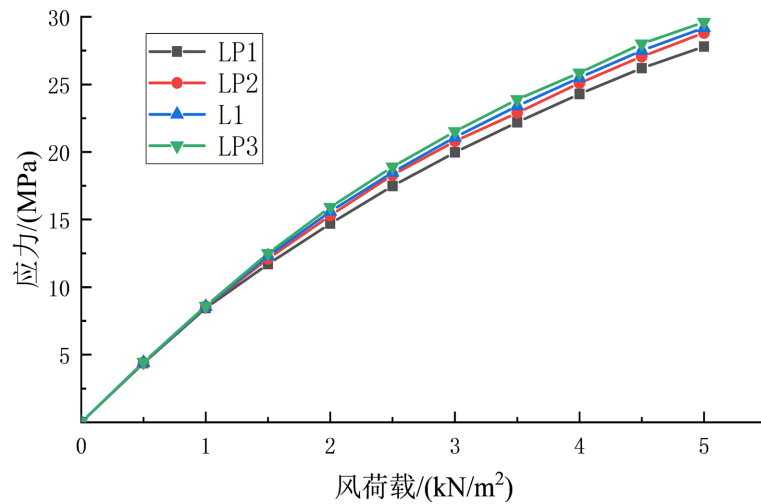


Figure 10. Maximum stress of inner glass plate core under different PVB sandwich thickness

图 10. 不同 PVB 夹胶厚度下内片玻璃板心最大应力

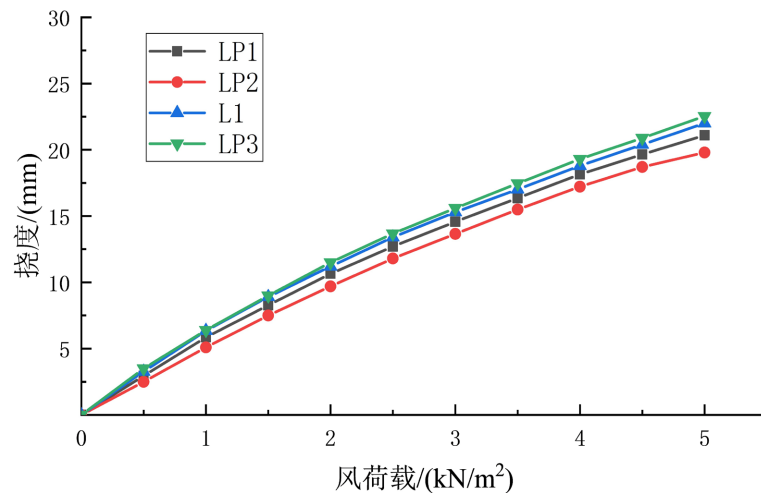


Figure 11. Average deflection of glass plate core under different PVB sandwich thickness

图 11. 不同 PVB 夹胶厚度下玻璃板心挠度平均值

从图 11 中可以看出, PVB 夹胶层厚度增加时, 玻璃板心最大挠度有所提高, 随着 PVB 夹胶层厚度, 玻璃板心最大挠度提升幅度逐渐减小。但整体来说, PVB 夹胶层厚度对玻璃挠度影响不大。实际应用中, 在满足承载力和构造条件的情况下, 结合玻璃平整度, 可以取 PVB 夹胶层最小厚度。

4. 结论

1) 整体体系有限元分析下的玻璃面板挠度与规范计算值产生 13.77% 的负偏差。可以反映出在整体体系中, 幕墙结构各构件的相互作用, 可以提高玻璃面板的强度和稳定性。

2) 当玻璃厚度在一定范围内增加时, 其弯曲刚度增加, 分配荷载增大, 使得该片玻璃应力增大, 剩余玻璃应力减小; 中空夹胶玻璃的挠度随玻璃厚度增加而降低, 且内片玻璃厚度变化对强度和挠度影响程度更大。

3) PVB 夹胶层对玻璃应力和挠度影响较小。当 PVB 夹胶层增加时, 各层玻璃的应力和挠度随之增

加, 即抗弯性能有所下降, 中片玻璃应力降幅最大。实际应用中, 在满足承载力和构造条件的情况下, 结合玻璃平整度, 可以取最小 PVB 夹胶层厚度。

参考文献

- [1] 周健, 杨笑天. 高大立面幕墙骨架结构设计研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(10): 110-117.
- [2] 陶志雄, 张其林, 陈俊, 陈峻, 谢步瀛. 四边简支夹层玻璃受弯承载力试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(10): 114-119.
- [3] 刘强, 黄小坤, 韩伟涛, 崔明哲, 付瑞佳. 夹层玻璃梁受弯性能研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(5): 44-49.
- [4] 张宗恒, 张红, 姚小虎, 胡浩峰. 低速冲击下 PVB 夹层玻璃的破坏模式试验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(S1): 113-119.
- [5] 邓汉国, 张红, 姚小虎. 考虑层间剪力的 PVB 夹层玻璃不等厚结构设计[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2113-2118.
- [6] 苏铜军, 肖建春, 赵勇, 等. 插芯长度对幕墙铝合金立柱受力性能影响分析[J]. 兰州工业学院学报, 2019, 26(1): 1-7.
- [7] Campione, G., Benfratello, S., Cucchiara, C. and Minafò, G. (2013) Flexural Behaviour of Glass Panels under Dead Load and Uniform Lateral Pressure. *Engineering Structures*, **49**, 664-670.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.12.027>
- [8] 中华人民共和国标准. 玻璃幕墙工程技术规范(JGJ102-2003) [S]. 北京: 建筑工业出版社, 2003.
- [9] 陶志雄, 张其林, 陈俊, 等. 夹层玻璃 PVB 胶片抗剪性能试验研究[J]. 结构工程师, 2011, 27(1): 134-138.
- [10] 马赢, 石永久, 王元清. 点支式中空玻璃板承载性能的有限差分法分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006(3): 305-308.