

支撑物对全钢化真空玻璃力学性能影响的数值模拟研究

袁朝阳, 胡东方, 刘亚楠

河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳

收稿日期: 2023年9月14日; 录用日期: 2023年10月26日; 发布日期: 2023年11月1日

摘要

全钢化真空玻璃是一种绿色安全玻璃, 广泛应用于建筑领域。为了确保其在使用中的安全性, 研究支撑物对其力学性能的影响十分必要。通过建立力学模型, 运用ANSYS Workbench软件进行模拟仿真, 分析了不同形状和布放间距下支撑物对全钢化真空玻璃力学性能的影响。研究表明: 全钢化真空玻璃变形量和最大Mises应力与支撑物布放间距呈正相关, 而采用圆柱形或空心圆柱形支撑物的全钢化真空玻璃力学性能更佳。对于这三种支撑物, 最佳的布放间距分别为70 mm、80 mm和80 mm。该研究为全钢化真空玻璃的优化设计提供了理论依据。

关键词

全钢化真空玻璃, ANSYS Workbench, 支撑物, 力学性能

Numerical Simulation Research on the Influence of Pillar on Mechanical Properties of Fully Tempered Vacuum Glass

Zhaoyang Yuan, Dongfang Hu, Yanan Liu

School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

Received: Sep. 14th, 2023; accepted: Oct. 26th, 2023; published: Nov. 1st, 2023

Abstract

Full tempered vacuum glass is a green safety glass, which is widely used in the field of architecture. To ensure its safety during use, it is necessary to investigate the effect of pillar on its me-

chanical properties. By establishing a mechanical model, the impact of pillars with different shapes and placement distances on the mechanical properties of full tempered vacuum glass is analyzed. The results indicate that the deformation and maximum Mises stress are positively correlated with the spacing between pillars, and the mechanical properties of fully tempered vacuum glass with cylindrical or hollow cylindrical pillars are better. The optimal placement spacing for these three types of pillars is 70 mm, 80 mm, and 80 mm respectively. This study provides a theoretical basis for the optimal design of fully tempered vacuum glass.

Keywords

Fully Tempered Vacuum Glass, ANSYS Workbench, Pillar, Mechanical Properties

Copyright © 2023 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

全钢化真空玻璃具有隔音降噪、隔热保温、安全性较高等特点，在建筑领域得到了广泛的应用。由普通玻璃制成的真空玻璃强度低、易破碎，且破碎后的碎片带有锋利边缘易对人体造成伤害。对普通玻璃进行深加工，使其表面形成压应力，内部形成张应力，从而提高它的安全性，即钢化玻璃[1]。利用钢化玻璃制成的真空玻璃称为全钢化真空玻璃。全钢化真空玻璃不仅有更好的抗弯强度、抗冲击强度，且破碎后的碎片为钝角小颗粒，对人体造成伤害较小，是真空玻璃未来发展的趋势[2]。

支撑物的选用是提升全钢化真空玻璃安全性能的关键，因此选用正确的支撑物形状以及合理安排支撑物的布局至关重要。李彦兵等人[3]研究发现了对于 5 mm 的钢化真空玻璃，球形支撑物间距不大于 70 mm 时均满足钢化玻璃的力学性能。管长征等人[4]通过研究发现支撑物布放间距越大，钢化真空玻璃的隔热能力越强。许嘉文等人[5]通过研究发现支撑物高度对钢化真空玻璃的支撑应力和变形量影响不大。唐世萱等[6]通过试验发现，当钢化真空玻璃采用长条形吸气剂时，其安全性更高。刘小根等人[7]研究真空玻璃在不同情况下的应力分布特征，推导出真空玻璃最大弯曲拉应力的定量计算公式。李深厚等人[8]对真空玻璃的封接技术进行了研究，并认为阳级键合技术是未来的发展方向。蔡东等人[9]通过研究发现钢化真空玻璃支撑物缺位会使支撑应力变大。Wullschlegler 等人[10]研究了支撑物对钢化真空玻璃刚度和挠度的影响；Simko 等人[11]则研究了真空玻璃采用低温封接技术后会改变玻璃中应力的分布。

如今研究支撑物对全钢化真空玻璃力学性能的影响本就少，而且这些研究都是只关注同一种支撑物形状的影响。全钢化真空玻璃支撑物形状不同其力学性能也会有所差异，因此对其进行研究很有必要。本文通过建立全钢化真空玻璃模型，使用 ANSYS Workbench 软件进行仿真计算，分析了全钢化真空玻璃在支撑物形状和布放间距不同情况下的力学性能，并确定了不同形状支撑物的合理布放间距。该研究对全钢化真空玻璃的优化设计提供理论依据。

2. 全钢化真空玻璃结构分析

全钢化真空玻璃主要由钢化玻璃基片、支撑物、吸气剂、真空层、以及低温封接技术材料组成。支撑物按一定形状等间距的排列在两块钢化玻璃之间，避免两块钢化玻璃因为抽真空的原因导致过大的应

力和变形，真空层内放置有专用吸气剂，用以保证真空层长期有效，两块钢化玻璃周围用低温封接技术材料进行封接，以保证在封接时避免高温使钢化玻璃退钢化[12]。全钢化真空玻璃的结构如图1所示。

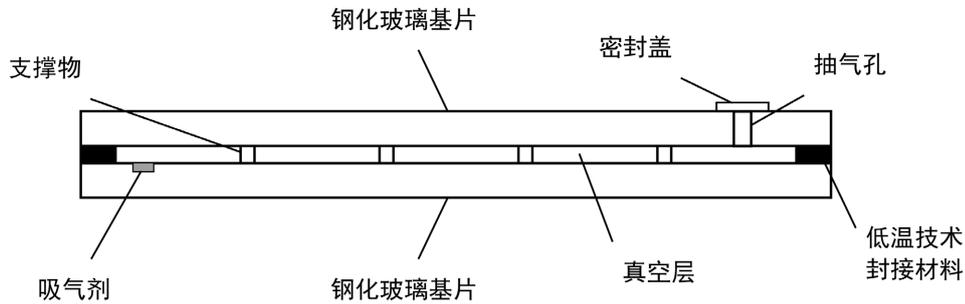


Figure 1. Structure diagram of fully tempered vacuum glass
图1. 全钢化真空玻璃结构示意图

支撑物需要按一定的排布方式进行布放，以防止钢化玻璃基片受力不均，导致破碎。全钢化真空玻璃支撑物排布方式一般为正方形。支撑物形状不同的全钢化真空玻璃产生的应力和变形也有所差异。常见的支撑物形状如图2所示。

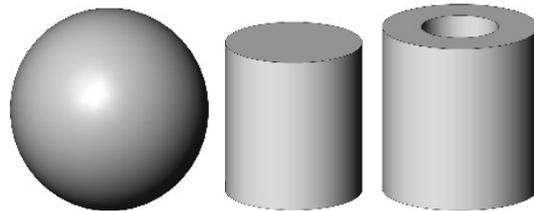


Figure 2. Common pillar shape
图2. 常见的支撑物形状

3. 大气压作用下全钢化真空玻璃应力研究

支撑物在大气压的作用下会与玻璃基片产生不可忽视的应力，如图3所示。

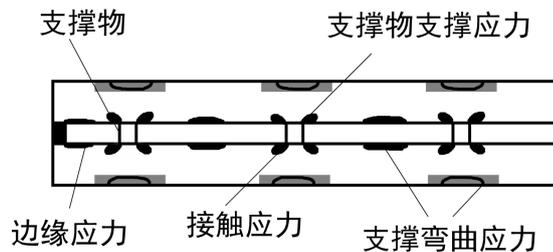


Figure 3. Stress distribution of fully toughened vacuum glass under atmospheric pressure
图3. 在大气压作用下全钢化真空玻璃应力分布示意图

全钢化真空玻璃内部的支撑物布放间距相等，形状规则，故各单元具有相同性。为计算玻璃基片产生的最大应力，方法以其中一个支撑点为中心，取一个边长为布放间距一半的正方形单元，由于钢化玻璃基片的厚度远小于支撑物布放间距，故可将其看作为垂直均布载荷和集中载荷作用下的薄板弯曲问题。各单元呈对称性，且边界处的转角角度为零，大气压和支撑物对钢化玻璃基片的作用力大小相等、方向相反，单位范围内不存在剪力，但存在弯矩，因此将边界作为夹支梁处理。示意图如图4所示。

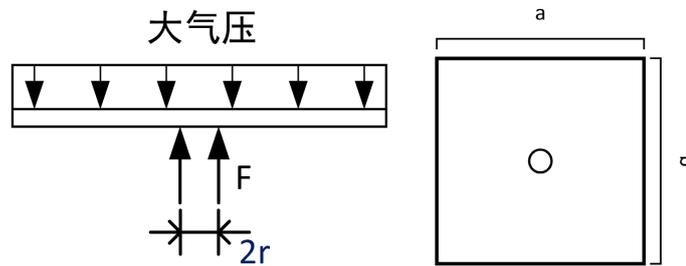


Figure 4. Force diagram of fully tempered vacuum glass unit model
图 4. 全钢化真空玻璃单元模型受力示意图

在支撑力 F 和大气压力 q_0 的作用下，支撑物与玻璃基片接触的上表面将会产生最大的叠加应力，计算公式如下[13]：

$$\sigma_{\max} = \frac{3F}{2\pi h^2} \left[(1+\nu) \ln \frac{2a}{\sqrt{1.6r^2 + h^2} - 0.675h} + \beta \right] - \beta_1 \frac{q_0 b^2}{h^2} \quad (1)$$

式中： σ_{\max} ——最大叠加应力；

F ——支撑物对玻璃基片的支撑力，且 $F = q_0 ab$ ；

ν ——钢化玻璃的泊松比；

r ——支撑物半径；

h ——钢化玻璃基片的厚度；

β 、 β_1 ——矩形板中部作用圆形区域载荷时的系数、矩形板作用均布载荷时的系数。因为所取单位区域为正方形，即 $a/b=1$ ，此时 $\beta = -0.238$ ， $\beta_1 = 0.1386$ [14]。

根据 GB15763.2《建筑用安全玻璃》[15]标准，钢化玻璃表面应力不低于 90 MPa，同时考虑玻璃基片变形过大会导致真空层失效，因此全钢化真空玻璃产生的最大 Mises 应力应小于 90 MPa，玻璃基片的最大变形量应小于真空层厚度的一半。

4. 全钢化真空玻璃力学性能仿真分析

4.1. 基本假设

建立全钢化真空玻璃模型时，作出基本假设：

1) 边界无位移假设。因为全钢化真空玻璃在现实中使用，四周常常会被固定在边框上，因此在仿真模拟时四周设置为固定约束，可认为边界无位移。

2) 刚性支撑假设。支撑物材料为 304 不锈钢，弹性模量为 193 GPa，钢化玻璃弹性模量为 72 GPa。由于钢化玻璃的弹性模量远小于支撑物的弹性模量，在外力作用下，接触部位支撑物变形远小于钢化玻璃变形，因此可认为是刚性支撑。

3) 弹性体假设。在实际使用中，全钢化真空玻璃在没有超出最大极限承载载荷时，表现为弹性特征，超过时表现为脆性特征。因此在仿真模拟中如果全钢化真空玻璃变形量和受到的最大 Mises 应力超过规定的最大值就认为全钢化真空玻璃破碎，如果不超过就认为其具有理想弹性的性质。

4.2. 参数设定

全钢化真空玻璃结构规则且成对称性，为了让数值仿真的效率更高，可以对全钢化真空玻璃的模型进行简化，具体参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters of fully tempered vacuum glass
表 1. 全钢化真空玻璃各参数

类型	参数
钢化玻璃基片长度、宽度/mm	500
钢化玻璃基片厚度/mm	5
钢化玻璃基片密度 kg/m^3	2500
钢化玻璃基片弹性模量/GPa	72
钢化玻璃基片泊松比	0.24
真空层厚度/mm	0.3
支撑物材料	304 不锈钢
支撑物形状	球形、圆柱形、空心圆柱形
支撑物排列方式	正方形
支撑物布放间距/mm	60、70、80、90
封接材料宽度/mm	7

4.3. 数值模拟结果与分析

在仅受到大气压力和支撑物的作用下，对球形、圆柱形及空心圆柱形的支撑物所对应的全钢化真空玻璃进行了研究。在布放形状为正方形、布放间距分别为 60、70、80、90 mm 的条件下，我们运用了 ANSYS Workbench 软件进行模拟仿真。以空心圆柱形的支撑物为例，图 5 和图 6 展示了在不同布放间距下的 Mises 应力和变形量的模拟结果。

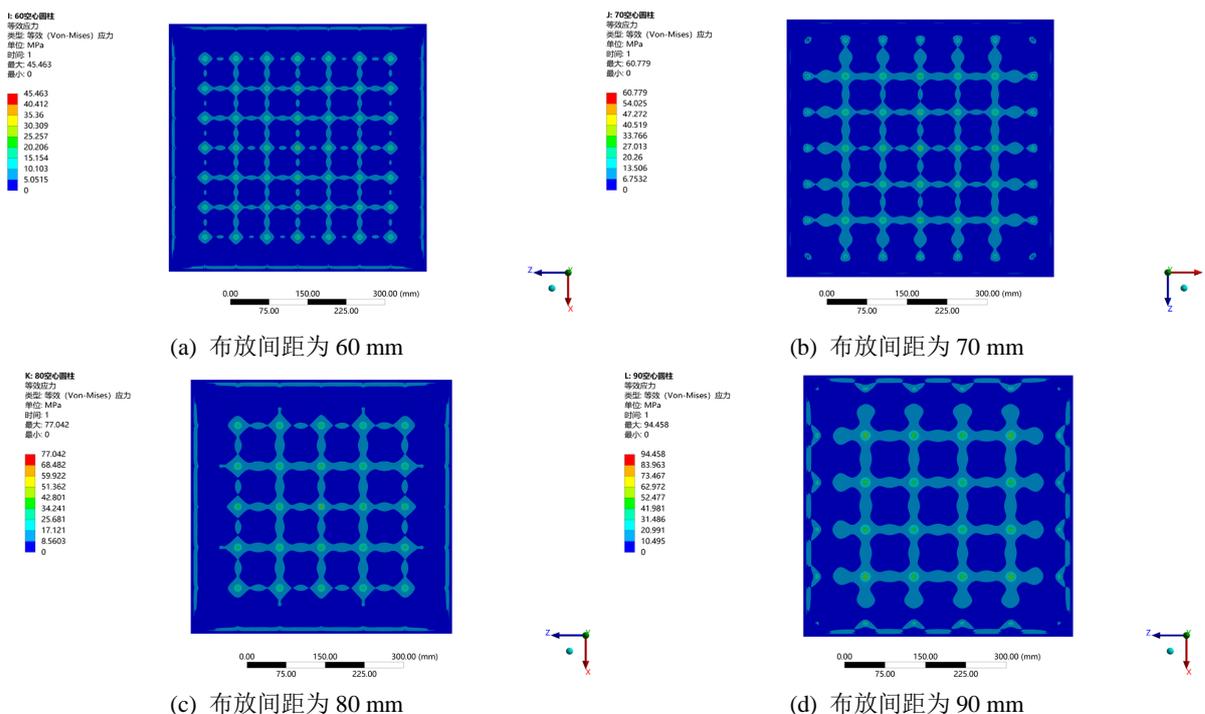


Figure 5. Effect diagram of different spacing of hollow cylindrical pillar
图 5. 空心圆柱形支撑物不同布放间距 Mises 应力图

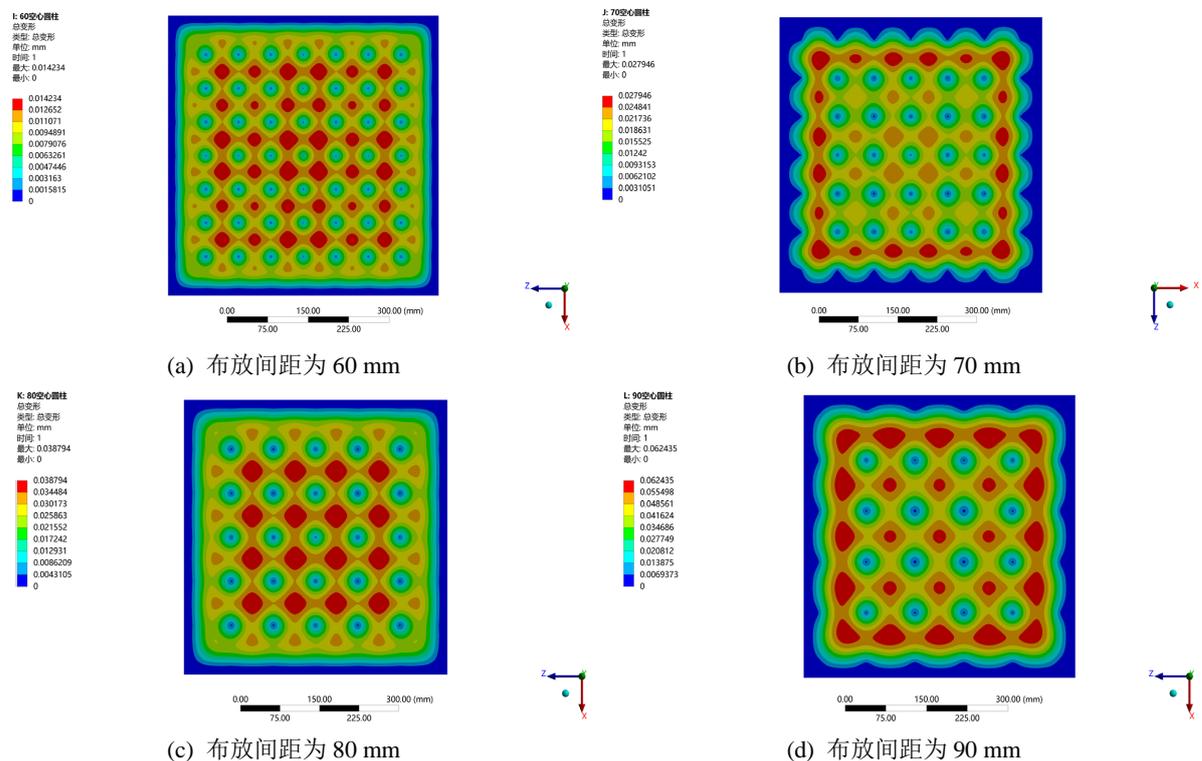


Figure 6. Total deformation diagram of hollow cylindrical pillar with different spacing

图 6. 空心圆柱形支撑物不同布放间距总变形图

由图 5 可知, 支撑物为空心圆柱形的全钢化真空玻璃在大气压力和支撑物支撑力的作用下其最大 Mises 应力随着布放间距增大而增大, 且 Mises 应力最大的区域为各个空心圆柱形支撑物与钢化玻璃基片的接触位置。这是因为当支撑物的间距增大时, 支撑物所提供的支撑力会分散到更大的面积上, 这就导致单位面积上所承受的支撑力减小。这样, 玻璃板在自身重力和外界载荷作用下更容易发生弯曲。当玻璃板发生弯曲时, 其内部会产生应力, 随着支撑物间距的增大, 玻璃板发生弯曲的可能性更大, 其内部的应力也就更大。因此, 最大 Mises 应力也会随着支撑物间距的增大而增大。

由图 6 可知, 钢化玻璃基片的最大变形量随着空心圆柱形支撑物布放间距增大而增大, 布放间距为 60 mm、80 mm 时变形量最大的区域为正方形排列的四个空心圆柱形支撑物的中心位置, 布放间距为 70 mm、90 mm 时, 由于空心圆柱形支撑物与封接材料之间有较大的间距, 变形量最大的区域为最外侧空心圆柱形支撑物与封接材料之间的区域。

同样, 分别对支撑物在其他情况下的全钢化真空玻璃进行仿真分析。可以发现, 支撑物形状为球形和圆柱形的全钢化真空玻璃的 Mises 应力和变形量与支撑物形状为空心圆柱形的全钢化真空玻璃除了数值有所不同, 分布规律几乎一样, 且其变形量和 Mises 应力都与支撑物排列间距呈正相关。全钢化真空玻璃在支撑物不同情况下的最大 Mises 应力与最大变形量如表 2 所示。

由表 2 可知, 钢化玻璃基片在支撑物形状和布放间距不同的情况下的最大变形量均小于规定的最大变形量 0.15 mm, 但是球形支撑物在布放间距为 80 mm 时, 以及圆柱形、空心圆柱形支撑物在布放间距为 90 mm 时, 其最大 Mises 应力已经超出所规定的最大应力 90 MPa, 即认为此时全钢化真空玻璃破碎。

将表 2 中的数据以及在不同布放间距时单位面积支撑物的数量绘制成折线图, 如图 7 所示。

Table 2. The maximum Mises stress and deformation of fully tempered vacuum glass under different conditions of pillar
表 2. 全钢化真空玻璃在支撑物不同情况下的最大 Mises 应力及变形量

支撑物间距/mm	最大 Mises 应力/MPa			最大变形量/mm		
	球形	圆柱形	空心圆柱形	球形	圆柱形	空心圆柱形
60	48.288	45.978	45.463	0.0175	0.0139	0.0142
70	64.63	61.495	60.779	0.0321	0.0274	0.0279
80	90.23	78.053	77.042	0.0477	0.0384	0.0388
90	119.86	94.315	94.458	0.0714	0.0616	0.0624

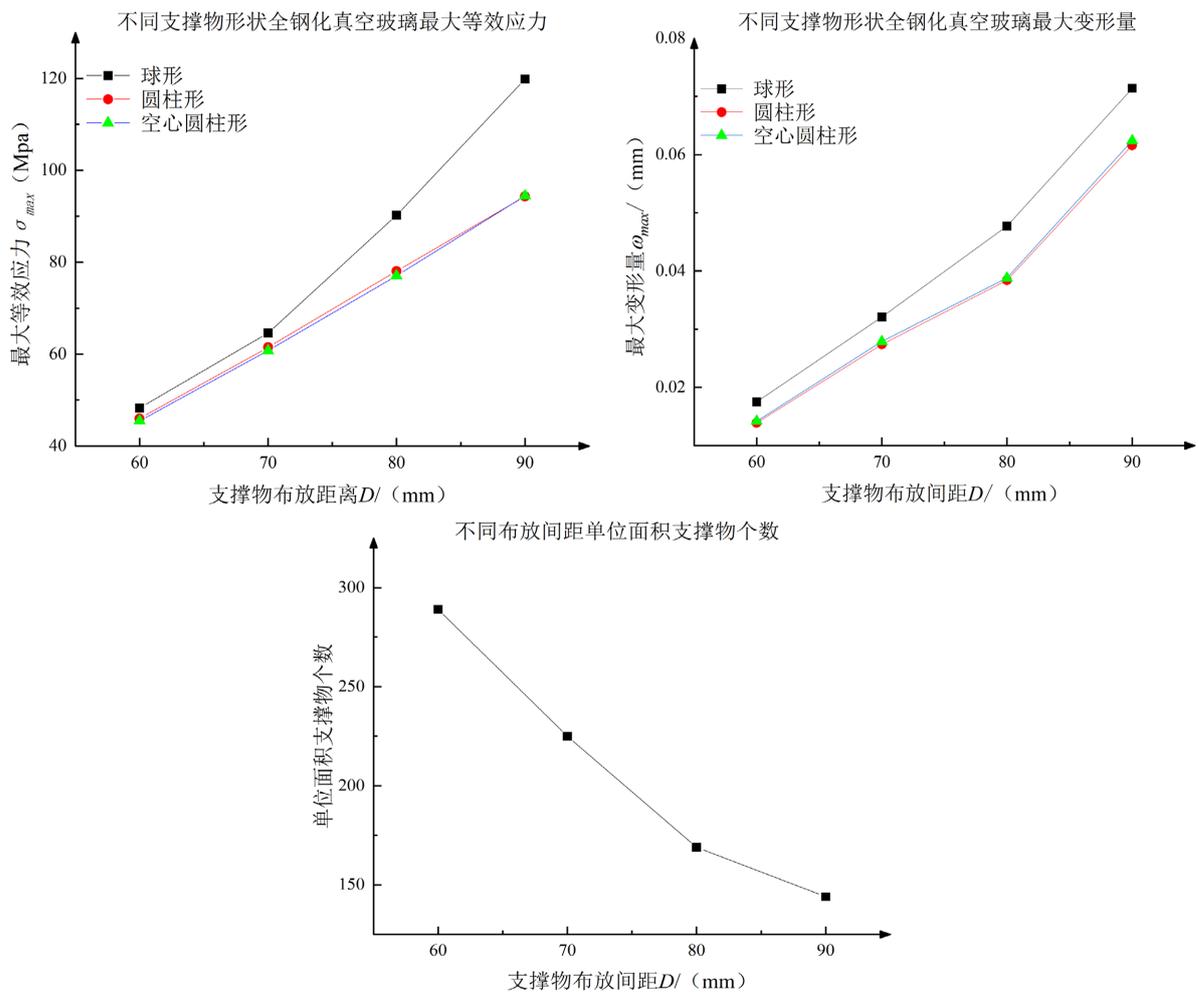


Figure 7. Maximum Mises stress, maximum deformation and number of pillars under different conditions
图 7. 不同情况下最大 Mises 应力、最大变形量和支撑物个数

由图 7 可知，支撑物摆放间距与支撑物数量呈反比，与最大 Mises 应力、变形量呈正比。采用球形支撑物的全钢化真空玻璃在各点的 Mises 应力和变形量最大，采用空心圆柱形和圆柱形支撑物的情况下，其变形量和 Mises 应力相差不大。从力学角度上来讲两片钢化玻璃之间的支撑物越多，钢化玻璃受到的应力和变形就会越小，但全钢化真空玻璃应用的场合通常要求其具有良好的通透性，而且放置过多的支撑物会使生产成本过大，所以支撑物的摆放要在避免两块钢化玻璃因为抽真空的原因导致过大的应力和

变形前提下, 支撑物的数量越少越好。因此, 采用圆球、圆柱、空心圆柱形支撑物的全钢化真空玻璃布放间距分别为 70、80、80 mm。

5. 结论

1) 通过 ANSYS 软件对全钢化真空玻璃不同形状支撑物、排列间距的力学模型进行了 Mises 应力和变形分析。结果表明, 变形量最大的区域为正方形排列的四个支撑物的中心位置或最外侧支撑物与封接材料之间的区域。

2) 支撑物布放间距不仅影响全钢化真空玻璃的通透性, 还会对其力学性能产生影响。变形量和最大 Mises 应力与支撑物布放间距呈正相关。在支撑物间距相同的条件下, 应优先考虑使用圆柱形或空心圆柱形的支撑物。

3) 为了保证全钢化真空玻璃的安全性和通透性以及降低生产成本, 采用圆球、圆柱、空心圆柱形支撑物的全钢化真空玻璃布放间距宜为 70、80、80 mm。

基金项目

河南省创新示范专项资助项目(191110211600); 河南省高等学校重点科研项目计划(19A460020)。

参考文献

- [1] 高帅, 岳高伟, 蔺海晓, 等. 钢化真空玻璃在温差作用下的变形特征[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(11): 3918-3924.
- [2] Varshneya, A.K. (2018) Stronger Glass Products: Lessons Learned and Yet to Be Learned. *International Journal of Applied Glass Science*, **9**, 140-155. <https://doi.org/10.1111/ijag.12341>
- [3] 李彦兵, 岳高伟. 支撑点间距对钢化真空玻璃力学特性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(4): 1172-1176, 1183.
- [4] 管长征, 胡东方. 钢化真空玻璃支撑物不同布放间距的传热分析[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(8): 38-41, 63.
- [5] 许嘉文, 奚小波, 张翼夫, 等. 支撑柱对钢化真空玻璃支撑应力影响仿真研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(8): 291-298.
- [6] 唐世萱, 胡东方. 吸气剂形状对钢化真空玻璃弯曲性能的影响及安全性评价[J]. 四川建筑科学研究, 2022, 48(2): 73-80.
- [7] 刘小根, 齐爽, 孙与康. 真空玻璃的应力分析及强度设计[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(4): 1141-1147.
- [8] 李深厚, 娄晶, 王丛笑, 等. 真空玻璃封接技术的研究现状及发展[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(11): 3893-3900.
- [9] 蔡冬, 奚小波, 张翼夫, 等. 支撑柱缺位对弧面钢化真空玻璃支撑应力的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11): 3669-3676.
- [10] Wullschleger, L., Manz, H., Ghazi Wakili, K. (2009) Finite Element Analysis of Temperature-induced Deflection of Vacuum Glazing. *Construction and Building Materials*, **23**, 1378-1388. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.010>
- [11] Simko, T.M., Fischer-Cripps, A.C. (1998) Temperature-Induced Stresses in Vacuum Glazing: Modelling and Experimental Validation. *Solar Energy*, **63**, 1-21. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00052-8)
- [12] 李彦兵, 岳高伟. 钢化真空玻璃支撑点的排布方式[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(6): 955-959, 966.
- [13] 赵伟同. 全钢化真空玻璃支撑物的研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 洛阳: 河南科技大学, 2020.
- [14] 许嘉文. 钢化真空玻璃力学性能及钢化损伤评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 15763.2-2005 建筑用安全玻璃第 2 部分: 钢化玻璃[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.