钢化真空玻璃在温差作用下的变形特征

高 帅,岳高伟,蔺海晓,李敏敏,刘 慧
(河南理工大学土木工程学院,焦作 454000)

摘要:钢化真空玻璃两侧存在温差是导致其弯曲失效的重要原因之一。通过钢化真空玻璃温差变形试验和数值模拟,得到不同尺寸的钢化真空玻璃(5+0.5V+5)在不同温差下的变形特征。结果表明:钢化真空玻璃受两侧温差形成的球面弯曲曲率半径与钢化玻璃基片的厚度成正比,与钢化玻璃基片的线膨胀系数及两侧温差成反比;钢化真空玻璃的变形量与钢化玻璃基片尺寸、温差大小及曲率半径呈正相关;同一温差下钢化真空玻璃变形量随长边尺寸增大而增大;数值模拟结果与试验结果吻合,相对误差在5%以内,能够为不同尺寸钢化真空玻璃在温差下的变形预测提供参考。

关键词:钢化真空玻璃; 温差; 玻璃尺寸; 热-变形力学模型; 变形; 数值模拟
中图分类号:TU502 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-1625(2022)11-3918-07

Deformation Characteristics of Tempered Vacuum Glass under Temperature Difference

GAO Shuai, YUE Gaowei, LIN Haixiao, LI Minmin, LIU Hui
(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The temperature difference between two sides of tempered vacuum glass is one of the important reasons for its bending failure. The deformation characteristics of tempered vacuum glass (TVG) were tested at various temperature difference and in various diameters, and determined by temperature difference deformation tests and finite element modelin (FEM) analysis. The findings demonstrate that the maximum deformation of TVG is in the center of the glass and gradually decreases to the periphery. Curvature radius of the sphere created by temperature difference between two sides of TVG is directly proportional to the thickness of the tempered glass, but inversely proportional to temperature difference between the two sides as well as to the linear expansion coefficient of glass. Glass size, temperature difference and curvature radius are all positivly correlated with the deformation of TVG. With the same temperature difference and different size of TVG, its deformation increases with the increase of the long side size of tempered glass. The larger the long edge size of TVG, the more significantly the deformation is affected by temperature difference. Moreover, a useful approach for the deformation prediction of TVG with different diameters under temperature difference is provided by the FEM analysis results, which is in good agreement with the experimental findings and where the relative error is less than 5%.

Key words: tempered vacuum glass; temperature difference; glass size; thermo-deformation mechanical model; deformation; numerical simulation

0 引 言

真空玻璃作为新一代节能环保玻璃,具有其他种类玻璃无法比拟的隔热、隔声等优越性能,但是由普通玻璃制成的真空玻璃因强度低等问题制约了其应用和发展[1]。而将普通玻璃经过加热—淬冷处理后得到的钢化玻璃,其表面形成的压应力层极大地提高了承载能力[2]。与普通玻璃相比,同等厚度的钢化玻璃抗

收稿日期:2022-09-15;**修订日期**:2022-10-13
基金项目:河南省科技攻关计划项目(222102320381);河南省高等学校重点科研项目(22A130002)
作者简介:高 帅(1996—),女,硕士研究生。主要从事钢化真空玻璃力学性能的研究。E-mail:gaoshuaiHPU@163.com
通信作者:岳高伟,博士,教授。E-mail:mxlygw@163.com

弯强度是普通玻璃的 3 ~4 倍,抗冲击强度更是普通玻璃的 3 ~5 倍,同时具备破碎后的碎片小、无尖锐锋角等安全性能[3]。此外,钢化玻璃本身强度较大,可以适当地增大支撑物间距,对真空玻璃的隔热性能和视觉效果起到优化作用[4-5]。

在应用过程中发现,钢化真空玻璃两侧存在温差时易发生弯曲变形,甚至出现密封开裂使钢化真空玻璃漏气(失效)的现象。造成这种现象产生的原因主要有两种:(1)钢化真空玻璃导热性极低;(2)温度较高侧玻璃发生线膨胀。真空玻璃具有极低的导热性,董慧敏[6]、李宏等[7]采用试验测试和数值模拟的方法,分析了不同类型玻璃的导热系数,结果表明真空玻璃导热系数远小于其他类型玻璃,满足节能环保的要求。Hu 等[8]、赵骁真等[9]通过对支撑物参数和边缘密封部分参数的灰色关联评价,得到了各个指标对玻璃传热系数的影响程度。Zhu 等[10]分析了基材玻璃的厚度、密封边的宽度、支撑柱阵列间距以及隔热框架结构对真空玻璃传热的影响。Rodriguez-Ake 等[11]模拟三层玻璃窗的共轭传热,通过与双层和单层玻璃对比,得出了不同真空层和玻璃基片厚度对玻璃窗抗热性能影响。Wang 等[12]利用思维进化神经网络对真空玻璃隔热层传热系数进行建模,预测了真空玻璃的保温隔热性能,发现玻璃在升高温度时发生线性膨胀,使真空玻璃封接部位破裂。Memon 等[13-14]研究了低温表面感应对真空抽取、泵孔密封和复合边缘密封的热性能的影响,并设计、开发了真空隔热玻璃的新型无铅密封材料,通过减少真空边缘密封的宽度和涂层的辐射率,改善了真空隔热玻璃的热性能。刘慧[15]通过实验和数值模拟,对钢化真空玻璃温差变形的影响因素和安全性进行研究。李永明等[16]通过计算内外玻璃温差作用下真空玻璃的应力和变形,分析了影响真空玻璃破裂的因素,结果表明任意尺寸的真空玻璃均有可能会因温差作用产生破裂,且最大拉应力分布在边角部位。苏行等[17]、Fang 等[18]利用冷热循环试验验证钢化真空玻璃可靠度,结果表明真空玻璃在经过热冷循环试验后传热率增加 10.1% ,真空度下降 0.6 Pa,但边缘封接部分未发生破裂,仍满足使用要求。

本文通过钢化真空玻璃在不同温差下的变形试验和数值模拟,分析了钢化真空玻璃两侧不同温差情况下的变形特征,为不同尺寸钢化真空玻璃在适用环境中的变形预测提供科学方法。

1　钢化真空玻璃温差变形及失效测试

钢化真空玻璃导热率极低,对其一侧加热,受热面玻璃膨胀变形,未受热面基本不受影响。封接部位对受热一侧玻璃的约束力也作用于常温侧玻璃,使其协同变形。当钢化真空玻璃弯曲受热变形过大时,封接部位撕裂,最终导致其漏气失效。为了研究钢化真空玻璃温差变形特征的影响规律,选用不同尺寸的钢化真空玻璃在不同温度下进行试验研究。

1.1　试验设备及方法

钢化真空玻璃温差试验需要的设备仪器有 IPC-610H 工控机、耐高温加热垫、测温线、控温线、直尺、细线等。IPC-610H 工控机通过控温线和测温线分别连接耐高温加热垫和钢化真空玻璃,实时控制并读取钢化真空玻璃的温度。耐高温加热垫对钢化真空玻璃的一面进行加热,使其达到预设的温度,并保持一段时间后再测试玻璃的变形。采用交叉测量法测量钢化真空玻璃的变形,为减小钢化真空玻璃温差变形试验的误差,同一工况下进行多次测量。

为研究尺寸和温差对钢化真空玻璃变形的影响,选用长宽尺寸分别为 347 mm ×1 344 mm、559 mm ×1 984 mm、318 mm ×2 120 mm 的钢化真空玻璃(5 +0.5V +5,单片钢化玻璃厚度为 5 mm,真空层厚度为 0.5 mm)进行试验。钢化真空玻璃温差试验步骤如下:

(1)调整 IPC-610H 工控机,初始温度设定为 30 ℃,加热时间为 120 min。

(2)将加热垫粘在钢化真空玻璃下侧,并放在水平试验平台上。

(3)钢化真空玻璃下侧由耐高温加热垫加热(加热温度由温度工控机控制),分别加热至 70 ℃、80 ℃、90 ℃、100 ℃、110 ℃,使钢化真空玻璃两侧温差达到 40 ℃、50 ℃、60℃、70 ℃、80 ℃。

(4)设定温度达到稳定后,在玻璃对角拉线,用直尺测量两条对角线交叉点 O 到玻璃的垂直距离 h,即玻璃中心变形量,钢化真空玻璃的高温变形示意图如图 1(a)所示。

(5)换其他尺寸的钢化真空玻璃重复步骤(1) ~(4),记录数据。

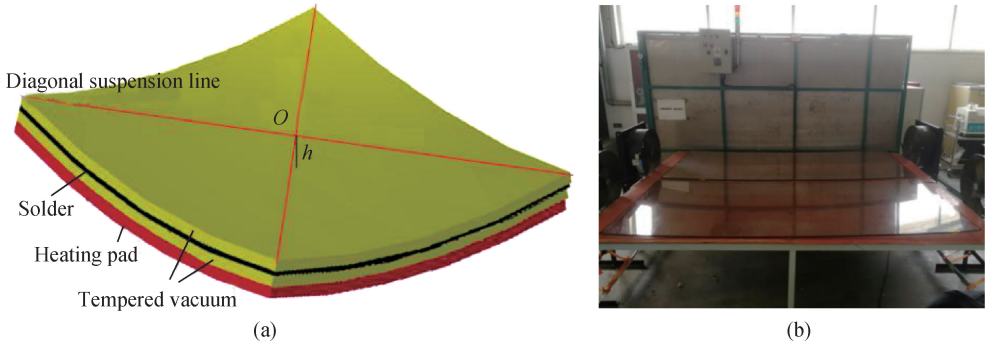

图 1　钢化真空玻璃高温变形示意图

Fig. 1　High temperature deformation diagram of tempered vacuum glass

1.2　试验结果分析

钢化真空玻璃受热后的变形如图 1(b)所示,从图中可明显看出钢化真空玻璃因受热引起的膨胀变形。将钢化真空玻璃温差试验的变形结果(玻璃中心点拱高)列于表 1。

由表 1 可得到钢化真空玻璃温差变形规律:(1)同一尺寸的钢化真空玻璃,其变形量随温差的增大而增大。(2)在同一温差下,钢化真空玻璃的变形量随长边尺寸增大而增大。故温差和尺寸对钢化真空玻璃温差变形均有影响。

表 1　钢化真空玻璃温差变形试验结果

Table 1　Temperature difference deformation test results of tempered vacuum glass

Size/(mm × mm)	Deformation/mm				
	40 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃	80 ℃
347 × 1 344	6.0	8.0	9.5	11.0	13.0
559 × 1 984	13.0	17.0	21.0	25.0	29.0
318 × 2 120	14.0	18.0	22.0	26.0	30.0

2　钢化真空玻璃在温差作用下的力学分析

不考虑其他约束作用,钢化真空玻璃受温差的变形是一个等半径的球面。设钢化玻璃基片厚度为 η,线膨胀系数为 α,支撑物高度(真空层厚度)为 v,钢化真空玻璃内外温差为 ΔT。任取弯曲球面钢化真空玻璃的常温面玻璃一单位长度 $\mathrm{d}l$ 为研究对象,则对应受热面玻璃(弯曲角度)的长度为 $\mathrm{d}l+\alpha\Delta T\mathrm{d}l$。设常温侧玻璃中性面距球心距离为 R(球面的曲率半径),则受热侧玻璃中性面距球心距离为 $R+\eta+v$,温度作用下钢化真空玻璃变形协调如图 2 所示。

根据变形协调关系,同时考虑玻璃板的泊松效应,温差下钢化真空玻璃在任一方向单位长度的变形协调满足关系如式(1)所示。

$$\frac{\mathrm{d}l}{R}=\frac{\mathrm{d}l[1+(1-\mu)\alpha\Delta T]}{R+\eta+v} \tag{1}$$

式(1)可以简化为

$$R=\frac{\eta+v}{\alpha\Delta T(1-\mu)} \tag{2}$$

式中:μ 为钢化玻璃基材的泊松比。

由式(2)可看出,钢化真空玻璃的弯曲曲率半径与玻璃基片厚度成正比,与基片的线膨胀系数及两侧温差成反比。曲率半径越小,说明钢化真空玻璃弯曲程度越大,对钢化真空玻璃造成的危害越大。

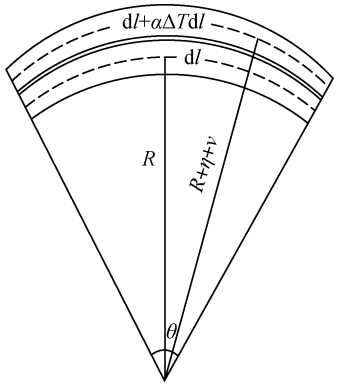

图 2　温差作用下钢化真空玻璃变形协调

Fig. 2　Deformation coordination of tempered vacuum glass under the action of temperature difference

3　钢化真空玻璃温差变形的热-变形力学模型

钢化真空玻璃温差变形试验可以得到温差和尺寸对其变形的影响,但是服役中的钢化真空玻璃尺寸不同,不能对其一一试验得出变形结果。因此,通过建立钢化真空玻璃数值模型,模拟钢化真空玻璃温差变形,通过对比试验结果,分析钢化真空玻璃数值模型的可靠性,进而可对任意尺寸的钢化真空玻璃在其应用环境中温差变形进行预测。由有限元软件 ABAQUS 建立的钢化真空玻璃模型如图 3 所示。

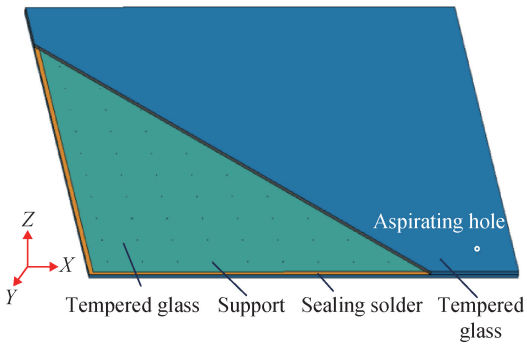

图 3　钢化真空玻璃模型

Fig. 3　Model of tempered vacuum glass

为研究钢化真空玻璃变形情况,对钢化真空玻璃的简化模型做出以下假设:(1)弹性体假设,钢化玻璃是脆性材料,未超过极限荷载,均表现为理想弹性特性;(2)角点边界无位移,即钢化真空玻璃变形过程中,低温面钢化玻璃的四个边角点 Z 轴方向位移为 0;(3)连续均匀性假设,即钢化玻璃、焊料、支撑物都是连续均匀材料。

3.1　钢化真空玻璃模型的基本参数设定

钢化真空玻璃由三部分组成:钢化玻璃基片、焊料及支撑物,其中模型尺寸与试验所用规格相同。焊料的有效宽度为 0.7 mm,厚度为 0.5 mm。支撑物采用 Q235B 不锈钢柱,其直径和高度均为 0.5 mm。材料力学参数如表 2 所示。

表 2　钢化真空玻璃材料参数汇总

Table 2　Summary of material parameters of tempered vacuum glass

Composition	Density/(kg · m^{-3})	Elasticity modulus/GPa	Poisson ratio
Monolithic tempered glass	2 500	72	0.20
Sealing solder	10	0.287	0.25
Support	7 900	210	0.30

3.2　初始条件和边界条件设置

为研究钢化真空玻璃在服役状态下的变形特征,对模型进行初始条件和边界条件的设置。

(1)在钢化真空玻璃上下表面施加 101 kPa 的大气压,保证其内部为真空状态。

(2)将钢化真空玻璃两侧初始温度设置为 30 ℃,在后续步骤中,将受热一侧钢化玻璃温度修改为升温后的温度(70 ~ 110 ℃)。

(3)将钢化真空玻璃常温面四个边角点 Z 轴方向的位移设置为 0,由此玻璃中心点位移即为钢化真空玻璃受高温后的最大变形量。

3.3　钢化真空玻璃温差变形数值模拟结果分析

根据钢化真空玻璃温差变形试验中玻璃的尺寸和温差设置,建立钢化真空玻璃热-变形力学模型,研究钢化真空玻璃温差变形规律及数值模型的可靠性。以长、宽尺寸为 347 mm × 1 344 mm 的钢化真空玻璃受热变形为例说明数值模拟结果,如图 4 所示。

从图 4 可看出钢化真空玻璃温差变形具有中心对称的特征。由于常温玻璃面四角点的 Z 轴方向固定,钢化真空玻璃温差变形呈球面,与理论分析相符。其最大变形量在玻璃中心,向四周逐渐减小。钢化真空玻璃温差变形的试验结果和数值分析结果对比分析如表 3 所示。

由表 3 中模拟变形结果看出,钢化真空玻璃温差变形数值模拟的协调变形规律与试验相吻合。即同一尺寸下的钢化真空玻璃变形量随温差增大而增大;同一温差下,钢化真空玻璃长边尺寸越大,变形量越大。

根据表 3 中误差结果可看出,钢化真空玻璃温差变形数值模拟结果与实测结果基本一致,相对误差均在 5% 以下,验证了钢化真空玻璃热-变形力学模型是可靠的。但模拟结果与试验结果始终存在差值,可能导致

误差的原因有以下两个方面：

(1)试验所使用的交叉测量法，只能减小而不能完全消除测量误差，且受到仪器精度限制，测试结果精度有限。

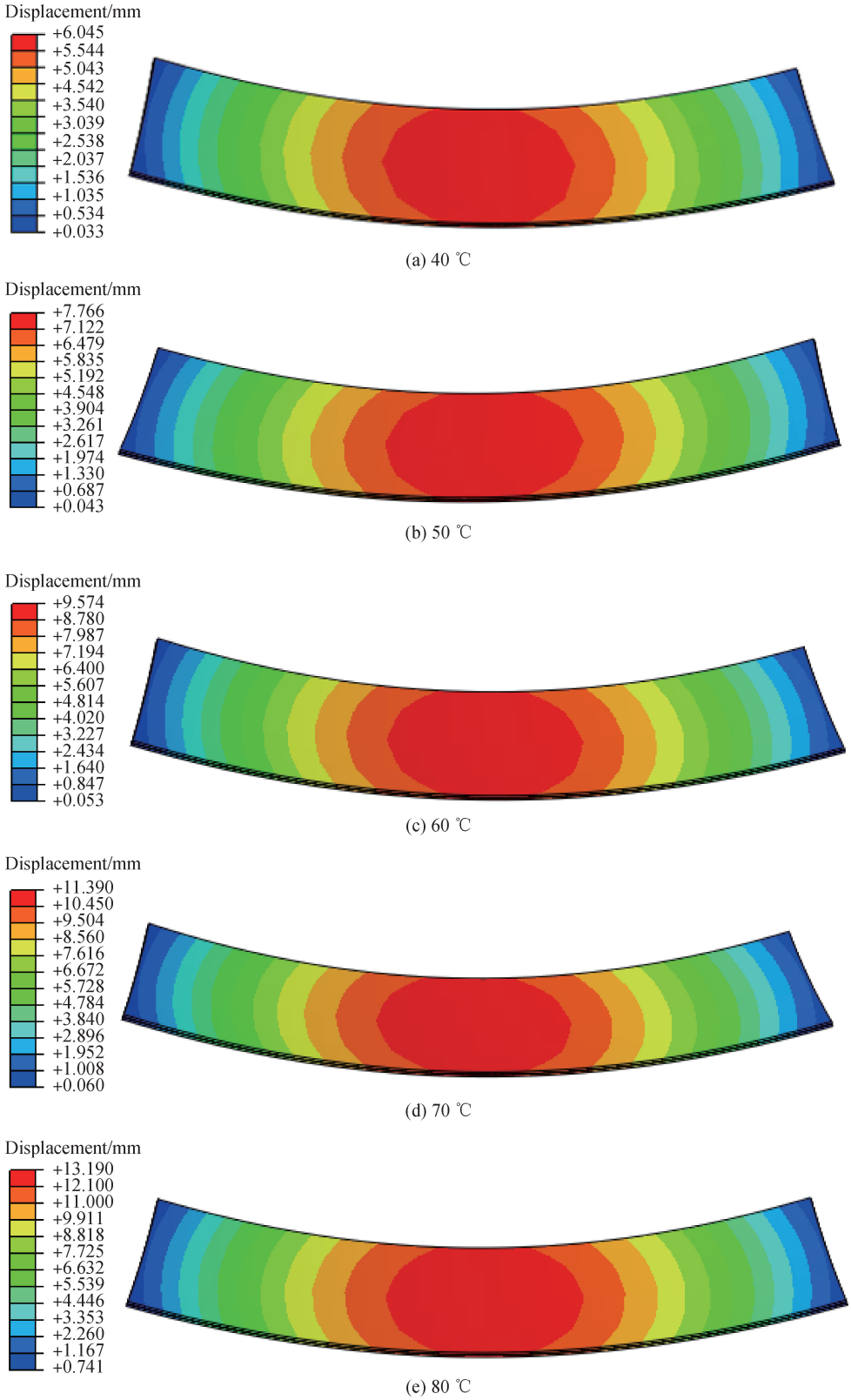

图 4　347 mm × 1 344 mm 钢化真空玻璃在不同温差下的变形数值模拟

Fig. 4　Numerical simulation of 347 mm × 1 344 mm tempered vacuum glass deformation under different temperature difference

(2)数值模拟所建立的钢化真空玻璃模型是一个简化的理想模型,模型忽略了封接焊料宽度和厚度不均匀对钢化真空玻璃温差变形的影响。

表 3　钢化真空玻璃温差试验和数值模拟结果

Table 3　Results of temperature difference test and numerical simulation of tempered vacuum glass

Size/(mm × mm)	Result	40 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃	80 ℃
347 × 1 344	Test/mm	6.0	8.0	9.5	11.0	13.0
	Numerical simulation/mm	6.05	7.77	9.57	11.39	13.19
	Relative error/%	0.83	2.87	0.73	3.50	1.46
559 × 1 984	Test/mm	13.0	17.0	21.0	25.0	29.0
	Numerical simulation /mm	13.20	16.98	20.95	24.94	28.89
	Relative error/%	1.54	0.12	0.24	0.24	0.38
318 × 2 120	Test/mm	14.0	18.0	22.0	26.0	30.0
	Numerical simulation /mm	14.39	18.51	22.83	27.18	31.48
	Relative error/%	2.78	2.83	3.77	4.54	4.93

4　结　论

(1)钢化真空玻璃弯曲曲率半径与钢化玻璃基片的厚度成正比,与基片的线膨胀系数及两侧温差成反比。曲率半径越小,则钢化真空玻璃弯曲程度越大,越容易漏气失效。

(2)钢化真空玻璃在温差下的变形随两侧温差及钢化玻璃基片长边尺寸的增大而增大,且长边尺寸越大,受温差影响的变形越明显。

(3)数值模拟结果与温差变形试验结果吻合较好,说明了基于有限元软件 ABAQUS 的钢化真空玻璃热-变形力学模型具有一定可靠性,可为各尺寸钢化真空玻璃温差协同变形的研究提供参考依据。

参　考　文　献

[1] 邹赟涵,奚小波,张翼夫,等. 真空玻璃技术现状与发展趋势[J]. 真空科学与技术学报,2022,42(8):563-572.
ZOU Y H, XI X B, ZHANG Y F, et al. Status and development trend of vacuum glazing technology[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2022, 42(8): 563-572 (in Chinese).

[2] BALAN B A, ACHINTHA M. Assessment of stresses in float and tempered glass using eigenstrains[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(7): 1301-1315.

[3] VARSHNEYA A K. Stronger glass products: lessons learned and yet to be learned[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2018, 9(2): 140-155.

[4] 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.
LI Y B, YUE G W. Support point arrangement of tempered vacuum glass[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2016, 34(6): 955-959 + 966 (in Chinese).

[5] FANG Y P, ARYA F. Evacuated glazing with tempered glass[J]. Solar Energy, 2019, 183: 240-247.

[6] 董慧敏. 钢化真空玻璃的热工性能研究[D]. 焦作:河南理工大学,2019:21-25.
DONG H M. Thermal performance study of tempered vacuum glass[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019: 21-25 (in Chinese).

[7] 李　宏,李璟玮,陈　鹏,等. 基于有限元分析的真空玻璃传热性能数值模拟研究[J]. 硅酸盐通报,2022,41(4):1148-1156 + 1176.
LI H, LI J W, CHEN P, et al. Numerical simulation of heat transfer performance of vacuum glazing based on finite element analysis[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(4): 1148-1156 + 1176 (in Chinese).

[8] HU D F, LIU C, LI Y B. Reliability analysis of toughened vacuum glass based on gray relation decision[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 2926480.

[9] 赵骁真,胡东方,江春伟. 全钢化真空玻璃传热系数和传热指标的灰关联分析[J]. 节能技术,2021,39(3):221-224 + 246.
ZHAO X Z, HU D F, JIANG C W. Grey correlation analysis of heat transfer coefficient and heat transfer index of fully tempered vacuum glass[J]. Energy Conservation Technology, 2021, 39(3): 221-224 + 246 (in Chinese).

[10] ZHU Q D, WU W D, YANG Y Y, et al. Finite element analysis of heat transfer performance of vacuum glazing with low-emittance coatings by using ANSYS[J]. Energy and Buildings, 2020, 206: 109584.

[11] RODRIGUEZ-AKE A, XAMÁN J, HERNÁNDEZ-LÓPEZ I, et al. Numerical study and thermal evaluation of a triple glass window under Mexican warm climate conditions[J]. Energy, 2022, 239: 122075.

[12] LEI W, GASTRO O, WANG Y Q, et al. Intelligent modelling to predict heat transfer coefficient of vacuum glass insulation based on thinking evolutionary neural network[J]. Artificial Intelligence Review, 2020, 53(8): 5907-5928.

[13] MEMON S, FANG Y P, EAMES P C. The influence of low-temperature surface induction on evacuation, pump-out hole sealing and thermal performance of composite edge-sealed vacuum insulated glazing[J]. Renewable Energy, 2019, 135: 450-464.

[14] MEMON S, EAMES P C. Design and development of lead-free glass-metallic vacuum materials for the construction and thermal performance of smart fusion edge-sealed vacuum glazing[J]. Energy and Buildings, 2020, 227: 110430.

[15] 刘 慧. 钢化真空玻璃高温温差下的变形特征[D]. 焦作:河南理工大学,2020:47-54.
LIU H. Deformation characteristics of toughened vacuum glass under high temperature difference[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020: 47-54 (in Chinese).

[16] 李永明,孙景春,许 威,等. 内外片温差作用下真空玻璃应力与变形分析[J]. 硅酸盐通报,2017,36(9):3128-3132+3138.
LI Y M, SUN J C, XU W, et al. Stress and deformation analysis of vacuum glazing with the action of temperature difference between inner and outer glass[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(9): 3128-3132+3138 (in Chinese).

[17] 苏 行,胡东方. 温差作用下钢化真空玻璃封接部位强度分析[J]. 建筑节能(中英文),2021,49(3):78-81.
SU H, HU D F. Strength analysis of sealing parts of toughened vacuum glass under the temperature difference[J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(3): 78-81 (in Chinese).

[18] FANG Y P, HYDE T, EAMES P C, et al. Theoretical and experimental analysis of the vacuum pressure in a vacuum glazing after extreme thermal cycling[J]. Solar Energy, 2009, 83(9): 1723-1730.