

# 温差作用下钢化真空玻璃应变与支撑物状态分析

刘亚楠<sup>1,2</sup>, 胡东方<sup>1,2</sup>, 袁朝阳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳

<sup>2</sup>河南省机械装备先进制造协同创新中心, 河南 洛阳

收稿日期: 2023年9月8日; 录用日期: 2023年10月28日; 发布日期: 2023年11月3日

## 摘要

钢化真空玻璃在其两侧温度不同时会发生热变形, 该变形可能会导致其发生破碎或是使支撑物的状态发生变化, 进而改变钢化真空玻璃的受力情况, 最终使其失效。通过理论分析, 研究了钢化真空玻璃在温差环境中影响其变形的因素。使用ANSYS模拟钢化真空玻璃在温差环境中发生的变形, 从仿真结果中可以看出, 在较大温差作用下钢化真空玻璃的变形量不大于失效极限值。为了研究支撑物在钢化真空玻璃发生变形的情况下其状态是否满足其力学特性要求, 取钢化真空玻璃样品对其进行冷热循环试验, 并于实验结束后对样品中间部位和边缘部位的支撑物进行观察, 从试验中可以看出, 支撑物的形状及其轴向位移和横向位移均未发生明显变化, 同时, 支撑物与玻璃紧密接触位置没有对玻璃板造成明显的挤压变形, 满足其力学特性要求。

## 关键词

钢化真空玻璃, 温差, 支撑物, 冷热循环, 变形

# Analysis of Strain and State of Pillar of Tempered Vacuum Glass under Temperature Difference

Ya'nan Liu<sup>1,2</sup>, Dongfang Hu<sup>1,2</sup>, Zhaoyang Yuan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Hennan Province, Luoyang Henan

Received: Sep. 8<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 28<sup>th</sup>, 2023; published: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2023

文章引用: 刘亚楠, 胡东方, 袁朝阳. 温差作用下钢化真空玻璃应变与支撑物状态分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(6): 5072-5081. DOI: 10.12677/mos.2023.126461

## Abstract

Due to the different temperatures on both sides of the tempered vacuum glass, thermal deformation will occur, which may lead to its breakage or change the state of the pillar, and then change the stress condition of the tempered vacuum glass, and finally make it invalid. Through theoretical analysis, this paper studies the factors affecting the deformation of tempered vacuum glass in temperature difference environment. ANSYS is used to simulate the deformation of tempered vacuum glass in the temperature difference environment. From the simulation results, it can be seen that under the action of a large temperature difference, the deformation of tempered vacuum glass is not greater than the failure limit value. In order to study whether the state of the pillar meets the requirements of mechanical properties when the tempered vacuum glass is deformed, take the tempered vacuum glass sample for cold and hot cycle test, and observe the pillar at the middle and edge of the sample after the experiment. From the test, it can be seen that the shape of the pillar and its axial displacement and transverse displacement have not changed significantly. At the same time, the close contact position between the pillar and the glass does not cause obvious extrusion deformation to the glass plate, which meets the requirements of its mechanical properties.

## Keywords

Tempered Vacuum Glass, Temperature Difference, Pillar, Thermal Cycling, Deformation

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

随着时代的发展,玻璃制品在我们生活中运用越来越广泛。无论是电子屏幕、建筑门窗,还是汽车、飞行器等,都少不了玻璃制品的身影,玻璃制品在众多领域均发挥出了它的作用。在建筑领域中,玻璃能够为室内引入更多的自然光,在一定程度上降低了电能消耗。但由于普通玻璃热阻小,不利于夏季与冬季的隔热、保温,因此又造成了多余的能源能耗[1]。为解决该问题,悉尼大学应用物理系教授 Collins 与唐健正教授于 1989 年在普通玻璃的基础上研制出符合节能环保要求的真空玻璃[2];在 2016 年,我国玻璃深加工企业更进一步的在真空玻璃的基础上研制出了安全性能更高的钢化真空玻璃[3]。钢化真空玻璃作为具有安全性能的绿色保温节能玻璃制品,它包括上下两层钢化玻璃基板,在两个基板之间用微小的支撑物将其隔开保持一定距离,上下玻璃板的边缘由封接材料进行封接并在内部形成密闭空间,将内部密闭空间抽真空后进行密封即可形成钢化真空玻璃,是比较新型的安全节能材料[4]。钢化真空玻璃结构如图 1 所示。因其保温性能比一般玻璃好,它在我国范围内被大量推广,特别是昼夜温差较大的区域。但钢化真空玻璃目前的生产技术尚不完善,比如对于封接层的封接方式、支撑物的布放以及排列方式等问题,在一定程度上制约了该行业的发展[5]。当钢化真空玻璃被用于温差环境中时,其面临的问题之一是在温差环境中是否具备较高的安全性与可靠性。在这种情况下,许多科研工作者被钢化真空玻璃这个行业所吸引,以期望能够在这个行业中能够有更多的发现[6] [7] [8]。

近年来,人们已经广泛地研究了支撑物设计过程中所涉及的力学理论[9],分析了支撑物排列方式及其变形和应力分布规律,但关于在温差作用下钢化真空玻璃支撑区域的应力分析和热变形研究在国内外

鲜有报道。处于温差环境中的钢化真空玻璃因其结构特殊,致使玻璃两侧具有较大的温度差[10] [11] [12]。由于钢化真空玻璃受力时支撑区域的情况复杂,理论计算需要大量工作,且得到的结果并不一定准确[13]。为了研究其在温差环境中服役的安全性及可靠性,利用 ANSYS 模拟钢化真空玻璃在温差作用下发生的变形,并对其结果进行分析,然后使用试验设备来对钢化真空玻璃中支撑物的状态进行检测,并在试验结束后使用 TS400 型号显微镜对钢化真空玻璃样品的中心区域支撑物和边缘区域支撑物进行检测,可以方便直观的得到试验结果,便于对支撑物状态进行分析,为钢化真空玻璃的发展和推广提供一些可靠的依据。

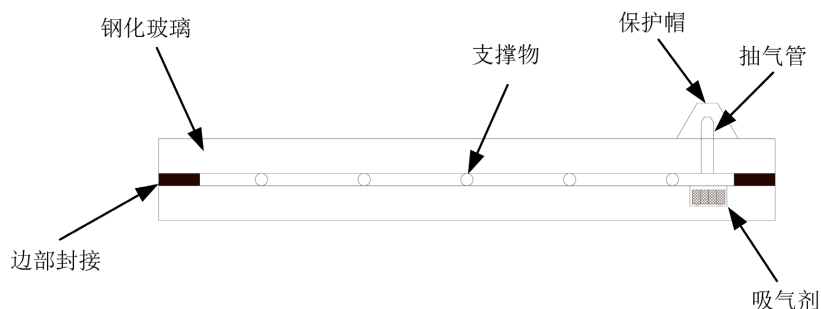


Figure 1. Structural drawing of tempered vacuum glass  
图 1. 钢化真空玻璃结构图

## 2. 温差作用下钢化真空玻璃变形计算

### 2.1. 钢化真空玻璃球面弯曲曲率计算

在温差环境中且没有四周的支撑槽口约束时,钢化真空玻璃会发生自由变形。当其处于静止状态下时,该变形可等效为一个曲率半径处处相等的曲面。温差环境中钢化真空玻璃变形状况图如图 2 所示。

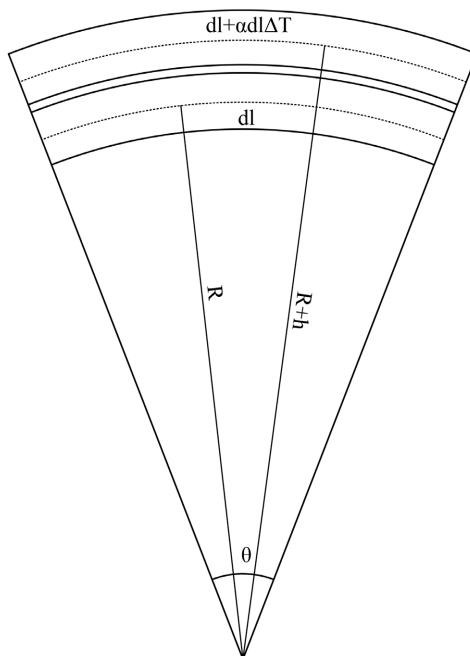


Figure 2. Deformation diagram of tempered vacuum glass in temperature difference environment  
图 2. 温差环境中钢化真空玻璃变形图

受温差作用的钢化真空玻璃在某方向上的单位长度的变形协调满足如下关系:

$$\frac{dl}{R} = \frac{dl[1+(1-\mu)\alpha\Delta T]}{R+h} \quad (1)$$

上式可简化为:

$$R = \frac{h}{\alpha\Delta T(1-\mu)} \quad (2)$$

上式中  $h$  为单层钢化玻璃的厚度,  $\mu$  为钢化玻璃的泊松比,  $\Delta T$  为钢化真空玻璃两侧的温差,  $\alpha$  为钢化玻璃基片的线膨胀系数。

由式(2)可以看出, 当钢化真空玻璃在温差环境中发生曲面弯曲时, 其曲率半径的大小与三个因素有关, 即钢化玻璃的线膨胀系数、厚度与钢化真空玻璃两侧的温差, 长度和宽度尺寸对其无影响。

## 2.2. 钢化真空玻璃弯曲挠度计算

在温差环境中, 安装在门窗幕墙上的钢化真空玻璃从初始平面变为球形表面, 其周围的直线变成弓形曲线。如果球面的弯曲挠度和边缘的弯曲挠度太大, 则将不利于钢化真空玻璃的正常使用, 温差环境中钢化真空玻璃的球面弯曲变形状况如图 3 所示。

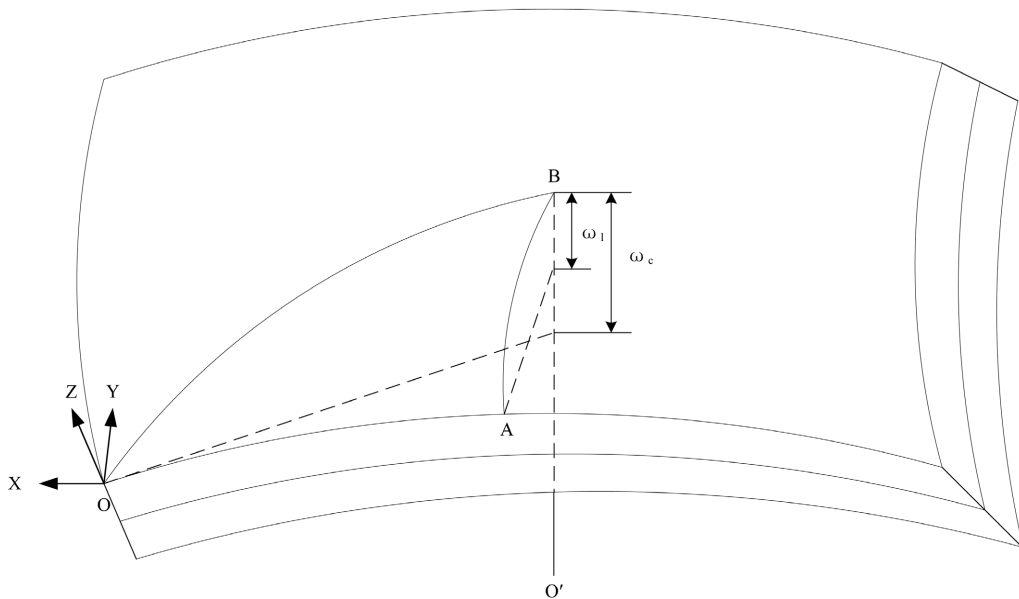


Figure 3. Spherical bending deformation of tempered vacuum glass in temperature difference environment  
图 3. 温差环境中钢化真空玻璃的球面弯曲变形状况图

设钢化真空玻璃长边长为  $m$ , 短边长为  $n$ , 且无其它环境因素所引起的钢化真空玻璃的形变, 从图 3 中的几何关系可知, 图中弧长  $OB$  的长度为:

$$OB = \frac{\sqrt{m^2 + n^2}}{2} \quad (3)$$

弧长  $AB$  的长度为:

$$AB = \frac{n}{2} \quad (4)$$

则其球面弯曲挠度公式为:

$$\omega_c = R \left( 1 - \cos \frac{180\sqrt{m^2 + n^2}}{2\pi R} \right) \quad (5)$$

边缘弯曲挠度公式为:

$$\begin{aligned} \omega_b = \omega_c - \omega_l &= R \left( 1 - \cos \frac{180n}{2\pi R} \right) - R \left( 1 - \cos \frac{180\sqrt{m^2 + n^2}}{2\pi R} \right) \\ &= R \left( \cos \frac{90\sqrt{m^2 + n^2}}{\pi R} - \cos \frac{90n}{\pi R} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以看出,钢化真空玻璃在温差环境中所产生的球面弯曲挠度和边缘弯曲挠度,与三个因素有关,即玻璃的长、宽和弯曲半径。

### 3. 温差作用下钢化真空玻璃支撑物传热特性与仿真分析

#### 3.1. 支撑物的固体导热

支撑物与玻璃平面接触,在大气压作用下,支撑物长期处于高压环境下,与钢化玻璃基片密切接触,这直接导致支撑物与玻璃之间产生的传热阻值是零。

由傅立叶定理推导出支撑物导热公式为:

$$Q = \left( \lambda_F \frac{\sum A_F}{\delta_F} + \lambda_Z \frac{\sum A_Z}{\delta_Z} \right) (t_2 - t_1) \quad (7)$$

式中:  $\lambda_F$  为封接材料导热系数;

$\sum A_F$  ——封接材料的表面积总和;

$\delta_F$  ——封接层的厚度;

$\lambda_Z$  ——支撑物的传热系数;

$\sum A_Z$  ——玻璃与支撑物接触的面积总和;

$\delta_Z$  ——支撑物的高度;

$t_2, t_1$  ——两边玻璃板内外侧温度。

则钢化真空玻璃一个单元面积上的热通量是:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

式中  $A$  为钢化真空玻璃的一个单元面积。

#### 3.2. 钢化真空玻璃模型的建立

本文使用 UG 来创建仿真模型。模型中玻璃板的长为 500 mm, 宽为 500 mm, 厚度为 5 mm, 支撑物为圆柱形, 高度为 0.3 mm, 直径为 0.3 mm, 排布方式为正方形, 布放间距 60 mm, 封接层厚度为 0.3 mm, 宽度为 7 mm。

#### 3.3. 材料的参数选取

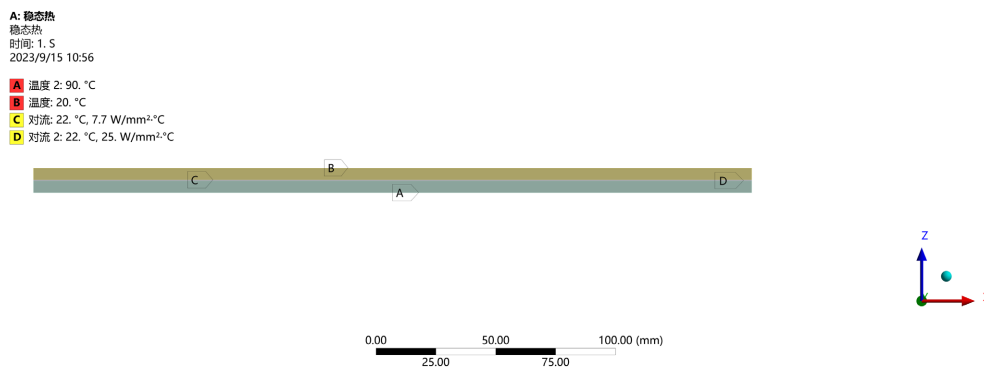
由相关工作人员总结出的数据以及查阅相关文献可知,钢化真空玻璃各部分的参数如表 1 所示。

**Table 1.** Material property parameters  
**表 1.** 材料属性参数

名称	密度 kg/m <sup>3</sup>	线膨胀系数(10 <sup>-6</sup> /°C)	导热系数 W/(km·°C)	泊松比	弹性模量 GPa
钢化玻璃	2400	9	7.83	0.20	72
封接材料	8700	12.1	19	0.30	27.6
支撑物	7930	10.6	32.6	0.33	198

### 3.4. 温差设定

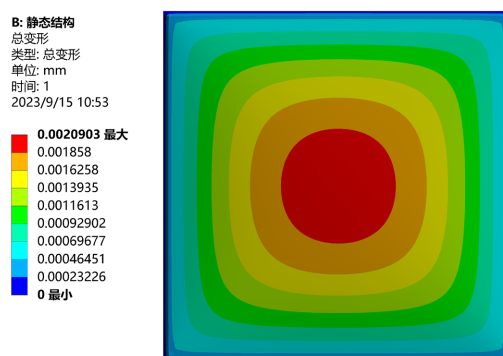
本文通过 ANSYS 进行仿真, 设定钢化真空玻璃一侧温度为 20°C, 另一侧为 90°C, 钢化真空玻璃模型施加温度图如图 4 所示。模拟温差为 70°C 环境中钢化真空玻璃两侧温度的分布情况, 通过仿真结果可以看出钢化真空玻璃的变形区域以及变形量的大小, 并以此为依据来判断钢化真空玻璃在较高温差环境中服役时是否具备安全性与可靠性。



**Figure 4.** Temperature distribution diagram of tempered vacuum glass model  
**图 4.** 钢化真空玻璃模型温度分布图

### 3.5. 温差作用下钢化真空玻璃变形分析

如图 4 所示, 在钢化真空玻璃模型的上表面施加温度为 20°C, 在模型下表面施加温度为 90°C, 对模型四周施加固定约束来模拟钢化真空玻璃在安装后受到支撑槽口对其的约束。经过计算机处理后, 得出模型的整体变形分布云图如图 5 所示。



**Figure 5.** Overall thermal deformation nephogram  
**图 5.** 整体变形云图

图 5 所示为钢化真空玻璃从 20℃ 到 90℃ 温度整体热变形情况。从图 5 左侧数值中可以看到，钢化真空玻璃在 70℃ 温差环境下发生了一定程度的变形，其变形最小值为 0 mm，最大值为 0.0020903 mm，均不大于破坏变形极限。由此可见，即便是在较大温差环境下，钢化真空玻璃依然能够保持较高的安全性与可靠性。

#### 4. 温差变形对钢化真空玻璃支撑物影响检测

钢化真空玻璃抽气密封后内部为真空状态，故其保温性能良好。在钢化真空玻璃实际安装后，其两个玻璃基片往往会处于不同的温度环境中，以至于无法忽视较高温差对其的影响。当钢化真空玻璃反复在温差作用下发生自由变形时，其内部微小支撑物的位置可能会随着钢化真空玻璃的变形而发生位移或变形，从而改变钢化真空玻璃的局部受力状况。这使得迫切需要用试验来分析在温差环境影响下的钢化真空玻璃中支撑物的状态。本文采取冷热循环试验来对钢化真空玻璃中支撑物的状态进行分析。

##### 4.1. 试验方法

根据对钢化真空玻璃在温差作用下进行研究，本文采用的试验样片中玻璃板的长为 500 mm，宽为 500 mm，厚度为 5 mm，支撑物为圆柱形，高度为 0.3 mm，直径为 0.3 mm，支撑物在 TS004 型号工业显微镜下观察图如图 6 所示，排布方式为正方形，排布间距为 60 mm，封接层宽度为 7 mm，厚度为 0.3 mm。通过模拟在温差的连续变化下检验钢化真空玻璃的支撑物力学性能。玻璃试验样片如图 7 所示。

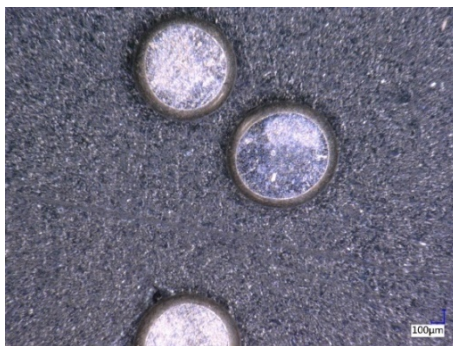


Figure 6. Observation of pillar under TS004 industrial microscope  
图 6. 支撑物在 TS004 型号工业显微镜下观察图



Figure 7. Glass test sample  
图 7. 玻璃试验样片

组建冷热循环试验台，由控制区、散热风扇、隔热垫、加热板组成，用于模拟钢化真空玻璃在服役过程中所处的温差环境，控制区通过控制钢化真空玻璃上下两层玻璃表面的升温 and 降温速率，来达到控制加热与散热时间的目的。计算机控制区如图 8 所示。



Figure 8. Test bed control area

图 8. 试验台控制区

设置试验台中加热板的最大加热温度为  $90^{\circ}\text{C}$ ，加热最大温差为  $70^{\circ}\text{C}$ ，由于温差幅度过大，为避免钢化真空玻璃与加热板直接接触的位置造成破坏，应在该位置放置  $5\text{ mm}$  的隔热垫进行保护。在本次实验中，加热所需时间为  $20\text{ min}$ ，保温所需时间为  $20\text{ min}$ ，散热所需时间为  $20\text{ min}$ 。共进行  $500$  小时的冷热循环试验。

#### 4.2. 试验结果及显微结构分析

由于支撑物尺寸非常微小，目视观察并不能发现支撑物的微观变化。因此，在冷热循环试验结束后，使用 TS004 型号工业显微镜对钢化真空玻璃样片中心区域支撑物和边缘区域的支撑物进行检测。玻璃样片中间部位支撑物如图 9 所示，玻璃样片边缘部位支撑物如图 10 所示。

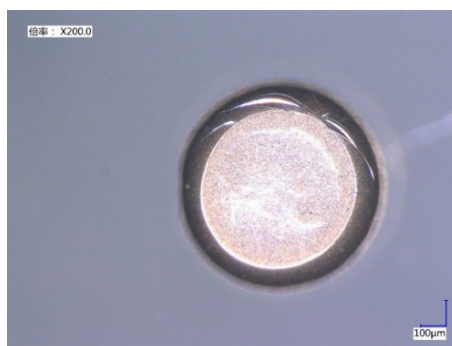


Figure 9. Pillar in the middle of glass sample

图 9. 玻璃样片中间部位支撑物

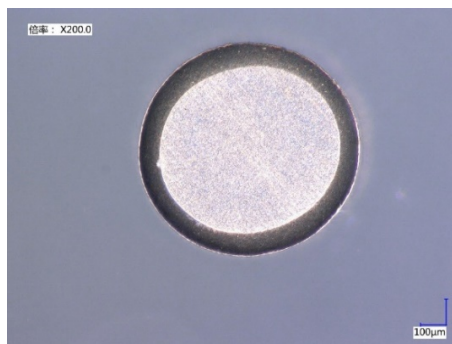


Figure 10. Edge pillar of glass sample

图 10. 玻璃样片边缘部位支撑物



从图中可以看出在温差作用下,支撑物基本无变形,但会相对钢化真空玻璃发生轴向位移,而且中间部位支撑物的轴向位移略大于边缘部分支撑物,中间部位支撑区域和边缘部位支撑区域也出现了轻微变形,且中间部位支撑区域的变形程度大于边缘部位支撑区域的变形。经分析,产生上述结果的原因是在不断加热、保温与冷却过程中,钢化真空玻璃不断的发生变形与复原,因钢化真空玻璃中心部位比边缘部位变形程度大,导致中间部位支撑物的轴向位移比边缘部位支撑物的大,在较大程度上改变了钢化真空玻璃中间部位支撑区域的受力状态,进而导致了支撑物发生轻微移动与支撑区域发生轻微变形的情况。由于放大 200 倍的缘故,此情况对钢化真空玻璃基片影响可以忽略不计。检测结果表明,通过冷热循环试验模拟室外温差环境,对钢化真空玻璃支撑物进行检测发现,钢化真空玻璃支撑物在温差作用下满足其力学特性要求。

## 5. 结论

1) 根据理论分析了钢化真空玻璃在温差环境中的曲面变形及其影响因素,结果得出,影响其曲率半径大小的因素为钢化玻璃的线膨胀系数、钢化真空玻璃两侧的温度差以及单层钢化玻璃的厚度。钢化真空玻璃边缘弯曲挠度与球面弯曲挠度仅与玻璃的弯曲半径、宽度和长度有关,在长边中点处产生最大边缘弯曲挠度。

2) 基于热分析理论对支撑物固体导热进行分析,利用仿真软件来模拟钢化真空玻璃在温差作用下发生的热变形。从仿真结果中可以看出,钢化真空玻璃的变形小于失效极限值。据此可知,即便是在较大温差环境下,钢化真空玻璃依然能够保持较高的安全性与可靠性。

3) 使用试验设备对钢化真空玻璃样品进行冷热循环试验,并在试验结束后使用显微镜对钢化真空玻璃样品的中心支撑物和边缘支撑物进行检测。检测结果表明,在钢化真空玻璃受到温差作用后支撑物基本上无变形,且其产生的微小位移和支撑区域产生的轻微变形基本上可以忽略不计,即支撑物能够有效克服钢化真空玻璃在温差作用下所产生的弯曲变形,满足其力学特性要求。

## 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] 彭小云. 严寒地区中庭玻璃能耗分析——以哈尔滨地区为例[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(4): 367-369.
- [2] Robinson, S.J. and Collins, R.E. (1989) Evacuated Windows-Theory and Practice. *ISES Solar World Congress, Japan*, 4-8 September 1989, 1-10.
- [3] 韩乐. 玻璃在建筑节能中应用浅析[J]. 玻璃, 2020, 47(7): 59-62.
- [4] 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.
- [5] 王世忠. 突破真空玻璃强度问题的技术途径[J]. 玻璃, 2012, 39(3): 22-28.
- [6] 刘小根, 包亦望, 王秀芳, 等. 安全型真空玻璃构件功能一体化优化设计[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7): 1310-1317.
- [7] 孙景春, 刘忠伟, 蒋毅, 等. 真空玻璃安全性综述[J]. 建设科技, 2018(9): 32-36.
- [8] 张瑞宏, 高建和, 顾乡, 等. 真空平板玻璃支撑应力实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2006, 26(6): 455-458.
- [9] 刘敏, 孙诗兵, 吕锋, 等. 无机支柱真空玻璃的封接边缘受力分析[J]. 山东建筑大学学报, 2020, 35(1): 50-57.
- [10] 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.
- [11] 罗琴. 大气压及温差环境下真空玻璃的受力与传热特性研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2017: 6-11.
- [12] 刘小根, 万德田, 孙景春, 等. 支撑物缺位对真空玻璃应力和变形影响分析[J]. 门窗, 2016(4): 42-45.

- 
- [13] 邹惠芬, 王雪峰, 孙阳, 等. 真空玻璃支撑柱处玻璃的应力分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2): 355-359.