

## 基于既有外窗改造的薄型中空窗热工性能研究

彭晋卿<sup>†</sup>, 都禹辰, 谭羽桐, 李厚培, 罗伊默

(湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘要:**采用超薄玻璃对既有建筑外窗进行改造,研发了一种薄型三玻两腔中空玻璃,旨在通过优化玻璃厚度、调整低辐射涂层数量与位置、填充不同惰性气体等措施来研究其对薄型中空窗热工性能的影响。首先采用层次聚类与 K-means 聚类法对国际玻璃数据库(IGDB)的低辐射玻璃进行聚类,确定了 7 种典型类型。而后以既有外窗窗框结构为约束条件,提出了内置薄玻、改变低辐射涂层位置及种类、变更空腔填充介质等单一或组合改造策略。利用 WINDOW、THERM、Optics 软件计算了不同改造策略下薄型中空外窗的热工性能,并搭建了全尺寸实验平台对薄型中空窗的热工性能开展了实测研究。最后通过 E-FAST 敏感性分析方法量化了不同改造策略对热工参数的影响。结果表明,相较于低辐射中空窗,改造后的薄型中空窗的传热系数可降低 30.64%;空腔填充介质和低辐射涂层种类是影响薄型中空窗热工性能的关键参数;相较于更换整窗的改造方式,使用薄型中空玻璃进行外窗改造的方式可降低 83%~87% 的材料成本。

**关键词:**超薄玻璃; 中空玻璃窗; 热工性能; 低辐射玻璃

**中图分类号:**TU111.2+4      **文献标志码:**A

## Study on Thermal Performance of Thin-glass Triple-pane Glazing Based on Existing Window

PENG Jinqing<sup>†</sup>, DU Yuchen, TAN Yutong, LI Houpei, LUO Yimo

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Ultra-thin glass is used to renovate windows. The thin-glass triple-pane glazing with two cavities is developed, so as to investigate the impacts on the thermal performance of the windows by optimizing glass thickness, adjusting the number and position of low emissivity (low-E) coatings, and filling different inert gases. Firstly, hierarchical and K-means clustering methods are used to cluster glass types in the International Glazing Database (IGDB) to determine seven low-E glass types. Secondly, based on typical window frame structures, single or combined strategies such as inserting thin glass, adjusting the low-E coatings, and changing the filling medium are proposed. Then, based on WINDOW, THERM, and Optics, the thermal performance of thin insulating windows under different renovation strategies is analyzed, and a full-scale experimental platform is built to conduct experimental research on the thermal performance of thin insulating windows. Finally, the impact of different

\* 收稿日期:2024-11-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3806202), National Key Research and Development Program of China(2023YFC3806202)

作者简介:彭晋卿(1984—),男,湖南常德人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人,E-mail:jqpeng@hnu.edu.cn

renovation strategies on thermal parameters is quantified by the E-FAST sensitivity analysis method. The results show that compared with low-E insulating windows, the heat transfer coefficient of the renovated thin insulating window can be reduced by 30.64%. The type of cavity medium and low-E coating are the key parameters affecting the thermal performance of thin insulating windows. Compared with the renovation method of replacing the whole window, the renovation method of using thin-glass triple-pane glazing for window renovation can reduce material costs by 83%~87%.

**Key words:** ultra-thin glass; hollow glass window; thermal performance; low-E glass

目前,全球建筑领域的能耗及二氧化碳排放分别占其总量的1/3及1/4<sup>[1]</sup>.随着城市化进程发展,建筑面积和能耗均呈上升趋势,截至2022年底,中国建筑面积总量约696亿平方米<sup>[2]</sup>,建筑生命周期能耗从2000年的192.86 Mtce增长至2020年的1 131.0 Mtce<sup>[3]</sup>.因此,为应对全球能源挑战并实现我国“双碳”目标,当前研究需要重点关注建筑领域的节能减碳.

中华人民共和国国家发展和改革委员会及住房和城乡建设部于2024年发布了《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》,方案要求加快推进既有建筑节能改造并明确了门窗改造作为重点内容之一.在建筑围护结构中,外窗的保温隔热性能较为薄弱,通过外窗损失的能耗约占建筑能耗的30%<sup>[4]</sup>,因此,提升外窗的热工性能对降低建筑碳排放、实现建筑节能具有重要意义.据统计,双层中空窗占据全球窗户市场最大的份额<sup>[5]</sup>.然而,随着建筑节能标准要求的不断提高,其热工性能逐渐难以满足节能规范对建筑外窗的要求.增加玻璃层数及空腔厚度虽可提升中空玻璃的热工性能,但会增加外窗的重量和厚度,需重新设计更换既有窗框,增加改造的成本,限制外窗改造的推广.

针对上述改造约束,Arasteh等<sup>[6]</sup>在1989年提出薄型三玻两腔中空玻璃的概念,即在传统中空玻璃内部插入厚度约1 mm的超薄玻璃,但受当时生产技术的限制未能落地推广.Li等<sup>[7]</sup>采用聚碳酸酯薄膜对传统中空玻璃进行改造,模拟发现相较传统中空玻璃,此改造方式可将哈尔滨某办公建筑的采暖及制冷总能耗降低16%,然而,聚碳酸酯薄膜存在加工技术不完善、耐久性及平整度不可控等问题.

近年来,电子产品的轻薄化发展推动了薄玻璃生产技术的进步,为薄玻璃在窗户市场的应用提供了支撑.Hart等<sup>[8]</sup>对比研究了薄型三层中空玻璃与

传统低辐射中空玻璃应用于美国不同气候区住宅的节能潜力,发现其在供暖主导的明尼苏达州的节能潜力为16%、在温和气候下的华盛顿州为12%、在制冷主导的得克萨斯州为7%.Urbikain<sup>[9]</sup>研究了在建筑改造中将薄型三层中空玻璃与真空隔热板结合使用,模拟了在欧洲柏林寒冷气候下的建筑热传递,分析发现较改造前该系统可以降低66%的传热量.

上述研究证明了薄型中空玻璃在既有建筑改造中具有诸多潜在优势,其尺寸与双层中空玻璃相近,不需更换既有窗框,能降低改造难度及成本,便于推广应用.此外,超薄玻璃的增加为涂覆低辐射涂层提供了更多的位置,可进一步改善玻璃系统的热工性能.然而,现有研究对薄型中空玻璃热工性能的研究仍不充分,缺乏其在中国既有建筑改造方面的应用研究.

因此,本文对不同改造策略下的薄型中空窗热工性能开展研究,首先基于国际玻璃数据库进行聚类,获取用于外窗改造的典型玻璃样本,然后使用WINDOW、THERM、Optics软件建立薄型中空窗的二维有限元传热模型,模拟计算在既有窗框基础上,采用增加超薄玻璃、涂覆低辐射涂层、填充惰性气体等方式改造后薄型中空窗的热工性能参数,并通过实测对薄型中空玻璃传热模型的准确性进行验证,而后,使用E-FAST敏感性分析方法量化不同改造因素对玻璃系统热工性能的影响,并对薄型中空窗改造应用的经济性进行分析.

## 1 模型建立

### 1.1 典型中空窗模型

根据现行规范《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)<sup>[10]</sup>和《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规

程》(JGJ/T 151—2008)<sup>[11]</sup>以及相关研究<sup>[12-13]</sup>统计,本研究以6 mm玻璃+12 mm气体+6 mm玻璃为中空玻璃结构基准。根据对中国建筑门窗市场主流产品型号<sup>[14]</sup>的调研,本研究以65系内开断桥隔热铝合金窗框为典型窗框。因此,本研究的基准外窗结构为双层中空玻璃加65系断桥铝窗框,见图1。

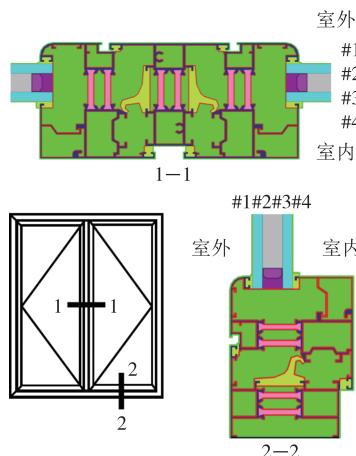


图1 基准中空窗结构图

Fig.1 Structure diagram of reference hollow window

本研究使用THERM软件建立窗框的传热模型,采用WINDOW软件建立中空玻璃系统的传热模型,并将窗框与玻璃模型相结合以计算整窗的传热系数U值和太阳得热系数 $C_{\text{SHGC}}$ (solar heat gain coefficient, SHGC)。其中,计算边界条件依据《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程》(JGJ/T 151—2008)<sup>[11]</sup>的要求,见表1。U值的计算采用冬季标准条件, $C_{\text{SHGC}}$ 的计算采用夏季标准条件,此外,外窗周边框的室外对流换热系数 $h_{c,\text{out}}$ 取8 W/(m<sup>2</sup>·K),周边框附近玻璃边缘(65 mm内)的室外对流换热系数 $h_{c,\text{out}}$ 取12 W/(m<sup>2</sup>·K)。计算得到的基准中空玻璃及整窗的传热系数U值、太阳得热系数 $C_{\text{SHGC}}$ 及可见光透射率 $T_{\text{vis}}$ 如表2所示。

表1 模拟计算边界条件

Tab.1 Boundary conditions for simulation calculation

参数	冬季标准	夏季标准
室内空气温度 $T_{\text{in}}/^\circ\text{C}$	20	25
室外空气温度 $T_{\text{out}}/^\circ\text{C}$	-20	30
室内对流换热系数 $h_{c,\text{in}}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	3.6	2.5
室外对流换热系数 $h_{c,\text{out}}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	16	16
太阳辐射照度 $I_s/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	0	500

## 1.2 典型玻璃模型

### 1.2.1 玻璃样本来源

为涵盖不同玻璃厂家产品间的共通和差异,本

表2 基准中空玻璃及整窗性能参数

Tab.2 Performance parameters of reference insulating glass and whole window

中空玻璃及整窗类型	$U/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	$C_{\text{SHGC}}$	$T_{\text{vis}}$
透明中空玻璃	2.663	0.738	0.802
#2低辐射中空玻璃	1.692	0.430	0.665
65系透明中空外窗	3.158	0.462	0.483
65系低辐射中空外窗	2.768	0.277	0.401

研究根据国际玻璃数据库(IGDB)进行分析并开展聚类以确定玻璃类型。IGDB数据库中不同透明玻璃产品间光谱数据相近,因此,本研究主要统计了低辐射玻璃产品的光谱数据。根据IGDB数据文本格式<sup>[15]</sup>以及《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程》(JGJ/T 151—2008)<sup>[11]</sup>对玻璃数据的要求,本研究对以上光谱数据进行了标准化处理,并采用线性插值法补全缺失数据,最终得到270组波长范围在0.3~25 μm的低辐射玻璃的光谱数据。

### 1.2.2 典型玻璃类型聚类

对上述玻璃光谱数据进行聚类,以确定改造用典型玻璃类型,本研究采用层次聚类法<sup>[16]</sup>与K-means算法<sup>[17-18]</sup>对270组光谱数据进行聚类分析。首先,采用基于平方欧氏距离的组间联接法进行层次聚类,通过谱系图评估各数据集的分组情况,根据组内个体数目及组间差异,确定了现有的低辐射玻璃产品可分为7类。然后,采用K-means算法,以聚类数为7进行迭代,得到7类低辐射玻璃在波长范围0.3~25 μm内的透射率及前、后表面反射率共9 702个详细光谱数据。7类低辐射玻璃在300~2 500 nm(紫外、可见光、近红外)范围内的透射率曲线如图2所示,在紫外波段③④透射率较高、①⑤透射率较低;在可见光波段③④⑥透射率较高、①⑦透射率较低;在近红外波段③④②透射率较高、⑤①透射率较低。本研究以此7类低辐射玻璃作为代表市场上现有低辐射玻璃的典型样本。

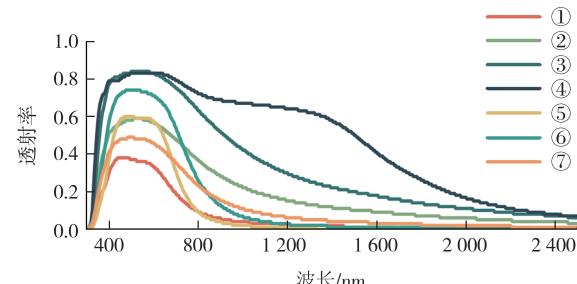


图2 7类低辐射玻璃透射率曲线

Fig.2 Transmittance curves of seven types of low-E glass

本研究使用 Optics 软件建立了 7 个典型低辐射玻璃模型并计算了对应的光学性能参数, 见表 3, 本研究采用可见光透射率与太阳辐射透射率的比值 ( $T_{\text{vis}}/T_{\text{sol}}$ )<sup>[19]</sup> 评估外窗玻璃材料的光热解耦性能。分析 7 种典型低辐射玻璃的光学性能参数发现①⑤ 具有很强的光热解耦能力 ( $T_{\text{vis}}/T_{\text{sol}}$  大于 2.08<sup>[20]</sup>)、⑥⑦ 具有较好的光热解耦能力 ( $T_{\text{vis}}/T_{\text{sol}}$  大于或接近 1.8<sup>[19]</sup>)、②③④ 光热解耦能力表现一般 ( $T_{\text{vis}}/T_{\text{sol}}$  小于 1.8)。

表 3 典型低辐射玻璃光学性能参数

Tab.3 Optical performance parameters of typical low-E glass

序号	$E_f$	$E_b$	$T_{\text{sol}}$	$T_{\text{vis}}$	$T_{\text{vis}}/T_{\text{sol}}$
①	0.844	0.038	0.165	0.351	2.127
②	0.844	0.058	0.365	0.578	1.584
③	0.844	0.113	0.579	0.834	1.440
④	0.844	0.113	0.692	0.829	1.198
⑤	0.844	0.033	0.246	0.582	2.366
⑥	0.844	0.038	0.359	0.725	2.019
⑦	0.844	0.095	0.262	0.471	1.798

注: 用于改造研究的无低辐射涂层的玻璃样本选择选择 NFRC 编号 8203 的透明玻璃, 其玻璃光学参数为: 前表面发射率  $E_f=0.84$ 、后表面发射率  $E_b=0.84$ 、太阳光透射率  $T_{\text{sol}}=0.847$ 、可见光透射率  $T_{\text{vis}}=0.902$ 。

### 1.3 薄型中空玻璃改造策略

根据《建筑玻璃应用技术规程》(JGJ 113—2015)<sup>[21]</sup> 中对三玻两腔中空玻璃厚度的规定, 本研究在中空玻璃系统总厚度为 24 mm 的约束下, 室内外侧玻璃的厚度分别选取 4、5、6、7 mm, 内置 1 mm 超薄玻璃后, 对应的空腔间距分别为 7.5、6.5、5.5 和 4.5 mm, 如图 3 所示。针对上述结构, 可通过改变低辐射涂层数目、位置、种类以及空腔填充介质等方式提升薄型中空玻璃的热工性能。为明确不同方式以单一形式或组合形式对中空玻璃热工性能的影响, 本文以全交叉的方式进行组合, 确定了 6 种改造策略, 见表 4。

## 2 模型验证

为验证薄型中空玻璃传热模型的准确性, 本研究在长沙地区开展薄型中空玻璃实物样品的热工性能测试, 并将实测结果与模拟结果进行对比分析, 以验证模拟计算的准确性。薄型中空玻璃实物样品的传热系数模拟值为 1.188 W/(m<sup>2</sup>·K), 太阳得热系数模拟值为 0.363。

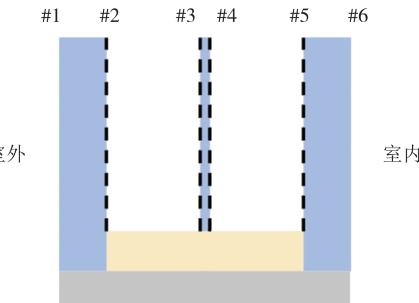


图 3 薄型中空玻璃结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of thin insulating glass structure

表 4 薄型中空玻璃系统改造策略

Tab.4 Retrofitting strategy for thin insulating glass system

策略编号	具体改造策略
1	基于典型透明中空玻璃结构基准, 外层玻璃厚度分别取 4、5、6、7 mm, 并于空腔插入 1 mm 超薄玻璃
2	涂覆单个低辐射涂层(位置:#2 或 #3 或 #4 或 #5; 种类: ① 或 ② 或 ③ 或 ④ 或 ⑤ 或 ⑥ 或 ⑦), 空腔填充空气
3	涂覆两个同种类低辐射涂层(位置: #24 或 #23 或 #25 或 #35 或 #45; 种类: ① 或 ② 或 ③ 或 ④ 或 ⑤ 或 ⑥ 或 ⑦), 空腔填充空气
4	涂覆两个不同种类低辐射涂层(位置: #24 或 #23 或 #25 或 #35 或 #45; 种类: 7 种涂层两两组合共 42 种, 其中组合①②、组合②①分别表示外侧涂层为①内侧涂层为②和外侧涂层为②内侧涂层为①), 空腔填充空气
5	基于策略 2、3、4, 空腔填充氩气
6	基于策略 2、3、4, 空腔填充氮气

### 2.1 传热系数实验验证

本研究遵循《建筑外门窗保温性能检测方法》(GB/T 8484—2020)<sup>[22]</sup>, 基于稳态传热原理, 采用标定热箱装置检测薄型中空玻璃的传热系数, 如图 4 所示, 当传热过程达到稳定后装置每隔 30 min 采集一组参数, 本研究共采集 12 组参数, 试件的传热系数按式(1)计算, 各参数取 12 次稳态的平均值, 薄型中空玻璃的传热系数实测值为 1.194 W/(m<sup>2</sup>·K), 实测值与模拟值间的相对误差为 0.50%, 因此, 本研究模拟计算的传热系数准确。

$$U =$$

$$\frac{Q - M_1 \times \Delta\theta_1 - M_2 \times \Delta\theta_2 - S \times M_3 \times \Delta\theta_3 - \varphi_{\text{edge}}}{A \times (T_h - T_c)} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为热箱加热装置的加热功率;  $M_1$  为热箱壁热流系数;  $\Delta\theta_1$  为热箱壁内外表面面积加权平均温差;  $M_2$  为试件框热流系数;  $\Delta\theta_2$  为试件框冷热侧表面面积加权平均温差;  $S$  为填充板面积;  $M_3$  为填充板热导率;  $\Delta\theta_3$  为填充板冷热侧表面的平均温差;  $\varphi_{\text{edge}}$  为试件

与填充板的边缘线传热量;  $A$  为试件面积;  $T_h$  为热侧空气温度;  $T_c$  为冷侧空气温度.

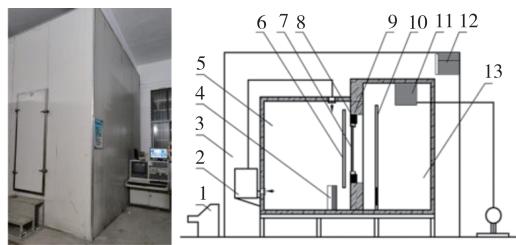


图4 薄型中空玻璃传热系数测试装置  
Fig.4 Schematic diagram of heat transfer coefficient testing device for thin insulating glass

图4 薄型中空玻璃传热系数测试装置  
Fig.4 Schematic diagram of heat transfer coefficient testing device for thin insulating glass

## 2.2 太阳得热系数实验验证

本研究使用便携式窗体量热计(portable window energy meter)进行薄型中空玻璃太阳得热系数的实测,如图5所示.此装置通过多个热流计以及小型空调系统的协同控制测量玻璃的太阳得热系数,该装置由室内模块及室外模块两部分组成,两模块与计算机通过无线电通信进行控制及数据采集,该装置的测试结果经ISO 9050的验证,当太阳入射角小于45°,室外气流速度小于5 m/s时,室外模块的不确定度为±0.04<sup>[23]</sup>.本研究测试共采集40组测试结果并取其平均值,得到薄型中空玻璃太阳得热系数的实测值为0.353,实测值与模拟值间的相对误差为-2.83%,因此,本研究模拟计算的太阳得热系数较为准确.综上,本研究建立的薄型中空玻璃的传热模型准确.



图5 薄型中空玻璃太阳得热系数  $C_{SHGC}$  实测  
Fig.5 Measurement of  $C_{SHGC}$  of thin insulating glass

## 3 结果分析

### 3.1 热工性能分析

本研究采用WINDOW对不同改造策略下玻璃系统的传热系数  $U$  值及太阳得热系数  $C_{SHGC}$  进行计

算,并建立典型窗框条件下描述玻璃系统与整窗热工性能参数之间关系的函数模型,以对不同改造策略下的整窗性能参数进行简便计算.

实施策略1,于空腔分别填充空气、氩气及氮气,分析空腔填充介质及外层玻璃厚度对薄型中空玻璃系统热工性能的影响,并确定后续研究的薄型中空玻璃结构.各中空玻璃热工性能参数如图6所示,横坐标表示了在基准中空玻璃24 mm总厚度的约束条件下,外层玻璃厚度以1 mm为步长、由4 mm递增至7 mm的传统中空玻璃及薄型中空玻璃结构.对空腔填充不同介质的各组薄型透明中空玻璃的热工参数进行分析,发现改变空腔填充介质对  $C_{SHGC}$  影响很小,但能有效降低玻璃系统的  $U$  值,空腔间隔越小时,填充介质对玻璃系统  $U$  值的影响效果越显著.对空腔填充相同介质的各组中空玻璃的热工参数进行分析,发现在透明中空玻璃空腔内插入中置薄玻,可有效降低玻璃系统  $U$  值,空腔间隔越大时,插入中置薄玻对降低玻璃系统  $U$  值的效果越显著.当玻璃系统的总厚度不变时,若减少外层玻璃的厚度,则空腔保温层厚度增大,从而使玻璃系统的  $U$  值减小.考虑玻璃系统的热工性能表现,本研究选择4 mm玻璃+7.5 mm空腔+1 mm玻璃+7.5 mm空腔+4 mm玻璃的薄型中空玻璃结构进行后续改造策略的实施.

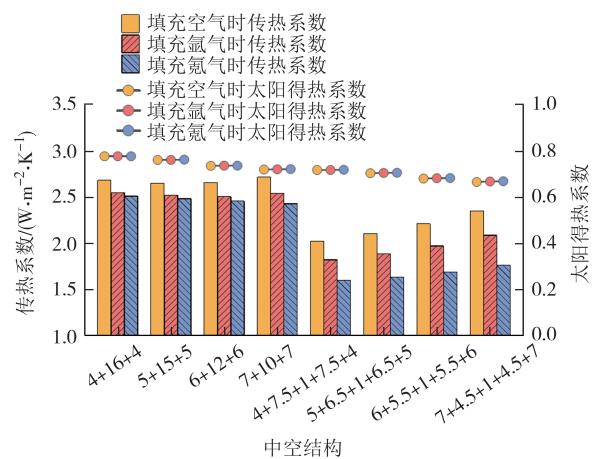


图6 不同外层玻璃厚度下中空玻璃系统热工性能  
Fig.6 Thermal performance of insulating glass system under different thicknesses of outer glass

基于以上薄型中空玻璃结构实施策略2,得到分别在#2、#3、#4、#5四组位置涂覆单个涂层的薄型中空玻璃的热工性能参数,如图7所示,涂覆单个涂层时,涂层位于#4或#5时  $U$  值较低,涂层位于#2或#4时  $C_{SHGC}$  较低,涂层种类为①或⑤或⑥(表面发射率较

低、 $T_{vis}/T_{sol}$ 较高)时  $U$  值较低,涂层种类为①或⑤或⑦(太阳辐射透射率较低)时  $C_{SHGC}$  较低,涂层种类为③或④(太阳辐射透射率较高)时  $C_{SHGC}$  较高.

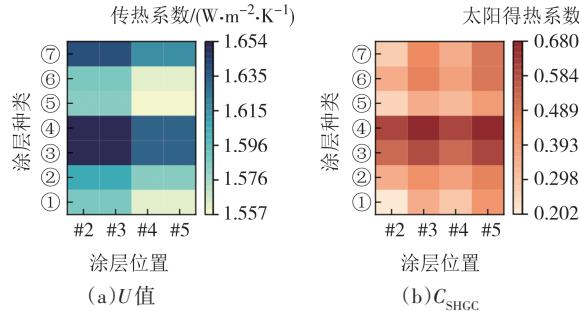


图7 涂覆单个低辐射涂层的薄型中空玻璃系统热工性能

Fig.7 Thermal performance of thin insulating glass system  
coated with one low-E coating

实施策略3,得到分别在#24、#23、#25、#35、#45五组位置涂覆两个相同种类涂层的薄型中空玻璃的热工性能参数,如图8所示,涂覆两个相同种类涂层时,涂层位于#24或#25或#35时  $U$  值较低,涂层位于#24或#23或#25时  $C_{SHGC}$  较低.对传热模型进行分析发现,空腔两侧玻璃间的换热主要以辐射形式进行,低辐射涂层在红外波段具有高反射率,可减少玻璃间的辐射换热,进而降低玻璃系统  $U$  值,当两个涂层涂覆于同一空腔时,其减少玻璃系统辐射换热的能力受限,因此,涂覆两个涂层时应避免两涂层涂覆于同一空腔内.

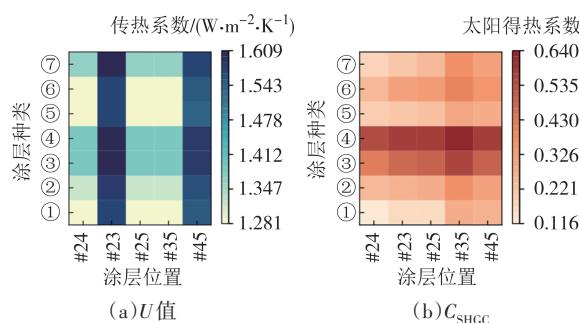


图8 涂覆两个同种类低辐射涂层的薄型中空玻璃  
系统热工性能

Fig.8 Thermal performance of thin insulating glass system  
coated with two same types of low-E coatings

实施策略4,得到分别在#24、#23、#25、#35、#45五组位置涂覆两个不同种类涂层的薄型中空玻璃系统热工性能参数,如图9所示,与策略3结果进行对比分析发现,热工性能参数的最值均出现在涂覆的两个涂层种类相同的条件下.

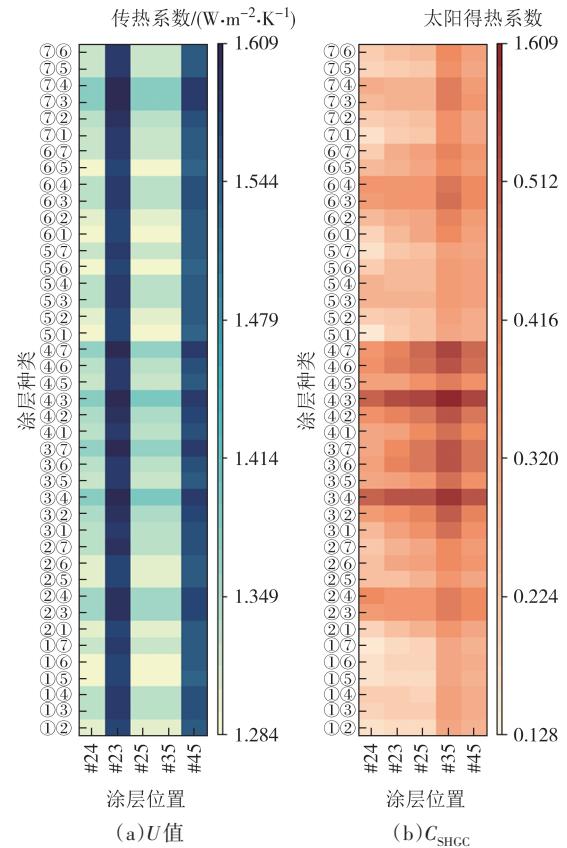


图9 涂覆两个不同种类低辐射涂层的薄型  
中空玻璃系统热工性能

Fig.9 Thermal performance of thin insulating glass system  
coated with two different types of low-E coatings

实施策略5与策略6,分别得到空腔填充氩气与空腔填充氪气时涂覆单个及两个低辐射涂层的薄型中空玻璃系统热工性能参数,分析发现涂层种类与位置对热工性能参数作用规律与填充空气时相同,相较于填充空气,填充氩气可进一步降低  $U$  值(17%~24%),但对  $C_{SHGC}$  影响较弱(1%~7%);相较于填充氪气,填充氪气可进一步降低  $U$  值(23%~35%),对  $C_{SHGC}$  影响较弱(1%~8%).

策略2至策略6(即空腔填充不同介质)下玻璃系统热工性能参数最值及其相应的涂层配置策略见表5,对结果进行对比分析发现,填充惰性气体能够增强低辐射涂层对玻璃系统热工性能的影响,其中氪气的作用效果优于氩气.此外,不同低辐射涂层在调节玻璃系统热工性能的同时,还会对室内采光效果产生影响.可见光透射率是影响外窗自然采光效果的重要因素:高可见光透射率的玻璃系统能够有效提高自然光的利用率,提高室内环境照度;低可见光透射率的玻璃系统有助于减轻眩光对室内光环境

舒适度的不利影响,提高室内光线的均匀度。分析策略2至策略6中不同配置薄型中空玻璃的可见光透射率发现,玻璃系统的可见光透射率主要取决于低辐射涂层的种类特性,而受空腔填充介质及涂层位

置的影响较小;通过改变涂层种类的组合方式,薄型中空玻璃的可见光透射率能够在0.115~0.730范围内调控,具有较强的光学性能可调性,能够满足不同场景对采光效果的需求。

表5 空腔填充不同介质时玻璃系统热工性能参数最值及其涂层配置策略

Tab.5 Max/min thermal performance of glass system with different cavity fillings and coating configuration strategies

涂层数目	参数	涂层位置,涂层种类	填充空气	填充氩气	填充氮气
单个涂层	$U_{\min}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	#5,⑤	1.557	1.260	0.908
	$U_{\max}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	#2,④	1.654	1.379	1.067
	$C_{\text{SHGCmin}}$	#2,①	0.202	0.194	0.184
	$C_{\text{SHGCmax}}$	#5,④	0.679	0.682	0.686
两个涂层	$U_{\min}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	#25,⑤	1.281	0.975	0.631
	$U_{\max}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	#23,④	1.609	1.321	0.993
	$C_{\text{SHGCmin}}$	#24,①	0.117	0.109	0.100
	$C_{\text{SHGCmax}}$	#35,④	0.640	0.644	0.648

结合以上不同改造策略中热工性能参数达到最值时的薄型中空玻璃改造方案,建立基于既有窗框的薄型中空外窗传热模型,并通过模拟计算得到了各改造方案下薄型中空窗的热工性能参数。不同玻璃配置的薄型中空窗与基准中空窗热工性能的比较见表6。同时,本研究建立了描述薄型中空玻璃系统

热工性能参数与整窗热工性能参数之间关系的函数模型,该函数以玻璃热工性能参数为自变量x,以整窗热工性能参数与玻璃热工性能参数的比值为因变量y,如图10所示,函数模型公式如式(2)、式(3)所示。通过该函数可对基于既有窗框改造的薄型中空窗的热工性能参数进行计算。

表6 薄型中空窗与基准中空窗热工性能对比

Tab.6 Comparison of thermal performance between thin hollow windows and benchmark hollow windows

玻璃系统配置(空腔填充介质;涂层配置)	$U/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}), C_{\text{SHGC}}$	较透明整窗降低百分比/%	较低辐射整窗降低百分比/%
氮气;#5,⑤	$U_{\min}=2.073$	34.39	25.14
空气;#2,④	$U_{\max}=2.474$	21.66	10.62
氮气;#2,①	$C_{\text{SHGCmin}}=0.127$	72.51	54.15
氮气;#5,④	$C_{\text{SHGCmax}}=0.429$	7.14	54.87
氮气;#25,⑤	$U_{\min}=1.920$	39.20	30.64
空气;#23,④	$U_{\max}=2.450$	22.42	11.49
氮气;#24,①	$C_{\text{SHGCmin}}=0.076$	83.55	72.56
氮气;#35,④	$C_{\text{SHGCmax}}=0.407$	11.90	46.93

$$t_u = 2.15 \times s_u^{(-0.74)} \quad (2)$$

式中: $s_u$ 为薄型中空玻璃传热系数; $t_u$ 为薄型中空整窗传热系数与薄型中空玻璃传热系数的比值。

$$q_{\text{SHGC}} = 1.079 - 0.103 \times (1 - e^{\frac{-p_{\text{SHGC}}}{0.306}}) - 0.36 \times (1 - e^{\frac{-p_{\text{SHGC}}}{0.061}}) \quad (3)$$

式中: $p_{\text{SHGC}}$ 为薄型中空玻璃太阳得热系数; $q_{\text{SHGC}}$ 为薄型中空整窗太阳得热系数与薄型中空玻璃太阳得热系数的比值。

### 3.2 敏感性分析

敏感性分析是研究输入参数对输出结果影响程

度的分析方法。针对非线性非单调模型的敏感性分析常使用基于方差的分析法<sup>[24]</sup>,E-FAST法是由Saltelli等<sup>[25]</sup>在FAST法(Fourier amplitude sensitivity test)基础上结合Sobol法的优点改进得到的基于方差的全局敏感性定量分析方法。该方法能够评估单个参数以及各参数间相互作用对输出的直接及综合影响。E-FAST法通过两个指标表征参数敏感性:主效应指标反映单个参数对输出的直接影响,总效应指标反映参数直接及间接影响的综合效应。两个指标的差异程度反映参数间相互作用的强弱,差异越大表明参数间的相互作用越显著。

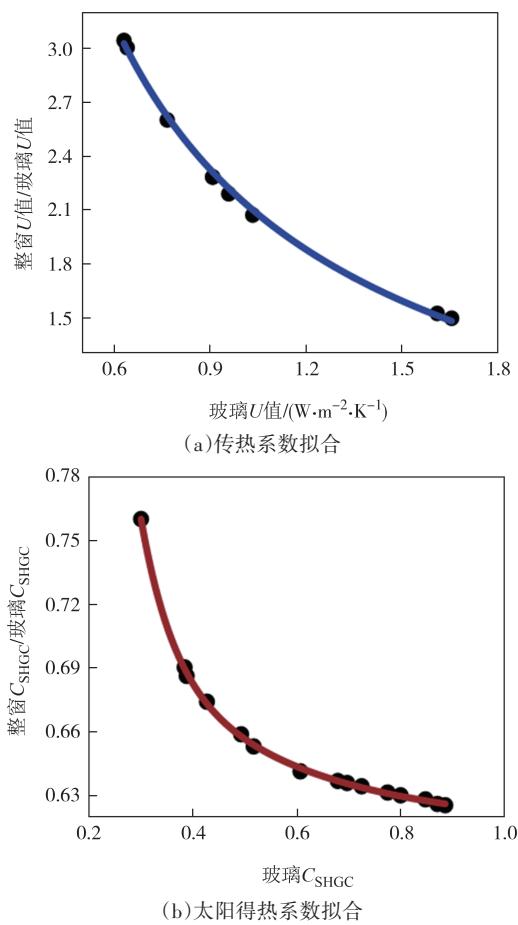


图 10 玻璃与整窗热工性能参数的函数模型

Fig.10 Function model of thermal performance parameters of glass and whole window

本研究采用 E-FAST 法分析不同改造参数对中空玻璃热工性能的影响, 并基于 SimLab 敏感性分析软件, 通过计算得到了表征不同参数分别对传热系数及太阳得热系数影响程度的主效应指标  $S_i$  和总效应指标  $S_i^\tau$ , 其计算公式分别如式(4)、式(5)所示, 具体结果如表 7 所示。分析发现: 在单个涂层和两个涂层条件下, 空腔填充介质均为影响中空玻璃传热系数的关键因素, 其总效应指标分别达到 0.968 及 0.852; 对于中空玻璃太阳得热系数, 在单个涂层条件下主要受涂层种类影响(总效应指标为 0.688), 而在两个涂层条件下主要受涂层位置影响(总效应指标为 0.627)。通过对比主效应指标与总效应指标的差异, 发现各参数间存在显著的相互作用。以两个涂层条件为例, 空腔填充介质对太阳得热系数的主效应指标仅为 0.026, 而其总效应指标提升至 0.409, 表明尽管空腔填充介质对太阳得热系数的独立影响较弱, 但通过参数间的相互作用, 其对太阳得热系数的

综合影响显著增强。综上所述, 薄型中空玻璃各改造参数间的相互作用能够显著提升其对中空玻璃热工性能的影响, 因此在制定改造方案时, 需充分考虑不同参数组合的综合效果。

$$S_i = \frac{V_i}{V(Y)} \quad (4)$$

式中:  $S_i$  为参数  $x_i$  的主效应指标, 指参数  $x_i$  对  $V(Y)$  的直接贡献;  $V_i$  为参数  $x_i$  对总方差  $V(Y)$  的影响程度;  $V(Y)$  为输出结果的总方差。

$$S_i^\tau = \frac{V(Y) - V_{-i}}{V(Y)} \quad (5)$$

式中:  $S_i^\tau$  为参数  $x_i$  的总效应指标, 指参数  $x_i$  以及参数  $x_i$  与其他参数的相互作用对  $V(Y)$  的综合贡献;  $V_{-i}$  为不包含参数  $x_i$  的其他参数方差之和。

表 7 改造参数对玻璃热工性能的主效应和总效应指标

Tab.7 Main effect and total effect indexes of renovation parameters on thermal performance of glass

涂层数量	参数	传热系数		太阳得热系数	
		$S_i$	$S_i^\tau$	$S_i$	$S_i^\tau$
单个涂层	涂层位置	0.003	0.067	0.211	0.412
	涂层种类	0.017	0.080	0.488	0.688
	空腔填充	0.867	0.968	0.007	0.145
两个涂层	涂层位置	0.101	0.212	0.133	0.627
	涂层种类	0.004	0.113	0.267	0.626
	空腔填充	0.701	0.852	0.026	0.409

### 3.3 成本经济性分析

本研究建立的薄型中空玻璃与传统双层中空玻璃具有相同的厚度, 且其重量相较于传统双层中空玻璃降低了约 25%, 其尺寸与窗框承重要求可以与既有窗框实现良好的匹配。相较于更换外窗整体的改造方式, 保留既有窗框只更换玻璃系统的改造方式在成本经济性方面具有一定的优势。

对外窗生产的主要材料价格进行调研, 综合外窗行业产品信息及市场调研结果, 确定不同材料近一年的平均市场价格, 材料种类及市场均价见表 8。薄型中空玻璃的主要生产材料包括外侧玻璃(低辐射玻璃、白玻)、中置超薄玻璃以及惰性气体, 以本研究建立的薄型中空玻璃为例, 根据不同的配置其传热系数变化范围为 1.26~0.63 W/(m²·K), 其成本范围约 65.65~82.08 元, 三玻两腔透明中空玻璃成本约为 98.187 元, 三玻两腔低辐射中空玻璃成本约为 108.26 元。应用薄型中空玻璃改造的方式减少了更

换窗框的成本,以本研究建立 $1.2\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 的65系断桥铝窗框为例,其型材成本约为486.56元。相较于更换整窗,使用薄型中空玻璃改造外窗的方式可减少约83%~87%的成本。并且,通过改变薄型中空玻璃的配置,可以使薄型中空窗热工性能满足不同气候区的外窗热工性能要求。

**表8 外窗主要材料种类及市场均价**

**Tab.8 Types and average market prices of main production materials for exterior windows**

材料种类	市场均价
6 mm白玻	28.38 元/ $\text{m}^2$
6 mm低辐射玻璃	37.11 元/ $\text{m}^2$
4 mm白玻	18.37 元/ $\text{m}^2$
4 mm低辐射玻璃	26.55 元/ $\text{m}^2$
1 mm白玻	12.01 元/ $\text{m}^2$
铝型材	25 578.03 元/ $\text{t}$
氩气	1 077.58 元/ $\text{t}$
氪气	404.18 元/ $\text{m}^3$

## 4 结论

本文提出了采用薄玻璃在既有建筑外窗窗框约束下改造提升外窗热工性能的方法。首先,结合层次聚类和K-means聚类法对国际玻璃数据库的低辐射玻璃进行了聚类,确定了7种典型类型。而后,基于WINDOW软件计算了采用不同低辐射涂层配置、不同空腔填充介质等单一或组合改造策略下的薄型中空窗的热工性能,并通过薄型中空玻璃的热工性能实测,验证模拟计算的准确性。最后,采用E-FAST敏感性分析法量化了影响薄型中空玻璃热工性能的关键参数,并对薄型中空玻璃在外窗改造的成本经济性进行分析。主要结论如下:

1)薄型中空玻璃的传热系数及太阳得热系数的实测值与模拟值间的相对误差分别为0.50%及-2.83%,本研究建立的薄型中空玻璃传热模型准确。

2)采用薄玻璃改造后的薄型中空窗传热系数可降至 $1.92\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,相比传统低辐射中空窗,降低了30.64%。

3)空腔填充介质和低辐射涂层种类分别是影响薄型中空玻璃的传热系数和太阳得热系数的关键参数,其总效应指标分别为0.968和0.688。

4)相较于更换整窗,使用薄型中空玻璃进行外窗改造可降低约83%~87%的成本。

## 参考文献

- [1] GONZÁLEZ-TORRES M, PÉREZ-LOMBARD L, CORONEL J F, et al. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers[J]. Energy Reports, 2022, 8:626–637.
- [2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2024(农村住宅专题)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2024.
- [3] LIU L, TAM V W Y, ALMEIDA L, et al. Dynamically assessing life cycle energy consumption of buildings at a national scale by 2020: an empirical study in China[J]. Energy and Buildings, 2023, 296:113354.
- [4] D&R International, Ltd. 2011 Buildings energy data book [M]. USA: US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, 2011:166–227.
- [5] CUCE E, RIFFAT S B. A state-of-the-art review on innovative glazing technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41:695–714.
- [6] ARASTEH D, SELKOWITZ S, WOLFE J R. The design and testing of a highly insulating glazing system for use with conventional window systems[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1989, 111(1):44–53.
- [7] LI N, MENG Q L, ZHAO L H, et al. Thermal performance study of multiple thermal insulating glazings with polycarbonate films as interval layers[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107159.
- [8] HART R, SELKOWITZ S, CURCIJA C. Thermal performance and potential annual energy impact of retrofit thin-glass triple-pane glazing in US residential buildings[J]. Building Simulation, 2019, 12(1):79–86.
- [9] URBIAKIN M K. Energy efficient solutions for retrofitting a residential multi-storey building with vacuum insulation panels and low-E windows in two European climates[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 269:121459.
- [10] 民用建筑热工设计规范:GB 50176—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.  
Code for thermal design of civil building: GB 50176—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [11] 建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程:JGJ/T 151—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.  
Calculation specification for thermal performance of windows, doors and glass curtain-walls: JGJ/T 151—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [12] 陈德敏,刘莹惠,李嘉琪,等. 低辐射中空玻璃对办公建筑能耗的影响[J]. 科学技术与工程,2022,22(14): 5744–5751.  
CHEN D M, LIU Y H, LI J Q, et al. Influence of low emissivity double-layer insulating glass on energy consumption of office buildings [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14):5744–5751. (in Chinese)
- [13] 肖敏,张云艳,李翰宇,等. 基于BIM的长沙市城镇老旧小区

- 既有住宅外墙和外窗节能改造研究[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(5):111–117.
- XIAO M, ZHANG Y Y, LI H Y, et al. Energy saving retrofitting of existing residential exterior walls and windows based on BIM in old urban communities in Changsha [J]. Building Energy Efficiency, 2022, 50(5):111–117. (in Chinese)
- [14] 茜彦辉, 刘万奇. 基于不同措施的建筑外窗传热系数研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(9):20–24.
- QIAN Y H, LIU W Q. Research on thermal transmittance of building windows based on different measures[J]. New Building Materials, 2020, 47(9):20–24. (in Chinese)
- [15] VERSLUIS R, POWLES R, YAZDANIAN M, et al. International glazing database: data file format [R]. San Francisco, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2012.
- [16] TAN P N, STEINBACH M, KARPATNE A, et al. Introduction to data mining[R]. New Delhi, India: Indian Nursing Council, 2018.
- [17] 周成龙, 陈玉明, 朱益冬. 粒K均值聚类算法[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(13):317–324.
- ZHOU C L, CHEN Y M, ZHU Y D. Granular K-means clustering algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(13): 317–324. (in Chinese)
- [18] SAXENA A, PRASAD M, GUPTA A, et al. A review of clustering techniques and developments[J]. Neurocomputing, 2017, 267: 664–681.
- [19] PU J H, SHEN C, WANG J L, et al. Near-infrared absorbing glazing for energy-efficient windows: a critical review and performance assessments from the building requirements [J]. Nano Energy, 2023, 110 :108334.
- [20] CARBONI M, CARRAVETTA M, ZHANG X L, et al. Efficient NIR light blockage with matrix embedded silver nanoprisms thin films for energy saving window coating[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016, 4(8):1584–1588.
- [21] 建筑玻璃应用技术规程: JGJ 113—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Technical specification for application of architectural glass: JGJ 113—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [22] 建筑外门窗保温性能检测方法: GB/T 8484—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
Test method for thermal insulating performance for building exterior doors and windows: GB/T 8484—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [23] MARINOSKI D L, GÜTHS S, LAMBERTS R. Development of a calorimeter for determination of the solar factor of architectural glass and fenestrations[J]. Building and Environment, 2012, 47: 232–242.
- [24] PANG Z H, O' NEILL Z, LI Y F, et al. The role of sensitivity analysis in the building performance analysis:a critical review[J]. Energy and Buildings, 2020, 209:109659.
- [25] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN K P S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output[J]. Technometrics, 1999, 41(1):39–56.