

热工参数可变的被动太阳能窗研究

贾纪康, 司鹏飞, 戎向阳, 石利军, 杨正武

(中国建筑西南设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 针对被动太阳能窗白天太阳得热要求的太阳总透射比大和夜间防止失热希望的传热系数小的矛盾问题, 开发了一种热工参数可变的被动太阳能窗, 实现了窗户传热系数 U 和太阳得热系数 $SHGC$ 阶跃可变。采用 WINDOW 和 THERM 软件对窗户的热工性能进行了模拟与优化, 给出了不同玻璃组合形式、窗框型材及窗框比下的热工性能参数, 并通过第三方检测对模拟结果进行了验证。结果表明: 模拟相对误差约为 4%, 可满足工程应用精度要求; 对于热工参数可变的被动太阳能窗(G3 玻璃系统), 白天内窗扇开启时, $SHGC$ 升高至 0.69, 进入室内的太阳辐射得热增加 82%, 可有效提高太阳辐射得热量; 夜晚内窗扇关闭时, 窗户 U 值降低至 $1.66 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 可有效减少窗户夜晚的散热量。

关键词: 被动太阳能; 建筑供暖; 太阳能窗; 太阳能得热系数

中图分类号: TU111.19; TK512

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0904-06

Development of passive solar window with variable thermal parameters

JIA Jikang, SI Pengfei, RONG Xiangyang, SHI Lijun, YANG Zhengwu

(China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Aiming at the contradiction between the high total solar transmittance required by the passive solar window for solar heat gain during the day and the small heat transfer coefficient required to prevent heat loss at night, a passive solar window with variable thermal parameters was developed to achieve a step change in the heat transfer coefficient U and the solar heat gain coefficient $SHGC$ of the window. WINDOW and THERM software were used to simulate and optimize the thermal performance of the window, and the thermal performance parameters under different glass combination forms, window frame profiles and window frame ratios were given. The simulation results were verified by third-party testing. The results show that the relative error of simulation is about 4%, which can meet the accuracy requirements of engineering applications. For passive solar window with variable thermal parameters (G3 glass system), when the window sashes are opened during the day, the $SHGC$ increases to 0.69, and the solar radiation entering the room increases by 82%, which means that the solar heat gain is effectively increased. When the window sashes are closed at night, the U is reduced to $1.66 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, which can effectively reduce the heat dissipation of the window at night.

Key words: passive solar energy; building heating; solar window; solar heat gain coefficient

被动太阳能建筑被认为是高原建筑最适宜的供暖方式^[1]。江亿等^[2]针对拉萨市的资源条件提出了在提升建筑围护结构性能的基础上, 被动太阳能技术优先的技术路线; 刘艳峰、杨婧等^[3-4]针对我国气候条件提出三级指标, 分析了不同地区各类被动太阳能采暖技术适宜性; 王登甲等^[5]针对大量被动太阳能示范建筑实测得出在采暖期过渡时段室温可达到 12°C 以上, 与传统建筑相比, 被动太阳能示范建筑节能率可达到 86%。

直接受益窗作为被动太阳能得热最有效的构件, 可利用进入室内太阳能的 $65\% \sim 70\%$ ^[6]。Levinson R, Oliveti G, Offiong 等^[7-9]分别研究了太阳能高度角、窗户位置和玻璃吸收率等对直接受益窗集热部件的影响。刘艳峰等^[10]对直接受益式太阳能建筑测试发现, 直接受益窗可提升室内平均温度和最高温度 3°C 和 7°C , 但室温温度波动较大, 这是由于传统窗户的热工参数固定不变(传热系数 U 、太阳得热系数 $SHGC$), 无法解决白天

收稿日期: 2021-04-07 修改稿日期: 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708532)

第一作者: 贾纪康(1994—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事建筑节能与可再生能源应用。E-mail: 18890356952@163.com

通信作者: 司鹏飞(1984—), 男, 工学博士/博士后, 高级工程师, 主要从事建筑节能与可再生能源应用。E-mail: 175987342@qq.com

太阳得热要求的太阳总透射比大和夜间防止失热希望的传热系数小的矛盾。基于此问题,冯雅、王登甲等^[11-12]均提出了采用外窗加设内置保温板或保温窗帘的方式;余庄等^[13]针对亚热带地区夏季需要隔热、冬季需要保暖的气候特点提出了气候适应性窗。

本研究团队提出了一种具有阶跃传热特性的透明围护结构^[14],该技术在“若尔盖县暖巢一号”项目中得到验证,具有良好的实际应用效果^[15]。通过对该工程评估后发现,由于外侧玻璃与墙体结合不严密,围护结构气密性难以保障,由此导致透明围护结构耗热量大,同时存在施工难度大,造价高等问题。鉴于上述问题,研究团队开发了一种热工参数可变的被动太阳能窗,其通过创新围护结构型材,将内窗扇、外窗扇一体化集成。本文将介绍该技术的原理与具体构造,并通过实测和模拟的方式对窗户的性能进行优化分析,对于工程应用具有一定的指导意义。

1 窗户构造与运行原理

1.1 窗户构造介绍

热工参数可变的被动太阳能窗构造如图1所示,其由内窗扇与外窗扇通过型材构造一体化组合而成。外窗扇分为固定窗扇和可外开窗扇,外窗扇采用6 mm单层透明玻璃,其特点是SHGC高,可有效增加进入室内的太阳辐射能;内窗扇采用内开式中空玻璃窗,构造为6 mm Low-E+12 mm 空气+6 mm 透明玻璃,其特点是保温性能好,可有效降低通过窗户散失的热量;整窗长度、宽度均为1.5 m,厚度为110 mm。

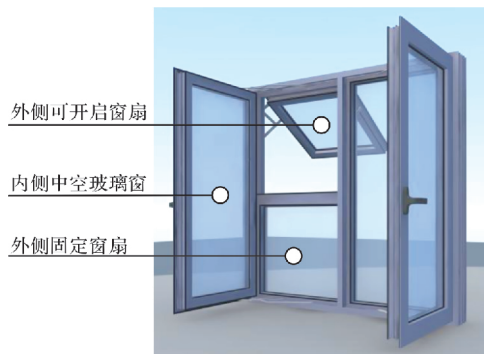


图1 热工参数可变的被动太阳能窗结构

Fig.1 Construction of passive solar window with variable thermal parameters

1.2 窗户运行原理

冬季,白天太阳辐射较强时,开启内窗扇,

大部分太阳辐射透过外侧单层玻璃进入室内,太阳得热系数高;夜晚关闭内窗扇,窗户热阻增大,与Low-E玻璃对中远红外辐射高反射特性同时作用,减少夜间通过窗户的失热量。夏季,炎热地区室内空调运行,关闭内、外窗扇,增加窗户热阻,防止室内冷量损失,同时可降低白天太阳得热系数,减少空调负荷;室外气候凉爽的地区同时开启内、外开窗扇,通过自然通风方式降低室内温度并保证室内空气质量。

2 窗户性能模拟及模型验证

本文主要采用劳伦斯伯克利实验室开发的WINDOW和THERM软件对产品性能进行模拟研究。窗户模型的建立需要WINDOW和THERM软件联合完成,具体流程如图2所示。WINDOW软件用于计算窗户U值、SHGC、遮阳和采光等参数,THERM软件采用二维有限元方法计算窗框等复杂建筑构件传热模拟^[16]。同时,通过实验测试对计算模型进行了验证,实验由具有工程检测资质的第三方检测机构进行。

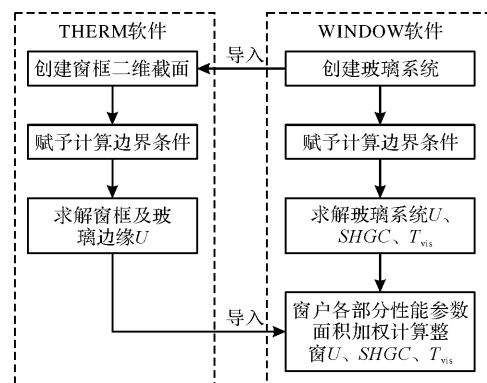


图2 窗户计算模型求解流程

Fig.2 Solution flow of window calculation model

2.1 窗户模型建立

WINDOW软件计算整窗的传热系数 U_t 时,将窗户分为窗框、玻璃中心和玻璃边缘三部分,分别计算各自的传热系数 U ,再以面积加权的方法计算 U_t 值, U_t 计算公式见式(1)。

$$U_t = \frac{\sum_i (U_{f(i)} \cdot A_{f(i)} + \sum_j U_{e(i,j)} \cdot A_{e(i,j)}) + \sum_j (U_{c(j)} \cdot A_{c(j)})}{A_t} \quad (1)$$

式中: U 为传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; A 为传热面积, m^2 ;下角标 t 表示窗户整体;下角标 $f(i)$ 表示第 i 部分窗框;下角标 $e(i,j)$ 表示第 i 部分窗框与

第 j 部分玻璃对应玻璃边缘;下角标 $c(j)$ 表示第 j 部分玻璃。

玻璃系统中心传热系数 U_c 计算由 WINDOW 软件完成,玻璃参数如表 1 所示。

表 1 玻璃参数
Tab. 1 Glass parameters

名称	导热系数 λ W/(m·k)	太阳辐射 透射率 T_{sol}	可见光 透射率 T_{vis}	内/外表 面辐射率 $E1/E2$
透明玻璃	1.0	0.771	0.884	0.840/0.840
Low-E 玻璃	1.0	0.642	0.857	0.068/0.840

玻璃系统边缘和窗框的传热系数计算需要在 THERM 软件中计算,其窗户边框的二维截面模型如图 3 所示。玻璃系统由 WINDOW 软件经过计算后导入 THERM 软件,为降低窗户的传热系数,采用多腔隔热金属型材窗框,各材质的热物性参数如表 2 所示。模拟边界条件均依据《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程》(JGJT151-2008)^[17] 选择,并与实验边界条件保持一致,传热系数计算边界条件如表 3 所示。

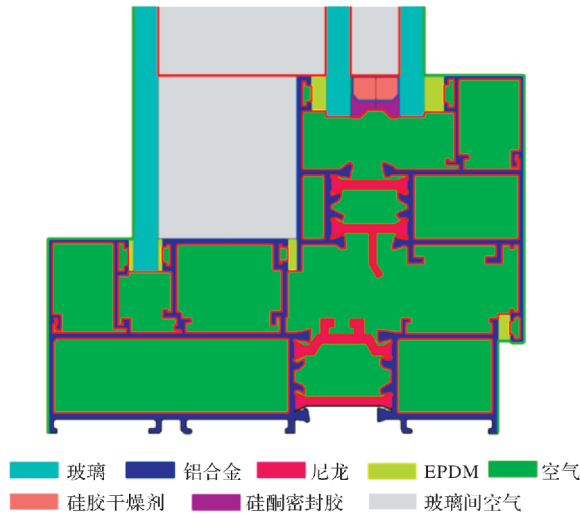


图 3 窗户边框节点截面
Fig. 3 Node section of window frame

表 2 不同窗框材质热物性参数

窗框部位	窗框型材	隔热条	密封条	中空玻璃 间隔条
材质	铝合金	尼龙	EPDM	不锈钢
导热系数 λ (W/(m·K))	160	0.25	0.25	14.3
发射率 E	0.2	0.9	0.9	0.2

表 3 传热系数计算边界条件

Tab. 3 Boundary conditions for heat transfer
coefficient calculation

边界条件	参数
室内空气温度 T_{in}	20 °C
室外空气温度 T_{out}	-20 °C
室内对流换热系数 $h_{c,in}$	3.6 W/(m ² ·K)
室外对流换热系数 $h_{c,out}$	16.0 W/(m ² ·K)
窗框室外对流换热系数 $h_{c, fra}$	8.0 W/(m ² ·K)
玻璃边缘室外对流换热系数 $h_{c, e}$	12.0 W/(m ² ·K)
室内平均辐射温度 $T_{rm, in}$	20 °C
室外平均辐射温度 $T_{rm, out}$	-20 °C
太阳辐射照度 I_s	0 W/m ²

2.2 模拟结果及模型验证

经过模拟计算玻璃中心 U_c 值为 1.24 W/(m²·K), 不同节点处窗框传热系数 U_f 及玻璃系统边缘传热系数 U_e 值各不相同,图 4 采用等温线的形式展示了典型窗框节点的模拟结果,图 4(a)窗框 $U_{f(a)}$ 为 2.29 W/(m²·K),玻璃边缘 $U_{e(a)}$ 为 1.74 W/(m²·K),图 4(b)窗框 $U_{f(b)}$ 值为 2.32 W/(m²·K),玻璃边缘 $U_{e(b)}$ 为 1.75 W/(m²·K)。由窗户不同部位模拟结果经过面积加权后整窗 U_t 为 1.66 W/(m²·K),整窗温度分布如图 5 所示。第三方检测机构对产品 U_t 值的实验结果为 1.6 W/(m²·K)^[18],如图 6 所示,模拟误差为 4%。

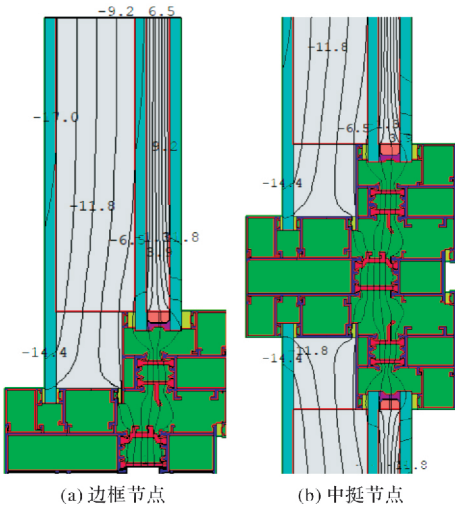


图 4 典型窗框节点等温线
Fig. 4 Isotherms of typical window frame nodes

3 窗户性能模拟优化分析

利用上述经过验证的模型,对窗户开闭状态、玻璃系统组合、窗框材料、窗框比等影响因素进行了优化分析。

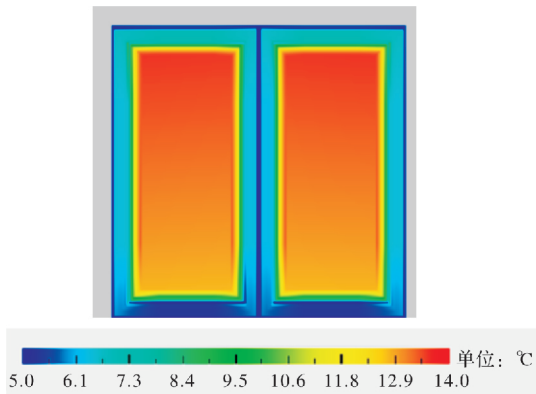


图 5 整窗温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of the whole window



图 6 窗户传热性能第三方检测

Fig. 6 Third-party testing of window heat transfer performance

3.1 开闭状态下窗户性能分析

窗户分为内窗扇和外窗扇的优势在于冬季白天太阳辐射较强时开启内窗, 外侧为 6 mm 透明玻璃, 可使更多的太阳辐射进入室内, 夜间关闭内窗, 增加热阻, 减少室内热量流失. 故有必要对内窗开、关状态下窗户的性能进行模拟分析.

模型尺寸 1.5 m×1.5 m, 计算边界条件依据《建筑门窗玻璃幕墙热工计算规程》(JGJT151-2008) 选择, 传热系数计算边界条件同表 3, SHGC 计算边界条件如表 4 所示.

表 4 SHGC 计算边界条件

Tab. 4 Boundary conditions for SHGC calculation

边界条件	参数
室内空气温度 T_{in}	25 °C
室外空气温度 T_{out}	30 °C
室内对流换热系数 $h_{c,in}$	2.5 W/(m ² · K)
室外对流换热系数 $h_{c,out}$	16.0 W/(m ² · K)
室内平均辐射温度 $T_{rm,in}$	25 °C
室外平均辐射温度 $T_{rm,out}$	30 °C
太阳辐射照度 I_s	500 W/m ²

模拟结果如表 5 所示, 内窗扇开启时, SHGC

增至 0.69, 进入室内的太阳辐射得热增加 82%, 同时, 窗框比由 0.31 降低至 0.16, 降低了窗框对太阳辐射的遮挡作用, 最大程度提升了冬季太阳能利用. 可见光透射比 T_{vis} 由 0.47 增加至 0.74, 可减少部分室内的照明能耗. 内窗扇关闭时, 窗户 U_i 降低至 1.66, 与 Low-E 玻璃对中远红外辐射高反射特性同时作用, 夜晚及夏季白天关闭内窗扇运行, 可大幅降低室内冷/热量流失, 同时 Low-E 玻璃对可见光的高透过性, 使得 T_{vis} 保持在 0.47, 夏季白天即使关闭内窗扇也能保证一定自然采光.

表 5 窗户不同运行工况下窗户性能

Tab. 5 Window performance under different operating conditions

工况	窗框比	传热系数 U W/(m ² · k)	太阳得热系数 SHGC	可见光透射比 T_{vis}
关内、外窗扇	0.31	1.66	0.38	0.47
开内窗扇, 关外窗扇	0.16	5.30	0.69	0.74

3.2 玻璃系统形式对窗户性能影响分析

由于窗户是围护结构节能薄弱部位, 所以针对窗户不断有新的节能技术出现, 如中空玻璃充惰性气体、Low-E 玻璃、真空玻璃等, 本文选择常用的 5 种玻璃系统进行对比模拟分析, 典型玻璃系统形式如表 6 所示, 其中 G1 为普通中空玻璃窗, 其余为热工参数可变组合形式.

表 6 典型玻璃系统形式

Tab. 6 Typical glass system form

编号	玻璃系统形式/mm
G1	6 透明+12 空气+6 透明
G2	6 透明+41 空气+6 透明+12 空气+6 透明
G3	6 透明+41 空气+6Low-E+12 空气+6 透明
G4	6 透明+41 空气+6Low-E+12 氩气+6 透明
G5	6 透明+41 空气+6Low-E+0.2 真空层+6 透明

窗户传热系数模拟结果如图 7 所示, G5 采用真空玻璃技术, U_i 值为 1.35 W/(m² · k), 保温性能等级达到 8 级, 相比于 G1 普通中空玻璃窗 U_i 值降低了 50.3%. 不同玻璃系统形式下整窗 U_i 值差别较大, 对比普通三玻两腔玻璃系统 G2, 使用 Low-E 玻璃, 玻璃系统 U_e 值降低 29.7%, U_i 值降低 16.5%; 中空玻璃充氩气技术玻璃 U_e 降低 14.9%, 整窗 U_i 降低 6.9%. 可见真空玻璃技术对窗户传热系数降低效果最明显, 随着玻璃系统 U_e 值逐渐降低, 整窗 U_i 降低幅度逐渐减小, 这是由于窗框 U_f 值较大, 随着玻璃系统 U_e 值逐渐降低, 窗框成为整窗的传热的主要部位, 如果不能提升其性能, 整窗 U_i 很难有明显降低.

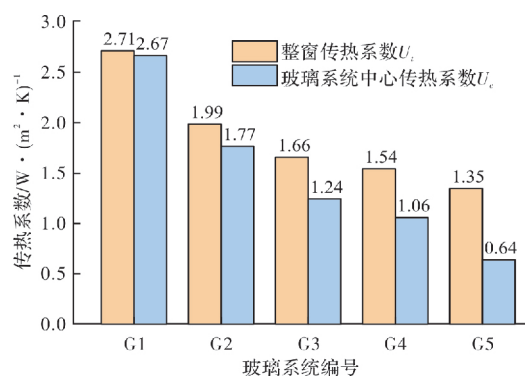


图7 窗户传热系数对比

Fig. 7 Comparison of window heat transfer coefficient

外窗作为自然采光主要围护结构, 保证其可见光透射比是基本要求, 同时夏季外窗的太阳得热系数对节能的影响不亚于传热系数的影响, T_{vis} 和 $SHGC$ 模拟结果如图8所示, 相比普通双层中空玻璃窗 G1, 采用 G2 产品 T_{vis} 降低 10.4%, $SHGC$ 降低 11.7%, 这是由于增加一层透明玻璃, 对可见光波段及其他波段降低基本一致; G3 使用 Low-E 玻璃相比 G2, T_{vis} 降低 3.1%, $SHGC$ 降低 12.9%, 可见 Low-E 玻璃在保证采光的条件下可有效降低太阳得热; G4 和 G5 选用玻璃与 G3 相同, 但改变了中空玻璃的气体间层, 相比于 G3, T_{vis} 完全相同, $SHGC$ 略有下降。

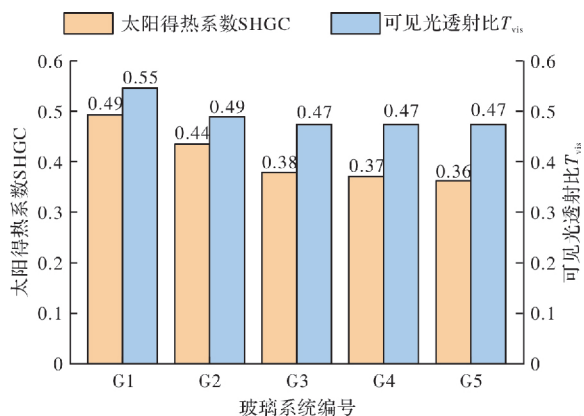


图8 窗户太阳能得热系数及采光性能对比

Fig. 8 Comparison of solar heat gain coefficient and daylighting performance of windows

3.3 不同窗框材料对性能影响

通过以上分析可知, 随着玻璃系统 U_c 不断降低, 整窗 U_i 主要受窗框 U_f 影响, 降低窗框 U_f 是提升整窗传热性能的有效措施。由于玻璃纤维增强聚氨酯(GRP)材料导热系数为 $0.36 W/(m \cdot K)$, 结合了塑料材料的优越保温性能和金属的高强度, 作为窗框型材具有很高适宜性。因此, 本文通过对 G3 玻璃系统分别选择多腔断热铝合金窗框和 GRPU 窗框进行了对比模拟分析, 结果如图9所示。采用 GRPU 型材之后窗框 U_f 值降低 52.3%,

达到 $1.09 W/(m^2 \cdot K)$, 玻璃边缘 U_e 值降低 6.9%, 主要是窗框传热的变化减小了窗户线传热系数, 整窗 U_i 值降低 23.3%, 可见 GRPU 窗框对窗户整体传热性能有较大提升作用。

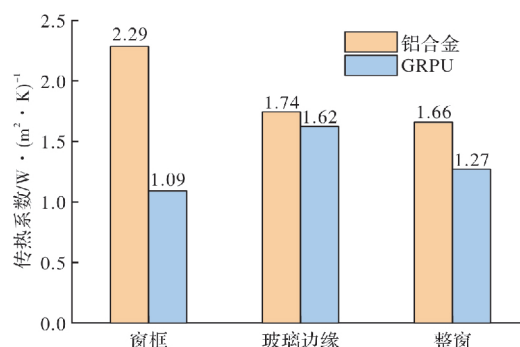


图9 铝合金与 GRPU 窗框窗户传热性能对比

Fig. 9 Comparison of heat transfer performance between aluminum alloy and GRPU window frames

3.4 窗框比对窗户性能影响分析

影响窗户性能的另一个重要参数是窗框比, 窗户尺寸越小, 窗框占比越大, 本文选择尺寸分别为 $2.1 m \times 2.1 m$ 、 $1.8 m \times 1.8 m$ 、 $1.5 m \times 1.5 m$ 的三种窗框比的窗户对 U_i 值、 $SHGC$ 、 T_{vis} 分别对比分析, 窗户玻璃系统均采用 G3 玻璃系统。结果如图10所示。

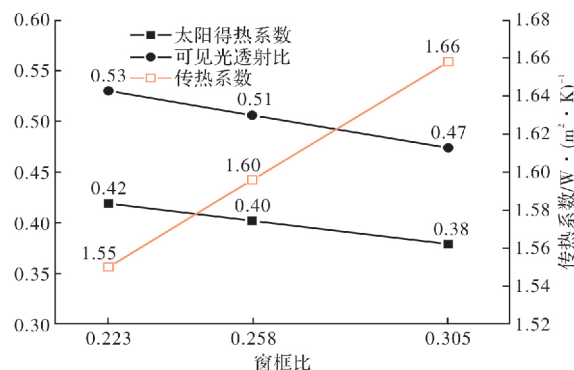


图10 窗框比对窗户性能影响对比

Fig. 10 Comparison of the effect of window frame ratio on window performance

随着窗框比由 22.3% 增大到 30.5%, T_{vis} 由 0.53 线性降至 0.47, $SHGC$ 由 0.42 线性降至 0.38, $SHGC$ 与 T_{vis} 基本与玻璃面积占比呈正比例关系; 随着窗框比增加 U_i 值由 $1.55 W/(m^2 \cdot K)$ 增加至 $1.66 W/(m^2 \cdot K)$, 这是由于窗框 U_f 值通常低于玻璃系统 U_c 值, 整窗 U_i 值通过窗户各部分 U 值面积加权求得, 故随着窗框比增加, 整窗 U_i 值不断增加, 且窗框 U_f 值与玻璃系统 U_c 值差距越大, 窗框比对整窗 U_i 值影响越大。

3.5 适用性分析

热工参数可变的被动太阳能窗, 解决了室外环境变化与室内热环境需求不统一的矛盾。不仅

适用于高寒地区,也适用于其他严寒、寒冷气候区,白天能尽可能多的利用太阳辐射,夜晚防止热量流失;同时也可应用于夏热冬冷地区,夏季可隔绝大部分室外得热,冬季可增加太阳辐射.该窗户成本增加较少,相对普通三玻两腔窗户,增量成本约5%以内,且功能多样的窗户结构可降低建筑空调季、供暖季负荷,过渡季通过通风调节室内环境,通过配合不同的玻璃系统形式以及窗框材料可满足大部分建筑节能设计标准以及建筑采光标准.

4 结论

开发了热工参数可变的被动太阳能窗,通过对该太阳能窗进行模拟优化与第三方检测,得出如下结论:

(1)样窗(G3玻璃系统)内窗扇开启时, U_i 值虽增加至5.30,但进入室内的太阳辐射得热增加82%,远高于传热损失;内窗扇关闭时, U_i 值降低至1.66 W/(m²·K),与Low-E玻璃对中远红外辐射高反射特性同时作用,可有效降低室内热量流失;

(2)铝合金窗框采用不同玻璃系统形式时, U_i 值差别较大,但随着玻璃系统 U_c 值逐渐降低, U_i 值降低幅度逐渐减小,可见,当 U_c 降低至一定程度后,玻璃系统 U_c 值对窗户传热性能提升效果有限;

(3)采用GRPU型材之后窗框 U_f 值降低52.3%, U_i 值降低23.3%,可见,窗框型材的传热性能对窗户整体 U_i 值较大提升作用;

(4)窗户SHGC与 T_{vis} 基本与玻璃面积占比呈正比例关系,当窗框 U_f 值与玻璃系统 U_c 值差别越大时窗框比对整窗 U_i 值影响越大,高窗框比时,降低窗框的 U_f 值对降低窗户 U_i 值有显著的效果.

参考文献 References

- [1] 中国建筑西南设计研究院有限公司. 四川省被动式太阳能建筑设计规范:DBJ51/T019-2013[S]. 成都:西南交通大学出版社,2014:22-23.
China Southwest Architectural Design and Research Institute Co. Ltd.. Technical code for passive solar buildings design in sichuan province: DBJ51/T 019-2013[S]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press., 2014: 22-23.
- [2] 江亿,冯雅,戎向阳,等. 对拉萨城市供暖模式的探讨[J]. 暖通空调,2013,43(6):1-7.
JIANG yi, FENG Ya, RONG Xiangyang, et al. Discussion on urban heating modes for Lhasa[J]. Heating, Ventilating & Air Conditioning, 2013, 43(6):1-7.
- [3] 刘艳峰,王莹莹,王登甲,等. 西北村镇建筑热环境提升与能源高效利用关键技术及应用[J]. 暖通空调,

2021, 51(8):1-6,43.

- LIU Yanfeng, WANG Yingying, WANG Dengjia, et al. Key technology and application of building thermal environment improvement and energy efficient utilization in northwest villages and towns[J]. Heating, Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(8):1-6,43.
- [4] 杨婧,刘艳峰,陈耀文,等. 用于被动太阳能采暖适用技术选择的气候分区研究[J]. 太阳能学报,2021,42(6):234-242.
YANG Jing, LIU Yanfeng, CHEN Yaowen, et al. Research of climate regions division for applicable passive solar heating technology selection[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(6):234-242.
- [5] 王登甲,刘艳峰,刘加平. 青藏高原被动太阳能建筑供暖性能实验研究[J]. 四川建筑科学研究,2015,41(2):269-274.
WANG Dengjia, LIU Yanfeng, LIU Jiaping. Experiments analysis on the heating performance of the passive solar house in the Qinghai - Tibet plateau[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(2):269-274.
- [6] 李元哲,狄洪发,方贤德. 被动式太阳房的原理及其设计[M]. 北京:能源出版社,1989.
LI Yuanzhe, DI Hongfa, FANG Xiande. Principle and design of passive solar house[M]. Beijing: Energy Press,1989.
- [7] LEVISON R, AKBARI H, BERDAHL P. Measuring solar reflectance—Part I: Defining a metric that accurately predicts solar heat gain[J]. Solar Energy, 2010, 84(9):1717-1744.
- [8] OLIVETI G, ARCURI N, BRUNO R, et al. An accurate calculation model of solar heat gain through glazed surfaces[J]. Energy & Buildings, 2011, 43(2/3):269-274.
- [9] ANIEKAN Offiong, UKPOHO A U. An analysis of solar gain through externally shaded window of buildings[J]. Renewable Energy, 2004, 29:131-150.
- [10] 刘艳峰,刘加平,杨柳,等. 拉萨地区被动太阳能传统民居测试研究[J]. 太阳能学报,2008,29(4):13-16.
LIU Yanfeng, LIU Jiaping, YANG Liu, et al. Measuring study of passive solar house for traditional dwelling building in Lhasa area[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008,29(4):13-16.
- [11] 祁清华,冯雅,谷晋川,等. 直接受益式太阳能建筑关键热工参数动态分析研究[J]. 可再生能源,2010,28(3):6-10.
QI Qinghua, FENG Ya, GU Jinchuan, et al. Dynamic analysis on the thermal parameters of direct gain solar building[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(3):6-10.

(下转第920页)