

张红婴,陈依然,胡正璐,等. 围护结构的光学特性与建筑能耗的关系[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(1): 24-35. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.01.004

ZHANG H Y, CHEN Y R, HU Z L, et al. The Relationship Between Optical Properties of the Envelope Structure and Energy Consumption of the Building [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(1):24-35. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.01.004

## 围护结构的光学特性与建筑能耗的关系

张红婴,陈依然\*,胡正璐,费华,符黄喜

(江西理工大学 土木与测绘工程学院,江西 赣州 341000)

**摘要:**通过对现有有关围护结构光学参数与建筑能耗关系的文献进行系统分析,得到北半球建筑最佳窗墙比与纬度的关系,给出建筑南立面和北立面最佳窗墙比的参考范围;发现在炎热地区的夏季,有色玻璃、热致变色玻璃和 Low-E 玻璃的节能效果很好,且 Low-E 玻璃对寒冷地区的冬季也有较好的节能效果;在气候炎热地区,非透明围护结构使用反射隔热涂料会大大降低全年建筑能耗,寒冷地区采用上述措施后,全年建筑能耗的减小量并不十分明显,甚至有可能加大全年的建筑能耗.文章指出围护结构传热量与得热量是各种参数综合影响下的结果,应该对各种光学参数影响下的建筑节能进行多因素分析,并且在优化光学材料的节能性能的基础上降低建筑节能的成本.

**关键词:**围护结构;光学参数;建筑节能;传热

中图分类号:TK519

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2024)01-0024-12

## The Relationship Between Optical Properties of the Envelope Structure and Energy Consumption of the Building

ZHANG Hongying, CHEN Yiran, HU Zhenglu, FEI Hua, FU Huangxi

(School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** Through the systematic analysis of the existing literature on the relationship between the optical parameters of building envelope structure and building energy consumption, the relationship between the optimal window wall ratio and latitude of buildings in the northern hemisphere is obtained, and the reference range of the optimal window wall ratio of buildings in the south and north facades is given. It is found that the energy-saving effect of colored glass, thermochromic glass and Low-E glass is very good in hot summer, and Low-E glass also has good energy-saving effect in cold winter. In hot climate areas, the use of reflective thermal insulation coating for non-transparent envelope will greatly reduce the annual building energy consumption. In cold areas, the reduction of annual building energy consumption is not very obvious, and may even increase the annual building energy consumption. It is also pointed out that the heat transfer and heat gain of building envelope structure are the results of the comprehensive influence of various parameters. The multi-factor analysis of building energy saving under the influence of various optical parameters should be carried out, and the cost of building energy saving should be reduced on the basis of optimizing the energy saving performance of optical materials.

**Keywords:** envelope structure; optical parameters; building energy-saving; heat transfer

收稿日期:2020-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51966004);江西省自然科学基金资助项目(20202BAB214022)

\*通信作者,陈依然, E-mail: 363117454@qq.com

随着经济的发展和水平的提高,人们对建筑环境的要求越来越高,造成了建筑能耗的持续增长.文献研究显示<sup>[1-2]</sup>,世界各国建筑能耗占一次能源消耗的 20%~40%<sup>[1]</sup>,其中,用于照明以及供暖和空调的能耗分别约占总建筑能耗的 10%和 50%左右<sup>[2]</sup>.

围护结构的光学特性影响建筑对太阳光线的吸收和透过,从而影响建筑的供暖空调和照明能耗,因此,国内外研究者对围护结构的光学特性与建筑能耗的关系进行了广泛的研究<sup>[3-10]</sup>.SHEN 等<sup>[3]</sup>认为窗墙比(WWR)将影响建筑的照明能耗和围护结构的传热能耗之间的平衡,他们的研究发现采用较大的 WWR 虽然可以在一定程度上降低室内照明能耗,但 WWR 过大会造成室内眩光的现象发生,并且由于通过窗户的传热量和透过窗户的太阳光线的增加会造成夏季制冷能耗的增加,而较小的 WWR 虽然可以降低夏季的制冷能耗,但却会降低室内视觉舒适性或提高室内照明负荷<sup>[4]</sup>.所以,选择合适的窗墙比对兼顾采光和建筑能耗非常重要<sup>[5]</sup>.在夏季,由于太阳辐射作用而产生的建筑能耗占较大比重,研究人员<sup>[6-8]</sup>还利用一些具有选择透过性的薄膜和涂层来降低通过窗户的太阳光线从而达到降低夏季室内负荷的目的.一般来说,在居住建筑中,非透明围护结构所占建筑表面积的比例通常大于透明围护结构,故其所造成的围护结构的传热能耗在建筑能耗中也占有一定比例,对此,研究人员通过改变外墙和屋顶外表面涂覆材料的吸收系数,来达到调控投射到围护结构外表面太阳辐射的吸收率的目的<sup>[9-10]</sup>.

本文分析了太阳辐射的传输过程,总结出影响围护结构吸收太阳辐射能的主要因素,并对近几年研究建筑窗墙比、玻璃窗的材料和结构以及屋顶和外墙的辐射吸收系数等围护结构光学参数与建筑能耗关系的文献进行综述,比较不同材料的 Low-E 玻璃和热致变色玻璃的建筑节能效果,分析不同气候分区中,外墙和屋顶反射隔热涂层的适用性,给出不同纬度条件下,最佳窗墙比的适用范围,以为建筑设计和太阳能被动利用技术提供借鉴.由于文中符号使用较多,因此对主要符号进行整理,以方便阅读,详情见表 1.

表 1 符号说明表

符号	说明	符号	说明
$\vec{r}$	位置矢量	$Q_{HG}$	建筑得热量, kWh
$\vec{S}$	方向矢量	$Q_H$	用于采暖的年总能耗, kWh/m <sup>2</sup>
$\vec{s}$	散射矢量	$Q_C$	用于制冷的年总能耗, kWh/m <sup>2</sup>
$s$	路径长度, m	$\Delta t$	覆有涂层的围护结构外表面所降低的温度, °C
$I$	辐射强度, W/m <sup>2</sup>	$\Delta t_{max}$	在夏季,最节能涂层的围护结构外表面最高温度的下降率, %
$t$	温度, K	$\Delta q$	与无涂料外墙相比,涂料外墙在夏季的日净得热量, kWh/m <sup>2</sup>
$T$	时间, s	希腊字符	
$h$	显焓	$\alpha_\lambda$	定波长辐射的吸收率
$t_{ref}$	壁面参考温度, K	$\gamma_\lambda$	定波长辐射的反射率
$c_p$	热容, kJ/(kg·K)	$\tau_\lambda$	定波长辐射的透射率
$\vec{v}$	指定固体的运动速度, m/s	$\varepsilon_\lambda$	定波长辐射的发射率
$S_r$	太阳辐射而产生的体积热源	$\rho_\lambda$	介质对光线吸收和散射作用分量的和
$I^B$	黑体辐射强度, W/m <sup>2</sup>	$\sigma_{s\lambda}$	介质对光线的散射分量
$S_h$	除辐射以外的其他所有体积热源	$\alpha$	吸收率
WWR	窗墙比	$\sigma_s$	散射率
WWR <sub>Z</sub>	最佳窗墙比	$\chi$	折射率
WWR <sub>E</sub>	朝向为东的最佳窗墙比	$\varepsilon$	发射率
WWR <sub>S</sub>	朝向为南的最佳窗墙比	$\varphi$	相位函数
WWR <sub>W</sub>	朝向为西的最佳窗墙比	$\sigma$	Boltzmann 常数
WWR <sub>N</sub>	朝向为北的最佳窗墙比	$\Omega'$	立体角
$Q_y$	用于制冷与采暖的建筑能源年需求量, kWh/m <sup>2</sup>	$\rho_s$	围护结构密度, kg/m <sup>3</sup>
$\Delta Q_y$	与普通玻璃相比用于制冷与采暖所节省的建筑年总能耗的百分比	$\beta$	玻璃的厚度, mm
$\Delta Q$	与普通玻璃相比所节省年总能耗的百分比	$\tau_v$	可见光透射率
$t_c$	转变温度, °C	$\tau_n$	红外透射率
$t_s$	转变开始时的温度, °C	$\tau$	透射率
$t_f$	转变结束时的温度, °C	$\gamma$	反射率
$\Delta Q_c$	与普通玻璃相比用于制冷与采暖所节省的建筑年总能耗的百分比	$\alpha_r$	辐射吸收系数

## 1 太阳辐射作用下围护结构的传热特性

阐明围护结构对太阳能吸收和传输机理将有助于深入了解围护结构对太阳能的吸收过程,从而为更好地调控太阳能的利用提供理论基础,下面将对光线的传输原理以及围护结构吸收太阳能后的能量传递过程进行分析<sup>[11-14]</sup>.

当光线或者电磁波入射到介质中,光线与介质中物质的相互作用导致了吸收、反射和透射3种常见的物理现象.

根据能量守恒定律,入射通量的透射、反射和吸收之和等于1.因此,它们之间的关系可以用式(1)进行描述.

$$\alpha_\lambda + \gamma_\lambda + \tau_\lambda = 1. \quad (1)$$

式中: $\alpha_\lambda, \gamma_\lambda, \tau_\lambda$ 分别为给定波长光线的辐射吸收率,反射率和透射率.对于非透明材料介质,即当透射率等于零( $\tau_\lambda = 0$ )时,式(1)可变为

$$\alpha_\lambda + \gamma_\lambda = 1. \quad (2)$$

温度在绝对零度以上的物体表面可在电磁波谱的所有波长上向四周发射能量,根据基尔霍夫定律,相同物质对相同波长电磁波的吸收率和发射率相同,则有 $\varepsilon_\lambda = a_\lambda$ 和 $\varepsilon = a$ .

当光线进入不均匀介质时,介质对光线的消散作用除了介质颗粒对其电磁能的吸收,还包括光线在介质内的散射作用<sup>[11-12]</sup>,用式(3)表示.

$$\rho_\lambda = \alpha_\lambda + \sigma_{s\lambda}. \quad (3)$$

式中: $\rho_\lambda$ 为介质对光线吸收和散射作用分量的和,通常称为吸收系数; $\sigma_{s\lambda}$ 为介质对光线的散射分量.

介质对某范围波段( $\lambda_1 \sim \lambda_2$ )的光线的总吸收系数 $\rho$ 如公式(4)所示.

$$\rho = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_\lambda(\lambda) I_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_\lambda(\lambda) d\lambda}. \quad (4)$$

以某一非均匀介质内部的辐射传输作为研究对象,综合考虑辐射光线的入射、透射、散射以及介质本身向外散发的红外辐射时,则研究系统辐射传输过程如图1所示.

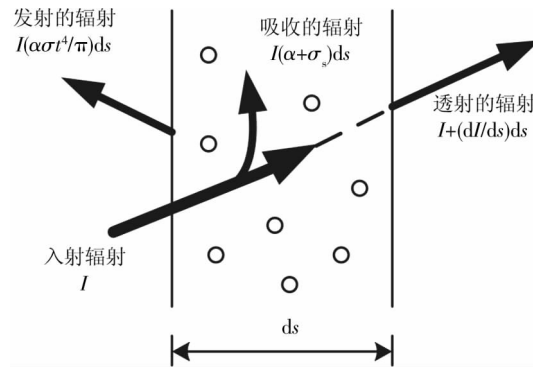


图1 辐射在非均匀介质中的传输过程

根据图1所示的辐射在介质中的传输过程,建立辐射传输模型,如式(5a)所示<sup>[13-14]</sup>.

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (\alpha + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = \frac{\varepsilon\chi^2}{\pi}\sigma t^4 + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}')\phi(\vec{r}, \vec{s}')d\Omega'. \quad (5a)$$

式中: $\vec{r}, \vec{s}, \vec{s}'$ 分别为位置矢量、方向矢量、散射矢量; $s$ 为路径长度,m; $\alpha, \sigma_s, \chi$ 和 $\varepsilon$ 分别为介质对辐射的吸收率、散射率、折射率和发射率, $\varepsilon = a$ ; $\phi$ 为相位函数; $\sigma$ 为 Boltzmann 常数( $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$ ); $I$ 为辐射强度, $\text{W/m}^2$ ; $t$ 为指定物体温度,K; $\Omega'$ 为立体角.式(5a)可以变形为

$$dI(\vec{r}, \vec{s}) = -I(\vec{r}, \vec{s})(\alpha + \sigma_s)ds + \frac{\varepsilon\chi^2}{\pi}\sigma t^4 ds + \left[ \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}')\phi(\vec{r}, \vec{s}')d\Omega' \right] ds. \quad (5b)$$

围护结构吸收太阳能后,表面温度升高,因此,将向室外散热或将热量传到建筑内部,将围护结构吸收的太阳辐射能作为体积热源,同时考虑太阳光散射的各向同性,对于外围护结构,其传热过程的控制方程为<sup>[13-14]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial T}(\rho_s h) + \nabla(\rho_s \vec{v} h) = \nabla(k \nabla t) + S_h + S_r \quad (6)$$

式中: $\rho_s$ 为围护结构密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T$ 为时间, $\text{s}$ ;  $h$ 为显焓, $h = \int_{t_{\text{ref}}}^t c_p dt$  (其中 $t_{\text{ref}}$ 为壁面参考温度, $\text{K}$ );  $c_p$ 为热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\vec{v}$ 为指定固体的运动速度, $\text{m}/\text{s}$ ;  $S_r$ 为由于太阳辐射而产生的体积热源, $S_r = \rho(I(\vec{r}, \vec{s}) - \sigma I^B)$  (其中 $I^B$ 为黑体辐射强度);  $S_h$ 为除辐射以外的其他所有体积热源;等式左边第 1 项为蓄热项,第 2 项为由于指定固体转动或平移而造成的对流能量传递;等式右边第 1 项代表导热通量。

综上所述,影响围护结构吸收太阳能的主要因素大致可以分为 3 类:(1)围护结构的几何性能,如建筑的几何形状、建筑的体形系数等;(2)围护结构的光学性能,如窗墙比、建筑材料的辐射吸收率、发射率以及透射率等;(3)围护结构的热工性能,如建筑围护结构材料的导热系数、热容、密度等。其中,围护结构的光学性能对建筑吸收太阳能有非常大的影响,本文将就此进行重点回顾。

## 2 围护结构光学性能对建筑能耗的影响

### 2.1 建筑能耗与窗墙比的关系

窗户和玻璃幕墙等透明围护结构远薄于外墙和屋顶等非透明围护结构,因此,与后者相比较,其单位面积传热能耗更大,而且在夏天,光线透过透明围护结构传到室内将增加空调制冷负荷;在冬天,通过窗户进入室内的太阳光线将减少冬季的供暖能耗;再者室内照明能耗也与建筑的窗墙比有关。有研究显示,民用建筑中,通过窗户所造成的能量损失可占建筑总能耗的 20~40%<sup>[15]</sup>。因此,很多研究者基于采光和建筑能耗等因素对建筑窗墙比进行优化研究。

PINO<sup>[16]</sup>对位于智利圣地亚哥办公楼的窗墙比(WWR)与建筑能耗的关系进行研究,结果表明:窗墙比(WWR)为 20%时,用于采暖和空调的建筑能源年需求量低于 40  $\text{kWh}/\text{m}^2$ ; WWR 提高为 50%时,建筑的能源需求在 40~70  $\text{kWh}/\text{m}^2$ ; WWR 提高至 100%时,建筑的能源年需求量可达到 50~155  $\text{kWh}/\text{m}^2$ 。上述研究表明,在地中海气候地区,建筑的采暖和空调能耗将随窗墙比的增大而增大。但是一般情况下,窗墙比越大,需要的照明能耗越小,TZEMPELIKOS 和 ATHIENITIS<sup>[17]</sup>对加拿大蒙特利尔的一个办公区域 4 个朝向不同 WWR 窗户的年日照可用率进行比较分析,并得出结论:30%的 WWR 可以保证在 76%的工作时间内工作区域有有用的自然照明。因此,为了兼顾照明和空调能耗,合理设计窗墙比将变得非常重要。MANGKUTO 等<sup>[18]</sup>根据日光指标和照明能源的需求对印度尼西亚万隆地区的窗户朝向和 WWR 进行了优化,发现南向窗户的最佳窗墙比( $\text{WWR}_z$ )为 30%。对于大型办公建筑和其他公用建筑,除了南北向有采光通风要求外,东西向也有采光通风要求。YEOM<sup>[19]</sup>综合考虑采光对员工工作表现的影响和办公建筑能耗 2 个因素来确定韩国仁川的最佳窗墙比,结果如下:东立面为 44.47%,南立面为 50.58%,西立面为 44.37%,北立面为 40.52%。

文献[16-19]均以采光和建筑能耗作为确定最佳窗墙比的影响因素,但也有研究者将其他环境参数和建筑能耗作为确定  $\text{WWR}_z$  的因素,如 CHI 等<sup>[20]</sup>将照明、室内热舒适和室内环境调控能耗作为参考因素对窗墙比进行优化,他们选取浙江省绍兴市的传统民居作为研究对象,对 WWR 分别在 0.1~0.9 的 8 个建筑模型进行室内环境和建筑能耗的数值模拟,计算了不同建筑朝向和 WWR 组合情况下的日照系数、室内温度和室内风速,根据《绿色建筑评估标准规范》(GB/T 50378—2014)、《建筑物采光设计标准》(GB 50033—2013)和热舒适范围的标准,分别确定了与日照因子、室内平均最高温度和室内平均风速相对应的 3 个  $\text{WWR}_z$  范围,综合考虑以上 3 个因素,他们得到浙江绍兴地区建筑外墙  $\text{WWR}_z$  为 35~52%。从以上叙述我们可以看出,建筑的最佳窗墙比与其所在的区域以及考虑的影响因素有很大关系,本文对此类文献进行了总结,如表 2 所示。

表2 不同地区建筑的最佳窗墙比

地区(城市)	经纬度	最佳窗墙比/%					$Q_y/(kWh \cdot m^{-2})$
		$WWR_Z$	$WWR_E$	$WWR_S$	$WWR_W$	$WWR_N$	
菲律宾(马尼拉) <sup>[21]</sup>	121°E, 14.52°N	—	—	25	—	—	68
中国(台湾台北) <sup>[21]</sup>	121.55°E, 25.07°N	—	—	—	—	50	48
中国(浙江绍兴) <sup>[20]</sup>	120°26'E, 29°34'N	35~52	—	—	—	—	—
加拿大(蒙特利尔) <sup>[17]</sup>	94°21'W, 35°07'N	—	—	30	—	—	24.2
德国(法兰克福) <sup>[22]</sup>	8°34'E, 50°07'N	—	39	40	41	43	—
挪威(奥斯陆) <sup>[22]</sup>	10°41'E, 59°57'N	—	41	56	40	40	—
印度尼西亚(万隆) <sup>[18]</sup>	107.61°E, 6.93°S	—	—	30	—	—	9.2~9.8*

注: \*表示照明能耗,  $kWh/m^2$  (除文中特别说明外, 表中所指最佳窗墙比均是综合考虑建筑能耗和采光 2 个因素得出);  $WWR_E$ ,  $WWR_S$ ,  $WWR_W$ ,  $WWR_N$  分别表示东、南、西、北 4 个方位的最佳窗墙比;  $Q_y$  表示用于制冷与采暖的建筑能源年需求量,  $kWh/m^2$

从表 2 可以看出:对于北半球的建筑,在综合考虑采光和建筑能耗的情况下,其南向的最佳窗墙比随纬度的升高而增大,北向最佳窗墙比随纬度升高而减小,并且文献[23]显示,在纬度为  $0 \sim 60^\circ N$  的总人口占世界人口的 89.8%,文献[19]也表明,在不考虑能耗的情况下,人员的工作绩效和工作的积极性在窗墙比为 60%时最佳,因此,综合表 2 及上述文献可知:对于北半球的建筑,最大窗墙比建议不超过 60%。

## 2.2 玻璃窗材料对太阳能的反射、透射和吸收

根据文献[24]可知:当窗墙比增加时,由于窗玻璃吸收、反射、透射太阳光线所造成的建筑能耗将大幅提升,且窗玻璃对不同波长的光线透过率和吸收率也不同.文献[25-27]的研究表明,人们常说的普通玻璃(主要成分是二氧化硅和氧化钠)对约占太阳光线 5%的紫外线(300~400 nm)、43%的可见光(400~700 nm)的透过率约为 88%,发射率约占 4%,约占 52%的红外线(700~2 500 nm)的透过率为 10%,发射率为 84%,研究表明<sup>[25-47]</sup>:组成玻璃的材料成分,玻璃表面涂层和玻璃的厚度均会对光线的透过率和发射率产生影响.因此,人们通过在玻璃中添加各种金属成分来改变玻璃的颜色与光学性能<sup>[7,28]</sup>,制成了有色玻璃,玻璃在添加钛或铜或铈后呈现古铜色(记为 1#有色玻璃),在添加钴或铬后呈现绿色(记为 2#有色玻璃),在添加钒后呈现灰色(记为 3#有色玻璃),图 2 给出了添加不同材料有色玻璃的光线透过率与厚度的关系<sup>[27-28]</sup>.

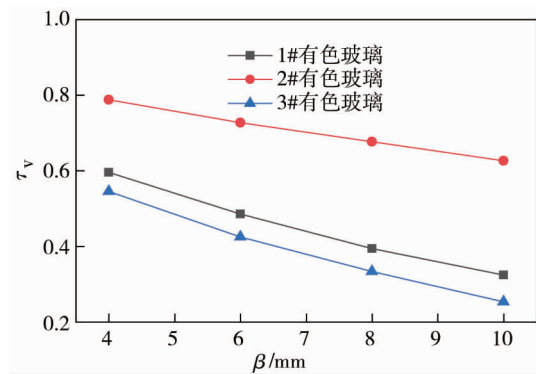


图2 有色玻璃的可见光透过率与厚度的关系

有色玻璃在提高建筑美观性和减少传热能耗的同时,阻挡了一部分可见光的透入,在阴雨天气,该种玻璃将会对室内采光产生不利影响,因此,人们在玻璃中添加热致变色材料,制成热致变色玻璃来达到既保证不同天气条件下的室内采光又节约建筑能耗的目的.热致变色玻璃的节能原理:热致变色材料在特定的温度区间内(转变起始温度  $t_s$  ~ 转变结束温度  $t_f$ )会发生由半导体相到金属相的转变(而这种变化通常是可逆的),从而增加玻璃对辐射的反射率<sup>[29-30]</sup>,目前最常用的热致变色材料就是二氧化钒( $VO_2$ )<sup>[31]</sup>,但由于  $VO_2$  转变温度( $t_c$ )为  $68^\circ C$ ,高于在太阳辐射作用下普通玻璃窗外表面所能达到的温度,Blackman 等<sup>[32]</sup>采用大气压化学气相沉积的方法在  $VO_2$  中掺杂了 0.36%的 W,获得了转变温度为  $20^\circ C$ 的热致变色薄膜,从而使热致变色玻璃的变色温度处在合适的范围;Liang 等<sup>[33]</sup>利用该种薄膜与其他几种热致变色薄膜进行了节能效果的比较,发现其在夏季可节约 17%~39%的建筑能耗.虽然在  $VO_2$  中掺杂金属可以降低  $VO_2$  的转变温度,但是同时也会导致  $VO_2$  薄膜的光学相变性能减弱,可见光透射率仅为 40%,这个数值对于阴雨天气的建筑采光来说显然较小<sup>[31]</sup>,因此,Mlyuka 等<sup>[34]</sup>通过反应性直流磁控溅射的方法获得  $TiO_2/VO_2/TiO_2/VO_2/TiO_2$  热致变色膜,并对其结构进行研究,发现这种薄膜的角度效应可以改善其透光率;而后 Yang 等<sup>[35]</sup>对此热致变色薄膜的节能效果进行模拟,结果表明:装有  $TiO_2/VO_2/TiO_2/VO_2/TiO_2$  玻璃的

房间比安装普通玻璃的房间可节省 14.2%~68.0%的制冷能耗.对于热致变色薄膜节能效果的评估,Saeli 等<sup>[36]</sup>也做了类似的研究,在 25%和 100%这 2 种窗墙比的条件下,他们采用 VO<sub>2</sub>, VO<sub>2</sub>/Au, VO<sub>2</sub>(TOAB, 生长导向表面活性剂中生长), VO<sub>2</sub>(TOAB)/Au 这 4 种不同的热致变色涂层的玻璃窗,对不同地区的能耗影响进行分析,发现采用 VO<sub>2</sub>(TOAB)膜的玻璃窗在各个地区的节能效果普遍更好.本文对此类文献进行了总结,如表 3 所示.

从表 3 可以看出:夏热冬冷地区和夏热冬暖地区使用 TiO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 薄膜的玻璃在夏季的节能效果要比使用 VO<sub>2</sub>/W(0.36%)的更好,而在严寒地区和温和气候地区,夏季使用空调制冷的机会较少,虽然其表现的节能效率更高,但这却是由于这些地区制冷能耗的需求较少而造成的,对此在严寒地区使用热致变色玻璃所节约的能量实际上没有在炎热地区的节能量大.同时通过表 3 可以看出:热致变色玻璃在到达转换温度时,对可见光和红外光的透射率都随之而降低,此特性虽然减少了进入室内的太阳光线,并大幅降低了建筑能耗,但是在可见光透射率减少的同时,对室内的采光效果亦会大打折扣<sup>[19]</sup>,因此,通过降低进入室内热量的同时,对窗玻璃的采光效果进行提升将成为热致变色玻璃今后研究的一个方向.

表 3 不同膜结构的热致变色窗的光学性能及其节能效果

膜结构	$t_c/^\circ\text{C}$	$t_s/^\circ\text{C}$	$t_f/^\circ\text{C}$	$t < t_s$		$t > t_f$		城市	纬度	$\Delta Q/\%$		$\Delta Q_c/Q_c/(\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2})$	
				$\tau_v(\lambda/\text{nm})$	$\tau_n(\lambda/\text{nm})$	$\tau_v(\lambda/\text{nm})$	$\tau_n(\lambda/\text{nm})$			25% * 100% *	%		
1# <sup>[34-35]</sup>	30.0	22	90	0.500(700)	0.42(2000)	0.520(700)	0.78(2000)	海拉尔	49.2°N	—	—	68.0	3.67
								北京	39.8°N	—	—	25.4	95.50
								上海	30.7°N	—	—	20.9	220.39
								广州	23.1°N	—	—	14.2	260.79
2# <sup>[36]</sup>	59.0	20	90	0.780(700)	0.60(2000)	0.740(700)	0.55(2000)	开罗	30°N	6.5	25.5	—	—
								巴勒莫	38.1°N	11.5	32.5	—	—
								罗马	42°N	7.5	34.5	—	—
3# <sup>[36]</sup>	43.0	20	90	0.560(700)	0.53(2000)	0.480(700)	0.36(2000)	开罗	30°N	5.0	27.5	—	—
								巴勒莫	38.1°N	9.5	35.5	—	—
								罗马	42°N	4.5	37.5	—	—
4# <sup>[36]</sup>	38.5	20	90	0.610(700)	0.55(2000)	0.510(700)	0.25(2000)	开罗	30°N	7.0	30.0	—	—
								巴勒莫	38.1°N	12.5	37.5	—	—
								罗马	42°N	6.7	40.0	—	—
5# <sup>[36]</sup>	45.5	20	90	0.770(700)	0.72(2000)	0.490(700)	0.43(2000)	开罗	30°N	5.0	27.0	—	—
								巴勒莫	38.1°N	9.5	34.0	—	—
6# <sup>[37]</sup>	41.3	—	—	0.421	—	0.435	—	罗马	42°N	5.0	36.0	—	—
								广州	23.1°N	—	—	10.2~20.0	—
7# <sup>[32-33]</sup>	20.0	—	—	0.390	—	0.390	—	哈尔滨	45.7°N	—	—	39.0	23.74
								北京	39.8°N	—	—	29.0	37.29
								杭州	30.2°N	—	—	22.0	39.29
								昆明	25°N	—	—	32.0	28.96
								广州	23.1°N	—	—	17.0	62.44

注:1#膜结构为 TiO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>,2#膜结构为 VO<sub>2</sub>,3#膜结构为 VO<sub>2</sub>/Au,4#膜结构为 VO<sub>2</sub>(TOAB),5#膜结构为 VO<sub>2</sub>(TOAB)/Au,6#膜结构为 VO<sub>2</sub>/PET,7#膜结构为 VO<sub>2</sub>/W(0.36%);  $\tau_v$  为可见光透射率;  $\tau_n$  为红外透射率;  $\Delta Q$  为与普通玻璃相比所节省年总能耗的百分比;  $\Delta Q_c$  为与普通玻璃相比用于制冷所节省年总能耗的百分比;  $Q_c$  为用于制冷的年总能耗; \* 为窗墙比

为了在保证室内采光的同时,减少室内外由于红外辐射而产生的热交换量,研究者们还发明了高可见光透过率,低红外线发射率的(Low-E)玻璃,Low-E 玻璃是在普通玻璃表面涂覆 Low-E 涂层来达到以上效果的,其结构通常由金属氧化物(如 SnO<sub>2</sub>, ZnO 和 TiO<sub>2</sub> 等)和金属薄膜(如 Ag, Cu 和 Al 等)组成<sup>[4,21, 38-49]</sup>. AL-SHUKRI<sup>[40]</sup>等采用沉积的方法制备了 3 种具有电解质/金属/电解质(D/M/D)三层结构形式的薄膜,将其应用在位于沙特阿拉伯地区的建筑模型,并测定这些模型在炎热季节的内部温度,研究结果显示,3

种薄膜的最大可见光透过率均大于0.7,其室内温度与对照组相比低8℃;WEI<sup>[41]</sup>等通过旋涂法和低温水热法制备ZnO纳米棒阵列,再将银纳米颗粒通过银镜方法涂覆在ZnO纳米棒上,获得了高可见光透过率,高红外反射的ZnO纳米棒/Ag薄膜,并与未覆膜的窗户进行对比,发现涂覆薄膜的模型比未涂覆的室内温度低5℃;QIANG等<sup>[42]</sup>采用超声处理及沉淀法制备了K<sub>0.3</sub>WO<sub>3</sub>/Ag<sub>2</sub>O纳米复合材料膜,并对此薄膜的节能性能做了研究,发现当K<sub>0.3</sub>WO<sub>3</sub>与Ag<sub>2</sub>O的质量比为30时,可获得最优效果,并且在研究达到热平衡时,具有K<sub>0.3</sub>WO<sub>3</sub>/Ag<sub>2</sub>O玻璃的室内温度比使用普通玻璃的室内温度低3℃.针对上述采用不同方法制备的Low-E玻璃的光学特性及其对室内热环境的影响进行对比分析,发现D/M/D形式的3层涂层薄膜所能达到的室内外温差最大,从而具有更好的节能效果.

由于Low-E玻璃具有高红外反射率的特点,因此在炎热地区的夏季,可以反射来自室外的红外辐射起到建筑隔热的作用,在寒冷地区的冬季也可以通过反射来自室内的红外辐射起到建筑保温的作用.卜增文等<sup>[43]</sup>对深圳市某一采用Low-E玻璃的建筑与采用普通玻璃的建筑的能耗进行对比分析,结果表明:在夏季相比于使用普通玻璃的建筑,采用Low-E玻璃的建筑可节省24%的制冷能耗;王晨<sup>[44]</sup>采用DeST能耗模拟软件对Low-E玻璃在西安地区建筑外围护结构的节能性进行分析,结果表明:在冬季,相比于使用普通玻璃的建筑,采用Low-E玻璃的建筑可节省52.9%的采暖能耗.由文献[45-46]可知增加Low-E玻璃的镀膜层数可以在维持相近可见光透过率的同时增加其红外反射率从而达到建筑节能的效果,对此郭龙等<sup>[47]</sup>针对以Ag基为主的单银、双银、三银的Low-E镀膜中空玻璃的节能效果进行比较,结果显示:三银Low-E中空玻璃比单银和双银中空玻璃更节能.综合上述文献研究可知:涂层结构和层数的选择对室内热环境与建筑节能有很大的影响,表4对不同结构、不同涂层层数的Low-E玻璃的节能性能进行了总结.

表4 Low-E玻璃的涂层和窗户结构对节能效果的影响

膜/玻璃结构(厚度)	$\tau(\lambda/\text{nm})$	$\gamma(\lambda/\text{nm})$	国家(城市)	$Q_{\text{HC}}/\text{kWh}$	$\Delta Q_{\text{C}}/\%$	$\Delta Q_{\text{H}}/\%$	$\Delta t/^\circ\text{C}$	$\chi/\%$
ZnS(31)/Ag(20)/ZnS(34) <sup>[40]</sup>	0.80(550)	0.05(550)						
WO <sub>3</sub> (37)/Ag(20)/WO <sub>3</sub> (37) <sup>[40]</sup>	0.06(1400)	0.85(1400)						
TiO <sub>2</sub> (40)/Ag(20)/TiO <sub>2</sub> (40) <sup>[40]</sup>	0.83(500)	0.03(500)	沙特阿拉伯				8°	
	0.10(1400)	0.80(1400)	(夏季最高温	—	—	—		
	0.75(600)	0.10(600)	度为38℃)					
	0.10(1400)	0.80(1400)						
ZnO纳米棒/Ag <sup>[41]</sup>	0.64(700)	0.90(1500)	—	—	—	—	5	—
	0.50(700)	—	—	—	—	—	3	—
	0.40(1400)	—	—	—	—	—		
Low-E(8mm)/白玻璃(8mm) <sup>[43]</sup>	0.71(700)	—	中国(深圳)	—	23	—	—	—
高透型Low-E中空玻璃(6mm) <sup>[44]</sup>	—	—	中国(西安)	—	—	52.9	—	—
高透型Low-E中空玻璃 <sup>[45]</sup>	—	—	中国(北京)	1.41×10 <sup>6</sup>	—	—	—	—
遮阳型Low-E中空玻璃 <sup>[45]</sup>	—	—	中国(北京)	1.30×10 <sup>6</sup>	—	—	—	—
双银Low-E中空玻璃 <sup>[45]</sup>	—	—	中国(北京)	1.27×10 <sup>6</sup>	—	—	—	—
单银Low-E(8mm)/氩气(12mm) <sup>[46]</sup>	0.65(700)	—	中国(哈尔滨)	—	—	—	—	30
双银Low-E(8mm)/氩气(12mm) <sup>[46]</sup>	0.63(700)	—	中国(哈尔滨)	—	—	—	—	12
三银Low-E(8mm)/氩气(12mm) <sup>[46]</sup>	0.65(700)	—	中国(哈尔滨)	—	—	—	—	4
单银Low-E(6mm)/空气(12mm)/白玻璃(6mm) <sup>[47]</sup>	0.64(700)	0.70(2000)	中国(北京)	$Q_1^*$	—	—	—	36
双银Low-E(6mm)/空气(12mm)/白玻璃(6mm) <sup>[47]</sup>	0.67(700)	0.85(2000)	中国(北京)	0.93 $Q_1$	—	—	—	15
三银Low-E(6mm)/空气(12mm)/白玻璃(6mm) <sup>[47]</sup>	0.64(700)	0.90(2000)	中国(北京)	0.84 $Q_1$	—	—	—	6

注: \*为全年耗电量; $\tau$ 为透射率; $\gamma$ 为反射率; $Q_{\text{HC}}$ 为建筑得热量; $\Delta Q_{\text{H}}$ 表示与普通玻璃相比用于采暖所节省年总能耗的百分比; $\chi$ 为太阳红外线热能总透射比

综合表 3 和表 4 可知:在炎热地区的夏季,热致变色玻璃和 Low-E 玻璃的节能效果很好,且 Low-E 玻璃对寒冷地区的冬季也有较好的节能效果,其中银基 Low-E 玻璃的可见光透射率相差甚微,并且三银 Low-E 玻璃具有的红外反射率最高,故其产生的节能效果亦最好,然而三银玻璃的造价相比于单银玻璃和双银玻璃都要更高,因此,在条件允许的基础上,为获得节能和采光的最佳效果,可以选择三银 Low-E 玻璃。

### 2.3 外墙和屋顶外表面涂覆材料的特性对建筑节能的影响

虽然玻璃的单位面积能源消耗量大,但是在居住建筑中的屋顶和外墙的传热负荷对建筑节能也有较大的影响.下面将分别从屋顶和外墙两个方面来回顾非透明围护结构的外表面涂覆材料的光学特性对建筑能耗的影响.研究者们<sup>[48-58]</sup>一般在屋顶和外墙涂覆反射隔热涂料来达到降低屋顶和外墙对投射到其表面的太阳能吸收率的效果。

文献[48-53]的研究发现,对于不同地区,反射隔热屋顶所发挥的功效是不同的,在炎热地区和温带地区,其对建筑节能产生正向的影响,但对于寒冷地区或严寒地区而言,反射隔热屋顶对建筑全年的总能耗的影响不大,甚至有可能加大全年的建筑能耗<sup>[53]</sup>.表 5 就不同地区反射隔热屋顶对建筑节能所产生的影响进行总结。

表 5 不同涂料对屋顶传热能耗的影响

涂料颜色和状态	$\gamma$ (反射/非反射)	国家,城市	气候特点	$\Delta t/^\circ\text{C}$	$Q_y/(\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2})$	$Q_H/(\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2})$	$Q_C/(\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2})$
黑色 <sup>[48]</sup>	0.41/0.04			14.4 <sup>s</sup>	—	—	—
蓝色 <sup>[48]</sup>	0.44/0.19			2.3 <sup>s</sup>	—	—	—
砖红色 <sup>[48]</sup>	0.41/0.12	美国,加州南部	热带沙漠(夏季最高温度为 54 $^\circ\text{C}$ )	4.4 <sup>s</sup>	—	—	—
绿色 <sup>[48]</sup>	0.46/0.17			6.7 <sup>s</sup>	—	—	—
咖啡色 <sup>[48]</sup>	0.41/0.12			6.7 <sup>s</sup>	—	—	—
灰色 <sup>[48]</sup>	0.44/0.21			4.0 <sup>s</sup>	—	—	—
				中国,哈尔滨	严寒	—	280.07
		中国,北京	寒冷	—	160.90	102.07	58.83
旧灰色屋顶 <sup>[49]</sup>	0.20	中国,上海	夏热冬冷	—	145.41	69.12	76.29
		中国,武汉	夏热冬冷	—	169.56	66.09	103.47
		中国,广州	夏热冬暖	—	167.79	13.88	153.91
		中国,哈尔滨	严寒	—	281.47	260.85	20.62
		中国,北京	寒冷	—	159.53	106.15	53.38
旧白屋顶 <sup>[51]</sup>	0.60	中国,上海	夏热冬冷	—	141.72	72.37	69.35
		中国,武汉	夏热冬冷	—	163.51	68.22	95.29
		中国,广州	夏热冬暖	—	157.26	15.78	141.48
		中国,哈尔滨	严寒	—	282.27	262.74	19.53
		中国,北京	寒冷	—	158.97	108.28	50.69
新白屋顶 <sup>[49]</sup>	0.80	中国,上海	夏热冬冷	—	140.5	74.43	66.07
		中国,武汉	夏热冬冷	—	161.05	69.69	91.36
		中国,广州	夏热冬暖	—	152	16.81	135.19
			亚热带气候				
白色涂层 <sup>[50]</sup>	0.90	巴西,圣保罗	(夏季最高温度为 26 $^\circ\text{C}$ )	24.4 <sup>s</sup>	—	—	—
白色涂料 <sup>[51]</sup>	0.89	希腊,伊拉克利翁	地中海气候	—	[19.8%] <sup>a</sup>	—	[27%] <sup>b</sup>
沥青屋顶 <sup>[52]</sup>	0.10			—	83.2	69.3	13.9
绿植屋顶 <sup>[52]</sup>	0.22	英国,伦敦	寒冷气候	—	71.8	60.2	11.6
冷屋顶 <sup>[52]</sup>	0.70			—	71.8	60.5	11.3

注:<sup>a</sup> 为与无涂层屋顶相比用于制冷与采暖所节省的建筑年总能耗;<sup>b</sup> 为与无涂层屋顶相比用于制冷所节省建筑能耗的百分比; $Q_H$  为用于采暖的年总能耗, $\text{kWh}/\text{m}^2$ ;  $Q_C$  为用于制冷的年总能耗, $\text{kWh}/\text{m}^2$

文献[54]以辐射吸收系数( $\alpha_r$ )为变量,对夏热冬冷地区涂覆反射隔热涂料( $\alpha_r = 0.48$ )、普通白色涂



料 ( $\alpha_r = 0.65$ ) 及无涂料 ( $\alpha_r = 0.73$ ) 这 3 种工况的建筑外墙的传热进行模拟,结果表明:涂覆反射隔热涂料表面所获得的太阳辐射净得热量最小.文献[55]和文献[56]对夏热冬冷地区外墙辐射吸收系数与其外表面温度关系进行研究,结果表明:随着  $\alpha_r$  从 0.9 降至 0.3,各外墙外表面温度都有明显降幅,其中东墙外表面降幅最大,可达 13.9 °C,其他外墙外表面温度降幅也均达到 5 °C 以上.MICHELE<sup>[57]</sup> 对位于地中海气候区域的 2 个城市(马赛、雅典)外墙辐射吸收系数与建筑能耗的关系进行研究,结果表明:当外墙的辐射吸收系数从 0.75 下降到 0.15 时,马赛、雅典的建筑总能耗分别降低了 14 kWh/m<sup>2</sup> 和 5 kWh/m<sup>2</sup>,节能率分别为 11% 和 6%.本文对关于外墙反射涂料节能效率的研究文献进行了总结,如表 6 所示.

表 5 和表 6 显示在不同地区反射涂料所产生的节能效果是不同的,其中气候较为炎热的地区,反射涂料的反射率越大,节能效果越好,而对于寒冷地区,反射隔热涂料在夏季的节能效果非常微弱,在冬季甚至还会导致采暖能耗的增加,对建筑节能正向作用并不明显,在有些地方还有可能负向作用,因此对于冬季采暖能耗占暖通空调总能耗比例更大一点的地区,选用低反射率的涂料更为合适;对于不同朝向的外墙,反射隔热涂料也表现出了不同的节能效果,在夏热冬冷地区,东西朝向的外墙涂覆反射隔热涂料比南北朝向的外墙涂覆反射隔热涂料的节能效果更佳.

需要说明的是,当建筑外墙的太阳光线反射率高于 0.8 时,其外表面颜色为纯白色,或当其长波发射率小于 0.2 时,建筑外表面对于太阳光线的反射相当于高度抛光的金属表面,从而导致城市环境中的光污染<sup>[53]</sup>.因此以上只针对太阳反射率小于 0.8 和长波发射率大于 0.2 的研究文献进行总结.

表 6 不同城市外墙反射涂料的节能效果

国家(城市)	地理信息	$\alpha_r$	$\gamma$	$\varepsilon$	$\Delta t_{\max}/\%$	$Q_y/(kWh \cdot m^{-2})$	$\Delta q/(kWh \cdot m^{-2})$
新加坡 <sup>[53]</sup>	热带气候地区	—	0.80	0.90	—	159.6	—
美国(迈阿密) <sup>[53]</sup>	亚热带气候地区	—	0.80	0.90	—	64.4	—
巴西(圣保罗) <sup>[53]</sup>	亚热带气候地区	—	0.80	0.80	—	25.2	—
中国(拉萨) <sup>[53]</sup>	高原气候地区	—	0.20	0.20	—	98.0	—
中国(成都) <sup>[53]</sup>	温带气候地区	—	0.80	0.20	—	133.0	—
法国(马赛) <sup>[57]</sup>	地中海气候地区	—	0.15	—	—	114.0	—
希腊(雅典) <sup>[57]</sup>	地中海气候地区	—	0.15	—	—	85.0	—
中国(长沙) <sup>[55]</sup>	夏热冬冷地区 (夏季最高温度为 43 °C)	0.30	—	—	[26.0] <sup>E</sup>	—	—
					[16.0] <sup>S</sup>	—	—
					[23.5] <sup>W</sup>	—	—
					[12.0] <sup>N</sup>	—	—
中国(杭州) <sup>[56]</sup>	夏热冬冷地区	—	0.84	—	[19.6] <sup>S</sup>	—	—
					[9.0] <sup>E</sup>	—	1.12
中国(上海) <sup>[54]</sup>	夏热冬冷地区	0.48	—	—	[2.0] <sup>S</sup>	—	0.84
					[12.0] <sup>W</sup>	—	1.12
法国(巴黎) <sup>[53]</sup>	寒冷气候地区	—	0.10	0.20	—	193.2	—
美国(旧金山) <sup>[53]</sup>	寒冷气候地区	—	0.10	0.20	—	44.8	—
中国(北京) <sup>[58]</sup>	寒冷气候地区	—	0.70	0.95	—	[48767.0] <sup>*</sup>	—

注:  $\Delta t_{\max}$  为在夏季,最节能涂料的围护结构外表面最高温度的下降率,<sup>E</sup> 代表东向;<sup>S</sup> 代表南向;<sup>W</sup> 代表西向;<sup>N</sup> 代表北向;\* 为用于采暖和空调的建筑年需求量,kWh; $\Delta q$  为与无涂料外墙相比,涂料外墙在夏季的日净得热量,kWh/m<sup>2</sup>

### 3 结论

1) 对于北半球的建筑,在考虑采光和能耗的情况下,南向的最佳窗墙比随纬度的升高而增大,北向最佳窗墙比却相反,而且无论南立面或北立面,北半球最佳窗墙比的最大值应控制在 60% 以内.

2) 在炎热地区的夏季,有色玻璃、热致变色玻璃和 Low-E 玻璃的节能效果很好,且 Low-E 玻璃对寒冷地区的冬季也有较好的节能效果.

3) 与寒冷地区相比,在外墙和屋顶外表面涂覆反射隔热涂料对于炎热地区全年建筑能耗的降低更为

明显,但过高的反射率也会导致城市的光污染,所以应选择反射率小于0.8的反射涂料为宜。

综合上述分析,建议可以在以下几个方面开展研究:

1)有色玻璃、热致变色玻璃和Low-E玻璃的节能效果受涂层材料及涂层结构的影响,在目前一般情况下,使用价格更高的涂层材料或者使用多层涂料后玻璃窗的节能效果更好,因此,今后可对光学薄膜和反射涂层的性能优化及降低节能成本等方面展开研究。

2)目前绝大多数的相关研究是通过某一光学参数与建筑能耗的关系进行单因素分析,而建筑围护结构的传热和得热量是各种参数综合影响下的结果,因此,作者认为应对各主要光学参数影响下的建筑节能情况进行多因素分析,从而优化围护结构的光学参数设计。

#### 参考文献:

- [1] PÉREZ-LOMBARD L, ORTIZ J, POUT C. A review on buildings energy consumption information[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(3): 394-398.
- [2] ICHINOSE T, LEI L, LIN Y. Impacts of shading effect from nearby buildings on heating and cooling energy consumption in hot summer and cold winter zone of China[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 136: 199-210.
- [3] SHEN H, TZEMPELIKOS A. Sensitivity analysis on daylighting and energy performance of perimeter offices with automated shading[J]. *Building and Environment*, 2013, 59: 303-314.
- [4] REZAEI S D, SHANNIGRAHI S, RAMAKRISHNA S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 159: 26-51.
- [5] FENG G, CHI DD, XU X L, et al. Study on the influence of window-wall ratio on the energy consumption of nearly zero energy buildings[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 730-737.
- [6] XUE P, LI Q, XIE J C, et al. Optimization of window-to-wall ratio with sunshades in China low latitude region considering daylighting and energy saving requirements[J]. *Applied Energy*, 2019, 233/234: 62-70.
- [7] GORGOLIS G, KARAMANIS D. Solar energy materials for glazing technologies[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 144: 559-578.
- [8] AL-OBAIDI K M, ISMAIL M, ABDUL RAHMAN A M. A review of skylight glazing materials in architectural designs for a better indoor environment[J]. *Modern Applied Science*, 2013, 8(1): 68-82.
- [9] GUO X G, WANG J, WU Y, et al. Experimental study of the thermal performance of a new type of building reflective coating in hot summer and cold winter zone of China[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 603-608.
- [10] HE Y, YU H, OZAKI A, et al. Thermal and energy performance of green roof and cool roof: a comparison study in Shanghai Area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122205.
- [11] LEVINSON R, BERDAHL P, AKBARI H. Solar spectral optical properties of pigments: Part I: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, 89(4): 319-349.
- [12] FULLER K A. Scattering and absorption cross sections of compounded spheres. II. Calculations for external aggregation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 881-892.
- [13] MATHUR S R, MURTHY J Y. Coupledordinates method for multigrid acceleration of radiation calculations[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1999, 13(4): 467-473.
- [14] JÄGER W, RANNACHER R, WARNATZ J, et al. *Diffusion and Transport*[M]. Heidelberg. German: Springer, 2006: 495-529.
- [15] BÜLOW-HÜBE H. *Energy-efficient window systems: effects on energy use and daylight in buildings*[D]. Lund(Sweden): Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture, Lund University, 2001.
- [16] PINO A, BUSTAMANTE W, ESCOBAR R, et al. Thermal and lighting behavior of office buildings in Santiago of Chile[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 47: 441-449.
- [17] TZEMPELIKOS A, ATHIENITIS A K. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand[J]. *Solar Energy*, 2007, 81(3): 369-382.

- [18] MANGKUTO R A, ROHMAH M, ASRI A D. Designoptimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand; a case study of buildings in the tropics[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 211–219.
- [19] YEOM S, KIM H, HONG T, et al. Determining the optimal window size of office buildings considering the workers' task performance and the building's energy consumption[J]. *Building and Environment*, 2020, 177: 106872.
- [20] CHI F A, WANG Y H, WANG R N, et al. An investigation of optimal window-to-wall ratio based on changes in building orientations for traditional dwellings[J]. *Solar Energy*, 2020, 195: 64–81.
- [21] LEE J W, JUNG H J, PARK J Y, et al. Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements[J]. *Renewable Energy*, 2013, 50: 522–531.
- [22] GOIA F. Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential[J]. *Solar Energy*, 2016, 132: 467–492.
- [23] 刘铮. 人口学辞典[M]. 北京: 人民出版社, 1986.
- [24] ALGHOUL S K, RIJABO H G, MASHENA M E. Energy consumption in buildings: a correlation for the influence of window to wall ratio and window orientation in Tripoli, Libya[J]. *Journal of Building Engineering*, 2017, 11: 82–86.
- [25] PFAENDER H. Glass, the material, in: H.G. Pfaender (Ed.), *Schott Guide to Glass*[M]. Springer, Netherlands, 1996: 16–83.
- [26] 杨云桦, 狄洪发. 低辐射能玻璃窗的节能研究[J]. *太阳能学报*, 2001, 22(3): 296–301.
- [27] LEFTHERIOTIS G, YIANOULIS P. Glazings and coatings[M]//*Comprehensive Renewable Energy*. Amsterdam: Elsevier, 2012: 313–355.
- [28] SHCHERBAKOVA N N, KONDRASHOV V I, KUPRIYANOVA I A, et al. Regression equations for determining light transmission in tinted float glass[J]. *Glass and Ceramics*, 2001, 58(5): 164–165.
- [29] ZHOU X, MILBRANDT R. Demonstration with Energy Assessments of Thermochromic Window Systems [J]. *Ashrae Transactions*, 2014, 120: 330–339.
- [30] MADIDA I G, SIMO A, SONE B, et al. Submicronic VO<sub>2</sub>-PVP composites coatings for smart windows applications and solar heat management[J]. *Solar Energy*, 2014, 107: 758–769.
- [31] GRANQVIST C G. Oxide-based chromogenic coatings and devices for energy efficient fenestration; brief survey and update on thermochromics and electrochromics[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2014, 32(6): 060801.
- [32] BLACKMAN C S, PICCIRILLO C, BINIONS R, et al. Atmospheric pressure chemical vapour deposition of thermochromic tungsten doped vanadium dioxide thin films for use in architectural glazing [J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(16): 4565–4570.
- [33] LIANG R Q, SUN Y Y, ABURAS M, et al. Evaluation of the thermal and optical performance of thermochromic windows for office buildings in China[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 176: 216–231.
- [34] MLYUKA N R, NIKLASSON G A, GRANQVIST C G. Thermochromic VO<sub>2</sub>-based multilayer films with enhanced luminous transmittance and solar modulation[J]. *Physica Status Solidi Applied Research*, 2009, 206(9): 2155–2160.
- [35] YANG J, XU Z T, YE H, et al. Performance analyses of building energy on phase transition processes of VO<sub>2</sub> windows with an improved model[J]. *Applied Energy*, 2015, 159: 502–508.
- [36] SAEI M, PICCIRILLO C, PARKIN I P, et al. Energy modelling studies of thermochromic glazing [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(10): 1666–1673.
- [37] YE H, LONG L S, ZHANG H T, et al. The demonstration and simulation of the application performance of the vanadium dioxide single glazing[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 117: 168–173.
- [38] FAN J C, BACHNER F J. Transparent heat mirrors for solar-energy applications [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(4): 1012–1017.
- [39] JELLE B P, HYND A, GUSTAVSEN A, et al. Fenestration of today and tomorrow; a state-of-the-art review and future research opportunities[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 96: 1–28.
- [40] AL-SHUKRI A M. Thin film coated energy-efficient glass windows for warm climates[J]. *Desalination*, 2007, 209(1/2/3): 290–297.
- [41] WEI G Y, DING J C, ZHANG T, et al. In situ fabrication of ZnO nanorods/Ag hybrid film with high mid-infrared reflectance

for applications in energy efficient windows[J]. *Optical Materials*, 2019, 94: 322–329.

- [42] GAO Q, WU X M, CAI L G. Dual functionality of  $K_{0.3}WO_3/Ag_2O$  nanocomposites for smart window: energy saving and visible photocatalytic self-cleaning performance[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 196: 111–118.
- [43] 卜增文, 毛洪伟, 杨红. Low-e 玻璃对空调负荷及建筑能耗的影响[J]. *暖通空调*, 2005, 35(8): 119–121.
- [44] 王晨. LOW-E 玻璃在西安地区建筑外围护结构的适用性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [45] 王迪. 多种 Low-E 中空玻璃性能对比分析[J]. *建筑节能*, 2017, 45(5): 47–49.
- [46] 米春亮, 王树军, 王跃, 等. 三银 Low-e 中空玻璃在严寒地区绿色机场中的应用[J]. *低温建筑技术*, 2017, 39(10): 141–143.
- [47] 郭龙, 张得全, 耿振搏, 等. 浅析三银 Low-E 镀膜玻璃的节能优势[J]. *建筑玻璃与工业玻璃*, 2017(12): 13–16.
- [48] LEVINSON R, AKBARI H, REILLY J C. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(7): 2591–2605.
- [49] GAO Y F, XU J M, YANG S C, et al. Cool roofs in China: policy review, building simulations, and proof-of-concept experiments[J]. *Energy Policy*, 2014, 74: 190–214.
- [50] DE BRITO FILHO J P, HENRIQUEZ J R, DUTRA J C C. Effects of coefficients of solar reflectivity and infrared emissivity on the temperature and heat flux of horizontal flat roofs of artificially conditioned nonresidential buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(2/3): 440–445.
- [51] KOLOKOTSA D, DIAKAKI C, PAPANTONIOU S, et al. Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 55: 85–93.
- [52] VIRK G, JANSZ A, MAVROGIANNI A, et al. Microclimatic effects of green and cool roofs in London and their impacts on energy use for a typical office building[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 88: 214–228.
- [53] SHI Z Y, ZHANG X. Analyzing the effect of the longwave emissivity and solar reflectance of building envelopes on energy-saving in buildings in various climates[J]. *Solar Energy*, 2011, 85(1): 28–37.
- [54] 张红婴, 钟珂, 刘加平. 太阳辐射吸收系数对围护结构夏季净得热量的影响[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(1): 156–163.
- [55] 罗松钦, 杨昌智, 李洪强, 等. 夏热冬冷地区太阳辐射对建筑围护结构能耗影响分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(5): 149–156.
- [56] GUO W, QIAO X, HUANG Y, et al. Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 50: 196–203.
- [57] ZINZI M. Exploring the potentialities of cool facades to improve the thermal response of Mediterranean residential buildings[J]. *Solar Energy*, 2016, 135: 386–397.
- [58] 李英, 王玉卓. 建筑非透明外墙材料热工性能研究[J]. *建筑技术*, 2009, 40(1): 38–41.