

电致变色智能窗在北京某办公室应用的节能特性分析

孙育英, 戚皓然, 王伟, 徐文静

(北京工业大学绿色建筑环境与节能技术北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为探究电致变色 (electrochromic, EC) 玻璃窗在建筑中应用的节能特性, 以北京某办公室为研究案例, 以市场销售的典型 EC 玻璃窗为研究对象, 基于 EnergyPlus 建立仿真模型, 分析 EC 玻璃窗在不同季节采用商用控制策略的节能效果. 研究表明, 由于建筑光热环境在不同季节对 EC 玻璃窗的需求特性不同, EC 玻璃窗在不同季节应采用不同控制策略, 且控制参数阈值选取对建筑能耗有重要影响. EC 玻璃窗在供冷季采用室外水平照度控制、供暖季采用眩光控制时能耗最低, 相比普通玻璃窗、高透型低辐射 (low emissivity, low-e) 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗, 全年最大节能量分别为 13.2%、11.0% 和 11.6%.

关键词: EC 玻璃窗; 节能特性; 控制策略; 控制参数阈值; 空调能耗; 照明能耗

中图分类号: TU 111.4

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2020)04-0385-08

doi: 10.11936/bjtxb2019010018

Energy Saving Analysis of Electrochromic Windows in an Office in Beijing

SUN Yuying, QI Haoran, WANG Wei, XU Wenjing

(Beijing Key Laboratory of green built environment and energy efficient technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Electrochromic (EC) windows is a new type of small windows. The visible light transmission rate and the solar heat gain coefficient can be actively adjusted according to the demand. To explore the energy-saving characteristics of the application of EC windows, this paper took an office in Beijing as a case study and took the EC windows sold in the market as the research object in the market. The EnergyPlus simulation was used to study the air conditioning with different control methods and different control thresholds of the EC windows. Due to different demand characteristics of EC windows in different seasons, EC windows should adopt different control strategies in different seasons, and the selection of control parameter threshold also has an important impact on building energy consumption. The EC windows have the lowest energy consumption in the cold season, the illumination and in the heating season with the glare control. Compared with the ordinary windows, the high permeable low emissivity (low-e) windows and the low permeability low-e windows, the energy saving is 13.2%, 11.0% and 11.7%, respectively. The results of this study can provide reference for energy saving applications of EC windows in China.

Key words: EC windows; energy saving characteristics; control strategy; control parameter threshold; air conditioning system energy consumption; lighting energy consumption

收稿日期: 2019-01-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601704); 国家自然科学基金资助项目(51778009)

作者简介: 孙育英(1974—), 女, 副教授, 主要从事建筑节能方面的研究, E-mail: sunyuying126@126.com

电致变色 (electrochromic, EC) 玻璃窗是一种新型智能玻璃窗,通过改变 EC 玻璃的输入电压,使其可见光透过率和太阳能得热系数在较大范围内变化^[1-2]. 相比传统的静态玻璃窗,EC 智能窗可按需主动调节透过玻璃的太阳辐射和可见光,改善建筑光环境和热环境舒适度,同时减少建筑物中的空调和照明的能源使用^[3-4]. 利用 EC 玻璃技术发展“健康、节能、舒适”的绿色智能建筑,是未来社会可持续发展最重要的手段之一^[5].

随着 EC 玻璃技术的发展,EC 玻璃已引起建筑领域专家学者的关注. 现有研究对 EC 玻璃在建筑外围护结构的应用,以及对建筑外区的光热环境影响和节能效果进行一些探讨. 李峥嵘等^[6-8]通过对办公建筑的模拟和实测研究,指出 EC 玻璃窗能有效减少眩光、改善室内光环境和热环境. 美国劳伦斯伯克利国家实验室 Lee 等^[9-11]基于小型实验或示范建筑,开展光环境舒适度、用户满意度等实测研究. 加拿大的 Dussault 等^[5]和葡萄牙的 Tavares 等^[12-13]分析在温带和地中海气候区,EC 玻璃窗安装在不同朝向的空调节能效果. 沙特阿拉伯的 Aldawoud^[14]、法国的 Assimakopoulos^[15]和美国的 Sbar 等^[16]将 EC 玻璃窗与普通玻璃窗、低辐射 (low emissivity, low-e) 玻璃窗等进行比较,验证 EC 玻璃窗是减少夏季太阳辐射得热的最佳方式,同时可减少年度尖峰负荷、降低系统初投资. 香港理工的 Yik 等^[17]和比利时的 Youness 等^[18]通过研究表明 EC 玻璃可有效减少使用机械制冷,减少空调能耗. 梁庆等^[19]指出如果 EC 玻璃窗控制方法选用不当,EC 玻璃窗不仅不节能,反而建筑能耗会高于普通玻璃窗. 瑞典的 Jonsson 等^[20]指出电 EC 玻璃窗调控应考虑房间占用状态,占用时根据室内照度控制,不占用时应以热环境需求调控.

现有研究对 EC 玻璃窗的应用性能和节能潜力进行有益探索,在节能研究方面多针对于 2 种调节状态 (透明态和着色态) 的 EC 玻璃窗,探索不同控制参数的控制性能,侧重分析对空调的影响. 然而,对于目前市场销售的具有 4 种调节状态 (透明态、中间态 1、中间态 2 和着色态) 的 EC 玻璃窗,尚缺乏对现有商用控制策略应用的节能特性研究,特别是控制参数阈值选取对空调能耗和照明能耗影响规律分析,不利于指导 EC 玻璃窗在我国应用发展.

本文以北京某典型办公室为研究案例,以市场销售的 EC 玻璃窗为研究对象,采用 EnergyPlus 模拟软件,研究在北京地区气候下、在满足室内光环

境、热环境舒适情况下,EC 玻璃窗采用商用控制策略不同控制阈值时,对供冷季和供热季的空调能耗和照明能耗影响,并与建筑采用普通玻璃窗、高透型 low-e 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗进行比较,最终提出 EC 玻璃窗调控方法的应用建议和节能评价.

1 建筑信息

1.1 建筑模型

本文选择北京某办公楼的一个房间为研究案例,其房间平面图见图 1. 该房间层高层为 3 m,南向装配有 1.5 m × 1.5 m 的玻璃窗,窗墙比为 23.6%,东、西、北向以及下楼板均与结构相似的空调房间相邻.

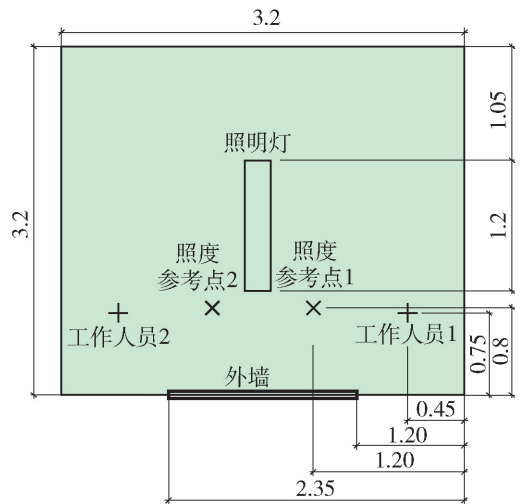


图 1 房间平面图 (单位: m)

Fig. 1 Room plane (unit: m)

照度参考点设定在图 1 照度参考点 2 位置,距地板高度 0.75 m,室内光源采用 80 W 调光式荧光灯,室内照度设定值为 300 lux. 照明灯功率可根据参考点照度调节:当进入室内的可见光使室内照度大于等于 300 lux,照明灯不开启,室内采光完全依靠自然光;当由自然光提供的室内照度小于 300 lux,照明灯开启,调节照明灯功率使室内照度保持为 300 lux.

室内设有 2 个工作人员和 2 台电脑,人员散热量为 99 W/人,电脑散热量为 50 W/台. 房间空调末端形式为风机盘管,冷热源为空气源热泵,空调能效比为 2.0. 空调系统没有新风,空气渗透量为 20.6 m³/h.

1.2 玻璃窗性能参数

EC 玻璃窗及对比的 3 种静态玻璃窗 (普通玻璃窗、高透型 low-e 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗)

均采用 5.7 mm + 6.0 mm + 5.7 mm 的双层中空构造,中间填充气体为 10% 空气和 90% 氩气,内层均采用相同的白玻璃,外层分别采用 EC 玻璃、白玻璃、高透型 low-e 玻璃、低透型 low-e 玻璃. 4 种玻璃窗光学性能参数由窗户性能分析软件 WINDOW7.6 计算得到,详见表 1.

1.3 模拟软件及计算条件

使用 EnergyPlus 软件计算,模拟气象参数选用

国际能耗计算典型气象年中北京地区气象文件. 供暖季为 11 月 15 日至次年 3 月 15 日,供冷季为 5 月 15 日至 9 月 15 日. 室内设备及空调设备开启时间为工作日 8:00—18:00. 空调系统为理想空调系统,供暖季、供冷季室内设计温度分别为 22 ℃、26 ℃. 考虑 EC 玻璃窗在不同状态切换时需要一定时间,模拟步长取 10 min.

表 1 玻璃性能参数表

Table 1 Physical properties of the windows analyzed

	普通玻璃	高透型 low-e 玻璃	低透型 low-e 玻璃	EC 玻璃			
				透明态	中间态 1	中间态 2	着色态
传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	2.7	2.1	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0
可见光透过率/%	78.6	74.6	36.3	60.2	17.6	5.7	0.9
外表面反射率/%	14.4	15.6	45.7	15.8	10.4	10.1	11.3
内表面反射率/%	14.4	16.2	20.7	14.3	9.3	8.9	9.0
太阳辐射透过率/%	60.1	54.3	19.2	33.1	7.1	2.2	0.4
遮阳系数	0.81	0.74	0.28	0.49	0.22	0.17	0.15
太阳能得热系数	0.7	0.64	0.24	0.43	0.19	0.15	0.13

2 控制策略

EC 玻璃典型商用控制策略共有 2 类,一类是眩光控制,另一类是室外水平照度控制.

眩光控制:EC 玻璃状态只根据窗户引起的眩光进行控制,当有眩光时,EC 玻璃调节为着色态;当没有眩光时,EC 玻璃为透明态.

本文用 C1 表示眩光控制策略. C1 控制策略使可见光和太阳辐射热最大限度地进入室内,同时避免眩光污染,保障室内光环境舒适. 眩光根据房间地理位置、朝向、人的位置等信息判断. 在模拟研究中采用简化方法,引入眩光指数 DGI 为判断依据, DGI > 22 时判断有眩光.

室外水平照度控制:通过比较室外水平照度实测值与控制阈值,调节 EC 状态,控制进入室内的可见光和太阳辐射热;当有眩光时,EC 玻璃强制为着色态. 根据控制阈值不同,该控制策略分为 8 种,用 S1 ~ S8 表示,见表 2. 以策略 S1 为例说明控制原理,当室外水平照度 < 20 000 lux 时,EC 玻璃为透明态,当 20 000 lux ≤ 室外水平照度 < 70 000 lux 时,EC 玻璃为中间态 1,当室外水平照度 ≥ 70 000 lux 时,EC 玻璃为中间态 2.

同时为了保证室内光舒适,以室外水平照度控制的控制策略(S1 ~ S8)也增加了眩光控制. 当有眩光时,调节 EC 玻璃至着色态;当没有眩光时,根据室外水平照度控制策略控制.

表 2 EC 玻璃室外水平照度控制策略

Table 2 EC window commercial control strategy

控制策略	EC 玻璃窗状态		
	透明态→ 中间态 1	中间态 1→ 中间态 2	中间态 2→ 着色态
S1	20 000	70 000	
S2	20 000	60 000	
S3	20 000	50 000	
S4	20 000	40 000	
S5	10 000	40 000	
S6	10 000	30 000	
S7	5 000	20 000	60 000
S8	5 000	10 000	30 000

除了上述 2 类控制策略之外,考虑 EC 玻璃在着色态时能尽可能减少进入室内的太阳辐射热,有

利于减少由此带来的空调负荷,本文研究还增加了一种将 EC 玻璃固定在着色态的控制策略,用 C2 表示,C2 策略将 EC 玻璃一直固定为着色态,其状态不根据室外水平照度和眩光指数的变化而变化,最大限度减少透过玻璃的自然光和太阳辐射热。

普通玻璃窗、高透型 low-e 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗均设计有电动窗帘,进行眩光控制,以使本文 4 种玻璃对比研究的室内光舒适性尽量一致。当有眩光时,电动窗帘拉下;当无眩光时,电动窗帘收起。

3 模拟结果与分析

对 EC 玻璃窗不同控制策略以及对比玻璃窗进行能耗模拟计算。由于采用理想空调系统,室内温度保持在设定值;采用自动照明控制,室内照度保持在设定照度以上,因此室内照度和温度的模拟结果均满足舒适需求。以下主要从节能方面,对 EC 玻璃窗与普通玻璃窗(PT)、高透 low-e 玻璃窗(GL)、低透 low-e 玻璃窗(DL)进行比较,分析 EC 控制策略与控制参数阈值对节能影响规律。

3.1 供冷季

供冷季能耗模拟计算结果如图 2 所示,具体分析如下:

1) 透过玻璃窗的太阳辐射量

根据供冷季建筑热环境的需求,应降低 EC 玻璃透过率,减少进入室内的太阳辐射热。当 EC 玻璃控制策略为 C1 时,透过玻璃窗进入室内的太阳辐射量最大,因为 EC 玻璃平时保持透明态,太阳辐射透过率最大(33.1%);当 EC 玻璃窗固定在着色态(C2)时,由于着色态的太阳辐射透过率最低(0.4%),最有利于减少透过玻璃窗进入室内的太阳辐射量,其仅为透明态(C1)的 1.0%。

当 EC 玻璃采用室外水平照度控制时,透过玻璃的太阳辐射量为 C1 的 16.8%~57.9%。随着室外水平照度控制阈值的减小,透过玻璃窗的太阳辐射量随之减小,控制阈值越小越有利于减少太阳辐射热形成的空调负荷。

相比普通玻璃窗、高透型 low-e 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗,EC 玻璃窗分别降低进入室内的太阳辐射量 48.1%~99.5%、43.2%~99.4% 和 -70.5%~98.2%,显著降低进入室内的太阳辐射。

2) 照明能耗

在供冷季,建筑光环境对玻璃透过率的需求与热环境的需求恰好相反,光环境要求提高 EC 玻璃

透过率使可见光尽可能多进入室内,降低人工照明能耗。当 EC 玻璃窗控制策略为 C1 时,照明能耗为最低,因为 EC 玻璃平时保持透明态,可见光透过率最大(60.2%),自然采光量大,基本可以维持室内照度。而当 EC 玻璃固定在着色态(C2)时,由于可见光透过率最低,仅为 0.9%,进入室内的可见光最少,必须依靠人工照明维持室内照度,照明能耗显著增大,为 C1 的 32 倍。

当 EC 玻璃采用室外水平照度控制时,照明能耗为 C1 的 1~11 倍,但显著低于 EC 着色态(C2)。随着室外水平照度控制阈值的减小,照明能耗变化趋势与透过玻璃窗的太阳辐射量恰好相反,照明能耗随着控制阈值的减小而增大,控制阈值越小,自然采光量越小,需要补充的人工照明越多,照明能耗越大。

EC 玻璃窗照明能耗分别是普通玻璃窗、高透型 low-e 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗的 0.7~22.7、0.7~22.7 和 0.4~12.5 倍。可见,EC 玻璃控制策略对照明能耗有重要影响,并且 EC 玻璃具有降低照明能耗的潜力。在发生眩光时,静态玻璃窗利用窗帘控制眩光,室内照明完全依赖照明灯;EC 玻璃采用着色态控制眩光,可透过少量可见光。因此 EC 玻璃既可以减少眩光,又可降低照明能耗。

3) 空调能耗

当 EC 玻璃控制策略 C1 时,由于 EC 玻璃更多时间处于透明态,透过玻璃窗的太阳辐射量大,空调负荷也最大。当 EC 玻璃固定在着色态(C2)时,虽然进入室内的太阳辐射热最少,但空调能耗未有显著降低,空调能耗仅为透明态(C1)的 95.8%。因为 EC 玻璃在着色态时,进入室内的可见光最少,为保证室内照度需要开启更多人工照明,照明散热量相应增大,增大了冷负荷,空调能耗未显著变化。

当 EC 玻璃采用室外水平照度控制时,空调能耗为 C1 的 87.5%~92.5%,比 EC 着色态(C2)取得更好节能效果。随着控制阈值的减小,空调能耗呈现先减小后增大的趋势,控制策略 S7 时的空调能耗最低。控制阈值过大时,进入室内的太阳辐射热多,空调能耗大;控制阈值过小时,虽然透过玻璃窗的太阳辐射量小,但照明能耗会增大,造成空调能耗的增加。

EC 玻璃窗相比普通玻璃窗、高透型 low-e 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗,空调能耗分别降低 12.9%~23.8%、12.1%~23.1% 和 -14.5%~-0.2%。可见,EC 控制策略对空调能耗也有显著

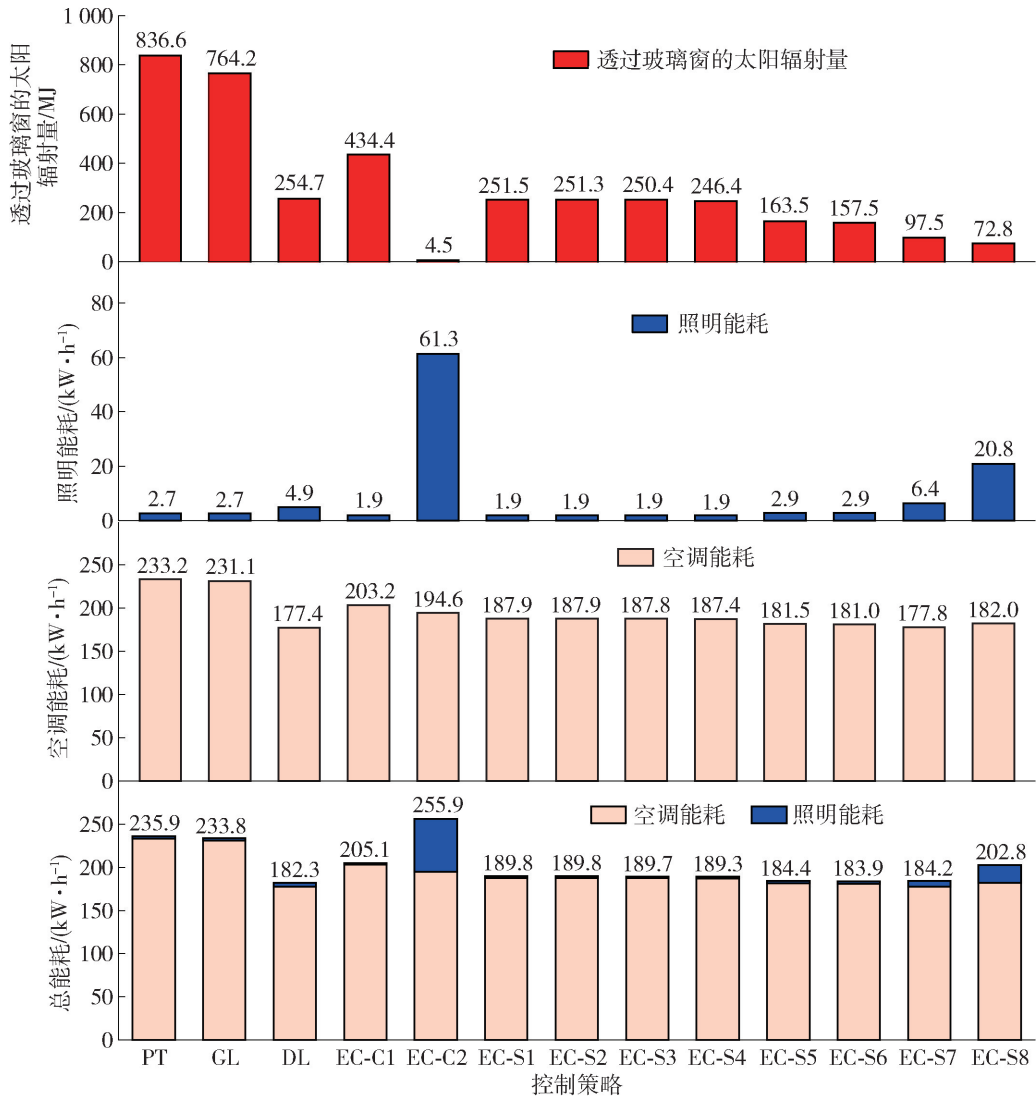


图2 EC玻璃窗与普通、高透low-e、低透low-e的供冷季能耗比较

Fig. 2 Energy consumption comparison of the EC window with ordinary, high transmittance Low-E and low transmittance Low-E windows in cooling season

影响。

4) 总能耗

当EC玻璃固定在着色态(C2)时,总能耗达到最高。着色态虽然减少进入室内的太阳辐射热,但照明能耗过大,照明散热引起的空调能耗也较大,造成总能耗增大,比C1总能耗高24.5%。

当EC玻璃采用室外水平照度控制时,总能耗为C1的87.5%~92.5%,相比着色态(C2)取得显著节能效果。随着室外水平照度控制阈值的减少,总能耗与空调能耗的变化趋势相似,呈现先减小后增大趋势。控制策略S6取得最低能耗,该控制阈值略大于空调能耗最低的控制策略S7阈值。

EC玻璃窗相比普通玻璃窗、高透型low-e玻璃窗和低透型low-e玻璃窗,总能耗可分别降低-

8.5%~22.1%、-9.5%~21.4%和-40.4%~-0.9%。可见,EC玻璃窗的控制策略和控制阈值对节能效果有重要影响,控制不当时反而造成能耗增大。

3.2 供暖季

供暖季能耗模拟计算结果如图3所示,具体分析如下:

1) 透过玻璃窗的太阳辐射量

根据供暖季建筑热环境的需求,应提高EC玻璃透过率,使进入室内的太阳辐射热尽可能增多。当EC玻璃在控制策略为C1时,透过玻璃窗进入室内的太阳辐射量最大。当EC玻璃窗固定在着色态(C2)时,透过玻璃窗的太阳辐射量仅为C1的1.4%。

当EC玻璃采用室外水平照度控制时,透过玻

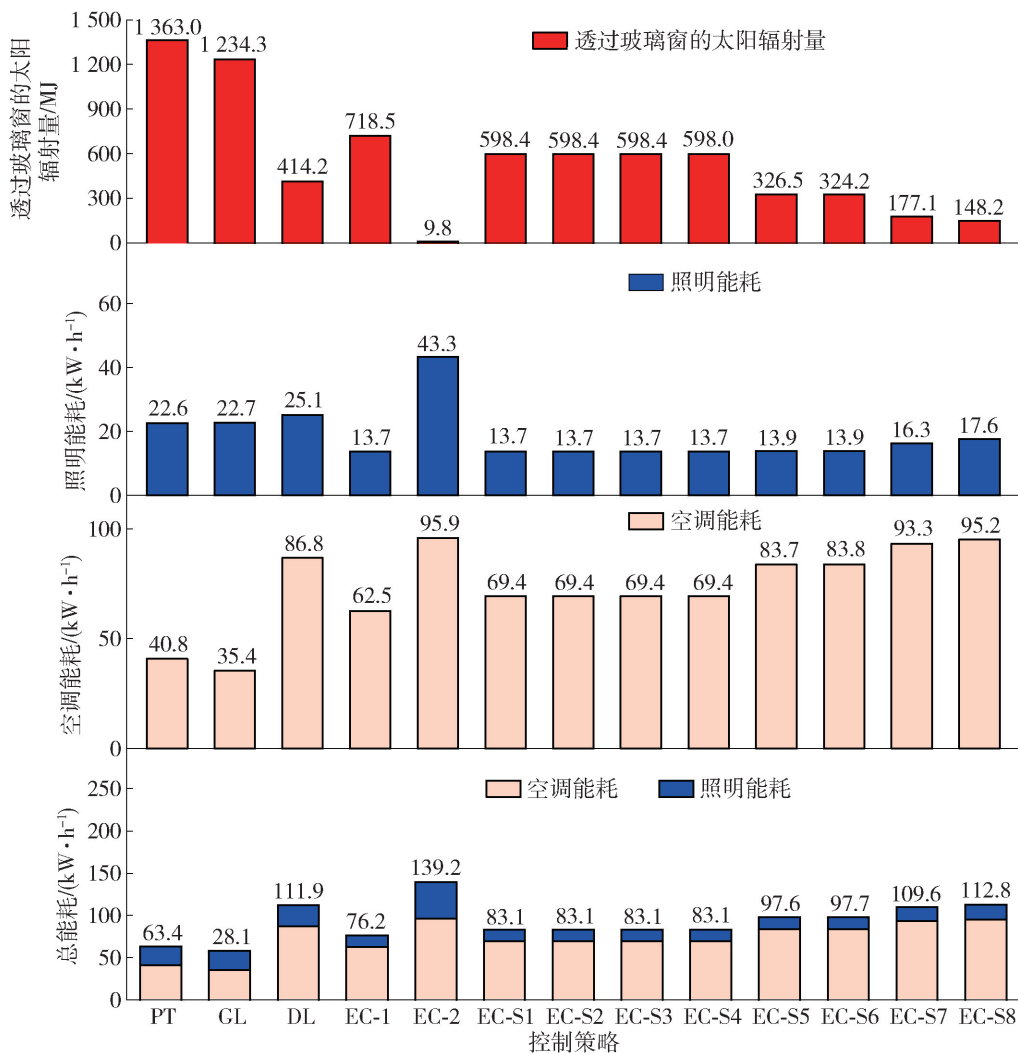


图3 EC玻璃窗与普通、高透low-e、低透low-e玻璃窗的供暖季能耗比较

Fig. 3 Energy consumption comparison of the EC window with ordinary, high transmittance Low-E and low transmittance Low-E windows in heating season

璃的太阳辐射量为C1的20.6%~83.3%。随着室外水平照度控制阈值的减小,透过玻璃窗的太阳辐射量随之减小,将增大冬季空调负荷。

EC玻璃窗相比普通玻璃窗、高透型low-e玻璃窗和低透型low-e玻璃窗,透过玻璃窗的太阳辐射量分别减少47.3%~99.3%、41.8%~99.2%和-73.4%~97.6%。

2) 照明能耗

在供暖季,建筑光环境对玻璃透过率的需求与热环境需求基本一致,光环境也要求提高EC玻璃透过率使更多可见光进入室内,降低照明能耗。当EC玻璃采用C1控制时,照明能耗为最低;当EC玻璃固定在着色态(C2)时,照明能耗最大,为透明态(C1)的3.2倍。

当EC玻璃采用室外水平照度控制时,照明能

耗为C1的1.0~1.3倍。照明能耗随着室外水平照度控制阈值的减小而增大,控制阈值越小,照明能耗越大。

供暖季EC玻璃窗的照明能耗变化规律与供冷季类似,但照明能耗明显高于供冷季,主要由于供暖季太阳高度角较低,眩光时间较长,为控制眩光,EC玻璃窗处于着色态和静态玻璃窗的电动窗帘拉下的时间较长。当EC玻璃控制策略为C1时,或采用较大控制阈值的室外水平照度控制时,如S1~S4,照明能耗较低。

EC玻璃窗的照明能耗分别是普通玻璃窗、高透型low-e玻璃窗和低透型low-e玻璃窗的0.6~1.9、0.6~1.9和0.6~1.7倍。

3) 空调能耗

供暖季EC玻璃对空调能耗与透过玻璃窗的

太阳辐射量的影响规律恰好相反.当 EC 玻璃控制策略为 C1 时,空调能耗最低.当 EC 玻璃固定在着色态(C2)时,空调能耗最大,为 C1 的 1.5 倍.

当 EC 玻璃采用室外水平照度控制时,空调能耗为 C1 的 1.1~1.5 倍.空调负荷随着室外水平照度控制阈值的减小而增大.

EC 玻璃窗相比普通玻璃窗、高透型 low-e 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗,空调能耗分别增加了 53.2%~135.0%、76.6%~170.9% 和 -28.0%~10.5%. EC 玻璃采用 C1 策略时,最有利于空调节能.

4) 总能耗

供暖季 EC 玻璃对总能耗的影响规律与对空调能耗和照明能耗影响规律一致.当 EC 玻璃采用 C1 控制策略时,玻璃透过率最大,不仅照明能耗最低、空调能耗最低,而且总能耗最低.当 EC 玻璃固定在着色态(C2)时,玻璃透过率最小,对空调能耗和照

明能耗均有产生影响,总能耗为 C1 的 1.8 倍.

当 EC 玻璃采用室外水平照度为控制参数时,总能耗是 C1 的 1.1~1.8 倍,总能耗随着控制阈值的减小而增大.

EC 玻璃窗相比普通玻璃窗、高透型 low-e 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗,总能耗分别增加 20.0%~119.4%、30.9%~139.4% 和 -32.0%~24.3%. EC 按照采用 C1 策略时,在供暖取得最佳节能效果.

3.3 全年总能耗

图 4 给出基于不同控制策略的 EC 玻璃窗与对比玻璃窗的全年总能耗,其中控制策略 S9 为供冷季和供暖季分别采用能耗最低的控制策略,在供冷季采用策略 S7,根据室外水平照度适度引入自然光,减少透过玻璃窗的太阳辐射量;在供暖季采用策略 C1,将 EC 固定在透明态,尽可能增加进入室内的太阳辐射热和自然光.

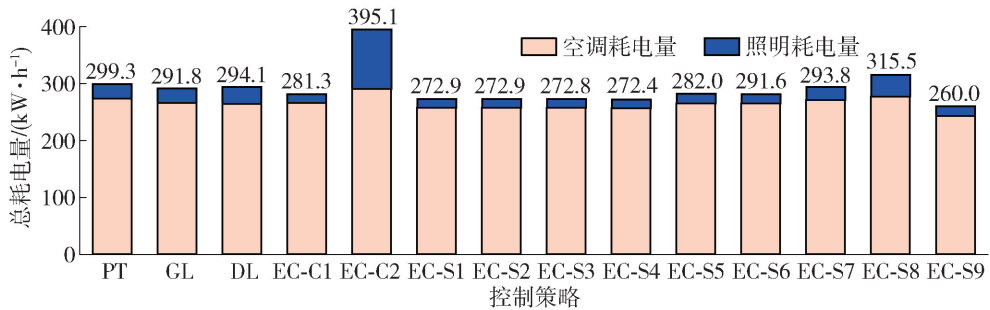


图 4 EC 玻璃窗与普通、高透 low-e、低透 low-e 玻璃窗的全年能耗比较

Fig. 4 Annual energy consumption comparison of the EC window with ordinary, high transmittance Low-E and low transmittance Low-E windows

从图 4 可以看出,当 EC 玻璃固定在着色态(C2)时,全年总能耗最高,超过 3 种静态玻璃窗.当 EC 玻璃窗在不同季节采用最佳控制策略 S9 时,全年总能耗最低,相比普通玻璃窗、高透型 low-e 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗分别节能 13.2%、11.0% 和 11.6%. EC 玻璃窗在不同季节应采用不同的适用控制策略,才能起到预期节能效果.

4 结论

1) 在供冷季,由于建筑光热环境对 EC 玻璃窗需求不一致,EC 玻璃窗的节能控制应寻求照明能耗与空调能耗的最佳平衡点.控制参数与其阈值的选取对 EC 玻璃窗节能效果有重要影响,科学选取 EC 玻璃窗的控制参数及其阈值,才能充分发挥 EC 玻璃窗节能优势.

2) 在供暖季,EC 玻璃窗的节能控制应尽量利

用室外自然采光和太阳辐射,并采取有效措施减少或防止眩光. EC 玻璃窗供暖季适用控制策略为 C1,无眩光时采用透明态,最大限度使太阳辐射热和可见光进入室内,同时采用着色态控制眩光,能较好保证室内光环境,使室内更为舒适.

3) 建议 EC 玻璃窗在不同季节采用不同控制策略.在供冷季采用室外水平照度控制 S7,供暖季采用 C1 策略时能耗最低,相比普通玻璃窗、高透型 low-e 玻璃窗和低透型 low-e 玻璃窗全年分别节能 13.2%、11.0% 和 11.6%. EC 玻璃窗在不同季节应采用不同的适用控制策略,才能起到预期节能效果.

EC 玻璃窗在我国的应用与研究尚处于初期,本文仅采用模拟方法,对采用市场销售的具有 4 种状态的 EC 玻璃窗在北京某办公室的供冷季和供暖季应用效果进行初步探讨. EC 玻璃窗在我国建筑的实际应用效果,以及 EC 玻璃窗中间态数量和状态

的优化选择, EC 玻璃窗对过渡季的影响等问题尚需要今后进一步研究。

参考文献:

- [1] 淮旭光, 李娜, 王文田, 等. 电致变色玻璃在建筑节能应用与发展[J]. 建筑玻璃与工业玻璃, 2013(8): 9-10.
HUI X G, LI N, WANG W T, et al. Application and development of electrochromic windows in building energy saving [J]. Architectural Glass and Functional Glass, 2013(8): 9-10. (in Chinese)
- [2] PICCOLO A, SIMONE F. Performance requirements for electrochromic smart window [J]. Journal of Building Engineering, 2015, 3: 94-103.
- [3] 刘全明, 姚涛, 彭罗文. 智能玻璃在建筑门窗幕墙中的应用研究及发展概述[J]. 工程质量, 2015, 33(8): 93-96.
LIU Q M, YAO T, PENG L W. Overview of application and development of smart glass in building doors and windows curtain walls[J]. Construction Quality, 2015, 33(8): 93-96. (in Chinese)
- [4] 陈怡, 徐征, 孙金礼, 等. 大面积智能电致变色玻璃的产业化现状及未来[J]. 功能材料, 2013, 44(17): 2441-2446.
CHEN Y, XU Z, SUN J L, et al. Industrialization status and future of large area smart electrochromic glass [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(17): 2441-2446. (in Chinese)
- [5] DUSSAULT J M, GOSELIN L, GALSTIAN T. Integration of smart windows into building design for reduction of yearly overall energy consumption and peak loads [J]. Solar Energy, 2012, 86: 3405-3416.
- [6] 李峥嵘, 徐伟鹏, 句俊玲, 等. 电致变色玻璃窗对上海居住建筑室内热环境的影响[J]. 暖通空调, 2015, 45(5): 74-76.
LI Z R, XU W P, JU J L, et al. Effect of electrochromic window on thermal environment for a residential building in Shanghai [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(5): 74-76. (in Chinese)
- [7] 李峥嵘, 徐伟鹏. 电致变色玻璃窗太阳辐射透过特性研究[J]. 建筑节能, 2014, 42(11): 36-40.
LI Z R, XU W P. Properties of the transmitted beam and diffuse solar radiation for the electrochromic window [J]. Building Energy Efficiency, 2014, 42(11): 36-40. (in Chinese)
- [8] LI Z R, JU J L, XU W P. Daylighting control performance and subject responses to electrochromic windows in a meeting room[J]. Procedia Engineering, 2015, 121: 27-32.
- [9] LEE E S, DIBARTOLOMEO D L, SELKOWITZ S E. Daylighting control performance of a thin-film ceramic electrochromic window: field study results [J]. Energy & Buildings, 2006, 38: 30-44.
- [10] LEE E S, DIBARTOLOMEO D L, KLEMS J, et al. Monitored energy performance of electrochromic windows controlled for daylight and visual comfort [J] // ASHRAE Transactions, 2006, 112: 122-141.
- [11] LEE E S, DIBARTOLOMEO D L. Application issues for large-area electrochromic windows in commercial buildings [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2002, 71(4): 465-491.
- [12] TAVARES P F, GASPAR A R, MARTINS A G, et al. Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in mediterranean climates [J]. Energy Policy, 2014, 67(4): 68-81.
- [13] TAVARES P, BEMRNARDO H, GASPAR A, et al. Control criteria of electrochromic glasses for energy savings in mediterranean buildings refurbishment [J]. Solar Energy, 2016, 134: 236-250.
- [14] ALDAWOU D A. Conventional fixed shading devices in comparison to an electrochromic glazing system in hot, dry climate [J]. Energy & Buildings, 2013, 59: 104-110.
- [15] ASSIMAKOPOULOS M N, TSANGRASSOULIS A, GUARRACINO G, et al. Integrated energetic approach for a controllable electrochromic device [J]. Energy & Buildings, 2004, 36: 415-422.
- [16] SBAR N L, LOU P, HONG M Y, et al. Electrochromic dynamic windows for office buildings [J]. International Journal of Sustainable Built Environment, 2012, 1: 125-139.
- [17] YIK F, BOJI M. Application of switchable glazing to high-rise residential buildings in Hong Kong [J]. Energy & Buildings, 2006, 38: 463-471.
- [18] YOUNESS A, PHILIPPE A. Thermal comfort and visual comfort in an office building equipped with smart electrochromic glazing: an experimental study [J]. Energy Procedia, 2015, 78: 2464-2469.
- [19] 梁庆, 徐刚, 徐雪青. 电致变色玻璃窗节能特性分析 [J]. 材料研究与应用, 2008, 2(4): 470-474.
LIANG Q, XU G, XU X Q. Analysis of energy-saving characteristics of electrochromic windows [J]. Materials Research and Application, 2008, 2(4): 470-474. (in Chinese)
- [20] JONSSON A, ROOS A. Evaluation of control strategies for different smart window combinations using computer simulations [J]. Solar Energy, 2010, 84(1): 1-9.