DOI:10.11918/202504084

温度自适应辐射致冷涂层性能与节能分析

杜佳欣[1],李 响[2],王富强[1,3],孙永铭[2],刘红雷[2],程子明[1]

(1.哈尔滨工业大学(威海)新能源学院,山东 威海 264200;2.中建中环新能源有限公司,南京 210012;
3.哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院,哈尔滨 150001)

摘 要:日间辐射致冷技术通过强烈反射太阳光波段(0.3~2.5 μm)能量、利用"大气窗口"(8~13 μm)与温度3 K的外太空进行能量交换,无需额外能量输入即可实现低于环境温度的降温。然而,现有辐射致冷技术在寒冷冬季下也会强烈反射太阳波段能量,急剧增加建筑采暖能耗。为此,制备了具有相变控温功能的温度自适应辐射致冷涂层,通过不同温度下结晶紫内酯的可逆开闭环反应,实现了在10~40 ℃内33%的太阳反射率调控范围,夏季太阳反射率达92%,冬季则下降到59%。实际建筑测试结果显示,涂覆该涂层后夏季室内平均温度降低3 ℃,冬季室内平均温度仅降低0.1 ℃。经过计算,重庆市应用该涂层后全年减碳率达15.7%,比传统辐射致冷涂层高5.0%,并且可以有效削减用电尖峰负荷,降低电网运营和扩建成本。涂层制备简单、成本低廉,突破了传统辐射致冷涂层仅适用于部分温暖和炎热地区的地理局限,具有优异的跨气候带适用性,可以在冷热负荷占比大于0.05的绝大多数城市大规模应用。

关键词:辐射致冷;温度自适应;热致变色;建筑节能;碳排放

中图分类号:TK9 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)10-0171-10

Performance and energy-saving analysis of temperature-adaptive radiative cooling coatings

Du Jiaxin[1], Li Xiang[2], Wang Fuqiang[1,3], Sun Yongming[2], Liu Honglei[2], Cheng Ziming[1]

(1. College of New Energy, Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai 264200, Shandong, China;
2. China Construction Power and Environment Engineering Co., Ltd., Nanjing 210012, China;
3. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Daytime radiative cooling technology reflects the energy of the solar wavelength band (0.3-2.5 μm) strongly and exchanges energy with outer space at a temperature of 3 K through the "atmospheric window" (8-13 μm), achieving cooling below the ambient temperature without additional energy input. However, existing radiative cooling technology also strongly reflects solar wavelength energy in cold winters, dramatically increasing the energy consumption of building heating. This study prepared a temperature-adaptive radiative cooling coating with phase change and temperature control function. Through the reversible opening and closing reaction of crystalline violet lactone at different temperatures, a solar reflectance control range of 33% within 10-40 ℃ was achieved, with a solar reflectance of 92% in summer and 59% in winter. Actual building tests show that after applying this coating, the average indoor temperature in summer is reduced by 3 ℃, and that in winter is reduced by only 0.1 ℃. According to calculations, the annual carbon reduction rate in Chongqing after applying the coating is 15.7%, which is 5.0% higher than that of the traditional radiative cooling coating, and it can effectively reduce peak electricity loads and reduce power grid operation and expansion costs. The coating is simple to prepare and inexpensive, breaking through the geographical limitations of traditional radiative cooling coatings that are only suitable for some warm and hot regions. It has excellent cross-climate applicability and can be used on a large scale in most cities where the hot and cold load ratio is greater than 0.05.

Keywords: radiative cooling; temperature adaptation; thermochromism; building energy efficiency; carbon emission

随着经济和技术的快速发展,人们更加注重生活舒适度,暖通空调、热水生产系统等外部设备使建筑物成为最大的能源消耗端[1-3]。据统计,建筑物占全球能源使用总量的32%,建筑业排放的CO_2占

收稿日期:2025-04-30;**录用日期**:2025-06-06;**网络首发日期**:2025-12-08
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251208.1027.002
基金项目:国家自然科学基金(52306078);江苏省产学研合作项目(BY20230669)
作者简介:杜佳欣(2001—),男,硕士研究生;王富强(1983—),男,教授,博士生导师
通信作者:王富强,wangfuqiang@hitwh.edu.cn

全球总排放量的 40%[4-5]。发达国家建筑业能耗占比达 40%，发展中国家的建筑能耗增长速度更高，并伴随着更显著的污染物排放[6]。其中，建筑能耗中的 40% ~60% 被用于建筑温度控制。因此，降低用于建筑控温的耗能对于节能减排至关重要。

除了传统建筑节能技术[7-10]，辐射致冷作为一种新兴的制冷策略，近年来在建筑节能领域取得了众多突破[11-14]。该方法通过反射太阳波段(0.3 ~ 2.5 μm)的强烈辐射，并且在 8 ~13 μm 大气窗口波段向外太空发射红外能量，以实现零能耗的亚环境冷却效果[15-17]。但是常规辐射致冷涂层固定的辐射特性，在低温下势必带来额外的采暖能耗负担，抵消部分节能效益。为实现辐射致冷的灵活应用，目前的方法包括机械调控[18-19]和电、化学刺激等[20]。Butler 等[21]通过可拉伸式辐射致冷结构实现了 132 W/m^{2}的可调功率范围，并且仅需简单的机械应变作为工作模式的触发开关；Zhao 等[22]提出了一种动态玻璃板，可以通过 2.5 V 的低电压可逆银电沉积在太阳能加热模式(70% 的太阳光入射)和辐射冷却模式(89% 的太阳能)之间切换。类似的工作均有着复杂的制备工艺[23-25]，并且需要人工干预以及额外能量输入，大规模应用的潜力有限。因此，亟需开发一种制备工艺简单、无需干预与额外能量输入即可实现夏季制冷与冬季保温的温度自适应辐射致冷技术。

针对上述辐射致冷材料辐射特性调控的局限，基于可逆有机热致变色微胶囊，制备了具有相变控温功能的温度自适应辐射致冷涂层，可以在无额外能量输入和人为干预的情况下，满足不同温度下的控温需求。户外实验表明，温度自适应辐射致冷涂层炎热环境下制冷效果比传统辐射致冷涂层略微降低，寒冷情况下的保温能力则大幅提升。建筑能耗分析与经济效益评估结果显示，该涂层拥有优异的跨气候带适用性和经济性，可以在中国大部分地区推广应用，有望推动绿色建筑行业的可持续发展，为实现“双碳”目标作出贡献。

1 温度自适应性能

1.1 制备与表征

涂层的可逆相变控温性能主要取决于其中的热致变色微胶囊的酯环开闭反应，其制备过程如图 1 所示。首先，双酚 A 与结晶紫内酯被用作成色剂与显色剂，加热至熔融态并加入到丁醇中。将溶液 pH 调至 8 ~9，利用乳化剂对上述混合物进行乳化作用。利用树脂对颗粒进行外壳封装，并调节 pH 至 4，降温固化后以形成具有可逆相变功能的热致变色微胶囊。结晶紫内酯在低温下的闭环结构本身为无色，在与双酚 A 发生反应后，质子加成使得结晶紫内酯的内酯环打开，呈现深色。而在高温下，结晶紫内酯的氢被双酚 A 捕获，恢复闭环的无色状态。由于过程中的加成反应和配位反应均为可逆过程，二者协同构成了热致变色微胶囊的可逆相变特性。

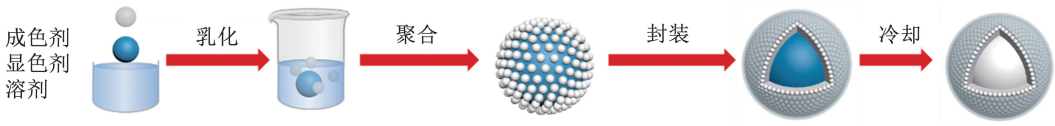


图 1 热致变色微胶囊制备

Fig. 1 Preparation of thermochromic microcapsules

温度自适应辐射致冷涂层通过简单的混合搅拌法制备，采用电子天平进行各组分的称量和小型搅拌机进行混合搅拌。搅拌均匀后采用喷涂或流涂法进行涂覆，并在 60 ℃下进行快速烘干成型。实验材料规格和质量分数如表 1 所示。

温度自适应辐射致冷涂层优异的节能效果来源于其不同温度下可自适应调节的辐射特性，利用紫外 - 可见光 - 近红外分光光度计和傅里叶红外光谱仪，对涂层进行了不同温度下辐射特性的测量。如图 2 所示，温度自适应辐射致冷涂层的太阳光反射率在 40 ℃下达 92%，低于 10 ℃时降低到 59%，材料的大气窗口发射率则保持在 91%。

表 1 主要实验材料

Tab. 1 Main experiment materials

名称	分子式	纯度/%	质量分数/%
双酚 A(BPA)	$C_{15}H_{16}O_2$	99	10
结晶紫内酯	$C_{26}H_{29}N_3O_2$	98	7.5
丁醇	$CH_3CH_2CH_2CH_2OH$	99	32.5
钛白粉	TiO_2	化学纯	6
硫酸钡	$BaSO_4$	分析纯	2.5
氧化铝	Al_2O_3	化学纯	2.5
碳酸钙	$CaCO_3$	化学纯	6
二氧化硅	SiO_2	化学纯	3
丙烯酸乳液	Acrylic	化学纯	30

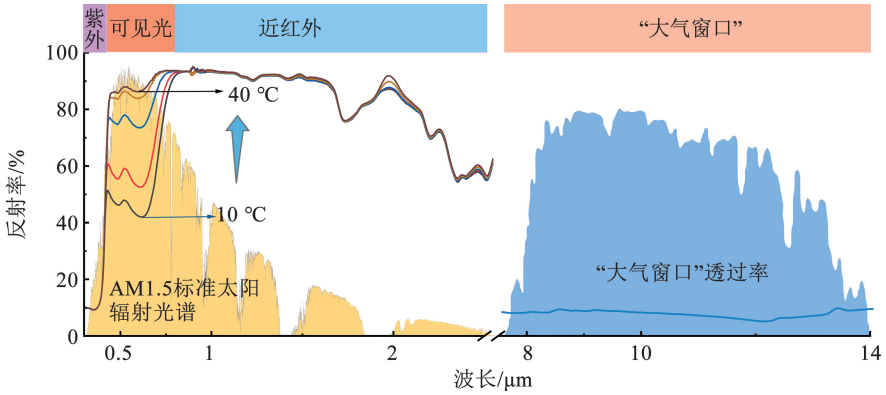


图 2　温度自适应辐射致冷涂层辐射特性

Fig. 2　Radiative properties of temperature-adaptive radiative cooling coatings

为初步验证温度自适应辐射致冷涂层的温度响应特性，对涂层进行了相变循环测试，图 3 展示了温度自适应辐射致冷涂层的相变过程。两片温度自适应辐射致冷涂层的金属基底涂片均采用同一批次制备的涂层涂覆，左侧涂片置于 10 ℃的环境温度下，右侧涂片置于与金属基底同样尺寸的温度控制模块上方，并缓慢加热。随着温度的升高，涂层的颜色逐渐变浅，这是由于高温和低温下结晶紫内酯环的开闭，微胶囊的可见光反射率发生了可逆的变化。在自身温度达到 40 ℃时，可视为相变过程彻底完成，此时涂层的太阳波段反射率达到最高，继续加热几乎无法观测到辐射特性参数的变化。对加热状态的涂层用冰袋进行急速降温处理后，10 s 内迅速恢复至与左侧相同的深色状态。并且相变过程可逆，多次循环加热后，并未观察到同一温度下辐射特性参数的变化。实验设备见表 2。

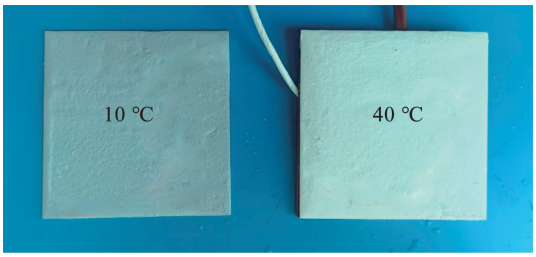


图 3　变色过程

Fig. 3　Process of color change

表 2　实验设备

Tab. 2　Experiment equipment

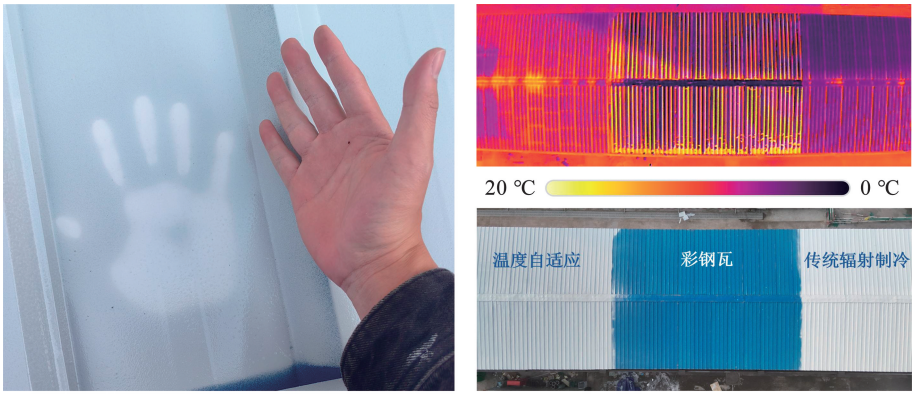
仪器	品牌
分光光度计(SolidSpec-3700)	岛津，日本
多通道温度巡检仪(SH-32X)	科联，中国
傅里叶红外光谱仪(Nicolet iS50)	赛默飞，美国
红外热像仪(Ti400)	福禄克，美国
温度控制模块(GJR-946M)	工匠仁，中国

1.2　户外控温测试

为探究温度自适应辐射致冷涂层在建筑中的实际控温效果，开展了温度自适应辐射致冷涂层的冬季和夏季户外测试。2024 年 12 月，在重庆某住宅建筑进行了冬季户外测试。在屋顶彩钢瓦不同区域分别进行温度自适应辐射致冷涂料、传统辐射致冷涂料的喷涂，并保留部分彩钢瓦裸露作为对照。不同区域彩钢瓦屋顶外表面与室内空气区域均布设温度传感器，用于实时监测室内外温度变化，并在正午典型时刻采用红外热像仪进行屋顶的俯视拍摄。

图 4(a)为温度自适应辐射致冷涂层的相变对比，可以看出，来自手掌的微小的温度扰动使涂层外观立即呈现明显改变。图 4(b)展示了 3 种工况下的正午屋顶红外图像，两种涂层均表现出明显的降温，其中，温度自适应辐射致冷涂层拥有更适合寒冷环境下的低功率制冷能力。

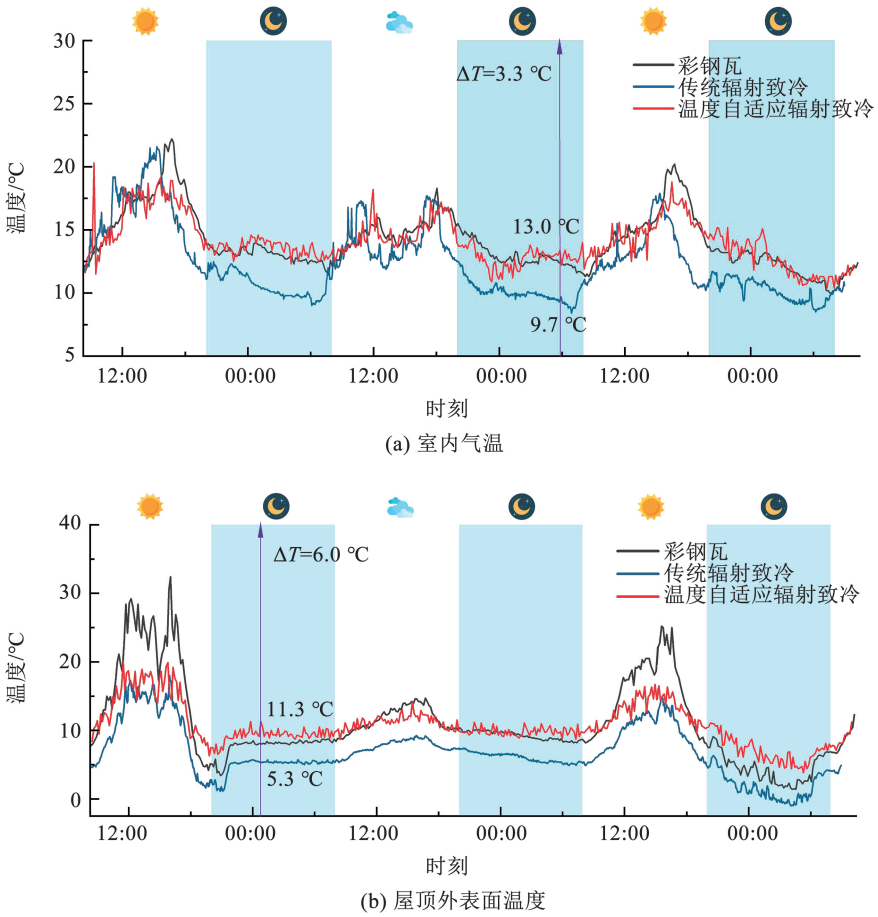
图 5 展示了 3 个昼夜的冬季室内外温度变化。温度自适应辐射致冷涂层和传统辐射致冷涂层在正午分别能够实现最高 12.9 ℃和 14.9 ℃的屋顶外表面降温。应用传统辐射致冷涂层的室内温度也明显低于温度自适应辐射致冷涂层房间和普通房间，表明传统辐射致冷在冬季带来的额外供暖现象十分突出。与传统辐射致冷涂层相比，应用温度自适应辐射致冷涂层后，室内温度最高上升了 3.3 ℃，3 d 内的室内平均气温上升了 1.8 ℃，与普通房间相比，平均气温仅下降了 0.1 ℃。显然，温度自适应辐射致冷涂层降温效果在高温下与传统辐射致冷涂层相近，低温下保暖能力则明显优于传统辐射致冷涂层，对于解决传统辐射致冷涂层固定辐射特性带来的额外采暖负担效果显著。



(a) 温度响应　　(b) 正午红外热成像

图 4　户外相变效果

Fig. 4　Outdoor phase change effect



(a) 室内气温

(b) 屋顶外表面温度

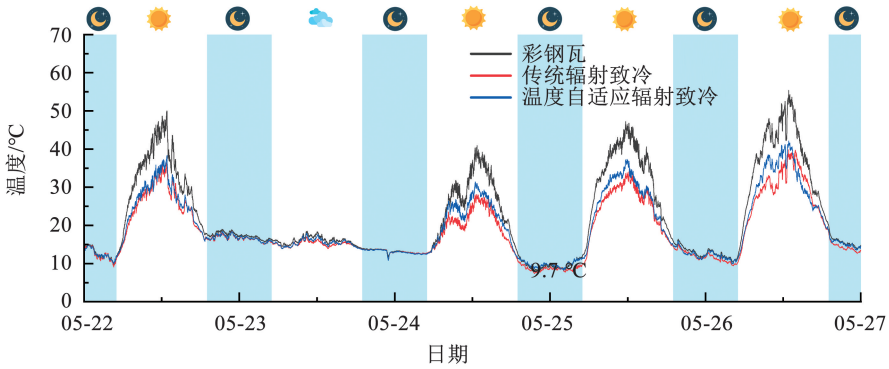
图 5　冬季测试室内外温度

Fig. 5　Tested indoor and outdoor temperatures in winter

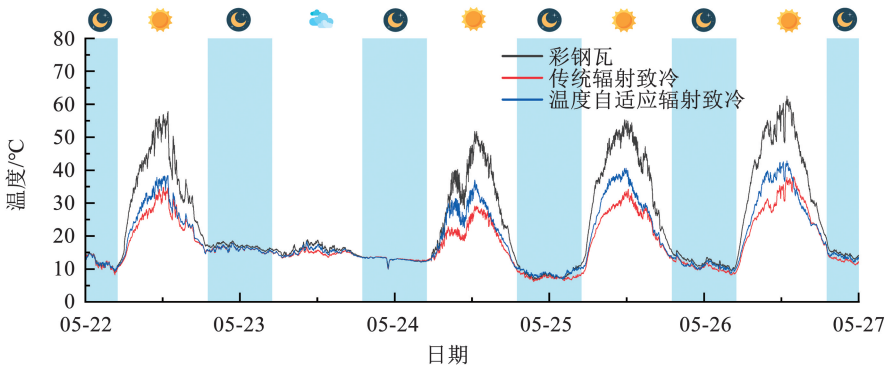
2025 年 5 月,进行了 5 d 的夏季户外对比测试。与冬季测试类似,分别设置了温度自适应辐射致冷涂层、传统辐射致冷涂层以及普通彩钢瓦 3 种工况。为使传热过程与真实建筑接近,测试对象采用金属箔包裹的泡沫微型建筑模型。在 3 种微型建筑模型内部空间和屋顶外表面粘接温度传感器,实时采集温度数据。

如前文所述,温度自适应辐射致冷涂层中的热致变色微胶囊相变程度取决于自身温度,温度离相变点越远相变过程越充分,实验中温度自适应辐射致冷涂层屋顶外表面温度绝大部分时间处于 40 ℃的极限温度以内,反射率略微低于传统辐射致冷涂层。如图 6 所示,涂覆温度自适应辐射致冷涂层后,微型建筑室内最高气温下降 12 ℃,屋顶外表面最高温度下降 19 ℃;涂覆传统辐射致冷涂层后,室内最高气温下降 14 ℃,外表面最高温度下降 24 ℃。涂

覆温度自适应辐射致冷涂层后，5 d 内平均室内气温下降 3 ℃，相比传统辐射致冷涂层仅减少 0.7 ℃。可以看出，夏季高温环境中，温度自适应辐射致冷涂层的降温能力略微低于传统辐射致冷涂层，但仍然表现出可观的制冷效果。



(a) 室内气温



(b) 屋顶外表面温度

图 6　夏季测试室内外温度

Fig. 6　Tested indoor and outdoor temperatures in summer

2　节能减碳分析

为进一步量化温度自适应辐射致冷涂层的节能潜力，对应用涂层后的典型城市住宅建筑进行了节能计算和详细分析。各城市住宅建筑面积存量数据根据国家统计年鉴和统计局公开数据进行估算[26-28]。需要注意的是，计算中使用的住宅建筑面积指的是建筑内的有效居住面积，而非建筑外表面积或建筑占地面积。在不同的温度下，根据温度自适应辐射致冷涂层的热致变色特性，对 Energy Plus 中建筑模型的外表面辐射参数进行调整，并计算供冷、供热、照明等耗电量[29]。汇总全年的数据后，结合城市的冷热负荷占比作为温度自适应辐射致冷涂层的跨气候区适用性判据指标，与传统辐射致冷涂层以及裸露表面的普通建筑进行直观的对比。

2.1　碳排放计算

制冷和采暖分别消耗电力和天然气，因此，二者碳排放计算规则不同，但是均以 CO_2 排放当量作为评估标准[30]。电力碳排放计算规则如下：

$$C_e = Q \times \lambda_{OM} \tag{1}$$

式中：C_e 为电力消耗引起的碳排放当量，Q 为用电量，λ_{OM} 为电量边际排放因子。电量排放因子可以理解为运行发电机组的含碳量，而 λ_{OM} 是区域电网中所有火电厂碳排放因子的加权平均，反映了该区域电力系统的所有化石燃料电厂总排放量。

天然气采暖排放计算如下：

$$C_{gas} = \frac{V_{CO_2} Q_{gas}}{q_{st} \eta_t} \tag{2}$$

式中：C_{gas} 为天然气消耗引起的碳排放当量，V_{CO_2} 为天然气碳排放因子，Q_{gas} 为天然气供热量，q_{st} 为标准煤的热值，η_t 为天然气燃烧效率。

2.2　节能预期

为直观展示不同气候下两类辐射致冷材料的节能效果，选取了中国不同地理分区下的代表性城市进行分析。Energy Plus 中设置 3 种工况，分别是不作任何处理的普通建筑、屋顶喷涂传统辐射致冷涂层的建筑和屋顶喷涂温度自适应辐射致冷涂层的建筑。其中，喷涂温度自适应辐射致冷涂层的建筑模型表面采用与前文一致的随温度变化的动态辐射参数，用于模拟该涂层实际情况下的热致变色特性。

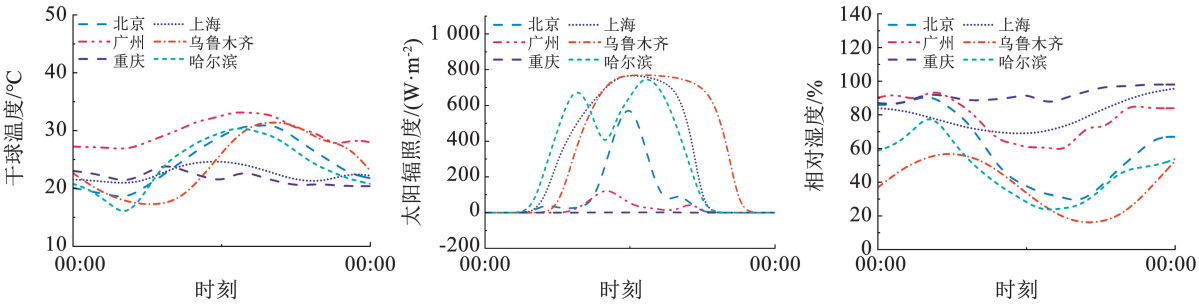
由于寒带、亚寒带等极端低温区几乎不具备辐射致冷的应用前景，仅讨论冷热负荷比为 0.05 以上的热带、亚热带以及温带气候下的应用情况。表 3 为选取城市的碳排放参数。

表 3 城市住宅 CO_2 排放计算

Tab. 3 Calculation of CO_2 emissions from urban dwellings

城市	冷热负荷比	住宅面积/ $10^8\ m^2$	碳排放因子(以 CO_2 计)/ ($kg \cdot kWh^{-1}$)	传统辐射致冷减碳(以 CO_2 计)/ 10^4 t	温度自适应辐射致冷减碳(以 CO_2 计)/ 10^4 t
北京	0.56	6.56	0.558 0	156.79	365.37
上海	2.90	8.40	0.584 9	371.00	541.80
广州	—	5.94	0.440 3	450.93	430.60
重庆	9.36	10.24	0.522 7	518.72	755.53
乌鲁木齐	0.14	1.20	0.623 1	−45.89	34.48
哈尔滨	0.05	2.52	0.536 8	−51.80	17.85

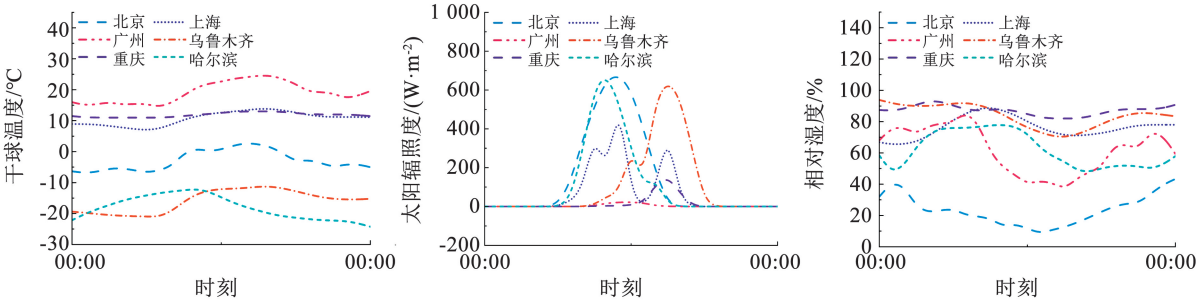
如图 7 ~9 所示，辐射致冷涂层在不同的气候区域节能效果差异较大。广州为炎热城市的代表，位于华南沿海，全年日间平均气温在 28 ℃以上，几乎没有采暖需求。传统辐射致冷低温下过冷的局限可忽略，因此，温度自适应辐射致冷涂层和传统辐射致冷涂层节能效果相近，年节能量分别为 62.1 MJ/m^2 和 59.2 MJ/m^2。



(a) 干球温度 (b) 太阳辐照度 (c) 相对湿度

图 7 夏季气候参数

Fig. 7 Climate parameters in summer



(a) 干球温度 (b) 太阳辐照度 (c) 相对湿度

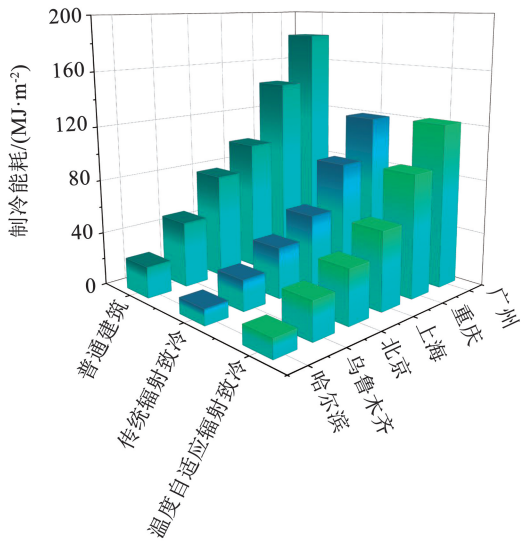
图 8 冬季气候参数

Fig. 8 Climate parameters in winter

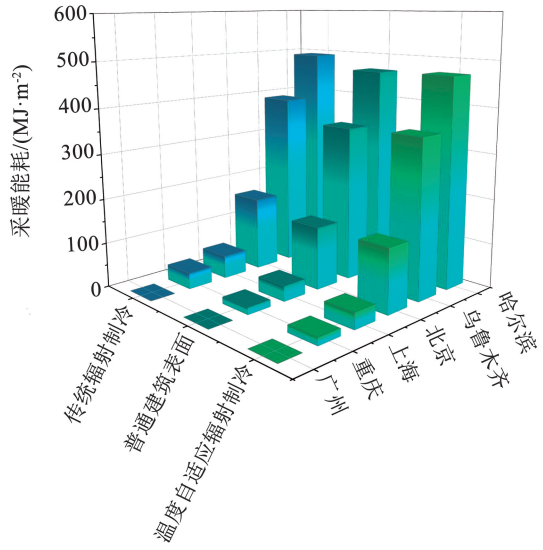
典型冬冷夏热城市中以北京、上海、重庆为代表。北京属于温带季风气候，冬季和夏季的日间平均气温在 2 ℃和 32 ℃，季节变化趋势明显。应用温度自适应辐射致冷涂层和传统辐射致冷涂层后，制冷能耗分别减少了 38.1 MJ/m^2 和 40.4 MJ/m^2，采暖能耗则分别增加了 1.7 MJ/m^2 和 25.1 MJ/m^2，总节能量分别为 36.4 MJ/m^2 和 15.3 MJ/m^2。与北京相比，上海纬度较低，制冷能耗更大，采暖需求更小，温度自适应涂层带来的节能效益则更高，年节能量为 38.7 MJ/m^2，比传统辐射致冷涂层高 12.2 MJ/m^2。重庆属于亚热带季风性湿润气候，存在较高的空气相对湿度和更高的平均气温，夏季较高的体感温度使重庆的制冷能耗相对更高，应用两种涂层后的节能效益也更显著，相变辐射致冷涂层和传统辐射致

冷涂层的年节能量分别达 51.8 MJ/m^2 和 35.1 MJ/m^2。

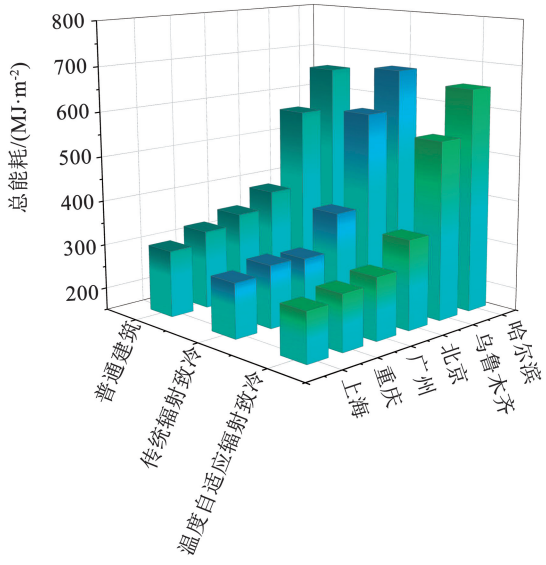
乌鲁木齐为中国西北部的典型温带大陆性干旱气候，冬季寒冷漫长，夏季炎热短暂，一年中最高气温可达 38 ℃，最低温可达 – 28 ℃。较强的太阳辐照强度使传统辐射致冷的高温节能效果强于温度自适应辐射致冷涂层，但是漫长的冬季使传统辐射致冷涂层带来的额外采暖负担被放大。经过计算，由于制冷节能量无法覆盖采暖能耗的额外增量，在乌鲁木齐应用传统辐射致冷涂层后，全年能耗反而上升了 19.7 MJ/m^2；而温度自适应辐射致冷涂层在冬季保持着最小的太阳波段反射率，保暖能力几乎与普通建筑一致，在夏季则相应地提供充足的制冷效果，年节能量达 14.7 MJ/m^2。同样，哈尔滨为中国东北部温带大陆性季风气候的代表，夏季白天平均气温在 25 ℃以下，应用传统辐射致冷涂层后全年总能耗增加了 16.4 MJ/m^2，应用相变辐射致冷涂层后减少了 5.7 MJ/m^2。



(a) 单位面积制冷能耗



(b) 单位面积采暖能耗



(c) 单位面积总能耗

图 9　全年能耗分析

Fig. 9　Annual energy consumption analysis

与碳排放总量相比，减碳率消除了建筑面积存量、能源结构等地区差异影响，反映了应用涂层后的相对节能效益，是对当地气候适配效果的直观体现。

图 10 展示了各城市应用两类辐射致冷涂层后的减碳率。广州代表了中国低纬度亚热带城市，温度自适应辐射致冷涂层节能效益略低于传统辐射致冷涂层，应用后减碳率分别为 17.0% 和 17.8%。重庆、上海、北京分别代表了华中、华东和华北地区，全年冷热负荷比分别为 9.36、8.40、6.56，传统辐射致冷涂层的局限被放大，应用后减碳率分别为10.7%、

8.9%、4.0%；应用温度自适应辐射致冷涂层后，减碳率分别提升到 15.7%、12.9%、9.4%。乌鲁木齐和哈尔滨分别代表了中国西北部和东北部的温带大陆性气候，冷热负荷比为 0.14 和 0.05，应用传统辐射致冷涂层后，额外采暖无法被制冷节能效益抵消，碳排放出现了增加；温度自适应辐射致冷涂层虽然也不可避免地带来额外的采暖能耗，但是低温下良好的保温性能，使年节能量仍然保持着正收益，减碳率分别为 2.6% 和 0.8%。可以看出，传统辐射致冷涂层仅在冷热负荷占比大于 0.56 的部分城市中表现出较好的节能效益，而温度自适应辐射致冷涂层除了在极少数全年炎热地区节能效益有所不如，在冷热负荷比为 0.05 ~ 9.36 的大区间范围均实现更高的节能收益，表现出更优异的跨气候带适应性。

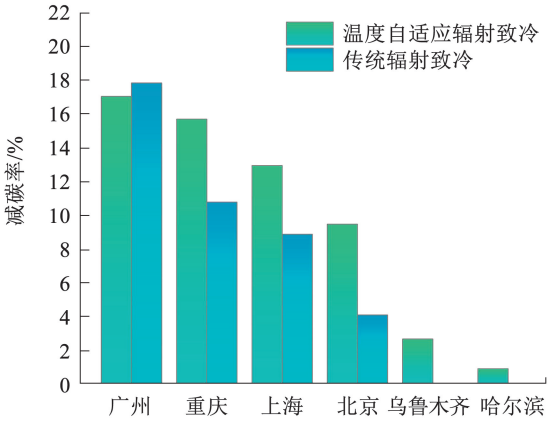


图 10 城市 CO_2 当量减碳率

Fig. 10 CO_2 equivalent carbon reduction rate for cities

3 经济效益评估

温度自适应辐射致冷涂层的经济效益主要体现在直接电费节约与电网峰值负荷减少两方面。本研究结合实验数据、区域电价政策及电网投资成本，量化分析其综合经济价值，并与传统涂层及普通建筑进行对比，验证该技术的推广潜力。节电量和夏季尖峰负荷计算参数来源于前文 Energy Plus 中的能耗分析结果。参考国家发展和改革委员会公布的 2023 年居民电价数据，选取典型城市平均电价（表 4），结合节电量计算年电费节省额，节电量计算如下：

$$S = E \times P \tag{3}$$

式中：S 为节电费用，E 为节电量，P 为区域电价。由于实际节电效果与可铺设面积、适用意愿、空调使用情况等因素密切相关，计算结果仅用于不同气候区节电趋势与涂层的回收周期参考。

温度自适应辐射致冷涂层和传统辐射致冷涂层的生产与施工成本分别为 30 元/m^2 和 10 元/m^2。以重庆为例，应用温度自适应辐射致冷涂层后，年节电量约为 145 亿 kWh，节省电费约 75.6 亿元，占全市年用电开支的 9.7%，成本回收周期为 4 a；传统辐射致冷涂层节电量约为 99.8 亿 kWh，节省电费约 51.9 亿元，回收周期为 2 a。在哈尔滨、乌鲁木齐等寒冷地区，温度自适应辐射致冷涂层虽然保持着正节电，但效益较低，回收周期过长，适用性明显低于炎热地区和常见冬冷夏热城市。

表 4 年节电收益

Tab. 4 Annual electricity savings

城市	平均电价/（元·kWh^{-1}）	温度自适应辐射致冷涂层			传统辐射致冷涂层		
		节电量/亿 kWh	年收益/亿元	回收周期/a	节电量/亿 kWh	年收益/亿元	回收周期/a
北京	0.55	66.5	36.6	5.4	28.5	15.7	4.2
上海	0.62	90.4	56.0	4.5	61.9	38.4	2.2
广州	0.60	97.9	58.8	3.0	103	61.5	1.0
重庆	0.52	145.0	75.6	4.1	99.8	51.9	2.0
乌鲁木齐	0.50	4.9	2.46	14.6	-6.6	-3.3	—
哈尔滨	0.54	3.97	2.14	35.3	-11.5	-6.2	—

温度自适应辐射致冷涂层不仅通过降低建筑能耗直接减少电费支出，还能减少夏季高峰期空调制冷需求，从而直接缓解电网峰值负荷压力，减少运营成本。电网峰值负荷减少量 ΔP 计算如下：

$$\Delta P = R_{AC} \times P_{total} \times E_{save} \tag{4}$$

式中：R_{AC} 为空调负荷占比，P_{total} 为总峰值负荷，E_{save} 为制冷节能率。同样以重庆市为例，夏季峰值负荷约 2 816 万 kW，空调占比 50%，温度自适应辐射致冷涂层的制冷节能率为 48%，应用后峰值负荷减少量可达 675.8 万 kW，占峰值总负荷的 24%。

综上，温度自适应辐射致冷涂层通过动态调节太阳反射率，在降低建筑能耗的同时为电网系统带来了可观的经济效益，展现了可大规模推广应用的价值。

4　结　论

1)通过热致变色微胶囊制备了具有相变控温功能的温度自适应辐射致冷涂层,在重庆某住宅建筑开展了冬季和夏季的控温测试,并进行了跨气候带能耗分析计算。研究表明,除冷热负荷比小于0.05的少数寒冷地区外,温度自适应辐射致冷涂层适用于大多数气候区,并且相比传统辐射致冷涂层,在冷热负荷比为 0.05 ~ 0.93 的绝大多数气候区域均表现出更优异的节能效益,具有更广泛推广价值,对于建筑节能事业发展具有重要意义。

2)经过光谱测试,温度自适应辐射致冷涂层温度响应灵敏,在 10 ~ 40 ℃实现了 33% 的太阳波段反射率调控范围,高温时可达 92%,低温时则降低到 59%,大气窗口波段的发射率保持在 91%。

3)在实际建筑测试中,应用温度自适应辐射致冷涂层后冬季室内平均温度相比传统辐射致冷涂层提高了 1.8 ℃,相比普通建筑仅下降 0.1 ℃;夏季室内平均温度相比传统辐射致冷涂层降低了 0.7 ℃,相比普通建筑下降了 3 ℃。

4)在以重庆为例的冬冷夏热的典型温带城市中应用温度自适应辐射致冷材料后,减碳率可达 15.7%,比传统辐射致冷材料高 5.0%;可以有效减少 24% 的夏季用电尖峰负荷,降低电网的运营和扩建成本。

参考文献

[1]杜晨秋, 李信仪, 喻伟, 等. 人员热适应对住宅全年供暖、供冷需求影响: 以重庆为例[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(6): 138
Du Chenqiu, Li Xinyi, Yu Wei, et al. Effect of occupant dynamic thermal adaption on residential heating and cooling demands in Chongqing[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(6): 138. DOI: 10.11918/202009020

[2]吴俊杰, 马秀琴, 黄超, 等. 天津中新生态城绿色建筑评价体系及节能效益研究[J]. 河北工业大学学报, 2011, 40(4):42
Wu Junjie, Ma Xiuqin, Huang Chao, et al. Evaluation system of green buildings and energy efficiency in Tianjin Sino-Singapore Eco-city[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2011, 40(4): 42. DOI: 10.14081/j.cnki.hgdxb.2011.04.022

[3]李伟, 张广振, 李月娟. 吉林省大中型城市节能潜力实证研究[J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(5): 95
Li Wei, Zhang Guangzhen, Li Yuejuan. The energy-saving potential and counter measures of the medium and large cities in Jilin province [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2012, 32(5): 95. DOI: 10.19718/j.issn.1005 - 2992.2012.05.028

[4]Yuan Yanping, Yu Xiaoping, Yang Xiaojiao, et al. Bionic building energy efficiency and bionic green architecture: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 771. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.004

[5]温静. 基于节余碳排放配额的建筑合同能源管理运营模式研究[J]. 能源环境保护, 2021, 35(2): 98
Wen Jing. Research on energy management operation mode of construction contract based on surplus carbon emission quota[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(2): 98. DOI: 10.3969/j.issn.1006 - 8759.2021.02.018

[6]Garg N, Kumar A, Pipralia S, et al. Initiatives to achieve energy efficiency for residential buildings in India: a review[J]. Indoor and Built Environment, 2018, 28(6): 1420326X1879738. DOI: 10.1177/1420326x18797381

[7]孙秀竹. 居住建筑中围护结构节能构造分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(6): 83
Sun Xiuzhu. Analysis of energysaving of building enclosure in residential building[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2004, 28(6): 83. DOI: 10.3321/j.issn:1000 - 5870.2004.06.021

[8]阮方, 钱晓倩, 钱匡亮, 等. 人行为模式对外墙内外保温节能效果的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2): 109
Ruan Fang, Qian Xiaoqian, Qian Kuangliang, et al. Influence on energy saving effects of internal and external wall insulations for different occupant behaviors[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2): 109. DOI: 10.11918/j.issn.0367 - 6234.2017.02.018

[9]孙世钧, 于奕欣, 陈庆丰. 建筑地面保温与节能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003(5): 573
Sun Shijun, Yu Yixin, Chen Qingfeng. Energy saving on ground floor of building[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003(5): 573. DOI: 10.3321/j.issn:0367 - 6234.2003.05.015

[10]张一飞, 赵天宇, 李光皓. 哈尔滨居住建筑南向窗尺寸优化遮阳效果分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(2): 37
Zhang Yifei, Zhao Tianyu, Li Guanghao. Energy conservation optimization for shape of southern window of residential buildings in Harbin[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(2): 37. DOI: 10.11918/j.issn.0367 - 6234.2015.02.007

[11]Cheng Ziming, Han Han, Wang Fuqiang, et al. Efficient radiative cooling coating with biomimetic human skin wrinkle structure[J]. Nano Energy, 2021, 89:106377. DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.106377

[12]Zhai Yao, Ma Yaoguang, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. Science, 2017, 355: 1062. DOI: 10.1126/science.aai7899

[13]Dong Yan, Meng Weifeng, Wang Fuqiang, et al. "Warm in winter and cool in summer": scalable biochameleon inspired temperature-adaptive coating with easy preparation and construction[J]. Nano Letters, 2023, 23(19): 9034. DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c02733

[14]Liang Huaxu, Zhang Xingping, Wang Fuqiang, et al. Bio-inspired micropatterned thermochromic hydrogel for concurrent smart solar transmission and rapid visible-light stealth at all-working temperatures[J]. Light: Science & Applications, 2024, 13(1): 202. DOI: 10.1038/s41377 - 024 - 01525 - y

[15]Lee M, Kim G, Jung Y, et al. Photonic structures in radiative cooling[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12(1): 134. DOI: 10.1038/s41377 - 023 - 01119 - 0

[16] Zhang Xingping, Cheng Ziming, Dong Yan, et al. Scalable bio-skin-inspired radiative cooling metafabric for breaking trade-off between optical properties and application requirements[J]. Acs Photonics, 2023, 5: 1624. DOI: 10.1021/acsphotonics.3c00241

[17] Zhang Xingping, Li Xiang, Wang Fuqiang, et al. Low-cost and large-scale producible biomimetic radiative cooling glass with multiband radiative regulation performance[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 23: 2270093. DOI: 10.1002/adom.202202031

[18] Zhao Xuzhe, Li Jiachen, Dong Kaichen, et al. Switchable and tunable radiative cooling: mechanisms, applications, and perspectives[J]. ACS Nano, 2024, 18(28): 18118. DOI: 10.1021/acsnano.4c05929

[19] Guo Na, Shi Changmin, Sheldon B, et al. A mechanical-optical coupling design on solar and thermal radiation modulation for thermoregulation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2024, 12(28): 17520. DOI: 10.1039/D4TA03388D

[20] Ding Yilin, Mei Zheyue, Wu Xueke, et al. Integrated multispectral modulator with efficient radiative cooling for innovative thermal camouflage[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 2500122. DOI: 10.1002/adfm.202500122

[21] Butler A, Argyropoulos C. Mechanically tunable radiative cooling for adaptive thermal control[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118527. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118527

[22] Zhao Xinpeng, Aili A, Zhao Dongliang, et al. Dynamic glazing with switchable solar reflectance for radiative cooling and solar heating[J]. Cell Reports Physical Science, 2022, 3(4): 100853. DOI: 10.1016/j.xcrp.2022.100853

[23] Frattolillo A, Loddo G, Mastino C C, et al. Heating and cooling loads with electrochromic glazing in Mediterranean climate[J]. Energy and Buildings, 2019, 201: 174. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.06.042

[24] Pyun K R, Jeong S, Yoo M J, et al. Tunable radiative cooling by mechanochromic electrospun micro-nanofiber matrix[J]. Small, 2023, 20: 2308572. DOI: 10.1002/smll.202308572

[25] Sheng Sizhe, Wang Jinlong, Zhao Bin, et al. Nanowire-based smart windows combining electro-and thermochromics for dynamic regulation of solar radiation[J]. Nature Communications, 2023, 14: 3231. DOI: 10.1038/s41467-023-38353-4

[26] 国家统计局固定资产投资统计司. 中国建筑业统计年鉴: 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021
Department of Fixed Assets Investment Statistics National Bureau of Statistics. China statistical yearbook on construction: 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021

[27] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴: 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China statistical yearbook: 2021[M]. Beijing: China Energy Statistics Press, 2022

[28] 国务院第七次全国人口普查领导小组办公室. 中国人口普查年鉴: 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022
Office of the Leading Group of the State Council for the Seventh National Population Census. China population census yearbook: 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022

[29] 张率, 刘衍, 侯立强, 等. 北方采暖地区居住建筑节能计算方法对比[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(10): 178
Zhang Shuai, Liu Yan, Hou Liqiang, et al. Comparative study on energy efficiency calculation methods of residential buildings in central heating areas of Northern China[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(10): 178. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201809015

[30] GB/T 2589—2020 综合能耗计算通则[S]
GB/T 2589—2020 General rules for calculation of the comprehensive energy consumption[S]

[31] 王涛, 张剑, 吴婧, 等. 迎峰度夏、迎峰度冬电力供需形势影响因素分析[J]. 电力勘测设计, 2024(8): 16
Wang Tao, Zhang Jian, Wu Jing, et al. Analysis of influencing factors on electric power demand and supply during summer and winter peak[J]. Electric Power Survey & Design, 2024(8): 16. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2024.08.003

(编辑 刘 彤)