

轻质围护结构内表面发射率对自然通风建筑室内热环境的作用机制实验研究

卢素梅

东莞理工学院/生态环境与建筑工程学院，广东东莞，510640；

摘要：为探究亚热带气候环境下轻质围护结构内表面发射率对自然通风建筑室内热环境及人体热舒适的影响，弥补该领域研究空白，本文在华南理工大学建筑节能研究中心楼顶的实验对比房，选取表面发射率分别为 0.05、0.25 和 0.8 的材料进行为期 10 天的现场实验，结合热适应性模型和 PMV 修正模型，通过测试室内热环境参数及收集受试者热舒适问卷数据展开分析。结果表明，围护结构内表面发射率与室内平均辐射温度、PMV 值及 TSV 值均呈显著负相关；与室外直接接触且受太阳直射的围护结构内表面，发射率越小其温度越高，而建筑内隔墙则相反；期望因子为 0.78 可有效预测低发射率自然通风建筑的室内热舒适。

关键词：轻质围护结构；内表面发射率；室内热环境 PMV 修正模型；热适应性模型

DOI: 10.69979/3029-2727.26.01.011

1 引言

封闭空间热环境研究已证实，外围护结构内表面发射率与室内热环境及人体热舒适密切相关，且其最优取值范围已得到初步界定^[1-2]。然而现有研究存在两大核心局限：其一，结论多基于空调稳态中性环境推导，“降低内表面发射率无法提升空气舒适温度”的传统认知缺乏多元场景验证，其在自然通风工况下的适用性尚未明确；其二，研究场景集中于封闭制冷空间，对自然通风建筑的热工特性与舒适影响机制研究覆盖度不足。当前学界普遍将风速、室外温度视为自然通风建筑室内舒适性的主导影响因素^[3-4]，却尚未系统揭示内表面发射率这一关键热工参数的潜在调控作用。截至目前，针对不同内表面发射率对自然通风建筑室内热环境及人体热舒适的专项研究相对欠缺，这一研究缺口制约了自然通风建筑热舒适优化设计的深度与实践成效。鉴于此，本文立足现有研究薄弱环节，创新性地聚焦我国亚热带气候区，以自然通风轻质围护结构建筑为研究载体，采用现场实测与主观评价相结合的方法，探究不同内表面发射率对室内热环境及人体热舒适的作用规律。本研究扩展了“内表面发射率—自然通风建筑—人体热舒适”关联机制的研究边界，为自然通风建筑热工设计优化及舒适性能提升提供新的理论依据与技术路径。

2 自然通风建筑的热舒适评价研究现状

PMV-PPD 模型仍是当前室内热舒适评价的核心工

具，但该模型的前提假设与实验数据均表明，其难以精准表征自然通风建筑的动态热舒适状况。为此，学界围绕自然通风环境特征，开展了系列热舒适实验与模型优化研究，目前形成两类主流适配模型：热适应性模型与 PMV 期望值修正模型。Dear 等^[3]基于 ASHRAE RP.884 数据库及多组实测数据，对比了空调建筑与自然通风建筑中两类模型的适用性，发现空调舒适范围外两者预测差异显著：热适应性模型更贴合自然通风建筑人员实际热感觉，界定的舒适温度区间更宽泛；而 PMV 原模型因与自然通风动态热环境假设不匹配，精准度不足。为弥补这一缺陷，学界一方面结合本土气候与建筑特征拓展热适应性模型，形成多类适配不同室外温度的修正公式，但该类模型以单一温度为核心评价变量，未兼顾风速、湿度等多因素协同影响，存在参数维度局限；另一方面提出 PMV 修正模型，通过引入期望因子（与全年炎热时长、空调使用频率相关，分高、中、低三类取值）试图缓解 PMV 与热感觉投票值（TSV）的“剪刀差”问题（见图 1），但未能突破原模型稳态理论框架，亦未根本解决 Fanger 指出的核心偏差——对炎热环境人体新陈代谢率的高估及对非空调环境居住者热期望的忽视。两类模型的固有局限导致当前自然通风建筑热舒适评价体系仍存在明显缺口，亟需构建贴合实际场景、兼顾多影响因素的评价逻辑。

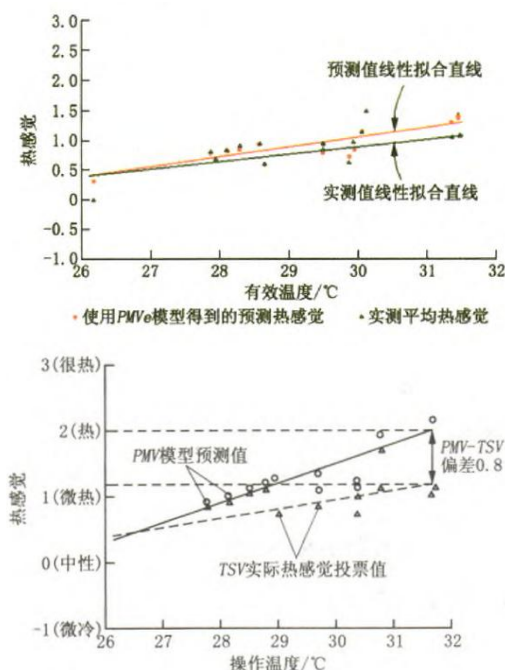


图 1 自然通风建筑热舒适评价模型与现场实测结果的比较^[3-4]

3 内表面发射率对人体热舒适影响的实验研究

3.1 研究目的

探究自然通风环境下，非透明轻质围护结构内表面发射率对室内热环境各项关键参数的影响，包括干球温度、湿球温度、围护结构表面温度、空气湿度及辐射换热量等；采用统计分析方法，明确自然通风场景中不同内表面发射率与人体热舒适度之间的量化关系。

3.2 实验设计与方法

本研究于华南理工大学建筑节能研究中心楼顶构建密封性能优良的实验对比舱（见图 2、图 3），以模拟自然通风建筑实际使用场景，开展为期两个月的夏季工况专项实验。实验核心调控变量为非透明围护结构内表面发射率，设定 0.05、0.25、0.8 三个梯度水平，分别通过在内墙表面敷设对应热物性材料实现——选用铝箔（ $\varepsilon=0.05$ ）、烫金羽绒服布料（ $\varepsilon=0.25$ ）及普通内墙涂料（ $\varepsilon=0.8$ ），所选材料热稳定性优良，可保障实验期间发射率参数恒定，且兼具材料可得性与操作便捷性。

实验周期选取 7 月 10 日—9 月 10 日（华南地区夏季高温高湿典型时段），筛选 10 个无降雨、无极端天气的晴朗日作为测试日。测试时段固定为每日 11:00-13:00，该时段太阳辐射强度稳定、室外温度波动幅度 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ，可最大限度削弱外界环境变量的干扰。实

验过程中维持门窗全开状态，模拟自然通风气流交换特征，室内风速、空气湿度随室外环境动态变化（不额外干预）；同时采用高精度传感器，对干球温度、湿球温度、围护结构表面温度、辐射换热量等关键参数进行 1 次 / 分钟的连续监测，确保实验数据的完整性与可靠性。



图 2 实验房实景图

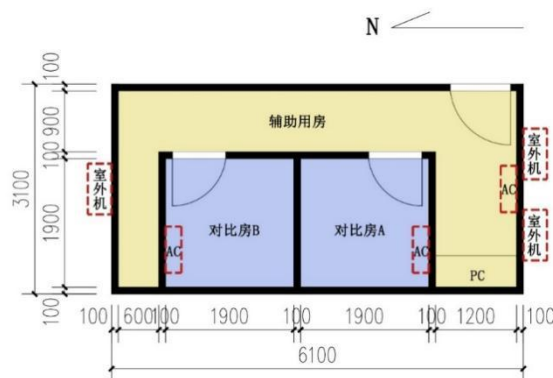


图 3 实验房平面图

3.3 主观评价设计与实验测试方案

3.3.1 问卷与评价指标体系设计

为系统获取受试者的主观热感知数据，构建了包含四大核心维度的主观评价指标体系，具体涵盖人体热感觉、热舒适等级、湿度感知及室内气流吹风感。其中，吹风感指标数据同步于自然通风工况下实时采集，实验结束后通过深度访谈法，进一步挖掘受试者对室内热环境热舒适特性的主观认知与反馈。主观评价标尺严格遵循 ASHRAE 国际标准体系：热感觉、吹风感及湿度感知均采用七级连续量化标尺，热舒适评价采用断裂式量化标尺。

3.3.2 受试者筛选与基线控制

受试者遵循人体热舒适实验筛选规范，选取华南理工大学在读学生 18 名（男女各 9 名），性别比例均衡，以规避性别差异对主观评价的干扰。受试者需满足无基础疾病、精神状态稳定、卫生状况达标等核心条件，保障主观评价数据可靠有效。实验期间，受试者统一穿

着华南地区夏季主流着装（短袖衬衣或 T 恤、轻质长裤、内衣裤及袜子），符合当地日常穿着习惯。考虑实验为动态测试，需严格控制服装热阻一致性，将服装热阻值限定为 0.45~0.5clo，确保测试基准统一。

3.3.3 实验流程与测试技术方案

实验前，受试者经室外进入辅助房间静坐适应预处理，消除室外热环境对初始热状态的干扰，保障评价基准一致。单次测试受试者 ≤ 2 人，全程保持静坐，规避活动量引发的代谢率波动对热感觉评价的客观性干扰。环境参数采用经计量校准的专业仪器（热电偶、HD32.3D 型环境参数测试仪等）测试，测试点设于房间几何中心距地面 1.2m 处（人体坐姿核心区域）。仪器通过专用支架固定，避免位移偏差，保障数据稳定精准。单次实验时长设定为 90 分钟，分两阶段：前 5 分钟为预适应阶段，受试者进入测试舱静坐调整，优化着装至近热中性初始状态；后 85 分钟为正式测试阶段，受试者填写主观评价指标，仪器同步持续采集环境参数。。

3.4 实验结果与数据分析

3.4.1 数据分析

数据分析涵盖两大核心维度：室内热环境参数实测值与受试者热反应主观问卷数据。数据处理需纳入室外环境因素，因实验环境受室外动态环境与室内可控工况耦合影响，兼具不确定性与确定性。数据处理先实现相同室外环境下不同工况的横向对比，再开展相同工况的纵向分析。为剔除室外环境干扰，数据按室外空气温度从高到低排序，以 0.5℃为间隔分组并取组内平均值，消除组间温差；不同工况对比基于同温分组平均值展开。

3.4.2 气象数据分析

实验期间 10:00-17:00 的逐时气象参数详见图 4 与图 5。由实测数据可知，整个实验阶段室外平均风速为 $2.35 \pm 1.03 \text{ m/s}$ ，整体保持稳定；室外空气相对湿度平均值为 $62.3 \pm 8.6\%$ ，波动范围较小，状态稳定；室外平均干球温度为 $32.03 \pm 1.83^\circ\text{C}$ ，温度变化幅度仅 1.83°C ，表明实验期间室外热环境条件基本一致。

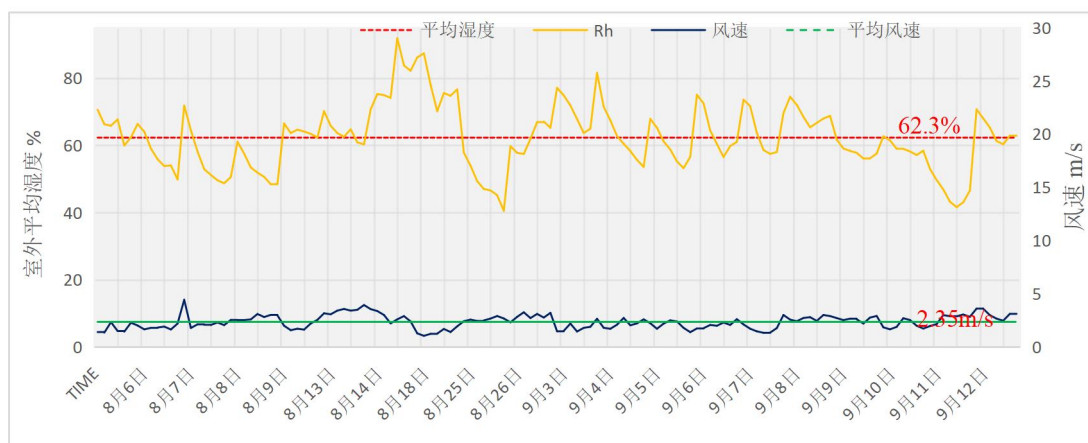


图 4 实验阶段室外逐时气象参数（室外湿度和风速）

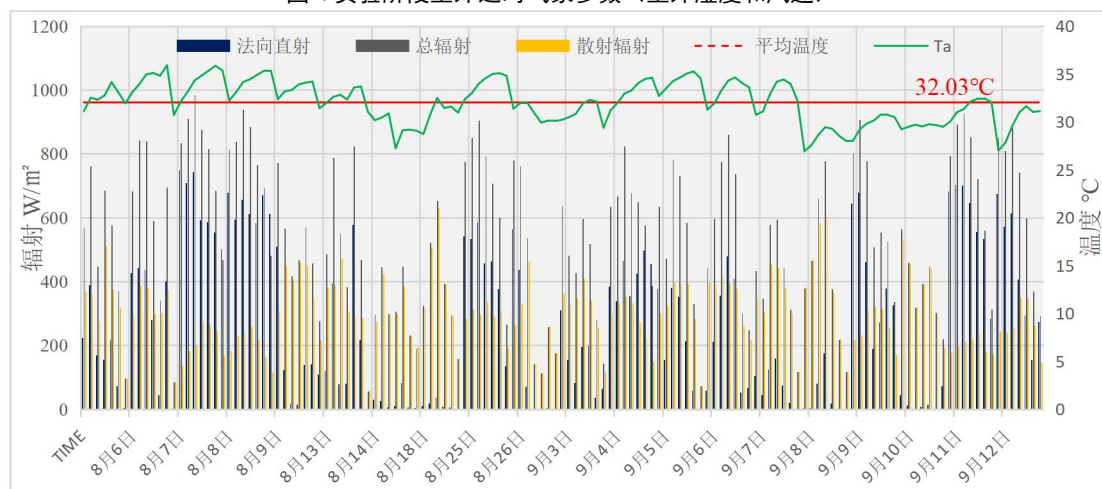


图 5 实验阶段室外逐时气象参数（室外温度和辐射量）

3.4.3 室内热环境参数分析

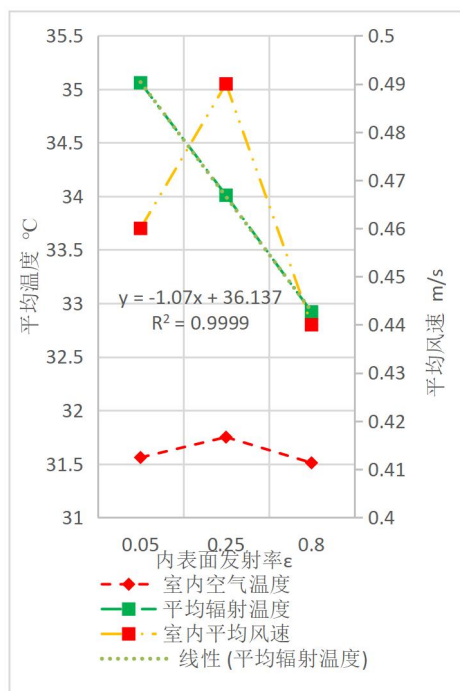


图 6 不同 ϵ 下的室内热环境参数

图 6 呈现了不同内表面发射率工况下，室内平均空气温度、平均辐射温度及平均风速的变化特征。室内平均空气温度介于 $31.56^{\circ}\text{C} \sim 31.75^{\circ}\text{C}$ 之间，其中在 $\epsilon = 0.25$ 工况下，室内空气温度较其他两种发射率工况略高 0.24°C 。室内平均辐射温度与内表面发射率 ϵ 呈显著正相关关系 ($R^2 = 0.9999$)，且发射率 ϵ 越低，室内平均辐射温度越高。自然通风场景下，室内热环境的热量主要源于室外空气输入，其核心影响机制为：高 ϵ

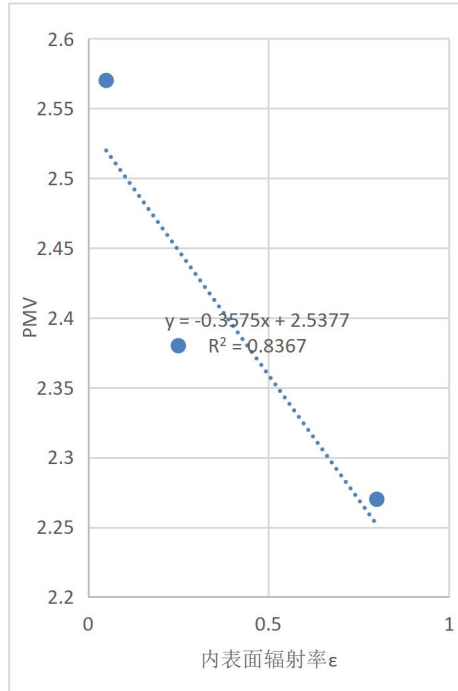
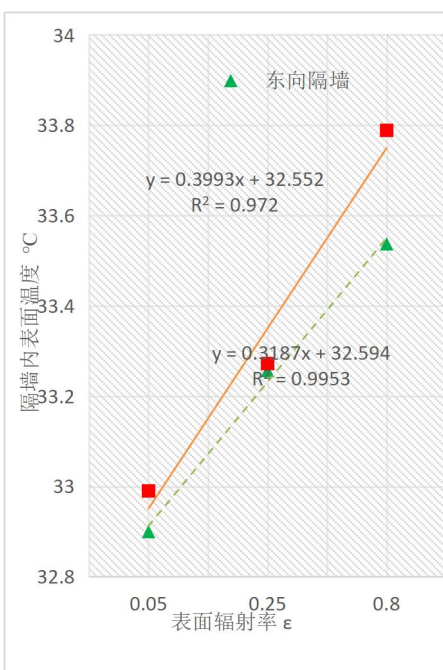
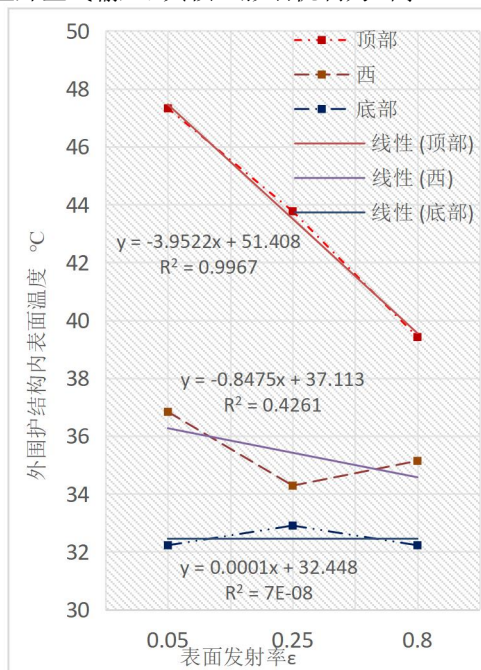


图 8 不同 ϵ 情况下的 PMV 平均值

材料因自身高吸收率特性会大量吸收环境热量，而低 ϵ 材料则会将热量反射至室内空间，进而导致辐射温度差异。风速方面， $\epsilon = 0.25$ 时室内平均风速虽略有提升，但与其他工况的差值分别为 0.03m/s 和 0.05m/s ，该差异处于实验误差允许范围内，因此可判定各工况下室内风速基本一致。

3.4.4 内表面温度实测分析



(i) 不同 ϵ 下的外围护结构内表面温度 (ii) 不同 ϵ 下的有温差隔墙内表面温度

图 7 不同表面发射率情况下的室内各表面温度

自然通风工况下,内表面发射率对室内各围护结构表面温度具有显著影响。分析过程中,鉴于三面内隔墙的温差不超过 0.8°C ,对其温度数据取均值处理;地面、西墙及屋顶因直接与室外环境接触,热交换特性不同,故单独开展针对性分析(详见图 7)。结果表明:屋顶内表面温度与内表面发射率 ε 呈显著负相关($R^2=0.9967$),西墙与 ε 为中等偏弱相关关系($R^2=0.4261$),地面与 ε 无明显相关关系($R^2=0.001$);而内隔墙表面温度与 ε 呈强正相关($R^2>0.95$)。

综上可得出结论:无太阳直射的墙体,内表面发射率 ε 越低,其表面温度越低;直接受太阳辐射的内墙(西墙、屋顶), ε 越小则表面温度越高;内隔墙的温度变化规律与无太阳直射墙体一致,即 ε 越低,表面温度越低。

3.4.5 PMV 平均值 (实测值)

HD32.3 仪器测试 PMV 时,设定人体代谢率 1.0met 、服装热阻 0.5clo 。自然通风建筑室内人体与环

境换热以对流为主,为明确辐射换热影响,开展专项分析。结果如图 8:围护结构内表面发射率 ε 与 PMV 平均值呈强负线性相关($R^2=0.8367$)。

3.5 调查问卷数据分析

3.5.1 热感觉投票值分析

(1) TSV 与 PMV 的量化相关性分析

本研究采用不同内表面发射率工况下的 PMV 平均值作为核心分析参数,与相应工况下的受试者热感觉投票值(TSV)进行线性回归分析,旨在明确两者的量化关联特征。经拟合得到回归方程:

$$\text{TSV}=0.7808\text{PMV}-0.0223 \quad (R^2=0.9865) \quad (1)$$

式(1)结果显示,TSV 与 PMV 之间存在显著的强线性相关关系,相关系数 R^2 高达 0.9865,表明该回归方程具有良好的拟合度。根据回归方程斜率可知,本实验场景下的热舒适期望因子取值为 0.78,与自然通风建筑热环境的适配性特征相符。

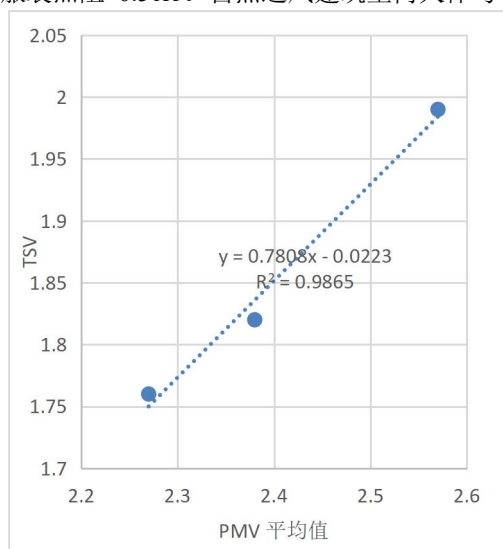


图 9 TSV 与 PMV 的关系

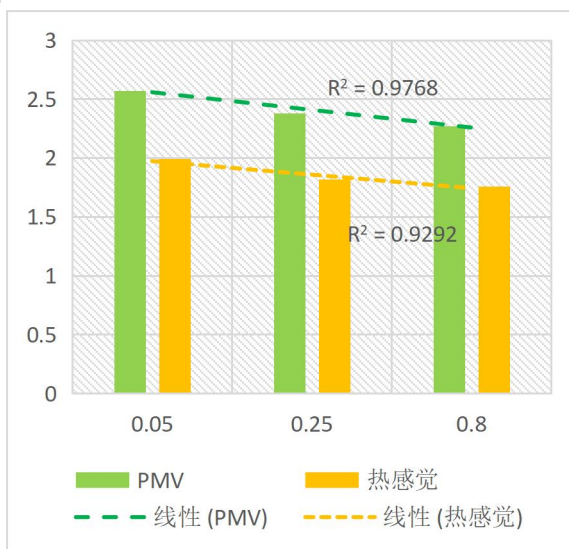


图 10 TSV 与 ε 的关系

3.5.2 TSV 与 ε 的量化关联分析

图 10 直观呈现了内表面发射率 ε 与热感觉投票值(TSV)、预测平均投票值(PMV)的量化关联规律。统计分析表明,多数测试工况中,PMV 预测值普遍高于受试者实际热感觉投票值(TSV),这与自然通风环境下 PMV 模型的典型预测特征一致;进一步分析可见,内表面发射率 ε 与 TSV、PMV 两类指标均呈现显著负相关趋势,即内表面发射率 ε 的升高会伴随 TSV 与 PMV 数值的同步降低,且该变化规律在全测试工况中具有有一致性。

4 结论

本研究通过试验测试与人体热感觉主观评价相结合的技术路径,系统探究自然通风工况下轻质围护结构建筑室内非透明内表面发射率对人体热舒适的影响规律与作用机制。研究结果表明,围护结构内表面发射率主导的辐射特性,与室内平均辐射温度、热感觉投票值(TSV)及预测平均投票值(PMV)均呈现显著负相关关系;经量化分析确定热舒适期望因子为 0.78,该结论可为自然通风建筑低发射率围护结构的优化设计及室内热舒适精准预测提供理论支撑与技术参考。

参考文献

[1] 卢素梅, 孟庆林. 围护结构内表面发射率对人体热舒适的影响[J]. 暖通空调, 2019, 49(5): 7. 2019-05-02 8.

[2] Dubd, Dube. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. 1916[J]. Nutrition, 1989, 5(5): 303.

[2] 王玉山等. 基于人体舒适度的室内温度优化设定方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 11: 4083-90

[3] Fanger P O, Toftum J. Thermal comfort in the future-Excellence and expectation[C] // Conference Proceedings on Moving Thermal Comfort Standards

into 21st Century, Windsor, UK, 2001.

[4] 陈慧梅, 张宇峰, 王进勇. 我国湿热地区自然通风建筑夏季热舒适研究——以广州为例[J]. 暖通空调, 2010, 40(2): 96-101.

[5] Zhang G, Zheng C, Yang W, et al. Thermal comfort investigation of naturally ventilated classrooms in a subtropical region[J]. Indoor and Built Environment, 2007, 16(2): 148-158.

基金项目: 东莞市社会发展科技; 项目: 亚热带地区轻质围护结构表面辐射换热影响机理研究; 编号: (20221800902352)