

西藏校舍暖床末端供暖性能实验测试

张勇钊², 默哲龙², 王登甲^{1,2}, 陈耀文^{1,2}, 郑治国³, 宋慧华³

(1. 绿色建筑全国重点实验室(XAUAT), 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 西藏昂彼特堡能源科技有限公司, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 西藏高原冬季漫长、年平均气温低、昼夜温差大, 如何保障在高原极端气候下的宿舍供暖是亟需解决的难题, 暖床末端系统具有分区供暖、精准高效的特点, 可以有效满足高原校舍类建筑的供暖需求。通过实验研究了不同加热形式和不同设定温度对暖床供暖性能的影响, 采用单位功耗下的温升速率作为评价指标, 得到了暖床末端与其他常用取暖装置的供暖效果对比结果。结果显示: 电加热暖床对于床板和被褥的升温幅度约是水加热暖床的 2 倍; 与其他常用取暖装置相比, 电加热暖床和水加热暖床的相对温升速率分别提高了 143%、68%, 研究为暖床在西藏高原校舍的应用提供了实测基础数据。

关键词: 西藏高原; 分时分区供暖; 高效散热末端; 供暖效果; 暖床性能

中图分类号: TU832

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)06-0829-08

Experimental test of warm bed heating performance in Tibetan dormitory buildings

ZHANG Yongzhao², MO Zhelong², WANG Dengjia^{1,2}, CHEN Yaowen^{1,2},
ZHENG Zhiguo³, SONG Huihua³

(1. State Key Laboratory of Green Building(XAUAT), Xi'an 710055, China;

2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. Tibet Ampeterburg Energy Technology Co., Ltd., Lhasa 850000, China)

Abstract: The Tibetan Plateau has a long winter, low average annual temperature and large temperature difference between day and night, so how to ensure the heating of dormitory in the extreme climate of the plateau is an urgent problem to be solved. The warm bed terminal system has the characteristics of zoned heating, precision and high efficiency, and can effectively meet the heating needs of plateau dormitory buildings. In this paper, the effects of different heating forms and different set temperatures on the heating performance of the warm bed are studied experimentally, the temperature rise rate per unit power consumption is used as the evaluation index, and the heating effect of the end of the warm bed and other commonly used heating devices is obtained. The results shows that the heating amplitude of the electrically heated bed for the bed board and bedding is about twice that of the water-heated bed. Compared with other commonly used heating devices, the relative temperature rise rate of electrically heated bed and water-heated bed warmer are increased by 143% and 68%, respectively. The study can provide measured basic data for the application of bed warming in dormitory buildings on the Tibetan plateau.

Key words: Tibetan Plateau; time-sharing district heating; efficient heat dissipation end; heating effect; bed warming performance

中国西藏高原年平均气温低、冬季持续时间长, 夜间温度常年低于 -8°C , 历史最低气温可达 -16°C ^[1], 气候条件相对恶劣^[2-3], 按照现行国家标准《民用建筑热工设计规范 GB50176》, 西藏大

部分地区属于寒冷气候区^[4], 供暖需求迫切^[5]。学校及单位宿舍作为学生和职工休息的主要场所, 具有人员密集、间歇使用的特点^[6], 在充分考虑节能的前提下, 如何保障其供暖效果是西藏冬季校

收稿日期: 2023-08-21

修回日期: 2024-11-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078408); 国家自然科学基金区域联合重点项目(U20A20311)

第一作者: 张勇钊(1999—), 男, 硕士生, 主要从事可再生能源与建筑节能研究。E-mail: zhangyongzhao@xauat.edu.cn

通信作者: 王登甲(1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事可再生能源供暖领域的研究。E-mail: wangdengjia@xauat.edu.cn

舍类建筑热环境营造的重要问题。

近年来,多位学者对校舍类建筑冬季供暖进行了相应研究。李仁春等^[7]从室内热舒适需求出发,利用调研和模拟手段,得到了拉萨高校学生民族、学生性别、建筑空间等因素与宿舍室内热环境的关联程度,提出了高原宿舍的热环境优化设计策略。李诗等^[8]为了在满足热舒适性的同时降低建筑能耗,通过软件模拟了严寒地区学生宿舍的全年能耗总值和全年不舒适时间及PMV值,总结了以营造舒适热环境为目的的低能耗建筑设计策略。在人体热感觉方面,NING等^[9]调研了宿舍学生的热感觉和热舒适度,发现实际人体热感觉始终大于预测值,且偏差在不同季节存在明显差异,这说明人工加热环境会逐渐削弱人体对寒冷气候的热适应性。王岳人等^[10]通过现场测试、问卷调查等方式,研究了高校宿舍供暖前后的热环境状况,对比分析了不同研究阶段预测平均热感觉投票与实际平均热感觉投票的偏离关系。总体而言,对于高人群密度的校舍类建筑来说,在满足供暖需求的同时提高宿舍采暖的热舒适性,并根据研究结果对宿舍供暖提出优化建议^[11-12],是目前宿舍供暖研究的主要侧重。

床上热环境会同时影响睡眠质量和睡眠热舒适度^[13-14],如何提高睡眠人群热舒适性是宿舍热环境营造的关键问题^[15]。平原地区冬季会使用散热片、暖风机等取暖装置改善局部热环境,然而加热器表面对流换热系数会随气压降低而减小^[16],因此高原低压环境会使平原地区常用取暖装置的供暖性能有所改变。暖床末端采暖系统是基于传统火炕演变研发出来的新型采暖末端装置^[17],可以自主调节供暖时长,通过导热、对流和辐射等多种方式营造舒适温暖的局部热环境,相较于电热毯等常见床上采暖设备,暖床辐射更加均匀,热量传递更加平缓,且减少了人体水分蒸发,提高了人体取暖舒适性,具有分区供暖、精准高效的特点,是满足高原宿舍供暖需求的有效解决手段。于国清等^[18]通过建立并验证蓄热暖床充热模型,提出了一种太阳能相变蓄热暖床采暖系统,这种暖床不仅是太阳能的储热设备,也是末端散热设备。陈澎浩等^[17]利用实验和模拟研究了一种昼夜两用型太阳能暖床的散热特性和热环境营造效果,给出了不同房间负荷条件下暖床系统盘管间距、运行水温等设计参数的确定依据,并提出了昼夜不同工况转换的调控方法。LIU等^[19]通过实验研究了睡眠人体在暖床条件下的热需求和西

北地区农村地区的睡眠热环境状况,并提出预测不满意百分比模型,揭示了面部和身体覆盖的热感觉对整体热满意度的共同影响。

综上所述,学者对于暖床末端的研究主要体现在暖床模型的建立和结构参数的优化,以及暖床对睡眠人群的热感觉影响等方面,暖床末端不同加热形式对供暖性能及局部环境影响的相关研究则相对较少。针对这一现状,本文提出一种便捷式暖床末端系统,通过搭建高原暖床末端实验平台,测试记录暖床的床上局部环境温度、床板温度和被褥温度等参数,基于暖床在不同加热形式和设定温度下的局部温度,分析不同运行工况对暖床供暖性能的影响,并提出供暖效果评价指标,结合其他常用取暖装置进行供暖效果比较。研究结果可为暖床在西藏高原校舍类建筑的应用与发展提供帮助。

1 暖床系统及传热过程

1.1 暖床系统介绍

暖床系统主要由热源、暖床末端、输配管道、阀门等组成,暖床末端包括床架、暖床板、床垫、床被等。暖床板安装在床架上,从上至下分别是床被、床垫、暖床板,暖床板尺寸为190 cm×80 cm。暖床按加热形式分为电加热暖床和水加热暖床,电加热暖床原理是利用远红外碳纤维发热电缆加热暖床板,水加热暖床原理是利用电锅炉加热水,热水在暖床板中的耐高温软管中流动使床板温度升高。暖床末端可以采用市电、太阳能等多种形式供能,暖床板结构及供能形式示意图如图1所示。

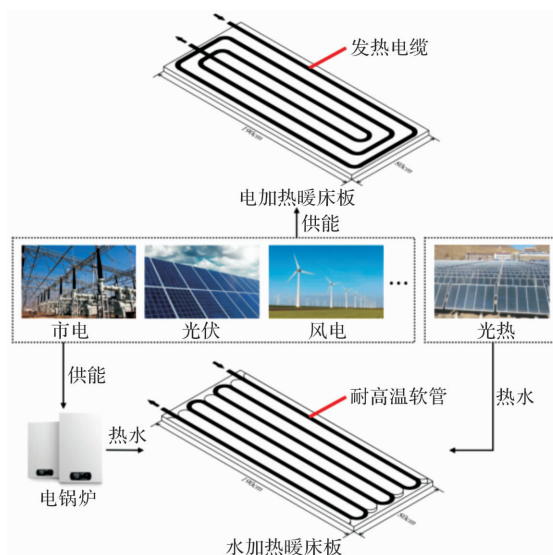


图1 暖床板两种加热形式示意

Fig. 1 Schematic diagram of two heating methods for warming the bed board

1.2 传热过程分析

1.2.1 传热网络图

发热电缆直接发热或耐高温软管内热水发热,通过辐射和导热的方式加热暖床板,暖床板通过对流和辐射的方式散热,同时暖床板、床垫和床被内部导热,使被褥温度和床上局部环境温度升高。图2是暖床末端及暖床板内向上传热的传热过程示意。其中, R_1 、 R_4 、 R_5 、 R_8 、 R_9 、 R_{12} 、 R_{13} 是对流热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; R_2 、 R_6 、 R_{10} 是导热热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; R_3 、 R_7 、 R_{11} 是辐射热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

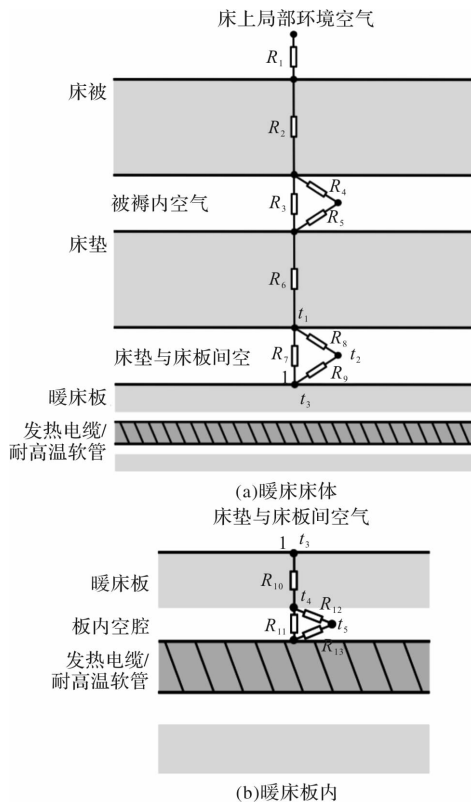


图2 暖床末端传热网络图

Fig. 2 Warm Bed Heat Transfer Network Diagram

1.2.2 热平衡方程

暖床末端系统的传热过程包括导热、对流和辐射,以图中节点1为例,其热平衡方程为

$$q_{R10}(\tau) - q_{R9}(\tau) - q_{R7}(\tau) = 0 \quad (1)$$

式中: $q_{R10}(\tau)$ 为暖床板上表面接收到的来自板内空腔的导热热量, W ; $q_{R9}(\tau)$ 为暖床板上表面与床垫床板间空气的对流换热量, W ; $q_{R7}(\tau)$ 为暖床板上表面与床垫下表面的辐射换热量, W 。

暖床板上表面接收到的来自板内空腔的导热热量 q_{R10} 可按下式计算^[20]。

$$q_{R10} = -\frac{\lambda(t_4 - t_3)}{\delta} \quad (2)$$

式中: λ 为暖床板导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; δ 为板内空腔到暖床板上表面的厚度, m ; t_4 为板内空腔

上表面温度, $^{\circ}\text{C}$; t_3 为暖床板上表面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

暖床板上表面与床垫下表面的对流换热量 q_{R9} 可按下式计算^[20]。

$$q_{R9} = a(t_3 - t_2) \quad (3)$$

式中: a 为暖床板与床垫之间空气的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t_2 为床垫与床板间空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

暖床板上表面与床垫下表面的辐射换热量 q_{R7} 可按下式计算^[20]。

$$q_{R7} = \frac{\sigma(T_3^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (4)$$

式中: σ 为玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_3 为暖床板上表面热力学温度, K ; T_1 为床垫下表面热力学温度, K ; ϵ_1 为暖床板上表面发射比; ϵ_2 为床垫下表面发射比。

从节点1处的热平衡方程公式(1)和公式(2)~(4)可以看出,暖床末端是通过床被、床垫、暖床板、环境空气之间的温度差来实现导热、对流和辐射等多种形式的传热。因此温度参数是研究暖床末端供暖性能的关键。

2 暖床供暖性能实验测试

2023年2月,在西藏高原某宿舍房间内开展暖床末端供暖性能实验。实验房间尺寸为 $7.1 \text{ m} \times 4.7 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$,外门尺寸为 $2.0 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,内门尺寸为 $2.0 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$,两个外窗尺寸均为 $2.0 \text{ m} \times 1.9 \text{ m}$ 。实验房间床铺为上下铺,共有八张暖床,其中电加热暖床1张,水加热暖床4张,无加热暖床3张。为了减少无关变量对实验的影响,三种暖床均选择一张下铺床作为实验对象,其中无加热暖床为空白对照组。由于电加热暖床和水加热暖床有多种供能形式,为了得到稳定的暖床实验数据,本实验中暖床末端均采用市电作为供能形式。

2.1 测量参数及仪器

为获取暖床供暖性能以及局部热环境的营造效果,需要对以下参数进行收集与测量:①室外气象参数(室外环境温度、太阳辐射强度);②暖床床上局部环境参数(床上局部环境温度);③暖床末端参数(床板温度、床板热流、被褥温度)。

实验仪器主要包含温度、热流等参数的测量仪器和数据采集设备,实验仪器的相关参数如表1所示。所有的数据采集设备均具有数据储存功能,设置的数据记录间隔为 5 min ,考虑到数据采集设备的储存容量有限,为提高采集数据的有效性,

防止设备容量存满造成数据丢失,在实验过程中会定期导出数据采集设备中的测试数据。

表1 实验仪器规格参数表

Tab. 1 Specification parameters of experimental instruments

仪器名称	测量参数	精度
全天候辐射数据自记仪 MS-602	太阳辐射强度	$<5\%$
温湿度自记仪 TR-72W	室外环境温度	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
热流传感器	暖床板热流密度	$\pm 4\%$
	床上局部环境温度	
K 型热电偶	床板温度	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
	被褥温度	
数据采集仪 LR8432	数据记录	$\pm 2\%$

2.2 测点布置

(1) 室外气象参数测试

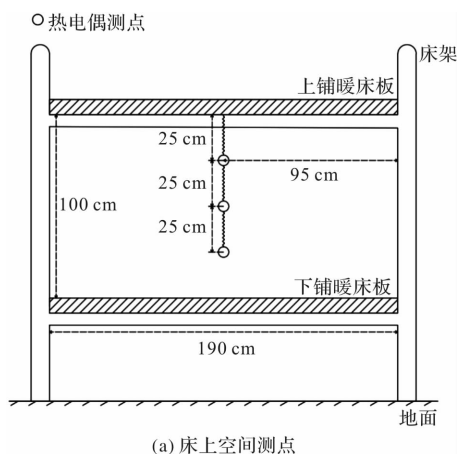
全天候辐射数据自记仪 MS-602 和温湿度记录仪 TR-72W 一起置于屋顶。全天候辐射数据自记仪 MS-602 根据水平仪将其水平放置,并确保其周围无遮挡物,温湿度记录仪 TR-72W 的温度探头用防辐射胶带包裹,避免受到太阳光的照射。

(2) 暖床上方局部空间环境参数测试

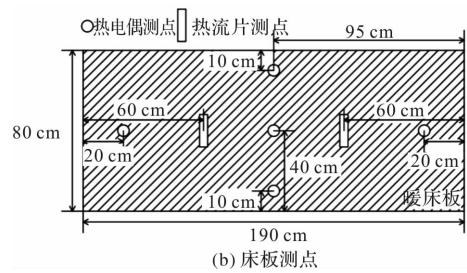
暖床主要向上方空间环境散热,为了获取暖床床上局部环境温度,在暖床上部空间布置温度测点,床上局部环境温度测点布置位置如图 3(a)所示。

(3) 暖床床体参数测试

暖床床体参数主要是被褥温度、床板温度和床板热流。将热电偶平稳放置在距暖床长边 40 cm、距暖床宽边 95 cm 的被褥中心位置,测量暖床被褥温度。根据成年人的平躺位置,暖床板温度与热流的测点布置位置如图 3(b)所示。为了减小热流片与床板之间的接触热阻,每个热流片上均涂有导热性良好的导热脂。



(a) 床上空间测点



(b) 床板测点

图3 温度测点与热流测点布置示意

Fig. 3 Layout diagram of temperature measurement points and heat flow measurement points

2.3 实验工况

为了对比不同加热方式和供暖设定温度对暖床局部环境温度的影响,实验工况如表 2 所示。实验对象是电加热暖床和水加热暖床,无加热暖床为实验对照组。电加热暖床和水加热暖床的加热形式分别是发热电缆和热水。暖床的供暖设定温度根据常见取暖装置设定温度选取。

表2 高原暖床末端供暖性能实验工况

Tab. 2 Experimental Conditions of Heating Performance at the End of Plateau Warm Bed

实验对象	加热形式	供暖设定温度/ $^{\circ}\text{C}$
电加热暖床	发热电缆	40、50、60
水加热暖床	热水	40、50、60
无加热暖床	/	/

2.4 实验流程

(1)在实验测点布置之前,对整个暖床末端系统进行了试运行和调试;

(2)在系统稳定运行后,根据对暖床的性能实验需求进行测点布置;

(3)在测点布置完成后,将整个暖床系统设置到实验工况,开始运行和测试;

(4)实验过程中严格按照实验计划和拟定工况进行实验,将早上 9 时至第二天早上 8 时作为完整一天的实验时间,将早上 8 时至早上 9 时这一个小时作为调整工况和分析数据的时间;

(5)定期导出实验数据并进行检查分析,确认暖床系统和测试仪器工作正常,保证实验顺利进行;

(6)实验完成并导出所有实验数据后,拆除测点并整理仪器。

3 实验结果与分析

3.1 不同加热形式对暖床性能的影响

本研究暖床末端的加热形式有两种,电加热暖床为市电直接通过远红外碳纤维发热电缆加热

床板,水加热暖床为电锅炉加热水使床板升温,无加热暖床为对照组.分析研究在供暖设定温度为40℃下电加热暖床和水加热暖床的加热效果和,在供暖设定温度为60℃下电加热暖床和水加热暖床的升温效率.

3.1.1 加热效果

(1) 床板温度

分别计算无加热暖床、电加热暖床、水加热暖床的5个床板测点温度的算数平均值,算数平均值根据公式(5)计算得到

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (5)$$

式中: \bar{t} 为平均温度,℃; t_i 为测点温度,℃; n 为测点个数.

暖床供暖时间内床板温度变化如图4所示,无加热暖床的平均床板温度为10.3℃,电加热暖床的平均床板温度为57.3℃,水加热暖床的平均床板温度为31.6℃.电加热暖床可以使平均床板温度升高47.0℃,水加热暖床可以使平均床板温度升高21.3℃.相较于水加热暖床,电加热暖床的床板温度波动较大,变化幅度超过10℃.

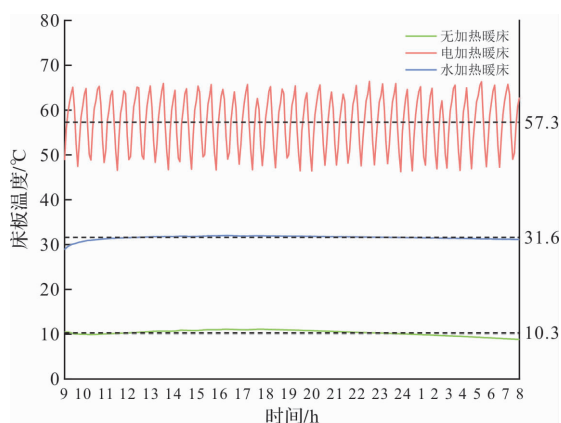


图4 暖床供暖时间内床板温度变化

Fig. 4 Temperature Change of Bed Board During Warm Bed Heating Time

(2) 被褥温度

暖床供暖时间内被褥温度变化图5显示,从早上9时至次日8时没有供暖的被褥平均温度为11.3℃,电加热暖床的平均被褥温度为35.6℃,水加热暖床的平均被褥温度为24.9℃,电加热暖床可以使平均被褥温度升高24.3℃,水加热暖床可以使平均被褥温度升高13.6℃.

从图4和图5可以看出,两种加热形式均可以有效加热暖床末端,并且在同一供暖设定温度下,相对于水加热暖床,电加热暖床可以提供更高的床板温度和被褥温度,升温幅度约是水加热暖床

的2倍.同时,相较于水加热暖床,电加热暖床的床板温度和被褥温度均有较大的波动性.

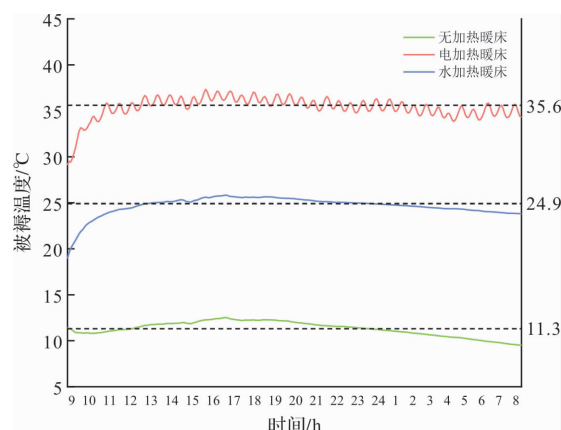


图5 暖床供暖时间内被褥温度变化

Fig. 5 Temperature changes of bedding during warm bed heating time

为了得到电加热暖床床板温度剧烈波动的原因,分析电加热暖床与水加热暖床的热流变化,如图6所示.在图6中,电加热暖床的热流剧烈波动,而水加热暖床的热流保持基本恒定.从1.2.2节公式(2)可以看出,板内空腔上表面温度 t_4 与床板温度 t_3 的差值与床板热流 q_{R10} 成正比.电加热暖床的热流持续波动,说明发热电缆的温度持续发生变化,进一步说明了电加热暖床具有自动启停、间断加热的工作特点,当床板温度过低时启动电加热,当床板温度过高时关闭电加热,目的是为了使暖床温度维持在设定值.而水加热暖床通过热水在耐高温软管中流动加热暖床板,没有这种启停机制,因此床板温度和被褥温度基本恒定.

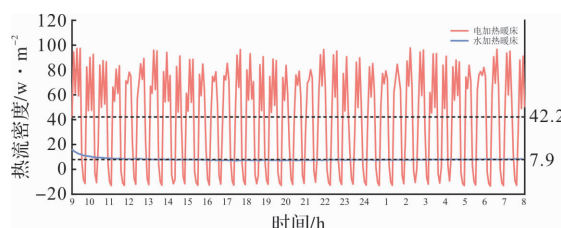


图6 电加热暖床与水加热暖床的热流变化

Fig. 6 Heat flux changes between electrically heated and water heated warm beds

(3) 床上局部环境温度

根据公式(5)分别计算无加热暖床、电加热暖床、水加热暖床在暖床供暖时间内3个床上局部环境温度的算数平均值,结果如图7所示.三种暖床的床上局部环境温度的趋势走向大致相同,整体先上升后下降,在17时左右达到最大值.电加热暖床、水加热暖床和无加热暖床的最高床上局部

环境温度分别是 15.1°C 、 15.7°C 、 14.9°C 。水加热暖床可以使床上局部环境温度最高升高 1.6°C ，电加热暖床可以使床上局部环境温度最高升高 1.3°C 。

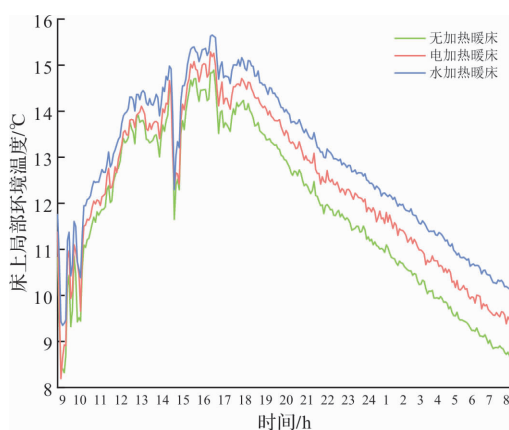


图7 暖床供暖时间内床上局部环境温度变化

Fig. 7 Changes in local ambient temperature on the bed during warm-up heating time

3.1.2 升温速率

由于电加热暖床自动启停、间断加热的工作特点，床板温度规律性波动即可认为电加热暖床已达到温度稳定。图8记录了供暖设定温度为 60°C 时电加热暖床和水加热暖床在升温过程中的每分钟床板温度变化。从图8可以看出，电加热暖床的床板温度明显比水加热暖床更早达到稳定。

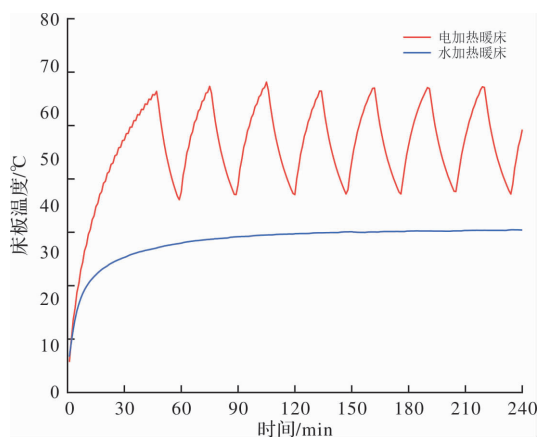


图8 电加热暖床与水加热暖床的床板升温变化

Fig. 8 Changes in bed plate temperature rise between electrically heated and water heated warm beds

综上所述，不同加热形式会明显影响暖床末端的供暖性能。从加热效果来看，在供暖设定温度相同的情况下，电加热暖床可以给暖床提供更高的床板温度和被褥温度，升温幅度约是水加热暖床的2倍，而水加热暖床的床上局部环境温度更高；从升温速率来看，电加热暖床可以比水加热暖床更快达到温度稳定。因此，电加热暖床升温

快、温度高，对于温度的响应更为灵敏。但相较水加热暖床来说，电加热暖床的床板温度和被褥温度均有明显波动。

3.2 供暖设定温度对暖床性能的影响

供暖设定温度会直接影响暖床末端的供暖性能和热环境营造效果，因此研究不同供暖设定温度对暖床供暖性能的影响是有必要的。

从3.1节得知，虽然水加热暖床的加热效果和升温速率不如电加热暖床，但水加热暖床的温度波动较小，能更好地反映出设定温度变化对暖床供暖性能的影响。图9和图10分别显示了不同供暖设定温度下水加热暖床的床板温度和被褥温度的变化，在供暖设定温度为 40°C 、 50°C 、 60°C 下，平均床板温度分别为 31.7°C 、 38.1°C 、 45.3°C ，平均被褥温度分别为 24.9°C 、 26.8°C 、 31.5°C 。可以看出，床板温度和被褥温度均与供暖设定温度成正比例关系，设定温度越高，床板温度和被褥温度越高。

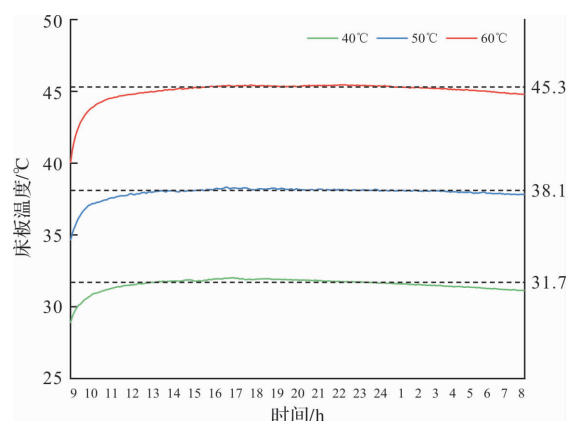


图9 不同供暖设定温度下床板温度的变化

Fig. 9 Changes in bed plate temperature under different heating settings

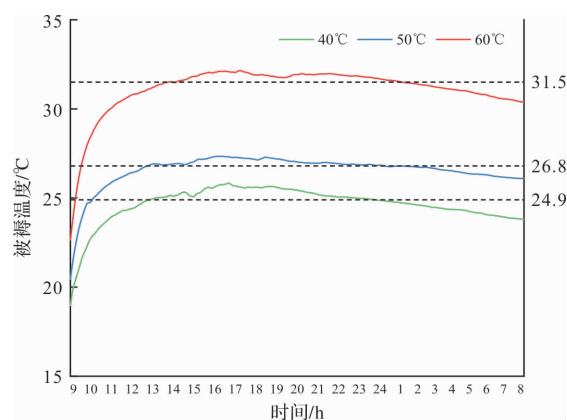


图10 不同供暖设定温度下被褥温度的变化

Fig. 10 Changes in bedding temperature under different heating settings

由于热量在传递过程存在散失，因此床板温度和被褥温度不会高于设定温度，不同供暖设定温度下平均床板温度和平均被褥温度与设定温度的差值见表 3。从表 3 可以看出，供暖设定温度越高，实际温度与设定温度的温差越大，这说明供暖设定温度越高，实际温度越难达到设定温度。这对于依据实际被褥温度需求而反向设定加热系统供暖温度具有指导意义。

表 3 不同供暖设定温度下实际温度与设定温度的温差

Tab. 3 Temperature difference between actual temperature and set temperature under different heating settings

供暖设定温度 /℃	实际床板温度与设定温度的温差 /℃	实际被褥温度与设定温度的温差 /℃
40	8.3	15.1
50	11.9	23.2
60	14.7	28.5

4 暖床供暖效果评价

4.1 评价指标

为了对比暖床末端与其他常用取暖装置的能耗和加热效果，采用评价指标 η 进行取暖装置的供暖效果比较，评价指标 η 的计算公式如下。

$$\eta = \frac{\Delta t}{T \times W_{de}} \quad (6)$$

式中： Δt 为温度变化量，℃； T 为温度变化时间，s； W_{de} 为用电量，kW·h。 η 的物理意义是指取暖装置在单位功耗下的温升速率，单位是℃/(s·kW·h)。 η 越大，说明该取暖装置的供暖效果越好。

4.2 不同取暖装置的供暖效果对比

分别将电加热暖床、水加热暖床、暖风机和电油汀的相关运行参数^[21]代入公式(6)，计算结果如表 4 所示。其中 η' 是指四种取暖装置以电油汀的 η 作为基准的相对温升速率。

表 4 四种取暖装置的供暖效果对比

Tab. 4 Comparison of heating effects of four types of heating devices

取暖装置	供能形式	$\eta / ^\circ\text{C} \cdot (\text{s} \cdot \text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	$\eta' / \%$
电加热暖床	市电	3.04×10^{-3}	243
水加热暖床		2.10×10^{-3}	168
暖风机		1.17×10^{-3}	94
电油汀		1.25×10^{-3}	100

从表 4 可以看出，当四种取暖装置均采用市电作为供能形式时，单位功耗下的温升速率：电加热暖床>水加热暖床>电油汀>暖风机。电加热暖床和水加热暖床的相对温升速率分别比电油汀高了 143%、68%。另外，暖床末端的相对温升速率明显大于暖风机和电油汀，因此暖床末端作为

一种新型采暖末端装置，可以有效满足西藏高原校舍类建筑分区供暖需求。

5 结论

本文通过分析暖床传热过程、搭建高原暖床末端实验平台，在西藏高原测试了不同加热形式(电加热、水加热)、不同设定温度(40℃、50℃、60℃)条件下暖床末端的温度与热流参数，根据实验结果对比分析了不同工况对暖床供暖性能的影响，并根据取暖装置在单位功耗下的温升速率对比了暖床末端与其他常用取暖装置的供暖效果。研究结果可为暖床末端在西藏高原校舍类建筑的应用与发展提供帮助。本研究结论如下：

(1)两种加热形式均可有效提高床板温度、被褥温度和床上局部环境温度。供暖设定温度越高，则暖床床板温度和被褥温度越高，且实际温度与设定温度的差值越大。在相同采暖设定温度条件下，水加热暖床提高床上局部环境温度的能力强于电加热暖床；

(2)不同加热形式会明显影响暖床末端的供暖性能。在相同设定温度下，电加热暖床温度更高、升温更快，升温幅度约是水加热暖床的 2 倍。相较电加热暖床，水加热暖床提供的温度更加恒定。可适当采用相变材料提高电加热暖床的温度稳定性；

(3)在供能形式均为市电的情况下，单位功耗下的温升速率：电加热暖床>水加热暖床>电油汀>暖风机，电加热暖床和水加热暖床的相对温升速率分别比电油汀高了 143%、68%。

总体而言，暖床系统作为新型采暖末端装置，可以有效满足高原校舍类建筑分区供暖需求。应选择太阳能、风能等可再生能源作为高原暖床的供能形式，可以进一步降低暖床末端的供暖能耗，实现“双碳”目标要求下的绿色供暖。

参考文献 References

[1] 赵娟,周波涛,白艺飞,等.高原寒冷地区既有建筑节能改造适宜性及经济性分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2023,55(5):774-782.
ZHAO Juan, ZHOU Botao, BAI Yifei, et al. Suitability and economic analysis of energy efficiency renovation of existing buildings in cold plateau regions[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2023,55(5):774-782

[2] 旦增朗珠.西藏地区气候特点及防灾减灾工作探究[J].北极星,2015,216(9):146-147.
DANZENG Langzhu. Exploration of climate characteristics and disaster prevention and reduction work in Tibet[J]. Northern Lights, 2015, 216(9): 146-147.

[3] FANG Yiping, WEI Yanqiang. Climate change adap-

- tation on the Qinghai-Tibetan Plateau: The importance of solar energy utilization for rural household[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 508-518.
- [4] 王登甲, 刘艳峰, 王怡, 等. 拉萨市住宅建筑冬季室内热环境测试评价[J]. *建筑科学*, 2011, 27(12): 20-24.
WANG Dengjia, LIU Yanfeng, WANG Yi, et al. Indoor thermal environment testing and evaluation of residential buildings in Lhasa during winter[J]. *Building Science*, 2011, 27(12): 20-24.
- [5] 张睿超, 王登甲, 刘艳峰, 等. 西藏高原离网光伏供暖系统容量配置优化研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 53(6): 828-834, 888.
ZHANG Ruichao, WANG Dengjia, LIU Yanfeng, et al. Optimization of capacity configuration for off grid photovoltaic heating systems in tibet plateau[J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2021, 53(6): 828-834, 888.
- [6] 孟莹. 严寒地区高校宿舍热计量采暖节能调节模式的应用研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
MENG Ying. Research on the application of heat metering heating and energy saving adjustment mode in university dormitories in severe cold regions[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.
- [7] 李仁春. 拉萨市高校学生宿舍室内热舒适研究及优化设计策略[D]. 拉萨: 西藏大学, 2022.
LI Renchun. Research on indoor thermal comfort and optimization design strategies for student dormitories in universities in Lhasa[D]. Lhasa: Tibet University, 2022.
- [8] 李诗. 基于舒适热环境的严寒地区高校学生公寓低能耗设计策略[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
LI Shi. Low energy design strategy for college student apartments in severe cold regions based on comfortable thermal environment[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.
- [9] NING Haoran, WANG Zhaojun, ZHANG Xuexiang, et al. Adaptive thermal comfort in university dormitories in the severe cold area of China[J]. *Building and Environment*, 2016, 99: 161-169.
- [10] 王岳人, 段冠囡, 于靓. 沈阳地区高校宿舍供暖前后人体热舒适实地调查与分析[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(1): 172-178.
WANG Yueren, DUAN Guannan, YU Liang. Field investigation and analysis of human thermal comfort before and after heating in college dormitories in Shenyang area[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2020, 36(1): 172-178.
- [11] CHEN Xi, LIU Meng. Simulation and on-site measurement of heating performance in air-conditioned university dormitories: A case study in Chongqing[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 2569-2576.
- [12] WANG Zhaojun, ZHANG Xuexiang, NING Haoran, et al. Human thermal adaptation in university classrooms and dormitories in Chinese severe cold area in winter[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 146: 24-31.
- [13] SONG Cong, LIU Yanfeng, ZHOU Xiaojun, et al. Temperature field of bed climate and thermal comfort assessment based on local thermal sensations[J]. *Building and Environment*, 2016, 95: 381-390.
- [14] KAZUYO T, KAZUE O, KOH M. Effects of humid heat exposure on sleep, thermoregulation, melatonin, and microclimate[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2004, 29: 31-36.
- [15] XU Xinbo, LIAN Zhiwei. Optimizing bedroom thermal environment: A review of human body temperature, sleeping thermal comfort and sleep quality[J]. *Energy and Built Environment*, 2023.
- [16] IHSSANE E G, ANAS E M, SAID S, et al. Thermal performance of a corrugated heat dissipation fin design: A natural convection numerical analysis[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021.
- [17] 陈澎浩. 基于昼夜热需求差异的太阳能暖床散热特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
CHEN Penghao. Research on the heat dissipation characteristics of solar warming beds based on the difference in heat demand between day and night[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2017.
- [18] 于国清, 高思亮, 姜季. 太阳能相变蓄热暖床充热过程建模分析[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(S1): 89-92, 99.
YU Guoqing, GAO Siliang, QIANG Ji. Modeling and analysis of the heating process of solar phase change thermal storage warm bed[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(S1): 89-92, 99.
- [19] LIU Yanfeng, SONG Cong, ZHOU Xiaojun, et al. Thermal requirements of the sleeping human body in bed warming conditions[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 130: 709-720.
- [20] 章熙民. 传热学[M]. 6版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
ZHANG Ximin. Heat transfer[M]. 6th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [21] 彭敦诚, 姚磊, 王长贵, 等. 标准场景下电加热瓷砖、暖风机和油汀加热效果对比[J]. *日用电器*, 2023, 207(3): 57-63.
PENG Duncheng, YAO Lei, WANG Changgui, et al. Comparison of heating effects of electric heating tiles, air heaters, and oil cement in standard scenarios[J]. *Household Appliances*, 2023, 207(3): 57-63.

(编辑 吴海西)