

文章编号:1674-2974(2016)09-0144-07

## 碳纤维带电地暖性能的足尺试验研究<sup>\*</sup>

朱德举<sup>1†</sup>, 马拓<sup>1</sup>, 刘赛<sup>1</sup>, 李航<sup>1</sup>, 李安令<sup>1</sup>, 刘洪彬<sup>2</sup>, 刘宝株<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 山东天意机械股份有限公司, 山东 济宁 272100)

**摘要:**设计了一套基于碳纤维带电技术的地暖系统, 并对其供暖性能和经济适用性进行了研究. 选取一间保温隔热良好的卧室铺设该地暖系统, 并预先在地板各层、近地表空间布置多个温度传感器. 进行24 h供暖试验, 通过检测和分析设定位置的温度变化来研究该系统的性能和能耗. 结果表明:碳纤维带电地暖能够将室内温度保持在设定范围内, 合理布置碳纤维带可以将各层横向温差控制在3℃以下. 通过与传统采暖方式间的造价及运行成本的对比, 研究了碳纤维带电地暖的经济适用性, 发现碳纤维带电地暖具有造价费用低、运行费用适中、总费用低的优势.

**关键词:**碳纤维带; 电地暖; 试验研究; 经济分析

**中图分类号:** TU578.13

**文献标识码:** A

## Full-scale Experimental Study on the Performance of Electrical Floor Heating Utilizing Carbon Fiber Tapes

ZHU De-ju<sup>1†</sup>, MA Tuo<sup>1</sup>, LIU Sai<sup>1</sup>, LI Hang<sup>1</sup>, LI An-ling<sup>1</sup>, LIU Hong-bin<sup>2</sup>, LIU Bao-zhu<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Shandong Tianyi Machinery Co, Ltd, Jining, Shandong 272100, China)

**Abstract:** An electrical floor heating system was designed by using carbon fiber tapes (CFT). The heating performance and economic applicability of the heating system were also analyzed. The heating system was constructed in a bedroom with good heat insulation, and the temperature sensors were arranged at the layers of the floor and near the floor for 24 h duration tests. Temperatures at specified locations were monitored and analyzed to study the performance and the energy consumption of the heating system. The results showed that the CFT electrical heating system could keep the indoor temperature constant within the preset range; the temperature gradient in lateral direction was within 3℃ when the carbon fiber tapes were reasonably arranged in the floor. Meanwhile, compared with that of the traditional heating methods, the economic applicability of the proposed heating system was also studied. The results show this CFT electrical heating system has the advantages of less construction cost, medium operation cost and less overall cost.

**Key words:** carbon fiber tape; electrical floor heating; experimental study; economic analysis

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-08-03

基金项目: 湖南省科技计划重点项目(2014WK2026); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB026200)

作者简介: 朱德举(1978-), 男, 山东济宁人, 湖南大学教授, 博士生导师(青年千人计划)

† 通讯联系人, E-mail: dzhu@hnu.edu.cn

目前,我国需要进行室内供暖的居民、单位约有3亿户左右<sup>[1]</sup>。同时,中国的采暖面积正呈现逐年扩大态势,采暖系统市场需求同样迅猛增长,显著地促进了采暖行业的蓬勃发展。

在我国北方城市,电热膜采暖作为一种居民室内采暖辅助性手段得到较为广泛的推广。研究表明:北京地区采用电热膜采暖的费用低于集中供暖,能够通过间歇性采暖以达到节能减排的目的<sup>[2]</sup>。发热电缆作为地板采暖系统的应用方面,孔祥强等<sup>[3]</sup>对适用于列车客车的地面辐射供暖系统进行了研究,概括出了适用的数学模型并进行了试验验证。赵志强等<sup>[4]</sup>对用户舒适性以及能源损耗等方面进行了研究,同时依托北京地铁管道层,进行了冬季防冻测试,研究结果表明:该系统满足工程应用中的防冻要求<sup>[5]</sup>。碳晶电热板是碳晶颗粒材料制成的取热产品。张明强<sup>[6]</sup>通过碳晶电热板与传统电取暖系统的比较分析,详细总结了碳晶电热板材料的优势,并提出间歇供暖这种新型方式来达到节能减排的目的。而导电混凝土和采用碳纤维带的加热系统被证明在室外除雪融冰方面能够取得良好效果<sup>[7-11]</sup>,同时,碳纤维在水泥基材料中也起到一定的加固作用<sup>[12-13]</sup>。本研究在前期工作<sup>[14]</sup>的基础上,对碳纤维带电热板供热性能进行了实地足尺试验,系统研究了碳纤维带电热地暖的工作性能。并与市面上常见的3种采暖形式进行经济适用性比较。本研究提出的碳纤维带电热地暖资源节约、环境友好,将拥有广阔的应用空间和市场前景。

## 1 试验方案

拟对碳纤维带电热地暖的热工性能进行测试,分别测试了两组碳纤维带电热地暖在24 h自动控制周期内的工作时间和能耗情况,并分析了碳纤维带电热地暖的舒适性和可行性。

## 2 试验条件

### 2.1 试验方案

试验场地位于一栋拥有良好保温隔热效果的别墅建筑内,如图1(a)所示。选取别墅二楼主卧(5.4 m长,3.6 m宽),并联布置两块碳纤维带电热板(2.7 m宽,

3.6 m长)。每块电热板由27条碳纤维带(50 mm宽,3 600 mm长),相互间隔50 mm组成。每块碳纤维带电热板电阻约为0.4 Ω。试验采用同样规格的T300B-3K单向编织碳纤维带,规格为3 600 mm × 50 mm × 0.2 mm,如图1(b)所示。在楼面毛坯层上依次布置地暖保温反射膜、水泥砂浆层、碳纤维带、玻纤网格布、水泥砂浆层、木地板。地暖保温反射膜能保证系统热量向上传递,减少损失,水泥砂浆层起阻燃和胶合系统作用,玻纤网格布可以保证碳纤维带的平整,便于施工。在布置上,电流经过电表和接触器后接入温控仪,温控仪用于控制整个电路的开闭。通过变压器调节电路电压。数据采集系统和计算机用于温度数据的实时采集和显示如图1(c)所示。

为了让碳纤维带与铜条之间有较为良好的连接,使两者之间不产生滑移,在铜条处钻孔,并用螺丝螺母和垫片连接固定。

### 2.2 温度传感器布置

首先将楼板毛坯层清理干净,用水泥砂浆抹平楼板间缝隙,防止地暖热量向下耗散。然后布置保温隔热板,并布置好1~6号温度传感器,如图2所示。接着铺设第一层水泥砂浆。水泥砂浆终凝后,铺设碳纤维带电热板,布置好7~16号温度传感器,并铺设玻纤网格布以固定电热板;再次铺设水泥砂浆,待水泥砂浆终凝后,布置17~26号温度传感器;最后铺设木地板,并布置27~32号温度传感器,以及近地表的33~36号及检测室外温度的37号温度传感器,并将温度传感器接入计算机实时记录温度数据。

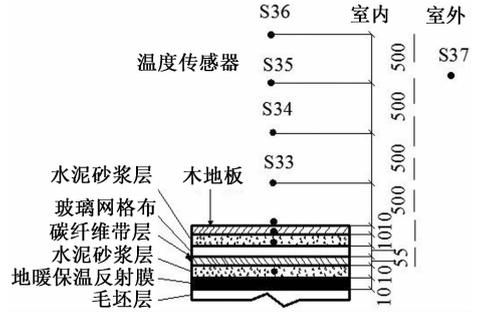
本温控试验初始温度为16℃,试验时间从上午8点开始,进行共计24 h测试。测试中对该试验卧室采取密封处理,防止室外冷空气侵入影响试验结果。温控仪预设温度为22~23℃。数据采集系统自动采集预埋温度传感器温度,温控仪通过预设温度自动控制接触器从而控制整体电路闭开。

## 3 结果分析

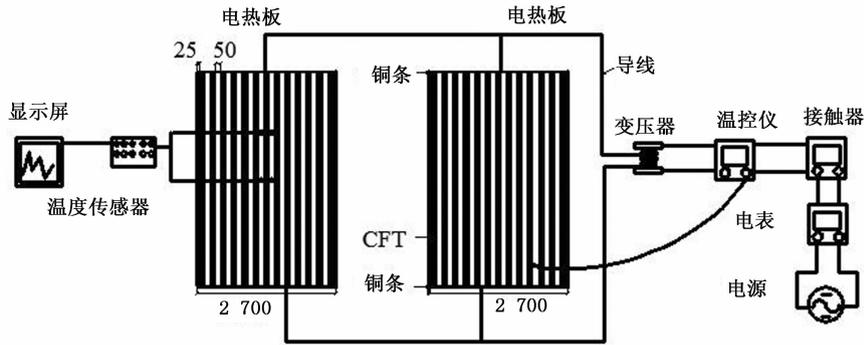
温控试验共进行了两组,室内初始温度分别为16℃和20℃,室外温度为13℃,预设温度为22~23℃,两组试验均从上午8:00进行到次日的8:00共24 h。两组试验结果如图3所示。



(a) 用于试验的别墅建筑



(b) 试验剖面布置图(单位:mm)



(c) 试验平面布置图

图1 试验场地及试验平面布置图  
Fig. 1 Test site and layout

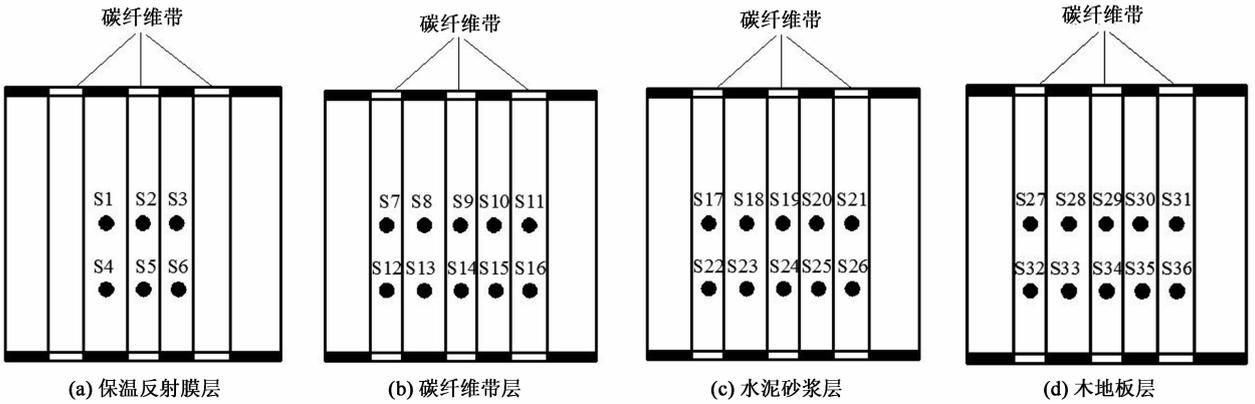
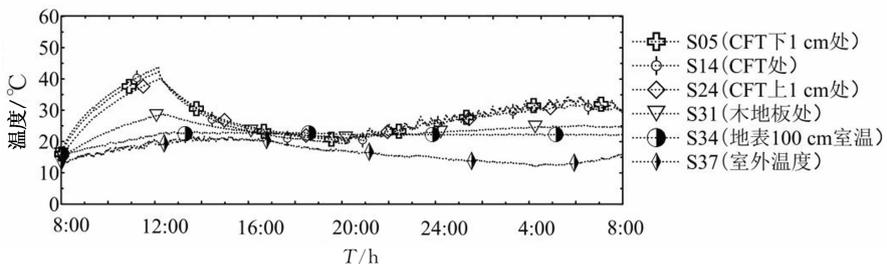


图2 碳纤维带电热板  
Fig. 2 Layout of temperature sensors



(a) 室内 16 °C, 室外 11~19 °C

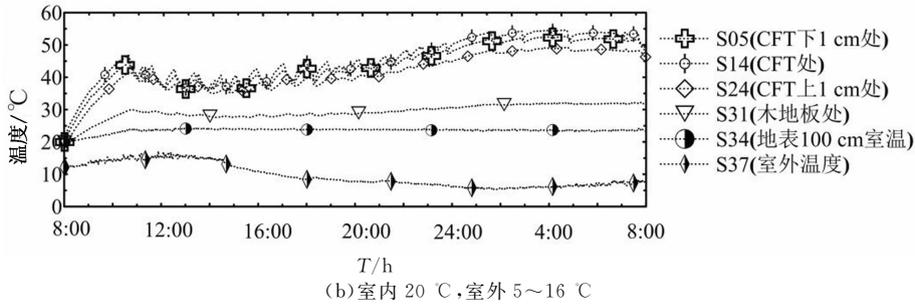


图 3 温控试验结果  
Fig. 3 Results of temperature tests

### 3.1 初始温度影响

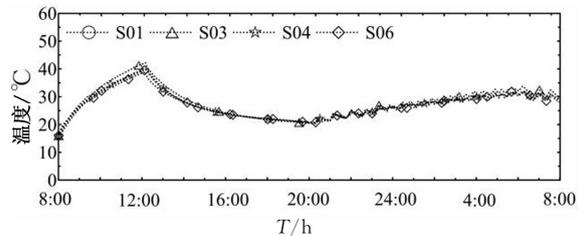
从图 3 可以得到两组各层在 24 h 内的温度变化趋势. a 组室外温度从 11~19 °C, 变化区间较小且温度普遍较高; b 组室外温度从 5~16 °C, 变化区间较大且温度普遍较低. 通过观察室内温度可以得到两组在不同室内初始温度及室外温度的情况下, 都能通过导热升温使室内温度达到预设温度并持续保持.

其中, 由于 b 组初始温度较高, 离预设温度差距较小, 所以 b 组经历更短的升温阶段, 较早达到预设温度范围而进入保温阶段. 但由于 b 组室外环境温度更低, b 组在达到预设温度后, 经历短暂的保温阶段后便进入经温控仪控制后的自动断续工作状态. 而 a 组由于室外温度较高, 在达到预设温度后, 能经过较长时间的保温阶段. b 组的升温阶段明显比 a 组长, 这表明: 从长时间的温控阶段来看, 相对于初始温度, 室外温度更能影响升降温控阶段工作时间及能耗. 通过两组试验的前后电表数字分析, 得到该碳纤维带电热地暖总功率 4 000 W, 碳纤维带电热板加热区域功率为 200 W/m<sup>2</sup>, 整体卧室房间 (30 m<sup>2</sup>) 加热功率为 133 W/m<sup>2</sup>.

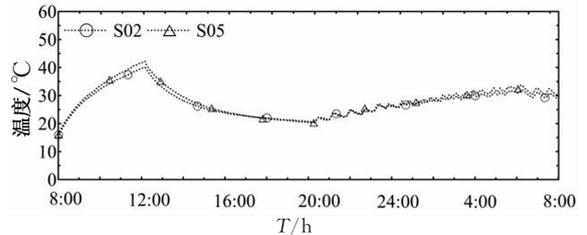
### 3.2 升温纵向分析

各层相应位置温度传感器升温结果如图 4~图 8 所示. 上述图中各层相似位置温度传感器中, 图 4 和图 5 组是位于碳纤维带上位置, 图 4 和图 6 组是位于两条碳纤维带中间位置, 图 4 和图 8 组是地表以上不同高度位置. 从曲线图中可得出三组温度传感器检测到的升温曲线基本重叠, 表明温控仪埋置位置良好准确, 在埋置以及施工过程中未发生位置偏移. 而 S18, S26 和 S32 由于与整体数据离散性较大, 在后续分析中剔除. 地表以上 50 mm 到 200 mm 处温度梯度较小, 温度变化基本一致, 温度从地表由

近到远稍有递减, 但不同高度之间温度相差不大, 不会导致空调取暖式的“透热脚冷”, 也不会导致因地表快速升温而形成的“脚热头冷”, 各个高度采暖均匀, 舒适性好.

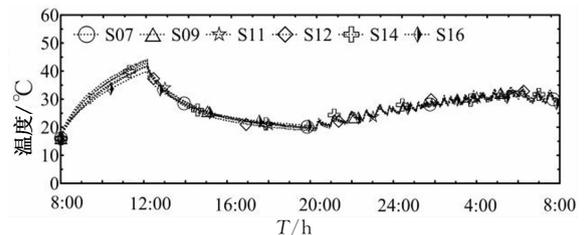


(a) 1, 3, 4, 6 号温度传感器温度变化

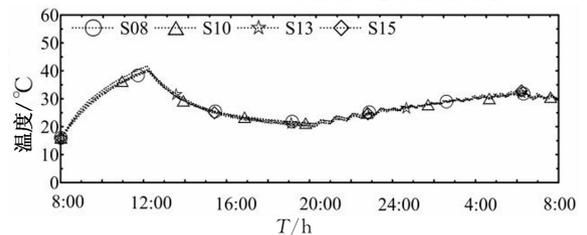


(b) 2, 5 号温度传感器温度变化

图 4 保温反射膜层温度变化  
Fig. 4 Temperature change in insulation reflecting film layer

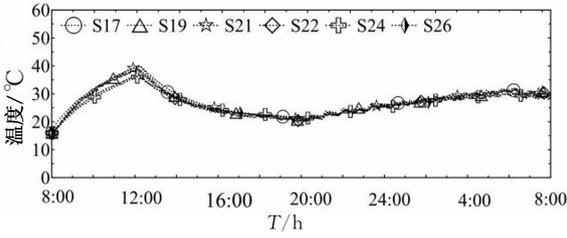


(a) 7, 9, 11, 12, 14, 16 号温度传感器温度变化

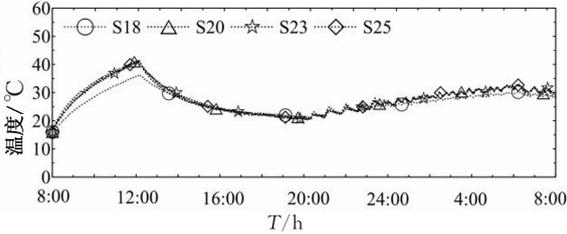


(b) 8, 10, 13, 15 号温度传感器温度变化

图 5 碳纤维带层温度变化  
Fig. 5 Temperature change in CFTs layer



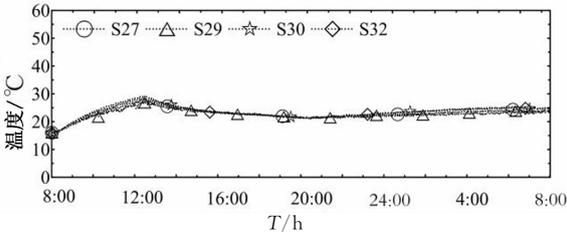
(a) 17, 19, 21, 22, 24, 26号温度传感器温度变化



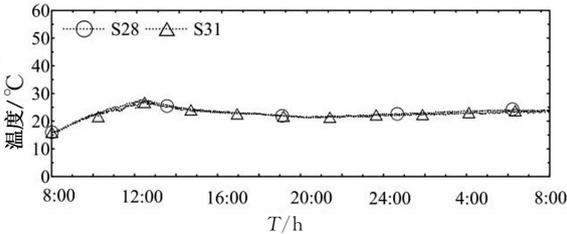
(b) 18, 20, 23, 25号温度传感器温度变化

图6 水泥砂浆层温度变化

Fig. 6 Temperature change in cement mortar layer



(a) 27, 29, 30, 32号温度传感器温度变化



(b) 28, 31号温度传感器温度变化

图7 木地板层温度变化

Fig. 7 Temperature change in wood floor layer

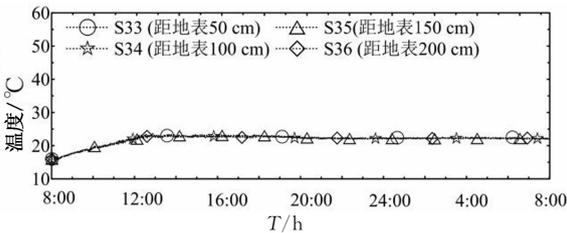


图8 地表以上不同高度处的温度传感器温度变化

Fig. 8 Temperature change at different height above the surface

分析测试房间在 24 h 内各个埋置深度的温度变化趋势得到,埋置整体温度首先逐渐升高,然后缓慢下降,最后断续地升高下降.而室温在从初始温度逐渐升高到预设温度后,一直保持恒温状态.对比图 4~图 8 中 5 组升温曲线可以得到,温度逐渐从碳纤

维带层向上下层递减,说明热量向上下扩散,水泥砂浆和木地板都拥有良好的导热性.而上下层曲线波峰位置的逐渐后移也显示出热量是逐层传导,均匀扩散的.

### 3.3 升温横向分析

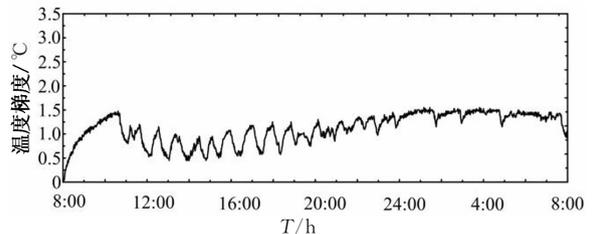
由于采暖均匀性与舒适性与碳纤维带横向布置有关<sup>[7]</sup>,本试验针对该方面进行了优化,以保证横向上升温的均匀性与舒适性.拟在同一功率条件下,布置更窄的碳纤维带以及减小碳纤维带之间布置距离,采用了宽 50 mm 碳纤维带等距离分布.在同一横截面方向上,为了减少测量误差,在碳纤维电热板宽度方向,于碳纤维带上(波峰)和两条碳纤维带之间(波谷)布置了多个温度传感器,可以采集到横向上的波峰和波谷温度.而在碳纤维电热板长度方向,采集  $L/2$  处和  $L/4$  处温度( $L$  为碳纤维带横向长度).现对采集到的数据作如下处理:

$$\text{波峰 } T = (\sum T_{L/2} + \sum T_{L/4})/n$$

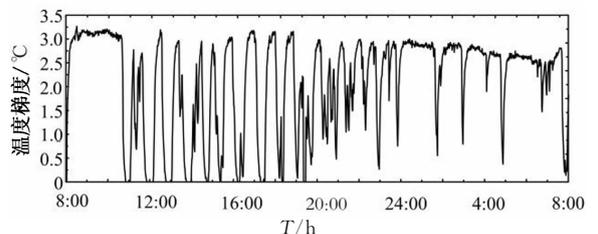
$$\text{波谷 } t = (\sum t_{L/2} + \sum t_{L/4})/n$$

式中: $n$  是所有相应位置温度传感器的个数.

图 9 纵坐标为各层所得波峰-波谷差值(温度梯度),横坐标为时间,得到各层温度梯度随时间的变化,从而了解各层的温度均匀性.可以看出各层的温度梯度整体变化较小,温度梯度在碳纤维带层、木地板层变化稍大(分别为  $3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),在保温隔热层变化较小( $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),都在  $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内.温度梯度各层变化趋势基本相同,都是在整个阶段不断增减.这表明碳纤维电热板的性能,通过减少碳纤维带的宽度并缩短碳纤维带之间布置距离的方法得到了较为明显的改善,取得较好舒适性的用户体验,达到预期效果.



(a) 保温隔热层温度梯度



(b) 碳纤维带层温度梯度

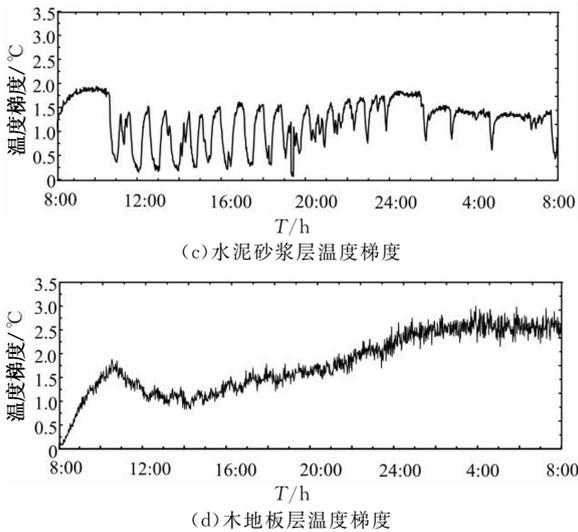


图9 横截面各层温度梯度变化图  
Fig. 9 Temperature gradient at various layers in the cross-section

#### 4 经济适用性分析

采暖系统的经济费用主要由造价费用和运行费用构成. 为了分析碳纤维带电热地暖的经济适用性, 本文核算了 30 m<sup>2</sup> 供暖面积的房间利用碳纤维带电热地暖在整个供暖期(90 d)的造价费用和运行费用, 并与暖气片水暖、水地暖、电地暖 3 种传统采暖方式的相关费用进行了对比分析. 4 种取暖方式费用如表 1 所示.

表 1 4 种取暖方式费用 (单位: 元)<sup>[14]</sup>

Tab. 1 The cost of various heating solutions (unit: Yuan)<sup>[14]</sup>

费用名称	暖气片	水地暖	电地暖	碳纤维地暖
造价费用	1 920	7 500	6 000	1 920
运行费用	2 025	1 927	2 556.4	2 128
总费用	3 945	9 427	8 556.4	4 048

从表 1 可知: 水地暖和电地暖初期投资较高, 碳纤维带电热地暖投资与暖气片持平, 处于较低水平; 电地暖系统运行成本较高, 碳纤维带电热地暖运行费用稍高于暖气片和水地暖; 水地暖和电地暖总费用较高, 碳纤维带电热地暖和暖气片总费用较低.

从造价方面可以看出, 碳纤维带电热地暖价格低廉, 易于接受. 考虑到暖气片维修困难, 且需要后续运检、维修费用(本文没有考虑此费用), 所以在总费用方面, 碳纤维带电热地暖拥有明显优势. 碳纤维带电热地暖设备简单、运行便捷, 使用寿命长的特点, 使其具有良好的应用前景.

#### 5 结论

通过进行 24 h 供暖试验, 考察了碳纤维带电热地暖的工作性能. 通过对比其与传统采暖方式的造价及运行成本, 研究了碳纤维带电热地暖的经济适用性. 碳纤维带电热地暖能够正常且长时间工作, 将室内温度保持在设定范围内.

在长时间工作状态下, 相对于室内初始温度, 室外温度是影响升降温控阶段工作时间及能耗方面的主要因素. 当室外温度较高时, 系统保温时间较长, 工作时间较短; 当室外温度较低时, 系统保温时间较短, 工作时间较长.

水泥砂浆和木质地板均拥有良好的导热性, 可用于组建碳纤维带电热地暖. 合理布置碳纤维带可以将各层横向温差控制在 3 °C 以下. 碳纤维带电热地暖造价费用低, 运行费用适中, 总费用远低于传统水、电地暖, 拥有广阔的应用范围和市场前景.

#### 参考文献

- [1] 黄世斌. 我国冬季室内取暖设备的现状与发展趋势[J]. 中国住宅设施, 2003(8): 34-35.  
HUANG Shi-bin. The current situation and development trend of indoor heating facilities in winter of China[J]. China Housing Facilities, 2003(8): 34-35. (In Chinese)
- [2] 殷昊. 采暖用电热膜的研究与室内热工性能分析[D]. 北京: 北京化工大学化学工程学院, 2013: 1-85.  
YIN Hao. Research and indoor thermal performance analysis of electrothermal film used in heating[D]. Beijing: School of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, 2013: 1-85. (In Chinese)
- [3] 孔祥强, 李瑛. 列车客车用低温发热电缆地面辐射供暖系统的实验研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(11): 10-14.  
KONG Xiang-qiang, LI Ying. Experiment of low-temperature heating cable floor radiant heating system on a passenger train [J]. HV&AC, 2004, 34(11): 10-14. (In Chinese)
- [4] 赵志强, 李炎锋. 露天水管电缆伴热防冻试验研究[J]. 暖通空调, 2003, 33(1): 20-23.  
ZHAO Zhi-qiang, LI Yan-feng. Experimental study of freeze-proof for open piping by electric heat tracing cable [J]. HV&AC, 2003, 33(1): 20-23. (In Chinese)
- [5] 李炎锋, 贾衡, 李俊梅. 露天管道绝热保温加电伴热防冻方案及其经济分析[J]. 暖通空调, 2002, 32(6): 112-114.  
LI Yan-feng, JIA Heng, LI Jun-mei. Freezing prevention for

- outdoor pipes with insulation layer and heating wire and its economic analysis[J]. HV&AC, 2002, 32(6): 112—114. (In Chinese)
- [6] 张明强. 碳晶电热板间歇供暖的热工性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 2012: 1—76.  
ZHANG Ming-qiang. Thermodynamic performance research on intermittent heating of carbon crystal panel[D]. Harbin: School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 2012: 1—76. (In Chinese)
- [7] YEHIA S A, TUAN C Y, FERDON D, *et al.* Conductive concrete overlay for bridge deck deicing: mixture proportioning, optimization, and properties[J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(2): 363—378.
- [8] YEHIA S A, TUAN C Y. Thin conductive concrete overlay for bridge deck deicing and anti-icing[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1698: 45—53.
- [9] 唐祖全, 李卓球, 钱觉时. 碳纤维导电混凝土在路面除冰雪中的应用研究[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(2): 215—220.  
TANG Zu-quan, LI Zhuo-qiu, QIAN Jue-shi. Application of carbon fiber reinforced conductive concrete for melting ice and snow on road surface[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(2): 215—220. (In Chinese)
- [10] YANG T, YANG Z J, SINGLA M, *et al.* Experimental study on carbon fiber tape-based deicing technology[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2011, 26(2): 55—70.
- [11] 沈刚, 董发勤. 碳纤维导电混凝土的性能研究[J]. 公路, 2004, 12: 178—181.  
SHEN Gang, DONG Fa-qin. Performance research on carbon fiber conductive concrete[J]. Highway, 2004, 12: 178—181. (In Chinese)
- [12] 卜良桃, 宋力, 施楚贤. 钢筋混凝土梁的抗弯加固中碳纤维板用量研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(6): 16—20.  
BU Liang-tao, SONG LI, SHI Chu-xian. Study on the consumption of carbon fiber plates in the RC beams strengthened with carbon fiber plates(CFP) [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(6): 16—20. (In Chinese)
- [13] 尚守平, 李知兵, 彭晖. 碳纤维板-混凝土界面黏结性能的试验研究与有限元分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(6): 43—51.  
SHANG Shou-ping, LI Zhi-bin, PENG Hui. Experimental research and finite element analysis of the interfacial bonding behavior of CFRP-concrete interface[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(6): 43—51. (In Chinese)
- [14] 朱德举, 马拓, 刘武华. 碳纤维带电热技术的试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(5): 131—136.  
ZHU De-ju, MA Tuo, LIU Wu-hua. Experimental study on electrical heating technology utilizing carbon fiber tape[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(5): 131—136. (In Chinese)
- [15] 马拓. 水泥基碳纤维地暖电热技术的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2015: 1—67.  
MA Tuo. Experimental study on electrical heating technology of cement-based flooring heating system utilizing carbon fiber tape[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2015: 1—67. (In Chinese)