

文章编号:1674-2974(2016)05-0131-06

## 碳纤维带电热技术的试验研究<sup>\*</sup>

朱德举<sup>†</sup>, 马拓, 刘武华

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**提出了一种基于碳纤维带的新型室内地暖电热系统,并介绍了电热板的设计思路、试验模型和建造过程,得到了试验结果.试验通过将三条宽度为50 mm,间距为200 mm的碳纤维带预埋在水泥砂浆中构成电热板,检测不同位置温度随时间的变化和系统能耗,以获得系统的电热性能.结果表明:电热系统升温迅速,平均升温速率能达到1.83 °C/min.竖直方向的温度变化梯度远大于水平方向温度变化梯度.碳纤维带电阻稳定性较好,地暖反射膜和保温板的隔热效果良好,温控装置对减少能耗成效显著.

**关键词:**碳纤维带;室内地暖;电热板;试验研究

中图分类号:TU578.13

文献标识码:A

## Experimental Study on Electrical Heating Technology Utilizing Carbon Fiber Tape

ZHU De-ju<sup>†</sup>, MA Tuo, LIU Wu-hua

(College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** This paper proposed an innovative design for in-door electrical heating system that uses commercially available carbon fiber tape (CFT). The design of the heating panel, layout and the construction of a prototype were presented with experiment results. The heating panel was made of three carbon fiber tapes and embedded in cement mortar. Each CFT was 50 mm wide with a spacing of 200 mm. Several experiments were conducted to examine the performance, temperature variation with time and location, and energy consumption of the proposed system. The experiment result has shown that the heating system performs satisfactorily and is heated up quickly with an average speed of 1.83 °C/min. The temperature gradient in the vertical direction is much larger than that in the horizontal direction. The electrical resistance of the CFT is stable, and the reflective membrane and insulation board are effective in reducing the heat transfer towards the bottom. The automatic temperature control device can reduce the energy consumption significantly.

**Key words:** carbon fiber tape; in-door heating; heating panel; experimental study

随着生活水平的不断提高,人们对居住的要求也在改变,由原来解决基本的生活问题,发展为寻求

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-01-30

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

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

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: dzhu@hnu.edu.cn

生活环境的舒适性和安逸性. 研究表明室内阴冷潮湿不利于人们的身体健康<sup>[1]</sup>. 室内供暖是人们抵御寒冷的主要方式, 而建筑供暖方式的舒适性也逐渐引起人们的重视; 同时, 世界各国都十分重视节能问题, 节约能源、提高能源利用率已经成为各行各业在谋求提高劳动生产率的同时所追求的另一个目标<sup>[2-3]</sup>, 这就对室内供暖方式提出了更高的要求. 传统的供暖方式, 已经不符合绿色环保的要求, 且燃烧产生的废物会对人体健康造成不同程度的危害<sup>[4]</sup>. 相比于传统能源, 电能清洁环保, 已在城市供暖领域得到了广泛应用<sup>[5-6]</sup>. 其中, 电地暖就是典型的代表. 由于地暖可以使室内各空间温度分布均匀, 同时垂直方向温差小, 使人们感觉更加舒适; 与对流采暖系统相比, 节能效果能达到 10% 左右, 能源利用率高, 不会产生噪音, 还能改善空气质量, 降低室内粉尘, 较传统方式更为清洁.

近年来, 国内外学者在电热地暖方面进行了研究. Anthienitis<sup>[7]</sup> 设计出一种混凝土板蓄热的地板电供暖系统, 并进行了供暖试验, 结果表明: 该系统供暖效果良好. Farid<sup>[8]</sup> 设计了一种蓄热的地板电供暖系统, 普通住宅中进行供暖试验, 结果表明: 该电热板可使室内温度迅速升高, 且均匀分布. 导电混凝土作为一种路面除冰融雪材料已经得到了应用<sup>[9-11]</sup>, 而作为地暖应用, 具有造价低, 施工方便等优点, 完全可以达到采暖目的, 但其性能尚需进一步研究. 同时对于大面积场地, 电极如何布置, 如何保证导电层施工厚度, 均需更多探讨. 导电混凝土是指由胶凝材料、导电相如导电微粒和导电纤维、介电骨料和水等组分, 按照一定配比混合凝结而成的多相复合材料. 而碳纤维带水泥基复合材料是依托导电碳纤维带形成的一种特殊形式的导电混凝土, 导电混凝土可和经过特殊布局的电极以及电动装置一起使用来给马路、人行道、桥面、飞机跑道除冰除雪<sup>[12]</sup> 以及室内地面导热升温. 目前, Yang<sup>[13]</sup> 将碳纤维带预埋在混凝土路面中, 设计和铺设了具有除冰加热层的人行道, 经过多次试验, 证实其能够起到良好的除冰作用. 徐世焯等<sup>[14-15]</sup> 发现碳/玻璃纤维混合编织网增强混凝土通电后可以形成良好的导电加热网络, 产生热量使混凝土温度升高, 升温过程中电阻率也较为稳定. 沈刚<sup>[16]</sup> 研究了电阻率随交流电压变化的情况, 分析了不同电压下的电热效应, 碳纤维混凝土通电后产生的热量能够满足冬季路面除冰化雪的需要. 还有研究表明: 碳纤维通电后产生的焦耳热很

容易散发, 电热转化效率高达 90% 以上, 节能效果十分显著<sup>[17]</sup>. 同时, 当混凝土中含有 1% 体积分数的碳纤维时, 其在拉伸和弯曲两方面的强度均得到了提高<sup>[18]</sup>. 由短碳纤维和少量有机粘结剂制成的碳纤维毡具有良好的耐腐蚀性和稳定的电阻率, 也被证明是良好的电加热材料<sup>[19]</sup>.

本研究设计出一套采用碳纤维带的新型电加热装置, 进行了通电升温试验和温度智能控制试验, 测量了温度变化过程和耗电量等关键数据.

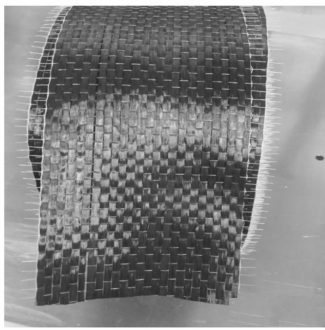
## 1 试件制备

试验采用 T300B-3K 单向编织碳纤维带, 规格为 600 mm × 50 mm × 0.2 mm. 基本物理力学性能如表 1 所示, 外观如图 1(a) 所示. 选用普通硅酸盐水泥, 河砂(最大粒径 1.2 mm), 为满足铺设地暖以及地板要求, 按照水泥与河砂体积比 1:3 制备砂浆. 砂浆具有较好的流动性和保水性, 使用过程中没有出现泌水和流浆现象.

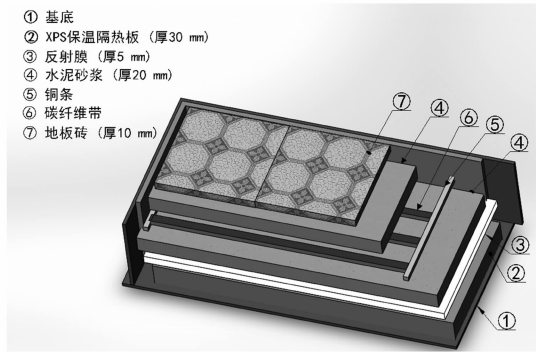
表 1 碳纤维带物理力学性能  
Tab. 1 Physical and mechanical properties of carbon fiber tape

类型	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	面积/ mm <sup>2</sup>	长度/ mm	抗拉 强度/ MPa	弹性 模量/ GPa	破坏 应变/ (mm · mm <sup>-1</sup> )
碳纤维束	2	0.444	300	1 585	364	0.005 5
碳纤维带 (4 yarns)	2	1.776	300	1 376	301	0.006 1

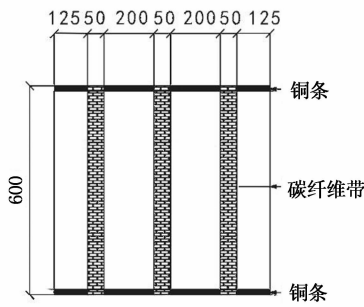
碳纤维电热装置的组成(图 1(b)), 包括基底、保温隔热板、水泥砂浆、反射膜、碳纤维加热膜、水泥砂浆和地板砖. 碳纤维带预埋在水泥砂浆中, 选取导电性能优良的黄铜条作为电极(长 × 宽 × 厚的尺寸为: 800 mm × 30 mm × 0.8 mm). 碳纤维地暖加热装置(长 × 宽的尺寸为: 800 mm × 600 mm) 的平面布置如图 1(c) 所示, 两端铜条与导线固定连接, 经变压器(24 V, 1 000 W) 与电源(220 V) 连接. 在满足变压器额定功率的前提下, 为了使碳纤维加热均匀, 布置了 3 条 50 mm 宽的碳纤维带, 间隔为 200 mm, 外侧碳纤维带与边缘的距离为 125 mm. 碳纤维带和铜条的总电阻为 1.9 Ω, 整个电热装置的功率为 300 W. 剖面方向上(图 1(d)), 底层铺设 30 mm 厚的保温隔热板和 5 mm 厚的反射膜, 碳纤维带埋置于 40 mm 厚的水泥砂浆的中间位置.



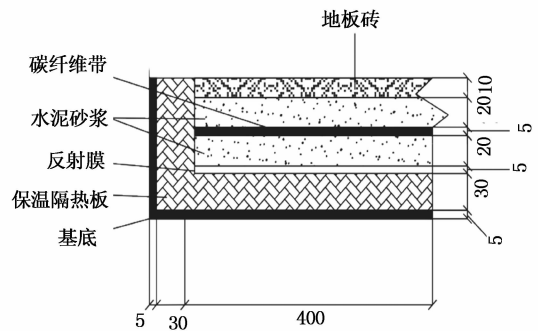
(a) 碳纤维带



(b) 碳纤维地暖装置效果图



(c) 平面图(mm)

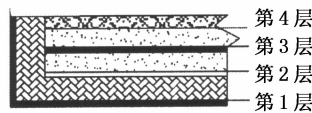


(d) 剖面图(mm)

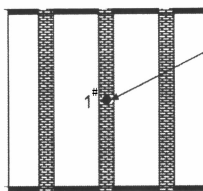
图 1 碳纤维带电热装置  
Fig. 1 Layout of the CFT electrical heating device

温度传感器的位置布置如图 2 所示. 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 传感器位于第 1 层和第 2 层的中间位置, 以便测试保温隔热板和反射膜的效果. 3<sup>#</sup>~8<sup>#</sup> 与 9<sup>#</sup>~12<sup>#</sup> 传感器位于第 3 层和第 4 层相同水平平面位置, 其中第 3 层的 3<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>, 7<sup>#</sup> 传感器和第 4 层的 8<sup>#</sup>, 10<sup>#</sup>,

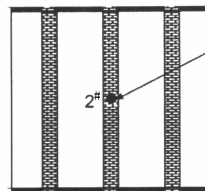
12<sup>#</sup> 传感器位于两条碳纤维带的中间位置, 能够记录温度在平面方向是否均匀. 而第 3 层的 4<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup> 传感器和第 4 层的 9<sup>#</sup>, 11<sup>#</sup> 传感器位于碳纤维带的中间位置, 能够记录碳纤维带的升温效率和热源的最高温度.



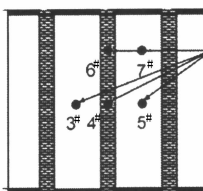
(a) 分层布置图



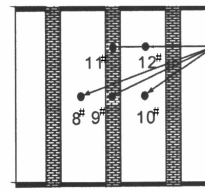
(b) 第 1 层



(c) 第 2 层



(d) 第 3 层



(e) 第 4 层

图 2 温度传感器的空间布置  
Fig. 2 Locations of temperature sensors

## 2 试件测试

### 2.1 加热测试

在完成碳纤维电热装置后,开始通电进行加热

测试.为了检测升温过程中是否具有良好的重复性,进行了3组测试,每组测试通电时间为35 min.由于部分温度传感器所处位置类似,将3<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>,7<sup>#</sup>;4<sup>#</sup>,6<sup>#</sup>;8<sup>#</sup>,10<sup>#</sup>,12<sup>#</sup>;9,11<sup>#</sup>传感器放在一起对比,温度变化如图3所示.

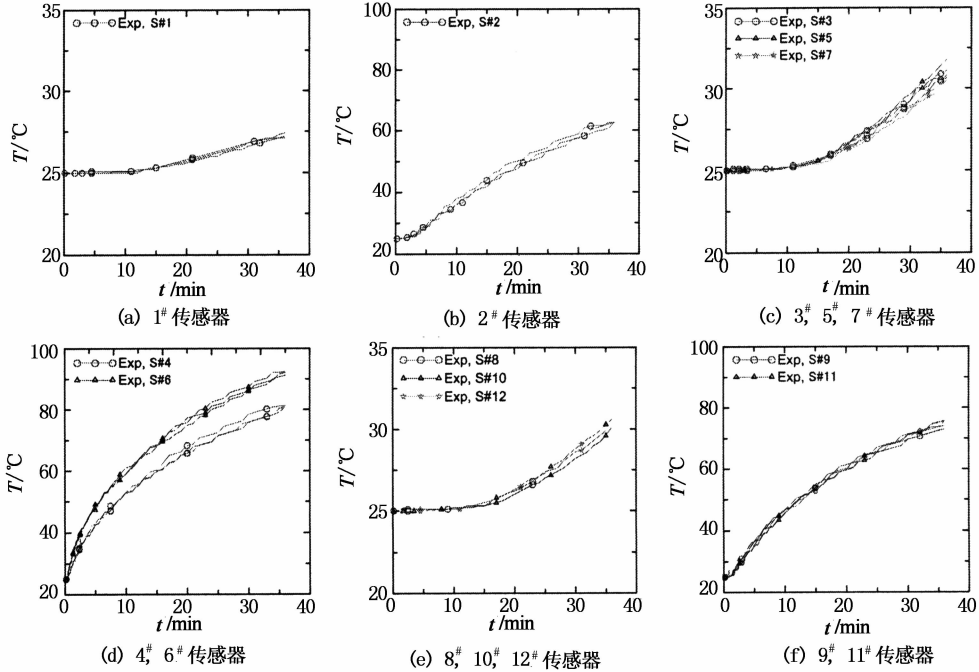


图3 温度传感器测量的不同位置的温度变化

Fig. 3 Temperature change at different locations measured by temperature sensors

所有温度传感器的数据重复性较好,表明该碳纤维加热装置具有较好的稳定性.4<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>温度传感器的数据有较大的差异,这可能是由于4<sup>#</sup>传感器在埋置过程中发生了偏移,其他各组位于类似位置的传感器的测试数据基本相同.

为了更加明确地反映不同铺设深度内温度变化趋势的情况,本文给出了不同位置温度传感器的数据.结果表明:位于碳纤维带上、下方的传感器(2<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>,6<sup>#</sup>,9<sup>#</sup>,11<sup>#</sup>)升温较快,位于碳纤维带中间位置的传感器(3<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>,7<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>,10<sup>#</sup>,12<sup>#</sup>)升温较慢.其中碳纤维下方2<sup>#</sup>温度传感器升温过程(从25~62℃)基本满足线性变化,平均升温速率为1.03℃/min;而由于保温隔热层的作用,位于下方1<sup>#</sup>温度传感器温度从25~27.5℃变化不大;位于第3层碳纤维上方位置的6<sup>#</sup>温度传感器和第4层砂浆处位置的9<sup>#</sup>,11<sup>#</sup>温度传感器在实验刚开始的时间内温度变化很快,之后升温速率逐步降低.第4层的温度变化滞后于第3层,升温过程中两层相同位置的温度传感器平均温度变化分别为25~91℃和25~75℃,升温速率分别为1.83℃/min和1.39℃/min;

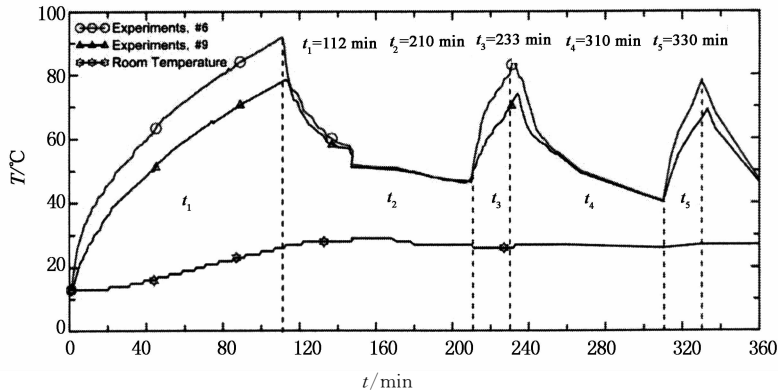
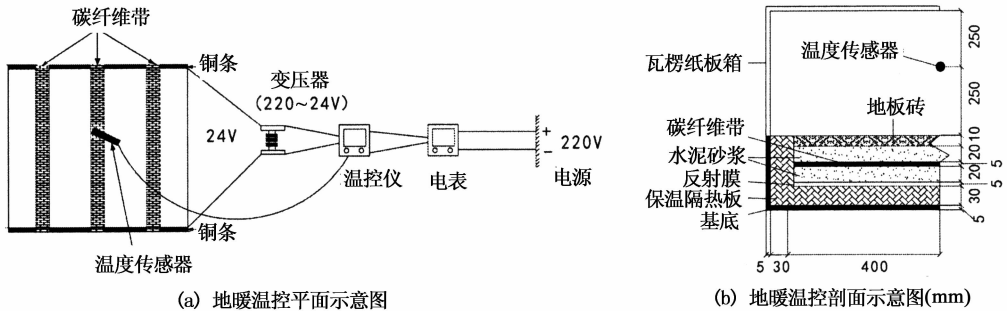
位于第3层碳纤维之间位置的3<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>,7<sup>#</sup>温度传感器和第4层砂浆处位置的8<sup>#</sup>,10<sup>#</sup>,12<sup>#</sup>温度传感器在实验刚开始的时间内温度变化很慢,之后升温速率逐步提高,升温过程中两层相同位置的温度传感器平均温度变化分别为25~33℃和25~31℃,升温速率分别为0.22℃/min和0.17℃/min.该碳纤维带电热系统升温迅速,1h升高10℃,相对于传统取暖方式属于较高效率,直接把电能转换为热能,热效率高达98%以上<sup>[20]</sup>.

### 2.2 自动温控试验

为了模拟室内环境中地暖加热以及温度智能控制等现实条件,本文还对碳纤维加热装置添加了自动温控仪以及电流表,进行了连续6h的温控实验(图4(a)).为了模拟实际应用情况,在碳纤维地暖加热装置上加盖一个底面积与地板砖相同,高度为50cm的多层瓦楞纸板箱,保温隔热效果良好,模拟温控试验装置如图4(b)所示.该装置高度50cm,空间范围较小,且用于搭建的瓦楞纸板箱保温隔热作用好,是较为理想的室内模型.同时,外接的电流表用于测定整个装置的耗电量.环境初始温度为13

℃,设定温控仪温度范围为26~27℃,则当温度高于27℃时,温控仪自动断电,待温度降至26℃以下时,温控仪自动联通,在升温和降温过程中,温控仪的温度传感器放置于地板砖和瓦楞纸板箱中心处,即离地板砖25cm处检测温度,温控仪根据自动断、

连电控制温度始终在该预设范围内,满足舒适性的要求.温控试验的温度变化如图4(c)所示,其中6#,9#温度传感器,分别代表碳纤维上和砂浆表层的温度,温控仪自带温度传感器显示环境温度(即纸箱内中心位置的气温).



(c) 温控试验结果  
图4 自动温控试验

Fig. 4 Automatic temperature control test

由于温控仪可以根据环境温度自动断开和连接电源,整个试验经历 $t_1, t_2, t_3, t_4$ 和 $t_5$ 5个阶段。 $t_1, t_3, t_5$ 为升温阶段, $t_2, t_4$ 为降温阶段。在 $t_1$ 阶段,6#,9#温度传感器迅速升温,分别从初始温度13℃升高到92.2℃和75.3℃;由于9#温度传感器位于第4层,所以温度变化滞后于6#温度传感器;室内温度也逐渐升高,当达到 $t_1$ (112 min)时,环境温度从初始温度13℃升高到27℃,温控仪自动断开电源,装置进入降温阶段 $t_2$ 。这时,6#,9#温度传感器温度迅速降低,但由于热量向上传导,温控仪传感器处的温度仍有所上升,一直上升到30℃才逐渐降低,且后阶段下降速率变慢。当达到 $t_2$ (210 min)时,环境温度降到26℃,温控仪自动连接电源,装置再次进入升温阶段 $t_3$ 。当达到 $t_3$ (233 min)时,环境温度升高到27℃,温控仪自动断开电源,装置又进入降温状态 $t_4$ 。当达到 $t_4$ (310 min)时,环境温度再次降低到26℃,温控仪自动连接电源,装置又进入升温阶段 $t_5$ 。当达到 $t_5$ (330 min)时,环境温度升高到27℃,温控仪自动断开电源,装置又进入下一个降温阶

段。可以看出,装置可以进行循环往复的加热-降温-再加热的过程。在该过程中,装置需要经过一定时间的 $t_1$ 阶段用来预热和升温以达到预设温度,在温度稳定(26~27℃)之后,装置实际上只需经过短时间加热阶段,又可以进入较长时间的降温阶段。

该加热装置在360 min的试验时间内,经历了一个预加热阶段( $t_1$ )和两个完整的升降温阶段( $t_2, t_3$ 和 $t_4, t_5$ ),实际通电时间为 $t_1 + t_3 + t_5 = 155$  min,耗电0.783 kW·h。在预加热阶段完成后,通电与断电的时间比 $(t_3 + t_5)/(t_2 + t_4) = 0.25$ ,表明该装置实际通电时间较短,具有很好的节能效果。同时,预加热阶段完成后,温控仪传感器处的温度不断上升,实际地暖加热时,可以把温控仪预设停止温度调整到稍低于预期温度,以便充分利用余热,节约能源。同时经过6 h加热后,测得碳纤维地暖装置电阻为1.92 Ω,基本无变化,表明该装置的稳定性较好。另外,对比2.2节的加热温度测试,该自动温控装置测试的平均升温速率(0.7℃/min)较低,可能与系统从较低初始温度升温需要更多的热量有关。该装置

节能效果明显,比传统电热制品节能约 30%。这种取暖方式充分利用了热传导、对流和辐射 3 种传播方式。碳纤维带地暖直接消耗电能,可以避免消耗煤、油等不可再生资源,减少二氧化碳和大气污染物的排放。碳纤维带地暖便于个人家庭安装,相比传统地暖发热迅速,由于其配有控温系统,室内温度便于调节,适合于我国南北方取暖。

### 3 结 论

提出了一种基于碳纤维带的新型室内地暖电热系统,介绍了电热板的设计,进行了加热和自动温控试验,得到了各处温度随时间和位置的变化趋势、能量消耗等数据,试验结果表明:电热系统升温迅速,平均升温速率能达到  $1.83\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,比传统的地暖取暖方式效率更高。竖直方向的温度变化梯度远大于水平方向温度变化梯度。碳纤维带电阻稳定性较好,地暖反射膜和保温隔热板效果良好。在温控仪控制下,电热系统往复升温 and 降温,其中实际通电时间约为断电时间的 25%,温控装置对减少能耗成效显著。本系统仍存在一些需要改进的地方,比如优化加热功率,提高温度分布的均匀性;在长时间反复升温降温过程中,该系统的碳纤维带的电阻是否会发生较大变化;以及不同初始温度对升温速率的影响仍有待于进一步研究。

### 参 考 文 献

[1] GEMMELL I. Indoor heating, house conditions, and health [J]. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 2001, 55(12): 928-937.

[2] LI Z, ZHANG G, LI D, *et al.* Application and development of solar energy in building industry and its prospects in China [J]. *Energy Policy*, 2007, 35(8): 4121-4128.

[3] XU J, SUI J, LI B, *et al.* Research, development and the prospect of combined cooling [J]. *Heating and Power Systems Energy*, 2010, 35(11): 4361-4368.

[4] 滕恩江, 胡伟, 吴国平, 等. 室内燃煤取暖与烟雾程度对呼吸道健康的影响研究 [J]. *中国环境监测中心*, 2001, 17(7): 5-32.

TENG En-jiang, HU Wei, WU Guo-ping, *et al.* The effect of indoor coal heating and smoke degree on respiratory health [J]. *China National Environmental Monitoring Center*, 2001, 17(7): 5-32. (In Chinese)

[5] LIN K, ZHANG Y, XU X, *et al.* Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates [J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(3): 215-235.

[6] OLESEN B W. Radiant floor heating in theory and practice [J]. *Ashrae Journal*, 2002, 44(7): 19-26.

[7] ATHIENITIS A, CHEN T. Experimental and theoretical investigation of floor heating with thermal storage [C]//The 1993 Winter Meeting of Ashrae Transactions. Chicago: Ashrae Transactions, 1993, 99(1): 1049-1057.

[8] FARID M, KONG W. Underfloor heating with latent heat storage [J]. *Journal of Power and Energy*, 2001, 215(5): 601-610.

[9] 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.

[10] YEHIA S A, TUAN C Y. Thin conductive concrete overlay for bridge deck deicing and anti-icing. transportation research record [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2000, 1698(1): 45-53.

[11] 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)

[12] 侯作富, 李卓球, 胡胜良. 导电混凝土导热系数分析的电热有限元法 [J]. *实验力学*, 2002, 17(4): 464-469.

HOU Zuo-fu, LI Zhuo-qiu, HU Sheng-liang. A finite element analysis for the thermal conductivity of electrically conductive concrete [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 17(4): 464-469. (In Chinese)

[13] YANG T, YANG Z, SINGLA M, *et al.* Experimental study on carbon fiber tape-based deicing technology [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2011, 26(2): 55-70.

[14] 徐世娘, 尉文婷, 宋世德. 碳/玻璃纤维混合编织网增强混凝土电热性能数值模拟与试验研究 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(9): 1271-1278.

XU Shi-lang, WEI Wen-ting, SONG Shi-de. Numerical simulation and experimental study on electrothermal properties of carbon/glass fiber hybrid textile reinforced concrete [J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 41(9): 1271-1278. (In Chinese)

[15] 张滇军, 徐世娘, 孙进. 碳纤维砂浆与碳纤维混凝土导电性能实验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2006, 9(3): 347-352.

ZHANG Dian-jun, XU Shi-lang, SUN Jin. Experimental study on electric properties of CFRM and CFRCC [J]. *Journal of Building Materials*, 2006, 9(3): 347-352. (In Chinese)

[16] 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: 178-81. (In Chinese)

[17] 贺福. 碳纤维的电热性能及其应用 [J]. *化工新型材料*, 2005, 6: 7-8.

HE Fu. The electrothermal property and application of carbon fiber [J]. *New Chemical Materials*, 2005, 6: 7-8. (In Chinese)

[18] CHEN B, WU K, YAO W. Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26(4): 291-7.

[19] CHUNG D. Electrical applications of carbon materials [J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(8): 2645-61.

[20] 赵登科. 碳纤维电热地暖板热工性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 2008: 1-82.

ZHAO Deng-ke. Thermodynamic performance research of carbon fiber electric heating panel for floor panel heating system [D]. Harbin: School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 2008: 1-82. (In Chinese)