

文章编号:1673-9468(2008)04-0065-04

地源热泵相变蓄能地板采暖技术性能分析

康利改,王景刚,刘杰

(河北工程大学 城建学院,河北 邯郸 056038)

摘要:对地源热泵相变蓄能地板辐射采暖技术与其它供暖方式进行了比较,指出此系统的优点;还将低温热水与电热源两种方式从环境效益方面论证地源热泵低温热水提供热量的可行性,分析了供水温度、相变温度与相变半径、相变材料的填充量以及盘管间距各因素的影响,同时与目前常用的电加热方式进行了经济性分析,年运行费用不到电加热的1/3。

关键词:地源热泵;电加热;蓄能;低温地板辐射

中图分类号: TU832

文献标识码: A

The performance analysis of GSHP radiant floor heating system with PCM

KANG Li-gai, WANG Jing-gang, Liu Jie

(College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: It was proven that the heating way with low temperature water has many advantages through the comparison of the GSHP radiant floor heating system with PCM and other heating modes. Besides the floor radiant heating system with low water and electricity were also compared from the exergy consumption in this paper, it was demonstrated that the radiant floor heating with low temperature water is the optimum. Also the paper had analyzed the influences of water supply temperature, phase transition temperature and phase change radius, filling amount of PCM and coiled pipe spacing. The author compared this heating mode with the modern heating modes with electricity from the economical aspects. The results show that its annual operation cost is less than 1/3 of the heating with electricity.

Key words: ground source heat pump; electric heating cable; energy storage; low-temperature water floor radiant heating

迄今为止,国外对蓄热式地板采暖有了一些研究和应用。西班牙的 Barrio 对放在恒温环境中的小室做了蓄热地板电采暖的实验,比较了 NPC 相变材料和混凝土的蓄热性能^[1]。加拿大的 A·K·Athienitis 研究了用混凝土蓄热的地板采暖系统在不同室外温度下的使用效果^[2]。Bakos 在被动式太阳房中应用了蓄热电采暖地板^[3]等。我国对相变材料蓄热的研究起步较晚,但是近几年发展较快。清华大学张寅平^[4]、中国科技大学叶宏^[5]、天津大学李建国等^[6]均对此进行了多方面的研究。

虽然电加热相变蓄能建筑系统,没有任何污染,而且有利于电力的削峰填谷和运行费用的节

约,但并不是一种合理的能源利用方式,节资效果也有限,而且存在着安全问题。本文提出将电力驱动地源热泵—相变蓄能地板的采暖方式。初步研究表明,这是一种高效节能环保的建筑采暖热源方式^[7,8]。

1 相变蓄能围护结构的调温机理

相变材料在其本身发生相变的过程中,可以吸收环境的热(冷)量,并在需要时向环境放出热(冷)量,从而达到控制周围环境温度的目的。把相变材料与建筑围护结构结合,制成相变蓄能围护结构,用于建筑物室内温度的调控。相变蓄能围护结构可以大大增加围护结构的蓄热作用,使

建筑物室内和室外之间的热流波动幅度被减弱、作用时间被延迟(见图1),从而提高建筑物的温度自调节能力和改善室内环境,达到节能和舒适的目的。

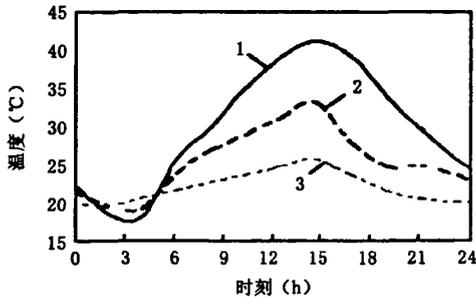


图1 室内外温度波动的衰减和延迟示意图

Fig.1 The decline and delay of the temperature between indoor and outdoor

2 可行性分析

2.1 地源热泵相变地板采暖优缺点

利用地源热泵低温热水加热相变材料,使其产生相变,以潜热形式储存热量,白天放出给房间供暖。与其他采暖相比,这种采暖方式优点为:①地源热泵系统不直接消耗煤或燃油、天然气等矿物燃料,没有任何直接排放的污染物;②高效的地源热泵系统,输出同等量的有用能量,仅仅消耗30-60%的电功率;③蓄能地板辐射采暖热效率高,在相同的舒适条件下,室内温度一般比对流方式低2°C-4°C低温传送,而且可直接利用地源热泵提供的40°C-45°C的低温热水,在热媒传输过程中热量损失小。同时,室内温度梯度很小,地面温度高于呼吸区温度,给人以脚暖头凉的感觉;④蓄能地板蓄热量大,热稳定性能更好,在间歇供暖的条件下,室内温度变化缓慢。⑤地板采暖容易布

置,较为理想的解决了大跨度空间散热器难以合理布置的问题,而且其运行管理简单,省去了锅炉与热水管道的建设、运行管理费用,节省了锅炉房与散热器所占空间,没有供暖收费难的问题。

相变蓄热地板采暖与地源热泵结合,在实行峰谷电价地区,利用夜间低谷廉价电运行,可大大降低采暖的电费开支,并缓解电网峰谷差;充分利用低品位热源,符合我国节能减排的要求。

2.2 采暖方式的舒适性与热损失比较

为了对各种供暖方式做一个相对客观的评价,应当综合考虑各种采暖方式的能耗(热损失)和热舒适性。如果以能耗和最大PPD值最低者的计分为1,能耗每超出10W增加1分,PPD值每超出5%增加1分,各采暖方式的能耗和舒适性计分列于表1,将二者相加,并根据得分的多少排序,得分少的综合排序靠前,从中可以看出以地板采暖为最优,各类墙上安装的散热器、暖风机和电热吊顶并列第二,窗下安装的采暖设备因为能耗高而排序在后,又以窗下安装的暖风机在最后。该项研究中热损失的具体数值参见文献[9]地板采暖能耗分析一节。

2.3 环境效益比较

电热电缆蓄能地板辐射采暖中,设环境温度 $t_0 = 0^\circ\text{C}$,为保持室温 $t = 20^\circ\text{C}$,需要单位时间用电热装置(如电炉)向室内的供热量为 Q ,则电能完全转换为热能,单从数量上看,已无节能潜力可挖。若从能量质量方面来分析,电能的能质系统等于1(即能全部转变为其它形式的能量),而热量 Q 的能质系统 $(1 - T_0/T)$ 仅为0.068,即供能与用能的能质相差0.932。也就是说,电能通过电炉转换为热量后,有93.2%的电焓退化为没有任何做功能力的焓。

表1 各种采暖设备的舒适性综合排序

Tab.1 The comprehensive sequencing of kinds of heating types

采暖设备	热损失计分	舒适性计分	热损失分+舒适性分	综合排序
低温热水地板采暖	1	2	3	1
电热式吊顶辐射板	1	4	5	2
电暖风机(窗下安装)	7	1	8	8
电暖风机(墙上安装)	4	1	5	2
高温热水板式散热器(窗下安装)	6	1	7	7
高温热水板式散热器(墙上安装)	4	1	5	2
低温热水板式散热器(窗下安装)	5	1	6	6
低温热水板式散热器(墙上安装)	4	1	5	2

这种能源浪费不是数量上的,而是能质量作用上的浪费——将高质量能用在低质量能用户上。而对于地源热泵,即是一种利用高位能把不能直接利用的低品位热能(土壤)转换为可以利用的高位热能。仍设环境温度 $t_0 = 0^\circ\text{C}$, 为保持室温 $t = 20^\circ\text{C}$, 需要单位时间用地源热泵向室内供热量为 Q , 地源热泵 $\text{COP} = 3.3$, 则需要的电能为 $Q/3.3$, 由此可见地源热泵供热不仅在数量上节能, 而且从能量的质的方面讲, 充分利用了低品位能, 节省了高品位的电能。

3 影响因素分析

1) 供水温度的影响。当相变温度、相变半径、相变材料填充量及盘管间距等其他参数均取定值时, 随着供水温度的升高, 地板表面温度增加。而且由于冬季地板表面温度比室内温度高, 当供水温度升高时, 地板表面辐射换热和自然对流换热的温差增大, 地板表面平均热流密度增大, 相变材料的蓄热时间缩短。但是供水温度不宜过大, 否则不仅会造成室内温度波动较大, 其相应的能耗也会增加。

2) 相变温度及相变半径的影响。当供水温度、相变材料填充量及盘管间距等其他参数均取定值时, 一般地, 相变温度在接近采暖温度时效果最佳。若在此基础上降低相变材料的相变温度, 则蓄、放热时间缩短, 室温波动增大。反之, 随着相变温度的升高, 相变层上下表面处于相变区的时间减少, 其相变材料不能完全发生相变, 从而得不到充分的利用, 此时, 室内温度波动较大, 室内温度发生较大的变化。

相变半径较小时, 室内温度变化较为平缓, 室内温度的日平均值也较高。随着相变半径的增加, 室内温度波动增加, 日平均温度也降低, 因此应选用较小相变半径的相变材料。

3) 相变材料的填充量的影响。当供水温度、相变温度、相变半径及盘管间距等其他参数均取定值时, 相变蓄能地板的蓄、放热时间随着相变材料填充量的增加而延长。且蓄热结束后, 地板表面平均温度也随相变材料填充量的增加而升高。根据实际应用分析得出, 一般取相变材料厚度稍大于盘管管径为宜。

4) 盘管间距的影响。在供水温度、相变温度、相变半径及相变材料填充量等其他参数均取定值时, 若盘管间距小, 则热流密度增加, 从而蓄热时

间缩短, 但相应的放热时间也短, 因此达不到所需的放热量, 但随着盘管间距的增加, 地面温度降低, 热流密度减少, 因此对于相变地板辐射采暖, 应合理选择符合满足相变材料达到一定蓄热量要求同时又能保证室内温度的盘管间距。

综上可知, 各个因素的变化都会引起热流密度的变化, 从而影响蓄、放热时间及其室内地面温度, 空间温度的变化, 图 2 模拟了一长宽高分别为 $6\text{m} \times 3.6\text{m} \times 3\text{m}$ 的房间, 给出了在不同热流密度时室内地面温度的变化, 可以看出随着热流密度的增加, 地面温度增加, 当热流密度为 $200\text{W}/\text{m}^2$ 时, 部分地面温度超过 30°C 。据一些国家对地面温度的限制(美国 29°C 、法国 21°C 、英国 24°C 、德国 29°C)及《简明供热设计手册》中: 地板辐射采暖系统中, 为保证人的舒适感, 其地面温度都有一定的限制, 对于经常有人停留的区域, 地面温度为 $26 - 32^\circ\text{C}$, 因此我们需要综合考虑各个因素, 使热流密度维持在满足人体热舒适温度的范围内。

4 经济效益分析

下面给出一算例。北京某住宅楼采暖面积 $2\text{万}\text{m}^2$, 外墙由 240mm 厚的重砂浆空心砖与 20mm 厚的聚乙烯板外保温构成, 内墙均为 240mm 厚的重砂浆空心砖, 地板中相变材料的相变温度约为

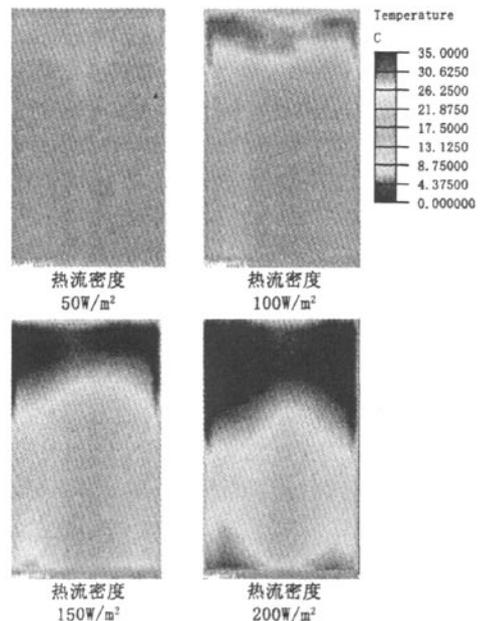


图2 不同热流密度下的地面温度分布

Fig. 2 The surface temperature at different heat

表 2 年运行费用对比表
Tab.2 Comparison of annual operation cost

供热方式	低谷电价 (元/度)	综合热 转化效率 (%)	产生 1kWh 热 所需费用 (元)	采暖负荷 (kWh/m ²)	单位面积 运行费用 (元)	总运行 费用 (万元/a)	初投资 (万元)
电缆	0.2	100	0.2	38.4	7.68	15.36	120
地源热泵	0.2	330	0.061	38.4	2.34	4.68	216

29℃, 相变潜热为 183kJ/kg, 地板覆盖层厚度 2cm, 内墙与上下楼板按绝热处理。

地板辐射采暖面积热指标按 40W/m², 则采暖总负荷为 40 × 20 000/1 000 = 800 kW。

地埋管系统初投资: 机房: 主机, 每 kW 成本 500 元; 机房辅助设备, 按主机造价的 70%, 总价 850 × 800 = 68 万元。

室内: 选用美国开发的一种新型耐高温管道材料——耐热聚乙烯 (PE-RT), 管间距为 150mm, 管径 Φ20 × 1.9mm, 由低温热水地板辐射采暖系统工程设计与施工知: 每平方米所需管子长度为 6.7 m, 故需总长度 6.7 × 20 000 = 134 000m, 每米以 5 元计算, 则所需费用为 5 × 134 000 = 6.7 × 10⁵ 元。

地埋管: 打井每岩米造价 25 元。每米管子 5 元, 故每岩米 35 元, 1 平方米建筑物按 1.2 岩米计算, 则每平方米建筑物造价为 42 元, 总造价 42 × 20 000 = 84 万元。

电缆加热系统造价: 供热指标 40W/m², 1.5 元/W。总价 1.5 × 800 × 1 000 = 120 万元。

运行费用: 设此系统只在夜间 22:00 - 06:00 时段运行, 此时低谷电价 0.2 元/度, 冬天运行 120d, 运行时间总计 120 × 8 = 960h, 则有采暖负荷 800 × 960 = 768 000 kWh, 折合成面积指标为 768 000/20 000 = 38.4 kWh/m²。

其初投资及年运行费用对比见表 2。

由表 2 可知在目前普遍推广使用的电加热已经节能的前提下, 利用地源热泵提供的低温热水加热, 年运行费用 4.68 × 10⁴ 元/a, 不到电加热的 1/3, 在其较长的寿命期内, 具有广阔的应用前景。

5 结论

1) 相变蓄热地板采暖系统采暖房间内, 室内温度分布比较均匀, 热舒适性较好。

2) 地源热泵相变蓄能地板采暖可以利用低品位能源(地热)以及廉价低谷电储存热能, 在峰平

时段释放热量, 实现移峰填谷。

3) 应当综合考虑地源热泵相变蓄能地板采暖系统各影响因素, 使其热流密度维持在 150W 左右, 从而使人体达到热舒适效果。

4) 较之目前广为使用的电加热地板采暖系统, 利用地源热泵提供的低温热水加热, 年运行费用 4.68 × 10⁴ 元/a, 不到电加热的 1/3。

参考文献:

- [1] BARRIO M, FONT J, LOPEZ D O, *et al.* Floor radiant system with heat storage by a solid - solid phase transition material[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, 27 (2): 127 - 133.
- [2] ATHIENTIS A K, CHEN T Y. Experimental and theoretical investigation of floor heating with thermal storage [J]. *ASHRAE Trans.*, 1993, 99(1): 1049 - 1057.
- [3] BAKOS G. Energy management method for auxiliary energy saving in a passive - solar - heated residence using lowcost off - peak electricity [J]. *Energy and Buildings*, 2000, 31 (5): 237 - 241.
- [4] 林坤平, 张寅平, 狄洪发, 等. 定形相变材料蓄热地板采暖系统热性能[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(12): 1618 - 1621.
- [5] 叶宏, 葛新石, 焦冬生. 带定形 PCM 的相变贮能式地板辐射采暖系统热性能的数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2002, 23(4): 482 - 487.
- [6] 李国建, 冯国会, 朱能, 等. 新型相变储能电热地板采暖系统[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2006, 22 (2): 294 - 298.
- [7] 王景刚, 张子平, 王侃宏, 等. R22 涡旋压缩机地源热泵机组循环性能研究[J]. *河北建筑科技学院学报*, 2002, 19(1): 13 - 17.
- [8] 王景刚, 孙培杰, 王惠想, 等. 辅助冷却复合地源热泵系统可行性分析[J]. *河北建筑科技学院学报*, 2005, 22 (3): 8 - 10.
- [9] 王子介. 低温辐射供暖与辐射供冷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(责任编辑 闫纯有)