

doi: 10.11707/j.1001-7488.20181101

# 复合式实木铝芯电加热地板传热效果分析<sup>\*</sup>

周玉成<sup>1</sup> 李响<sup>2</sup> 任长清<sup>2</sup> 马岩<sup>2</sup> 杨春梅<sup>2</sup> 白岩<sup>2</sup> 邓英健<sup>2</sup>

(1. 山东建筑大学信息与电气工程学院 济南 250101; 2. 东北林业大学机电工程学院 哈尔滨 150040)

**摘要:** 【目的】提出实木地板与铝合金芯板复合的电加热地板结构,结合电热线缆嵌入式制造工艺,构建新型实木铝芯电加热地板,以提高电加热地板采暖的热舒适性和传热效率并降低安全隐患,为电加热地板的研发、生产提供技术支持。【方法】以高档实木拼板为面板层、低档单板为底板层,通电的发热电缆与铝合金芯板组合构成发热芯层,将发热芯层嵌入实木复合地板面板层凹槽内,石棉网作为保温隔热层紧贴在发热芯层下方以保证电加热地板的热效率,采用脲醛树脂对面层和底层板材进行胶合,经过高温高压后制成企口地板。利用有限元分析软件对复合式实木铝芯电加热地板的供暖过程进行仿真。【结果】未添加铝芯散热板的电加热地板 1 h 后地板表面温度为 33.3 ℃,加热层温度过于集中,高达 60 ℃,存在安全隐患。添加铝芯散热板且散热板为普通平板式结构的电加热地板 1 h 后地板表面温度约为 29.7 ℃;肋板式铝芯散热结构的地板表面热量不如平板式均匀,但地板表面温度约为 34.5 ℃,且加热导线层温度最低,综合传热效率最好。【结论】含肋板式铝芯散热结构的电加热地板上表面温度高于不含铝芯散热结构的电加热地板,升温速度快;铝芯的结构形式对传热效果有重要影响,肋板式铝芯电加热地板升温速率快,传热效果更好。

**关键词:** 实木地板; 铝芯; 电加热; 有限元

中图分类号: S772; TU111 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2018)11-0001-06

## Analysis of Heat Transfer Effect for Compound Solid Wood Aluminum-Core Electro-Thermal Floor

Zhou Yucheng<sup>1</sup> Li Xiang<sup>2</sup> Ren Changqing<sup>2</sup> Ma Yan<sup>2</sup> Yang Chunmei<sup>2</sup> Bai Yan<sup>2</sup> Deng Yingjian<sup>2</sup>

(1. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University Jinan 250101;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University Harbin 150040)

**Abstract:** 【Objective】The electro-thermal floor structure combined with solid wood and aluminum alloy core board is proposed, combined with the embedded manufacturing process of electric heating cable, to build a new type of electro-thermal floor with solid wood and aluminum core, in order to improve the thermal comfort of the electro-thermal floor heating and the heat transfer efficiency, to reduce the security hidden danger, and to provide technical support for the development and production of electro-thermal floor. 【Method】The high-grade solid wood plate is used as the surface layer, and the low-grade veneer as the bottom layer. The electrically heating cable and aluminum alloy core plate are combined to form a heating core layer, and then the heating core layer is embedded into the groove of the panel layer of solid wood composite floor. The asbestos net is adhered as a thermal insulation layer under the heating core layer to ensure the thermal efficiency, the surface layer and the bottom plate are glued by a urea-formaldehyde resin glue, the tongue-and-groove floor was made by the high temperature and high pressure made. The finite element analysis software was used to simulate the heating process of composite solid wood floor with aluminum core. 【Result】The surface temperature of the electro-thermal floor without aluminum core is 33.3 ℃ after 1 h heating, the temperature of the heating layer is concentrated, up to 60 ℃, existing safety hazard. When the electro-thermal floor is installed with a flat aluminum core radiator plate, the surface temperature of floor is about 29.7 ℃ after 1 h heating; As for the floor with ribbed aluminum core, the surface temperature of the floor is about 34.5 ℃, though the heat dissipation of ribbed structure is not as uniform as the flat type, but the temperature of the heating wire layer is the lowest and the comprehensive heat transfer efficiency

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-06-01。

基金项目: 泰山学者优势特色学科人才团队(2015162); 哈尔滨市科技局创新人才基金(2016RQYXJ015)。

\* 马岩为通讯作者。

is the best.【Conclusion】The upper surface temperature of the electro-thermal floor with ribbed aluminum core is higher than that without the aluminum core, and the heating speed is fast; the structure of the aluminum core also has an important influence on the heat transfer effect, the electro-thermal floor with ribbed aluminum core has a faster heating rate and a better heat transfer effect.

**Key words:** solid wood floors; the aluminum core; electro-thermal; the finite element

在需要冬季供暖的地区,燃煤集中供暖作为常见的采暖手段被普遍应用,但燃煤除了造成煤炭资源浪费外,在燃烧过程中还会产生大量污染物,对生态环境造成严重影响(杜京武等,2002;江亿等,2006);此外,近年来随着人们生活水平不断提高,采暖过程中在保证室内温度的同时,舒适度也越来越被重视(李廷贤等,2004;方修等,2002)。在这种情况下,地板辐射采暖因具有环保清洁、热效高、节省空间、热力均匀等优点,逐渐成为室内采暖的主流。地板辐射采暖供热介质主要为热水和电加热,相比热水,电加热地板采暖加工控制简单、热能利用高效且清洁环保,是更为理想的采暖方式。

实木复合地板基材由多层单板复合而成,木材纤维纵横交错成网状叠压组合,使木材的各种内应力在层板之间相互适应,确保了木地板的平整性和稳定性,不同树种板材交错层压而成的实木复合地板其干缩湿胀率小,尺寸稳定性好,还有实木地板的自然木纹和舒适的脚感,兼具强化地板的稳定性和实木地板的美观性,可见,实木复合地板是电加热地板采暖的理想材料。袁全平等(2015)研究指出,电加热地板的材料选择及其内部结构布置是影响室内温度及舒适度的主要因素,鉴于此,本研究提出实木地板与铝合金芯板复合的电加热地板结构,结合电加热线缆嵌入式制造工艺,构建新型实木铝芯电加热地板,以提高电加热地板采暖的热舒适性和传热效率并降低安全隐患(韩新彬等,2009),为电加热地板的研发、生产提供技术支持。

## 1 复合式实木铝芯电加热地板的结构与制作方法

复合式实木铝芯电加热地板的面板层选用不同树种板材交错层压而成,在板材材质选择时,要综合考虑材料的热传导性、耐热性、防潮性、热稳定性及环保性等因素(佟锡刚,2005)。复合式实木铝芯电加热地板将通电的发热电缆或电热膜与铝合金芯板组合在一起构成功热芯层,然后将发热芯层嵌入实木复合地板面板层凹槽内,厚度3~5 mm的石棉网作为保温隔热层紧贴在发热芯层下方,以降低发热芯层产生的热量向地表层的损耗,保证电加热地板

的热效率。每一块地板都是一个单独发热体,地板之间通过导线并联连接,最终汇集到总线上(袁全平等,2015;李廷贤等,2006)。

复合式实木铝芯电加热地板的制作工艺为:以高档实木拼板为面板层,经双面砂光定厚为7 mm,以低档单板为底板层,经双面砂光最终定厚为8 mm,面板层底部开深度为4 mm的凹槽,将发热芯层嵌入凹槽内,发热线的接线端头留在地板外部,底板层上部开深度为5 mm的凹槽,将石棉隔热层嵌入凹槽内(杨保铺等,2016),面板层与底板层通过脲醛树脂胶合,后经热压机在高温高压条件下压制,压制完成后经过齐边、表面砂光、开榫等工艺流程,最终加工成企口地板,规格为910 mm×127 mm×15 mm。复合式实木铝芯电加热地板既保持了实木复合地板不易变形、开裂的优点,又具有华贵、独特的装饰性能,其层次结构如图1所示。

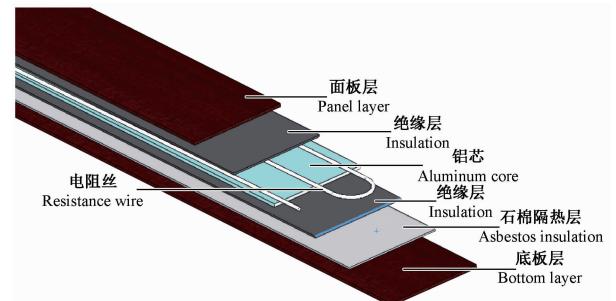


图1 复合式实木铝芯电加热地板的层次结构

Fig. 1 The structure of the composite solid aluminum core electro-thermal floor

建立复合式实木铝芯电加热地板的三维模型,如图2所示,其结构从上到下依次为实木面板层、铝芯散热板、电热膜、石棉网和底板层。根据传导传热公式可知,传热量与铝芯散热板面积呈正比,因此如果传热面积增大,则可使传热量增加。铝芯散热板根据肋化传热的理论依据设计,铝芯板凸出的表面称为肋,有助于增大传热部分面积,各块地板之间通过榫槽连接。

复合式实木铝芯电加热地板通电后,热量通过电热膜传递到铝芯散热板,发热芯层通过散热性良好的铝合金芯板释放热量,热能大部分通过导热方

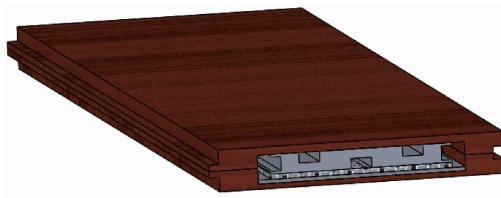


图 2 复合式实木铝芯电加热地板三维建模

Fig. 2 Three-dimensional modeling diagram of composite solid aluminum core electro-thermal floor

式传递到木质地板中,一小部分储存到具有隔热作用的石棉网隔热层中(Seo *et al.*, 2011),木质地板表面主要以辐射和对流方式将热量传递到室内空气中。

## 2 复合式实木铝芯电加热地板传热分析

复合式实木铝芯电加热地板以金属铝和电热膜作为电热媒介,电热膜的发热体是碳纤维银粒子墨石,接通电源后,碳纤维油墨的原子分子间相互激烈振荡撞击产生热能,电热膜以导热方式将热量传递到铝芯散热板,铝芯散热板同样以导热方式将热量传递到面板层,其单位时间传递的热量(陈思婷,2014)为:

$$Q = A\lambda \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\sigma}。 \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为材料导热系数,表明材料的导热能力( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ );  $T_{w1}$  为电热膜的温度( $\text{K}$ );  $T_{w2}$  为铝芯散热板表面的温度( $\text{K}$ );  $\sigma$  为铝芯散热板的厚度( $\text{m}$ );  $A$  为铝芯散热板的散热面积( $\text{m}^2$ )。

电热膜产生的热能通过金属铝板均匀传递到实木复合地板表层,当发热芯层与地板表面温度达到平衡后,电加热地板以整个地板表面为散热面与室内环境通过辐射和对流方式实现热量交换,其中辐射所占比重较大,从而达到采暖目的(牟群英,2007)。

辐射换热传递的热量为:

$$Q = C_n \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A_1。 \quad (2)$$

式中:  $C_n$  为辐射系数;  $T_1, T_2$  为两物体的温度( $\text{K}$ );  $A_1$  为辐射体的辐射表面积( $\text{m}^2$ )。

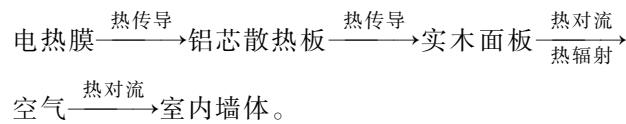
对流换热传递的热量为:

$$Q = h(T_w - T_f)A_2。 \quad (3)$$

式中:  $T_w, T_f$  分别为电加热地板壁面和空气流体的平均温度( $\text{K}$ );  $A_2$  为对流换热面积( $\text{m}^2$ );  $h$  为对流换热系数( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ )。

复合式实木铝芯电加热地板的传热过程可以总

结为:



对电加热地板传热进行分析,需要进一步了解其内部温度分布情况以及通电加热后所能传递的热量情况。理论上,假设厚度为  $L$  的平板,高温侧( $X=0$ )和低温侧( $X=L$ )的表面温度分别为  $T_1, T_2$  并保持不变,平板内的温度被视为只沿  $X$  方向变化的一维问题,那么热量传递也是只沿  $X$  方向一维导热,平板的导热方程是一维( $Y, Z$  方向的微分项为 0)、稳定、无内热源的导热方程式(杨世铭等,1998; 张亮, 2010):

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dt}{dx} \right) = 0。 \quad (4)$$

式(4)表明平板的热流密度不随位置变化,处处相等。当导热系数为常数时,对式(4)进行 2 次积分,可求出平板内温度分布通解:

$$T(x) = C_1x + C_2。 \quad (5)$$

积分常数  $C_1, C_2$  可根据  $X=0$  和  $X=L$  处表面温度的 2 个边界条件得出:

$$\begin{aligned} T(0) &= T_1; \\ T(L) &= T_2。 \end{aligned} \quad (6)$$

最终求得平板的温度分布如下:

$$T(x) = (T_2 - T_1) \frac{x}{L} + T_1。 \quad (7)$$

通过平板的热流密度  $q$  为:

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L}。 \quad (8)$$

因为复合式实木铝芯电加热地板由电加热膜发热层、铝芯散热层、实木面层组成,故所研究的对象属于多层平板。各板材的导热系数不同,将由导热系数不同的多个平板紧密接触构成的多层平板内的导热视为一维导热,平板间无接触热阻,且在实木复合电加热地板各板层之间认为相邻两平板完全接触,接触面上两侧平板的温度和热流密度相等。

将铝芯散热板与实木面板组合的多层平板放置在不同温度( $T_h, T_c$ )的空气流体中,考察其热传递情况。如图 3 所示,平板高温侧的表面传热系数为  $h_h$ , 低温侧的表面传热系数为  $h_c$ , 铝芯散热板的导热系数为  $\lambda_1$ , 实木面板的导热系数为  $\lambda_2$ , 各平板的接触传热面积相同均设为  $A$ , 各平板的表面温分别设为  $T_1, T_2, T_3$ , 可以建立如下热流密度方程组:

$$q = h_h(T_h - T_1); \quad (9)$$

$$q = \lambda_1 \frac{T_1 - T_2}{L_1}; \quad (10)$$

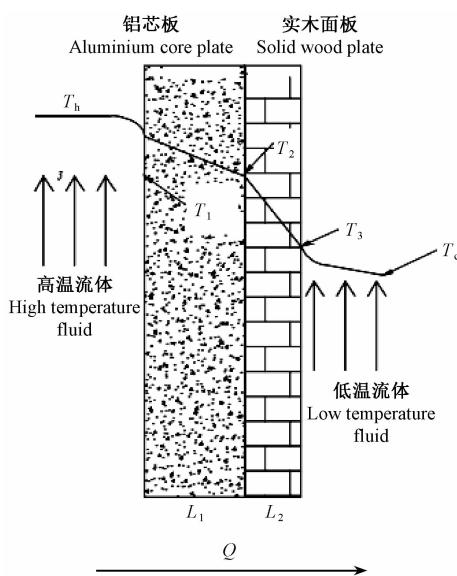


图 3 地板散热情况示意

Fig. 3 Schematic diagram of floor heat dissipation

$$q = \lambda_2 \frac{T_2 - T_3}{L_2}; \quad (11)$$

$$q = h_c(T_3 - T_c). \quad (12)$$

上述方程组中, 消去  $T_1, T_2, T_3$ , 热流密度可用两侧流体温度  $T_h, T_c$  表示为:

表 1 各类材料的属性<sup>①</sup>

Tab. 1 Property sheets of various materials

材料 Material	铝合金 Aluminum alloy	石棉 Asbestos	木地板 Wood floor	加热导线 Heating wire
密度 Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	2 610	900	540	7 820
导热系数 Thermal conductivity/(W·m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	107	0.1	0.166	15.2
比热容 Specific heat/(J·kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	904	816	2 400	460

① 设定加热时长: 100 s; 生热率: 100 W. Set heating time: 100 s; Heat generation rate: 100 W.

上表面综合换热系数 = 对流换热系数 + 辐射换热系数 =  $29.12 + 13.01 = 42.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 下表面辐射换热系数 =  $37.68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (李廷贤等, 2006)。

图 4 所示为利用有限元软件分析未安装铝芯散

$$q = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_h} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_c}}. \quad (13)$$

因此, 传热面积为  $A$  的平板, 传热量  $Q$  为:

$$Q = Aq = \frac{A(T_h - T_c)}{\frac{1}{A}(\frac{1}{h_h} + \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{h_c})} = Ah(T_h - T_c). \quad (14)$$

此时所得的综合传热系数为:

$$\frac{1}{h} = (\frac{1}{h_h} + \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{h_c}). \quad (15)$$

通过式(14)和(15), 可对复合式实木铝芯电加热地板进行热量传递计算。

### 3 复合式实木铝芯电加热地板仿真分析

通过三维建模软件对复合式实木铝芯电加热地板进行建模, 并应用有限元软件对电加热地板的发热和散热情况进行仿真。假设发热芯层的生热情况为均匀生热, 发热芯层至地板表面的热量传递方式为热传导, 地板表面到空气的散热形式为辐射和对流换热。各层材料的属性如表 1 所示。

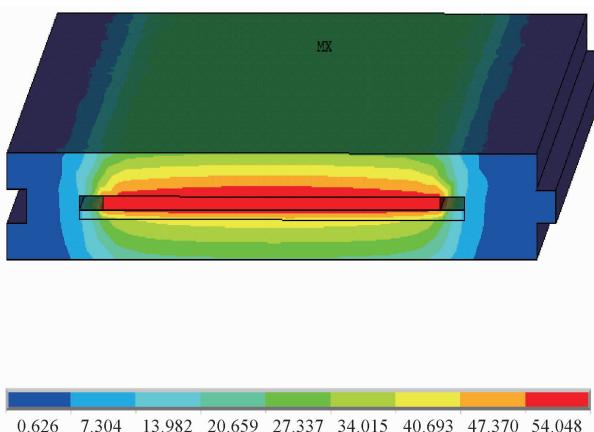
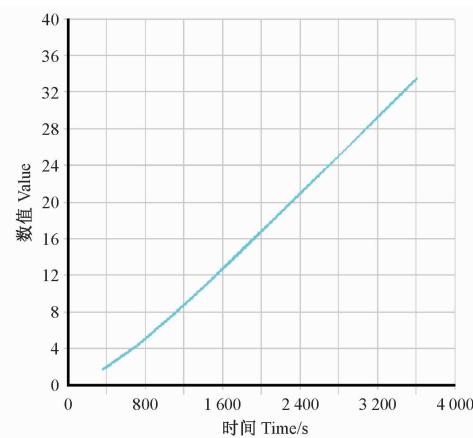


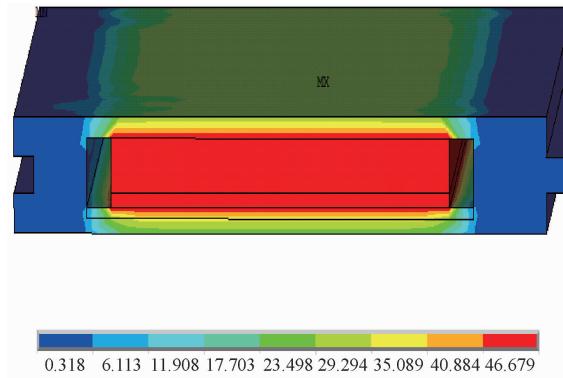
图 4 未安装铝芯散热板的电加热地板散热效果

Fig. 4 Electro-thermal heat floor heat dissipation without aluminum core heating plate



面板接触,电热膜将产生的热量传递到铝芯散热板,进而传递到面板层。

图 6 所示为肋板式铝芯散热结构的辐射电加热



地板散热情况,通过在铝合金芯板上加工凹槽,从而增大散热面积,电热膜将产生的热量传递到肋板式散热板,进而传递到面板层。

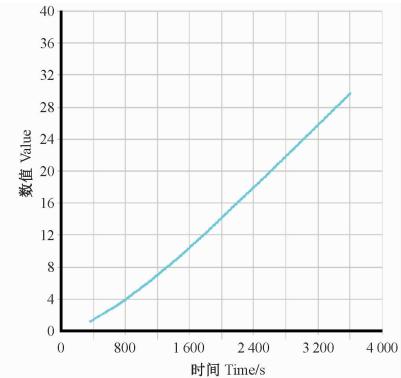


图 5 平板式铝芯散热地板辐射效果

Fig. 5 Radiating effect of plate aluminum core heating floor

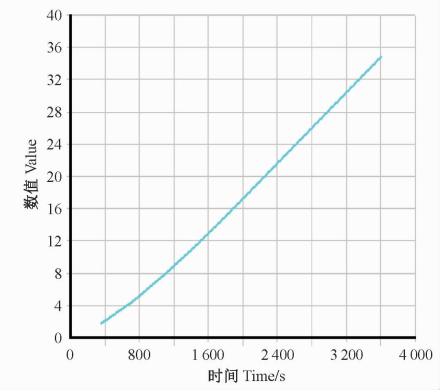
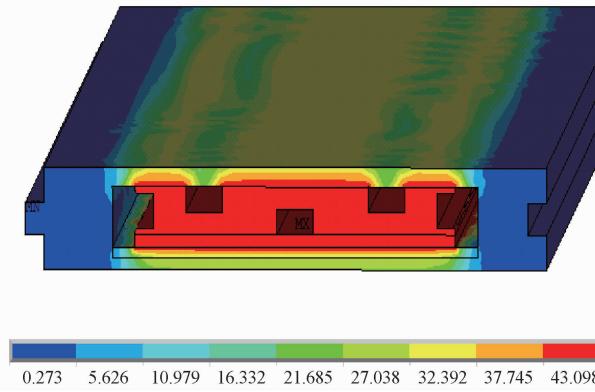


图 6 肋板式铝芯散热地板辐射效果

Fig. 6 Radiating effect of ribbed aluminum core heating floor

从以上 3 组电加热地板的传热仿真结果可以看出,未添加铝芯散热板时,1 h 后地板表面温度为 33.3 °C,但加热层温度高达 60 °C,存在安全隐患;当铝芯散热板为普通平板时,传递热量比较均匀,但由于其结构紧凑,散热效果不佳,1 h 后地板表面温度约为 29.7 °C;肋板式铝芯散热结构的地板表面热量不如平板式均匀,但地板表面温度约为 34.5 °C,且加热层温度最低,降低了安全隐患。综合分析,肋板式铝芯散热结构的电加热地板传热效果最佳,且可以通过多加工肋板结构,使散热板表面凹槽更密集,解决地板表面温度不均匀的问题。

#### 4 结论

1) 未安装铝芯散热板的电加热地板表面温度偏低,且由于未安装铝芯散热板,导致加热层温度高达 60 °C,存在安全隐患。

2) 采用平板式铝芯散热板时,地板表面温度分

布均匀,但由于内部结构较为紧凑,导致传热效果不佳,地板表面温度为 29.7 °C,相对较低。

3) 采用肋板式铝芯散热板时,地板表面有局部温度不均,但不影响电加热地板的供热效果,电加热地板表面温度达 34.5 °C,且加热层温度最低,整体传热效果最佳。

#### 参 考 文 献

- 陈思婷. 2014. 基于相变材料的电加热地板辐射采暖系统实验及模拟研究. 广州: 华南理工大学硕士学位论文.
- (Chen S T. 2014. Experimental and simulative investigation of the electronic radiant floor heating system with phase change materials. Guangzhou: MS thesis of South China University of Technology. [ in Chinese] )
- 杜京武, 张福进, 钱进良, 等. 2002. 高寒地区电采暖供热技术现状. 黑龙江电力, (3): 192–195.
- (Du J W, Zang F J, Qian J L, et al. 2002. Present status of electric heating technology in highly cold areas. Heilongjiang Electric Power, (3): 192–195. [ in Chinese] )
- 方修, 王伟, 施雪华. 2002. 电热膜供暖的舒适性分析. 暖通空

- 调, 32(4): 94–95, 111.  
(Fang X, Wang W, Shi X H. 2002. Thermal comfort analysis of electric heating panels. Hv & Ac, 32(4): 94–95, 111. [in Chinese])
- 韩新彬, 刘慧娟. 2009. 低温地板辐射采暖技术研究现状. 制冷与空调, 23(1): 36–38.  
(Han X B, Liu H J. 2009. The technology of low-temperature floor radiant heating. Refrigeration & Air Condition, 23(1): 36–38. [in Chinese])
- 江 亿, 杨 秀. 2006. 我国建筑能耗状况及建筑节能工作中的问题. 中华建设, (2): 12–18.  
(Jiang Y, Yang X. 2006. The problems in our country's energy consumption and building efficiency. China Construction, (2): 12–18. [in Chinese])
- 李廷贤, 刘艳华. 2004. 地表装饰材料和保温层性能对辐射地板热损影响的数值研究. 暖通空调, 34(11): 19–23.  
(Li T X, Liu Y H. 2004. Numerical simulation on effects of flooring material and insulation on heat loss of radiant floor. Hv & Ac, 34(11): 19–23. [in Chinese])
- 李廷贤, 刘艳华, 董淑萍, 等. 2006. 电加热辐射地板传热特性的实验研究. 建筑热能通风空调, (3): 8–11.  
(Li T X, Liu Y H, Dong S P, et al. 2006. Research on the heat transfer characteristics of an electric heating radiation floor system. Building Energy & Environment, (3): 8–11. [in Chinese])
- 牟群英. 2007. 电加热地板物理性能测试. 安徽农学通报, (5): 165–166, 107.  
(Mou Q Y. 2007. Experimental research on properties of heating floor with thermoelectric film. Anhui Agricultural Science Bulletin, (5): 165–166, 107. [in Chinese])
- 佟锡刚. 2005. 地热地板的选用. 建筑装饰材料世界, (11): 70, 68.  
(Tong X G. 2005. The choice of geothermic floor. Building Decoration Materials World, (11): 70, 68. [in Chinese])
- 杨保铈, 贺绍均, 王 丰, 等. 2016. 杉木集成材薄板制备电加热地板的热工性能. 林业工程学报, 1(1): 46–50.  
(Yang B S, He S J, Wang F, et al. 2016. Thermal performance of electrically heated flooring prepared by thin Chinese fir glulam. Journal of Forestry Engineering, 1(1): 46–50. [in Chinese])
- 杨世铭, 陶文铨. 1998. 传热学. 3 版. 北京: 高等教育出版社.  
(Yang S M, Tao W Q. 1998. Heat transfer. 3rd edition. Beijing: Higher Education Press. [in Chinese])
- 袁全平, 梁善庆, 曾 宇, 等. 2015. 内置电热层电采暖木竹地板技术现状. 林产工业, (8): 6–9, 17.  
(Yuan Q P, Liang S Q, Zeng Y, et al. 2015. Discussion on technology status of electric heating wood and bamboo floor with built-in electrothermal layer. China Forest Products Industry, (8): 6–9, 17. [in Chinese])
- 张 亮. 2010. 不同热源供暖性能的比较与评价研究. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文.  
(Zhang L. 2010. Study on the comparison and valuation of performance between different heat sources for heating. Xi'an: MS thesis of Xi'an University of Architecture and Technology. [in Chinese])
- Seo J, Jeon J, Lee J H, et al. 2011. Thermal performance analysis according to wood flooring structure for energy conservation in radiant floor heating systems. Energy and Buildings, 43(8): 2039–2042.

(责任编辑 石红青)