

研究与开发

小径级杉木制备内置 碳纤维电热线地热地板

阙泽利, 赵晓旭, 李哲瑞, 潘彪, 朱一辛

(南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037)

摘要: 以小径级杉木六棱柱体锯制的层板为芯层和底层,并在芯层内置碳纤维电热线,制备三层结构地热地板,测试在不同电压下地板的导热性能和尺寸稳定性。结果表明:试板经 0.5 h 左右即达到平衡温度,最终可达 30~35 ℃,表面温度分布均匀,电压的提高有助于地板的导热效能,并能够显著提高地板最终平衡温度;组坯方式对地板面层温度及尺寸稳定性均无明显影响,但对传热稳定性有一定影响;长时间加热时地板的尺寸稳定性有待提高。

关键词: 小径木; 杉木; 六棱柱体; 地热地板; 碳纤维电热线

中图分类号: TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2015)04-0009-05

Electrically Heated Flooring Made with Hexagon Glulam from Small-Diameter Chinese Fir

QUE Ze-li, ZHAO Xiao-xu, LI Zhe-rui, PAN Biao, ZHU Yi-xin

(College of Material Science and Engineering, Nanjing Forestry University,
Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: The authors developed a new kind of electrically heated flooring using hexagon glulam made with small-diameter Chinese fir as the core and base the layers with carbon fiber electric heating wires laid between the layers. Heat conductivity and dimensional stability of the flooring were tested. The results showed that the carbon fiber electric heating wires were effective. The peak temperature of the samples could reach 30~35 ℃ in 30 minutes with good temperature uniformity. A higher voltage could increase the peak temperature of the flooring. The flooring assembly method had little effect on the surface temperature and dimensional stability but could affect heat transfer stability.

Key words: small diameter; Chinese fir; hexagon glulam; electrically heated flooring; carbon fiber electric heating wire

杉木速生材的利用一直倍受关注,在小径级杉木六棱柱体制造工艺研究的基础之上^[1-3],笔者对其成果的进一步应用开展了研究,其中包括利用六棱柱体

开发新型地热地板。

目前,国内外研究较多且使用较广泛的地热地板为低温热水地板,通过埋藏于地板下管道内不高于 60 ℃ 的热水为热媒,循环流动加热地板,进行辐射采暖^[4]。该类低温热水地板的热源为隐蔽式,维修难度大,且整体地板结构厚度增加 6~8 cm,增加建筑结

收稿日期: 2015-02-15; 修改日期: 2015-06-04
基金项目: “十二五”国家科技支撑资助项目“低等级木材复合地热地板的研究”(2012BAD24B010204)。
作者简介: 阙泽利(1973—),南京林业大学副教授,博士。

构的负担;另外,室内大件家具也会影响整体式热源的散热^[4-7]。

目前市场上有内置金属电阻线、碳晶片或碳分子发热纸等多种地热地板产品,总体成本偏高,且缺乏有标准依据、相对系统科学的试验研究。

本研究使用碳纤维电热线和六棱柱体杉木为材料,制造一种新型三层结构实木复合地热地板,其基本原理与内置金属电阻线式相同,特点是:

1) 发热元件位于地板内部,缩短了热传导路线,热转换率高,升温快;2) 线路埋藏于龙骨间,质轻便捷,无额外结构负担或空间浪费;3) 自成单元,检修难度低;4) 设备运输方便,尤其适于老房改造;5) 可根据当地气象条件、能源状况等因素,分区供热,且易实现家居电气智能化。

依据目前现行低温水热地板的标准规范,笔者对此新型内置碳纤维电热线地热地板进行了性能测试,旨为自发热式地热地板的设计优化及推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 三层实木复合地板材料:

芯层和底层为小径级杉木(*Cunninghamia lanceolata*)指接六棱柱体集成材,自制,幅面 980 mm×117 mm,厚度 5 mm,密度 0.394 g/cm³,含水率均为 5%~8%。

面层为橡木(*Quercus* spp.)单板,由某企业提供,幅面 980 mm×117 mm,厚度 4 mm,密度 0.695 g/cm³,含水率均为 6%~8%。

2) 碳纤维电热线:平均电阻为 17.2 Ω/m(24 K),市售。

3) 胶黏剂:JD-7810 单组份聚氨酯胶,黏度 6 000~10 000 mPa·s,固体含量 45%,市售。

1.2 试验设计

1) 碳纤维电热线布置:如图 1a 所示,将碳纤维电热线布置于面层与芯层之间,以缩短热传导路径,减少能量损失。在芯层板上开水平线槽,碳纤维电热线由底层穿入芯层,置于线槽中,再由水平面线槽穿入底层,线头尾收于底层背槽中(图 1b),通电对地板表面进行供热。

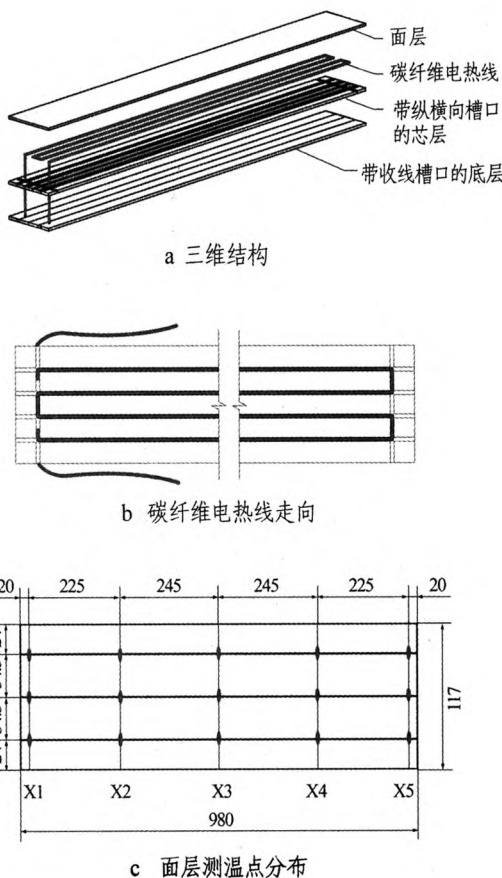


图 1 自发热式地热地板结构及测点分布
Fig. 1 Diagram of electrically heated flooring and temperature measuring points

2) 地板制备:设计了两种组坯方式,即芯层板纹理方向分别为沿着地板长度方向(A型)和垂直长度方向(B型),如图 2 所示。按照开槽、穿线、胶合(施胶冷压 24 h,涂胶量 250 g/m²,压力 8 MPa)的工艺流程制备。每种组坯方式试板各 3 块,分别编号为 A1、A2、A3 和 B1、B2、B3。

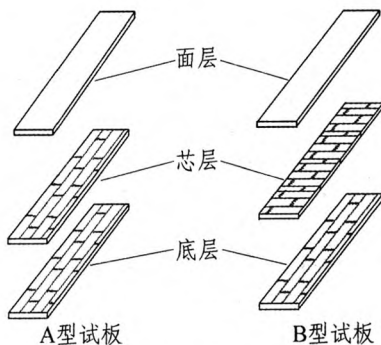


图 2 地板试样组坯方式
Fig. 2 Flooring assembly

4) 地板加热:参考 GB/T 3805-2008《特低电压限值规范》规定的安全电压标准值,设定三组试板的电压:

- 一组(A1、B1):施加 36 V 电压至温度平衡;
- 二组(A2、B2):施加 42 V 电压至温度平衡;
- 三组(A3、B3):施加 42 V 电压 20 h。

1.3 性能检测

1) 导热性能:自发热式地热地板目前暂无标准可循,故参照外加热源类型地热地板标准 LY/T 1700-2007《采暖用木质地板行业标准》测试第 1 组和第 2 组试板的导热性能。

使用手持式红外测温仪,每隔 15 min 检测试板面层和底层的温度,通过板面温度分布及单位时间温度变化情况,评价地板的热学性能。面层共设置 15 个温度检测点,分布如图 1c 所示。底层仅测试其中点的温度。

2) 尺寸稳定性:依照 GB/T 18103-2013《实木复合地板标准》,对第 3 组(A3、B3)试板进行测试。

2 结果及分析

2.1 导热性能

2.1.1 导热效能

导热效能是反映热传导速率的重要指标,以热能向上传递至试板表面,稳定温度与初始温度之差与所用时间的比值来表示,结果如图 3 所示。

图 3 结果显示:

1) A、B 型试板的导热效能均满足 LY/T 1700-2007 对采暖用木质地板温升速率 $\geq 8\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的要求。这是由于热源位于地板内,热能到达面层经过路程短,因而升温速度较快。

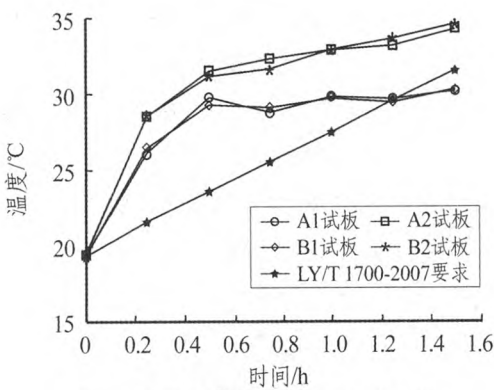


图 3 试板面层加热过程中温度变化
Fig. 3 Surface layer temperature during heating

2) A1 与 B1、A2 与 B2 试板的温度曲线基本重合,说明组坯方式对试板的导热效能无明显影响。

3) 提高电压,即提高对地板的热能输入,并不会对试板的传热速率产生显著提升作用。在本试验两种电压条件下,试板经 0.5~0.75 h 的加热,均可达到温度平衡。

2.1.2 热传递性能

1) 竖向(厚度方向)热传递性能 通过面层与底层之间的温度差来衡量,检测结果列于表 1。

表 1 结果显示:

面层初温与终温大致相当($\leq 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$),表明测试环境温度及试板温度稳定;面层 15 点平均终温均低于中点终温,主要是因为中点落在碳纤维电热线上方,传热路径短,故温度略高。

面、底层中点的终温差大部分为负值,绝对值 $\leq 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明热量传递到试板表面的同时,亦向地板底层传递,并向楼板散失。实际应用中,可以考虑铺设反射膜或选用导热系数更高的木材(如枫木)作面层,以减少热能损失。

表 1 地板面层与底层温度差异

Tab. 1 Temperature difference between surface and back layer of flooring samples / $^{\circ}\text{C}$

编号	面层			底层		面层—底层		面底层终温差	
	初温	终温 ^a	终温 ^b	初温	终温	初温差	终温差	平均值	变异系数/%
A1	19.8	31.5	30.2	19.7	33.0	0.1	-1.5		
A2	19.7	36.7	34.2	19.7	36.0	0	0.7	-0.633	-1.512
A3	19.7	36.4	34.3	19.8	37.5	-0.1	-1.1		
B1	19.7	31.9	30.3	19.6	33.2	0.1	-1.3		
B2	19.9	36.2	34.5	19.8	36.8	0.1	-0.6	-0.867	-0.357
B3	19.9	36.2	35.2	19.8	36.9	0.1	-0.7		

注 a:面层中点温度;注 b:面层 15 个测点的温度平均值。

A 型试板面层与底层终温差的平均值与 B 型相差 $\leq 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明组坯方式对地板竖向(厚度方向)的热传导影响并不明显;但 A 型试板面、底层终温差的变异性略高,说明组坯方式对传热稳定性有影响。可能是因为 B 型试板纵横纹理交错的组坯方式,降低了地板整体各向异性,故传热稳定性较优。

2) 水平向全表面热传递性能 为了更准确地分析温度离散度,采用统计学箱形图进行分析。

前期试验发现,A、B 两种组坯方式地板温度的变化趋势基本一致,且地板长度方向温度变异性较小。以 A1 试板为例,将每隔 15 min 测得的 15 点温度数据按照从大到小排列,取最大值、上四分位数 Q3、中位数、下四分位数 Q1、最小值,绘制温度分布箱形图(图 4)。

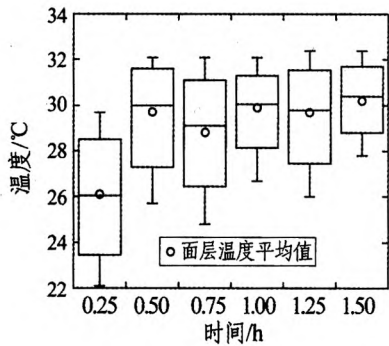


图 4 地板水平面温度分布
Fig. 4 Temperature distribution on floor surface

图 4 显示:板面各点温度 Q3 和 Q1 差距不超过 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大值和最小值差距不超过 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,体现了较好的温度分布均匀性;随着加热时间延长,温度逐渐平衡,板面温度分布均匀度也逐渐提高。

3) 地板宽度方向热传递性能 以 A2 试板为例,分析其宽度方向的温度分布情况。参见图 1c,分别取 Y1X1~Y1X5、Y2X1~Y2X5 和 Y3X1~Y3X5 的三组温度平均值,结果见图 5。

图 5 显示:两边温度较低,是因为宽度方向两边的测试点不在电热线上方,传热路径较远,故温度略低;各测试点中,有两组在电热线上,另一组在电热线连线的中垂线上(距离电阻线最远),均未出现明显的温度偏差,证明温度均匀性较好。

2.1.3 最终温度

在不同电压条件下,两种组坯方式地板终温检测结果,列于表 2。

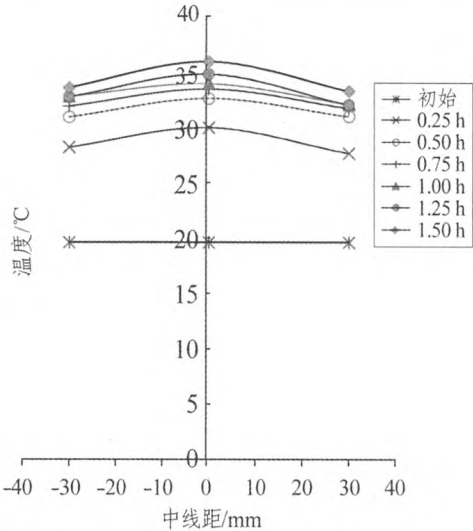


图 5 地板宽度方向的温度分布
Fig. 5 Temperature distribution along flooring width

表 2 试板在不同电压加热条件下的最终温度

试板类型	地板终温/ $^{\circ}\text{C}$	
	36V	42V
A 型	30.2	34.2
B 型	30.3	34.5

表 2 结果显示:最终温度与电压有明显相关性,而不同组坯方式地板的温度差异较小;施加 42 V 电压时,地板终温可以达到 $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,较为适宜。针对市场上现有地热地板一般以 $39\sim 41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为最高温度的设置,可采取加粗碳纤维电热线或贴反射膜等方式,进一步提高地板的最终温度。

2.2 尺寸稳定性

3 组试板加热后的翘曲度见图 6。

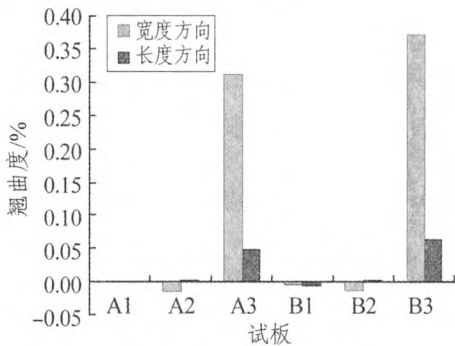


图 6 试板加热前后翘曲度变化
Fig. 6 Flooring deformation before and after heating

图6结果显示:

加热时间短于1.5 h的第1、2组试板,翘曲度变化较小;而持续加热20 h的第3组试板,出现明显翘曲。主要是因为地板结构不对称,加热层离面层较近,面层收缩明显大于底层所致。

试板宽度方向的翘曲比长度方向明显,尤其是顺纹方向组坯的A型试板,是由木材横纹干缩大于顺纹方向所致。

理论上,B3试板芯层木材纹理方向垂直于地板长度方向,试板整体尺寸稳定性应优于A3;而实测结果显示B3的翘曲度更大。说明在本试验条件下,组坯方式对试板的尺寸稳定性无明显影响,其原因有待进一步探究。

3 结论

1) 本试验制备的内置碳纤维电热线地热地板试样的导热效能,满足LY/T 1700-2007的要求,但最终温度有待提高。组坯方式对地板面层温度及尺寸稳定性均无明显影响,但对传热稳定性有一定影响;电压对地板导热效能无显著影响,但和地板最终温度呈正相关。

2) 后续研究中,有待通过调整结构、增加平衡层、表面干燥或炭化,以及在地板表面增加耐磨层等措施,提高地板尺寸稳定性;在实际生产中,可考虑采取间断供热、增加反射层等措施,以降低电压提高安全系数,节约能源。安装使用时,需对电路连接进行设计,以获得最优节能方案。

参考文献:

- [1] 李荣荣,曹平祥,王浩,等.小径级杉木六棱柱体的制材工艺[J].木材工业,2013,27(5):13-16.
- [2] 王浩,曹平祥,范庆平,等.小径级毛方材四边锯的三维实体设计与仿真分析[J].木材工业,2014,28(1):5-9.
- [3] 丁建文,郭晓磊,郝敬东,等.大断面六棱柱胶拼压机的设计[J].木材工业,2014,28(3):5-8.
- [4] 江涛.地采暖用竹木复合地板相关性能研究[D].北京:北京林业大学木材科学与技术,2009.
- [5] 万龙起,黄文学,张兴华,等.地热地板的基本技术性能[J].吉林林业科技,2006,35(3):41,44.
- [6] 梁星宇,李刚,李晓平.地热采暖对地板性能的影响[J].林业科技开发,2006,20(6):31-34.
- [7] 曾珍,王维新.地热地板及其热学常识[J].中国人造板,2005(3):39-40,44.

(责任编辑 向琴)

(上接第8页)

参考文献:

- [1] Iida I, Imamura Y, Kashiwa N, et al. Liquid penetration of precompressed wood (Ⅱ). Effects of thickness and length of specimen on liquid uptake[J]. Wood Preservation, 1992, 18(1): 31-37.
- [2] Iida I, Ikeuchi A, Imamura Y. Liquid penetration of precompressed woods (Ⅲ). Effects of moisture contents of specimens and ambient temperatures while compression on liquid uptakes of softwoods and hardwoods[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1995, 41(9): 811-819.
- [3] Iida I, Mori S, Nakamura Y, et al. Liquid penetration of precompressed wood (Ⅴ). Effects of cyclic loading, type of impregnated chemicals and annual ring angles on liquid uptakes of water or oily solvents[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1996, 42(6): 581-588.
- [4] 酒井温子. 利用压缩法对难渗透木材的液体浸注[J]. 木材工业(日文), 1994, 49(12): 604-609.
- [5] Adachi K, Inoue M, Knayama K, et al. Liquid impregnation of dry wood using a roller-pressing method I. Effect of transverse compressive deformation on liquid impregnation[J]. Mokuzai Gakkaishi, 2003, 49(6): 416-422.

- [6] Adachi K, Inoue M, Kwai S. Liquid impregnation of green wood using a roller-pressing method[J]. Mokuzai Gakkaishi, 2005, 51(3): 159-165.
- [7] 长谷良一, 儿玉顺一. 软质木材高效利用研究(第2报)基于辊压压缩方法的表层压密木材的制备[R]. 岐阜县生活技术研究所研究报告, 2006: 50-57.
- [8] 长谷良一, 儿玉顺一. 软质木材高效利用研究(第2报)基于辊压压缩方法的表层压密木材的应用[R]. 岐阜县生活技术研究所研究报告, 2007: 35-39.
- [9] 吴玉章, 黑须博司, 伊藤贵文. 辊压预处理改善树脂浸注均匀性的研究[J]. 东北林业大学学报, 2005, 33(1): 23-24.
- [10] Norimoto M. Large compressive deformation in wood [J]. Mokuzai Gakkaishi, 1993, 39(8): 867-874.
- [11] Inoue M, Norimoto M. Permanent fixation of compressive deformation in wood by heat treatment[R]. Wood Research and Technical Notes, 1991: 31-40.
- [12] Inoue M, Norimoto M, Otsuka Y, et al. Surface compression of coniferous wood lumber Ⅱ. Permanent set of compression wood by low molecular weight phenolic resin and some physical properties of the products[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1991, 37(3): 227-233.

(责任编辑 向琴)