

重载纤维模塑材料热压成型的水分传递过程

王全亮, 肖生苓, 岳金权, 陆新宗
(东北林业大学, 哈尔滨 150040)

摘要: **目的** 探究各工艺因素(热压温度、热压压力、初始含水率、定量)对重载纤维模塑材料水分传递过程的影响,揭示重载纤维模塑材料热压成型的水分传递机理。**方法** 采用隔层设计测得纤维模塑板坯不同位置的水分变化;引入 t 检验与 F 检验法检验对称位置水分变化曲线的差异。**结果** 热压过程中,水分在重载纤维模塑板坯中对称分布,水分变化可划分为 2 个阶段,即快速下降段(Q 段)和集中汽化段(L 段)。水分梯度主要发生在 L 段,其水分传递依次满足菲克第一定律的稳态扩散和菲克第二定律的非稳态扩散,扩散速率由表及里逐渐减慢。在 Q 段与 L 段,提高热压温度、增大热压压力或减小定量均能加快芯层水分下降速率,初始水分含量对水分下降速率无明显影响。**结论** 热压过程中,重载纤维模塑材料由表及里先后完成干燥。降低初始含水率、提高热压温度、增大热压压力或减小定量均能缩短重载纤维模塑材料的干燥时长。

关键词: 重载; 纤维模塑; 热压成型; 水分传递; 水分分布

中图分类号: TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)09-0096-06

Moisture Transfer Process of Hot-Press Molding of Overloaded Molded Fiber Material

WANG Quan-liang, XIAO Sheng-ling, YUE Jin-quan, LU Xin-zong
(Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of various process factors (hot-press temperature, hot-press pressure, and initial water content and basis weight) on the moisture transfer process of overloaded molded fiber material, and reveal the mechanism of moisture transfer in hot-press molding. The moisture change of molded fiber slab at different positions was measured in the method of interlayer design. The T test and F test methods were introduced to test the difference of water change curves at symmetrical position. During the hot-press process, the moisture content was symmetrically distributed in overloaded molded fiber materials and the moisture change could be divided into 2 stages: the rapid descending section (section Q) and the centralized vaporization section (section L). The moisture gradient mainly occurred in section L and its moisture transfer in turn met the steady state diffusion of Fick's first law and the unsteady state diffusion of Fick's second law. The diffusion rate gradually decreased from the outside to the inside. In sections Q and L, the increased hot-press temperature and pressure or the decreased basis weight could accelerate the descending rate of the moisture content of the core layer. The initial moisture content had no significant effect on the descending rate of moisture content. In hot-press process, the overloaded molded fiber material is dried from the outside to the inside. Reducing initial moisture content, improving hot-press temperature and pressure, or decreasing basis weight can shorten the drying time of overloaded molded fiber material.

KEY WORDS: overloaded; molded fiber; hot-press molding; moisture transfer; water distribution

纤维模塑制品是近几年发展迅猛的新型材料,是塑料和实木材料的优良替代品,广泛应用于包装、物

流等领域。传统纤维模塑制品通常为单面吸滤成型,其最大承载负荷仅为 50 kg 左右,而重载纤维模塑是

收稿日期: 2016-10-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2572016AB69); 国家林业公益性行业科研专项(201304506)

作者简介: 王全亮(1990—),男,东北林业大学博士生,主要研究方向为重载纤维模塑包装材料。

通讯作者: 肖生苓(1961—),女,博士,东北林业大学教授,主要研究方向为农林生物质材料。

指通过异于单面吸滤成型工艺来实现,具有特殊结构形式和较强综合承载能力(2~3 t)的新型模塑制品,可应用于大型、重载机械设备的集合包装或场内搬运等,具有广阔的发展前景。

研究重载纤维模塑热压成型过程中的水分传递,不仅对成型工艺有指导意义,且为成型机理的研究提供理论基础。王东林^[1]在对中密度纤维板水分传递及分布的研究表明,热压过程中,板坯中心含水率始终高于其他层。孙丙虎^[2]等在对木材干燥时水分变化的研究得出,微波干燥到含水率 20%以上时,木材内部水分沿厚度方向移动到表层的速度小于木材表面蒸发的速度,呈现内高外低的含水率梯度。李文军^[3]在对刨花干燥时内部水分迁移的研究中得出,在纤维饱和点以上时,刨花中的自由水和水蒸气分别在毛细张力梯度和蒸汽压力梯度的作用下以渗透流的形式从刨花内部向外迁移。过去对刨花板、木材等的热压水分传递过程研究较多,且多集中在以数值模拟为基础的水分传递分析,误差较大,很难准确描述水分传递过程。文中试验通过采用隔层的办法实现对重载纤维模塑板坯不同位置水分变化的实时监测,通过其质量变化准确测得水分变化,探究不同因素对板坯表层与芯层水分变化的影响,为重载纤维模塑材料成型机理的研究及其成型工艺参数的优化提供理论基础。

1 实验

1.1 材料与设备

主要材料:以打浆度为 40°SR 的废纸板浆为浆料,用抄纸机制得直径为 0.2 m 的不同定量的成型试样,在自动压片机上进行冷压,压力为 2 MPa,冷压时间为 15 min,电热鼓风干燥箱干燥,干燥温度为 105 ℃,制得不同含水率的热压试样。主要设备:ZG-20T 型压片机,东莞市正工机电设备科技有限公司;101-3A 型电热鼓风干燥箱,天津泰斯特仪器有限公司;ZT7-01 型纸样成型器,兴平市中通试验装备有限公司;电子天平(PL4002),上海速展计量仪器有限公司。

1.2 方法

分别在试样上下表面放置不同目数的滤网各 7 层,保证水分能够主要从广域的试样两侧表面溢出。

1.2.1 水分测量手段

采用抄纸机制作不同定量的板坯。整块板坯由等定量的板坯分层铺装构成,层与层之间用纱布隔开,见图 1。试验中,水分快速下降阶段和集中汽化阶段分别每隔 1, 5 min 称量特定层质量,记录整块板坯不同位置的水分变化。试验平行测定 3 次,取试验测

定值的平均值作水分变化曲线。

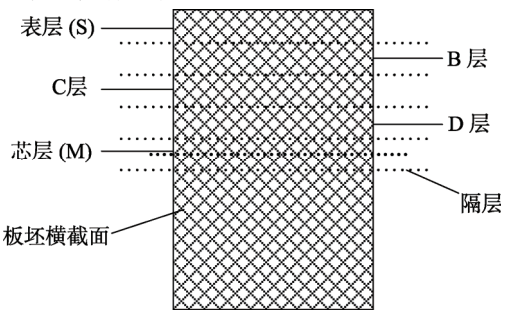


图 1 隔层布置
Fig.1 Interlayer arrangement

1.2.2 设计

文中实验以初始含水率、热压温度、热压压力、定量为影响因素,采用单因素变化设计试验,见表 1,分析各因素对重载纤维模塑材料热压成型水分传递过程的影响。

表 1 试验因素
Tab.1 Experiment factors

试验号	初始含水率/%	热压温度/℃	热压压力/MPa	定量/(g·cm ⁻³)
1	20	150	8	7.2
2	40	150	8	7.2
3	60	150	8	7.2
4	60	110	8	7.2
5	60	190	8	7.2
6	60	150	4	7.2
7	60	150	12	7.2
8	60	150	8	3.6
9	60	150	8	10.8
10	60	150	8	19.2

2 结果与分析

2.1 整体水分分布

重载纤维模塑材料在热压过程中的水分分布及变化对干燥过程与材料性能有重要影响,故以初始含水率 60%的纤维模塑板坯(定量 19.2 kg/m²) 在热压工艺为 150 ℃和 8 MPa 条件下成型为例,分析其水分分布及传递规律。

2.1.1 对称位置

热压过程中压力与汽化作用下可能会影响板坯上下半层的水分分布,因此有必要探究整个板坯在对称位置水分分布是否存在显著性差异,取上下半层比较其水分变化的差异,见图 2。

由图 2 可知,板坯上下对称半层的水分变化曲线

呈现出较好的重叠性。为说明对称半层水分变化曲线是否一致,需检验 2 条曲线之间是否存在显著性差异,即检验残差、截距和斜率 3 项。文中使用 R 软件对上下半层水分变化曲线的差作均值为 0 的 t 检验,其 P 值为 0.1594,远大于 0.05,即该均值为 0 的检验无显著性差异。用 SPSS 软件对上下半层的 2 条水分变化曲线作协方差分析检验截距和斜率差异^[4-6],得到 P 值分别为 0.539 和 0.849,均大于 0.05,即认为回归模型的斜率与截距均无显著性差异。可认为板坯在上下半层对称位置的水分变化曲线无显著性差异,即水分分布及其变化具有对称性。

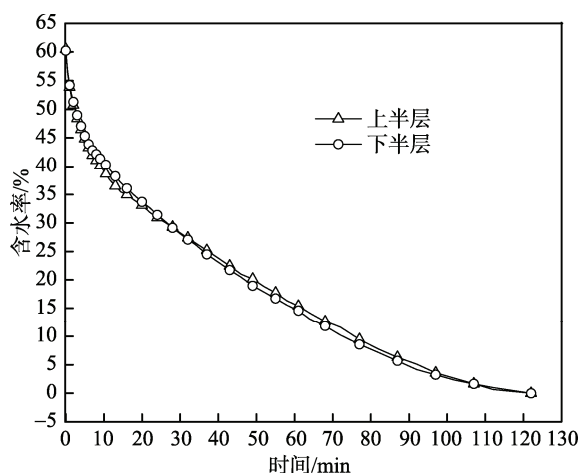


图2 上下半层水分变化曲线

Fig.2 Water change curve of upper and lower layers

2.1.2 隔层对水分传递的影响

板坯中隔层的存在会导致水分在不同界面与介质间传递,影响其传输速率。文中试验以板坯中有无隔层为例,探究隔层对水分传递的影响,见图 3。用 t 检验法作水分变化曲线差的均值分析, P 值为 0.249; F 检验法作水分变化曲线斜率与截距的协方差分析, P 值分别为 0.066 和 0.74。 P 值均大于 0.05,可认为板坯隔层对水分传递无显著性影响。

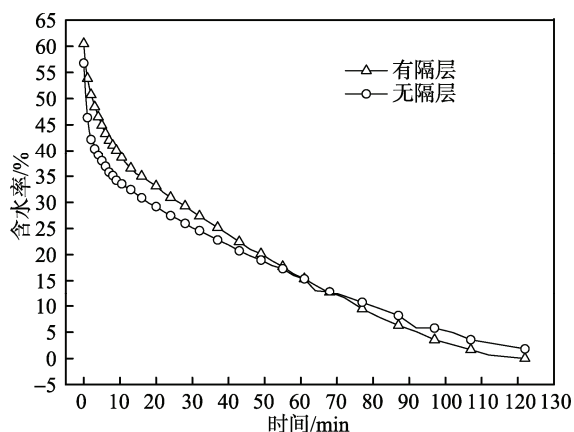


图3 水分变化曲线

Fig.3 Water change curve

2.1.3 传递规律

通过上述分析可知,隔层对水分传递无显著性影响,且板坯在对称位置的水分变化无显著性差异,因此半层板坯的水分分布及变化可以表征整块板坯水分变化情况,见图 4。由图 4a 可知,在热压过程中,板坯各层水分含量随时间逐渐下降,大体可分为快速下降阶段(Q 段)和水分集中汽化阶段(L 段)。热压板闭合后,板坯中自由水在强压力下以热水形式脱出,板坯各层水分迅速下降,即形成 Q 段;板坯温度快速上升,水分汽化加速,气体逸出通道由表层至里层逐渐变长,致使 Q 段维持时间相应变长^[1]。当板坯中自由水以热水形式脱出结束后,板坯中温度梯度开始由表及里逐渐形成,且焓变温度不变,液态水发生相变变成水蒸气,汽化速率由表层至里层依次减慢,进入水分集中汽化阶段,即形成 L 段^[7]。

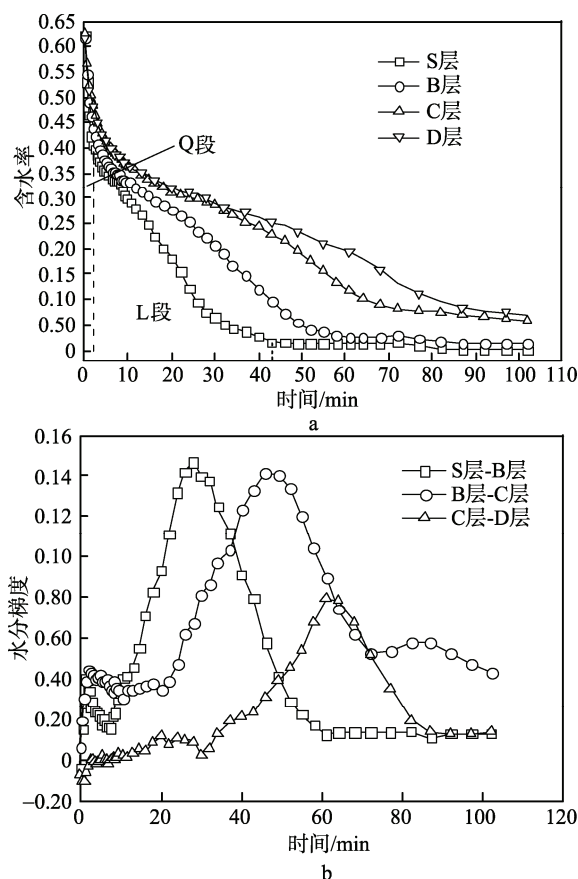


图4 水分分布及梯度变化曲线

Fig.4 Curves of water distribution and gradient change

在热压的集中汽化阶段,水蒸气在板坯中主要以分子扩散的方式进行,而水分梯度对水蒸气扩散具有重要影响^[8]。由图 4b 可知,在集中汽化段水分梯度的首个峰值出现之前,水分梯度由表层至内层逐渐降低。在 L 段初期的一小段时间内,各层温度差异以及水分浓度变化较小,可看作稳态扩散过程,即扩散系数一定。根据菲克第一定律:

$$j_d = -D \frac{dc}{dx}$$

式中： j_d 为扩散通量(kg/(m²·s))； D 为扩散系数(m²/s)； c 为水分质量浓度(kg/m³)； dc/dx 为水分梯度。扩散流 j_d 正比于流动方向上的浓度梯度^[8]，可知此时扩散速率由表层至里层逐渐减慢。

随着水分扩散的进行，水分梯度不再维持由表层至里层逐渐降低的趋势，而是外层水分梯度降低，里层依次出现了梯度峰值。这时，虽然外层水分梯度变小，但因其含水率及温度相对于内层发生很大变化，使其扩散系数发生较大变化^[9-11]，此时，整块板坯的水分扩散就不能再看作稳态扩散过程。对于非稳态扩散过程，菲克第二定律指出，在距离 S 处，浓度随时间的变化率等于该处的扩散通量随距离变化率的负值^[12-13]，即：

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial S} \left(D \frac{\partial c}{\partial S} \right)$$

式中： t 为扩散时间(s)； S 为扩散距离(m)。

在 L 段，各层浓度随时间的变化率是定值，故每层的扩散通量随距离的变化率也是定值，又因为各层浓度随时间的变化率由表及里逐渐减小，故扩散通量由表及里逐渐减小，即在 L 段，表层扩散速率最快，里层最慢。

2.2 不同因素对表层与芯层水分变化的影响

在不同的板坯参数（初始含水率和定量）与热压参数（热压温度和压力）下，表层与芯层的水分变化不同。同时，纤维模塑板坯水分呈梯度分布，芯层最后完成干燥。为分析各因素对与芯层水分变化的影响，以含水率为因变量，时间为自变量，利用 R 软件对芯层水分变化曲线的 Q 段与 L 段作线性回归^[14]，并对其回归方程作参数检验（ t 检验法）与残差检验（ F 检验法），见表 2，其中回归模型自变量系数的绝对值表示水分下降速率，实验得到的参数检验和残差检验的 P 值均小于 0.05。

2.2.1 初始含水率

不同初始含水率的水分变化曲线见图 5。当初始含水率为 20%与 40%时，表层与芯层均无 Q 段出现，说明水分没有明显的机械挤出。初始含水率增加，芯层 L 段水分下降速率无明显变化，表层与芯层完全干燥（含水率为 8%）^[15]所需的时长增加，且芯层滞后于表层的干燥时长也增加。

2.2.2 热压温度

不同热压温度的水分变化曲线见图 6。热压温度增加，芯层 Q 段的水分下降速率有小幅度的增加，而 L 段的水分下降速率显著增加。这是因为高

的热压温度加速水分集中汽化，故 L 段水分下降明显。热压温度增加，表层与芯层完全干燥的时长减小，芯层滞后于表层的干燥时长缩短。

表 2 芯层含水率变化的建模结果
Tab.2 Modeling results of water content variation in core layer

试验号	阶段	回归模型
1	L	$Y=21.586\ 28-1.383\ 08X$
2	L	$Y=38.603\ 95-1.505\ 42X$
3	Q	$Y=61.002-11.386X$
4	L	$Y=40.999\ 28-1.105\ 67X$
5	Q	$Y=56.851-9.856X$
6	L	$Y=33.615\ 155-0.418\ 247X$
7	Q	$Y=59.631-11.508X$
8	L	$Y=41.406\ 11-1.978\ 63X$
9	Q	$Y=61.6633-5.0259X$
6	L	$Y=47.411\ 29-1.051\ 64X$
7	Q	$Y=60.950-17.766X$
8	L	$Y=39.888\ 28-1.916\ 76X$
9	Q	$Y=59.773-26.242X$
8	L	$Y=35.9793-2.1979X$
9	Q	$Y=58.1973-8.9096X$
9	L	$Y=39.186\ 34-0.849\ 82X$

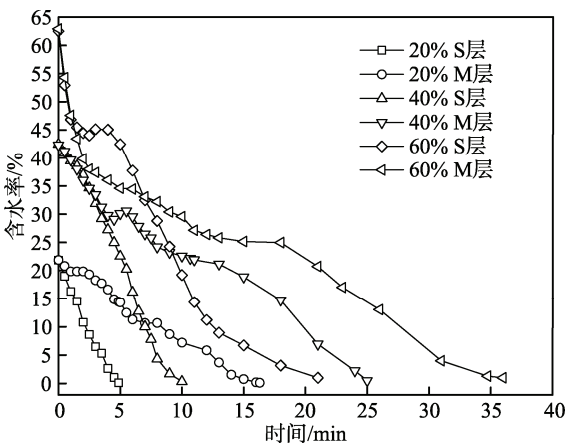


图 5 不同初始含水率的水分变化曲线
Fig.5 Curves of water change with different initial water contents

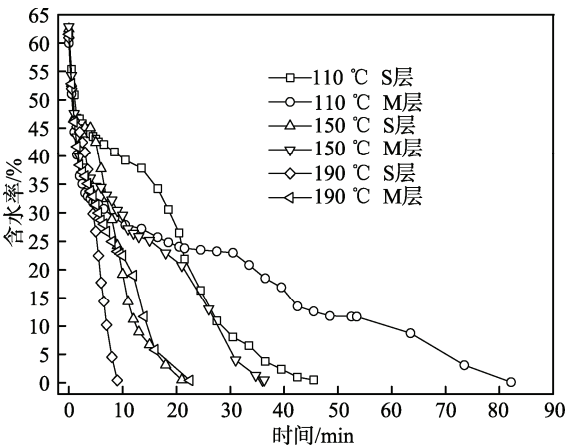


图 6 不同热压温度的水分变化曲线
Fig.6 Curves of water change at different hot-press temperatures

2.2.3 热压压力

不同热压压力的水分变化曲线见图7。热压压力增加,芯层Q段的水分下降速率显著增加,L段的水分下降速率有小幅增加。这是因为高的热压压力有利于自由水的机械挤出,故Q段水分下降明显。热压压力增加,表层与芯层完全干燥的时长减小,芯层滞后于表层的干燥时长缩短。

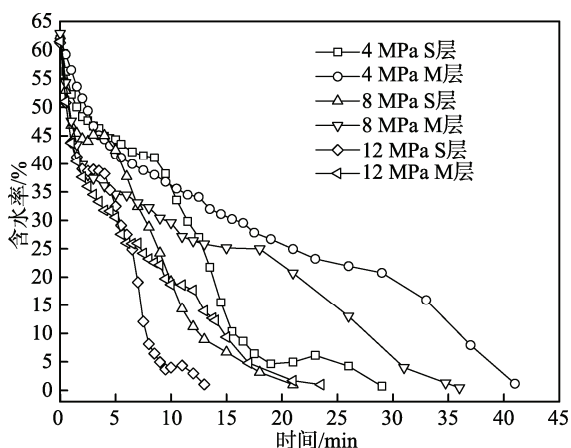


图7 不同热压压力的水分变化曲线
Fig.7 Curves of water change under different hot-press pressures

2.2.4 定量

不同定量的水分变化曲线见图8。定量增加,芯层Q段与L段的水分下降速率均明显降低。定量增加,传递到芯层的机械力减弱,水分溢出通道延长,芯层水分梯度降低,故Q段与L段的水分下降速率减慢。定量增加,表层与芯层完全干燥的时长增加,芯层滞后于表层的干燥时长增加。

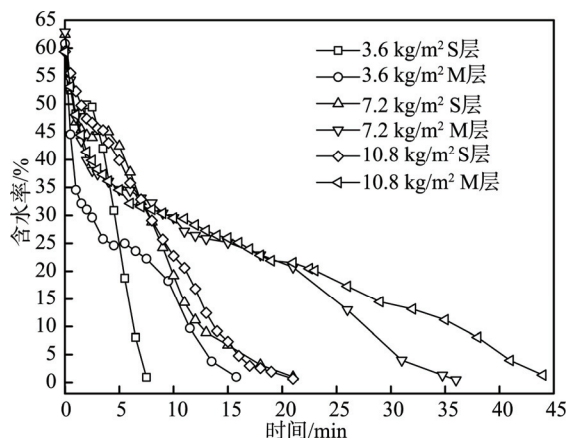


图8 不同定量的水分变化曲线
Fig.8 Curves of water change with different basis weights

3 结语

热压过程中,水分在重载纤维模塑板坯中对称分

布,水分含量由内向外依次降低,水分变化划分为2个阶段,即快速下降段和集中汽化段。水分梯度主要发生在集中汽化段,其水分传递依次满足菲克第一定律的稳态扩散和菲克第二定律的非稳态扩散,里层水分传递滞后于表层,且水分扩散速率由表及里逐渐变慢。在快速下降段和集中汽化段,提高热压温度、增大热压压力或减小定量均能加快芯层水分下降速率,初始含水率对芯层水分下降速率无明显影响。降低初始含水率、提高热压温度、增大热压压力或减小定量,均能缩短芯层的干燥时间。

参考文献:

- [1] 王东林. 中密度纤维板热压智能控制系统的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
WANG Dong-lin. Study on Intelligent Controlled System of Hot-Pressing for Medium-density Fiberboard's Production[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [2] 孙丙虎, 王喜明. 利用低场核磁共振技术研究木材微波干燥过程中的水分状态与迁移[J]. 内蒙古农业大学学报, 2012, 33(3): 205—210.
SUN Bing-hu, WANG Xi-ming. Research on the Moisture Rate and Mobility in Wood during Microwave Drying by Lf-Nmr[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2012, 33(3): 205—210.
- [3] 李文军. 刨花对流干燥特性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
LI Wen-jun. The Characteristics of Wood Particle Drying with Convection[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005.
- [4] 白震, 曹伟. 联系数学与 t 检验在差异显著性检验中的比较研究[J]. 福建体育科技, 2005, 24(5): 11—13.
BAI Zhen, CAO Wei. Contact Mathematics and t Examination Obviously Examine the Inside's Comparison Research in the Difference[J]. Fujian Sports Science and Technology, 2005, 24(5): 11—13.
- [5] 钱晓华, 张伟民. 浙江省医院常规化学室间质量评价不同方法学间测定结果的比较分析[J]. 浙江检验医学, 2006, 24(5): 448—451.
QIAN Xiao-hua, ZHANG Wei-min. Zhejiang Province Hospital Quality Evaluation between Conventional Chemical Room the Determination Results of the Comparative Analysis between Different Methodology[J]. Jiangxi Journal of Medical Laboratory Sciences, 2006, 24(5): 448—451.
- [6] 赵猛, 府伟灵, 陈鸣, 等. 压电凝血反应频率指数衰减规律及最大曲率终点法的研究[J]. 第三军医大学学报, 2006, 28(4): 311—314.
ZHAO Meng, FU Wei-ling, CHEN Ming, et al. Exponential Decay Regularity of Frequency and Endpoint Determination by Maxmi Al-curvature in Piezoelectric

- Coagulation[J]. *Acta Academiae Medicinae Militaris Tertiae*, 2006, 28(4): 311—314.
- [7] 吴娟, 于志明, 陈天全. 大片刨花板热压的传热过程[J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(2): 92—95.
WU Juan, YU Zhi-ming, CHEN Tian-quan. Heat-transfer Process during Hot-pressing of Flakeboard[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(2): 92—95.
- [8] 施静波. 中密度纤维板热压传热传质模型[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
SHI Jing-bo. Heat and Mass Transfer Hot-Pressing Model of Medium Density Fiber Board[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [9] KAYA A, AYDIN O, DEMIRTAŞ C. Drying Kinetics of Red Delicious Apple[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 96(4): 517—524.
- [10] QU L, ZHAO N, ZHAO H J, et al. In Situ Study of the Real-Time Growth Behavior of Cu_6Sn_5 , at the Sn/Cu Interface during the Soldering Reaction[J]. *Scripta Materialia*, 2014(2): 43—46.
- [11] PAN Y A, LEI P, ZHANG H, et al. Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, during the Initial Impoundment Period[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5): 27—34.
- [12] 邓健超, 陈复明, 王戈, 等. 竹束单板层积材的吸湿性能[J]. *南京林业大学学报*, 2014(2): 1—5.
DENG Jian-chao, CHEN Fu-ming, WANG Ge, et al. Research on Hygroscopicity of Laminated Bamboo-Bundle Veneer Lumber[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2014(2): 1—5.
- [13] HE Z B, ZHAO Z J, FEI Y, et al. Effect of Ultrasound Pretreatment on Wood Prior to Vacuum Drying[J]. *Maderas Ciencia Y Tecnologia*, 2014, 16(1): 395—402.
- [14] 杨姗姗, 王松会, 宋东东. 基于回归分析的研究及 R 语言实现[J]. *电子科技*, 2015, 28(10): 186—188.
YANG Shan-shan, WANG Song-hui, SONG Dong-dong. Research Based on Linear Regression and Realization of R Language[J]. *Electronic Science and Technology*, 2015, 28(10): 186—188.
- [15] 石魁, 赵越. 热风炉干燥机在中密度板生产中的应用与研究[J]. *林业机械与木工设备*, 2002, 30(8): 10—13.
SHI Kui, ZHAO Yue. Application and Research of Hot Air Drying Machine in Medium Density Board Production[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2002, 30(8): 10—13.