

# 温室型太阳能-除湿干燥室干燥杨木单板的试验研究

张新宇, 丁宇, 张静, 储德淼, 母军

(北京林业大学材料科学与技术学院; 木质材料科学与应用教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 利用温室型太阳能-除湿干燥室, 采用开式模式、闭式模式和组合模式干燥, 分析干燥速率、能耗及干燥模式对杨木单板质量的影响。结果表明: 本试验条件下, 空窑或闭式模式室内温度高于室外 23~27 °C; 初含水率 99.21% 的单板预干至 30%, 闭式模式耗时 3 h, 干燥速率为 21.39 %/h, 耗电量为 5.56 kW·h/m<sup>3</sup>; 当含水率由 30% 降至 12% 左右, 闭式、开式模式干燥分别耗时 1、3 h, 对应的干燥速率为 16.56 %/h、5.70 %/h。闭式模式借助除湿机在排出水分的同时回收热量, 缩短了干燥时间, 相比于组合模式可降低干燥能耗。

**关键词:** 温室型太阳能-除湿干燥室; 杨木单板; 干燥工艺; 干燥能耗

中图分类号: S781.71; S792.117; TS653.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654 (2020) 04-0013-04

## Experimental Study on Poplar Veneer Drying Using a Greenhouse Solar-dehumidification Drying Chamber

ZHANG Xin-yu, DING Yu, ZHANG Jing, CHU De-miao, MU Jun

(College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University;

Key Laboratory of Wood Materials Science and Application of Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Using a greenhouse solar-dehumidification drying chamber at various modes, including open-mode, closed-mode and combined-mode, the drying process, the drying rate, the energy consumption and the quality of poplar veneer were evaluated. The results showed that under the conditions, at the air-dry kiln or closed-mode, the indoor temperature was about 23~27 °C higher than the outdoor temperature. When the veneer with an initial moisture content of 99.21% was pre-dried to 30%, the closed-mode drying took 3 h, and the drying rate was 21.39%/h, the energy consumption was 5.56 kW·h/m<sup>3</sup>. When the moisture content of veneer was reduced from 30% to about 12%, the closed-mode and open-mode drying process took 1 h and 3 h respectively, with corresponding drying rate of 16.56%/h and 5.7%/h. The closed-mode used the dehumidifier to recover heat while discharging water, which shortens the drying time. Compared with the combined mode, it can also reduce drying energy consumption.

**Key words:** greenhouse solar-dehumidification drying chamber; Poplar veneer; drying process; drying energy consumption

收稿日期: 2019-05-24; 修改日期: 2020-06-03

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划重点专项子课题“桉杨木单板太阳能预干协同干燥技术”(2016YFD0600701)。

作者简介: 张新宇 (1993—), 女, 硕士研究生。Email: 1536350257@qq.com

责任作者: 母军, 女, 教授。Email: mujun@bjfu.edu.cn

在胶合板生产成本中, 能耗成本占约 25%, 其中单板干燥热能消耗占胶合板生产全部能耗的 75% 以上<sup>[1-2]</sup>。我国胶合板生产企业以中小型居多, 生产管理水平、设备及工艺落后, 生产过程中的热能及电能损耗较大, 热能利用效率与发达国家相比存在

较大的差距<sup>[3]</sup>。节能降耗对企业具有现实意义。

我国太阳能资源丰富,国土面积 2/3 以上地区的年辐射总量达 4 500 MJ/m<sup>2</sup> 以上<sup>[4]</sup>。全年照射面积的太阳能相当于目前全年的煤、石油、天然气、柴草等全部常规能源能量的 2 000 多倍<sup>[5]</sup>。太阳能是一种间歇性能源,实际使用过程中需与其他能源进行联合干燥<sup>[6-7]</sup>。太阳能干燥室一般可分为温室型和集热器型两大类,其中温室型太阳能干燥室构造简单、成本低、管理方便且应用广泛。本研究探究温室型太阳能-除湿干燥室的不同干燥模式对单板干燥速率、质量和能耗的影响,以提高太阳能-除湿干燥方法在单板干燥中的应用效率,为胶合板生产节能降耗提供技术支持。

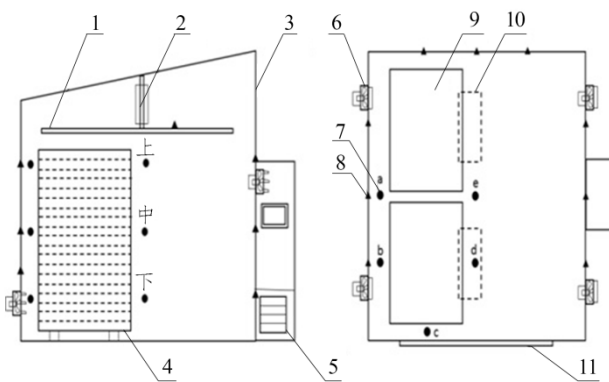
## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

毛白杨(*Populus tomentosa*)单板:购于山东潍坊临朐县,初含水率约 99.2%,幅面为 1 300 mm×650 mm×1.8 mm。

### 1.2 试验装置

温室型太阳能-除湿干燥室如图 1 所示。



1—挡风板; 2、10—风机; 3—PC板; 4、9—材车;  
5—除湿机; 6—换气扇; 7—风速测定点 a-e;  
8—温度测定点; 11—干燥室门口

图 1 太阳能-除湿干燥室结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the solar-dehumidification drying chamber

窑内尺寸:前端高 2 540 mm,后端高 2 550 mm,长度 4 170 mm,宽度 2 930 mm。除后墙板外,均采用 10 mm 厚的聚碳酸酯板(polycarbonate board,简称 PC 板)进行构建。干燥室透光与隔热性能良好,通过吸收太阳光热量加热室内空气,并在风机作用下进行对流换热。顶部两台风机正反转交换时间为 30 min,功率为 1 100 W。温度传感器用于在线监测干燥室内外温度。除湿机功率为 2 800 W,四台换气扇(功率 30 W/台)。

称 PC 板)进行构建。干燥室透光与隔热性能良好,通过吸收太阳光热量加热室内空气,并在风机作用下进行对流换热。顶部两台风机正反转交换时间为 30 min,功率为 1 100 W。温度传感器用于在线监测干燥室内外温度。除湿机功率为 2 800 W,四台换气扇(功率 30 W/台)。

### 1.3 试验方法

试验地点:山东省潍坊市临朐县,潍坊富顺节能科技有限公司。试验日期为 2018 年 7 月 20 日—8 月 1 日,于每日上午 9:00 开始。

干燥室配置 2 个材车,每车可装载 60 张单板。干燥过程采用称质量法测得单板含水率变化。单板测得初始质量后,码放于材车的上、中、下部位;每个材车三个部位均设置三块重复,测试后取平均值。设置三种干燥模式。

1) 闭式模式:为快速降低干燥初期干燥室内湿度,关闭进出风口,使用除湿机进行除湿干燥。每隔 1h 取出单板称质量。

2) 开式模式:打开干燥室两个进气口和两个排气口,将新鲜空气引入室内并排出湿空气,以降低干燥室内湿度。每隔 1.5 h 取出单板称质量。

3) 组合模式:先进行闭式模式干燥 3 h,每隔 1h 取出单板称质量;再进行开式模式干燥,每隔 1.5 h 取出单板称质量。

同时以大气干燥单板为对照组。将装载单板的材车置于干燥窑外进行大气干燥,每隔 1.5 h 取出单板称质量。

### 1.4 检测方法

1) 干燥室工况 采用太阳能辐射仪对太阳辐射热量进行监测,采用 16 路 XSL-1002V0 温度巡检仪,监控记录干燥室在三种干燥模式及空窑状态(进出风口及除湿机关闭,顶风机打开)时的温度。

2) 干燥速率 干燥过程中根据单板含水率的变化进行干燥速率的测定。

$$R=100(MC_{i-1}-MC_i)/t \quad (1)$$

式中:R—干燥速率,%;  $MC_{i-1}$ —第  $(i-1)$  次测量时单板含水率,%;  $MC_i$ —第  $i$  次测量时单板含水率,%;  $t$ —干燥时间间隔, h。

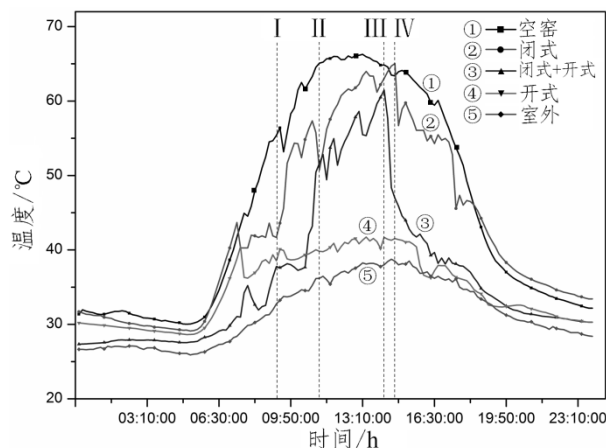
3) 干燥质量 单板的干缩率、翘曲度、开裂、含水率均匀性等,按照参考文献<sup>[8-9]</sup>的方法进行检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 太阳能干燥室工况

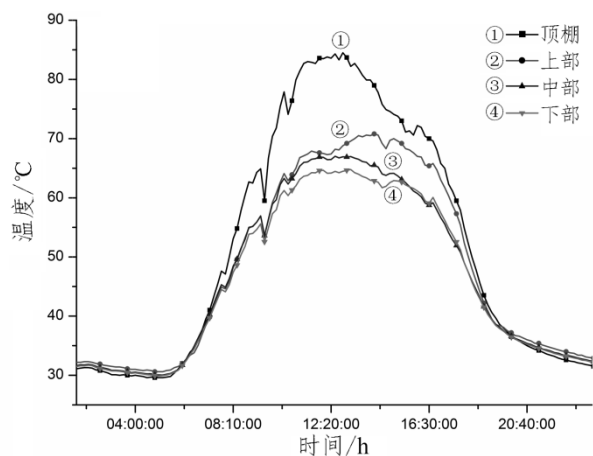
为对比不同干燥模式对单板干燥的影响,记录太阳能干燥室在空窑状态,以及闭式、开式、组合模式干燥工艺下的温度变化。

1) 空窑状态: 由图 2a 可知,空窑时最高温度为 66.28 °C,比室外高出 27.53 °C,平均温度 64.3 °C,说明 PC 板能在一定程度上实现保温的功能,但在达到一定的温度时不再上升,这是干燥室内外环境热交换达到动态平衡所致。风机运转使得干燥室内热空气对流,但不同位置的温度依然存在差异。由图 2b 可知,材车高度方向上的温度分布呈现由高到低变化趋势: 上部>中部>下部。



I—闭式模式干燥开始时间; II—组合模式干燥开始时间;  
III—闭式转开式的干燥时间; IV—除湿机关闭时间。

a 不同干燥模式



b 空窑时不同干燥位置的温度

图2 空窑及3种干燥模式下太阳能干燥室内的温度变化

Fig.2 Temperature changes of solar drying kiln at the empty kiln condition and 3 drying modes

2) 闭式干燥模式: 开启除湿机,除湿机工况参数为目标温度 50 °C,目标相对湿度为 45%~50%。窑内最高温度达 62 °C,平均温度 56.6 °C。

3) 开式干燥模式: 干燥过程中换气扇不断引入新鲜空气,致使窑内热量散失,室内温度偏低,仅比室外温度高 3~4 °C,平均温度 40.1 °C,在一定程度上延长了干燥时间。

4) 组合干燥模式: 闭式模式干燥 3 h 后,转换为开式模式,换气扇将新鲜空气引入干燥室内,平均温度 46.6 °C,与空窑状态相比下降约 20 °C。

干燥室运行三种干燥模式时平均温度依次为: 闭式模式>组合模式>开式模式。图 2a 显示,干燥室在吸收外界热量以及除湿机供给热量情况下,温度可达 55~62 °C,并且热空气在顶风机作用下,加快与单板之间的对流换热,促使水分蒸发速率加快。

### 2.2 单板干燥速率和质量

干燥过程中单板含水率和干燥速率曲线,如图 3 所示;干燥质量检测结果列于表 1。

由图 3 可知,干燥前期单板需预热过程,故干燥速率逐渐升高。随着细胞腔和细胞间隙中自由水的散失,含水率降至纤维饱和点 30%附近,主要是与细胞壁呈氢键结合的吸着水开始散失,水分散失所受束缚力增大,散失缓慢,干燥速率降低。

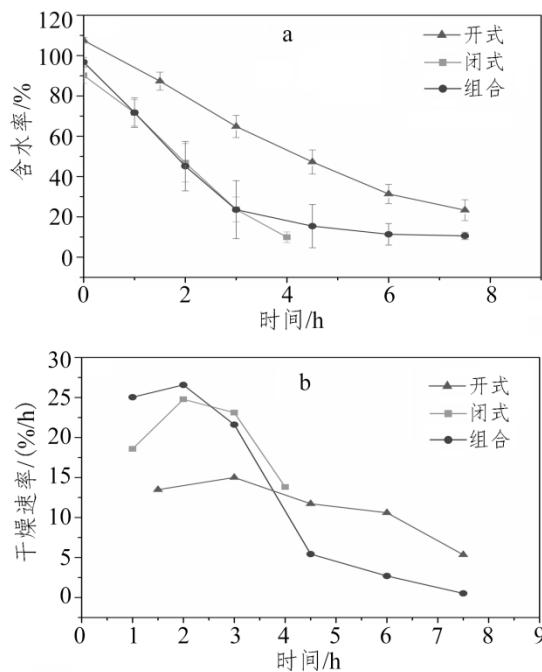


图3 不同干燥模式的单板干燥曲线

Fig.3 Drying curves for veneers at various drying process

表1 不同干燥工艺下单板干燥质量  
Tab.1 Drying properties of veneers at various drying processes

| 干燥模式 | 材车部位 | 翘曲度/% | 横纹干缩率/% | 开裂/mm | 平均含水率/% | 终含水率/% | 干燥时间/h |
|------|------|-------|---------|-------|---------|--------|--------|
| 闭式   | 上    | 7.50  | 4.84    | 14.50 | 6.40    |        |        |
|      | 中    | 6.57  | 4.98    | 14.50 | 9.27    | 9.69   | 4.0    |
|      | 下    | 5.82  | 4.31    | 18.75 | 13.41   |        |        |
| 开式   | 上    | 4.30  | 3.29    | 18.50 | 18.41   |        |        |
|      | 中    | 4.00  | 3.46    | 6.00  | 18.47   | 17.95  | 7.5    |
|      | 下    | 4.29  | 4.08    | 10.00 | 16.96   |        |        |
| 组合   | 上    | 5.62  | 4.08    | 15.25 | 8.50    |        |        |
|      | 中    | 4.88  | 4.13    | 11.50 | 13.40   | 10.99  | 7.5    |
|      | 下    | 3.76  | 4.29    | 15.25 | 11.08   |        |        |
| 大气干燥 |      | 7.20  | 4.04    | 4.00  | 19.55   | 19.55  | 9.0    |

在闭式模式与开式模式工艺下,单板由初始含水率预干至纤维饱和点耗时分别为 3、6 h,干燥速率为 21.39 %/h、13.11 %/h;当单板含水率由 30%降至 12%左右时,闭式、开式模式分别耗时 1、3 h,对应的干燥速率为 16.56 %/h、5.70 %/h。闭式模式与组合模式相比,除湿机干燥时干燥介质温度越高,水分移动速度越快。

图 4a 显示在材车高度方向上,单板含水率由小到大依次为上部>中部>下部。由闭式转换为开式后,打开换气扇向干燥室内引入新鲜空气,使得干燥室下部风速增大,进而促使材车下部单板干燥速率加快,大于中上部干燥速率。

观察干燥室温度变化曲线可知,闭式模式干燥时温度高、湿度小,干燥速率快。但由于单板边部水分蒸发速率快,使得单板边部出现开裂及翘曲变形的情况。由表 1 数据可知,闭式干燥模式下单板最大开裂长度为 18.75mm,翘曲度达 7.5%。此模式下干燥室内温度及风速分布为上部大于中、下部,对比表 1 中不同材车部位可知,闭式模式材车上部单板含水率为 6.4%,低于中部单板含水率(9.27%)、下部单板含水率(13.41%)。

对于组合干燥模式,后期开式循环时,新鲜空气由干燥室下部进气口进入,材车下部风速增加,加速了单板水分的蒸发,干燥完成后下部含水率为 11.08%,低于材车中部单板含水率。开式循环时,

由于新鲜空气的引入使得干燥室内温度降低,造成单板含水率下降缓慢,达到开式模式相同终含水率所需时间有所延长。

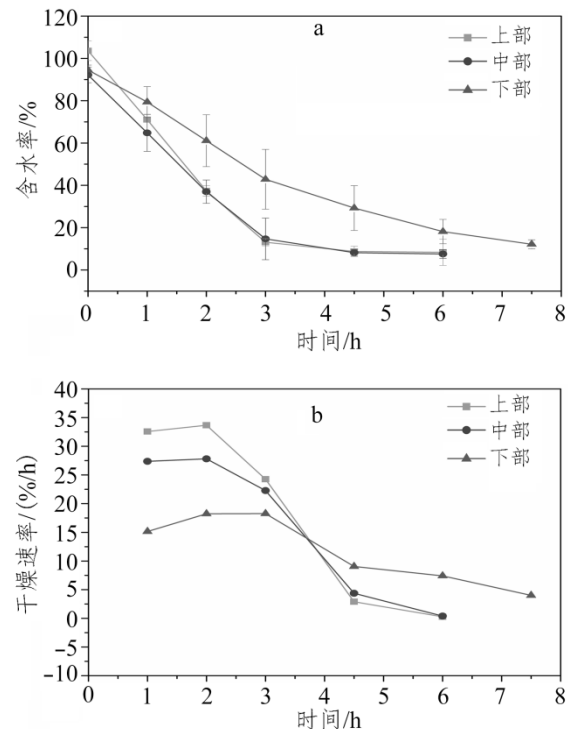


图4 组合模式干燥过程不同部位试材的含水率  
Fig.4 Drying curves for veneers at the combined drying process

## 2.3 单板干燥能耗

不同模式干燥单板的能耗统计结果列于表 2。

表2 单板干燥能耗统计  
Tab.2 Energy consumption for veneer drying

| 干燥模式 | 使用时间/h |     |     | 总耗电量/(kW·h) | 单位板材耗电量/(kW·h·m <sup>-3</sup> ) |      |
|------|--------|-----|-----|-------------|---------------------------------|------|
|      | 顶风机    | 除湿机 | 换气扇 |             | 预干燥阶段                           | 全程   |
| 闭式   | 4      | 4   | 0   | 15.6        | 5.57                            | 7.41 |
| 开式   | 7.5    | 0   | 7.5 | 9.15        | 3.49                            | 4.36 |
| 组合   | 7.5    | 3   | 4.5 | 17.19       | 5.57                            | 8.16 |

干燥前期,单板含水率较高,除湿机可借助较高的干燥介质温度,排出水分并回收一定热量,对单板含水率的快速降低起到主导作用。相较于开式模式,闭式干燥室内温度较高,从而缩短了干燥时间;相较于组合干燥模式,闭式干燥在节省时间的同时降低干燥能耗,因此在后续生产过程中,除湿机的使用可在节省干燥时间的同时,在一定程度上降低干燥能耗。

(下转第 37 页)

- 28(3): 9-12.
- [8] 翟阳洋. 木材抽提物分布规律的研究[D]. 南京林业大学, 2017.
- [9] 王凤昂. 生物质(稻壳)微波热解研究[D]. 安徽理工大学, 2008.
- [10] 张雪, 王鑫, 周明东, 张新伟. 半纤维素微波热解研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(11): 1749-1754.
- ZHANG X, WANG X, ZHOU H D, et al. Study on microwave-assisted pyrolysis of hemicellulose[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(11): 1749-1754.
- [11] Soykeabkaew N, Thanomsilp C, Suwantong O. A review: starch-based composite foams[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 78: 246-263.
- [12] Bichot A, Lerosty M, Radoiu M, et al. Decoupling thermal and non-thermal effects of the microwaves for lignocellulosic biomass pretreatment[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 203: 1-13..
- [13] Chengkai Z, Na T, Baohai P, et al. Revealing the importance of non-thermal effect to strengthen hydrolysis of cellulose by synchronous cooling assisted microwave driving[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 197: 414-421.
- [14] Tjeerdsma B F, Boonstra M, Pizzi A, et al. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement[J]. Holz als Roh- und Werkstoff, 1998, 56(3): 149-153.
- [15] Windeisen E, Strobel C, Wegener G. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood[J]. Wood Science and Technology, 2007, 41(6): 523-536.
- [16] Funaoka M, Kako T, Abe I. Condensation of lignin during heating of wood[J]. Wood Science & Technology, 1990, 24(3): 277-288.
- [17] 姜江涛. 植物纤维原料化学成分定量分析方法研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2010.
- [18] Moharram M A, Mahmoud O M. FTIR spectroscopic study of the effect of microwave heating on the transformation of cellulose I into cellulose II during mercerization[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 107(1): 30-36.
- [19] Vinden P, Torgovnikov G. The manufacture of solid wood composites from microwave modified wood[C]. International panel products symposium, 2007: 111-120.
- [20] Al Shra'ah, Ahmad, Helleur R. Microwave pyrolysis of cellulose at low temperature[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014, 105: 91-99.
- [21] 刘一星, 赵广杰. 木质资源材料学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.

(本文编校 张鹏、向琴)

(上接第16页)

### 3 结论

1) 本试验条件下, 透光与隔热性能良好的温室型太阳能干燥室, 在夏季可实现较好的热量蓄积、干燥室内温度可高于室外温度 23~27 °C; 不同干燥模式下, 干燥室内温度存在差异, 闭式模式下温度可达 62 °C, 开式模式最高温度仅为 41.8 °C。

2) 单板由初含水率干燥至 30%纤维饱和点时, 可采用闭式模式, 干燥速率为 21.39 %/h, 单位板材耗电量为 5.57 kW·h; 含水率由 30%干燥至 12%时, 闭式与开式干燥速率为 16.56 %/h、5.70 %/h。

3) 闭式模式借助除湿机在排出水分的同时回收热量, 相较开式模式, 可缩短干燥时间; 相较组合干燥模式可降低干燥能耗。后续生产过程中, 为提高干燥速率的同时降低干燥能耗, 建议单板干燥过程中引入除湿机进行干燥。

### 参考文献:

- [1] 周永东, 孙锋, 吕建雄, 等. 6种桉木单板干燥质量的比较[J]. 林业科学, 2014, 50(11): 104-108.
- ZHOU Y D, SUN F, LYU J X, et al. Veneer drying quality comparison of six eucalyptus species[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(11): 104-108.
- [2] 孙锋, 周永东, 贺志强. 我国单板干燥节能技术现状及发展趋势[J]. 木材工业, 2012, 26(6): 35-38.
- SUN F, ZHOU Y D, HE Z Q. Current status and development of energy conservation in china's veneer drying process[J]. China Wood Industry, 2012, 26(6): 35-38.

- [3] 吴盛富, 翁甫金, 马英刚. 我国胶合板产业的发展建议[J]. 木材工业, 2016, 30(2): 44-47.
- WU S F, WENG P J, MA Y G. Suggestions on plywood industry development in China[J]. China Wood Industry, 2016, 30(2): 44-47.
- [4] 邹淑萍, 孟伊娜, 张健, 等. 太阳能干燥装置对四种蔬菜干制效果的影响研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(8): 1505-1512.
- ZOU S P, MENG Y N, ZHANG J, et al. Effect of solar drying device on drying effect of four kinds of vegetables [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(8): 1505-1512.
- [5] 张璧光, 伊松林. 我国太阳能干燥现状及在热利用中应有的地位[J]. 干燥技术与设备, 2012, 10(1): 32-37.
- ZHANG B G, YI S L. The present state of the solar drying in China and the status which it should have in thermal application[J]. Drying Technology & Equipment, 2012, 10(1): 32-37.
- [6] 史海舰, 钱珊珠, 淮守成, 等. 新型太阳能干燥系统的智能控制系统研究设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 263-268.
- SHI H J, QIAN S Z, HUAI S C, et al. Research and design of intelligent control system of new solar drying system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 263-268.
- [7] 于海, 高建民, 陈瑶. 储热技术在木材太阳能干燥中的应用与发展趋势[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(04): 382-387.
- YU H T, GAO J M, CHEN Y. Heat storage for wood drying using solar heat. [J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(4): 382-387.
- [8] 王金林, 李春生, 赵戈, 等. 杨木单板干燥试验研究[J]. 木材工业, 1998, 12(5): 3-7, 14.
- WANG J L, LI C S, ZHAO G, et al. Drying of poplar veneer[J]. China Wood Industry, 1998, 12(5): 3-7, 14.
- [9] 张新宇, 储德森, 母军, 等. 太阳能预干对桉木单板干燥质量的影响[J]. 木材加工机械, 2018, 29(3): 21-25, 29.
- ZHANG X Y, CHU D M, MU J, et al. Effect of solar pre-drying on the drying quality of eucalyptus veneers[J]. Wood Processing Machinery, 2018, 29(3): 21-25, 29.

(本文编校 张鹏、向琴)