

高温高湿处理对樟子松脱脂率及微观结构的影响

平立娟¹, 刘君良¹, 王喜明²

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 内蒙古农业大学材料科学与艺术设计学院, 内蒙古呼和浩特 010018)

摘要: 探讨高温高湿处理过程中人工林樟子松木材的含水率和脱脂率的变化规律, 并通过生物光学显微镜和扫描电子显微镜观察其树脂道、纹孔及薄壁组织等微观结构的变化。研究发现: 高温高湿处理后樟子松试材的干燥周期由33 h缩短至18 h, 平均脱脂速率由0.057 %/h提升至0.151 %/h, 干燥后试材厚度上含脂率梯度由0.84%降至0.31%; 相比常规干燥, 经高温高湿处理后的樟子松试材树脂道发生破坏, 细胞壁、纹孔塞和纹孔膜出现裂纹, 这些结构变化均有利于水分和树脂的排出。

关键词: 樟子松; 汽蒸处理; 高温干燥; 微观结构; 脱脂率

中图分类号: S781; S791.253; TS652

文献标识码: B

文章编号: 1001-8654 (2020) 04-0038-05

Effect of High-Temperature and High-Humidity Treatment on Extraction Rate and Micro-structure of Mongolian Scotch Pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)

PING Li-juan¹, LIU Jun-liang¹, WANG Xi-ming²

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. College of Materials Science and Art Design, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: The relationship between the moisture content and the extraction rate of Mongolian scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.) wood treated by high temperature and high humidity was investigated. The changes of microstructures such as resin channels, pits and thin-walled tissues were observed through a bio-optical microscope and a scanning electron microscope. The study found that the drying time with the high-temperature and high-humidity treatment was shortened from 33 hours to 18 hours; the average extracting speed was increased from 0.057%/h to 0.151%/h; and the gradient of extractive content along their thickness after drying was reduced from 0.84% to 0.31%. Compared with conventional drying, the wood resin channel was partially destroyed after high-temperature and high-humidity treatment, and the cell wall, pore plug and pore membrane were cracked. These structural changes are conducive to moisture and resin discharging.

Key words: Mongolian scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.); steam treatment; high temperature drying; micro-structure; extraction rate

收稿日期: 2019-05-21; 修改日期: 2020-06-11

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项“木质复合材料与化学资源化利用领域增强专项”(CAFYBB2017ZX003-04)。

作者简介: 平立娟(1992—), 女, 博士研究生。Email: plj@caf.ac.cn

责任作者: 刘君良, 男, 研究员。Email: liujunliang@caf.ac.cn

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)是目前造林及应用较为广泛的树种之一, 树木生长较快、适应性强, 主要分布在我国的北方。樟子松木材的密度、硬度和物理性质均适中; 纹理清晰、细

直、美观；材质较软，机械加工性能良好，是东北地区主要速生用材。

樟子松木材在应用中多需要进行油漆和涂饰处理，但是木材树脂含量较高（4%~8%），如果不进行脱脂处理，可因树脂溢出而影响木制品的涂饰和油漆效果。而一般的高温湿热处理易导致木材变色甚至开裂，所以必须严格控制处理条件。

长期以来，学者们对松木脱脂技术进行了系统的研究，并取得了显著成果。其中最常用的脱脂工艺有：碱液皂化法^[1]、溶剂萃取法^[2]、催化聚合法^[3]、高温干燥法^[4]和真空干燥法^[5]，但这些方法也都存在一些缺陷。如碱液皂化法脱脂过程中，使用的有机溶剂和化学药剂回收利用率低；催化聚合法较难实现深度脱脂；高温干燥法对松香的脱脂作用有限，而且高温下木材容易变色；真空干燥法设备复杂，处理费用高，限制了应用和推广^[6]。

为了达到理想的脱脂效果，笔者团队采用高温高湿蒸汽对樟子松木材进行处理，探讨处理条件对脱脂效果的影响，并分析处理材的微观结构变化，以期对樟子松快速干燥和高效脱脂技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试材：樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.）购于河北省围场县，选取无明显缺陷的试材，锯解成35 mm厚板材，含水率80%左右。冷藏待用。

试样规格尺寸：400 mm（长）×100 mm（宽）×30 mm（厚），弦切板，要求无节子、虫蛀等缺陷。

试剂：苯（分析纯）、95%乙醇（分析纯）、环氧丙醇，均外购；抽提剂：苯-乙醇混合溶液（2：1）。

1.2 仪器与设备

GDJXS-120A型高低温交变湿热试验箱，温度范围-20~150℃，湿度范围20%~99.9%；TR230X型多路温度巡检仪，测温范围-1 000~1 000℃，配合T型热电偶温度传感器；S-4800I型扫描电子显微镜；Leica SM 2010R型平推式切片机；电热恒温鼓风干燥箱、数显恒温水浴锅、多功能粉碎机、索氏抽提器、防水耐高温环氧树脂胶、40~60目标准铜筛等。

1.3 试验方法

试验依据百度试验法^[7]制定常规干燥基准，见表

1，作为对照。依据《木材工业大全 木材干燥卷》列出高温高湿干燥基准，见表2。

表1 常规干燥基准

Tab.1 Conventional drying schedule

木材含水率/%	干球温度/℃	干湿球温度差 Δt/℃
>40	70	7
40~30	75	11
30~25	80	14
25~20	85	17
20~15	90	22
<15	95	30

表2 高温高湿干燥基准

Tab.2 High-temperature and high-humidity drying schedule

木材含水率/ %	干球温度/ ℃	湿球温度/ ℃	相对湿度/ %	EMC/ %	处理时间/ h
蒸汽处理	99.5	99.5	100	22	3
>20	115	88	38	3.1	
<20	118	82	28	2.3	

至含水率低于8%时，关闭加热器，停止加热，冷却出箱。每次试验选取3个试件，相同条件重复3次，取平均值。

选取上述试验条件的试件，校正三个切面后，制成20 mm×20 mm×20 mm的小规格试块，将小试块放入1:1的环氧丙醇:乙醇的混合溶液中充分软化，制备20 μm和80 μm厚的切片，分别用于光学显微镜和扫描电镜试片，观察微观构造的差异。

1.4 脱脂速率和含脂率梯度计算

1) 含脂率X：按照GB/T 2677.6—1994《造纸原料有机溶剂抽出物的测定》，测定苯醇混合液的抽出物含量为试件含脂率。

2) 脱脂率N：根据处理前后试样的含脂率之差计算，见公式1。

$$N = (X_1 - X_2) * 100 / X_1$$

式中：X₁—处理前试样的含脂率，%；X₂—处理后试样的含脂率，%。

3) 脱脂速率：木材干燥时，其中所含的树脂会经由不同的流通管道，自中心移至表面从而排出，在整个过程中，树脂移动的速率（每小时含脂率的变化量）即为脱脂速率。

4) 含水率和含脂率梯度: 分层测定试件的含水率和含脂率以确定含水率梯度和含脂率梯度。

分层方法: 整个试件沿厚度方向, 均匀分为六层(如图1所示), 每层厚度5 mm, 用切片法测量分层含水率和含脂率。试件从外到内依次为: 表层(*i-1*和*i-6*)、次表层(中层,*i-2*和*i-5*)、芯层(*i-3*和*i-4*)。

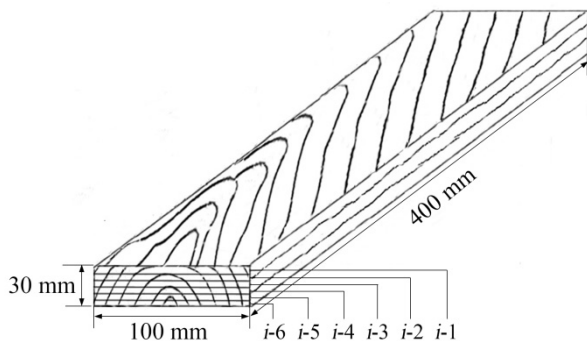


图1 木材分层画线及切片位置

Fig.1 The layering and slicing positions of wood sample

含脂率梯度主要是由于在木材干燥过程中, 其内外树脂含量的不同导致。试验时首先测定试样的初始含脂率, 并以其一半厚度用刀劈成两部分, 再将其分别均匀劈成三层, 按照测定树脂含量的方法, 分别测定各层的初始树脂含量。试验过程中木材表层和芯层(或中层)含脂率之差为含脂率梯度。

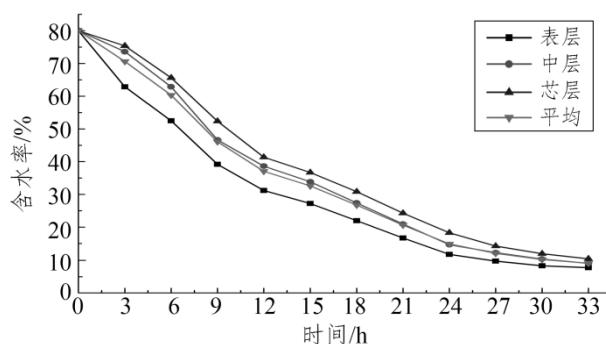
2 结果与讨论

2.1 不同干燥基准下木材的含水率和脱脂率变化

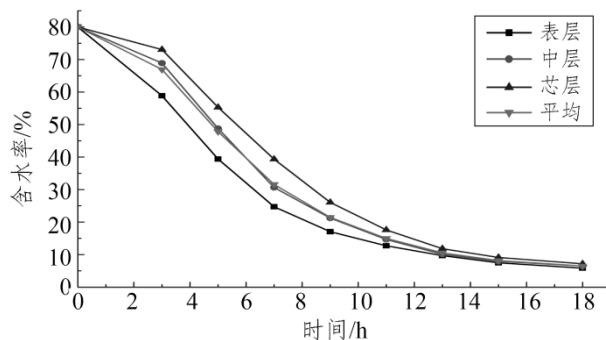
在两种干燥基准下, 樟子松试材的含水率变化曲线如图2所示。结果表明, 常规干燥的周期为33 h(图2a), 而高温高湿处理的干燥周期为18 h(图2b)。

高温高湿处理时, 高温蒸汽中的水被吸附在木材上使木材含水率升高。木材树脂中的松节油与这些水汽发生共沸, 根据水蒸气蒸馏的原理其沸点降至100℃左右, 便同木材内的水一同蒸发从木材内排除, 木材中的松香类物质随松节油的排除而部分被排除。因此, 高温高湿处理可以达到很好的脱脂效果。

整个干燥过程中, 随着干燥时间的延长, 木材内含脂率逐渐减少, 脱脂率逐渐增加。因为高温高湿的条件可以有效促进松节油蒸发, 从而使树脂对



a. 常规干燥



b. 高温高湿处理

图2 两种干燥基准下木材含水率的变化曲线

Fig.2 Drying curve of two drying schedules

木材中水分移动的阻碍作用减小; 同时汽蒸可以提高渗透性, 降低木材内部的含水率梯度, 加快干燥过程。干燥初期, 木材含水率较高, 树脂含量亦较多, 随着温度的升高, 树脂的黏度减小, 流动性增大, 所以脱脂速率较快; 随着木材内含水率降低, 树脂含量减少且黏度越来越大, 流动性变差, 故脱脂速率开始变慢^[8-9]。

干燥过程中试材的含脂率测定结果, 以及根据含脂率计算的脱脂率、脱脂速率、含脂率梯度等结果, 列于表3和表4。

干燥前, 试件表层、中层和芯层的含脂率分别为4.51%、4.79%和4.20%, 木材内外树脂含量差别不大。干燥过程中, 树脂不断的由芯层向中层、中层向表层的移动, 随着树脂的移动, 松节油与水共沸而使树脂中松节油的含量减少, 同时, 木材的含水率也随干燥过程而逐渐降低, 树脂黏度逐渐增大, 树脂流动速度也逐渐减少, 导致树脂逐渐沉积在木材表层。干燥结束时, 高温高湿处理试块表层、中层和芯层的含脂率分别为1.98%、1.70%和1.67%, 厚度上含脂率梯度较小; 常规干燥处理试块表层、

表3 两种干燥过程中木材的脱脂率
Tab.3 Extraction rate during two drying process

干燥工艺	干燥时间/h	含脂率/%	脱脂率/%
常规干燥	0	4.370	
	3	3.988	8.74
	6	3.666	16.11
	9	3.419	21.76
	12	3.271	25.15
	15	3.085	29.41
	18	2.929	32.98
	21	2.794	36.06
	24	2.719	37.78
	27	2.623	39.98
	30	2.551	41.62
高温高湿处理	33	2.503	42.72
	0	4.500	
	3	2.914	35.24
	5	2.541	43.53
	7	2.254	49.91
	9	2.026	54.98
	11	1.935	57.00
	13	1.871	58.42
	15	1.822	59.51
	18	1.785	60.33

表4 高温高湿处理和常规干燥过程的脱脂率对比

Tab.4 Comparison of extraction rate of two types of drying schedules

干燥工艺	初含脂率/%	终含脂率/%	脱脂率/%	干燥周期/h	脱脂速率/(%/h)			含脂率梯度%
					>FSP	<FSP	平均	
高温高湿	4.50	1.750	61.11	18	0.321	0.043	0.151	0.31
常规干燥	4.37	2.503	42.72	33	0.086	0.032	0.057	0.84

中层和芯层的含脂率分别为 2.96%、2.43%和 2.12%，厚度上含脂率梯度仍存在明显的含脂率梯度。

由表 4 可知，高温高湿处理的干燥周期较常规干燥可节省约 45%的时间；脱脂速率约为常规干燥脱脂速率的 2.67 倍；干燥结束时，木材横断面上含脂率分布更均匀，厚度上含脂率梯度较小，脱脂效果更好^[10-11]。这是因为常规干燥的干燥温度低于松节油与水的共沸温度（约 95.6℃），所以其脱脂主要是液态松节油的移动和固态松香溶于液态松节油形成的液态树脂的移动。由于液体的流动速度远小于

蒸汽的移动速度，所以常规干燥脱脂速率慢，脱脂率低。纤维饱和点（fiber saturation point, FSP）以上，两种处理方式的脱脂速率较快，而当含水率降到纤维饱和点以下时，脱脂速率明显减慢。主要是因为 FSP 以上，木材内部自由水较多，松节油与水有更多的机会结合共沸，且树脂黏度较小，脱脂速率较快；反之，当含水率降到 FSP 以下时，木材内部主要是结合水，松节油与水结合共沸的机会减小，且树脂黏度增大，故脱脂速率减小。

2.2 微观构造分析

1) 光学显微镜：人工林樟子松材处理前的树脂道，如图 3a 所示。横切面上，轴向（纵生）树脂道位于管胞之间，树脂道内充满了液态树脂，且周围的管胞中也存在液态树脂弦切面上，木材的径向（横生）树脂道呈辐射状排列，位于木射线水平生长的细胞之间，木射线中深色的物质为液态松节油和固态松脂的混合物。

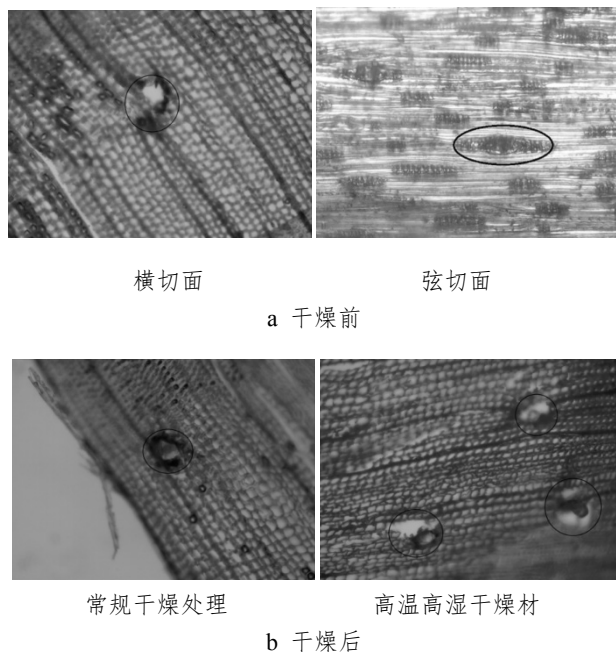


图3 干燥处理前后试材的树脂道

Fig.3 The resin canal before and after drying process

图 3b 为常规处理和高温高湿处理后的树脂道。由图可见，常规干燥材轴向树脂道内存在较多的松脂，呈半透明状态，树脂道周围的管胞内也存在较多深色的固态松脂^[12]。高温高湿处理材的树脂道内存在较少的液态松节油和深色的固态松脂；树脂道周围的管胞大多数呈通透状，仅有部分管胞内含有

少量液态松节油和深色的固态松脂。图3印证了2.1节中的不同干燥方式导致的脱脂率差异。

2) 扫描电子显微镜分析: 扫描电子显微镜观察樟子松木材的树脂道如图4所示。

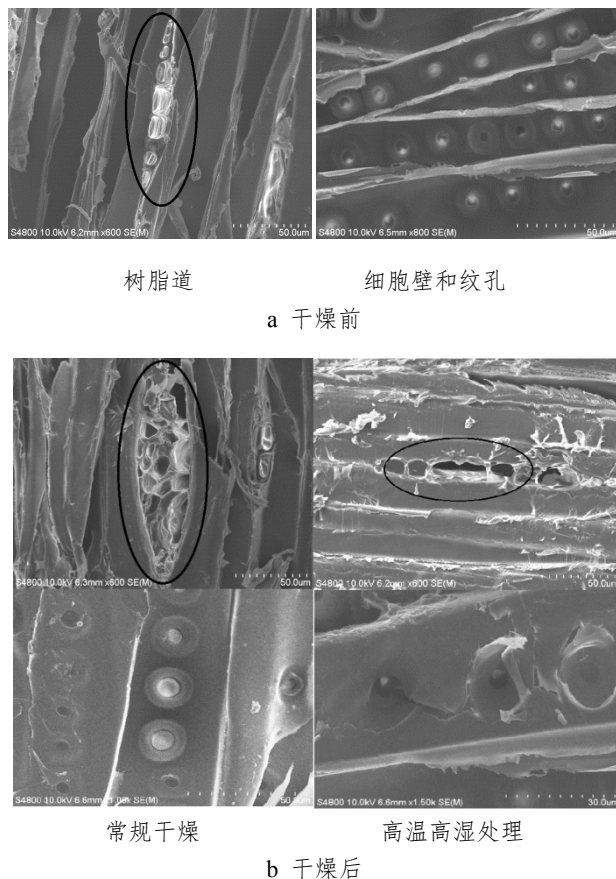


图4 干燥处理前后试材的树脂道、细胞壁和纹孔

Fig.4 Resin canals, cell wall and pit before and after drying process

樟子松湿材的树脂道结构比较完整, 管胞间结合紧密; 少数射线管胞呈通透状; 管胞壁上存在大量具缘纹孔, 结构相对完整, 纹孔膜表面光滑, 大多数呈闭塞状态, 且有无定形物质覆盖, 阻碍了液体的流动, 导致渗透性较差。

常规干燥木材的树脂道(图4b)内, 反光的液态松节油减少, 树脂道结构受到轻微破坏; 管胞壁上纹孔膜破裂, 闭塞纹孔被打开, 纹孔缘破裂, 部分管胞内呈现反光的液态松节油, 部分管胞壁沿纹孔缘出现裂隙, 胞间层出现细长裂纹。

高温高湿处理后, 树脂道(如图4b)被破坏, 树脂道内基本呈现空腔状态; 管胞壁上闭塞纹孔被打开, 纹孔缘破裂, 甚至使管胞壁沿纹孔边缘出现

裂纹, 胞间层也出现较大程度的裂纹和撕裂, 射线管胞内几乎不存在反光的液态松节油, 交叉场纹孔口亦形成相互连通的通道。这些通道的形成, 均有利于提高木材的径向渗透性^[13-15]。

高温高湿处理后木材的微观结构变化程度更大, 是因为高温高湿的蒸汽一方面对薄壁纹孔等组织结构有较大冲击作用, 导致这些结构产生破裂, 且时间越长, 纹孔等一些薄弱组织结构受到破坏的可能性加大, 更容易产生较多裂隙; 另一方面, 在高温作用下管胞壁、纹孔等结构上原有的一些细小裂隙加长加宽, 变成更大的裂纹, 甚至形成相互连通的通道。这些组织结构的变化, 增加了木材内有效纹孔数量, 促进了木材内部松脂的移动及水分的蒸发, 对木材快速干燥与高效脱脂具有重要影响。

此外, 经汽蒸处理, 不仅有利于木材内水分的扩散, 也有助于木材释放部分生长应力, 避免木材干燥时产生开裂和翘曲等缺陷, 提高干燥质量^[14-15]。

3 结论

1) 高温高湿处理的干燥周期较常规干燥可节省约45%的时间; 脱脂速率约为常规干燥脱脂速率的2.67倍; 干燥结束时, 横断面上含脂率分布更均匀, 厚度上含脂率梯度较小, 脱脂效果更好。

2) 高温高湿处理后木材的微观构造发生明显变化, 细胞壁和纹孔受到破坏, 木材内部原有通道加宽, 或者形成了新的流体通道, 使得木材内的传输通道增多, 提高了木材的渗透性, 促进了内部松脂的移动和水分的蒸发, 对樟子松木材的快速干燥和高效脱脂具有重要影响。

参考文献:

- [1] 郭明辉. 脱脂处理对樟子松单板苯醇提取物含量的影响[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(6): 852-854.
- [2] 苗平, 顾炼百. 松木脱脂技术研究进展[J]. 林业科技开发, 1999(4): 7-9.
- [3] 张美. 家具用材马尾松溶剂汽相法脱脂技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007.
- [4] 韦妍蕾, 姜帅成, 李昀彦, 等. 过热蒸汽处理马尾松木材干燥质量的影响[J]. 木材工业, 2017, 31(6): 50-53.
WEI Y Q, JIANG S C, LI J Y. Effect of superheated steam drying on drying quality of Masson pine lumber[J]. China Wood Industry, 2017, 31(6): 50-53.

(下转第47页)

- KE B F, JIANG Z H, ZHANG S Y, et al. A study on the computerized identification of important commercial timbers for china[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 1990(2): 79-91.
- [3] YU M, JIAO L, GUO J, et al. DNA barcoding of vouchered xylarium wood specimens of nine endangered *Dalbergia* species[J]. Planta, 2017, 246(6): 1165-1176.
- [4] Snel F A, Braga J W B, Diego D S, et al. Potential field-deployable NIRS identification of seven *Dalbergia* species listed by CITES[J]. Wood Science and Technology, 2018, 52(5):1411-1427.
- [5] Wang F, Huang A, Yin X, et al. Multilevel profiling and identification of *Dalbergia odorifera* and *Dalbergia stevensonii* by FTIR, NMR and GC/MS[J]. Chinese Chemical Letters, 2018, 29(9):85-88.
- [6] Hwang S W, Kobayashi K, Zhai S, et al. Automated identification of Lauraceae by scale-invariant feature transform[J]. Journal of Wood Science, 2018, 64(2):69-77.
- [7] IAWA Committee. IAWA list of microscopic features for hardwood identification[EB]. Bulletin N S, 1989, 10(3): 219-332.
- [8] LaPasha, C A & E A Wheeler. A microcomputer based system for computer-aided wood identification[EB]. IAWA Bulletin N S, 1987, 8(4): 347-354.
- [9] Ilie J. Computer aided wood identification using csiroid[J]. IAWA Journal, 1993, 14(4): 333-340.
- [10] Gupta S, Kulshreshta S P, Chauhan L. Wood Anatomy Information System (WAIS) - A computer-assisted wood identification package from India[J]. IAWA Journal, 2001, 22(4): 430-431.
- [11] Wheeler E A. InsideWood - A web resource for hardwood anatomy[J]. IAWA Journal, 2011, 32(2):199-211.
- [12] 刘鹏, 程放, 杨家驹. 东南亚阔叶树材数据库查询系统[J]. 林业科学, 1992, 28(5): 480-484.
- LIU P, CHENG F, YANG J J. A computerized database inquiry system of hardwood from southeast Asia[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1992, 28(5): 480-484.
- [13] 程放, 王艳君. 木材综合信息数据库查询系统的研究[J]. 木材工业, 1995, 9(4): 16-19.
- CHENG F, WSNG Y J. Studies on the integrated database of wood information system[J]. China Wood Industry, 1995, 9(4): 16-19.
- [14] 徐峰. 中国和东南亚 1000 种木材图像计算机查询系统[J]. 四川农业大学学报, 1998, 16(1): 181-183.
- XU F. The computer compact disk consulting system of 1000 species commercial timber structure pictures in china and south Asia[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 1998, 16(1): 181-183.
- [15] 王艳君, 程放. 拉丁美洲热带木材树种数据库查询系统[J]. 木材工业, 2000, 14(2): 31-32.
- WANG Y J, CHWNG F. Studies on Latin America tropical wood database system[J]. China Wood Industry, 2000, 14(2): 31-32.
- [16] 陈勇平, 周玉成, 姜笑梅. 红木识别鉴定平台的设计与实现[J]. 中国人造板, 2004, 11(10): 12-15.
- CHEN Y P, ZHOU Y C, JIANG X M. Design and realization of accreditation platform for tree species of Hongmu[J]. Wood-Based Panels, 2004, 11(10): 12-15.
- [17] 叶丽. 基于 Web 的世界主要商用木材信息查询系统的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- [18] 孙书冬, 甘雪菲, 霍丽平, 等. 基于 Visual Basic 的木材识别系统[J]. 木材工业, 2013, 27(5): 21-25.
- SUN S D, GAN X F, HUO L P, et al. Development of wood identification system based on visual basic program[J]. China Wood Industry, 2013, 27(5): 21-25.
- [19] IAWA Committee. IAWA list of microscopic features for softwood identification[J]. IAWA Journal, 2004, 25(1): 1-70.
- [20] 姜笑梅, 殷亚方, 刘晓丽, 等. IAWA 针叶树材显微特征一览表[J]. 木材工业, 2004, 18(4): 37-38.
- (本文编校 孟凡丹、向 琴)

(上接第 42 页)

- [5] 王天龙. 兴安落叶松真空干燥脱脂过程中松节油迁移特性及机理的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [6] 彭万喜. 人工速生林木材增值利用人工林松木脱脂新技术研究[D]. 株洲: 中南林学院, 2003.
- [7] 王喜明. 木材干燥学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [8] 程曦依, 李芸, 全鹏, 等. 马尾松锯材常压过热蒸汽干燥脱脂特性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(6): 108-113.
- CHENG X Y, LI Y, QUAN P, et al. Study on drying and degreasing characteristics with atmospheric pressure steam for Masson pine wood[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(6): 108-113.
- [9] 张志文, 陈广元. 高温高湿处理对落叶松锯材树脂脱除及分布影响分析[J]. 森林工程, 2011, 27(3): 61-63.
- ZHANG Z W, CHENG G Y. Effect of high temperature and humidity treatment on the moving and distribution of pine resin[J]. Forest Engineering, 2011, 27(3): 61-63.
- [10] 冯竞楠, 许佳琪, 薛静, 等. 高温/蒸汽法脱脂处理对石蜡乳液在松木中渗透效果的影响[J]. 木材加工机械, 2016, 27(2): 47-50.
- FENG J N, XU J Q, XUE J, et al. High temperature/steaming method degreasing treatment on paraffin emulsion in pine penetration effect[J]. China Wood Industry, 2016, 27(2): 47-50.
- [11] 杨霞, 刘元, 李贤军. 马尾松木材微波脱脂工艺研究[J]. 木材工业, 2018, 32(1): 40-43.
- YANG X, LIU Y, LI X J. Resin Removal from *Pinus massoniana* lumber by microwave technology[J]. China Wood Industry, 2018, 32(1): 40-43.
- [12] 齐华春, 孙玮鸿, 吴俊华, 等. 高温高压处理对落叶松脱脂率及超微结构的影响[J]. 北华大学学报, 2017, 18(4): 450-43.
- QI H CH, SUN W H, WU J H, et al. Influence of degrease rate and ultrastructure of *larix gmelini* by high temperature and pressure[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2017, 18(4): 450-43.
- [13] HE S, LIN L Y, FU F, et al. Microwave treatment for enhancing the liquid permeability of Chinese fir[J]. Bioresources, 2014, 9(2): 1924-1938.
- [14] 何盛, 徐军, 吴再兴, 等. 毛竹与樟子松木材孔隙结构的比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 157-162.
- HE S, XU J, WU Z X, et al. Compare of porous structure of *Moso bamboo* and *Pinus sylvestris* L. lumber[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 41(2): 157-162.
- [15] Lehringer C H, Hillebrand K, Schwarze F W, et al. A review on promising approaches for liquid permeability improvement in softwood [J]. Wood Fiber Sci, 2009, 41(4): 373-385.
- (本文编校 张 鹏、姜 征)