doi:10. 3969/j. issn. 1006-8023. 2024. 01. 012

油蜡热处理对木材物理性能及尺寸稳定性的影响

蒋金成,李璟,张镜元,王秉泉,战剑锋*
(东北林业大学 材料科学与工程学院,哈尔滨 150040)

摘　要:为探究植物油蜡热处理对不同树种木材的物理性能及尺寸稳定性的影响,以臭冷杉、落叶松和条纹乌木为研究对象,自主配置的植物油蜡溶液为加热介质,分别在不同温度(140、170 、200 ℃)下对木材进行 4 h 的高温热处理,再通过充分的冷却确保植物油蜡完全进入木材内部,并利用扫描电镜观察其内部结构。研究结果表明,室温冷却阶段是木材油蜡热处理的关键,该阶段植物油蜡大量进入木材内部,这主要表现为木材试件增重百分比(Weight Percentage Gain, WPG)的变化。经植物油蜡联合热处理后,3 种木材最大颜色变化(ΔE^*)分别为 48. 24、40. 67、5. 95;表面疏水性均有稳定提高,接触角(Water Contact Angle, WCA)稳定提升至 70°左右;不同树种的弦向、径向线湿胀率及体积膨胀率均有不同程度的降低,抗膨胀效率(Anti Swelling Efficiency, ASE)有效提高,3 种木材最大提高 49. 64%、48. 24%、38. 86%,说明植物油蜡热处理可以提升木材尺寸稳定性。

关键词:植物油蜡;热处理;木材;物理性能;尺寸稳定性
中图分类号:TS652　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)01-0106-08

Effect of Oil Wax Heat Treatment on Physical Properties and Dimensional Stability of Wood

JIANG Jincheng, LI Jing, ZHANG Jingyuan, WANG Bingquan, ZHAN Jianfeng*
(College of Materials Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to explore the effect of heat treatment of vegetable oil wax on the physical properties and dimensional stability of wood of different tree species, *Abies nephrolepis* Maxim. , *Larix gmelinii* and *Diospyros celebica* were taken as the research objects, and the independently prepared vegetable oil wax solution was used as the heating medium. The wood was heat treated at different temperatures (140, 170, 200 ℃) for 4 hours, and then the vegetable oil wax was fully cooled to ensure that it entered the interior of the wood. The internal structure was observed by scanning electron microscope. The results showed that the room temperature cooling stage was the key of wood oil wax heat treatment. At this stage, a large amount of vegetable oil wax entered the interior of wood, which was mainly reflected in the change of wood specimen weight percentage gain (WPG). The maximum color change (ΔE^*) of three kinds of wood after combined heat treatment with vegetable oil and wax were 48. 24, 40. 67, 5. 95. The surface hydrophobicity was improved steadily, and the water contact angle (WCA) was increased to about 70°. The tangential and radial moisture expansion rates and volume expansion rates of different tree species were reduced to varying degrees, and the anti swelling efficiency (ASE) was effectively improved, with the maximum increase of 49. 64%, 48. 24% and 38. 86% for the three kinds of wood, indicating that vegetable oil wax heat treatment can improve the dimensional stability of wood.

Keywords: Vegetable oil wax; heat treatment; wood; physical property; dimensional stability

0　引言

木材作为当今世界四大材料中唯一的可再生资源,不但具备良好的性能,也符合绿色环保的国策,受到广泛研究。木材是一种吸湿性、各向异性的生物聚合物,主要由纤维素、半纤维素和木质素组成。天然木材的密度较小,水分与木纤维复合材料的相互作用也导致木材易开裂、易皱缩等缺陷,这都限制了木材在某些环境条件中的应用。

植物油热处理可以有效提高木材的物理性能及尺寸稳定性,大豆油为半干性油,平均分子量为 290 ,能够进入木材结构中与木材成分之间发生交联,并限制了木材细胞壁的移动,从而提高尺寸稳定性;亚麻油为干性油,平均分子量为 870 ,不能进入细胞壁,但在空气中易氧化,在木材表面形成保护膜,进而提高尺寸稳定性;蓖麻油为不干性油,黏度大,流动性强,可作为调和剂;巴西棕榈蜡因为其本身的拒水性,其作为添加剂可与植物油联合改性

收稿日期:2022-10-08
基金项目:中央高校基本科研业务费 C 类资助项目(2572019CJ01)。
第一作者简介:蒋金成,硕士研究生。研究方向为木材改性。E-mail: 2320157043@ qq. com
*通信作者:战剑锋,博士,副教授。研究方向为木材物理及干燥。E-mail: zhanjianfeng2002@ sina. com. cn
引文格式:蒋金成,李璟,张镜元,等. 油蜡热处理对木材物理性能及尺寸稳定性的影响[J]. 森林工程,2024,40(1):106-113.
JIANG J C, LI J, ZHANG J Y, et al. Effect of oil wax heat treatment on physical properties and dimensional stability of wood [J]. Forest Engineering, 2024, 40(1):106-113.

木材,可以更好地提高木材的尺寸稳定性。邵霖治等[1]研究发现植物油蜡浸润对落叶松木材表面颜色及耐候性有明显提升;曹钰[2]定量分析高温油热处理前后毛竹材中淀粉含量的变化,解释高温油热处理工艺对毛竹材霉腐变化的影响;马淑玲等[3]研究了植物油热处理温度与时间对杨木和樟子松力学性能的影响;赵鑫宇等[4]研究发现,热处理工艺和油蜡涂饰处理的组合,可以用来改善针叶材的材色;Dubey 等[5]研究发现,以亚麻籽油为介质对辐射松进行油热处理,吸油量越多木材的疏水性更强、尺寸稳定性更好;Chen 等[6]将亚麻籽油环氧化处理后与巴西棕榈蜡复合形成乳液对杨木进行改性处理,能大幅提高其疏水性及尺寸稳定性。已有研究表明[7-9]油热处理改变木材性能的原因可能是高温暴露导致木材的化学成分变化和木材在热处理过程中吸油量的综合作用。

本研究以臭冷杉、落叶松和条纹乌木作为研究对象,采用自主配制的植物油蜡体系作为加热介质,对木材进行高温热处理。研究植物油蜡热处理不同温度对木材质量、颜色、表面疏水性及尺寸稳定性的影响,遴选出最佳热处理工艺,旨在提高 3 种木材物理性能及尺寸稳定性,为拓展应用途径提供技术参考。

1　材料与方法

1.1　材料

臭冷杉(*Abies nephrolepis* Maxim.),产自黑龙江省伊春市,平均含水率为 7.82%~8.06%,气干密度为 0.4 g/cm^3,将其加工成规格为 50 mm×35 mm×15 mm 的小试件;落叶松(*Larix gmelinii*),产自黑龙江省鹤岗市,平均含水率为 7.44%~8.67%,气干密度为 0.71 g/cm^3,将其加工成规格为 45 mm×45 mm×10 mm 的小试件;条纹乌木(*Diospyros celebica*),产自印度尼西亚,平均含水率为 7.03%~7.43%,气干密度为 0.94 g/cm^3,将其加工成规格为 35 mm×35 mm×15 mm 的小试件;以上 3 种木材试样均无缺陷;植物油:大豆油(沸点 230 ℃)购自上海麦德龙商业集团有限公司;亚麻籽油(沸点 335 ℃)购自江西康膳源油脂有限公司;蓖麻油(沸点 313 ℃)购自山东优索化工科技有限公司;巴西棕榈蜡购自山东优索化工科技有限公司。

实验仪器有:智能恒温水油浴锅(数显温度可升降)、常规干燥箱、TM3030 型扫描电子显微镜、NF333 型分光光度计、CA100B 型接触角测量仪、恒温恒湿箱(精度 0.1 ℃)、电子天平(精度 0.001 g)、游标卡尺(精度 0.01 mm)等。

1.2　实验方法与检测

1.2.1　植物油蜡混合体系

将亚麻籽油、大豆油、蓖麻油按照自主比例(10∶10∶1)混合,再将巴西棕榈蜡加入混合油中(20∶1),通过智能恒温水油浴锅加热至 80 ℃,并且持续搅拌至油蜡混合均匀形成稳定体系,呈现透明,然后以 5 ℃/min 加热速度进行高温热处理,将热处理温度分别提升至 140、170 、200 ℃[1]。

1.2.2　木材质量变化检测

在试样各相对面的中心以及两侧位置做上记号,测量每组试件质量以及尺寸。选择若干个试件标记后放入烘箱中进行绝干处理,绝干完毕测量其质量并记录,再放入原组,设置为绝干对照组。

高温热处理结束后,打开油浴盖,让整个系统进入冷却,同时快速将试件捞出,用滤纸将表面油蜡擦净,测量其质量,测量完毕后将试件放入油浴锅中继续冷却,随后分别在油浴中冷却 1、2、4、8、16、32 h 后再对试件立即进行测量,最终充分冷却后取出所有试件并测量。选出绝干对照组的试件,放入烘箱中进行绝干处理后测量。得到油蜡高温热处理木材的增重百分比(Weight Percentage Gain,WPG,式中记为 W_{PG})和油蜡高温处理绝干木材的干重增加百分率 (Dry Weight Percentage Gain,DWPG)。

$$W_{PG}=\frac{M_1-M_0}{M_0}\times 100\%。\qquad(1)$$

式中:M_0 为油蜡热处理前的试件质量;M_1 为油蜡热处理后的试件质量。

利用美国公司 TM3030 型扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)测试热处理前后木材的微观结构。

1.2.3　木材材色检测

根据国际照明委员会 CIE 的 Lab 模式,利用 NF333 型分光光度计测量热改性前后木材材色,随机取点得到平均值 L^*(明度指数)、a^*(红绿轴指数)、b^*(黄蓝轴指数),通过计算得到色差 ΔE^*[10],计算公式

$$\Delta E^*=\sqrt{(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2}。\qquad(2)$$

式中:ΔE^* 表示处理材与未处理材之间的整体色差;ΔL^* 表示热处理前后明度值差值;Δa^* 表示热

处理前后红绿轴色品指数差值；Δb^* 表示热处理前后黄蓝轴色品指数差值。

1.2.4 木材表面疏水性与尺寸稳定性检测

1)木材表面疏水性检测：采用 CA100B 型接触角测量仪，使用去离子水液滴测定，每 40 ms 拍摄一次照片并计算接触角，共 80 s，当液滴刚滴于样品表面，在样品和液滴界面立刻形成接触角，此时为“初始接触角”；当接触角的值基本不变化，或者呈线性减小时，此时为“平衡接触角”。每个试件上分别随机选取 5 个测试点，最后计算每组工艺中接触角的平均值，无特殊说明，接触角表示的都是水在试样表面的平衡接触角[11]。

2)木材尺寸稳定性检测：采用 GB/T 1934.2—2009《木材湿胀性测定方法》进行木材尺寸稳定性测试，计算公式为

$$\alpha = \frac{l_b - l_a}{l_a} \times 100\% 。 \quad (3)$$

$$S = \frac{V_b - V_a}{V_a} \times 100\% 。 \quad (4)$$

$$A_{SE} = \frac{S_c - S_t}{S_c} \times 100\% 。 \quad (5)$$

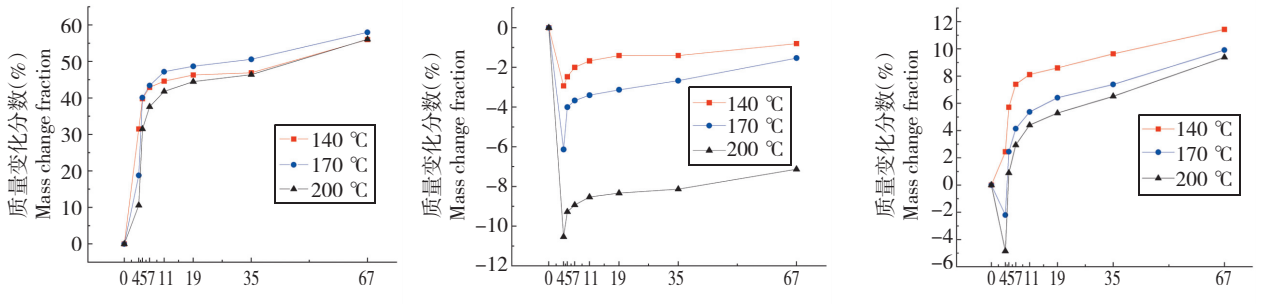
式中：α 为线湿胀率；l_a 为热处理材绝干后尺寸；V_a 为热处理材绝干后体积；l_b 为湿胀试验后试材尺寸；S 为体积膨胀系数；V_b 为湿胀试验后试材体积；A_{SE} 为抗膨胀效率；S_c 对照组样品膨胀系数；S_t 油蜡热处理材膨胀系数。

2 结果与分析

2.1 植物油蜡热处理对木材质量变化的影响

图 1 为 3 种木材在不同高温油蜡热处理中的质量变化分数(图中横坐标时间为最开始加热，到最终完全冷却结束，4 个小时热处理，对应时刻 0、4、5、7、11、19、35、67 h)。通过实验发现，木材吸收油蜡主要发生在冷却阶段，吸油量随着冷却时间的延长而增加。这是由于冷却导致木材空隙中空气收缩，从而产生一个真空，与大气压产生的压力差使得油蜡能够进入木材中[12]。

由图 1(a)可知，臭冷杉在高温热处理阶段中就开始吸收油蜡，但随着热处理温度升高臭冷杉在高温热处理阶段中的质量增长幅度减小，在热处理冷却阶段中大量吸收油蜡；由图 1(b)可知，落叶松在高温热处理阶段质量减少，并且随着热处理温度的升高，落叶松的质量大幅度减少，冷却阶段开始吸油，质量缓慢增加，充分冷却后，质量仍略低于初始质量，说明油蜡在热处理过程中落叶松吸收油蜡量低于其内部挥发性成分的挥发以及半纤维素、抽提物的降解；由图 1(c)可知，条纹乌木在 140 ℃高温热处理阶段质量增加，在 170 ℃与 200 ℃高温热处理阶段质量减少，说明在 170 ℃下条纹乌木已经发生了内部结构破坏，内部结构的质量损失超过吸收的油蜡质量，并且随着热处理温度的升高，内部结构破坏加剧，整体呈现质量减少，冷却阶段条纹乌木开始大量吸收油蜡，质量增加。



(a)油蜡热处理臭冷杉的质量变化分数 (b)油蜡热处理落叶松的质量变化分数 (c)油蜡热处理条纹乌木的质量变化分数

(a) Mass change fraction of *Abies nephrolepis* Maxim. treated with oil wax (b) Mass change fraction of *Larix gmelinii* treated with oil wax (c) Mass change fraction of *Diospyros celebica* treated with oil wax

图 1 3 种木材在不同高温植物油蜡热处理中的质量变化分数

Fig. 1 Mass fraction of three kinds of wood after heat treatment with different high temperature vegetable oil wax

2.2 植物油蜡热处理后木材的 WPG

图 2 为 3 种木材经植物油蜡浸润-高温热改性处理充分冷却后 WPG 和 DWPG 图像。

由图 2 可知，未绝干处理的臭冷杉在不同高温植物油蜡热处理下的 WPG 均超过 45%，因为臭冷杉作为针叶材，其结构松软、密度小且有较多的孔隙使得油蜡可以更好地进入木材内部[13]；未绝干处理的落叶松在不同高温植物油蜡热处理下的 WPG

均为负值,且随热处理温度的升高,WPG 减小。因为落叶松作为松木,其内部含有大量树脂,树脂主要是由 2 部分组成,一部分是挥发性物质精油即松节油,另一部分是不可挥发性物质松香(树脂酸),含量占树脂总量的 75%[14];未绝干处理的条纹乌木在不同高温植物油蜡热处理下的 WPG 均超过 10%,但随热处理温度的升高,质量略微减少。因为条纹乌木作为阔叶材,其轴向薄壁组织星散聚合状或细弦线状,与木射线构成网格状,木射线非叠生,射线组织异形单列及多列,方形射线细胞较多,且内含丰富的菱形晶体,导致其木纤维壁甚厚,相较于其他木材耐高温性能更好,超过耐受温度也会结果破坏[15]。

绝干处理的目的是使木材试件在植物油蜡高温热处理前就将其中的水分及可挥发性物质挥发。木材的 DWPG 均高于 WPG,这表明在植物油蜡热处理前对木材进行绝干预处理可以使油蜡更好地进入木材中,能够有效提高木材的 WPG,得到更佳的浸润效果。

2.3　油蜡热处理后木材微观结构分析

同一树种比较,不同热处理温度之间没有显著差异,图 3 为 3 种木材热处理前后的 SEM 结果。由图 3(a)和图 3(d)可以发现,臭冷杉热处理前后,未处理材细胞腔内干净光滑,细胞壁上纹孔清晰可

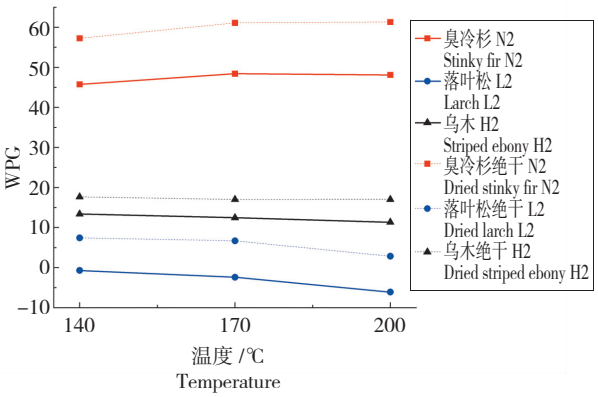
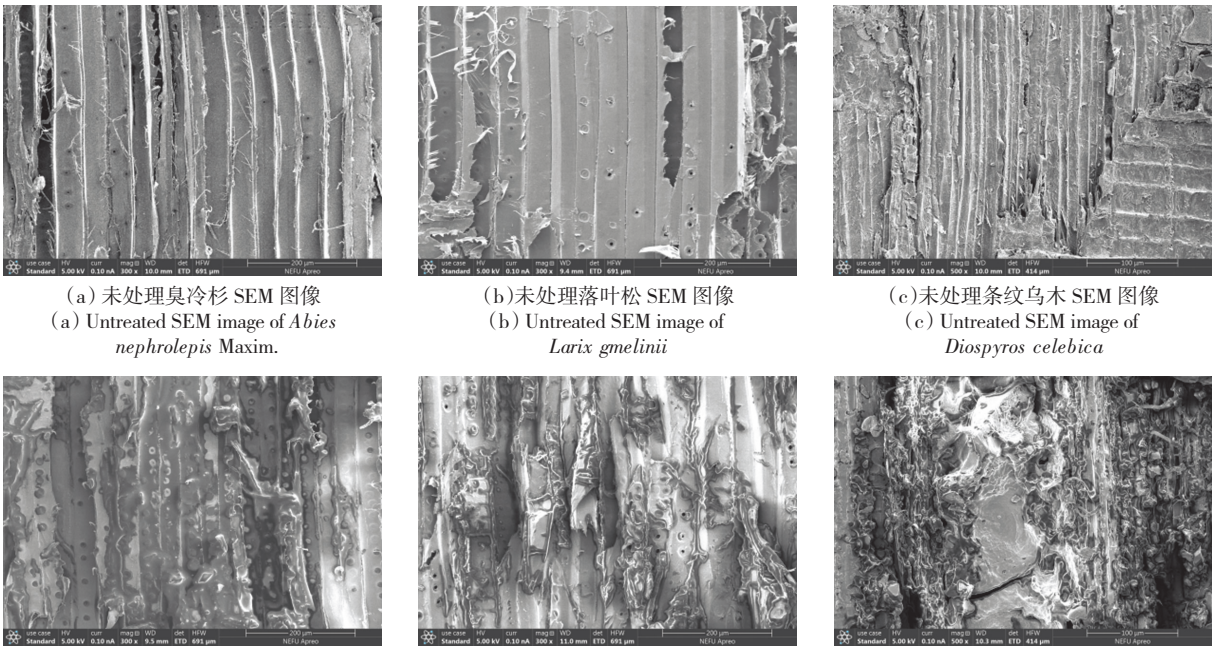


图 2　不同高温植物油蜡热处理后 3 种木材的 WPG 变化图像

Fig. 2 Changes of WPG of three kinds of wood after heat treatment with different high temperature vegetable oil wax

见,热处理材细胞壁上纹孔被植物油蜡覆盖和堵塞,部分纹孔清晰表面植物油蜡进入细胞壁内;由图 3(b)和图 3(e)可见,落叶松热处理前后,未处理材由于本身落叶松松脂堆积有部分纹孔堵塞,热处理材植物油蜡附在表面但部分纹孔清晰可见,说明植物油蜡进入木材细胞壁内;由图 3(c)和图 3(f)可以发现,条纹乌木热处理前后,植物油蜡大量进入导管中并以改固体形式填充于木材细胞腔内,



(a)未处理臭冷杉 SEM 图像
(a) Untreated SEM image of *Abies nephrolepis* Maxim.

(b)未处理落叶松 SEM 图像
(b) Untreated SEM image of *Larix gmelinii*

(c)未处理条纹乌木 SEM 图像
(c) Untreated SEM image of *Diospyros celebica*

(d)油蜡处理后臭冷杉 SEM 图像
(d) SEM image of *Abies nephrolepis* Maxim. after oil wax treatment

(e))油蜡处理后落叶松 SEM 图像
(e) SEM image of *Larix gmelinii* after oil wax treatment

(f)油蜡处理后条纹乌木 SEM 图像
(f) SEM image of *Diospyros celebica* after oil wax treatment

图 3　3 种木材热处理前后 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of three kinds of wood before and after heat treatment

与细胞壁接触紧密,整块油蜡中心出现纹孔亮点,说明植物油蜡进入细胞壁中[16-17]。

通过观察未被植物油蜡覆盖处可以发现,未处理木材木材组织依旧棱角分明,细胞壁上的纹孔清晰可见,热处理后木材细胞壁表面变得粗糙,细胞壁结构受到挤压,产生轻微的变形,出现微小裂缝,部分纹孔产生变形[18-19]。

2.4 油蜡热处理对木材颜色的影响

图 4 为不同温度植物油蜡热处理下 3 种木材的表面颜色,图 4 中依次为臭冷杉、落叶松、条纹乌木的空白对照组及 140 、170 、200 ℃图片。

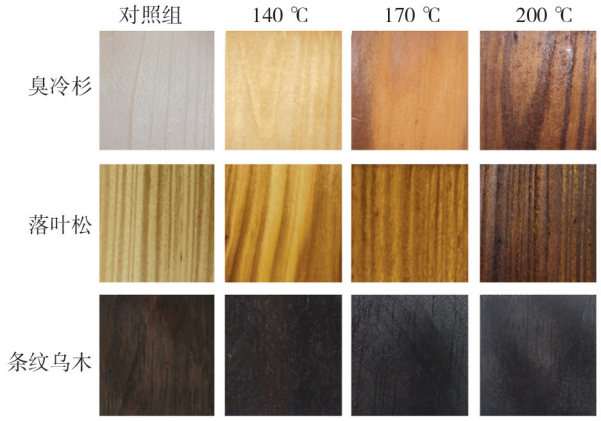


图 4 不同温度植物油蜡热处理下的 3 种木材

Fig. 4 Three kinds of wood treated with vegetable oil wax at different temperatures

表 1 为不同处理工艺下木材的色度指数及色差分析。由表 1 可知,臭冷杉热处理前后色度指数均有变化明显,随着热处理温度的升高臭冷杉的明度 L^* 明显降低,而色度指数 a^* 和 b^* 随热处理温度的升高有先增加后减小的抛物线变化趋势,色差 ΔE^* 随热处理温度升高增大,表明热处理前后臭冷杉颜色差别大;落叶松热处理前后色度指数均有变化明显,随热处理温度的升高明度 L^* 明显下降,a^* 整体趋势升高略有波动,b^* 先提升再大幅度下降,色差 ΔE^* 增大,表面热处理前后落叶松颜色差别大;条纹乌木热处理前后色度指数变化不明显,色差 ΔE^* 也较小,随着热处理温度升高条纹乌木的颜色变化也较小。

2.5 油蜡热处理对木材疏水性的影响

由图 5 可知,未经处理的 3 种木材接触角相差比较大,臭冷杉约为 30°;落叶松约为 51°;条纹乌木约为 35°,说明 3 种木材本身疏水性不同,这是由于不同树种表面所含的成分有所差异导致的。

表 1 不同处理工艺下木材的色度指数及色差

Tab. 1 Color index and color difference of wood under different treatment processes

树种 Varieties of trees	油蜡联合处理温度/℃ Oil wax joint treatment temperature	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
臭冷杉 *Abies nephrolepis* Maxim.	140	74.28	4.58	26.30	22.96
	170	55.54	16.14	29.61	32.24
	200	22.29	12.45	10.22	48.24
	对照组	68.88	1.45	4.21	—
落叶松 *Larix gmelinii*	140	50.32	9.84	42.00	19.42
	170	39.49	13.65	39.74	26.09
	200	20.93	11.24	13.81	40.67
	对照组	58.39	1.60	26.38	—
条纹乌木 *Diospyros celebica*	140	15.81	1.54	1.20	3.39
	170	13.99	1.26	−0.46	5.78
	200	13.89	1.18	−0.59	5.95
	对照组	17.57	1.22	4.08	—

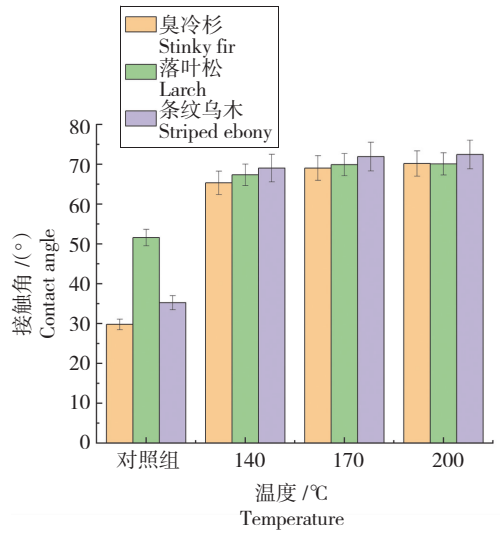


图 5 植物油蜡热处理前后 3 种木材对水的接触角变化

Fig. 5 Changes of water contact angle of three kinds of wood before and after heat treatment with vegetable oil wax

热处理前后 3 种木材接触角均有不同程度的提升,臭冷杉热处理材接触角增加幅度在 54.39%~57.56%;落叶松热处理材接触角增加幅度在 23.41%~26.41%;臭冷杉热处理材接触角增加幅度在 48.96%~51.35%,说明植物油蜡高温热处理工艺产生的疏水效果对木材具有普遍适用性,这主要是因为植物油在木材表面形成的疏水膜可覆盖木材表面羟基,从而提高木材表面疏水性。此外,植物油阻碍了水分在木材内部通道中的移动,从而降

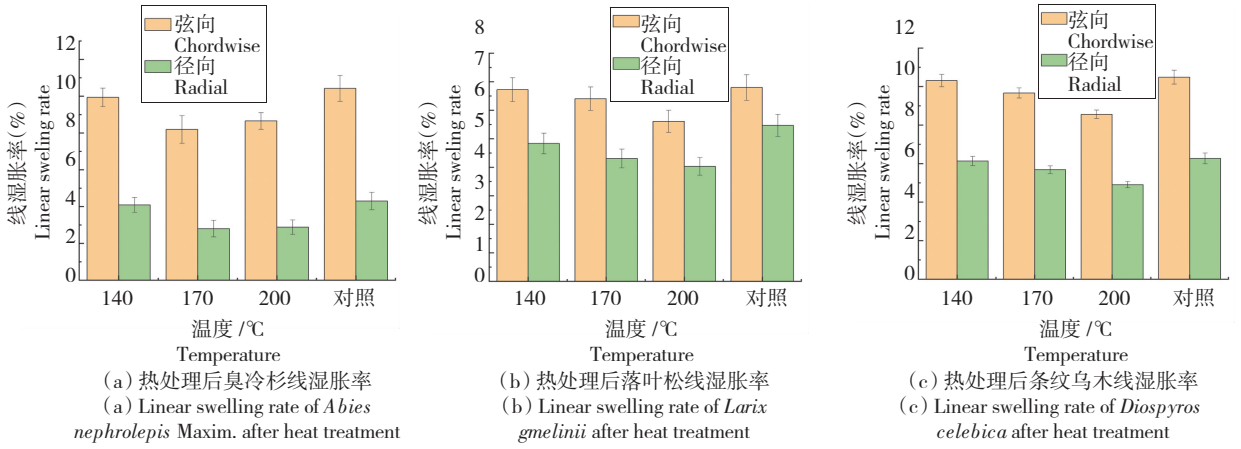
低水分吸收速率,也具有疏水作用[20]。

2.6　油蜡热处理对木材尺寸稳定性的影响

在湿胀试验中,木材的尺寸稳定性主要体现为线湿胀率及体积抗膨胀效率。油蜡热处理对不同木材的尺寸稳定性均有不同程度的提升。

2.6.1　热处理对木材线湿胀性的影响

图 6 为 3 种木材在不同温度植物油蜡高温热改性后的线湿胀率变化,与对照组相比,植物油蜡高温热改性对 3 种木材各个方向的线湿胀率均有不同程度的降低。由图 6(a)可知,热处理后臭冷杉的弦向线湿胀率下降了 4.7%~21.40%,径向线湿胀率下降了 4.88%~34.88%,且在 170 ℃油蜡热处理温度下臭冷杉达到最小弦向线湿胀率 8.19%,径向线湿胀率 2.8%,尺寸稳定性达到最好;由图 6(b)可知,热处理后落叶松的弦向线湿胀率下降了 1.18%~17.5%,径向线湿胀率下降了 14.32%~25.95%,随热处理温度的升高,弦向和径向的线湿胀率呈下降趋势;由图 6(c)可知,条纹乌木弦向线湿胀率下降了 1.62%~18.32%,径向线湿胀率下降了 2.23%~21.69%,随热处理温度的升高,弦向和径向的线湿胀率呈下降趋势。



(a)热处理后臭冷杉线湿胀率
(a) Linear swelling rate of *Abies nephrolepis* Maxim. after heat treatment

(b)热处理后落叶松线湿胀率
(b) Linear swelling rate of *Larix gmelinii* after heat treatment

(c)热处理后条纹乌木线湿胀率
(c) Linear swelling rate of *Diospyros celebica* after heat treatment

图 6　3 种木材在不同高温植物油蜡热处理后线湿胀率

Fig. 6 Linear swelling rate of three kinds of wood after heat treatment with different high temperature vegetable oil wax

植物油蜡浸润-热改性可以有效降低 3 种木材的线湿胀率,且径向湿胀率比弦向湿胀率下降更多,有利于提高木材尺寸稳定性[21-22]。3 种木材油蜡热处理前后的线湿胀率变化与其 WPG 变化规律相似,说明油蜡热处理中吸收的油蜡量与木材尺寸稳定性的提升呈正相关。

2.6.2　热处理对木材体积膨胀系数及 ASE 的影响

表 2 为不同高温植物油蜡热改性后 3 种木材的体积膨胀系数以及 ASE 数据。由表 2 可知,油蜡热处理对 3 种木材的体积膨胀率均有不同程度的降低,未处理的木材由于其多孔结构而膨胀得更多,而油蜡热处理的木材由于油蜡沉积在木材的毛细管和空隙中,导致木材体积膨胀得更少[23]。

通过 SPSS 软件对木材体积膨胀率进行双因素误差分析,结果见表 3。主体间效应检验通过多元统计分析得到木材体积膨胀率与树种和热处理温度两因素间的显著性,树种的显著性系数(P)为 $0<0.05$;温度的 P 为 $0<0.05$,表明树种和温度对体积膨胀率影响都显著;同时双因素联合效应的评估,R^2

表 2　不同植物油蜡热处理温度下 3 种木材的体积膨胀系数以及 ASE 数据

Tab. 2 Volumetric expansion coefficients and ASE data of three kinds of wood at different vegetable oil wax heat treatment temperatures

树种 Varieties of trees	油蜡热处理温度/℃ Oil wax heat treatment temperature	体积膨胀系数(%) Volume expansivity	ASE(%)
臭冷杉 *Abies nephrolepis* Maxim.	140	14.75	4.28
	170	10.32	33.03
	200	7.76	49.64
	对照	15.41	—
落叶松 *Larix gmelinii*	140	13.47	15.39
	170	12.19	23.43
	200	8.24	48.24
	对照	15.92	—
条纹乌木 *Diospyros celebica*	140	18.08	10.85
	170	16.41	19.08
	200	12.40	38.86
	对照	20.28	—

为98.1%,代表了树种和温度对体积膨胀率总体变化的贡献为98.1%,而误差因素贡献了1.9%,开平方之后得到 $R=0.99$,表明树种和温度联合影响体积膨胀率有非常强的关系。分析结果表明,植物油蜡高温热改性可以显著提高木材的尺寸稳定性。

表3 主体间效应检验

Tab. 3 Intersubjective effect test

源 Source	Ⅲ类平方和 Class Ⅲ sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	*F*	*P*
修正模型 Corrected model	156.279a	5	31.256	62.797	0
截距 Intercept	2 275.079	1	2 275.079	4 570.957	0
树种 Varieties of trees	55.155	2	27.578	55.407	0
温度 Temperature	101.123	3	33.708	67.724	0
误差 Error	2.986	6	0.498	—	—
总计 Total	2 434.345	12	—	—	—
修正后总计 Total after correction	159.265	11	—	—	—

注: $R^2=0.981$(调整后 $R^2=0.966$)。

Note: $R^2=0.981$(After adjustment $R^2=0.966$).

植物油蜡热处理能够使木材尺寸稳定性提升的主要原因,一部分是由于油蜡热处理过程中高温使得半纤维素降解,半纤维素中自由羟基的浓度大大降低,并且植物油蜡分子可以与木材中的游离羟基发生反应,减少了木材的吸湿性和内应力;纤维素部分降解,自由度降低结晶度升高,结晶区增加,从而使得木材吸湿性和吸水性降低。另一部分是由于植物油蜡进入木材结构中与木材成分之间发生交联,并限制了木材细胞壁的移动,从而提高木材的尺寸稳定性。除此之外,木材在油蜡热处理中吸收的油蜡可以在木材表面形成保护层,防止水分渗入木材,进一步提高木材的尺寸稳定性[24-26]。

3 结论

1)木材的增重吸收油蜡主要发生在冷却阶段,绝干预处理可以有效提高植物油蜡热处理的增重百分比。通过SEM测试可知,植物油蜡高温热改性对木材内部结构有一定程度破坏,但能使植物油蜡进入木材细胞内部。

2)植物油蜡热处理对3种木材的颜色均有不同程度的影响。臭冷杉与落叶颜色变化明显,条纹乌木 ΔE^* 相对较小。

3)植物油蜡高温热改性能够提高木材的表面疏水性以及尺寸稳定性。高温热改性后木材附上一层氧化膜提高了表面疏水性,3种木材的接触角均达到70°;3种木材的径向线湿胀率、弦向线湿胀率和体积膨胀率均显著降低,ASE显著提高,其中臭冷杉和落叶松最大ASE可达49.64%、48.24%,条纹乌木最大ASE可达38.86%。

【参 考 文 献】

[1] 邵霖治,李明剑,王嘉伟,等. 热处理和植物油蜡浸润对落叶松颜色均一性和耐候稳定性的影响[J]. 木材科学与技术,2022,36(3):65-71.
SHAO L Z, LI M J, WANG J W, et al. Effects of heat treatment and vegetable oil wax infiltration on color uniformity and weather stability of Larch[J]. Wood Science and Technology, 2022, 36(3):65-71.

[2] 曹钰. 高温油热处理对毛竹材性能影响的研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2019.
CAO Y. Study on the effect of high temperature oil heat treatment on the properties of Moso bamboo[D]. Hangzhou: Zhejiang Agricultural and Forestry University, 2019.

[3] 马淑玲,王雅梅,苏金梅. 油热处理木材的物理力学性能研究[J]. 木材加工机械,2013,24(5):13-16.
MA S L, WANG Y M, SU J M. Study on physical and mechanical properties of oil heat treated wood[J]. Wood Processing Machinery, 2013, 24(5): 13-16.

[4] 赵鑫宇,闫晨光,王开许,等. 热改性与植物油蜡涂饰对臭冷杉早晚材色差的影响[J]. 东北林业大学学报,2022,50(6): 111-116.
ZHAO X Y, YAN C G, WANG K X, et al. Effect of thermal modification and vegetable oil wax coating on color difference of early and late wood of *Abies odora*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(6): 111-116.

[5] DUBEY M K, PANG S, WALKER J. Oil uptake by wood during heat-treatment and post-treatment cooling, and effects on wood dimensional stability[J]. Holz als Roh- und Werkstoff, 2012, 70(1/3):183-190.

[6] CHEN J Y, WANG Y J, CAO J Z, et al. Improved water repellency and dimensional stability of wood via impregnation with an epoxidized linseed oil and carnauba wax complex emulsion[J]. Forests, 2020, 11(3):271.

[7] 顾炼百,丁涛,江宁. 木材热处理研究及产业化进展[J]. 林业工程学报,2019,4(4):1-11.
GU B L, DING T, JIANG N. Research and industrialization progress of wood heat treatment[J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(4): 1-11.

[8] LEE S H, ASHAARI Z, LUM W C, et al. Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review [J]. Con-

struction and Building Materials, 2018.

[9] WANG J Y, COOPER P A. Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood [J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 2005, 63:417-422.

[10] 蔡绍祥,王新洲,李延军. 高温水热处理对马尾松木材尺寸稳定性和材色的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2019,39(1):160-165.
CAI S X, WANG X Z, LI Y J. Effect of high temperature hydrothermal treatment on dimensional stability and color of Masson pine wood[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science), 2019, 39(1): 160-165.

[11] 张孝涛. 低温等离子体改性提高木材表面疏水性机理的研究[D]. 南京:南京林业大学,2016.
ZHANG X T. Study on the mechanism of improving wood surface hydrophobicity by low temperature plasma modification[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2016.

[12] AWOYEMI L, COOPER P A, UNG T Y. In-treatment cooling during thermal modification of wood in soy oil medium: soy oil uptake, wettability, water uptake and swelling properties[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2009, 67(4):465.

[13] 杨燕平,陈坤华,王光野. 冷杉和臭冷杉木材解剖观察[J]. 江苏农业科学,2013,41(4):181-183.
YANG Y P, CHEN K H, WANG G Y. Observation on wood anatomy of *Abies faxoniana* and *Abies odora*[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2013, 41(4): 181-183.

[14] 史蔷,张守攻,吕建雄,等. 落叶松木材改性的研究现状及发展趋势[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(4):210-215.
SHI Q, ZHANG S G, LYU J X, et al. Research status and development trend of larch wood modification[J]. Journal of Central South University of forestry and technology, 2012, 32(4): 210-215.

[15] 吴柳月,刘金炽,莫玉婵,等. 4 种"黑檀"木材解剖构造特征比较[J]. 绿色科技,2022,24(13):96-98,109.
WU L Y, LIU J Z, MO Y C, et al. Comparison of wood anatomical structure characteristics of four kinds of 'ebony'[J]. Green Technology, 2022, 24(13): 96-98, 109.

[16] 牛康任. 改性聚乙烯蜡/石蜡烫蜡木材性能及界面结合机理研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2021.
NIU K R. Study on properties and interfacial bonding mechanism of modified polyethylene wax/paraffin wax treated wood[J]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.

[17] 陈悰,王望,曹金珍. 亚麻油/混合蜡乳液构建木材内双层疏水体系[J]. 林业科学,2021,57(4):124-132.
CHEN Z, WANG W, CAO J Z. Construction of double layer hydrophobic system in wood by linseed oil/mixed wax emulsion[J]. Forestry Science, 2021, 57(4): 124-132.

[18] 高义钦,李元元,任瑞清,等. 弱酸改性对高温热处理杉木结构及性能的影响[J]. 林业工程学报,2021,6(4):49-55.
GAO Y Q, LI Y Y, REN R Q, et al. Effect of weak acid modification on structure and properties of high temperature heat treated Chinese fir[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(4): 49-55.

[19] 孙振炳,李晓宝,姚曜,等. 果胶预处理对杉木耐久性的影响[J]. 西部林业科学,2022,51(1):84-88
SUN Z B, LI X B, YAO Y, et al. The effect of pectin pretreatment on the durability of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(1):84-88.

[20] DUBEY M K, PANG S, WALKER J. Changes in chemistry, color, dimensional stability and fungal resistance of *Pinus radiata* D. Don wood with oil heat-treatment[J]. Holzforschung, 2012, 66(1): 49-57.

[21] 丁涛,顾炼百,蔡家斌. 热处理对木材吸湿特性及尺寸稳定性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(2):143-147.
DING T, GU L B, CHA J B. Effect of heat treatment on hygroscopic properties and dimensional stability of wood[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science), 2015, 39(2): 143-147.

[22] 吕蕾,周亚菲,刘珊杉,等. 热处理对三种木材尺寸稳定性的影响[J]. 林业科技,2020,45(2):51-54.
LYU L, ZHOU Y F, LIU S S, et al. Effect of heat treatment on dimensional stability of three kinds of wood[J]. Forestry Science and Technology, 2020, 45(2): 51-54.

[23] 秦泽秀,张银亮,刘明利,等. 浸渍处理对木材尺寸稳定性影响研究进展[J]. 林产工业,2021,58(12):22-25,38.
QIN Z X, ZHANG Y L, LIU M L, et al. Research Progress on the effect of impregnation treatment on wood dimensional stability[J]. Forest Product Industry, 2021, 58(12): 22-25, 38.

[24] 王婷欢,高晶晶,何正斌,等. 长时低温热处理对速生杨木材颜色及尺寸稳定性的影响[J]. 东北林业大学学报,2022,50(12):83-86.
WANG T H, GAO J J, HE Z B, et al. Effects of long-term low-temperature heat treatment on color and dimensional stability of fast-growing poplar wood[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(12): 83-86.

[25] 孙伟伦,李坚. 高温热处理落叶松木材尺寸稳定性及结晶度分析表征[J]. 林业科学,2010,46(12):114-118.
SUN W L, LI J. Analysis and characterization of dimensional stability and crystallinity of larch wood after high temperature heat treatment[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(12):114-118.

[26] 陈金宇,王望,曹金珍. 植物油改性木材研究进展[J]. 世界林业研究,2020,33(3):26-31.
CHRN J Y, WANG W, CAO J Z. Research progress of vegetable oil modified wood[J]. World Forestry Research, 2020, 33(3): 26-31.