

氮气介质环境中热处理樟子松木材主要性能的变化

齐文玉¹, 刘 偲¹, 陈金明², 吴小莲¹, 杨明月¹, 李吉庆¹, 林金国^{1*}

(1. 福建农林大学 材料工程学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省林业科技推广总站, 福建 福州 350001)

摘 要:以氮气为介质,采用 160℃、180℃、200℃ 3 种不同温度,2、4、6 h 3 种不同时间分别对樟子松木材进行热处理改性,分析热处理前后樟子松材色、尺寸稳定性及力学性能的变化规律,并采用 FTIR 及 XRD 手段分析了其变化机理。结果表明,樟子松木材色差随热处理温度和时间增大而增大,而明度随热处理温度和时间增大逐渐降低,处理材红绿色品指数 a^* 值和黄蓝色品指数 b^* 值均大于未处理材。樟子松木材平衡含水率随热处理温度和时间增大逐渐减小,ASE 和吸湿滞后现象随温度的增大逐渐增大。樟子松木材的顺纹抗压强度、抗弯弹性模量及抗弯强度随热处理强度的增加呈现先增大后降低的趋势,但在 200℃ 下对这 3 个力学性能指标影响均不显著。热处理温度对樟子松材色及尺寸稳定性影响均极显著,热处理时间对樟子松木材明度、黄蓝色品指数 b^* 、色差、平衡含水率和体积湿胀率影响均极显著。研究结果为高品质樟子松热处理木材的生产提供科学依据。

关键词:樟子松木材;氮气热处理;材色;尺寸稳定性;力学性能

中图分类号:S781.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)05-0161-07

Effect of N₂ Heat Treatment on Main Properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Wood

QI Wen-yu¹, LIU Cai¹, CHEN Jin-ming², WU Xiao-lian¹, YANG Ming-yue¹, LI Ji-qing¹, LIN Jin-guo^{1*}

(1. College of Material Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;

2. Forestry Science and Technology Promotion Station of Fujian Province, Fuzhou 350001, Fujian, China)

Abstract: To analyse the change pattern of colour, dimensional stability and mechanical properties before and after heat treated wood under N₂, *Pinus sylvestris* var. *mongolica* wood was heat treated at the temperature of 160℃, 180℃ and 200℃, for 2 h, 4 h and 6 h. FTIR and XRD also were used to analyse the mechanism of these changes. The results showed that with the increase of heat treatment temperature and time, the ΔE^* increased while the L^* , equilibrium moisture content (EMC) decreased. The a^* and b^* of heat treated *Pinus sylvestris* var. *mongolica* wood were bigger than that of untreated one. The hygroscopic hysteresis and anti-swelling efficiency (ASE) increased with the increase of temperature. The compression strength parallel to grain, modulus of elasticity in static bending and bending strength of heat treated *Pinus sylvestris* var. *mongolica* wood increase first then decrease with the increase of thermal proces intensity, but the influence of thermal proces intensity on mechanical properties of thermal *Pinus sylvestris* var. *mongolica* wood is not significant. Treatment temperature has extreme significant on the color, dimensional stability of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* wood after heat treated with N₂. Treatment time has extreme significant on the brightness b^* , ΔE^* and equilibrium moisture content and volume swelling rate of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* wood after heat treated with. The results of this study could provide scientific basis for production of thermal *P. sylvestris* wood with high quality.

收稿日期:2020-10-18 修回日期:2020-11-11

基金项目:福建省科技计划项目(2018S0026);福建农林大学科技创新项目(CXZX2017479)。

作者简介:齐文玉,博士在读。研究方向:木材科学与技术。E-mail:294922022@qq.com

*通信作者:林金国,教授,博士生导师。研究方向:木材科学与技术。E-mail:fjlinjg@126.com

Key words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; N₂ heat treatment; color; dimensional stability; mechanical properties

近年来,随着热带深色木材资源的减少和对热带雨林的保护,红木等稀缺热带深色木材供不应求^[1],为了满足不断变化的装饰木材市场需求,人们越来越重视利用资源丰富的速生木材通过热处理改性生产附加值较高的深色木材,木材热处理已成为国内外木材科学与技术领域的研究热点。木材氮气热处理是在氮气保护隔绝氧气下进行,在产生良好改性效果的同时对木材力学性能的负面影响较小。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是我国东北地区和俄罗斯远东地区主要速生用材树种,资源非常丰富,用途非常广泛。然而,由于樟子松木材尺寸稳定性、外观以及装饰效果不太理想,使其价格偏低^[2]。大部分木材热处理后,原有材色向棕褐色等深色调转变,从而改善了外观和装饰价值;热处理还有利于改善木材的尺寸稳定性和耐久性^[3-4];当然,高温热处理也会一定程度影响木材的力学性能,其中抗弯强度(MOR)受热处理影响较大,而温和的处理条件会提高木材的抗弯弹性模量(MOE),奥克榄(*Aucoumea klaineana*)木材经真空条件下热处理后,MOE、MOR 基本呈现先增大后较小的趋势^[5-6],因此,很有必要通过木材热处理工艺的优化趋利避害,提高木材的使用价值和附加值。迄今为止,关于氮气热处理改性木材方面的研究鲜有报道,本研究以樟子松窑干木材为对象,以氮气为介质,进行热处理改性,研究分析氮气介质环境中热处理樟子松木材材色、尺寸稳定性和力学性能等主要性能的变化规律并探究其变化机理,为高品质樟子松热处理木材的生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以产自俄罗斯的樟子松窑干材为试验原料,将其制成 20 mm×20 mm×20 mm、20 mm×20 mm×30 mm、20 mm×20 mm×300 mm 的无疵试件,初始含水率为 10%±2%。试验仪器设备见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 热处理方法 将樟子松窑干木材分为 9 组,一组为对照,采用双因素法,以氮气为介质,分别在 160℃、180℃、200℃下热处理 2、4、6 h 制备不同的热处理木材。

1.2.2 颜色测定方法 采用国际照明委员会 CIE $L^*a^*b^*$ 标准色度学系统表征颜色变化。在试件弦切面无缺陷、颜色较均匀处取 15 个点为测色点,测

量氮气热处理前后樟子松试件明度 L^* 、红绿轴色品指数 a^* 、黄蓝色品指数 b^* ,记录取其平均值。

表 1 试验主要仪器设备

Table 1 Main equipments used in the experiments

仪器名称	型号	生产厂家
马弗炉	KDF-S80	DENKEN
电子分析天平	BSA224S-CW	北京赛多利斯仪器系统有限公司
测色配色系统	R-201D	美国爱色丽公司
电热恒温鼓风干燥箱	DHG9146A	上海精宏实验设备有限公司
恒温恒湿培养箱	HHS-250B	南京恒裕仪器设备制造有限公司
X 射线衍射仪	XTert Pro MPD	飞利浦公司生产
傅里叶红外光谱仪	Nicolet7199	美国尼高力仪器公司生产
微机控制电子式万能试验机	CWT5504	深圳新三思公司材料检测有限公司

1.2.3 尺寸稳定性测定 参照 GB/T 1934.2—2009《木材湿胀性测定方法》对樟子松热处理前后的湿胀性进行测定,并对抗胀性进行测试^[7]。参照 GB/T 1932—2009《木材干缩性测定方法》对樟子松热处理前后的干缩性进行测定^[8]。参照 GB/T 1931—2009《木材含水率测定方法》对樟子松热处理前后木材的吸湿平衡含水率及解吸平衡含水率进行测定^[9]。

1.2.4 力学性能测定 参照 GB/T 1936.1—2009《木材抗弯强度试验方法》^[10]、GB/T 1936.2—2009《木材抗弯弹性模量测定方法》^[11],对樟子松热处理前后的抗弯强度、抗弯弹性模量进行测试。参照 GB/T 1935—2009《木材顺纹抗压强度试验方法》^[12],对樟子松热处理前后的顺纹抗压强度进行测试。

1.2.5 FTIR 表征 利用 Nicolet6700FT-IR 傅里叶变换红外光谱仪对热处理前后木材进行红外光谱分析,扫描范围 400~4 000 cm⁻¹,分辨率 4 cm⁻¹,频率 16 次。

1.2.6 XRD 表征 采用 X 射线衍射仪对热处理前后樟子松木材样品的结晶度进行分析表征。衍射角范围为 5°~40°(2 θ),扫描 2°·min⁻¹。样品的结晶度指数(CrI)的计算方法根据 Segal 经验法:

$$\text{CrI}/\% = \frac{I_{002} - I_{\text{am}}}{I_{002}} \times 100 \quad (1)$$

式中, I_{002} 为 002 面晶格衍射角的极大强度; I_{am} 为非晶格背景衍射的散射强度。

2 结果与分析

2.1 材色变化

由图 1 可知,在相同温度条件下,随处理时间的延长,樟子松热处理材的明度呈逐渐降低的趋势,红绿色品指数 a^* 值基本不变,黄蓝色品指数 b^* 值逐渐降低;在相同时间条件下,随处理温度升高,樟子松热处理材的明度 L^* 逐渐降低,红绿色品指数 a^* 值和黄蓝色品指数 b^* 值较未处理材都明显升高,但随热处理强度的增加, a^* 先升后降,而 b^* 则逐渐降低。樟子松热处理材的明度较未处理材下降了 10.50%~47.3%,在 200℃ 中处理 6 h 后达到最低值 42.05;樟子松热处理材的红绿色品指数 a^* 值明显大于未处理材,在 200℃ 处理 2 h 达到最大,变化范围为 14.25~12.13;樟子松热处理材黄蓝色品指数在 160℃ 处理 2 h 最高,变化范围为 36.38~22.15。樟子松热处理材黄蓝色品指数 b^* 值随温度的变化规律与蔡绍祥等^[13]对马尾松水热处理的研究结论一致;陈太安等^[14]选用西南桦作为热处理原料,也发现 a^* 与 b^* 都呈现逐渐升高然后降低的趋势,且在 200℃ 达到最大;以往一些研究人员也发现

了其他热处理材相似的材色变化规律^[14-15]。热处理过程中发生的氧化及自缩合(酸性条件)反应是生成深色成分的主要反应类型。红绿色品值 a^* 变化主要是因为热处理过程中发生缩合和降解生成氧化产物,如醌类物质,此类物质吸收红色光的补色光,随上述物质增多,木材逐渐变红。

樟子松木材色差 ΔE^* 随热处理时间的延长和热处理温度的升高均呈逐渐增大的趋势,在 200℃ 处理 6 h 后色差最大,变化范围为 15.22~39.45。热处理 2 h 和 6 h 时,从 160℃ 升至 180℃ 樟子松木材色差 ΔE^* 分别增加了 4.13% 和 7.56%,从 180℃ 升至 200℃ 樟子松木材色差 ΔE^* 分别增加了 10.11% 和 12.74%,表明温度越高对樟子松热处理材色差的影响越大。

对不同温度、不同时间条件下樟子松热处理材的明度、红绿色品指数、黄蓝色品指数和色差进行方差分析,结果表明:热处理温度及时间对明度、黄蓝色品指数 b^* 及色差的影响极显著,热处理时间对红绿色品指数 a^* 的影响不显著,温度及时间的交互作用对明度和色差的影响极显著(表 2)。

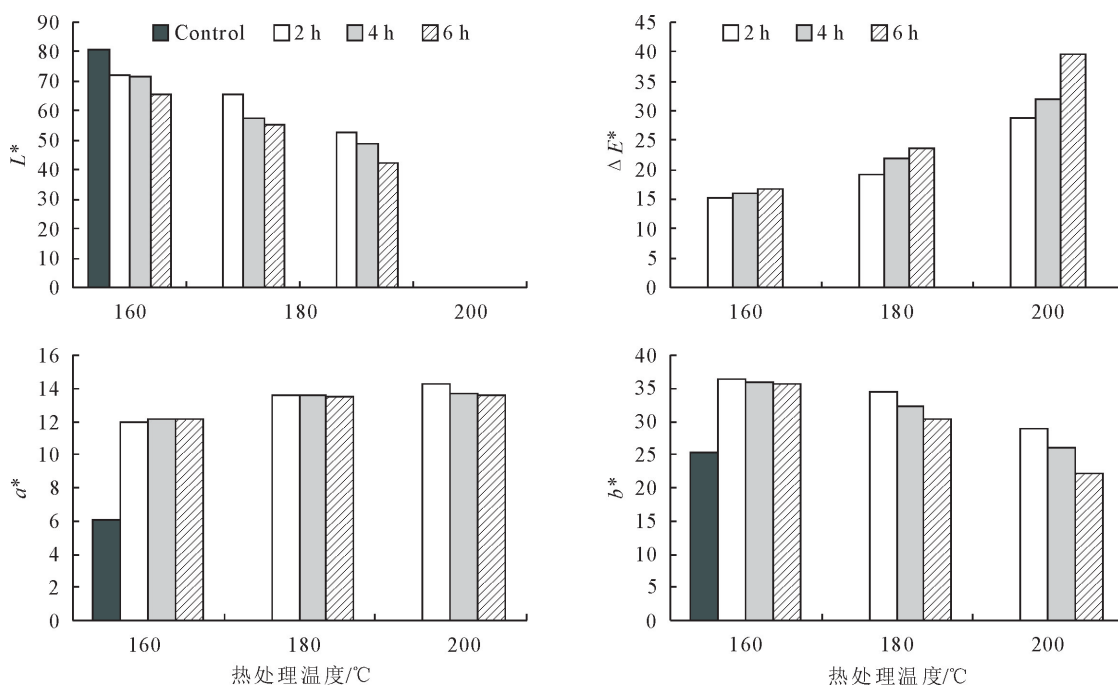


图 1 氮气热处理樟子松木材的颜色变化

Fig. 1 Color changes of *P. sylvestris* var. *mongolica* wood after heat treatment with N_2

2.2 尺寸稳定性的变化

2.2.1 平衡含水率的变化 由图 2 可知,樟子松木材经热处理后,木材的平衡含水率随温度上升和时间延长均呈下降趋势,且热处理温度比时间对樟子松热处理材平衡含水率的影响更大。随热处理时间和温度的增加,解吸含水率大于吸湿含水率的吸湿

滞后现象明显加强,这与 Z. Y. Fu et al^[16]对其他热处理材的研究结论一致。200℃ 处理 6 h 后,解吸含水率由未处理前的 11.29% 下降到 9.52%,降低了 15.68%;吸湿含水率从未处理前的 8.45% 下降到 4.97%,降低了 41.18%。蔡绍祥等^[13]发现马尾松木材在 200℃ 蒸气介质中处理 5 h 的平衡含水率由

11.5%降低至 6.03%，减少了 47.56%。

对不同温度、不同时间条件下氮气热处理樟子松木材的平衡含水率进行方差分析,结果表明:温度、时间及两者交互作用对氮气热处理樟子松木材平衡含水率的影响均极显著(表 3)。

2.2.2 干缩湿胀性的变化 由表 4 可见,经氮气热处理后樟子松木材的尺寸稳定性随热处理程度的加剧而逐渐提高,各向湿胀率均降低,径向湿胀性小于弦向湿胀性,抗胀率提高,这与其他研究者结果相似^[17-19]。樟子松热处理材弦向湿胀率最大减少了

33.43%，径向湿胀率最大减少了 32.62%，体积湿胀率最大减少了 30.22%；樟子松热处理材弦向干缩率从 8.24%降至 6%，径向干缩率从 3.69%降至 2.60%，体积干缩率从 11.8%降至 8.88%。樟子松木材抗胀率经热处理后明显提高,最高为 30.25%。这是由于木材热处理过程中,易吸收水分的半纤维素率先发生热降解,其次为纤维素,最后为木质素。半纤维素相对含量降低,同时热解形成糠醛聚合物,其吸湿性比半纤维素低,在水中膨胀较小,所以其尺寸稳定性提高。

表 2 氮气热处理樟子松木材颜色的方差分析

Table 2 ANOVA for color CIE L*a*b* of *P. sylvestris* var. *mongolica* wood after heat treatment with N₂

因素	明度 L*		红绿色品指数 a*		黄蓝色品指数 b*		色差 ΔE*	
	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.
时间	23.689	0.000	0.482	0.619	6.962	0.001	13.345	0.000
温度	140.155	0.000	3.173	0.045	63.166	0.000	131.725	0.000
时间*温度	1.923	0.109	0.830	0.508	2.281	0.062	3.758	0.006

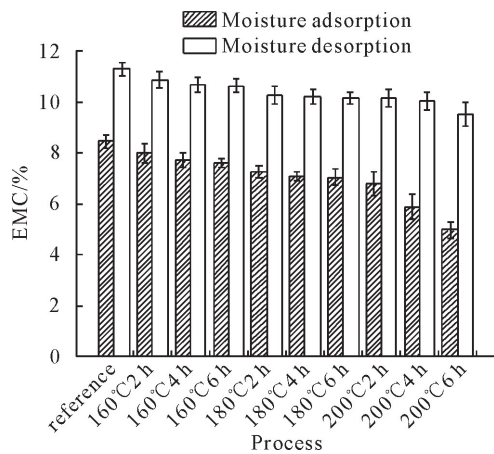


图 2 氮气热处理樟子松木材的平衡含水率

Fig.2 EMC of *P. sylvestris* var. *mongolica* wood before and after heat treatment with N₂

表 3 氮气热处理樟子松木材平衡含水率方差分析

Table 3 ANOVA for EMC of *P. sylvestris* var. *mongolica* wood after heat treated with N₂

差异源	Ⅲ型平方和	df	均分	F	Sig.
截距	6 897.311	1	6 897.311	49 912.523	0.000
温度	84.050	2	42.025	304.115	0.000
时间	13.171	2	6.585	47.655	0.000
温度*时间	14.674	4	3.669	26.548	0.000
误差	19.070	138	0.138		
校正总计	140.507	146			

对不同温度、不同时间条件下樟子松氮气热处理材的湿胀率进行方差分析(表 5),结果表明:在 200℃以下氮气热处理温度对樟子松木材尺寸稳定性影响极显著,热处理时间对体积吸湿率影响极显著,时间及温度的交互作用对湿胀性影响不显著。

2.3 力学性能的变化

樟子松木材氮气热处理温度<200℃时,顺纹抗压强度随热处理时间延长呈现先增后减的趋势,并在 160℃处理 6 h 后达到最大,较未处理材增大 19.25%;而当温度>200℃后,呈现逐渐降低的趋势,并在处理 6 h 后达到最低,较未处理材降低 9.64%(图 3)。氮气热处理后樟子松木材的抗弯弹性模量较未处理前大,随热处理强度增加其弹性模量先增后降,在 180℃处理 4 h 后达到最大,较未处理材增加 39.83%(图 4)。氮气热处理后樟子松木材的抗弯强度在温度>180℃时,呈现逐渐降低的趋势,在 200℃下处理 6 h 时将至最低,较未处理材降低 19.95%;在 160℃下,随热处理时间增加呈现先增加后降低的趋势,在处理 4 h 时达到最大,较未处理材增大 9.15%(图 5)。对不同温度、不同时间条件下樟子松氮气热处理材的力学性能进行方差分析(表 6),结果表明:在 200℃以下氮气热处理温度及时间对樟子松木材力学性能影响均不显著。

2.4 FTIR 分析

1 737 cm⁻¹ 特征峰归属于 C=O 双键伸缩振动,其峰值随热处理温度升高而逐渐增强,说明热处理樟子松木材中羰基数量随热处理温度升高而增加,这可能是由于在酸性条件下木材细胞壁物质中木质素发生酯化作用,使吸水性较强的羟基数量减少、吸水性较弱的羰基数量增多^[20];1 510 cm⁻¹ 特征峰为芳香族骨架的 C=C 振动,1 031 cm⁻¹ 峰值逐渐增加,一般也归属于 C-O 伸缩振动(图 6、表 7)。I 1510/I 1372、I 1510/I 1163 反映了综纤维素含量,随热处理温度逐渐升高,其值稍有增加后逐

渐降低; I 895/ I 1425、I 895/ I 1507 反映了纤维素的相对含量,随热处理温度升高呈现先升高而后逐渐下降的趋势。木材综纤维素逐渐降低、纤维素逐渐升高说明半纤维素发生降解,热处理后木材成分中吸湿性最好的半纤维素发生降解,有效降低了木材平衡含水率,提高了木材抗胀性^[21-23]。1 058

cm⁻¹ 特征峰为纤维素或半纤维素中的 C-O 伸缩振动, I 1058/ I 1425 反映了木质素的相对含量,随热处理温度逐渐升高,其相对值逐渐增加,而木材中发色基团大多存在于木质素内,其中羰基作为主要发色基团,其峰值也有增高趋势,这 2 种变化是导致木材颜色加深的主要原因^[24]。

表 4 氮气热处理前后樟子松木材的湿胀性和干缩性

Table 4 Swelling and shrinkage of *P. sylvestris* var. *mongolica* wood before and after heat treatment with N₂

热处理条件	湿胀率				干缩率/%		
	弦向/%	径向/%	体积/%	ASE	弦向	径向	体积
未处理材	9.60	3.74	14.36	—	8.24	3.69	11.80
160℃, 2 h	8.81	3.24	12.73	11.34	8.16	3.54	11.68
160℃, 4 h	8.81	3.16	12.57	12.44	8.15	3.37	11.56
160℃, 6 h	8.77	3.08	12.35	14.00	7.98	3.34	11.53
180℃, 2 h	7.92	3.08	12.21	14.95	6.84	3.37	10.60
180℃, 4 h	7.82	2.99	12.05	16.09	6.80	3.13	10.44
180℃, 6 h	7.51	2.82	11.75	18.19	6.79	3.01	10.17
200℃, 2 h	6.94	2.76	11.23	21.83	6.65	2.79	9.39
200℃, 4 h	6.87	2.69	10.23	28.79	6.49	2.74	9.34
200℃, 6 h	6.39	2.52	10.02	30.25	6.00	2.60	8.88

表 5 氮气热处理樟子松木材湿胀性的方差分析

Table 5 ANOVA for swelling of *P. sylvestris* var. *mongolica* wood after heat treatment with N₂

因素	弦向湿胀率		径向湿胀率		体积湿胀率		ASE	
	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.
时间	1.316	0.272	1.188	0.310	7.406	0.001	0.953	0.389
温度	34.316	0.000	5.911	0.004	7.406	0.001	12.162	0.000
时间 * 温度	1.316	0.272	1.188	0.310	0.092	0.985	0.483	0.748

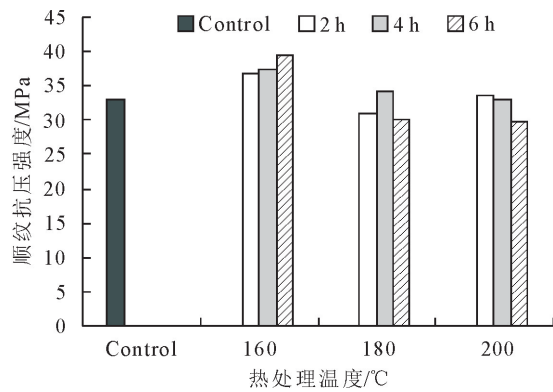


图 3 氮气热处理樟子松木材的顺纹抗压强度

Fig. 3 Compression strength parallel to grain for *P. sylvestris* var. *mongolica* wood before and after heat treatment with N₂

表 6 氮气热处理樟子松木材力学性能的方差分析

Table 6 ANOVA for mechanical property of

P. sylvestris var. *mongolica*

wood after heat treatment with N₂

因素	顺纹抗压强度		抗弯弹性模量		抗弯强度	
	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.
时间	1.242	0.272	1.214	0.302	1.535	0.258
温度	17.587	0.293	0.619	0.541	0.193	0.828
时间 * 温度	3.696	0.007	1.401	0.24	0.066	0.991

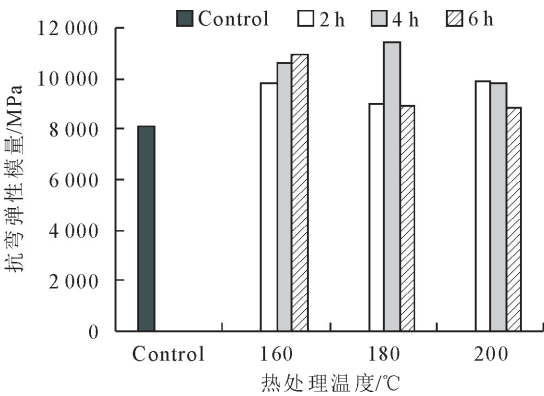


图 4 氮气热处理樟子松木材的抗弯弹性模量

Fig. 4 Modulus of elasticity in static bending for *P. sylvestris* var. *mongolica* wood before and after heat treatment with N₂

2.5 XRD 分析

氮气热处理后,樟子松木材的结晶度略有提高(表 8)。在 200℃处理 6 h 时达到峰值,从未处理的 35.32%增加到 41.12%,增加了 16.42%。结晶度的增加是木材吸湿性降低和尺寸稳定性提高的重要原因。氮气热处理导致樟子松木材结晶度增加的原因是纤维素非结晶区分子链上的羟基相互结合以去除水分,从而使微纤丝之间的排列更加紧密,非结晶

区的微纤丝向晶态方向有序,从而提高了木材的纤维素结晶度。木材具有干缩湿胀性是由于木材在失水或吸湿时,木材内所含水分向外蒸发,或干木材从空气中吸收水分,使细胞壁内非结晶区的相邻纤维

丝,微纤丝间水层变薄或消失而靠拢或变厚而伸展,从而导致细胞壁乃至整个木材尺寸或体积发生变化。结晶度的增加使得非结晶区亲水羟基减少,导致木材吸湿性降低、尺寸稳定性提高。

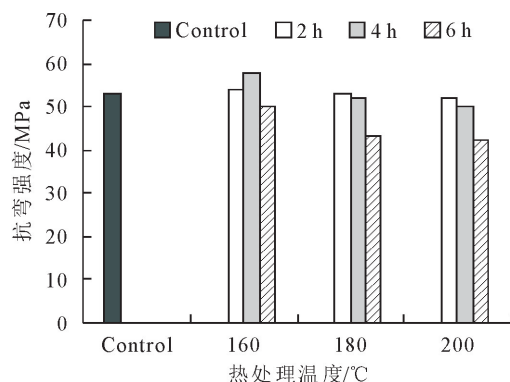


图5 氮气热处理樟子松木材的抗弯强度

Fig. 5 Bending strength of *P. sylvestris* var. *mongolica* wood before and after heat treatment with N_2

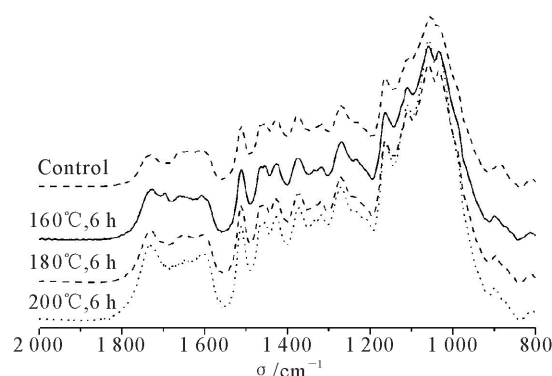


图6 樟子松热处理材及对照材红外光谱分析

Fig. 6 FTIR spectra of *P. sylvestris* var. *mongolica* woods with/without the heat treatment with N_2

表7 氮气热处理樟子松木材红外吸收强度

Table 7 Absorbance ratios of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* wood after heat treatment with N_2

处理条件	I_{1058}/I_{1425}	I_{1510}/I_{1372}	I_{1510}/I_{1163}	I_{895}/I_{1425}	I_{895}/I_{1507}
未处理材	2.527 965	0.848 037 74	0.549 028 53	0.299 411	0.337 081
160°C, 6 h	2.546 15	0.858 944 26	0.550 189 39	0.312 139	0.338 969
180°C, 6 h	2.607 735	0.849 130 81	0.539 776 99	0.319 397	0.349 606
200°C, 6 h	2.707 972	0.834 286 43	0.530 339 95	0.315 459	0.347 846

表8 樟子松热处理材及对照材 XRD 分析

Table 8 XRD analysis of *P. sylvestris* var. *mongolica* wood before and after heat treatment with N_2

处理条件	002 晶面角	相对结晶度
未处理材	22.16	35.32%
160°C, 6 h	22.2	35.43%
180°C, 6 h	22.2	40.70%
200°C, 6 h	22.32	41.12%

3 结论

樟子松氮气热处理材的颜色随热处理强度增加逐渐加深,热处理温度及时间对明度、黄蓝色品指数 b^* 及色差影响均极显著。

樟子松氮气介质环境中热处理材的平衡含水率随热处理温度升高、时间延长而逐渐降低。樟子松氮气介质环境中热处理材尺寸稳定性随热处理强度的增加而逐渐提高,各项湿胀率均降低,抗胀率提高。

樟子松木材经氮气介质环境中热处理后,顺纹抗压强度、抗弯弹性模量及抗弯强度随热处理强度增加呈先增加后降低的趋势,200°C 以下氮气热处理对樟子松木材力学性能影响不显著。

樟子松氮气介质环境中热处理材半纤维素的特

征峰强度下降,而纤维素和木质素特征峰强度上升,羰基峰增加,导致木材尺寸稳定性提高和颜色加深。樟子松氮气介质环境中热处理材半纤维素相对含量降低及结晶度增加是其尺寸稳定性提高的重要原因。

参考文献:

- [1] 罗春茂. 关于我国濒危木材物种进口贸易管理的思考[J]. 国家林业局管理干部学院学报, 2019, 18(1): 35-39, 43.
- [2] 孙龙祥, 赵有科, 吕建雄, 等. 热处理温度与时间对樟子松木材颜色的影响[J]. 木材工业, 2014, 28(6): 16-19.
SUN L X, ZHAO Y K, LÜ J X, et al. Effects of heat treating temperature and time on color of *Pinus sylvestris* wood[J]. China Wood Industry, 2014, 28(6): 16-19. (in Chinese)
- [3] 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 L B, DING T, JIANG N. Development of wood heat treatment research and industrialization[J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(4): 1-11. (in Chinese)
- [4] 朱捷, 张洋, 贾翀. 水热及高温处理工艺对杨木表面润湿性能的影响[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 256-259.
ZHU J, ZHANG Y, JIA C. Effects of thermal or hydrothermal treatment on the wettability of fast-growing poplar timber[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 256-259. (in Chinese)
- [5] 周亚琴, 薛紫芬, 黄琼涛, 等. 真空热处理对家具用奥克榄木材物理力学性能的影响[J]. 林业工程学报, 2020, 5(4): 73-78.

- ZHOU Y Q, XUE Z Q, HUANG Q T, *et al.* Physical and mechanical properties of *Aucoumea klaineana* wood after vacuum heat treatment for furniture components[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2020, 5(4): 73-78. (in Chinese)
- [6] 陈康乐, 冯德君, 张英杰, 等. 高温热处理对木材力学性能的影响[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(5): 164-166, 268.
- CHEN K L, FENG D J, ZHANG Y J, *et al.* Effects of high temperature treatment on mechanical properties of wood[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(5): 164-166, 268. (in Chinese)
- [7] 中国国家技术监督局. 木材湿胀性测定方法: GB/T1934. 2-2009[S]. 北京: 中国标准出版社. 2009.
- [8] 中国国家技术监督局. 木材干缩性测定方法: GB/T1932-2009[S]. 北京: 中国标准出版社. 2009.
- [9] 中国国家技术监督局. 木材含水率测定方法: GB/T1931-2009[S]. 北京: 中国标准出版社. 2009.
- [10] 中国国家技术监督局. 木材抗弯强度试验方法: GB/T 1936. 1-2009[S]. 北京: 中国标准出版社. 2009.
- [11] 中国国家技术监督局. 木材抗弯弹性模量测定方法: GB/T 1936. 2-2009[S]. 北京: 中国标准出版社. 2009.
- [12] 中国国家技术监督局. 木材顺纹抗压强度试验方法: GB/T 1935-2009[S]. 北京: 中国标准出版社. 2009.
- [13] 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. The size stability and color change of *Pinus massoniana* wood by high temperature hydrothermal treatment[J]. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Science*, 2019, 39(1): 160-165. (in Chinese)
- [14] 陈太安, 王昌命, 曾金水, 等. 高温热处理对西南桦材色的影响[J]. *西南林业大学学报*, 2012, 32(1): 79-82, 87.
- CHEN T A, WANG C M, ZENG J S, *et al.* Impact of heat treatment on color of *Betula alnoides* wood[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2012, 32(1): 79-82, 87. (in Chinese)
- [15] DANICA KAČÍKOVÁ, FRANTIŠEK KAČÍK, IVETA ČABALOVÁ, *et al.* Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood[J]. *Biore-source Technology*, 2013, 144: 669-674.
- [16] FU Z Y, ZHOU Y D, GAO X, *et al.* Changes of water related properties in radiata pine wood due to heat treatment[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116692.
- [17] OKON, KUFRE, EDET, *et al.* Modification of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* L.) wood by silicone oil heat treatment with micro-wave pretreatment[J]. *European Journal of Wood & Wood Products*, 2018, 76(1): 221-228.
- [18] 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 heat-treated *Larix* spp. [J]. *Scientia Silvae sinicae*, 2010, 46(12): 114-118. (in Chinese)
- [19] 严悦, 李凤龙, 张坤, 等. 高温热处理红松和橡胶木的尺寸稳定性及涂饰性能[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(2): 45-48.
- YAN Y, LI F L, ZHANG K, *et al.* Dimensional stability and finishing performance of heat-treated *Pinus koraiensis* and *Rubber* wood [J] *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(2): 45-48. (in Chinese)
- [20] 冯德君, 赵泾峰. 热处理木材吸湿性及尺寸稳定性研究[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(2): 200-202.
- FENG D J, ZHAO J F. Heat treatment of wood hygroscopicity and dimensional stability[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(2): 200-202. (in Chinese)
- [21] 李贤军, 刘元, 高建民, 等. 高温热处理木材的 FTIR 和 XRD 分析[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(Supp. 1): 104-107.
- LI X J, LIU Y, GAO J M, *et al.* Characteristics of FTIR and XRD for wood with high-temperature heating treatment[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(Supp. 1): 104-107. (in Chinese)
- [22] 丁涛, 彭文文, 李涛. 基于 FT-IR 和 XPS 的热处理白蜡木材色变化机理[J]. *林业工程学报*, 2017, 2(5): 25-30.
- DING T, PENG W W, LI T. Mechanism of color change of heat-treated white ash wood by means of FT-IR and XPS analyses[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2017, 2(5): 25-30. (in Chinese)
- [23] 苏明垒, 刘苍伟, 王玉荣, 等. 基于 X 射线剖面密度仪和 FTIR 快速测定两种实木地板材的物理化学性能[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(10): 3048-3052.
- SUN M L, LIU C W, WANG Y R, *et al.* Rapid determination of physical and chemical properties of two kinds of solid floor woods with XRD and FTIR approaches[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(10): 3048-3052. (in Chinese)
- [24] 姚晴, 蔡家斌. 新西兰辐射松高温热处理颜色变化研究[J]. *林产工业*, 2018, 45(4): 15-21.
- YAO Q, CAI J B. Study on effects of heat treatment process on the color of radiata pine[J]. *China Forest Products Industry*, 2018, 45(4): 15-21. (in Chinese)