

# PEG400 预处理枫桦圆盘干燥特性研究

杨亮庆<sup>1</sup>, 刘一星<sup>2</sup>, 蔡英春<sup>2</sup>

(1. 黑龙江省木材科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150081;

2. 东北林业大学 生物质材料科学与工程教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:**将木材加工成圆盘是扩大木材、尤其是低质材应用范围,提高其经济价值的一条有效途径。为解决圆盘干燥过程中易于出现的开裂问题,以人工林枫桦圆盘为研究对象,采用 PEG400 溶液进行预处理,研究了处理对圆盘干燥特性的影响,并对 PEG400 抑制圆盘开裂的机理进行了分析。结果表明:该处理方法可使圆盘在 40 mm 厚枫桦锯材干燥基准条件下获得良好的干燥质量,提高了对干燥条件的适应性,很好地解决了圆盘的干燥问题;对径向表层含水率梯度产生明显影响;指出处理后弦径向干缩系数间差值的变小是 PEG400 抑制圆盘开裂的主要机制。

**关键词:**PEG400;预处理;枫桦圆盘;干燥开裂

**中图分类号:**S781.71

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2013)04-0153-05

## Drying Characteristics of *Betula costata* Disk Pretreated with PEG400

YANG Liang-qing<sup>1</sup>, LIU Yi-xing<sup>2</sup>, CAI Ying-chun<sup>2</sup>

(1. Heilongjiang Institute of Wood Science, Harbin, Heilongjiang 150081, China; 2. Key Laboratory of Bio-based Material Science and Technology of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

**Abstract:** In order to expand the application extent of the woods with low quality, and to promote their economic values, one of the effective ways is to process them into disk-shaped timber (DST). However, DST is easy to be cracked during drying. To solve the problem, a solution called PEG400 was applied for the pretreatment before making the *Betula costata* DST. The influences of the pretreatment on the drying characteristics of *B. costata* DST were examined. The mechanism of preventing the occurrence of the cracking was discussed. The results showed that drying quality of pretreated DST with a thickness of 40 mm was satisfactory. The adaptability for the drying conditions was promoted after the pretreatment. The pretreatment significantly affected radial moisture content gradient. To diminish D-value of shrinkage coefficient between radial and tangential direction was the major function of restraining cracking by PEG400.

**Key words:** PEG400; pretreatment; *Betula costata*; drying cracking

如何高效利用因径级、弯曲和轴向长度等因素导致锯材出材率低而难以有效应用的原木以及提高该类木材的经济价值成为一个重要的问题<sup>[1]</sup>。将木材加工成圆盘是有效利用这类木材的重要途径,圆盘通过将原木横向锯切制得,依据自身截面上独有的物理加工特性和纹理图案,可用于菜墩、立木地板和工艺品等的加工,集功能性与艺术性于一身,利于产品自身技术含量和文化价值的提高,从而可获得

高附加值,是有效提高木材经济价值的一条途径。但是木材圆盘的干燥要远难于锯材,因为干燥中会出现严重的开裂。因此对木材圆盘要采用特殊的干燥工艺和方法。

针对圆盘干燥开裂问题,国内外学者进行了相关研究和探索,将开裂的产生归结为木材弦向、径向干缩不一致而产生的干燥应力<sup>[2-5]</sup>。由此提出采用聚乙二醇(Polyethylene Glycol,简称 PEG)预处理

枫桦圆盘的设想。改性木材的研究表明 PEG 是化学品中最佳的木材膨胀剂,能够显著改善木材的尺寸稳定性<sup>[6-8]</sup>,而且 PEG 多用于食品添加剂和药品胶囊方面,具有绿色环保特点。这就为解决圆盘干燥开裂问题提供了可能,但 PEG 在木材圆盘方面的应用研究尚属空白,有必要开展 PEG 预处理圆盘干燥特性及影响机理方面的研究。

为促进 PEG 在木材内的扩散,缩短预处理时间,提高改性效果,在考虑成本的基础上,采用 PEG400 溶液预处理枫桦圆盘。该方法操作简单,常温常压下通过浸泡处理即可实现,无需特殊设备。首先研究了 PEG400 处理的不同处理时间对枫桦圆盘干燥特性的影响,证实该方法可在快速干燥过程中获得良好的干燥质量。之后通过 PEG400 预处理对木材干燥后径向上分层含水率、弦径向干缩差异的影响,分析了 PEG400 预处理获得良好干燥质量的机理。提出建立评价预处理对干燥质量影响新的分析依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料和设备

试材树种为人工林枫桦(*Betula costata*),采自黑龙江省铁力林业局,圆盘直径为 20~22 cm,刨光厚度为 2.5 cm。将圆盘保存在冷库中,以保持生材圆盘的含水率。干燥前去皮,平均初含水率为 80%。PEG400(化学纯,天津科密欧化学试剂有限公司)。

干燥设备为苏州鑫达公司产 DS-408 恒温恒湿干燥箱。

### 1.2 试验方法

根据 PEG 处理木材的研究,浸渍浓度 30% 时处理效果最为显著<sup>[9-10]</sup>。配置该浓度的 PEG400 溶液,搅拌至全部溶解,将圆盘全部浸入。由于 PEG400 在圆盘内以顺纹扩散为主,因此在毛细管作用和扩散作用下,PEG400 在细胞腔和细胞壁内扩散较快<sup>[11]</sup>,不需任何辅助设备,常温常压下处理即可,工艺简单,易于实现。为确定处理时间对干燥质量影响,将处理时间分别设定为 3、6、12、24 h,之后取出放置 0.5 h,除去圆盘表面附着水分,降低试验误差。

为保证干燥质量,干燥基准以 LY/T 1068-2002 中 40 mm 厚枫桦锯材干燥基准为基础进行制定(表 1)。干燥基准调整根据未处理圆盘含水率变化进行。

圆盘径向各部位含水率测试试件按图 1 进行锯

表 1 干燥基准

Table 1 Drying schedule

含水率 MC/%	>50	50~40	40~30	30~25	25~20	<20
干球温度/℃	57	60	62	65	70	72
干湿球温差/℃	4	4	5	8	10	12

切,由髓心至树皮方向依次进行标记。因髓心不属于木质部部分,物理特性具有特殊性,对其不予考虑。在圆盘横截面上按照年轮数量对小试件进行划分,因偏心的缘故,不同径向位置上制得的试件尺寸并不一致。径向各物理参数数据为不同径向位置数据的平均值,以更好反应木材物理特性径向变化。

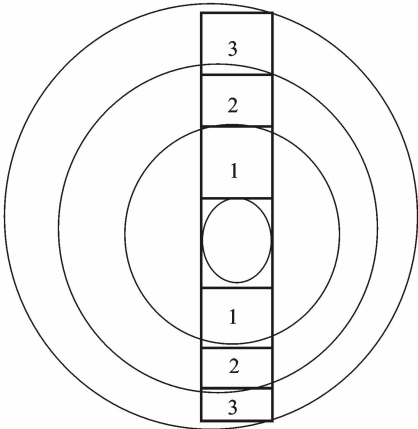


图 1 圆盘径向试件制取示意图

Fig. 1 Schematic of saw cutting in disk radial direction

## 2 结果与分析

### 2.1 可见干燥质量分析

PEG400 预处理枫桦圆盘旨在解决干燥中的开裂问题。试验结果表明,PEG400 预处理在 40 mm 厚枫桦锯材干燥基准快速干燥条件下可解决圆盘的干燥开裂问题。对处理 3、6、12 h 和 24 h 的圆盘进行对比干燥测试表明,该干燥基准下,预处理 6、12 h 和 24 h 的圆盘均可获得较好干燥质量,无裂纹出现。预处理 3 h 的圆盘则干燥质量较差,有较多径向裂纹出现,裂纹长 1~2 cm,宽 1 mm 左右。因此建议在该干燥基准下进行干燥的圆盘预处理时间以不低于 6 h 为宜,当干燥条件发生变化时预处理时间需相应调整。

在对木材的改性处理中,一些处理会引起木材材色的变化,PEG400 处理圆盘干燥亦如此。对照干燥后未处理圆盘发现,尽管 PEG 处理后木材材色略微变深,但这却使得枫桦早晚材区别更为明显,纹理更为清晰。通常枫桦未处理圆盘干燥后早晚材材色变化并不明显,因此 PEG400 处理更易突出枫桦圆盘横截面上的美观特性和可观赏性。

2.2 干燥曲线与干燥速率

图 2 为 PEG400 处理 12 h 枫桦圆盘与未处理圆盘在表 1 干燥基准下的干燥曲线、干燥速率图。从图可知,处理后圆盘初含水率下降,这与 PEG400 对水分子的置换作用有关<sup>[11]</sup>。将处理圆盘的含水率由 78.7%干燥至 10.4%时需要 46 h,而将未处理圆盘的含水率由 82%干燥至 9.6%时需要 42 h,说明处理后圆盘干燥速率下降。由于干湿球温度的调整根据未处理圆盘含水率情况进行,这就使得在相同含水率阶段处理圆盘的干燥基准相比未处理圆盘偏硬。即便如此,处理圆盘的干燥周期仍大于未处理圆盘,表明 PEG400 的存在对木材内水分的移动产生了一定的阻碍作用。究其原因,由于 PEG400 含有的羟基等亲水基团较少,与水分子结合能力较弱,因此其对木材内水分移动速度的影响主要与改变木材微观构造有关。研究表明,PEG 可与木材复杂成分通过氢键结合,相互吸附,从而较稳定地附着在细胞壁及纹孔上,甚至渗入到木材纹孔中<sup>[12]</sup>,使水分移动通道变小或者堵塞,阻碍水分子的移动。

在该干燥基准下,未处理圆盘平均干燥速率为  $1.72\% \cdot \text{h}^{-1}$ ,PEG400 处理 12 h 圆盘平均干燥速率为  $1.48\% \cdot \text{h}^{-1}$ ,明显低于未处理圆盘。在干燥窑内相同环境条件下,未处理材水分移动速率一直高于处理材,直到未处理材含水率降到纤维饱和点以内时两者速率才基本持平。此时处理圆盘与未处理圆盘含水率差值达到最大值,之后直到干燥结束,处理材干燥速率开始高于未处理材(图 2)。这与木材内水分移动机制变化密切相关。随着木材表层含水率下降至纤维饱和点(FSP)以下,木材心层下降至 FSP 前,表层结合水与水蒸气扩散机制和心层自由水渗透机制共同影响着木材内部水分移动,随后的干燥过程则将完全由扩散机制控制<sup>[13]</sup>。未处理材进入 FSP 以后水分移动方式的变化相当于处理材中 PEG400 对木材水分移动的影响,使之干燥速率下降,进而出现在 FSP 附近干燥速率趋于接近的现象。处理材含水率进入 FSP 以内后,水分子移动方式使其受木材微构造变化的影响减弱,而此时含水率却明显高于未处理材,从而出现干燥后期处理材干燥速率高于未处理材的现象。说明 PEG400 预处理对水分移动影响主要发生在自由水移动阶段,对结合水移动的影响较小。

总之,在该干燥基准下,PEG400 处理的枫桦圆盘可获得良好的干燥质量,干燥周期较未处理的对照圆盘仅增加 10%左右。尽管处理会对木材内

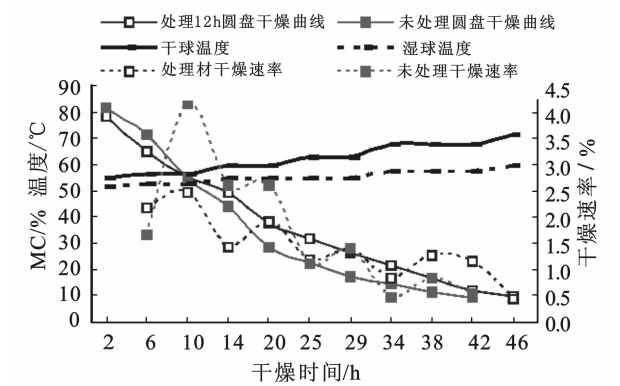


图 2 PEG400 处理圆盘与未处理圆盘干燥曲线与干燥速率

Fig. 2 Drying curve and drying rate of tree disks and non-treated PEG400

水分的移动产生影响,但也使圆盘对于干燥条件的适应性增强,干燥质量对于干燥条件的敏感性下降,即干燥条件波动时不会有开裂或明显的开裂产生,更易保证干燥质量。

2.3 预处理时间对圆盘干燥参数影响

表 2 为未处理圆盘和不同预处理时间(6、12、24 h)处理圆盘在 46 h 干燥前后的干燥参数及增重率(WPG)。处理时间是影响 PEG400 进入量的重要因素,随着处理时间的延长,PEG400 进入量呈逐步增加趋势,体现为木材增重率的变化(表 2)。由于圆盘初含水率较高,木材内水分与 PEG400 进行着等体积交换<sup>[9]</sup>,随着处理时间延长 PEG400 进入量增加,木材初含水率呈现出下降趋势,2 项干燥参数具有负相关性。通过木材的毛细管效应<sup>[14]</sup>,PEG400 在木材微构造上不断附着、填充,部分导管、纹孔、毛细管等水分移动通道变小甚至堵塞,空隙比率下降,水分渗透性下降,因此出现处理圆盘干燥时间延长,平均干燥速率下降的情况。最终结果是在相同干燥条件和干燥时间下,处理时间越长,圆盘终含水率越高,干燥周期越长。

表 2 处理时间对圆盘干燥参数及增重率(WPG)影响数据

Table 2 Experimental data of disk drying parameter and WPG in different processing time				
处理时间	初含水率	干燥速率	终含水率	增重率
/h	/%	/%	/%	/%
0	82.55	1.63	7.61	0.00
6	80.78	1.56	8.77	9.26
12	78.67	1.48	10.42	13.71
24	72.26	1.28	13.23	21.01

2.4 预处理对分层含水率影响

占剑锋<sup>[15]</sup>等在研究木材干燥应力变化规律时指出,木材内部的干燥应力主要是由含水率梯度和

各向异性即弦径向干缩差异产生的残余应力引起。因此从含水率梯度和各向异性入手分析 PEG400 预处理抑制枫桦圆盘干燥开裂机理。表 3 为干燥后处理圆盘和未处理圆盘径向各部位表层含水率、心层含水率及含水率梯度,其中“均值”为径向各部位含水率的平均值。由边材位置至髓心径向上,未处理圆盘心层和表层终含水率均呈增大趋势,处理后这一趋势并未发生明显变化,但含水率较处理前均变大,尤其是心层含水率增大更为明显,导致心表层含水率梯度显著增大,均值增大约 60%。木材心表层终含水率梯度反映了木材干燥应力情况,直接影响到干燥质量。终含水率梯度越大,干燥应力越大,木材越易产生开裂。因此,PEG400 处理加剧了木材心层和表层的不一致干缩,不利于抑制圆盘的干燥开裂。从该角度看,PEG400 处理在抑制圆盘开裂中产生了反作用,表明含水率梯度不是 PEG400 预处理抑制圆盘开裂的机制。

表 3 处理材与未处理材径向分层含水率  
Table 3 Layered MC of treated and untreated disk  
in radial direction %

处理	径向试件位置	3	2	1	均值
未处理	心层	9.61	10.61	11.59	10.60
	表层	8.84	9.49	10.11	9.48
	含水率梯度	0.59	0.86	1.15	0.87
PEG400 处理	心层	9.62	12.46	12.53	11.54
	表层	8.70	10.02	10.15	9.62
	含水率梯度	0.71	1.88	1.83	1.47

2.5 预处理对干缩系数影响

表 4 为处理前后弦径向干缩系数变化情况,从该表可知,PEG400 处理对木材弦向干缩系数( $Y_T$ )和径向干缩系数( $Y_R$ )均产生显著影响,其中  $Y_T$  下降了 55%, $Y_R$  下降了 59%,体现出 PEG400 良好的充胀性能。PEG400 因为分子量较小,可通过扩散进入细胞壁部分微孔隙中,从而在预处理及干燥过程中附着填充在这些空隙和细胞壁上,产生膨胀效应,起到抑制细胞壁干缩的作用,进而改变木材的干缩性能<sup>[11]</sup>。

表 4 处理材、未处理材干缩系数对照  
Table 4 Contrast diagram of drying shrinkage coefficient  
for treated and untreated disk

项目	PEG400 处理材		未处理材	
	径向( $Y_R$ )	弦向( $Y_T$ )	径向( $Y_R$ )	弦向( $Y_T$ )
干缩系数( $Y$ )	0.06	0.113	0.147	0.250
$Y_T/Y_R$	1.88		1.70	
$Y_T-Y_R$	0.053		0.103	

木材弦径向的不一致干缩是导致圆盘干燥开裂的重要原因<sup>[2,6]</sup>,基于这一理论,根据木材圆盘独特

的几何外形(近似为圆形),在忽略其他因素影响下,可以推测木材弦径向的不一致干缩(径向干缩明显小于弦向)会使圆盘在圆周方向上产生干缩应变,而干缩应变大小与弦径向干缩差异程度密切相关,差值越大,干燥应变越大,圆盘开裂的可能性就越大。反之,干燥应变越小,圆盘开裂的可能性就越小。对此,李增超<sup>[16]</sup>等研究指出弦径向干缩差异小,发生开裂的危险性也小。W. Kang<sup>[17]</sup>等 在研究中也曾指出,如果在切向和径向上的收缩、机械吸附恒定,从髓心到树皮的径向上,由弦向、径向的不同收缩而产生的干燥应力是可以估计的。从表 4 可知,PEG400 处理后弦径向干缩系数差值明显下降,仅为处理前的 50%,试验结果进一步证实了上述推测。在锯材干燥中,弦向、径向干缩比越大表明干燥应力越大。但在圆盘的研究中弦、径向干缩比增大并不意味着圆盘承受的干燥应力增大,处理后弦径向干缩比变大,而两者间差值变小,说明处理后弦径向干缩趋于一致,圆盘承受的干燥应变变小。另外,对圆盘来说并不温和的干燥强度使得生长应力和干燥应力等不能得以充分释放<sup>[18]</sup>,凸显了处理后弦径向干缩差异变小在降低干燥应变中的重要作用。从而认为,PEG400 处理通过降低弦径向上干缩率(或干缩系数)的差值来降低干燥应力是其抑制圆盘开裂的主要机制。

3 结论与讨论

从 PEG400 预处理对枫桦圆盘干燥质量、干燥速率、径向含水率及弦径向干缩系数几个方面的影响入手,研究了 PEG400 预处理枫桦圆盘的干燥特性,主要得出以下结果。

PEG400 预处理可显著改善枫桦圆盘干燥质量,提高干燥速率,使圆盘表面上纹理较未处理材更加清晰,早晚材区别明显,提高了枫桦圆盘的可观赏性。

PEG400 处理使木材内水分子移动速率降低,但主要发生在 FSP 以上,这主要与其对木材微构造产生影响、减少或堵塞水分移动通道以及木材内水分移动机制有关。

从干燥后处理木材分层含水率,弦径向干缩系数等方面对抑制开裂的机理进行的研究结果表明:PEG400 处理使心表层含水率梯度增大,在抑制圆盘开裂中起到反作用;提出并建立评价预处理对干燥应变影响的预测模型,指出干燥应变随着圆盘半径和弦径向干缩差值的增大而增大,由此指出处理后弦径向干缩系数差异变小,是预处理降低了干燥

应力进而抑制圆盘开裂的主要机制。

参考文献：

[1] 杨亮庆. 枫桦圆盘预处理及干燥特性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011: 1-2.

[2] KUBLER H. Growth stresses in trees and related wood properties[J]. *Forestry Abstracts*, 1987, 10: 74-107.

[3] LEE N H, HAYASHI K, JUNG H S. Effect of radio-frequency/vacuum drying and mechanical press-drying on shrinkage and checking of walnut log cross sections[J]. *Forest Products*, 1998, 48: 73-79.

[4] LI C Y, LEE N H. Effect of external compressive load on tangential strain behavior in Japanese larch log cross sections during radio-frequency/vacuum drying[J]. *Journal of Wood Science*, 2007, 53: 291-295.

[5] KANG W, LEE N H. Mathematical models to predict drying deformation and stress due to the differential shrinkage within a tree disk with radial variations[J]. *Wood Science Technology*, 2002, 36: 463-476.

[6] STAMM A J. Factors affecting the bulking and dimensional stabilization of wood with polyethylene glycols[J]. *Forest Prod J*, 1964, 14(9): 403-408.

[7] YAMAGUCHI T, ISHIMARU Y, URAKAMI H. Effect of temperature on dimensional stability of wood with polyethylene glycol. I. Bulking effect [J]. *Journal of the Japan Wood Research Society*, 1999, 45(6): 434-440.

[8] PERSENAIRE O, ALEXANDRE M, DEGÉE P, *et al.* End-grained wood -polyurethane composites, 2: Dimensional stability and mechanical properties[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2004, 289(10): 903-909.

[9] 赵俊卿, 王喜明, 高志悦, 等. 白桦材聚乙二醇改性技术的研究[J]. *内蒙古林业科技*, 1995(1): 44-47.

[10] 李筱莉, 岳翠银. 聚乙二醇处理的木材尺寸稳定性研究[J]. *安徽农业大学学报*, 1993, 20(4): 353-358.

LI X L, YUE C Y. An experimental study of the dimensional stability of wood treated with polyethylene glycols [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 1993, 20(4): 353-358. (in Chinese)

[11] 尹思慈. 聚乙二醇处理木材的研究 II 保存古木的研究[J]. *南京林学院学报*, 1985(3): 51-60.

YIN S C. A study on polyethylene glycol treatment of wood II A test on preserving ancient wood[J]. *Journal of Nanjing Institute of Forestry*, 1985(3): 51-60. (in Chinese)

[12] 谢成, 刘志明, 吴鹏, 等. 聚乙二醇木材复合相变储能材料的制备及表征[J]. *林业科学*, 2012, 48(9): 120-126.

XIE C, LIU Z M, WU P, *et al.* Preparation and characterization of polyethylene glycol wood composite phase change materials[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(9): 120-126. (in Chinese)

[13] 战剑锋, 顾继友, 蔡英春. 落叶松板材干燥过程的结合水扩散系数[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(4): 6-10.

ZHAN J F, GU J Y, CAI Y C. Bound water diffusion coefficient of larch timber during drying process [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2008, 32(4): 6-10. (in Chinese)

[14] 吴洪远, 岳斌, 沈青. 木材在毛细与非毛细管方向的吸收特征及受液体性质影响的研究[J]. *林业科学*, 2005, 41(5): 106-109.

WU H Y, YUE B, SHEN Q. Absorption of liquids in capillary and non-capillary of wood and the effects of liquid properties [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(5): 106-109. (in Chinese)

[15] 战剑锋, 顾继友, 艾沐野. 白桦干燥过程的横纹干燥应力[J]. *东北林业大学学报*, 2005, 33(4): 25-28.

ZHAN J F, GU J Y, AI M Y. Transverse drying stress of white birch wood during drying[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, 33(4): 25-28. (in Chinese)

[16] 李增超, 邱增处, 雷亚芳, 等. 2.5 cm 桦木地板毛坯快速干燥新工艺[J]. *西北林学院学报*, 2001, 16(2): 91-92.

LI Z Q, QIU Z C, LEI Y F, *et al.* A new rapid drying technique for 2.5 cm-thick Birch floor planks[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16(2): 91-92. (in Chinese)

[17] KANG W, LEE N H. Relationship between radial variations in shrinkage and drying defects of tree disks [J]. *Journal of Wood Science*, 2004, 50: 209-216.

[18] 刁海林, 唐继新, 唐贤明, 等. 米老排锯材干燥中试研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(6): 168-173.

DIAO H L, TANG J X, TANG X M, *et al.* The drying intermediate test research of sawn timber of *Mytilaria laosensis* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(6): 168-173. (in Chinese)