doi:10.11707/j.1001-7488.20170811

脱除部分化学成分杨木的动态水分吸着行为*

周海珍 杨甜甜 马尔妮
(北京林业大学材料科学与技术学院 北京 100083)

摘 要: 【目的】考察木材主要化学成分对其在动态条件下水分吸着行为的影响,以获得动态条件下化学成分之间相互作用的信息,为解析木材的吸着和变形行为提供理论依据。【方法】以 40~60 目的杨木木粉为研究对象,对试材分别进行脱抽提物、脱半纤维素及脱 matrix(木质素和半纤维素)处理,并采用 X 射线衍射(XRD)检测脱化学成分处理对试材的影响。将未处理材和各化学处理材分别置于温度为 25 ℃、相对湿度在 45%~75% 之间正弦变化(周期 1 h、6 h 和 24 h)的环境中,测量试材含水率变化情况,并利用傅里叶法对相对湿度及各试材的含水率变化进行拟合分析。【结果】1) XRD 测试表明,化学处理材纤维素结晶区常用衍射峰的位置没有发生变化,脱抽提物材、脱半纤维素材和脱 matrix 材的结晶度分别为 36.4%、41.3% 和 48.5%;2) 在动态条件下,傅里叶法对不同周期下的相对湿度及各化学处理试材的含水率变化均获得了良好的拟合效果;3) 各试材的动态等温吸附曲线由多个连续的椭圆形相互叠加而成,可以明显地观察到吸湿滞后现象,滞后率在 0.881~0.955 范围内;4) 当相对湿度循环周期足够长时,未处理材、脱抽提物材、脱半纤维素材和脱 matrix 材的水分吸着系数分别是0.090 8、0.094 8、0.089 2 和 0.087 4,仅为静态条件下水分吸着系数的 1/2 左右。【结论】1) 在化学处理过程中,木材的半纤维素被脱除,而纤维素的结晶结构没有受到破坏;2) 随着相对湿度的正弦变化,各处理材的含水率也呈正弦变化,在相位上滞后于相对湿度的变化,且随着时间的延长逐渐趋于稳态;3) 随着周期的延长,试材的振幅和水分吸着系数均有所增加,相位滞后有所下降;4) 将各化学处理材进行比较,对于任一周期下,脱抽提物材的振幅和水分吸着系数最大,其次分别是未处理材、脱半纤维素材和脱 matrix 材。

关键词: 木粉; 脱化学成分; 动态; 水分吸着
中图分类号: S781 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001-7488(2017)08-0094-07

Dynamic Moisture Sorption of Poplar Wood Subject to Partial Removal of Chemical Component

Zhou Haizhen Yang Tiantian Ma Erni
(*College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University Beijing* 100083)

Abstract: 【Objective】In order to obtain the information about interactions among the main components of wood and to provide theoretical basis to analyze the behaviors of moisture sorption and wood deformation, the effects of chemical components on moisture sorption of wood under dynamic conditions were investigated.【Method】*Populus euramericana* flour (40-60 meshes) was subjected to extractives, hemicellulose extraction and matrix (hemicellulose and lignin) removal treatment, respectively. The effects of partial removal of chemical component treatments were detected by X-ray diffraction (XRD). The control and treated samples were placed into dynamic conditions where RH changed sinusoidally between 45%-75% for cyclic periods of 1, 6, and 24 h at 25 ℃, during which moisture changes were measured. The changes of relative humidity and wood moisture content were fitted by the Fourier analysis, giving the following result.【Result】1) XRD tests suggested that the positions of the diffraction peaks for crystal planes in cellulose of the samples did not change after partial removal of chemical component treatments. The crystallinity of extractives removed samples, hemicellulose removed samples and matrix removed samples was determined as 36.4%, 41.3% and 48.5%, respectively. 2) In dynamic conditions, the Fourier analysis proposed by a previous study showed a good agreement with experiment result in this work for both RH and moisture changes of the samples at each cyclic period. 3) Dynamic sorption isotherms of the samples were characterized by several overlapped oval curves, where sorption hysteresis could be obviously

收稿日期: 2016-01-26; 修回日期: 2016-05-06。
基金项目: 北京高等学校青年英才计划资助项目(YETP0762); 国家自然科学基金项目(31200435)。
* 马尔妮为通讯作者。

observed with hysteresis ratio ranging from 0.881 to 0.955. 4) The moisture sorption coefficient of the untreated samples, extractives removed samples, hemicellulose removed samples and matrix removed samples was 0.090 8, 0.094 8, 0.089 2 and 0.087 4, respectively, when the cyclic period was sufficiently long. These values were half of the static values. 【Conclusion】 1) Hemicellulose of the samples was removed without breaking the crystallize structure in cellulose. 2) Moisture of the samples were generally sinusoidal but lagged behind the imposed RH and steady-state was reached as dynamic sorption proceeded. 3) The amplitude and moisture sorption coefficient increased and the phase lag decreased with increasing cyclic period. 4) A comparison among the samples by different partial removal of chemical component treatments demonstrated that the extractives removed samples exhibited the highest amplitude and moisture sorption coefficient, followed by the untreated samples, hemicellulose removed samples and matrix removed samples for all cyclic periods.

Key words: wood flour; removal of chemical component; dynamic condition; moisture sorption

木材是一种天然吸湿性材料，当外界温湿度发生变化时，能够从外界吸收水分或者向外界蒸发水分，其含水率会发生相应改变，进而影响木材的尺寸稳定性、力学性质等，造成木材在日常加工和利用时经常出现开裂、翘曲等问题。研究木材与水分的相互作用对木制品的加工及利用具有重要指导意义。

以往对木材中水分的研究一般是在温湿度恒定的静态条件下进行的，主要围绕木材的吸湿能力展开，经常通过测量等温吸附曲线来进行评估（Chau *et al.*, 2015; Stamm, 1964; Okoh *et al.*, 1980）。等温吸附曲线的斜率表示单位相对湿度变化时木材含水率的变化大小，称为水分吸着系数（moisture sorption coefficient），常常被用于表征木材的吸湿性（杨甜甜等, 2013; 周海珍等, 2014; Chau *et al.*, 2015）。此外，木材的水分吸着往往具有吸湿滞后的特点，即在同一温度下，木材吸湿和解吸的等温吸附曲线不会发生重叠，且由吸湿过程达到的平衡含水率往往低于由解吸过程达到的平衡含水率，二者之间的比值称为滞后率，用 A/D 表示（刘一星等, 2004），其范围通常在 0.75 ~ 0.90 之间（Skaar, 1988）。研究表明，在静态条件下，滞后率通常受相对湿度的影响，随着相对湿度增加，A/D 有所增加，即吸湿滞后减小（Okoh, 1976; Spalt, 1958）。

在静态条件下对木材水分进行研究，虽然能够简化试验方法和理论分析，但其结果过于理想化。在实际生活中，木材的加工和利用往往是处于温湿度不断变化的动态环境中的，因此在动态条件下考察木材中的水分更具有现实意义（马尔妮, 2013）。Chomcharn 等（1983）将木材置于 25 ℃、相对湿度在 77%~47% 之间正弦变化的环境中，在湿度循环前后的 2 个水分平衡态和湿度循环过程中测定了试材的含水率，结果表明：试材的含水率也呈正弦变化趋势，但在相位上滞后于相对湿度的变化，同时，随着周期的延长，含水率的相位滞后有所下降，振幅有所增加。Ma 等（2010）也进行了类似的研究，并发现木材的尺寸变化快于含水率变化的特异现象。

木材作为一种天然高分子有机体，主要由处于结晶状态的纤维素分子链及围绕其周围的无定形态的半纤维素和木质素（合称为 matrix）及少量的抽提物构成。其中，纤维素和半纤维素富含游离羟基，其含量与木材的水分吸着呈正相关；而木质素具有疏水性，脱除木质素往往会造成木材水分吸着的增加；抽提物因其填充效应而与木材的水分吸着呈负相关（马尔妮等, 2012）。由于这些组成成分具有不同的化学性质和存在形式，其水分吸着行为必然有所不同，因此，探究木材化学成分对木材吸湿性的影响，不仅对木材化学改性至关重要，而且能够丰富木材物理及木材化学的基础内容。不少学者曾尝试以木材主成分之间的相互作用为切入点，解析动态条件下木材的流变学特性，如张文博等（2006）对湿度周期变化过程中脱木质素处理木材蠕变的研究、谢满华（2006）对温度周期化过程中脱 matrix 处理木材应力松弛的研究等。

但是，动态条件下脱化学成分木材的水分吸着，作为更为基础的研究内容，迄今为止却未有涉及。因此，本研究以 40 ~ 60 目的杨木木粉为对象，考察未处理材、脱抽提物、脱半纤维素及脱 matrix 处理试材在温度恒定、相对湿度 45% ~ 75% 正弦变化环境中的水分吸着行为，以期获得动态条件下化学成分之间相互作用的信息，为解析木材的吸着和变形行为提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

采用阔叶树种杨木（*Populus euramericana*）作为试验用材。将试材通过研磨机研磨，筛选出 40 ~ 60

目的木粉备用。

1.2 化学处理

首先将木粉置于干燥箱中，在 105 ℃下烘至绝干，记录木粉的绝干质量 m_0。然后将木粉分为未处理组（CK）、脱抽提物组（DE）、脱半纤维素组（DHC）和脱 matrix 组（DM）4 组，各组化学处理方法如下。

1.2.1 苯醇抽提处理 将木粉用体积比为 2∶1 的苯醇混合溶液抽提 48 h 后，置于 60 ℃水浴锅中煮 3 h（谢满华，2006），并用蒸馏水洗净，气干后放入干燥箱中烘至绝干，记录其绝干质量 m_1。

1.2.2 脱半纤维素处理 将脱半纤维素试材与水以 1∶20 的质量比一并放入高压反应釜中，在 170 ℃下加热 2 h（Hosseinaei *et al.*，2012）。加热结束后，将脱半纤维素试材用蒸馏水洗净，气干后放入干燥箱中烘至绝干，记录其质量 m_2。

1.2.3 脱 matrix 处理 将脱抽提物试材放入装有 967 mL 蒸馏水、20 g 次氯酸钠和 13 mL 冰醋酸混合溶液的烧杯里，于 40 ℃恒温水浴锅中煮 30 h（张文博等，2006），即可脱去部分木质素；将脱木质素试材用蒸馏水洗净，气干后放入干燥箱中烘至绝干，记录其质量 m_3；将干燥后的试材进行脱半纤维素处理后，放入干燥箱中烘至绝干，并记录其质量 m_4。

试材抽提物脱除率（P_1）按式（1）计算，半纤维素脱除率（P_2）按式（2）计算，matrix 脱除率（P_3）按式（3）计算，其中木质素脱除率（P_4）按式（4）计算：

$$P_1 = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%; \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{m_0 - m_2}{m_0} \times 100\%; \quad (2)$$

$$P_3 = \frac{m_0 - m_3}{m_0} \times 100\%; \quad (3)$$

$$P_4 = \frac{m_0 - m_4}{m_0} \times 100\%。 \quad (4)$$

根据式（1）～（4），脱抽提物组的脱除率约为 3%，脱半纤维素组的脱除率约为 9%，脱 matrix 组的脱除率约为 38%，其中木质素和半纤维素脱除率分别为 14% 和 24%。化学处理结束后，将每组木粉分成 3 部分，每部分约 0.5 g，置于称量瓶中备用。

1.3 X 射线衍射测试

采用 X 射线衍射（XRD）研究脱化学成分处理材 002 晶面和 040 晶面衍射峰的位置和纤维素结晶度的变化情况。将脱化学成分处理的木粉气干后，置于 X 射线衍射仪（Bruker D8 Advance，德国）中进行检测。测试条件为：铜靶辐射 λ 为 0.154 0 nm，辐射管电压为 40 kV，辐射管电流为 40 mA，扫描角度 θ 为 5°～40°，步宽为 0.02°，扫描速度为每步 0.5 s。

1.4 动态吸着试验

由于日常相对湿度的变化范围主要集中在 45%～75% 之间，且呈正弦趋势变化（Schniewind，1967），因此本研究利用人工气候箱设定环境温度为 25 ℃、相对湿度在（45%～75%）±3% 之间正弦变化来模拟日常湿度变化。

将 CK、DE、DHC、DM 材在 105 ℃下烘至绝干，记录绝干质量后，置于温度为 25 ℃、相对湿度为 45% 的环境中调至平衡［45% 的相对湿度环境由无水碳酸钾饱和溶液调制获得（Macromolecule Academy，1958）］。随后，将各化学处理材置于预先设定程序的人工气候箱内［温度为 25 ℃、相对湿度在（45%～75%）±3% 之间正弦循环变化］进行试验。循环周期分别为 1 h、6 h 和 24 h：1 h 的设计主要是考察木材对湿度剧烈变化环境的异常响应情况，循环次数为 12 次；24 h 的设计主要是为了模拟日常湿度的变化，循环次数为 4 次；而 6 h 的设计主要是为了获得二者之间的过渡，循环次数为 6 次。试验过程中温湿度由预设程序自动控制，并通过放置在试材旁边的温湿度记录仪实时监测。在此过程中，利用箱内的电子分析天平（精确至 0.1 mg）定期测定试材质量。

1.5 傅里叶分析

傅里叶分析（Chomcharn *et al.*，1983）能够有效模拟出动态试验过程中试材相对湿度及含水率的正弦变化曲线，即利用下式的正弦函数方程对试验数据进行拟合：

$$G(t) = \frac{G(t)_{\max} + G(t)_{\min}}{2} + \frac{G(t)_{\max} - G(t)_{\min}}{2}[A_1\sin\omega t + B_1\cos\omega t]。 \quad (5)$$

式中：$G(t)$ 为相对湿度；A_1、B_1 为傅里叶系数；ω 为角频率；$G(t)_{\max}$ 和 $G(t)_{\min}$ 分别为 $G(t)$ 在时间 t 下的波峰、波谷函数，其可通过不同阶数的多项式对试验测得的各个波峰、波谷值进行拟合求得。

重排式（5）可得：

$$A_1\sin\omega t + B_1\cos\omega t = \frac{2G(t) - G(t)_{\max} - G(t)_{\min}}{G(t)_{\max} - G(t)_{\min}} = Q(t)。 \quad (6)$$

式中：$Q(t)$ 用来代表含有 $G(t)$ 的复杂分数项。

由傅里叶分析，可得 A_1 和 B_1 的表达式为：

$$A_1 = (2/T_0)\int_0^{T_0} Q(t)\sin(\omega t)\,\mathrm{d}t \approx (2/T_0)\sum_{i=1}^{N} Q_i(t)\sin(\omega t)\Delta t; \quad (7)$$

$$B_1 = (2/T_0)\int_0^{T_0} Q(t)\cos(\omega t)\,\mathrm{d}t \approx (2/T_0)\sum_{i=1}^{N} Q_i(t)\cos(\omega t)\Delta t。 \quad (8)$$

式中：T_0 为相对湿度的变化周期；N 为一个循环测量的试验点数。

2　结果与分析

2.1　XRD 分析

图 1 为各化学处理材的 X 射线衍射图谱，其中 $2\theta = 22.5°$和 35°附近分别对应于 002 和 040 晶面的衍射峰，这些晶面是分析纤维素结晶结构的常用晶面（Liu *et al.*, 2014）。由图 1 可知，对于 DE、DHC 和 DM 材，这些衍射峰的位置没有改变，说明化学处理并没有破坏木材中纤维素的结晶结构。此外，DE、DHC 和 DM 材的结晶度分别为 36.4%、41.3% 和 48.5%，这主要是由于试材经脱半纤维素处理后，非结晶区被破坏，并在化学处理后期洗涤过程中被除去，因而结晶区的相对含量增加，且半纤维素脱除得越多，结晶区的相对含量增加得越多，如 DM 材。这也进一步证明了在化学处理过程中，木材的半纤维素确实被脱除，而纤维素的结晶结构没有受到破坏。

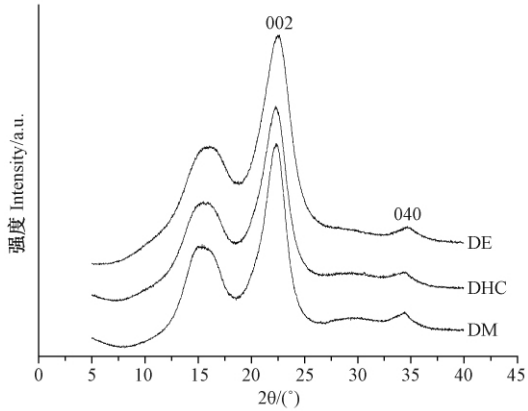


图 1　各化学处理材的 X 射线衍射图谱

Fig. 1　XRD patterns for the samples

2.2　相对湿度与木材含水率的动态模拟

图 2 以周期 6 h 为例，给出了采用傅里叶法对 CK 材的相对湿度和含水率变化进行拟合的结果，可以发现，相对湿度及含水率的理论曲线与试验数据都拟合得较好。此外，对于另外 2 个周期下，不同化学处理试材的相对湿度和含水率变化也均获得了良好的模拟效果。

2.3　振幅

图 3 所示为各化学处理材在循环周期 24 h 下

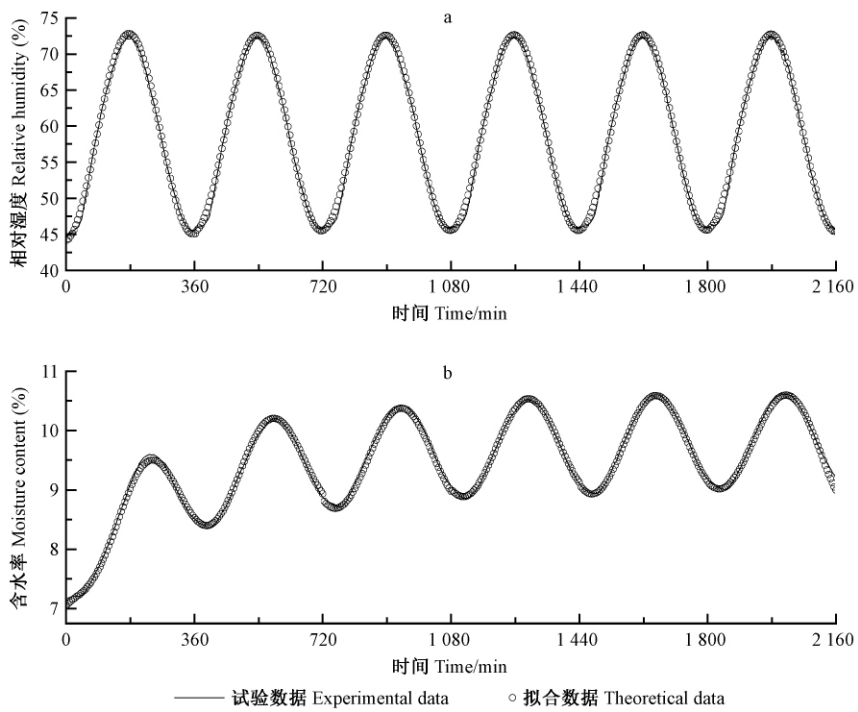


图 2　基于傅里叶法拟合的相对湿度（a）及含水率（b）的理论曲线与试验数据的比较（CK 材，周期 6 h）

Fig. 2　Comparison of theoretical curves simulated by Fourier fitting with experimental results of relative humidity (a) and moisture changes (b) (CK, 6 h)

的含水率随相对湿度的变化。可以看出，各化学处理材的含水率呈正弦趋势变化，且在相位上明显滞后于相对湿度的变化。在相对湿度变化初期，含水率变化曲线有上升的趋势，随着时间延长，各含水率变化曲线逐渐趋于稳态。将同一循环内含水率变化的波峰与波谷之差定义为振幅，可反映木材中的水分对动态湿度响应的大小。由表 1 可知，周期越长，各试材的振幅越大。这是因为，随着周期的延长，各试材有足够的时间响应相对湿度的变化，从而在较长的周期下表现出较大的振幅。将各组试材的振幅进行比较可以发现，DE 材的振幅最大，其次分别是 CK、DHC、DM 材。如上所述，这是因为试材脱除抽提物后吸湿性增加，因此含水率振幅增大。而脱除半纤维素后，试材内部游离羟基的数量减少，从而造成含水率振幅降低；且半纤维素脱除得越多，试材含水率变化的振幅越小，如 DM 材。

表 1 不同周期各化学处理材含水率变化的振幅①

Tab. 1 Moisture content amplitude against cyclic period for the samples

周期 Period	振幅 Amplitude(%)			
	CK	DE	DHC	DM
1 h	0. 67	0. 68	0. 63	0. 52
6 h	1. 78	1. 80	1. 74	1. 68
24 h	2. 38	2. 40	2. 35	2. 26

①各循环下含水率振幅的平均值。Average values for moisture content amplitude of all cycles.

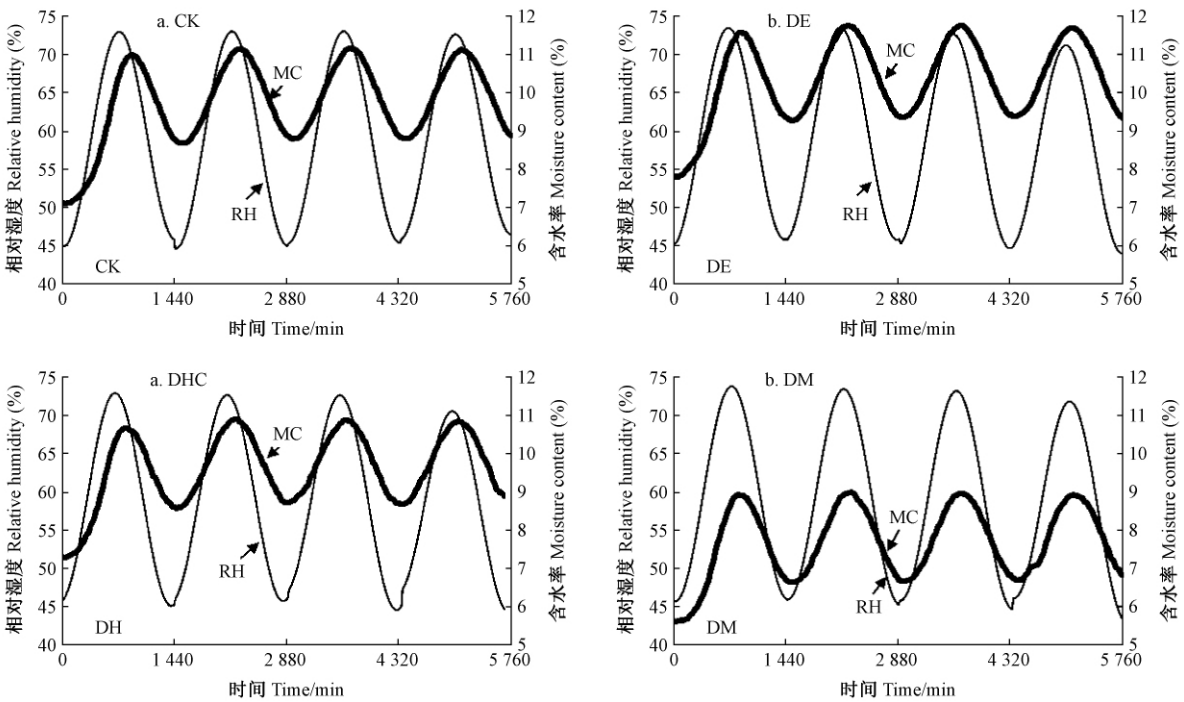


图 3 各化学处理材的含水率随相对湿度的变化(25 ℃，周期 24 h)

Fig. 3 Moisture content (MC) changes for the samples with varying relative humidity (25 ℃, 24 h)

2.4 相位滞后

相位滞后反映了木材中水分对动态湿度响应的快慢。为了定量分析各化学处理材相对于相对湿度的相位滞后情况，利用式(9)对该参量进行计算：

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta t}{T}。 \quad (9)$$

式中：$\Delta\varphi$ 为相位滞后(rad)；Δt 为各循环下含水率变化的波峰相对于相对湿度波峰滞后的时间(min)；T 为相对湿度的循环周期(min)。

由表 2 可知，随着周期的延长，各化学处理材的相位滞后均有所减小，即周期的增长使试材含水率的响应跟得上相对湿度的变化，这与以往的研究结果相一致(杨甜甜等，2013)。此外，对比 CK 材，DE 材的相位滞后变化不大，而 DHC 材和 DM 材的相位滞后有所减小。这可能是因为试材在脱除半纤维素后，振幅减小(表 1)，进而能够较快地达到含水率的波峰或者波谷。从而，半纤维素脱除得越多，相位滞后也减小得越多，即试材的响应越快，如 DM 材。

表 2 各化学处理材含水率变化的相位滞后①

Tab. 2 Phase lag of moisture response for the samples

周期 Period	相位滞后 Phase lag/rad			
	CK	DE	DHC	DM
1 h	1. 32	1. 32	1. 13	1. 06
6 h	0. 78	0. 78	0. 71	0. 69
24 h	0. 61	0. 58	0. 47	0. 30

①各循环下相位滞后的平均值。Average values for phase lag of all cycles.

2.5　吸湿滞后和水分吸着系数

图 4 以周期 24 h 为例，给出了 CK 材的动态等温吸附曲线。由图 4 可知，该曲线由多个连续的椭圆形相互叠加而成，其上可以明显地观察到吸湿滞后现象。其他化学处理材同样表现出类似的行为。为了定量考察动态条件下试材吸湿滞后的大小，计算各个循环下最小滞后率 A/D 并求其平均值，结果如表 3 所示。动态条件下，各化学处理材的 A/D 值在 0.881 ~ 0.955 范围内，与实木的滞后率相近（Skaar，1988）。此外，各化学处理材 A/D 值并未与循环周期、化学处理方法表现出一定的规律。

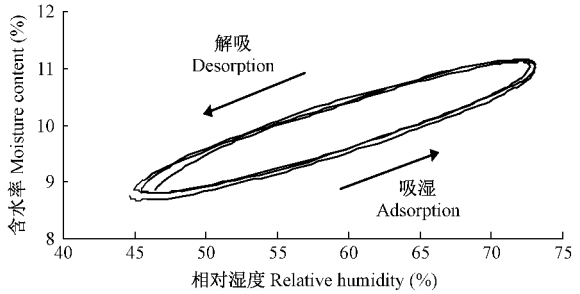


图 4　CK 材的动态等温吸附曲线（25 ℃，周期 24 h）

Fig. 4　Dynamic sorption isotherm for the CK (25 ℃, 24 h)

表 3　不同周期下各化学处理材的吸湿滞后率 A/D

Tab. 3　A/D values for the samples in various cyclic periods

周期 Period	滞后率 Hysteresis ratio			
	CK	DE	DHC	DM
1 h	0.940	0.955	0.941	0.945
6 h	0.890	0.894	0.894	0.881
24 h	0.915	0.919	0.918	0.907

动态等温吸附曲线上椭圆长轴的斜率即为水分吸着系数 Z。为了进一步定量考察各化学处理材的吸湿性，本研究利用式（10）计算不同周期下各化学处理材的动态水分吸着系数在各循环的平均值：

$$Z = \frac{A}{RH_1 - RH_2}。\qquad (10)$$

式中：A 为各循环含水率变化的振幅；RH_1、RH_2 分别表示各振幅对应的最大、最小相对湿度。

如表 4 所示，随着周期的延长，各化学处理材的水分吸着系数有所增加，这说明单位相对湿度变化时，周期越长，含水率变化越大。此外，DE 材的水分吸着系数最大，其次分别是 CK、DHC、DM 材，即动态条件下，脱半纤维素处理的试材 DHC 和 DM 在相对湿度变化时，其含水率变化要小于 CK 材，亦满足了 DHC 和 DM 材的吸湿能力小于 CK 材的趋势，与表 1 中振幅的结果相一致。

表 4　不同周期各化学处理材的水分吸着系数

Tab. 4　Moisture sorption coefficient for the samples in various cyclic periods

周期 Period	水分吸着系数 Moisture sorption coefficient			
	CK	DE	DHC	DM
1 h	0.059	0.061	0.047	0.041
6 h	0.084	0.087	0.080	0.078
24 h	0.091	0.095	0.089	0.087

图 5 进一步给出了不同周期下各化学处理材的动态水分吸着系数，横坐标是 24 与各研究周期的比值。图中线性回归线在 Y 轴的截距表示相对湿度循环周期足够长，即试材内部不存在含水率梯度而均匀地随动态环境变化时的水分吸着系数。对于 CK、DE、DHC 和 DM 材，其大小分别是 0.090 8、0.094 8、0.089 2 和 0.087 4，仅为静态条件下水分吸着系数 0.18（Noack *et al.*, 1973）的 1/2 左右，这可能是由于循环过程中强烈的吸湿滞后作用所造成的（马尔妮，2013）。

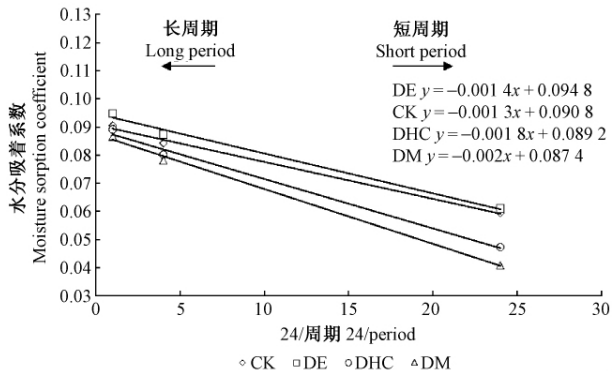


图 5　不同周期下各化学处理材的动态水分吸着系数

Fig. 5　Dynamic moisture sorption coefficient at different cyclic periods for the samples

3　结论

本研究主要考察了脱化学成分木粉在动态条件下的水分吸着行为，主要结论如下：

1）在化学处理过程中，木材的半纤维素被脱除，而纤维素的结晶结构没有受到破坏；

2）在动态条件下，傅里叶法对不同周期下的相对湿度及各化学处理试材的含水率变化曲线均获得了良好的拟合效果；

3）随着相对湿度的正弦变化，各处理材的含水率也呈正弦变化，在相位上滞后于相对湿度的变化，且随着时间的延长逐渐趋于稳态；

4）随着周期的延长，试材的振幅和水分吸着系数均有所增加，相位滞后有所下降；

5）将各化学处理材进行比较，对于任一周期下，脱抽提物材的振幅和水分吸着系数最大，其次分别是未处理材、脱半纤维素材和脱 matrix 材。

本研究结果不但可为木材化学组分的物理性质积累基础数据，丰富木材化学及木材物理的内容，更有助于从主成分相互作用的角度解析木材在宏观上表现出的吸着行为。在未来的研究工作中，作者将进一步研究木材的主要化学成分在动态条件下对木材干缩湿胀行为的影响，这将对木制品的加工及利用具有更为现实的指导意义。

参 考 文 献

刘一星，赵广杰. 2004. 木质资源材料学. 北京：中国林业出版社，137－138.

（Liu Y X，Zhao G J. 2004. Wood resources in materials science. Beijing：China Forestry Publishing House，137－138.［in Chinese］）

马尔妮. 2013. 木材的水分吸着和干缩湿胀——从静态到动态的研究. 湖北农业科学，52（21）：5121－5125.

（Ma E N. 2013. Studies on moisture sorption and hygroexpansion of wood from static condition to dynamic condition. Hubei Agricultural Sciences，52（21）：5121－5125.［in Chinese］）

马尔妮，赵广杰. 2012. 木材物理学专论. 北京：中国林业出版社，19－39.

（Ma E N，Zhao G J. 2012. Special topics on wood physics. Beijing：China Forestry Publishing House，19－39.［in Chinese］）

谢满华. 2006. 化学处理木材的应力松弛. 北京：北京林业大学博士学位论文.

（Xie M H. 2006. Stress relaxation of chemically treated wood. Beijing：PhD thesis of Beijing Forestry University.［in Chinese］）

杨甜甜，马尔妮. 2013. 水分周期性作用下木材的动态吸着和干缩湿胀. 功能材料，44（24）：3055－3059.

（Yang T T，Ma E N. 2013. Dynamic sorption and hygroexpansion of wood by humidity cyclically changing effect. Functional Materials，44（24）：3055－3059.［in Chinese］）

张文博，德本守彦，武田孝志. 2006. 木材のメカノソープティブクリープ及ぼす脱リグニン処理の影响Ⅰ. 木材学会志，52（1）：19－28.

（Zhang W B，Tokumoto M，Takeda T，*et al.* 2006. Effects of delignifying treatments on mechano-sorptive creep of wood I. Journal of the Japan Wood Research Society，52（1）：19－28.［in Japanese］）

周海珍，许 若，马尔妮. 2014. 吸湿过程中脱化学成分木材的水分及尺寸变化. 中国农学通报，30（25）：49－54.

（Zhou H Z，Xu R，Ma E N. 2014. Moisture and dimensional changes of chemicalcomponent-removing wood during adsorption processes. Chinese Agricultural Science Bulletin，30（25）：49－54.［in Chinese］）

Chau T，Ma E，Cao J. 2015. Moisture adsorption and Hygroexpansion of Paraffin WaxEmulsion-treated Southern Pine（*Pinus* spp.）. BioResources，10（2）：2719－2731.

Chomcharn A，Skaar C. 1983. Dynamic sorption and hygroexpansion of wood wafers exposed to sinusoidally varying humidity. Wood Science and Technology，17（4）：259－277.

Hosseinaei O，Wang S，Taylor A M，*et al.* 2012. Effect of hemicellulose extraction on water absorption and mold susceptibility of wood-plastic composites. International Biodeterioration & Biodegradation，71：29－35.

Liu R，Peng Y，Cao J. 2014. A comparison of various ionic surfactant modifiers used in in situ synthesis oforgano-montmorillonite inside wood flour. Industrial Crops and Products，62：387－394.

Ma E，Nakao T，Zhao G，*et al.* 2010. Dynamic sorption and hygroexpansion of wood subjected to cyclic relative humidity changes. Wood and Fiber Science，42（2）：229－236.

Macromolecule Academy. 1958. Physical properties of macromolecule（Ⅲ）. Tokyo：Kyoritsu Press，240－260.

Noack D，Schwab E，Bartz A. 1973. Characteristics for a judgment of the sorption and swelling behavior of wood. Wood Science and Technology，7（3）：218－236.

Okoh K I A，Skaar C. 1980. Moisture sorption isotherms of the wood and inner bark of ten southern US hardwoods. Wood and Fiber，12（2）：98－111.

Okoh I K A. 1976. Moisture sorption and electrical resistivity of some woods and barks. State University of New York，College of Environmental Science and Forestry，Syracuse.

Schniewind A P. 1967. Creep-rupture life of Douglas-fir under cyclic environmental conditions. Wood Sci Technol，1（4）：278－288.

Skaar C. 1988. Wood-water relations. Berlin：Springer，24－28.

Spalt H A. 1958. The fundamentals of water vapor sorption by wood. Forest Products Journal，8（10）：288－295.

Stamm A J. 1964. Wood and cellulose science. New York：Ronald Press，549.

（责任编辑 石红青）