

蒙脱土/木材复合材料的结晶性能

薛振华^{1,2} 赵广杰¹

(1 北京林业大学材料科学与技术学院 2 内蒙古农业大学林业工程学院)

摘要:为了考察蒙脱土/木材复合材料的结晶性能,利用 X 射线衍射仪检测了以处理木材试样和蒙脱土为原材料、借助酚醛树脂制备的蒙脱土/木材复合材料,并将未处理试材、处理试材及复合材料进行比较后发现,试材经氢氧化钠、微波、氢氧化钠-微波、氢氧化钠-超声波处理后,相对结晶度降低;超声波处理后,相对结晶度增大。除氢氧化钠处理试材外,其他处理试材与蒙脱土形成的复合材料的结晶度均进一步降低。未处理材、处理材及复合材料结晶区晶层间距变化不明显。研究还发现,蒙脱土在复合材料中主要以插层型结构存在。

关键词:蒙脱土;复合材料;相对结晶度;结晶性能

中图分类号:S781.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2008)01-0114-05

XUE Zhen-hua^{1,2}; ZHAO Guang-jie¹. **Crystal properties of montmorillonite-wood composite.** *Journal of Beijing Forestry University* (2008) **30**(1) 114-118 [Ch, 21 ref.]

1 College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 College of Forestry Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, 010018, P. R. China.

For investigating crystal properties, the montmorillonite-wood composite (MPW), which is compound of wood and MMT with medium of phenol formaldehyde resin (PF), was scanned by X-ray diffraction, and compared with treated and untreated wood samples. Results were found that relative crystallinities of the samples, treated by liquid of sodium hydroxide (NaOH), microwave (MW), NaOH/MW and NaOH/ ultrasonic (US), were decreased compared with those of untreated wood samples, but relative crystallinities of US treated wood samples were increased. Comparing the treated samples, relative crystallinities of MPW, which was compounded with MMT and treated wood samples excepting for NaOH treatment wood samples, were decreased more. The layer space among untreated samples, treated samples and MPW changed unobviously confirmed by X-ray diffraction. It was also found that MMT mainly existed in MPW at intercalation state.

Key words montmorillonite; composite; relative crystallinity; crystal properties

蒙脱土(MMT)具有天然的纳米层状结构,通过蒙脱土与其他有机高分子材料复合,能够极大地提高有机高分子材料的物理力学性能^[1-2]。自日本^[3]首次利用插层法制备了尼龙6/蒙脱土纳米复合材料(NCH)使尼龙6的力学、热学等性能得到了很大提高以来,各种聚合物/粘土纳米复合材料的研究方兴未艾^[4-7]。随着人们生活水平的提高,木材这种可再生的绿色生物材料越来越受到人们的关注。为了扩展木材的应用领域,利用木材的多孔性、可渗透性等性能与其他有机或无机材料复合,形成新型木质复合材料,以改善木材性能或赋予木材新的物理性

能已经成为木材科学以及生物功能复合材料研究的重要方向之一,并已取得很好效果^[8-10]。赵广杰^[11-12]在木材细胞壁形成过程的基础上提出了纳米木材的概念,即在木材的细胞壁中存在纳米空隙,可以与无机材料实现纳米级复合。吕文华等^[13-14]构想了木材/蒙脱土纳米复合材料的制备方法,并制备了该复合材料。与木材相比,复合材料的吸水膨胀性较木材显著降低,其吸水膨胀率大约为木材的1/6~1/8,而且径向和弦向吸水膨胀率的差距减小,即各向异性减小。通过插层复合技术,蒙脱土纳米片层充分剥离,并与木材中的半纤维素、纤维素充分接

收稿日期:2006-11-30

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(30271055)。

第一作者:薛振华,博士生,副教授。主要研究方向:木质复合材料。电话:010-62338358 Email: X-zhenhua@126.com 地址:100083北京

林业大学材料科学与技术学院。

触,封闭纤维素和半纤维素分子上的羟基或与之形成化学键,显著降低木材吸水率,有效控制木材的干缩湿胀,显著提高稳定性。因此,利用蒙脱土与木材在其细胞壁上进行复合,形成蒙脱土/木材复合材料,从而改善木材的物理力学性能或赋予木材新的性能成为可能。本文根据 NaOH、微波、超声波对木材的作用^[15-19]而对木材进行前期处理,然后以酚醛树脂为介质与改性的层状蒙脱土进行复合,形成蒙脱土/木材复合材料(MPW),然后利用 x 射线衍射法(XRD)来观察所形成复合材料的结晶状况,评价 MMT 进入木材细胞壁的情况及其存在状态,从而为进一步评价复合材料的性能奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试材及原料

试材为采自福建的杉木(*Cunninghamia lanceolata*),锯切为 53 mm(L)×33 mm(R)×1.6 mm(T)的薄片,在大气条件下进行自然干燥至平衡;无水乙醇,阿托兹精细化工有限公司生产,化学纯;蒙脱土,北京大众泰华膨润土科技发展公司生产,200 目;酚醛树脂胶,自制,固含量 45%,黏度 $1.43 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;十六烷基三甲基溴化铵,北京化学试剂公司,化学纯。

1.2 蒙脱土改性

将蒙脱土在蒸馏水中分散,除杂质,在 pH 值为 3~4 条件下加入十六烷基三甲基溴化铵反应后,除溴离子,真空干燥后研磨至 300 目。

1.3 蒙脱土/酚醛树脂浸渍液(MP)制备

按体积比为 3:1 的比例,将无水乙醇加入酚醛树脂胶中,然后将改性蒙脱土按 3%(固体质量比)加入其中,充分搅拌而成。

1.4 复合材料制备

将木材试件 $W_1 \sim W_5$ 分别进行 XRD 扫描后,将 W_1 、 W_4 、 W_5 置入 3% 氢氧化钠处理 48 h。其中 W_1 用蒸馏水洗涤至中性,自然干燥后形成碱处理材(W_1 -NaOH); W_4 用微波炉(W-8511,广东佛山富士宝微波制品有限公司)连续处理 120 s,自然干燥后形成氢氧化钠/微波处理材(W_4 -NaOH/MW); W_5 置入超声波仪(KQ-50DB,昆山市超声仪器有限公司)蒸馏水槽中全功率输出,洗涤 30 min,自然干燥后形成氢氧化钠-超声波处理材(W_5 -NaOH/US);而 W_2 、 W_3 经蒸馏水浸泡至饱和后分别用微波炉和超声波仪(处理方法同上)处理,自然干燥后形成相应的微波处理材(W_2 -MW)和超声波处理材(W_3 -US)。将

这些处理材经 XRD 扫描后在 MP 中浸渍 24 h 后,在 140℃ 真空干燥 2 h,形成相应的复合材料 $MPW_1 \sim MPW_5$ 。

1.5 XRD 检测

将所形成的复合材料采用日本岛津公司生产的 XRD-6000 进行扫描,其条件为:CuK α 铜靶辐射($\lambda = 0.154 \text{ nm}$),辐射管电压 40 kV,辐射管电流 30 mA,扫描范围 $2\theta = 5^\circ \sim 40^\circ$,步长 0.1° ,扫描速度 $2^\circ/\text{min}$ 。

1.6 结晶区域性能参数计算

1) 结晶区域的宽度及长度:根据晶体点阵可知,002 峰反映了结晶区的宽度,而 040 峰反映了结晶区的长度。根据 Scherer 公式计算结晶区的长度及宽度:

$$D = \frac{K\lambda}{f_{hkl} \cos \theta} \quad (1)$$

式中, D 为结晶区的长度或宽度(mm); λ 为入射 x 射线的波长(0.154 nm); f_{hkl} 为(hkl)图衍射峰半宽(弧度); $\cos \theta$ 为衍射角余弦; K 为常数,取 0.9。

2) 结晶区层间距(d_{hkl}):结晶区层间距根据 Bragg 方程计算:

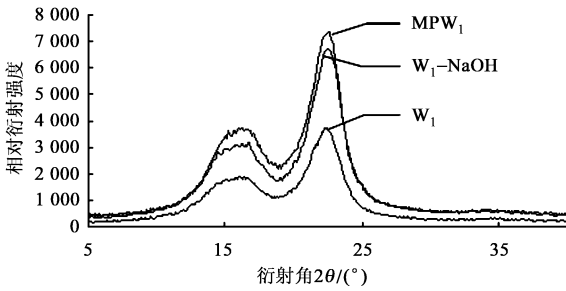
$$d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 MPW₁ 的结晶性能

试材 W_1 、处理试材 W_1 -NaOH 以及复合材料 MPW_1 的 XRD 扫描结果及相应结晶性能参数见图 1 及表 1(因性能参数均为(002)晶面衍射峰,故晶面指数未进行标注;(040)晶面衍射峰太弱,所以结晶区的长度未计算,下同)。

从图 1 可以看出, W_1 、 W_1 -NaOH、 MPW_1 衍射峰的位置几乎没有变化。从表 1 看,经 NaOH 处理后,衍射角略有增加,层间距略有减小。说明 NaOH 处理对木材结晶区构造在较短的处理时间内影响比较小。同时也说明,木材经 NaOH 处理后,纤维素微纤丝表面的碱抽出物被溶出,活性基团部分裸露,吸附力增强^[16]。但由于 NaOH 对木材的非结晶区影响较大,通过对非结晶内低聚合度的纤维素和半纤维素及其他糖类形成润胀,使得相对结晶度有较大程度的降低。形成复合材料后, MPW_1 结晶度较 W_1 -NaOH 略有增加,浸渍液主要进入到非结晶区,但对非结晶区没有产生新的润胀;且由于其中具有层状的蒙脱土,因此结晶度有所增加。 MPW_1 的 002 晶层方向结晶区宽度减小,主要是由于衍射峰的强度减小,结晶区密度减小所致。

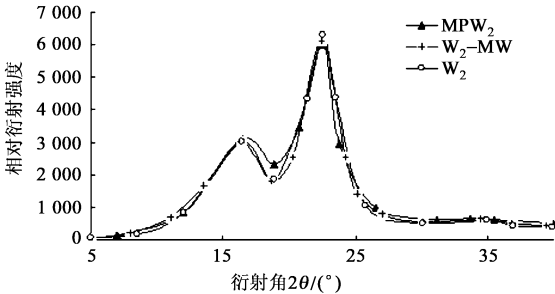
图1 W_1 、 W_1 -NaOH、 MPW_1 的XRD扫描曲线FIGURE 1 XRD curves of W_1 , W_1 -NaOH and MPW_1 samples表1 W_1 、 W_1 -NaOH、 MPW_1 结晶区域的主要参数TABLE 1 Main values of crystal regions of W_1 , W_1 -NaOH and MPW_1

| | $2\theta/(\circ)$ | d/nm | $f/(\circ)$ | $c/\%$ | D/nm |
|-------------|-------------------|---------------|-------------|--------|---------------|
| W_1 | 22.3 | 0.398 | 2.57 | 46.38 | 3.34 |
| W_1 -NaOH | 22.4 | 0.396 | 2.55 | 41.43 | 3.37 |
| MPW_1 | 22.3 | 0.399 | 2.79 | 42.94 | 3.08 |

注: 2θ 为衍射角, d 为层间距, f 为半峰宽, c 为相当结晶度, D 为结晶区宽度, 下同。

2.2 MPW_2 的结晶性能

试材 W_2 、处理试材 W_2 -MW 以及复合材料 MPW_2 的 XRD 扫描结果及相应结晶性能参数见图 2 及表 2。

图2 W_2 、 W_2 -MW、 MPW_2 的XRD扫描曲线FIGURE 2 XRD curves of W_2 , W_2 -MW and MPW_2 samples表2 W_2 、 W_2 -MW、 MPW_2 结晶区域的主要参数TABLE 2 Main values of crystal regions of W_2 , W_2 -MW and MPW_2

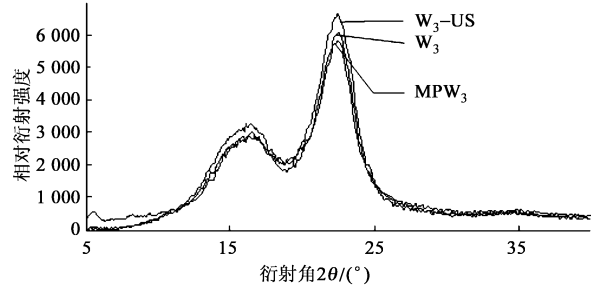
| | $2\theta/(\circ)$ | d/nm | $f/(\circ)$ | $c/\%$ | D/nm |
|-----------|-------------------|---------------|-------------|--------|---------------|
| W_2 | 22.4 | 0.396 | 2.60 | 45.94 | 3.12 |
| W_2 -MW | 22.5 | 0.395 | 2.55 | 44.61 | 3.18 |
| MPW_2 | 22.1 | 0.402 | 3.23 | 32.18 | 2.50 |

从图 2 可以看出, W_2 、 W_2 -MW、 MPW_2 衍射峰几乎重叠。就 MPW_2 衍射峰而言, 非结晶成分明显增加, 并略向小角度偏移, 这一点从表 2 中也明显地反映出来了。微波处理使木材相对结晶度略有降低, 主要是在微波作用过程中, 水分急剧汽化, 同时非结晶区域纤维素、半纤维素分子链摆动, 导致非结晶区域微纤丝排列进一步无序的结果。微波作用同样使结晶区外围可熔融物排出, 其表面活性增强, 使部分非定向微纤丝定向化, 导致结晶区宽度增加。 MPW_2 较 W_2 、 W_2 -MW 的衍射角略有减小, 层间距略有增

加, 结晶度、结晶区宽度则有较大幅度降低。说明 MP 大量进入木材的非结晶区域, 使得非结晶区域面积扩大, 同时也有少量的 MP 进入结晶区域, 导致结晶区结构发生变化。

2.3 MPW_3 的结晶性能

试材 W_3 、处理试材 W_3 -US 以及复合材料 MPW_3 的 XRD 扫描结果及相应结晶性能参数见图 3 及表 3。

图3 W_3 、 W_3 -US、 MPW_3 的XRD扫描曲线FIGURE 3 XRD curves of W_3 , W_3 -US and MPW_3 samples表3 W_3 、 W_3 -US、 MPW_3 结晶区域的主要参数TABLE 3 Main values of crystal regions of W_3 , W_3 -US and MPW_3

| | $2\theta/(\circ)$ | d/nm | $f/(\circ)$ | $c/\%$ | D/nm |
|-----------|-------------------|---------------|-------------|--------|---------------|
| W_3 | 22.4 | 0.397 | 2.64 | 42.16 | 3.06 |
| W_3 -US | 22.4 | 0.397 | 2.56 | 43.35 | 3.17 |
| MPW_3 | 22.3 | 0.398 | 2.25 | 37.72 | 3.60 |

从图 3、表 3 可以看出, 木材经超声波处理后, 002 衍射峰位置没有发生变化, 结晶区层间距一样, 结构没有发生变化。但超声波处理使木材的相对结晶度略有增加, 说明经超声波作用后, 与结晶区域相邻的非结晶区域产生了变化。超声波属于机械波, 其频率 ($>16 \text{ kHz}$) 不能改变有机分子的结构和键合方式, 其空化作用是改变反应体系、促进反应的主要原因^[19-20]。木材经过超声波处理时, 局部的空化作用以及热作用, 对木材表面形成冲击, 并使木材内部非结晶区部分解聚、破坏, 导致非结晶区域减小, 相对结晶度增加。超声波作用也使得与结晶区相邻的非结晶区微纤丝表面获得能量, 与结晶区微纤丝形成某种键合, 从而使结晶区宽度加大。当与 MP 复合形成复合材料后, 酚醛树脂 (PF) 渗入细胞腔、纹孔室及细胞壁的非结晶区, 固化后使润胀的非结晶区固定, 相对结晶度下降。结晶区宽度的增加, 可能是其中的蒙脱土片层在结晶区有序聚集的结果。

2.4 MPW_4 的结晶性能

试材 W_4 、处理试材 W_4 -NaOH/MW 以及复合材料 MPW_4 的 XRD 扫描, 结果及相应结晶性能参数见图 4 及表 4。

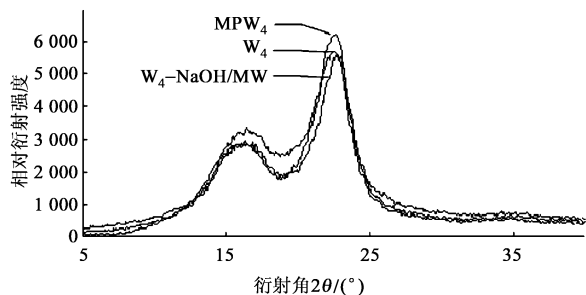


图 4 W_4 、 W_4 -NaOH/MW、 MPW_4 的 XRD 扫描曲线

FIGURE 4 XRD curves of W_4 , W_4 -NaOH/MW and MPW_4 samples

表 4 W_4 、 W_4 -NaOH/MW 和 MPW_4 结晶区域的主要参数

TABLE 4 Main values of crystal regions of W_4 , W_4 -NaOH/MW and MPW_4

| | $2\theta/(\circ)$ | $d/(\text{nm})$ | $l/(\circ)$ | $c/(\%)$ | $D/(\text{nm})$ |
|----------------|-------------------|-----------------|-------------|----------|-----------------|
| W_4 | 22.4 | 0.397 | 2.62 | 43.06 | 3.27 |
| W_4 -NaOH/MW | 22.6 | 0.392 | 2.47 | 40.01 | 3.48 |
| MPW_4 | 22.4 | 0.396 | 2.42 | 32.67 | 3.55 |

从图 4、表 4 可以看出,木材经 NaOH/MW 处理后,002 衍射峰向大角度方向偏移,结晶区层间距减小。相对结晶度较木材小,结晶区宽度增大。这是由于木材经过处理后,碱抽提物溶出,可熔融物析出,纤维素微纤丝表面活性基团增加,微波赋予能量后活性基团的活性增强,表面吸附能量增大,部分非定向微纤丝趋于定向,结晶区宽度增大。同时微波使水分瞬间蒸发,对相互作用较弱的非结晶区形成较强大的冲击,非结晶区相对扩大,导致结晶度降低。与 MP 复合形成复合材料 MPW_4 后,MP 渗透到非结晶区域,与该区域的微纤丝结合、固化沉积,使非结晶区域面积增加。同时 NaOH 和微波的双重作用,使结晶区外围微纤丝具有较高的表面能,吸附层状的蒙脱土,并吸引近邻非结晶区微纤丝而定向排列,导致结晶区宽度增加。

2.5 MPW_5 的结晶性能

试材 W_5 处理试材 W_5 -NaOH/US 以及复合材料 MPW_5 的 XRD 扫描结果及相应结晶性能参数见图 5 及表 5。

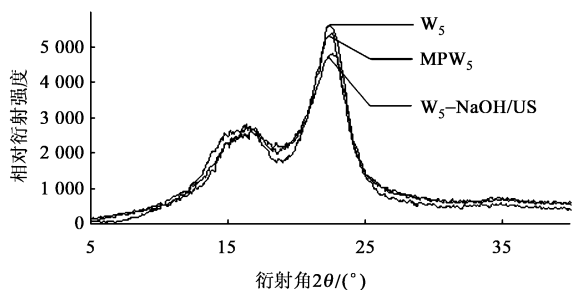


图 5 W_5 、 W_5 -NaOH/US、 MPW_5 的 XRD 扫描曲线

FIGURE 5 XRD curves of W_5 , W_5 -NaOH/US and MPW_5 samples

从图 5、表 5 可以看出,木材经 NaOH 处理后,与原材料相比,衍射峰位置没有发生变化,层间距也相

同,说明纤维素微纤丝的晶体构造没有变化。木材细胞壁纤维素微纤丝表面的吸附能量加强,微纤丝有相互吸引而靠拢的趋势。但经超声波的空化作用后,特别是在非结晶区,键合较弱的微纤丝分离,有的解聚,导致非结晶区域面积扩大,相对结晶度降低。与 MP 复合,形成复合材料 MPW_5 后,002 衍射角减小,层间距扩大,说明经 NaOH/US 作用后,尽管晶体结构没有发生变化,但表面能增加。当与 MP 接触后,与其发生反应,并使部分 MP 进入层间,导致层间距扩大。结晶区宽度减小,可能是酚醛树脂固化,导致部分纤维素结晶结构离散,其中的蒙脱土也形成了剥离型所致,具体原因有待进一步研究。

表 5 W_5 、 W_5 -NaOH/US、 MPW_5 结晶区域的主要参数

TABLE 5 Main values of crystal regions of W_5 , W_5 -NaOH/US and MPW_5

| | $2\theta/(\circ)$ | $d/(\text{nm})$ | $l/(\circ)$ | $c/(\%)$ | $D/(\text{nm})$ |
|----------------|-------------------|-----------------|-------------|----------|-----------------|
| W_5 | 22.4 | 0.396 | 2.58 | 42.35 | 3.14 |
| W_5 -NaOH/US | 22.4 | 0.396 | 2.71 | 33.29 | 2.99 |
| MPW_5 | 22.1 | 0.402 | 3.16 | 32.47 | 2.56 |

从上述复合材料相对结晶度、002 晶面层间距以及相对结晶区域宽度的变化可以看出,MMT 借助 PF 与木材实现了在其细胞壁中的复合。但与木材相比,复合材料的相对结晶度降低。就木材而言,其晶体部分是木材细胞壁主成分之一的纤维素分子链规则排列的结果,相对结晶度的大小直接影响木材的物理力学性能。通过强度为 $1.58 \times 10^8 \text{ rad}$ 的 γ 射线辐射木材,发现其相对结晶度明显下降,伴随着木材横纹抗拉强度和硬度的显著降低^[21]。但对于该复合材料,因 PF 与 MMT 的介入,使得木材中纤维素、木素及半纤维素分子链上的活性基团(如羟基等)与 PF 及 MMT 结合,从而形成一个更加牢固的整体,导致强度、吸湿稳定性等物理力学性能提高。 MPW 性能与其结晶构造及 MMT 量的关系有待进一步研究。

3 结 论

1) 木材经 NaOH、MW、NaOH/MW 处理后,纤维素微纤丝因表面能增加而靠拢,002 衍射角增大,晶层间距减小;US、NaOH/US 处理对纤维素晶体结构没有影响。

2) 木材经 MW、NaOH/US、NaOH/MW 处理后,再与 MP 复合形成的复合材料与木材相比,衍射角减小、层间距扩大、结晶度降低。而 US、NaOH/US 处理方法所形成的复合材料的衍射角及层间距没有发生变化,但结晶度降低。

3) NaOH、NaOH/MW 处理形成复合材料的 002 晶面衍射强度增加,晶区形成新的键合,密度增加。

4) 从形成复合材料的结晶度看,US 处理形成的复合材料中,MMT 以剥离型存在;其他处理形成的复合材料中,MMT 主要以插层结构存在木材中。

参 考 文 献

- [1] 王平华, 宋功品, 徐国永, 等. PVC/蒙脱土复合材料的制备与结构研究[J]. 中国塑料, 2003, 17(1): 35-38.
WANG P H, SONG G P, XU G Y, *et al.* Preparation and structure research of PVC/montmorillonite composite [J]. *China Plastics*, 2003, 17(1): 35-38.
- [2] 程爱民, 田艳, 韩冰, 等. 聚氨酯/蒙脱土纳米复合材料的制备与性能研究[J]. 高分子学报, 2003(4): 591-594.
CHENG A M, TIAN Y, HAN B, *et al.* Synthesis and characterization of polyurethane/montmorillonite nanocomposites [J]. *Macromolecule*, 2003(4): 591-594.
- [3] OKADA A, KAWASUMI M, KURAUCHI T, *et al.* Nanolayer reinforcement in polymer-clay nanocomposite [J]. *Polym Prepr*, 1987, 28, 447-451.
- [4] ALEXANDRE M, DUBOIS P, SUN T, *et al.* Polyethylene-layered silicate nanocomposite prepared by the polymerization-filling technique: synthesis and mechanical properties [J]. *Polymer*, 2002, 43(11): 2 123-2 132.
- [5] BEAKE B D, CHEN S, HULL J B, *et al.* Nano-indentation behavior of clay/poly (ethylene oxide) nano-composite [J]. *Nanoscience and Nanotechnology*, 2002, 2(1): 73-79.
- [6] MEDELLIN-RODRIGUEZ F J, BURGER C, HSIAO B S, *et al.* Time resolved shear behavior of end-tethered Nylon-6 clay nanocomposite followed by nan-isothermal crystallization [J]. *Polymer*, 2001, 42: 9 015-9 023.
- [7] YE H J M, LIOU S J, LIN C Y, *et al.* Anticorrosively enhanced PMMA clay nanocomposite materials with quarternary alkylphosphonium salt as an intercalating agent [J]. *Chemistry of Materials*, 2002, 14(1): 154-161.
- [8] LÜ W H, ZHAO G J. Design of wood/montmorillonite intercalation nanocomposite [J]. *Forestry Studies in China*, 2004, 6(1): 54-62.
- [9] LÜ W H, ZHAO G J. Design wood nanocomposites from polymer nanocomposites [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2004, 1(1): 46-52.
- [10] 王西成, 田杰. 陶瓷化木材的复合机理[J]. 材料研究学报, 1996, 10(4): 435-440.
WANG X C, TIAN J. Composite mechanism of ceramic-wood [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 1996, 10(4): 435-440.
- [11] 赵广杰. 木材细胞壁的构造及其主成分的堆积过程[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(1): 72-79.
ZHAO G J. Structure and formation process of wood cell wall [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1999, 21(1): 72-79.
- [12] 赵广杰. 木材中的纳米尺度、纳米木材及木材-无机纳米复合材料[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 204-207.
ZHAO G J. Nano-dimensions in wood, nano-wood, wood and inorganic nano-composites [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5/6): 204-207.
- [13] 吕文华, 赵广杰. 木材蒙脱土(MMT)纳米插层复合材料的制备构想[J]. 林业科学, 2005, 41(1): 181-188.
LÜ W H, ZHAO G J. Nano intercalation compounding of wood/montmorillonite (MMT) [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(1): 181-188.
- [14] 吕文华. 木材/蒙脱土纳米插层复合材料的制备[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
LÜ W H. Preparation of wood/montmorillonite (MMT) intercalation nanocomposite [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2004.
- [15] YUKIKO I, TAKATO N. Adsorption properties and structural features of alkali treated wood [J]. *The Japan Wood Research Society*, 2005, 51(6): 364-371.
- [16] 陈玉和, 黄文豪, 常德龙, 等. 氢氧化钠预处理对木材漂白促进作用的研究[J]. 林产化学与工业, 2000, 20(1): 52-56.
CHEN Y H, HUANG W H, CHANG D L, *et al.* Study on promoting effects of NaOH pretreatment on wood bleaching [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2000, 20(1): 52-56.
- [17] 王喜明, 薛振华, 石丽慧, 等. 微波改性木材的初步研究[J]. 木材工业, 2002, 16(6): 16-19.
WANG X M, XUE Z H, SHI L H, *et al.* Preliminary study on microwave modified wood [J]. *China Wood Industry*, 2002, 16(6): 16-19.
- [18] 古忠云, 马玉珍, 李茂果. 微波在材料表面处理中的应用[J]. 粘接, 1996, 20(6): 25-28.
GU Z Y, MA Y Z, LI M G. Microwave application on surface modification of polymer materials [J]. *Adhesion in China*, 1996, 20(6): 25-28.
- [19] 许临晓, 陶凤岗. 有机声化学反应[J]. 有机化学, 1986(6): 415-420.
XU L X, TAO F G. Organic sonochemistry reaction [J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 1986(6): 415-420.
- [20] 邝生鲁, 贡长生. 声化学及其应用[J]. 化学通报, 1990(6): 23-27.
KUANG S L, GONG C S. Sonochemistry and application [J]. *Chemistry Online*, 1990(6): 23-27.
- [21] 李文彬, 赵广杰, 殷宁. 林业工程研究进展[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
LI W B, ZHAO G J, YIN N. *Advances of research on forest products and engineering* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.

(责任编辑 李文军)