



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20160067

不同程度稀酸预处理后杨木枝桠材的物料平衡分析

陈 威, 刘 苇, 侯庆喜, 张金平, 汪 兵, 高建秋
(天津市制浆造纸重点实验室, 天津科技大学造纸学院, 天津 300457)

摘 要: 为了全面系统地研究酸预处理过程对木质纤维生物质的影响,对杨木枝桠材进行不同程度的酸预处理. 结果表明:在稀酸预处理过程中,木聚糖的降解最多,葡聚糖和 Klason 木素的降解较少,这些化学组分的溶出均随着预处理强度的增加而增多. 在稀酸预处理的不同因素中,预处理温度对木聚糖和木素的溶出影响最大,而酸的浓度对乙酰基的溶出影响最大. 同时,稀酸预处理后,木片表面会出现木素颗粒,随着预处理强度的增加而有增加的趋势.

关键词: 稀酸预处理; 杨木枝桠材; 物料平衡; 预处理强度

中图分类号: S789.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2017)02-0030-06

Analysis of the Mass Balance of Poplar Branch Wood after Dilute Acid Pretreatment with Different Intensities

CHEN Wei, LIU Wei, HOU Qingxi, ZHANG Jinping, WANG Bing, GAO Jianqiu
(Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, College of Papermaking Science and Technology,
Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to systematically investigate the effects of acid pretreatment on the lignocellulosic biomass, poplar branch wood was pretreated by dilute acid with different pretreatment intensities. The results showed that much more xylan was dissolved than glucan and Klason lignin during the pretreatment. The dissolution of those compositions increased with the increase of pretreatment intensity. Among different factors of dilute acid pretreatment, the dissolution of acetyl groups was susceptible to acid concentration while the dissolution of xylan and acid soluble lignin was susceptible to temperature. Meanwhile, the lignin granule appeared on the surface of wood chips after the dilute acid pretreatment, and the amount of lignin granule increased with the increase of pretreatment intensity.

Key words: dilute acid pretreatment; poplar branch wood; mass balance; pretreatment intensity

随着世界能源、资源、环境问题的日益严峻,寻找替代燃料成为社会可持续发展的当务之急. 众所周知,生物质是一种适用于生产生物燃料(生物乙醇、生物柴油和生物原油等)的可再生资源^[1],燃料乙醇则是一种可以通过生物质发酵获得的可再生能源,能够替代普遍使用的化石能源. 在用生物质生产乙醇的过程中,将生物质通过酶水解转化成可发酵糖是尤为重要的一步. 生物质本身的一些物理及化学屏障会阻碍酶水解的进行,因此,在生物质酶水解之前,可经过预处理来改变生物质的物理及化学性质,

从而提高酶水解效率^[2]. 稀酸预处理在工业上的应用受到了广泛关注,因为这种预处理可以广泛地应用于各种不同的生物质^[3]. 杨木作为一种速生材,在河北、山东、河南等北方省份有广泛的种植. 杨木的主干木材主要用于木材加工及家具制造,但在木材的加工过程中会产生大量的杨木枝桠材废弃物,这些废弃的杨木枝桠材是一种丰富的纤维素资源,将它们用于生产生物乙醇等高附加值产品,对资源的充分利用以及环境保护具有重要的意义. 因此,本文对杨木枝桠材进行不同程度的稀酸预处理,分析原料中主要的化学组

收稿日期: 2016-03-02; 修回日期: 2016-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31300491)

作者简介: 陈 威(1991—),男,湖南邵阳人,硕士研究生;通信作者: 刘 苇,副研究员, weiliu@tust.edu.cn

数字出版日期: 2016-12-01; 数字出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20161201.1034.002.html>

分(葡聚糖、木聚糖和木素)在预处理过程的物料平衡,同时对预处理后的杨木枝桠材木片进行扫描电镜(SEM)以及红外光谱(FTIR)分析,从而全面系统地了解不同程度稀酸预处理对杨木枝桠材木片的影响.诸多研究表明稀硫酸预处理能提高木质纤维生物物质的酶水解效率^[4-5],基于此,本文开展的有关杨木枝桠材在稀酸预处理过程中的物料平衡的研究,对于利用林业废弃物生产燃料乙醇将具有一定的指导意义.

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

本文所用的杨木枝桠材木片取自山东某工厂,木片规格为 35 mm × 10 mm × 5 mm. 木片经过清洗和风干之后,在室温下用编织袋储存备用. 所用杨木枝桠材木片的主要化学组分的质量分数分别为:葡聚糖

42.25%、木聚糖 14.80%、Klason 木素 21.75%、酸溶木素 4.32%、乙酰基 2.59%、乙醇抽出物 1.88%.

实验所用葡萄糖和木糖标准样品为色谱纯,其余试剂为分析纯,均购自国药集团化学试剂有限公司.

CN3000 型 M/K 双缸蒸煮器,美国 M/K 系统公司;1200 系列高效液相色谱仪(HPLC),美国安捷伦科技有限公司;SU-1510 型扫描电子显微镜,日本日立公司.

1.2 实验流程

杨木枝桠材木片的稀酸预处理在 M/K 双缸蒸煮器中完成,稀酸预处理的条件见表 1. 实验过程中所用酸为硫酸,表 1 中酸用量指硫酸质量相对于绝干木片质量的百分比. 稀酸预处理完成后,分别收集预处理后的木片和水解液,并分别测定预处理后木片和水解液中的化学组分以及木片的得率. 然后将木片用 SEM 以及 FTIR 进行观察与检测.

表 1 稀酸预处理的条件

Tab. 1 Conditions for dilute acid pretreatment

| 组别 | 编号 | 强度因子 | 时间/min | 温度/°C | 酸用量/% | 固液比 |
|----|----|------|--------|-------|-------|--------|
| t | t1 | 1.08 | 20 | 150 | 1.00 | 1 : 10 |
| | t2 | 1.26 | 30 | 150 | 1.00 | 1 : 10 |
| | t3 | 1.38 | 40 | 150 | 1.00 | 1 : 10 |
| | t4 | 1.56 | 60 | 150 | 1.00 | 1 : 10 |
| | t5 | 1.69 | 80 | 150 | 1.00 | 1 : 10 |
| T | T1 | 0.38 | 30 | 120 | 1.00 | 1 : 10 |
| | T2 | 0.67 | 30 | 130 | 1.00 | 1 : 10 |
| | T3 | 0.96 | 30 | 140 | 1.00 | 1 : 10 |
| | T4 | 1.26 | 30 | 150 | 1.00 | 1 : 10 |
| | T5 | 1.55 | 30 | 160 | 1.00 | 1 : 10 |
| S | S1 | 0.96 | 30 | 150 | 0.50 | 1 : 10 |
| | S2 | 1.13 | 30 | 150 | 0.75 | 1 : 10 |
| | S3 | 1.26 | 30 | 150 | 1.00 | 1 : 10 |
| | S4 | 1.44 | 30 | 150 | 1.50 | 1 : 10 |
| | S5 | 1.56 | 30 | 150 | 2.00 | 1 : 10 |
| R | R1 | 1.26 | 30 | 150 | 1.00 | 1 : 10 |
| | R2 | 1.41 | 30 | 150 | 1.00 | 1 : 7 |
| | R3 | 1.66 | 30 | 150 | 1.00 | 1 : 4 |

1.3 实验方法

1.3.1 化学组分分析

稀酸预处理前后的杨木枝桠材木片中的主要化学组分(葡聚糖、木聚糖、木素、乙酰基以及乙醇抽出物)分析参照美国可再生能源实验室的标准(NREL/TP-510-42618、NREL/TP-510-42619)进行^[6-7]. 水解液中的主要化学组分分析参照 NREL/TP-510-42623 进行^[8].

1.3.2 SEM 分析

取表面较光滑平整的样品放在 55 °C 的真空干燥箱中干燥 4 h,使样品干度达到 90% 以上. 将样品贴到扫描电镜的载物台上,进行喷金处理,在真空状态下用扫描电子显微镜进行观察.

1.3.3 FTIR 分析

按比例称取 3.5 mg 绝干木粉(≤40 目)和 350 mg 溴化钾,将称好的试样真空干燥 4 h 后,放入

玛瑙研钵中混合并研细,压制成全透明的压片,用傅里叶变换红外光谱仪测出样品的红外光谱.

1.4 计算

1.4.1 强度因子的计算

为了评价不同稀酸预处理的强度,本文采用CSF(combined severity factor)来表示强度因子,其计算公式^[9-10]为

$$R_0 = t \times \exp\left(\frac{T-100}{14.75}\right) \quad (1)$$

$$\text{CSF} = \lg R_0 - \text{pH} \quad (2)$$

式中: t 为保温时间, min; T 为反应温度, °C.

1.4.2 物料平衡的计算

在水解过程中,木聚糖和葡聚糖都会水解成多种水解产物,为了方便分析,将不同的水解产物含量都换算成相应聚糖的含量,不同碳水化合物的回收率或得率的计算均参照文献[11]进行.

2 结果与讨论

2.1 化学组分分析

经不同稀酸预处理后的杨木枝桠材木片的化学

组分见表 2. 从表 2 中可以发现:当稀酸预处理的固液比相同(t 、 T 和 S 组)时,木片的得率随着处理强度的增加而降低;当其他条件一致,而固液比不同时(R 组),木片的得率随着预处理强度的增加而略有增加. 这可能是由于随着固液比的增加,整个稀酸预处理体系中自由水变少,较少的水分使降解的化学组分难以完全溶解到反应体系中,从而引起木片得率有所增加.

木片得率的降低主要是由于稀酸预处理导致了木片中部分化学组分的溶出. 从化学组分分析得知,随着预处理强度的增加,木片中木聚糖和木素的含量下降,其中木聚糖的含量下降最多. 这是因为在酸性条件下木聚糖容易被降解. 木聚糖的降解和溶出有利于增加木片中纤维素的可及度,从而对后续的酶水解产生积极的影响^[12]. 预处理后木片中的葡聚糖的含量则随着预处理强度的增加而有所增加. 这是因为在稀酸预处理过程中,木聚糖和木素的降解和溶出较多,葡聚糖的溶出较少,从而导致木片中葡聚糖的含量相对增加. 由此可见,稀酸预处理能促使部分半纤维素和木素降解溶出,而对纤维素的破坏较小,这都有利于后续酶水解的进行.

表 2 不同稀酸预处理后杨木枝桠材木片的得率及化学组分

Tab. 2 The yield and chemical compositions of poplar branch wood chips after different dilute acid pretreatment

| 组别 | 序号 | 强度因子 | 木片得率/% | 质量分数/% | | | |
|----|----|------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| | | | | 葡聚糖 | 木聚糖 | Klason 木素 | 酸溶木素 |
| t | t1 | 1.08 | 94.33 ± 0.58 | 44.99 ± 0.15 | 14.34 ± 0.05 | 21.72 ± 0.23 | 3.77 ± 0.11 |
| | t2 | 1.26 | 92.16 ± 0.25 | 44.97 ± 0.22 | 10.53 ± 0.07 | 22.30 ± 0.37 | 3.16 ± 0.10 |
| | t3 | 1.38 | 89.38 ± 0.60 | 45.56 ± 0.10 | 10.08 ± 0.09 | 21.60 ± 0.59 | 3.08 ± 0.09 |
| | t4 | 1.56 | 88.33 ± 0.06 | 46.46 ± 0.10 | 9.56 ± 0.03 | 22.64 ± 0.17 | 2.91 ± 0.05 |
| | t5 | 1.69 | 85.11 ± 0.84 | 47.10 ± 0.07 | 8.75 ± 0.00 | 22.02 ± 0.06 | 2.63 ± 0.01 |
| T | T1 | 0.38 | 98.75 ± 0.13 | 42.97 ± 0.10 | 14.54 ± 0.08 | 21.38 ± 0.29 | 3.88 ± 0.04 |
| | T2 | 0.67 | 97.83 ± 0.19 | 41.65 ± 0.36 | 14.12 ± 0.07 | 21.76 ± 0.64 | 3.84 ± 0.18 |
| | T3 | 0.96 | 96.31 ± 0.86 | 43.21 ± 0.09 | 11.09 ± 0.14 | 23.35 ± 0.54 | 3.74 ± 0.05 |
| | T4 | 1.26 | 92.16 ± 0.25 | 44.97 ± 0.22 | 10.53 ± 0.07 | 22.30 ± 0.37 | 3.16 ± 0.10 |
| | T5 | 1.55 | 84.35 ± 0.23 | 47.23 ± 0.10 | 8.65 ± 0.03 | 25.30 ± 0.43 | 2.36 ± 0.02 |
| S | S1 | 0.96 | 93.84 ± 0.22 | 42.21 ± 0.56 | 14.21 ± 0.20 | 20.08 ± 0.37 | 3.40 ± 0.05 |
| | S2 | 1.13 | 92.66 ± 0.89 | 43.95 ± 0.96 | 12.22 ± 0.33 | 20.38 ± 0.77 | 3.41 ± 0.01 |
| | S3 | 1.26 | 90.09 ± 0.96 | 45.53 ± 0.89 | 10.34 ± 0.24 | 20.98 ± 0.85 | 3.41 ± 0.03 |
| | S4 | 1.44 | 88.41 ± 0.75 | 47.94 ± 0.72 | 7.04 ± 0.52 | 22.74 ± 0.52 | 2.92 ± 0.00 |
| | S5 | 1.56 | 87.22 ± 0.42 | 45.08 ± 0.36 | 5.51 ± 0.71 | 23.71 ± 0.01 | 2.87 ± 0.27 |
| R | R1 | 1.26 | 90.09 ± 0.68 | 44.74 ± 0.39 | 12.04 ± 0.44 | 21.45 ± 0.52 | 4.12 ± 0.05 |
| | R2 | 1.41 | 91.34 ± 0.55 | 45.12 ± 0.72 | 10.13 ± 0.11 | 22.06 ± 0.04 | 4.06 ± 0.06 |
| | R3 | 1.66 | 92.23 ± 0.68 | 46.41 ± 0.62 | 8.21 ± 0.63 | 22.20 ± 0.02 | 3.63 ± 0.27 |

2.2 物料平衡的计算分析

本文研究了不同程度稀酸预处理的杨木枝桠材木片中不同化学组分的物料平衡. 经过稀酸预处理后,木片中的葡聚糖和木聚糖以不同的形式存在于残

余木片和水解液中. 残余木片中主要有葡聚糖和木聚糖,水解液中主要有低聚葡萄糖、低聚木糖、葡萄糖、木糖、羟甲基糠醛(HMF)和糠醛等,而 HMF 和糠醛分别是葡萄糖和木糖经过进一步降解所得的降

解产物. 在进行物料平衡计算时, 木片中的聚糖用得率(%)表示, 水解液中的降解产物用回收率(%)表示.

2.2.1 葡聚糖

经过不同程度的稀酸预处理后, 葡聚糖物料平衡情况如图 1 所示.

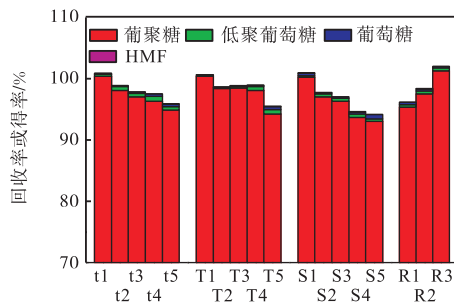


图 1 葡聚糖的物料平衡
Fig. 1 Mass balance of glucan

图 1 中葡聚糖、低聚葡萄糖、葡萄糖和 HMF 的得率或回收率分别为它们换算成葡聚糖后占原料中葡聚糖的百分比. 从图 1 中可以发现, 当稀酸预处理的固液比相同时 (t、T 和 S 组), 葡聚糖的得率随着预处理强度的增加而有减少的趋势, 当以固液比为变量时 (R 组), 得率随着预处理强度的增加而增加, 这说明延长预处理时间、提高预处理温度以及增加酸用量会促进葡萄糖的降解; 同时, 其他条件不变时 (R 组), 随着固液比的增加葡聚糖得率增加. 总的来说, 在经过不同稀酸预处理之后, 葡聚糖的降解非常有限, 在预处理强度最强时, 木片中葡聚糖的得率也有 94% 左右. 同时, 在水解液中 HMF 的含量很小 (基本没有). 以上结论说明稀酸预处理对纤维素的降解作用很弱.

2.2.2 木聚糖

木聚糖的物料平衡情况如图 2 所示.

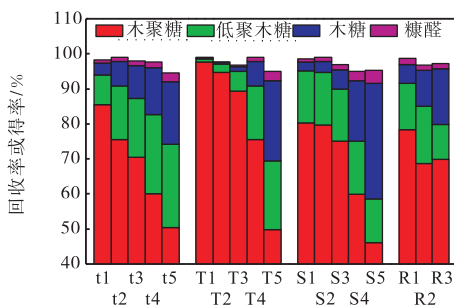


图 2 木聚糖的物料平衡
Fig. 2 Mass balance of xylan

从图 2 中可以看出, 在稀酸预处理过程中, 木聚糖的降解比葡聚糖更加显著. 随着预处理强度的增加木片中的木聚糖的得率降低, 同时随着预处理温度

从 120 °C 增加到 160 °C (T1 至 T5) 时, 木聚糖的变化最大, 木聚糖的得率从 97.64% 减少到 49.74%, 水解液中低聚木糖、木糖以及糠醛回收率分别从 0.88%、0.16% 和 0.28% 增加到 19.76%、22.75% 和 2.79%. 从图中 T 组可看出在温度大于 150 °C (T4) 后, 木聚糖溶解突然增加. 这是在水溶液中一部分半纤维素从 150 °C 就开始溶解^[13]. 因此, 在稀酸预处理过程中, 木聚糖对预处理温度的变化比较敏感, 增加预处理温度有利于木聚糖的降解及溶出. 同时, 水解液中糠醛含量的变化也是随着预处理强度的增加而增加.

随预处理强度的增加, 木片中木聚糖被大量降解, 水解液中木糖和低聚木糖回收率增加. 在预处理强度比较低时, 水解液中的木聚糖的降解产物主要是以低聚糖的形式存在, 当处理强度较大时, 主要以木糖单糖的形式存在, 同时糠醛的回收率也会随之增加. 这主要是由于在比较高的处理强度下, 低聚糖更加容易进一步水解, 生成单糖, 木糖也会进一步发生脱水反应生成糠醛^[14]. 同时, 木糖的溶出有利于酶水解, 主要是由于它的溶出可以增加生物质的平均孔径, 从而增加木质纤维生物质的可及度, 这是稀酸预处理的一个最重要的特性与作用机制^[12].

在稀酸预处理过程中乙酸就是半纤维素中的乙酰基降解生成的, 所以乙酸的生成可以间接地反映出半纤维素的溶出. 不同稀酸预处理对水解液中乙酸质量浓度的影响如图 3 所示.

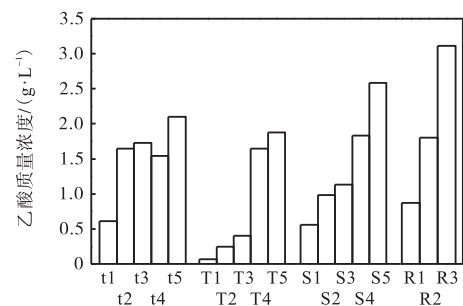


图 3 不同稀酸预处理对水解液中乙酸质量浓度的影响
Fig. 3 Effects of different dilute acid pretreatment on the acetic acid mass concentration of hydrolysates

随着预处理温度、时间、酸用量以及固液比的增加, 乙酸在水解液中的质量浓度也随着增加. 其中, 随着固液比的增加乙酸的质量浓度增加幅度比较大, 其他条件不变时, 酸用量从 0.5% 增加到 2.0% 时 (从 S1 到 S5), 水解液中乙酸的质量浓度从 0.56 g/L 增加到 2.58 g/L, 增加了 3.61 倍. 当酸用量和固液比较大时乙酸质量浓度最大, 在 S5 和 R3 处理条件下乙酸质量浓度分别为 2.58 g/L 和 3.11 g/L. 因为酸用量和

固液比的增加都会导致酸质量浓度的增加,这说明在稀酸预处理过程中,水解液中的酸浓度的变化对乙酰基的溶出影响最大.

从总体来看,经过不同程度的稀酸预处理后,不同化学组分及其降解产物百分比的总和都接近100%,但不等于100%.这是由于在本文中对葡聚糖

的降解产物的测定只涉及 HMF 或糠醛,其他副产物并没有涉及.

2.2.3 木素

稀酸预处理后 Klason 木素和酸溶木素的物料平衡如图 4 所示.

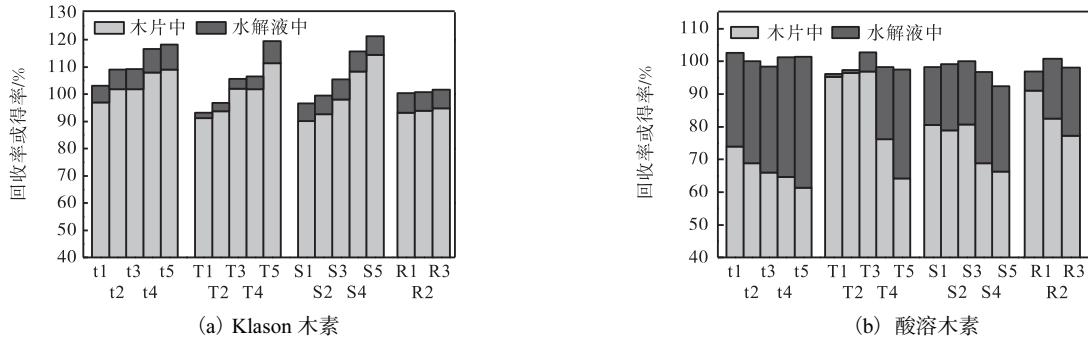


图 4 Klason 木素与酸溶木素的物料平衡

Fig. 4 Mass balance of Klason lignin and acid soluble lignin

当以预处理时间为自变量时(t1 至 t5),随着预处理强度的增加,水解液中的 Klason 木素的回收率略有增加,而木片中的木素却增加较大(尤其是 t、T 和 R 这 3 组),随着处理强度的增加,Klason 木素的得率甚至超过了 100%,证明在稀酸预处理过程中,木片中木素含量增加了.有文献^[15]指出,这是由于在稀酸预处理过程中,木质纤维生物质中的多糖会在酸的催化作用下发生脱水 and 降解作用,并与木素发生缩聚或聚合等一系列变化,并最终形成假木素,这些假木素的形成会导致 Klason 木素得率的增加.当预处理温度升高时(T1 至 T5),Klason 木素在水解液中回收率的变化比较大(从 2.10% 到 8.14%,增加了 2.88 倍).这说明在稀酸预处理过程中,温度的变化对

Klason 木素的溶出影响最大.

温度的变化(从 T1 至 T5)对酸溶木素得率变化的影响比较大,这是由于温度的增加会导致木素的降解产物融化,使它溶出的速率变快,从而导致木素溶出量的增加^[16].总的来说,稀酸预处理降解酸不溶木素的百分含量要大于 Klason 木素的百分含量,但是酸不溶木素溶出的总量比 Klason 木素要少(见表 2),这是由于在木片中 Klason 木素的含量要远远大于酸溶木素.

2.3 稀酸预处理对杨木枝桠材木片表面形貌的影响

采用扫描电子显微镜观察经过不同程度稀酸预处理之后杨木枝桠材木片的表面形貌变化情况,结果如图 5 所示.

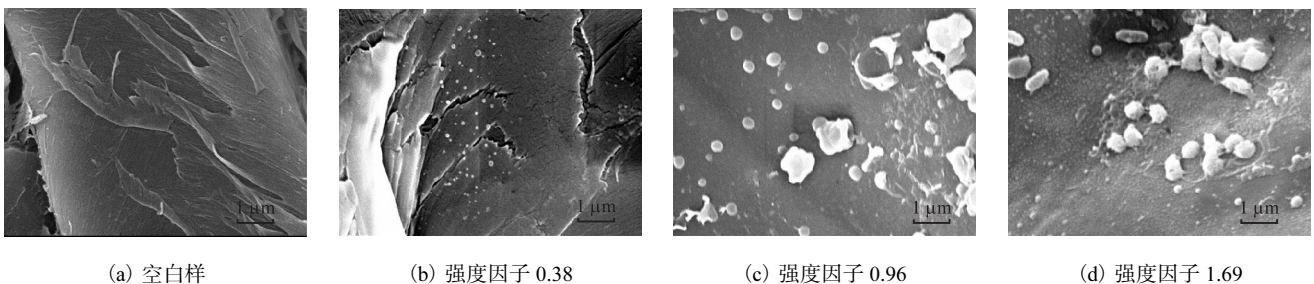


图 5 经不同强度稀酸预处理后木片 SEM 图

Fig. 5 SEM of radial sections of poplar wood chips after different pretreatment

从图 5 中可以看出,未经稀酸处理的木片表面比较光滑,而经过稀酸预处理后木片表面出现了一些圆点状物质,随着预处理强度的增加这些圆点状物质逐渐增加且颗粒逐渐增大.当稀酸预处理强度最大时(图 5(d)),纤维表面出现更大的颗粒.在预处理过

程中会有部分木素及其降解产物以熔融状态存在于水解液中,因为木素的部分降解产物在温度大于或等于 120 °C 时会达到熔融状态^[17],这些熔融状态下的木素及其降解产物会在环境冷却下来后沉积并吸附在纤维表面形成点状物质,有文献^[18]称之为“木

素液滴”。同时,随着预处理强度进一步增大,水解液中的木素增加,木素液滴会聚集在一起,形成比较大的液滴,形成的表面木素也更多更大(图5(d)).这些表面木素在酶水解过程中会不可逆地吸附酶,并降低酶水解效率^[17].因此,在稀酸预处理过程中过高的处理强度不仅会造成更大的能源消耗,还会使木片表面形成木素颗粒,不利于后续的酶水解工艺.

2.4 稀酸预处理后杨木枝桠材木片红外光谱分析

利用 FTIR 分析杨木枝桠材木片经过不同程度稀酸预处理后官能团的变化情况,以此来反映稀酸预处理对木片中主要化学组分的影响情况.红外光谱扫描的区域为 800 cm^{-1} 到 1800 cm^{-1} ,测试结果如图6所示.在 1736 cm^{-1} 处的吸收峰是存在于半纤维素和木素中的游离醛和非共轭酮类的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动^[19].在 1653 cm^{-1} (代表苯环共轭取代基的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动), 1596 cm^{-1} 和 1508 cm^{-1} (代表苯环的碳骨架振动)以及 1248 cm^{-1} (代表木素愈疮木酚基单元的 $\text{C}-\text{O}$ 伸缩振动)处都有吸收峰^[20],这些峰都是木素的特征吸收峰,其吸收强度随着预处理强度的增加而减弱,这表明随着预处理强度的增加,木片中的木素含量减少.在进行化学分析时 Klason 木素是增加的,但是由于增加的 Klason 木素本质上并不是木素,因此红外光谱分析结果与表2的数据一致.

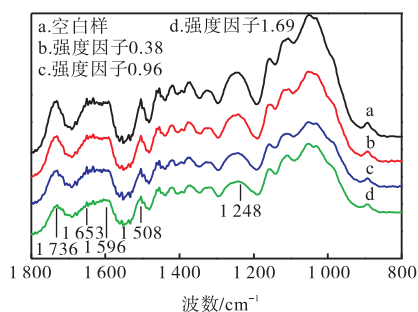


图6 不同预处理强度下木片的红外光谱图

Fig. 6 FTIR spectrum of the wood chips after different pretreatment

3 结论

(1)在稀酸预处理过程中,杨木枝桠材木片中木聚糖的降解最多,而葡聚糖的降解最少,这些化学组分的降解溶出均随着预处理强度的增加而增加,因此木片得率会相应下降.同时,FTIR分析也可以证实随着预处理强度的增加木片中木素的含量有减少的趋势.由于其他化学组分的大量降解,杨木枝桠材木片中葡聚糖的含量会随着预处理强度的增加而相对

增加,而 Klason 木素随着预处理强度的增加而增加是由于预处理过程中假木素的形成.

(2)不同的稀酸预处理的因素中,酸的浓度对乙酰基的降解与溶出影响最大,而预处理温度对木聚糖和木素的溶出影响较大.在处理强度较低时,水解液中的降解产物主要是低聚糖;预处理强度较高时,水解液中的降解产物主要是单糖.

(3)在稀酸预处理过程中,木片表面会有木素颗粒的形成,且随着预处理强度的增加而增加.这些表面木素的形成会限制后续酶水解的进行.因此,在对木质纤维生物质进行稀酸预处理时,不宜采用过高的预处理强度.

参考文献:

- [1] Hamelinck C N, Van Hooijdonk G, Faaij A P C. Ethanol from lignocellulosic biomass: Techno-economic performance in short-, middle-and long-term[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 28(4): 384-410.
- [2] 曹国良,张小曳,王丹,等. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(4): 389-393.
- [3] Mosier N, Wyman C E, Dale B E, et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(6): 673-686.
- [4] Wyman C E, Dale B E, Elander R T, et al. Comparative sugar recovery and fermentation data following pretreatment of poplar wood by leading technologies[J]. *Biotechnology Progress*, 2009, 25(2): 333-339.
- [5] Wang G S, Pan X J, Zhu J Y, et al. Sulfite pretreatment to overcome recalcitrance of lignocellulose (SPORL) for robust enzymatic saccharification of hardwoods[J]. *Biotechnology Progress*, 2009, 25(4): 1086-1093.
- [6] National Renewable Energy Laboratory. NREL-510-42618 Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass[S]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [7] National Renewable Energy Laboratory. NREL-510-42619 Determination of Extractives in Biomass[S]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- [8] National Renewable Energy Laboratory. NREL-510-42623 Determination of Sugars, Byproducts, and Degradation Products in Liquid Fraction Process Samples[S]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2008.

(下转第78页)