



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180090

## 不同纸浆对甲醛气体的吸附性能

赵北辰, 刘秋娟

(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:** 通过静态甲醛吸附实验,研究了本色与漂白针叶木硫酸盐浆(KP)、本色与漂白阔叶木 KP、本色竹 KP 以及本色亚硫酸铵针叶木浆等 9 种浆的甲醛吸附速率,测定了 11 种不同纸浆在相同条件下的甲醛吸附量,并与两种市售吸附用活性炭进行了对比.实验结果表明:室温下 9 种浆的甲醛饱和吸附时间均小于 3 h,多为 2~3 h.本色针叶木和阔叶木 KP 对甲醛的吸附速率大于漂白针叶木和阔叶木 KP.一般饱和吸附量越大,吸附速率也越快.实验条件下吸附 4 h 后纸浆的甲醛吸附量结果是本色亚硫酸铵针叶木浆最大(213 mg/kg),本色针叶木 KP 和本色桦木 KP 以及本色桉木 KP 次之,其甲醛吸附量在 179~193 mg/kg 之间;漂白针叶木 KP 和漂白阔叶木 KP 的甲醛吸附量较小,分别为 135 mg/kg 和 126 mg/kg.本色烧碱-蒽醌麦草浆和本色高得率竹浆对甲醛的吸附性能与本色木材浆相近.冷碱浸渍能提高纸浆的吸附效果.有些纸浆的甲醛吸附效果可达到甚至超越一些吸附用活性炭的吸附效果.

**关键词:** 纸浆; 甲醛; 吸附量; 吸附速率; 冷碱浸渍

中图分类号: TS749; X51

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2019)05-0068-06

## Adsorption Performance of Various Pulp for Formaldehyde Gas

ZHAO Beichen, LIU Qiujuan

(Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, College of Papermaking Science and Technology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Static formaldehyde adsorption experiments were conducted to investigate the formaldehyde adsorption rates of nine pulps. The pulps included unbleached and bleached hardwood kraft pulp (KP), unbleached and bleached softwood KP, unbleached bamboo KP, unbleached softwood ammonium sulfite pulp and so on. The formaldehyde adsorption of 11 different pulps under the same conditions were measured and compared with two kinds of commercially available activated carbon for adsorption. The results indicate that the saturated adsorption time of formaldehyde of the 9 pulps at room temperature was less than 3 h, usually between 2 h and 3 h. The formaldehyde adsorption rates of the unbleached softwood and hardwood KP were greater than that of the bleached softwood and hardwood KP. In general, the larger the saturated adsorption amount, the faster the adsorption rate. Under the experimental conditions and after four-hour adsorption, the unbleached softwood ammonium sulfite pulp had the best adsorption property (213 mg/kg), the unbleached birch KP and the unbleached eucalyptus KP were the next (179-193 mg/kg), while the formaldehyde adsorption amount of the bleached softwood and hardwood KP were the lowest (135 mg/kg and 126 mg/kg respectively). The unbleached wheat straw soda-AQ pulp and unbleached bamboo high yield pulp had the similar formaldehyde adsorption performance as the unbleached wood pulp. Cold alkali impregnation can improve the adsorption performance. The formaldehyde adsorption effect of some pulps can be the same as or even better than that of some activated carbon.

**Key words:** pulp; formaldehyde; adsorption capacity; adsorption rate; cold alkali impregnation

甲醛是室内空气主要污染物之一,是一种常温下无色且具有特殊辛辣、刺激性气味的气体.室内甲醛主要来自组合家具、装饰材料、涂料、地板材料、墙纸以及香烟燃烧产生的烟雾等<sup>[1-2]</sup>.长期生活在低浓度

收稿日期: 2018-03-26; 修回日期: 2018-06-29

作者简介: 赵北辰(1993—),女,河北廊坊人,硕士研究生;通信作者:刘秋娟,教授,liuqiujuan@tust.edu.cn

甲醛的环境中会引起一系列室内空气综合征,比如嗅觉异常、过敏、肝功能损伤、头晕头痛、消化功能紊乱、记忆力减退,严重可导致死亡<sup>[3]</sup>。曾有报道<sup>[4]</sup>指出,甲醛能使蛋白质和细胞DNA相互交联,从而产生致突变和致癌作用。随着对甲醛危害认识的逐渐提高,人们对除甲醛材料的需求量日益增大。

目前室内甲醛的主要治理方法有:臭氧氧化法、光催化氧化法、金属氧化法和吸附法。吸附法富集功能强,脱除率高,不易造成二次污染,所以成为治理甲醛的主要方法<sup>[5]</sup>。在国内挥发性有机物(VOCs)治理技术中,吸附法占到38%,位居第一<sup>[6]</sup>。市面上的吸附剂主要有分子筛、八面沸石、丝光沸石、活性炭、活性炭纤维等。活性炭纤维与传统活性炭相比,具有更大的比表面积,吸附微孔暴露在纤维表面,在低浓度下吸附效果更好,吸附容量是传统活性炭的1~10倍;并且,吸附后的吸附剂可通过变温变压脱附、吹扫、置换、微波加热等技术再生<sup>[7]</sup>。目前也有不少研究者在研究吸附产品性能的改进。

纸基吸附材料最近成为新热点,由于纸浆本身所含有的植物纤维的物理结构呈多毛细管性,其比表面积较大,具有一定的吸附性能;用纸浆制成纸基吸附材料,纤维与纤维之间可形成疏松的多孔结构,而且多为微孔结构,丰富的微孔结构使其对气相和液相中不同种类的吸附质均具有很好的吸附作用,不仅能用于高浓度的吸附质处理,对微量或痕量的吸附质也适用。通常将纸基与海泡石、活性炭、TiO<sub>2</sub>等相结合来吸附甲醛等气相污染物。Espino-Pérez等<sup>[8]</sup>将经过酯化改性的纳米纤维素用作吸附材料,该材料对有机气体有较好的吸附性能。周建斌等<sup>[9]</sup>将活性炭和胶黏材料复配好加入纸浆中抄成活性炭吸附纸,可以对甲苯蒸气、甲醛、三氯甲烷蒸气有很好的吸附效果。日本一志公司研发出了一种加填了硅藻土和生物酶的特殊壁纸,该壁纸能通过物理吸附和生物酶的氧化作用永久消除有害物质<sup>[10]</sup>。王喜华等<sup>[11]</sup>研究纳米TiO<sub>2</sub>/改性竹炭涂布纸的甲醛吸附性能时发现,在初始甲醛质量浓度为0.8 mg/m<sup>3</sup>、紫外光照射3 h时,该涂布纸对甲醛的吸附降解率高达93.75%。白鸽<sup>[12]</sup>研究了墙纸和布类对室内污染物甲苯的吸附情况,结果表明,对甲苯的吸附性能的高低顺序为:全纸墙纸>PVC墙纸>无纺布墙纸>布料,而且全纸墙纸的浓度保持性能也最好。刘志明等<sup>[13]</sup>用芦苇浆制得纤维素原液与壳聚糖接枝共聚制备成的气凝胶球进行吸附实验,在吸附过程中,甲醛能与壳聚糖中的氨基结合生成无毒害作用的席夫碱,从而被除去。

本文使用不同的纸浆进行甲醛吸附实验,测定不同纸浆在相同条件下的吸附量和吸附速率,并与两种市售的吸附用活性炭进行对比,旨在探讨不同纸浆对甲醛的吸附性能,为纸基甲醛吸附材料制备时纸浆的选择提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验原料

漂白针叶木硫酸盐浆板为俄罗斯进口的乌斯齐浆;本色针叶木硫酸盐浆板来自浙江太平洋纸业;漂白阔叶木硫酸盐浆板为亚太森博浆纸有限公司生产的商品浆板;本色竹硫酸盐浆板和本色高得率竹浆板由四川某竹浆厂提供;本色桉木硫酸盐浆取自广西某浆厂。本文硫酸盐浆简称为KP。

本色亚硫酸铵针叶木浆、本色亚硫酸盐稻草浆、本色烧碱-蒽醌麦草浆和杨木化机浆均为实验室自制纸浆。

粒状活性炭1#和活性炭2#分别为天津市风船化学试剂科技有限公司和天津市大茂化学有限公司的产品。

### 1.2 吸附用纸浆的制备

将上述浆板或风干浆用水浸泡后疏解,在标准纸页成型器上抄造成定量约为500 g/m<sup>2</sup>的浆饼;将浆饼置于50℃的电热鼓风干燥箱中,烘干后贮存于密封塑料袋中平衡水分,并测定水分含量。

### 1.3 纸浆冷碱浸渍

将上述浆板和风干浆用质量分数为10%的氢氧化钠溶液在浆浓度为10%、温度为室温下浸渍处理3 h,处理后用蒸馏水洗至中性。后续步骤按照1.2节操作进行。

### 1.4 纸浆或活性炭的吸附甲醛实验

将上述1.2节和1.3节中烘干的浆饼裁剪成绝干质量为(2.500±0.010)g的方形,并折成“V”字形。将市售活性炭放到电热鼓风干燥箱中(105℃)烘干,以去除其中的水分和吸附在其中的气体。取质量为(2.500±0.010)g烘干的活性炭平铺到300目的不锈钢网上,并将此不锈钢网包好。将纸浆浆样或活性炭试样置于水平放置的6.4 L广口瓶中间位置,向该广口瓶中注入5 μL 83.46 g/L的甲醛水溶液,立即密封广口瓶。甲醛在广口瓶中挥发,形成气相环境。静置至预定吸附时间后,取出浆样或活性炭试样置于另一6.4 L无甲醛的广口瓶中静置7 min,以脱除假吸附,之后取出浆样,马上进行甲醛吸附量检测。

### 1.5 甲醛吸附量测定

甲醛吸附量的测定参考 GB/T 34448—2017《生活用纸及纸制品甲醛含量的测定》中乙酰丙酮-可见分光光度法进行。

本色浆用水浸泡的溶液有颜色,会对测定有影响,并且实验中发现每种浆的颜色对各自标准曲线的影响各不相同。因此,实验中对标准曲线的制作方法进行了探讨和修改。按照逐级稀释的方法得到三级甲醛标准溶液,用移液管准确移取 0、5.0、10.0、15.0、25.0 和 50.0 mL 的三级甲醛标准溶液加入到 100 mL 容量瓶中,加水稀释至刻度线;另准确称取 6 份质量为  $(2.500 \pm 0.010)$  g 本色浆样,分别加入上述 6 个锥形瓶中,然后放入恒温振荡器中振荡 1 h。吸光度测定参照 GB/T 34448—2017《生活用纸及纸制品甲醛

含量的测定》中的方法进行。活性炭吸附标准曲线绘制方法与本色浆的相同。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同纸浆的甲醛吸附量

选取本色和漂白针叶木 KP、本色和漂白阔叶木 KP、本色烧碱-蒽醌麦草浆、杨木化机浆等 11 种不同种类的纸浆,水分含量均在 4%~5%,在相同条件下(吸附时间为 4 h,吸附温度为 22~25 °C)进行吸附,测量不同浆样的吸附量。由探索实验得出,一般纸浆的甲醛饱和和吸附时间为 3 h 左右。因此,此次实验吸附时间选择 4 h。11 种不同纸浆的甲醛吸附实验结果见表 1。

表 1 不同纸浆相同条件下的甲醛吸附量

Tab. 1 Formaldehyde adsorption capacity of different pulps under the same conditions

纸浆种类	浆饼定量/(g·m <sup>-2</sup> )	浆饼松厚度/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	吸附温度/°C	吸附量/(mg·kg <sup>-1</sup> )
本色亚硫酸铵针叶木浆	511	6.57	23	213
本色针叶木 KP	536	5.61	23	181
漂白针叶木 KP	567	5.37	24	135
本色桦木 KP	544	6.19	22	193
本色桉木 KP	534	6.12	23	179
漂白阔叶木 KP	524	5.40	24	126
本色烧碱-蒽醌麦草浆	521	4.92	25	191
本色亚硫酸盐稻草浆	501	4.36	23	159
本色竹 KP	533	5.02	25	170
本色高得率竹浆	547	5.27	22	181
杨木化机浆	498	4.57	25	156

分析表 1 中的数据可以发现:在相同的吸附条件下不同纸浆的甲醛吸附量是有差异的,对于木浆而言,其中本色亚硫酸铵针叶木浆的甲醛吸附量最大,为 213 mg/kg;本色针叶木 KP、本色桦木 KP 以及本色桉木 KP 次之,其甲醛吸附量在 179~193 mg/kg;漂白针叶木 KP 和漂白阔叶木 KP 的甲醛吸附量较小,分别为 135 mg/kg 和 126 mg/kg。这与纸浆吸附苯系物的实验结果相似,中性本色亚硫酸铵针叶木浆对苯的吸附效果最好,商品漂白阔叶木 KP 和漂白针叶木 KP 对本色浆而言对苯的吸附效果较差<sup>[14]</sup>。

有些非木材本色化学浆以及本色高得率竹浆对甲醛的吸附性能与本色木浆相近,其中,本色烧碱-蒽醌麦草浆较好一些,本色亚硫酸盐稻草浆稍差一些。杨木化机浆对甲醛的吸附效果一般,其吸附量只有 156 mg/kg。

从上述实验结果来看,本色浆的吸附性能要优于漂白浆。

纸浆的漂白程度会影响甲醛的吸附量,含氮基团和含氧基团会对甲醛的吸附性能产生影响,含酚羟基越多或氮碳比(N/C)越大,甲醛吸附性能越好<sup>[15]</sup>。本色浆中含有少量木素,木素结构上含有酚羟基。在化学浆漂白过程中,漂白剂与木素发生化学反应,特别是与木素的酚型结构更容易反应<sup>[16]</sup>,从而使木素降解并从浆中溶出;经过漂白的纸浆中酚羟基含量要比本色浆要少,因此漂白浆比本色浆的甲醛吸附量少。用亚硫酸铵法蒸煮的针叶木浆中可能会含有氨基,氨基对甲醛具有亲和性,所以本色亚硫酸铵针叶木浆的甲醛吸附量最大。

### 2.2 不同活性炭的甲醛吸附量

将两种吸附用颗粒状活性炭按照与纸浆相同的方法进行了甲醛吸附实验,探讨了活性炭的饱和吸附量。由本课题组屈永波<sup>[17]</sup>的前期实验可知,活性炭 1#的甲醛饱和和吸附时间在 3 h 左右。本文在吸附温度为 23 °C 下,测定出活性炭 1#吸附 3 h 后的饱和吸附

量为 168 mg/kg. 图 1 为活性炭 2#在吸附温度为 26 °C时的吸附实验结果.

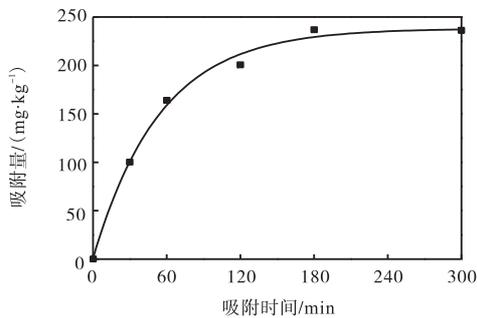


图 1 不同时间下活性炭 2#的甲醛吸附量

Fig. 1 Formaldehyde adsorption of activated carbon 2# at different time

由图 1 可知:活性炭 2#在 210 min 左右达到饱和,饱和吸附量为 236 mg/kg. 将活性炭的甲醛饱和吸附量与表 1 中的数据进行比较后可以发现:许多纸浆对甲醛的吸附性能很好,可以达到甚至超越吸附用活性炭 1#的吸附性能;本色针叶木亚硫酸铵浆的甲醛吸附量接近于活性炭 2#的水平.

## 2.3 不同纸浆的甲醛吸附速率

### 2.3.1 针叶木浆

首先比较本色针叶木 KP、漂白针叶木 KP 和本色亚硫酸铵针叶木浆 3 种针叶木浆(水分含量分别为 4.78%、4.65% 和 4.92%)的甲醛吸附情况,这 3 种浆的甲醛吸附实验结果如图 2 所示.

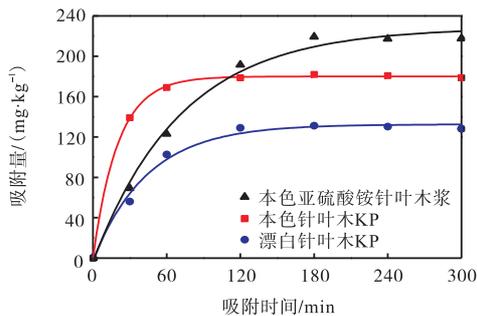


图 2 不同针叶木浆的甲醛吸附速率

Fig. 2 Formaldehyde adsorption rate of different softwood pulps

由图 2 可知:在吸附温度为 23 °C时,本色亚硫酸铵针叶木浆达到饱和需要约 180 min,饱和吸附量为 213 mg/kg;本色针叶木 KP 吸附甲醛达到饱和约需要 90 min,饱和吸附量为 181 mg/kg;漂白针叶木 KP 达到饱和需要 120 min 左右,饱和吸附量为 135 mg/kg. 由曲线的斜率可以看出:本色针叶木 KP 的甲醛吸附速率最大,其次是本色亚硫酸铵针叶木

浆,漂白针叶木 KP 甲醛吸附速率最小.

### 2.3.2 阔叶木浆

为了考察阔叶木浆的甲醛吸附情况,选取了本色桦木 KP、本色桉木 KP 和漂白阔叶木 KP 这 3 种浆(水分含量分别为 4.88%、5.02% 和 4.95%),在相同的吸附条件下(吸附温度分别为 22 °C、23 °C 和 24 °C)进行甲醛吸附.这 3 种浆的甲醛吸附实验结果如图 3 所示.

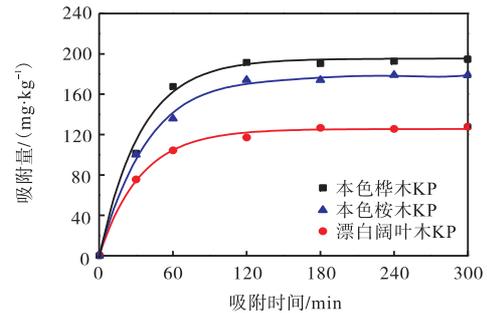


图 3 不同阔叶木浆的甲醛吸附速率

Fig. 3 Formaldehyde adsorption rate of different hardwood pulps

由图 3 可知:3 种阔叶木浆对甲醛的吸附均在 120 min 左右达到饱和.本色桦木 KP、本色桉木 KP 和漂白阔叶木 KP 的饱和吸附量分别为 193 mg/kg、179 mg/kg 和 126 mg/kg. 本色桦木 KP 的甲醛吸附速率略大于本色桉木 KP,而漂白阔叶木 KP 的吸附速率比上述二者小许多.

### 2.3.3 非木材浆

非木材浆的甲醛吸附速率实验选取了本色亚硫酸盐稻草浆、本色高得率竹浆、本色竹 KP(水分含量分别为 4.58%、4.75% 和 4.82%),其吸附温度分别为 23 °C、22 °C 和 25 °C.这 3 种浆的甲醛吸附速率曲线如图 4 所示.

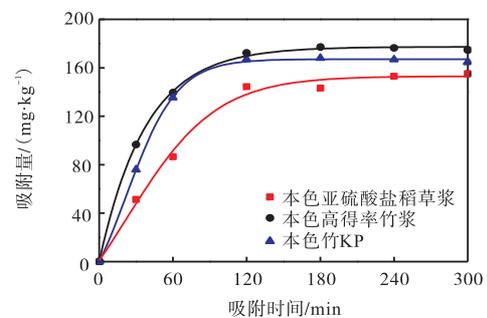


图 4 非木材浆的甲醛吸附速率

Fig. 4 Formaldehyde adsorption rate of different non-wood pulps

由图 4 可知:本色亚硫酸盐稻草浆达到饱和吸附

需 160 ~ 180 min, 饱和吸附量为 159 mg/kg; 本色竹 KP 达到饱和和吸附需 120 min 左右, 饱和吸附量为 170 mg/kg; 本色高得率竹浆达到饱和和吸附需 140 ~ 150 min, 饱和吸附量为 181 mg/kg. 其中, 本色高得率竹浆的甲醛吸附速率略高于本色竹 KP, 本色亚硫酸盐稻草浆的吸附速率最小且吸附量也最少.

#### 2.4 冷碱浸渍后纸浆的甲醛吸附性能

将纸浆在碱液中进行浸渍处理, 纤维可以得到充分润胀, 纤维素结晶区间的半纤维素、树脂、色素等能较好地溶解除去, 使得纤维变得光滑、圆润、扭曲. 经过这样处理后的纸浆所抄成的纸页, 纤维之间较大的空隙, 透气度增大<sup>[18]</sup>. 本文将本色针叶木 KP、本色竹 KP 和本色桉木 KP 进行冷碱浸渍处理, 然后进行甲醛吸附实验, 探讨了冷碱浸渍处理对纸浆吸附甲醛性能的影响. 图 5 为经过冷碱浸渍后 3 种浆进行甲醛吸附实验的结果.

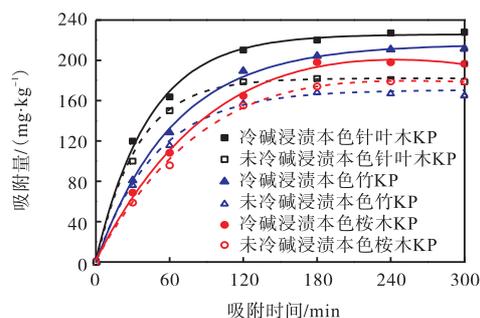


图 5 冷碱浸渍后纸浆的甲醛吸附速率

Fig. 5 Formaldehyde adsorption rate of different pulps soaked with cold alkali

由图 5 可知: 冷碱浸渍会提高纸浆的吸附速率. 经过冷碱浸渍处理后的本色针叶木 KP(水分含量为 4.54%), 在吸附温度为 23 °C 时, 达到饱和时间约为 120 min, 饱和吸附量为 227 mg/kg, 与未经过冷碱浸渍的本色针叶木 KP 相比, 饱和吸附量提高了 25.4%; 经过冷碱浸渍处理的本色竹 KP(水分含量为 4.78%), 在吸附温度为 22 °C 时, 达到饱和时间约为 240 min, 饱和吸附量为 211 mg/kg, 与未经过冷碱浸渍的本色竹 KP 相比, 饱和吸附量提高了 24.1%; 经过冷碱浸渍的本色桉木 KP(水分含量 5.02%) 在吸附温度为 22 °C 时, 达到饱和时间约 180 min, 饱和吸附量为 198 mg/kg, 与未经过冷碱浸渍的本色桉木 KP 相比, 饱和吸附量提高了 10.6%.

冷碱浸渍使得 3 种浆吸附甲醛的性能均得到了改善, 对本色针叶木 KP 和本色竹 KP 的效果较好. 冷碱浸渍后纸浆所抄制成的浆饼疏松, 孔径更

多, 使得甲醛分子更容易进入纸浆中, 使得甲醛吸附量增大.

### 3 结论

在温度为 22 ~ 25 °C 和实验所用的气相甲醛浓度下吸附 4 h 后, 本色亚硫酸铵针叶木浆的甲醛吸附量最大(213 mg/kg), 本色针叶木 KP、本色桉木 KP、本色桉木 KP 次之(179 ~ 193 mg/kg), 漂白针叶木 KP(135 mg/kg) 和漂白阔叶木 KP(126 mg/kg) 的甲醛吸附量较小; 本色烧碱-萘醌麦草浆(191 mg/kg) 和本色高得率竹浆(181 mg/kg) 对甲醛的吸附性能与本色硫酸盐木浆(179 ~ 193 mg/kg) 相近. 有些纸浆的甲醛吸附性能比较好, 可以达到甚至超越某种吸附用活性炭的吸附性能. 不同的活性炭对甲醛的吸附性能相差比较大. 室温下, 实验测定的 9 种纸浆的甲醛饱和和吸附时间均小于 3 h, 多为 2 ~ 3 h.

冷碱浸渍会提高纸浆的甲醛吸附量. 经过冷碱浸渍之后, 本色针叶木 KP 和本色竹 KP 的甲醛饱和和吸附量分别可达到 227 mg/kg 和 211 mg/kg, 比未冷碱浸渍的浆分别提高了 25.4% 和 24.1%.

#### 参考文献:

- [1] An H B, Yu M J, Kim J M, et al. Indoor formaldehyde removal over CMK-3[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2012, 7(1): 7.
- [2] Liang W J, Li J, Li J X, et al. Formaldehyde removal from gas streams by means of NaNO<sub>2</sub> dielectric barrier discharge plasma[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 175(1/2/3): 1090-1095.
- [3] 塔娜, 沈岳年, 王成, 等. 负载型纳米金催化剂对室内空气甲醛的去除[J]. *环境科学学报*, 2009(6): 1164-1169.
- [4] Shaham J, Bomstein Y, Meltzer A, et al. DNA-protein crosslinks, a biomarker of exposure to formaldehyde: In vitro and in vivo studies[J]. *Carcinogenesis*, 1996, 17(1): 121-126.
- [5] 蔡健, 胡将军, 张雁. 改性活性炭纤维对甲醛吸附性能的研究[J]. *环境科学与技术*, 2004, 27(3): 16-17.
- [6] 席劲瑛, 武俊良, 胡洪营, 等. 工业 VOCs 气体处理技术应用状况调查分析[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(11): 1955-1960.
- [7] Zaitan H, Manero M H, Valdés H. Application of high silica zeolite ZSM-5 in a hybrid treatment process based

- on sequential adsorption and ozonation for VOCs elimination[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 41: 59–68.
- [ 8 ] Espino-Pérez J, Bras J, Almeida G, et al. Cellulose nanocrystal surface functionalization for the controlled sorption of water and organic vapours[J]. *Cellulose*, 2016(5): 1–16.
- [ 9 ] 周建斌,周小凡,曾丽萍,等. 活性炭吸附纸制造工艺及性能研究[J]. *中华纸业*, 2003, 24(10): 23–25.
- [ 10 ] 宋宝祥,孙德文. 硅藻土在造纸业的用途与开发应用现状[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2010(2): 7–10.
- [ 11 ] 王喜华,陈港. 纳米 TiO<sub>2</sub>/竹炭涂布纸对甲醛吸附降解性能的研究[J]. *中国造纸*, 2010(10): 11–15.
- [ 12 ] 白鸽. 墙纸对室内苯系物的吸附影响因素研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- [ 13 ] 刘志明,吴鹏. 壳聚糖/纤维素气凝胶球的制备及其甲醛吸附性能[J]. *林产化学与工业*, 2017, 37(1): 27–35.
- [ 14 ] 张帅. 纸基气体吸附材料的制备[D]. 天津:天津科技大学, 2016.
- [ 15 ] Song Y, Qiao W, Yoon S H, et al. Removal of formaldehyde at low concentration using various activated carbon fibers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 106(4): 2151–2157.
- [ 16 ] 詹怀宇,刘秋娟,陈嘉川,等. 制浆原理与工程[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2010: 250–251.
- [ 17 ] 屈永波. 吸附法处理制浆厂挥发性有机物和净化空气的研究[D]. 天津:天津科技大学, 2016.
- [ 18 ] 徐斌,郑焱嵩,胡健,等. 马尾松纤维丝光化研究[J]. *广东造纸*, 2000(6): 4–8.

责任编辑:周建军

(上接第 50 页)

- line polysaccharides. I. Hydrogen bonds in native celluloses[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1959, 37(132): 385–395.
- [ 18 ] Dinand E, Vignon M, Chanzy H, et al. Mercerization of primary wall cellulose and its implication for the conversion of cellulose I → cellulose II [J]. *Cellulose*, 2002, 9(1): 7–18.
- [ 19 ] Ford E N J, Mendon S K, Thames S F, et al. X-ray diffraction of cotton treated with neutralized vegetable oil-based macromolecular crosslinkers[J]. *Journal of Engineering Fibers and Fabrics*, 2010, 5(1): 10–20.
- [ 20 ] Rojas J. Effect of Polymorphism on the Particle and Compaction Properties of Microcrystalline Cellulose[M]. *Cellulose-Medical, Pharmaceutical and Electronic Applications*. Croatia: InTech, 2013.
- [ 21 ] Ander P, Daniel G, Garcia-Lindgren C, et al. Characterization of industrial and laboratory pulp fibres using HCl, cellulase and FiberMaster analysis[J]. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2005, 20(1): 115–120.
- [ 22 ] Placet V, Trivaudey F, Cissé O, et al. What are the possible origins of the nonlinear tensile behaviour of hemp fibres?[C]. *The 19th International Conference on Composite Materials (ICCM)*. Montreal: Curran Associates, 2013: 5981–5988.
- [ 23 ] Nakano T. Modeling of the morphological change of cellulose microfibrils caused with aqueous NaOH solution: The longitudinal contraction and laterally swelling during decrystallization[J]. *Journal of Molecular Modeling*, 2017, 23(4): 129.
- [ 24 ] Le Moigne N, Navard P. Dissolution mechanisms of wood cellulose fibres in NaOH-water[J]. *Cellulose*, 2010, 17(1): 31–45.
- [ 25 ] Zhang S, Wang W C, Li F X, et al. Swelling and dissolution of cellulose in NaOH aqueous solvent systems[J]. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2013, 47(9/10): 671–679.
- [ 26 ] Shibasaki H, Kuga S, Okano T. Mercerization and acid hydrolysis of bacterial cellulose[J]. *Cellulose*, 1997, 4(2): 75–87.

责任编辑:周建军