



基于响应曲面漆酶处理杨木碱浸渍废液条件的优化

王 旭^{1,2}, 项钰洲³, 肖生苓^{1,2}, 岳金权³

(1. 东北林业大学工程技术学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学森林持续经营与环境微生物工程
黑龙江重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040; 3. 东北林业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

[摘要] 采用单因素实验法和响应曲面法, 以杨木碱浸渍废液的木质素去除率和 B/C 为评价指标, 探究了漆酶与杨木碱浸渍废液在充氧条件下的最佳作用条件。单因素实验通过设置多个实验梯度确定因素最佳范围, 再在最佳范围内每个因素设置 3 个水平进行响应曲面分析, 探讨了漆酶投加量、反应温度、反应时间 3 个因素对处理效果的影响, 从而确定出最佳作用条件。实验结果表明, 最佳作用条件: 漆酶投加量 157 U/L, 反应温度 37 °C, 反应时间 4.56 h, 在此条件下, 预测木质素去除率为 42.66%, B/C 为 0.758; 验证实验得到的木质素去除率为 43%, B/C 为 0.75, 与预测值偏差超过 1.06%, 优化结果可信。各因素对木质素去除率和 B/C 影响的大小顺序为漆酶投加量>反应时间>反应温度。

[关键词] 漆酶; 碱浸渍; 响应曲面; 木质素去除率; B/C

[中图分类号] TS79; X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2021)10-0067-06

Optimization treatment condition of laccase on poplar alkali impregnated waste stream by response surface method

WANG Xu^{1,2}, XIANG Yuzhou³, XIAO Shengling^{1,2}, YUE Jinquan³

(1. College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. Heilongjiang Key Laboratory of Forest Sustainable Management and Environmental Microbiology Engineering,
Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. College of Materials Science and Engineering,
Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The lignin removal rate and B/C of poplar alkali impregnated waste stream were used as evaluation indexes to investigate the optimal action conditions of laccase and poplar alkali impregnated waste stream under oxygenation conditions by using single-factor experiment and response surface method. The single-factor experiment was conducted to determine the optimal range of factors by setting multiple experimental gradients, and then three levels of each factor in the optimal range were set for response surface analysis to investigate the influence of three factors on the treatment effect including laccase dosage, reaction temperature and reaction time, so as to determine the optimal conditions of action. The experimental results showed that the optimum condition was 157 U/L laccase dosage, 37 °C reaction temperature and 4.56 h reaction time. Under this condition, the predicted lignin removal rate was 42.66% and the B/C was 0.758, the lignin removal rate obtained from the validation experiment was 43% and the B/C was 0.75, which deviated from the predicted value by no more than 1.06% and the optimized result was reliable. The order of the influence of the factors on the lignin removal rate and B/C followed laccase dosage>reaction time>reaction temperature.

Key words: laccase; alkali impregnation; response surface; lignin removal rate; B/C

化学机械浆生产方法多样, 基本制浆原理都是通过化学软化和后续机械磨解以使纤维分离。在化

学软化过程中多以 NaOH 为基本浸渍液, 浸渍过程中 OH⁻与纤维素、半纤维素等发生化学反应, 同时发

生脱乙酰基反应,从而使木片软化、润胀,为后续的磨解分离奠定基础^[1]。碱浸渍过程在使木片软化的同时,还伴随着半纤维素、木质素、树脂酸和糖醛酸等耗碱类物质的溶出^[2],其中木质素是碱浸渍废液中的主要污染物成分。木质素由3种苯丙烷单元通过醚键和碳碳键相互连接形成的具有三维网状结构的生物高分子,其中的酚类化合物及其衍生物具有毒性和生物抑制作用,结构复杂,具有高异质性,可导致废液可生化性差,处理难度较大^[3-4]。碱浸渍废液为高浓度有机废液,此类废液成分复杂,污染程度较高,因此,研究如何对该类废液进行有效处理十分必要^[5-9]。

漆酶(Laccase, EC1.10.3.2)是一种多酚氧化酶,广泛存在于自然界中,其对木质素具有高效的降解能力,可通过氧化降解和聚合反应作用于木质素。漆酶是一种单电子氧化还原酶,可氧化大量芳香胺、酚类、芳香羧酸及其衍生物,其反应速度是木质素过氧化物酶(LiP)和锰过氧化物酶(MnP)的10~100倍;另外,多项研究表明,漆酶可通过与酚类物质的聚合反应实现去毒作用^[10-11]。与传统的物理化学方法相比,采用漆酶预处理制浆废液,具有效能高、作用条件温和、反应设备简单的优点。漆酶的主要作用对象为木质素,而木质素的去除有利于提高废液的可生化性。在氧分子存在条件下,漆酶能够氧化降解木质素的酚型结构单元^[12],而废液的生物降解性能普遍采用B/C(BOD₅/COD)表示。因此,木质素去除率和B/C是衡量漆酶对废液预处理效果的重要指标。

前期实验研究表明,由于碱浸渍废液中木质素含量较高,直接采用生化法对其进行处理效果不佳。为降低废液中的木质素含量,本研究采用漆酶对碱浸渍废液进行预处理。由于漆酶的成本较高,为提高漆酶对废液的预处理效率,最大限度降低经济成本,以木质素去除率和B/C为评价指标,通过单因素实验和响应曲面法对其作用条件进行了优化。

1 实验方法

1.1 实验材料及仪器

实验材料:杨木,取自吉林省白河林业局;漆酶(酶活性为120 U/g),上海源叶生物科技有限公司。浓硫酸(H₂SO₄,纯度98%),天津市科密欧化学试剂有限公司;硫酸亚铁铵[(NH₄)₂Fe(SO₄)₂·H₂O]、邻菲

罗啉(C₁₂H₈N₂·H₂O),天津福晨化学试剂有限公司;硫酸汞(HgSO₄),姜堰市环球试剂厂;硫酸银(Ag₂SO₄),天津东聚隆化工技术开发有限公司;3,5-二硝基水杨酸(DNS),上海展云化工有限公司;氢氧化钠(NaOH)、亚硫酸钠(Na₂SO₃),天津市东丽区天大化学试剂厂;苯酚(C₆H₅OH),天津市致远化学试剂有限公司;重铬酸钾(K₂Cr₂O₇),天津市光复科技发展有限公司。以上试剂均为分析纯。

仪器:BODTrak™ II型BOD测定仪,美国哈希公司;T6新世纪型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限公司;RE-5299型旋转蒸发仪,上海况胜实业有限公司;PHS-3C型pH计,上海仪电科学仪器有限公司;101-3A型电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;DZ-1BC II型真空干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 杨木碱浸渍废液的制备

将杨木加工成规格为长20~40 mm、宽3~5 mm的杨木片,采用烘干法测定其含水率以确定绝干质量。化学浸渍条件:NaOH质量分数为6%,杨木和水的固液质量比为1:4,浸渍温度100℃,保温时间1 h。浸渍过程完成后,过滤,制得NaOH浸渍废液。

1.2.2 漆酶氧化杨木碱浸渍废液实验

向过滤后的杨木碱浸渍废液中滴加乙酸-乙酸钠缓冲溶液调节pH至6.0~6.5,然后加入适量漆酶^[13],在一定的条件下反应一定时间。取样,测定其中的木质素含量、COD和BOD₅。废液中木质素含量采用紫外-可见光谱法测定^[14],COD采用快速密闭消解法测定^[15],BOD₅采用微生物传感器快速测定法测定^[15]。

1.3 实验设计

1.3.1 单因素实验设计

以漆酶投加量(X_1)、反应时间(X_2)和反应温度(X_3)为影响因素进行单因素实验,每组实验设置3个平行,结果取平均值。

漆酶投加量影响实验:通过查阅资料与前期实验可知^[13,16],漆酶投加量在50 U/g(即1 g木质素中含有50 U漆酶)时,可与木质素发生高效反应。根据前期废液中木质素含量测定结果,选择50~175 U/L作为漆酶投加量实验区间,以25 U/L为增量。

温度影响实验:根据前期实验结果及文献记

载^[17-18],漆酶的适宜反应温度通常为 25~50 ℃。温度过低会抑制漆酶活性,温度过高会严重破坏漆酶活力。因此,选择 25~50 ℃为反应温度实验区间,以 5 ℃为增量。

反应时间影响实验:为了探究漆酶与木质素反应完全所用时间,提高预处理效率,根据资料研究结果^[13,19],选择 1~6 h 为反应时间实验区间,增量为 1 h。

1.3.2 响应曲面优化实验设计

根据单因素实验结果,通过响应曲面法(Box-Behnken Design,BBD)优化实验,对漆酶作用条件进行进一步优化。因素水平见表 1。

表 1 BBD 因素水平

Table 1 BBD factor level

编码及水平	$X_1/(U \cdot L^{-1})$	$X_2/^\circ C$	X_3/h
-1	125	20	4
0	150	30	5
1	175	40	6

2 结果与讨论

2.1 单因素实验结果

2.1.1 漆酶投加量

在反应温度为 40 ℃,反应时间为 5 h 的条件下,探究了漆酶投加量对处理效果的影响。结果表明,当漆酶投加量<150 U/L 时,木质素去除率和 B/C 随漆酶投加量的增加呈现升高趋势。投入漆酶量过少,酶反应程度过小^[20],参与氧化和降解反应的木质素较少;逐步增加漆酶的投加量,酶与木质素的反应程度提高,被氧化降解的酚型木质素增加,使得木质素去除率和 B/C 不断升高。但当漆酶投加量为 150~175 U/L 时,木质素去除率与 B/C 出现了小幅度降低。确定 150 U/L 为漆酶的最佳投加量。

2.1.2 反应温度

在漆酶投加量为 150 U/L,反应时间为 5 h 的条件下,探究了反应温度对处理效果的影响。结果表明,当温度从 20 ℃升到 30 ℃时,木质素去除率和 B/C 均大幅度升高;当温度>30 ℃时,随着温度的升高,2 个指标均呈下降趋势,30 ℃为最佳反应温度。反应温度直接影响漆酶的活性。温度过低,漆酶活性较低,氧化酚型木质素结构单元的程度和效率较低,不利于废液中木质素的去除,从而不利于可生化性的提高;温度过高,酶失活,也不能高效地将木质素结构单元

氧化成酚氧自由基进行下一步的非酶催化反应,同样达不到去除木质素、提高废液可生化性的目的。

2.1.3 反应时间

在漆酶投加量为 150 U/L,反应温度为 40 ℃的条件下,探究了反应时间对处理效果的影响。结果表明,当反应时间在 2~5 h 时,木质素去除率与 B/C 随反应时间的增长呈现增长趋势;5 h 后,2 个指标不再随反应时间的增长而升高,5 h 是漆酶预处理杨木碱浸渍废液的最佳反应时间。漆酶与木质素充分反应需要一定的时间,但由于漆酶氧化形成的酚氧自由基同时有聚合和解聚 2 种倾向,如反应时间过长,酚氧自由基会发生聚合反应,形成更高分子质量的木质素结构。

2.2 响应曲面模型建立和分析

根据单因素实验确定的 X_1 、 X_2 和 X_3 较优取值范围,以木质素去除率和 B/C 为响应值(Y_1 、 Y_2),利用响应曲面法(BBD)设计了 3 因素 3 水平的实验,具体实验方案及结果见表 2。

表 2 BBD 实验方案及结果

Table 2 BBD experimental scheme and results

实验组号	自变量			实验值	
	$X_1/(U \cdot L^{-1})$	$X_2/^\circ C$	X_3/h	$Y_1/\%$	Y_2
1	125	20	5	23.69	0.675
2	125	40	5	28.32	0.709
3	150	20	6	31.55	0.720
4	175	20	5	33.93	0.722
5	150	30	5	53.03	0.784
6	150	30	5	50.50	0.773
7	175	30	6	45.98	0.733
8	125	30	6	32.81	0.716
9	150	40	6	36.09	0.741
10	125	30	4	29.47	0.681
11	150	40	4	31.78	0.726
12	150	20	4	27.91	0.715
13	175	30	4	37.32	0.725
14	150	30	5	50.84	0.779
15	175	40	5	32.54	0.718
16	150	30	5	48.56	0.78
17	150	30	5	50.47	0.772

根据表 2,利用 Design Expert 10.0 软件建立木质素去除率和 B/C 与 3 个因素之间的二次回归方程,见式(1)和式(2)。

$$Y_1=50.88+4.56X_1+1.33X_2+2.49X_3-1.26X_1X_2+1.33X_1X_3+0.17X_2X_3-8.47X_1^2-13.04X_2^2-6.01X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2=0.78+0.012X_1+7.75 \times 10^{-3}X_2+5.25 \times 10^{-3}X_3-9.5 \times 10^{-3}X_1X_2-1.5 \times 10^{-3}X_1X_3+2.5 \times 10^{-3}X_2X_3-0.039X_1^2-0.033X_2^2-0.02X_3^2 \quad (2)$$

表 3 是对木质素去除率回归方程系数显著性检

验的结果。

表3 木质素去除率模型回归方程系数显著性检验结果

Table 3 Coefficient significance test results of regression equation of lignin removal rate model						
方差来源	平方和	自由度	平均方差	F值	P值	显著性
回归模型	1 533.51	9	170.39	68.74	<0.000 1	显著
X_1	166.35	1	166.35	67.11	<0.000 1	
X_2	14.18	1	14.18	5.72	0.048 1	
X_3	49.75	1	49.75	20.07	0.002 9	
X_1X_2	6.30	1	6.30	2.54	0.154 9	
X_1X_3	7.08	1	7.08	2.85	0.135 0	
X_2X_3	0.11	1	0.11	0.045	0.837 6	
X_1^2	302.33	1	302.33	121.96	<0.000 1	
X_2^2	715.55	1	715.55	288.66	<0.000 1	
X_3^2	152.15	1	152.15	61.38	0.000 1	
残差	17.35	7	2.48			
失拟项	10.67	3	3.56	2.13	0.239 1	不显著
纯误差	6.68	4	1.67			
总和	1 550.87	16	$R^2=0.988 8$	$R_{Adj}^2=0.974 4$		

由表3可知,木质素去除率回归方程对应的模型显著($P<0.000 1$)。该二次模型 R^2 值为0.988 8, R_{Adj}^2 值为0.974 4,均接近于1,因此认为模型准确^[21-23]。失拟项是评估方程可靠性的重要数据,此回归方程失拟项不显著,表明回归方程拟合较好。此外,从表3还可以看出,木质素去除率回归方程一次项 X_1 ($P<0.000 1$)极显著, X_2 、 X_3 ($P<0.05$)显著;二次项 X_1^2 、 X_2^2 ($P<0.000 1$)极显著, X_3^2 ($P<0.05$)显著;交互项 X_1X_3 、 X_1X_2 、 X_2X_3 不显著。由 F 值可知,3个因素对木质素去除率影响大小的顺序为漆酶投加量>反应时间>反应温度。

表4是对B/C回归方程系数显著性检验的结果。

表4 B/C模型回归方程系数显著性检验结果

Table 4 Coefficient significance test results of regression equation of B/C model						
方差来源	平方和	自由度	平均方差	F值	P值	显著性
回归模型	0.018	9	1.980×10^{-3}	81.08	<0.000 1	显著
X_1	1.711×10^{-3}	1	1.711×10^{-3}	70.07	<0.000 1	
X_2	4.805×10^{-4}	1	4.805×10^{-4}	19.68	0.003 0	
X_3	4.961×10^{-4}	1	4.961×10^{-4}	20.32	0.002 8	
X_1X_2	3.610×10^{-4}	1	3.610×10^{-4}	14.78	0.006 3	
X_1X_3	1.822×10^{-4}	1	1.822×10^{-4}	7.46	0.029 3	
X_2X_3	2.500×10^{-5}	1	2.500×10^{-5}	1.02	0.345 3	
X_1^2	7.313×10^{-3}	1	7.313×10^{-3}	299.44	<0.000 1	
X_2^2	3.771×10^{-3}	1	3.771×10^{-3}	154.40	<0.000 1	
X_3^2	2.070×10^{-3}	1	2.070×10^{-3}	84.78	<0.000 1	
残差	1.709×10^{-4}	7	2.442×10^{-5}			
失拟项	6.975×10^{-5}	3	2.325×10^{-5}	0.92	0.507 9	不显著
纯误差	1.012×10^{-4}	4	2.530×10^{-5}			
总和	0.018	16	$R^2=0.990 5$	$R_{Adj}^2=0.978 3$		

由表4可知,B/C回归方程对应的模型显著($P<0.000 1$)。该二次模型 R^2 值为0.990 5, R_{Adj}^2 值为0.978 3,均接近于1,认为模型准确^[23]。失拟项不显著,表明回归方程拟合较好。此外,从表4还可以看出,B/C回归方程一次项 X_1 ($P<0.000 1$)极显著, X_2 、 X_3 ($P<0.05$)显著;二次项 X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 ($P<0.000 1$)极显著;交互项 X_1X_2 、 X_1X_3 ($P<0.05$)显著, X_2X_3 不显著。由 F 值可知,3个因素对木质素去除率影响大小的顺序为漆酶投加量>反应时间>反应温度。

2.3 响应曲面交互性分析

响应曲面交互性分析结果如图1所示。

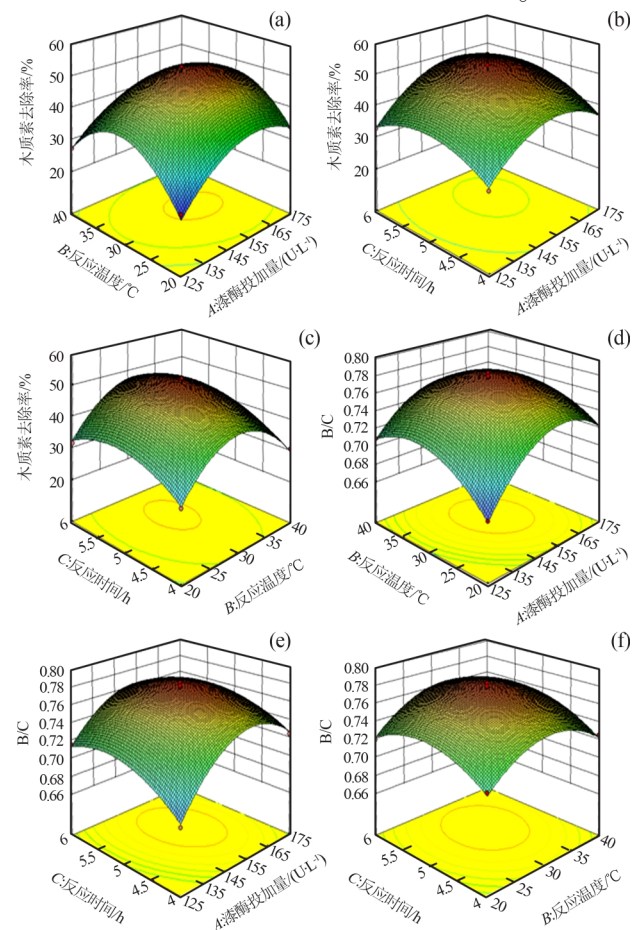


图1 多因素交互对木质素去除率和B/C影响的响应曲面

Fig. 1 Response surface of multi-factor interaction on lignin removal rate and B/C

由图1可知,当反应时间恒定时,木质素去除率随漆酶投加量增加而增长的速度较随反应温度升高而增长的速度快;当反应温度恒定时,木质素去除率随漆酶投加量增加而增长的速度较随反应时间增加而增长的速度快;当漆酶投加量恒定时,木质素去除

率随反应时间增加而增长的速度较随反应温度升高而增长的速度快。可见,3个因素对木质素去除率影响大小的顺序为漆酶投加量>反应时间>反应温度。

当反应时间恒定时,B/C随漆酶投加量增加而增长的速度较随反应温度升高而增长的速度快;当反应温度恒定时,B/C随漆酶投加量增加而增长的速度较随反应时间增加而增长的速度快;当漆酶投加量恒定时,B/C随反应时间增加而增长的速度较随反应温度升高而增长的速度快。可见,3个因素对B/C影响大小的顺序为漆酶投加量>反应时间>反应温度。

2.4 参数优化及验证

以漆酶投加量、反应温度、反应时间作为影响因素,以杨木碱浸渍废液的木质素去除率与B/C作为优化目标,根据实验所得结果及二次回归模型的数学分析结果,设置不同的权重及重要度,通过Design Expert 10.0软件可以得到漆酶处理杨木碱浸渍废液的最佳作用条件组合:漆酶投加量 157 U/L,反应温度 37℃,反应时间 4.56 h,在此条件下,预测的木质素去除率为 42.66%,B/C 为 0.758。在最佳条件下进行验证实验,得到木质素去除率为 43%,与预测值偏差为 0.8%,B/C 为 0.75,与预测值偏差为 1.06%,与预测值基本一致,偏差较小,因此,可以认为优化结果可信。

3 结论

(1)基于响应曲面法建立了杨木碱浸渍废液木质素去除率和B/C的二阶响应面回归方程模型,其 R^2 和 R_{Adj}^2 均接近于1,说明模型具有良好的准确性;实验值与预测值的偏差不超过1.06%,说明该模型可以用于漆酶处理杨木碱浸渍废液作用条件的优化和预测。

(2)漆酶投加量与反应时间的交互作用对杨木碱浸渍废液的木质素去除率影响最大,漆酶投加量与反应温度的交互作用次之,反应温度与反应时间的交互作用影响最小;漆酶投加量与反应温度的交互作用对杨木碱浸渍废液的B/C影响最大,漆酶投加量与反应时间的交互作用次之,反应温度与反应时间的交互作用影响最小。

(3)漆酶与杨木碱浸渍废液的最佳作用条件组合:漆酶投加量 157 U/L,反应温度 37℃,反应时间

4.56 h,在此条件下,预测木质素去除率为 42.66%,B/C 为 0.758。通过验证实验得到的木质素去除率与B/C分别为43%和0.75,与预测值基本吻合。

参考文献

- [1] 王永贵. 杨木 NaOH 浸渍流体传输性能研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.
- [2] 王鑫宇. Fenton 降解杨木 APMP 制浆废液中木素和糖类污染物的作用机理[D]. 南宁:广西大学,2015.
- [3] 王松,谢益民,王鹏,等. 漆酶去除造纸废水中木素及多酚类化合物应用[J]. 环境科学与技术,2008,31(7):53-57.
- [4] 贾洪玉,安亮亮,刘翠云,等. 高木素含量制浆废液处理的研究进展[C]//中国造纸学会第十七届学术年会论文集. 陕西西安:中国造纸学会,2016:421-426.
- [5] 王伟,禹建伦,牛涛,等. 厌氧接触+射流曝气+Fenton 流化床技术处理制浆造纸废水运行实例[J]. 纸和造纸,2020,39(1):32-35.
- [6] 梁定超,胡晓东,萧灿强,等. 内循环厌氧反应器处理制浆造纸废水的效能及影响因素[J]. 水处理技术,2019,45(9):84-88.
- [7] ABDULKHANI A, AMIRI E, SHARIFZADEH A, et al. Concurrent production of sodium lignosulfonate and ethanol from bagasse spent liquor[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 819-824.
- [8] YANG Guiting, CHENG Donghong, LIU Yan, et al. A simple method for preparing chelated calcium based on the black liquor generated by the pulp and paper industry[J]. Environment Pollutants and Bioavailability, 2019, 31(1):56-59.
- [9] 范述捷. 棉短绒制浆蒸煮液循环及废液综合利用项目通过技术鉴定[J]. 纸和造纸,2019,38(5):75.
- [10] DEC J, BOLLAG J M. Detoxification of substituted phenols by oxidoreductive enzymes through polymerization reactions[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1990, 19(4):543-550.
- [11] ROY-ARCAND L, ARCHIBALD F S. Direct dechlorination of chlorophenolic compounds by laccases from *Trametes (Coriolus) versicolor*[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1991, 13(3):194-203.
- [12] 唐雨楠,马尔妮. 漆酶/天然介体系统对碱木质素粒径和官能团变化的影响[J]. 林产工业,2020,57(5):11-15.
- [13] 张勇兵. 漆酶及漆酶/介体体系处理对黄麻纤维中木质素结构影响的研究[D]. 无锡:江南大学,2013.
- [14] 卜令习,鲁杰,杨瑞丰,等. 紫外-可见光谱法测定黑液中木素含量[J]. 化工学报,2010,61(12):3266-3271.
- [15] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002:251-259.
- [16] 魏华丽,石淑兰,裴继诚,等. 漆酶处理木素的功能基变化及其光谱分析[J]. 中国造纸学报,2003,18(2):60-63.
- [17] 吴怡,马鸿飞,曹永佳,等. 真菌漆酶的性质、生产、纯化及固定化研究进展[J]. 生物技术通报,2019,35(9):1-10.
- [18] 葛飞,张慧敏,龚倩,等. 杏鲍菇产漆酶培养条件优化及其对菲



木质素磺酸钠接枝聚丙烯酸钠树脂的制备及其吸附

魏 婕, 徐 铭, 李宏伟

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁沈阳 110168)

[摘要] 以木质素磺酸钠和聚丙烯酸钠为原料制备了具有重金属吸附性的木质素磺酸钠接枝聚丙烯酸钠树脂, 并研究了其对水中重金属离子 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附性能。首先研究了引发剂用量、反应时间、反应温度等制备条件对吸附树脂接枝率的影响; 其次对制备的吸附树脂进行了 SEM、XRD 及 FTIR 表征; 最后考察了接枝率、pH、吸附时间、初始金属离子浓度对吸附效果的影响。结果表明: 最大接枝率为 81.7%; 制备的吸附树脂对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的最大吸附率分别为 93.28% 和 91.46%, 饱和吸附容量分别为 25.338 1、23.675 9 mg/g。

[关键词] 木质素磺酸钠; 聚丙烯酸钠; 接枝; 重金属; 吸附

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2021)10-0072-06

Preparation and adsorption of sodium lignosulfonate grafted sodium polyacrylate resin

WEI Jie, XU Ming, LI Hongwei

(College of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Sodium lignosulfonate and sodium polyacrylate were used as raw materials to prepare a sodium lignosulfonate grafted sodium polyacrylate resin with heavy metal adsorption properties, and its adsorption properties for heavy metal ions Pb^{2+} and Cu^{2+} in water were studied. Firstly, the influence of initiator dosage, reaction time, reaction temperature and other preparation conditions on the grafting rate of adsorption resin was studied. Secondly, the prepared adsorption resin was characterized by SEM, XRD and FTIR. Finally, the influence of grafting rate, pH, adsorption time, and the initial metal ion concentration on the adsorption effect were investigated. The results showed that the maximum grafting rate was 81.7%, and the maximum adsorption rates of the prepared adsorption resin for Pb^{2+} and Cu^{2+} were 93.28% and 91.46%, respectively. The saturated adsorption capacities were 25.338 1 and 23.675 9 mg/g, respectively.

Key words: sodium lignosulfonate; sodium polyacrylate; grafting; heavy metal; adsorption

近年来, 对水中重金属的处理已成为废水处理的重要部分。由于水体中的重金属不能被生物降解,

并可在食物链中循环, 因此, 含重金属的废水若不经处理直接排放, 会对人类健康及生态环境造成极大

[基金项目] 水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601004-01); 辽宁省教育厅项目(lnjc202011)

的降解特性研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(14): 221-225.

[19] 王辉. 白腐菌产漆酶优化及其对稻草秸秆预处理分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.

[20] 邵秀芝, 李爱珍, 肖永霞, 等. 酶作用条件对抗性淀粉形成的影响[J]. 粮油加工, 2010(2): 53-56.

[21] 王俊, 申立中, 杨永忠, 等. 基于响应曲面法的非道路用高压共轨柴油机设计点优化标定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 31-39.

[22] 李晓雪, 王菲, 崔新爽, 等. 响应面优化紫苏叶中黄酮类物质提

取工艺研究[J]. 森林工程, 2019, 35(6): 48-54.

[23] 刘运伟, 李占君. 响应面优化塔拉籽油超声提取工艺研究[J]. 森林工程, 2020, 36(4): 64-69.

[作者简介] 王旭(1996—), 硕士。电话: 16603695272, E-mail: wangxu961021@163.com。通讯作者: 岳金权, 副教授。电话: 13503685136, E-mail: yuejinq@163.com。

[收稿日期] 2021-07-26(修改稿)