

白腐真菌对造纸黑液中木质素的降解效果

李海红¹, 龚文姣¹, 同 帆¹, 王 颖²

(1 西安工程大学 环境与化学工程学院, 陕西 西安 710048 ; 2 陕西省现代建筑设计研究院, 陕西 西安 710000)

【摘 要】 【目的】应用白腐真菌处理造纸黑液, 探讨白腐真菌对造纸黑液中木质素的降解效果及其影响因子, 确定最佳降解条件。【方法】从自然界腐朽木材上分离培养白腐真菌, 利用专用培养基对其进行分离和纯化, 分析木质素溶液质量浓度(污染负荷)、pH 值、搅拌速度、碳源和氮源质量浓度、 $[\text{Fe}^{2+}]$ 质量浓度对白腐真菌降解木质素效果的影响。【结果】确定白腐真菌降解造纸黑液中木质素的最佳条件为: 木质素质量浓度为 153.0 mg/L, pH 值为 5, 搅拌速度为 250 r/min, 葡萄糖质量浓度为 1 g/L, 酒石酸铵质量浓度为 0.20 g/L, $[\text{Fe}^{2+}]$ 质量浓度为 0.08 mg/L。【结论】得到了白腐真菌降解造纸黑液中木质素的最佳条件, 在此条件下白腐真菌对木质素的降解率最高可达 64.38%。

【关键词】 白腐真菌, 木质素, 生物降解, 造纸黑液

【中图分类号】 X783.5

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)12-0200-07

Study on factors influencing the degradation of lignin in black liquor by white-rot fungus

LI Hai-hong¹, GONG Wen-jiao¹, TONG Zhi¹, WANG Ying²

(1 School of Environmental & Chemical Engineer, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 Environmental Impact Assessment Institute, Shaanxi Modern Architecture Design & Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: 【Objective】 The study chose the white-rot fungus to process black liquor to explore the degradability and the influence factors of white-rot fungus on lignin of black liquor. 【Method】 Special culture medium was used to separate and purify white-rot fungus which had been separated from the rotten wood and cultured. The influence of degradation was analyzed by the following ingredients: lignin consistency, pH value, stirring speed, consistency of carbon and nitrogen source, and Fe^{2+} consistency, so as to choose the best conditions of white-rot fungi for degradation. 【Result】 The best condition of degrading black liquor is determined: lignin=153 mg/L, pH=5, the rotating speed is 250 r/min, glucose=1 g/L, ammonium tartrate=0.20 g/L, Fe^{2+} =0.08 mg/L. 【Conclusion】 The best degradation conditions in which white-rot fungus degrade black liquor are obtained. Under these conditions, the degradation rate of white-rot fungus is up to 64.38%.

Key words: white-rot fungus; lignin; biodegradable; degradation of black liquor

造纸工业是污染环境的主要行业之一, 其主要污染源是化学浆的造纸黑液, 此部分占污染物总负荷的 90% 左右^[1]。造纸黑液的主要成分是木质素, 是一种天然的高分子聚合物, 结构极其复杂。因此, 是否能有效降解木质素成为造纸黑液降解的关键所

在。在众多的处理方法中, 生物降解法正在逐渐被人们所重视。

白腐真菌作为自然界中降解木质素能力最强的一类微生物, 其在处理各种造纸废水、印染废水和降解复杂有机物方面的优势越来越引起人们的广泛关

* 【收稿日期】 2009-03-26

【基金项目】 陕西省教育厅重大产业化项目(05JC15)

【作者简介】 李海红(1971—), 女, 陕西西安人, 副教授, 硕士, 主要从事工业废水处理研究。E-mail: lihhcn@163.com

注^[2]。尤其在降解木质素方面,白腐真菌可通过自身分泌的各种胞外酶,并通过一系列的自由基链式反应来实现对复杂有机物的降解^[3]。目前,对白腐真菌降解有机废水的研究多集中于漂白废水^[4],而对利用其降解造纸黑液中木质素的研究较少。

本研究对影响白腐真菌降解造纸黑液中木质素效果的一系列因素进行分析,以期用白腐真菌处理造纸黑液中相关工艺条件参数的选择提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料及仪器

原水取自西安周边造纸厂蒸煮黑液,pH 为 13。

主要仪器:PYX-DHSP50×65 隔水式电热恒温培养箱,上海市跃进医疗器械一厂;Motic SFC-18 光学显微镜,麦克迪实业集团有限公司;DHG-9247A 电热恒温干燥箱,上海精宏试验设备有限公司;HV-50 高压灭菌气锅,浙江科通仪器有限公司;722N-可见分光光度计,上海精密科学仪器有限公司。

1.2 菌种的分离

1.2.1 菌种的培养 菌种由西安工程大学环境与化学工程学院实验室分离纯化所得。原混合菌种采自陕西南部秦岭深山的腐败朽木之上。将含菌腐败木屑用无菌水浸泡 24 h,搅匀后以此为菌原液接种于培养皿中。

采用的专用培养基配方为:KH₂PO₄ 1.0 g, NaH₂PO₄ 0.2 g, MgSO₄ · 7H₂O 0.5 g, V_{B₁} 0.1 mg, CaCl₂ 0.1 mg, FeSO₄ · 7H₂O 0.4 mg, CuSO₄ · 7H₂O 0.2 mg, ZnSO₄ · 7H₂O 1.4 mg, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1 000 mL, 葡萄糖和酒石酸铵适量^[5]。培养接种前于 121 ℃ 下灭菌 20 min,置于 39 ℃ 恒温培养箱中培养,培养 3 d。

1.2.2 菌种分离与鉴定 将培养皿中各菌落分别刮下,用无菌水配成孢子悬浮液,采用稀释平板分离法及划线平板分离法进行分离。分离后主要获得 2 种菌,A 种菌落为绿色绒粒状,B 种菌落为白色绒状。

菌种鉴定从 2 方面入手,一方面通过显微镜观察菌体形态,另一方面利用白腐真菌的特征进行变色反应^[6],具体方法是在 1.2.1 专用培养基中加入琼脂及少量单宁酸,观察菌落外侧是否形成肉眼可见的褐色晕环。

1.3 试验方法

本研究通过在白腐真菌降解木质素的过程中改变某一单因子,同时其他降解条件不变,以木质素的降解率为惟一判定标准对比降解效果,从而选出最佳降解条件。

降解率(η)=(C₁-C₂)/C₁×100%。

式中:C₁ 为降解前造纸黑液中木质素的质量浓度,mg/L;C₂ 为降解后造纸黑液中木质素的质量浓度,mg/L。

1.3.1 木质素质量浓度的测定 配制木质素质量浓度分别为 50,100,150,200,250 mg/L,将木质素溶液经饱和碳酸钠溶液浸出,用 3 cm 比色皿,以纯水作参比,于 700 nm 波长测定吸光度,绘制标准曲线。

1.3.2 降解时间的确定 在最初的预降解试验中,自 0 h 开始计时,每隔 20 h 对木质素的降解率进行 1 次测定,随着降解时间的增加,溶液中木质素降解量的变化趋势逐渐趋缓,至 140 h 后降解效果基本无变化,因此在试验中选取 140 h 作为降解周期。

1.3.3 不同单因素对白腐真菌降解木质素效果的影响 以木质素在 140 h 的降解率为判定指标,进行单因素试验。最终确定木质素质量浓度、pH 值、搅拌速度、碳源和氮源质量浓度以及[Fe²⁺]质量浓度的最佳组合。

(1)木质素质量浓度。在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液(质量浓度为 7.006 6 g/L),pH 为 6,搅拌速度 500 r/min,葡萄糖质量浓度为 1 g/L,酒石酸铵质量浓度 0.10 g/L,[Fe²⁺]质量浓度为 0.4 mg/L,分别在瓶中加入 2,4,8,14 mL 原木质素溶液,使木质素质量浓度分别为 28.7,46.0,153.0,212.0 mg/L,在 39 ℃(白腐真菌的生化培养温度)培养降解 140 h,每隔 20 h 检测 1 次木质素的质量浓度。

(2)pH 值^[7]。在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液,木质素质量浓度为 153.0 mg/L,搅拌速度 500 r/min,葡萄糖质量浓度为 1 g/L,酒石酸铵质量浓度 0.10 g/L,[Fe²⁺]质量浓度为 0.4 mg/L,调节 pH 值分别为 5,6,7,8.5,于 39 ℃ 培养降解 140 h,每隔 20 h 检测 1 次木质素的质量浓度。

(3)搅拌速度。在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液,木质素质量浓度为 153.0 mg/L,pH 为 5,葡萄糖质量浓度为 1 g/L,酒石酸铵质量浓度 0.10 g/L,[Fe²⁺]质量浓度为 0.4

mg/L,搅拌速度分别为 150,250,500,1 500 r/min,于 39 ℃培养降解 140 h,每隔 20 h 检测 1 次木质素的质量浓度。

(4)碳源质量浓度。一般认为,葡萄糖是普适碳源^[8-10]。在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液,木质素质量浓度为 153.0 mg/L,pH 为 5,搅拌速度 250 r/min,酒石酸铵质量浓度 0.10 g/L,[Fe²⁺]质量浓度为 0.4 mg/L,锥形瓶中葡萄糖质量浓度分别为 1,2,5,10 g/L,于 39 ℃培养降解 140 h,每隔 20 h 检测 1 次木质素的质量浓度。

(5)氮源质量浓度。试验选取培养基中的酒石酸铵作为氮源。在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液。木质素质量浓度为 153.0 mg/L,pH 为 5,搅拌速度 250 r/min,葡萄糖质量浓度 1 g/L,[Fe²⁺]质量浓度为 0.4 mg/L,锥形瓶中酒石酸铵的质量浓度分别为 0.08,0.10,0.20,0.50 g/L,于 39 ℃培养降解 140 h,每隔 20 h 检测 1 次木质素的质量浓度。

(6)[Fe²⁺]质量浓度。微量元素对微生物生长具有多方面的功能,或是酶的活性基组成成分,或是酶的激活剂^[11]。[Fe²⁺]是细菌所含十大生物元素之一,不仅是细胞色素的成分,而且也是过氧化酶、细胞色素氧化酶的组分。在 4 个锥形瓶中各加入 150 mL 灭菌培养基和 15 mL 菌悬液。木质素质量

浓度为 153.0 mg/L,pH 为 5,搅拌速度 250 r/min,葡萄糖和酒石酸铵质量浓度分别为 1 g/L 和 0.20 g/L,锥形瓶中[Fe²⁺]质量浓度依次为 0.04,0.08,0.10,0.14 mg/L。于 39 ℃培养降解 140 h,每隔 20 h 检测 1 次木质素的质量浓度。

2 结果与分析

2.1 菌株形态的观察及鉴定

试验分离出的 A 种菌落为绿色绒粒状,镜检观察有大量孢子,初步认为是绿色木霉^[12]。B 种菌落为白色绒状,镜检为长丝状,初步认为是白腐真菌^[13]。对 A、B 2 种菌分别进行变色反应,结果显示,B 种菌有褐色轮环,而 A 种菌没有,因此判定 B 菌为白腐真菌。

试验分离纯化出的白腐真菌,肉眼观察其菌落外形呈圆形绒毛状,生长均匀,整体扁平,有同心圆或放射线;显微镜观察其菌丝有两叉分支裂殖孢子,单个呈链状长筒型。白腐真菌的生物学分类属于担子菌,分泌的酶系中包括内(外)切 β-葡萄糖、纤维二糖氧化酶等^[14],能分解包括木质素在内的全部木材组成成分。

2.2 木质素质量浓度对白腐真菌降解木质素效果的影响

木质素质量浓度对白腐真菌降解木质素效果的影响见表 1。

表 1 不同质量浓度木质素对白腐真菌降解木质素效果的影响

处理时间/h Time for degradation								
木质素质量浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	0		20		40		60	
	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent
	28.7	0.00	14.8	48.43	15.1	47.38	15.5	45.99
46.0	46.0	0.00	35.5	22.83	36.7	20.22	34.2	25.65
153.0	153.0	0.00	105.2	31.24	122.7	19.80	114.7	25.03
212.0	212.0	0.00	167.5	20.99	178.6	15.75	168.6	20.47

处理时间/h Time for degradation								
木质素质量浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	80		100		120		140	
	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent
	28.7	47.73	15.4	46.34	14.5	49.48	17.8	37.98
46.0	31.3	31.96	27.5	40.22	26.2	43.04	30.8	33.04
153.0	99.4	35.03	96.4	36.99	94.5	38.24	93.6	38.82
212.0	158.1	25.42	151.8	28.04	150.9	28.82	148.5	29.95

从表 1 可以看出,在降解处理 0~20 h 溶液中木质素质量浓度下降十分明显,但这一过程并不完全是因为木质素被降解,而是由于白腐真菌对造纸

黑液中的木质素具有吸附作用,这种现象在木质素质量浓度较高的情况下尤为明显,经过更长一段时间的处理,原先被吸附的木质素有一部分又会被解

析出来,所以在 20~40 h 木质素质量浓度又有小幅回升。40 h 后,液体中木质素在白腐真菌的作用下逐渐被降解。木质素质量浓度分别为 28.7,46.0,153.0,212.0 mg/L 时,其 140 h 后的降解率分别为 37.98%,33.04%,38.82%,29.95%。综合试验结果可以看出,当木质素质量浓度为 153.0 mg/L 时的降解效果是 4 组试验中最优的。因此,在随后的

降解试验中木质素的质量浓度均为 153.0 mg/L。
2.3 pH 值对白腐真菌降解木质素效果的影响
从表 2 可以看出,pH 值越低,木质素降解率越高,较 pH=5 时处理效果较好,其最终降解率为 38.89%,相对于 pH 为 6,7,8.5 时分别高出 12.75%,13.66%和 15.49%。说明白腐真菌适合在低 pH 环境下对木质素进行降解,故最佳 pH 为 5。

表 2 不同 pH 值对白腐真菌降解木质素效果的影响
Table 2 Effect of white-rot fungi degrading lignin influenced by the pH

pH	处理时间/h Time for degradation							
	0		20		40		60	
	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent
5	153.0	0.00	105.1	31.31	122.4	20.00	114.2	25.36
6	153.0	0.00	128.5	16.01	137.1	10.39	135.4	11.50
7	153.0	0.00	130.3	14.84	148.6	2.86	135.3	11.57
8.5	153.0	0.00	132.2	13.59	140.8	7.97	134.2	12.29

pH	处理时间/hTime for degradation							
	80		100		120		140	
	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent
5	99.0	35.29	96.1	37.19	94.5	38.24	93.5	38.89
6	121.6	20.52	118.5	22.55	116.2	24.05	113.0	26.14
7	119.5	21.90	117.3	23.33	116.0	24.18	114.4	25.23
8.5	122.3	20.07	121.2	20.78	119.4	21.96	117.2	23.40

2.4 搅拌速度对白腐真菌降解木质素效果的影响
从表 3 可以看出,当搅拌速度为 250 r/min 时,自 60 h 后木质素的降解率明显增大,处理 140 h 其最终降解效率为 48.56%,明显优于其他 3 组,表明

过于剧烈的搅拌严重抑制了木质素过氧化氢酶等的产生,从而影响木质素的降解效果,适当搅拌有助于物质之间的传递,促进木质素的降解。故后续试验中搅拌速度以 250 r/min 为宜。

表 3 不同搅拌速度对白腐真菌降解木质素效果的影响
Table 3 Effect of white-rot fungi degrading lignin influenced by the different stirring speed

搅拌速度/ (r·min ⁻¹) Stirring speed	处理时间/h Time for degradation							
	0		20		40		60	
	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent
150	153.0	0.00	124.3	18.76	130.4	14.77	124.3	18.76
250	153.0	0.00	125.2	18.17	116.5	23.86	98.5	35.62
500	153.0	0.00	123.1	19.54	116.6	23.79	108.3	29.28
1 500	153.0	0.00	138.0	9.80	137.5	10.13	136.1	11.05

搅拌速度/ (r·min ⁻¹) Stirring speed	处理时间/h Time for degradation							
	80		100		120		140	
	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent	质量浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解率/% Percent
150	123.1	19.54	122.0	20.26	120.1	21.50	122.6	19.87
250	96.0	37.25	88.5	42.15	81.2	46.93	78.7	48.56
500	108.3	29.21	108.2	29.28	106.2	30.59	93.8	38.69
1 500	134.2	12.29	128.4	16.08	125.2	18.17	128.6	15.95

2.5 碳源和氮源对白腐真菌降解木质素效果的影响

2.5.1 碳源质量浓度 由表 4 中木质素在 140 h 最终降解率可知,当葡萄糖质量浓度为 1 g/L 时的

降解率最高,可达 55.10%。这是由于适当的含碳量对提高菌丝的综合性能(包括酶的活性)最为有利,且培养得到的菌丝对污染物的吸附能力强,机械强度也较好。故葡萄糖的质量浓度以 1 g/L 为宜。

表 4 不同质量浓度葡萄糖对白腐真菌降解木质素效果的影响

Table 4 Effect of white-rot fungi degrading lignin influenced by the different glucose concentrations

葡萄糖 质量浓度/ (g · L ⁻¹) Glucose	处理时间/h Time for degradation							
	0		20		40		60	
	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent
1	153.0	0.00	113.9	25.56	117.4	23.27	102.7	32.88
2	153.0	0.00	126.4	17.39	124.6	18.56	108.0	29.04
5	153.0	0.00	121.6	20.52	116.8	22.36	104.0	32.03
10	153.0	0.00	131.8	13.8	116.8	22.36	104.9	31.76

葡萄糖 质量浓度/ (g · L ⁻¹) Glucose	处理时间/h Time for degradation							
	80		100		120		140	
	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent
1	90.3	40.98	79.2	48.24	75.2	50.85	68.7	55.10
2	94.8	38.04	91.8	40.00	87.9	42.54	82.3	44.90
5	102.4	33.07	90.8	40.90	84.3	44.90	74.5	51.31
10	98.9	35.36	90.6	40.78	84.2	44.97	76.0	50.33

2.5.2 氮源质量浓度 由表 5 可知,当酒石酸铵质量浓度为 0.20 g/L 时,白腐真菌对木质素有吸附作用,140 h 时其降解率最高,为 59.02 %;当酒石酸铵质量浓度为 0.08,0.10 和 0.50 g/L 时,白腐真菌对木质素基本无吸附作用。这一现象可能是由于氮源

含量过低或过高时使得碳氮比值变得过大或过小,从而不能满足白腐真菌的正常生长需要,以至影响菌丝的发育从而导致吸附作用减弱。故本研究中酒石酸铵最佳质量浓度为 0.20 g/L。

表 5 不同质量浓度酒石酸铵对白腐真菌降解木质素效果的影响

Table 5 Effect of white-rot fungi degrading lignin influenced by the different ammonium tartrate concentrations

酒石酸铵 质量浓度/ (g · L ⁻¹) Ammonium tartrate	处理时间/h Time for degradation							
	0		20		40		60	
	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent
0.08	153.0	0.00	135.7	11.31	127.9	16.41	111.8	26.93
0.10	153.0	0.00	113.0	26.08	118.2	22.75	103.6	32.29
0.20	153.0	0.00	123.5	19.28	110.1	28.04	98.2	35.81
0.50	153.0	0.00	139.0	9.15	129.7	15.23	124.9	18.37

酒石酸铵 质量浓度/ (g · L ⁻¹) Ammonium tartrate	处理时间/h Time for degradation							
	80		100		120		140	
	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg · L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent
0.08	102.9	32.75	93.6	38.28	91.7	40.07	88.7	42.03
0.10	90.3	40.98	79.2	48.24	73.6	51.90	68.2	55.42
0.20	83.6	45.36	73.3	52.09	67.8	55.69	62.7	59.02
0.50	118.9	22.29	114.2	25.36	111.7	27.00	109.1	28.70

综合表 4 和表 5 可知,当葡萄糖质量浓度为 1 g/L、酒石酸铵质量浓度为 0.20 g/L 时,木质素的降解率最高。由此可以推断,适宜的碳氮比对白腐真

菌的生长有利,菌丝发达对木质素吸附能力强且酶活性大。否则,既不利于白腐真菌的生长,也不利于木质素的降解。

2.6 [Fe²⁺]质量浓度对白腐真菌降解木质素效果的影响

从表 6 可以看出,当[Fe²⁺]质量浓度为0.08 mg/L时,白腐真菌对木质素的吸附量大,解析量也较大,140 h 的降解率为 64.38 %;当[Fe²⁺]质量浓度较高时,木质素的吸附量小,且降解较缓慢。由此可知,适合的[Fe²⁺]质量浓度可以促进酶活性,

从而提高对木质素的降解效果。[Fe²⁺]质量浓度过低则会导致白腐真菌生长所需微量元素不足,影响其正常降解能力;质量浓度过高则会导致酶蛋白与Fe²⁺结合,引起蛋白质变性,抑制白腐真菌降解木质素。本研究中[Fe²⁺]的最适质量浓度为 0.08 mg/L。

表 6 不同质量浓度[Fe²⁺]对白腐真菌降解木质素效果的影响

Table 6 Effect of white-rot fungi degrading lignin influenced by the different [Fe²⁺] concentrations

[Fe ²⁺]/ (mg·L ⁻¹)	处理时间/h Time for degradation							
	0		20		40		60	
	质量 浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent
0.04	153.0	0.00	135.7	11.31	132.9	13.14	129.8	15.16
0.08	153.0	0.00	100.5	34.31	118.0	22.88	84.8	44.58
0.10	153.0	0.00	124.5	18.63	109.8	28.24	97.5	36.27
0.14	153.0	0.00	136.8	10.59	129.5	15.36	127.9	16.41

[Fe ²⁺]/ (mg·L ⁻¹)	处理时间/h Time for degradation							
	80		100		120		140	
	质量 浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent	质量 浓度/ (mg·L ⁻¹) Lignin	降解 率/% Percent
0.04	90.3	40.98	89.2	41.70	85.0	44.44	83.4	45.49
0.08	77.9	49.08	68.9	54.97	61.4	59.87	54.5	64.38
0.10	83.2	45.62	73.3	52.09	67.8	55.69	61.6	59.79
0.14	125.4	18.04	118.3	22.68	110.1	28.04	108.8	28.89

由表 6 还可知,当[Fe²⁺]质量浓度为 0.08 mg/L时,其他条件(木质素质量浓度、pH、搅拌速度、碳源和氮源质量浓度)均满足本试验中的最佳条件组合时,白腐真菌对造纸黑液中木质素的降解率最高,为 64.38 %。

3 小 结

造纸黑液以其浓度高、含纤维悬浮物多、色度深、BOD 和 COD 含量高等特点,成为造纸废水中的处理关键。本试验以造纸黑液中木质素为降解对象,研究了影响白腐真菌降解造纸黑液中木质素的因素,结果显示,在木质素质量浓度为 153.0 mg/L, pH 为 5,搅拌速度为 250 r/min,葡萄糖质量浓度为 1 g/L,酒石酸铵质量浓度为 0.20 g/L,[Fe²⁺]质量浓度为 0.08 mg/L 的条件下,白腐真菌对造纸黑液中木质素的降解效果最佳,其最终降解率可达 64.38%。该结果对于降低造纸黑液中有机的含量具有重要意义。本研究中,有关葡萄糖和酒石酸铵质量浓度的结论,与吴涓等^[15]用白腐真菌处理草浆造纸废水研究中的结论一致。生物处理造纸废水具有成本低、效率高、二次污染少等优点。吴香波

等^[16]总结了有关造纸废水生物处理的进展,表明有多种微生物可用于造纸废水的处理,白腐真菌以其具有能降解木质素等大分子物质的独特特点成为其中的佼佼者。随着造纸工业和生物技术的迅猛发展,以及对环境质量要求的提高,白腐真菌在生物处理技术上的应用必将在制浆造纸工业废水处理中得到更广泛认可。

[参考文献]

[1] 张玉仙,姚芳,杜书田,等. 造纸废水治理技术进展 [J]. 天津造纸,2008,3(1):20-23.
Zhang Y X,Yao F,Du S T,et al. The progress of papermaking wastewater treatment technology [J]. Tianjin Pulp & Paper, 2008,3(1):20-23. (in Chinese)

[2] 楚广诣,胡力华,刘莉,等. 造纸废水生物处理的研究进展 [J]. 黑龙江造纸,2007,12(3):34-35.
Chu G Y,Hu L H,Liu L,et al. Advance in the study of biological treatment waste water from pulp and paper industry [J]. Heilongjiang Pulp & Paper,2007,12(3):34-35. (in Chinese)

[3] 徐海娟,梁文芷. 白腐菌处理漂白废水工艺及脱色机理探讨 [J]. 广东造纸,1999,6(1):121-125.
Xu H J,Liang W Z. A process for treating bleach effluent by

- phanerochaete chrysosporium and it's decolorization mechanisms [J]. Guangdong Pulp & Paper, 1999, 6(1): 121-125. (in Chinese)
- [4] 张业录, 李 群, 谭国民, 等. 固定化白腐菌技术在漂白废水处理中的应用 [J]. 工业水理, 2000, 20(12): 5-7.
Zhang Y L, Li Q, Tan G M, et al. Application of immobilized white rot fungus technique to bleach effluent treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2000, 20(12): 5-7. (in Chinese)
- [5] 李海红, 同 帆, 仝攀瑞. 玉米秸秆发酵生产蛋白饲料 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2003, 33(7): 22-25.
Li H H, Tong Z, Tong P R. Study on producing protein feeds through fermenting maize straw [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2003, 33(7): 22-25. (in Chinese)
- [6] 徐晓峰, 何北海, 石海强, 等. 降解木片树脂的白腐菌菌种选育与脱除树脂过程 [J]. 中国造纸学报, 2006, 21(1): 29-32.
Xu X F, He B H, Shi H Q, et al. Pitch-degrading fungus strains screening and application in pitch removal [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2006, 21(1): 29-32. (in Chinese)
- [7] 高大文, 文湘华, 周晓燕, 等. pH 值对白腐真菌液体培养基抑制杂菌效果的影响 [J]. 环境科学, 2005, 26(6): 173-179.
Gao D W, Wen X H, Zhou X Y, et al. Effect of pH on suppressing the growth of other bacteria and fungi in culturing phanerochaete chrysosporium in liquid medium [J]. Environmental Science, 2005, 26(6): 173-179. (in Chinese)
- [8] 周晓燕, 文湘华, 冯 嫣. 葡萄糖补料对白腐真菌 *P. chrysosporium* 产木质素降解酶的影响 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(3): 363-368.
Zhou X Y, Wen X H, Feng Y. Glucose impact on *P. chrysosporium* of ligninolytic enzymes [J]. Environmental Science, 2007, 27(3): 363-368. (in Chinese)
- [9] 林 刚, 文湘华, 钱 易. 液体培养基中添加天然成分对白腐真菌 *Phanerochaete chrysosporium* 生长的促进作用 [J]. 环境科学, 2003, 24(4): 41-47.
Lin G, Wen X H, Qian Y. Liquid medium to add natural ingredients for the growth of *Phanerochaete chrysosporium* role in promoting [J]. Environmental Science, 2003, 24(4): 41-47. (in Chinese)
- [10] 赵 华, 齐 刚, 代 彦. 白腐菌液体深层培养条件的研究 [J]. 生物技术, 2003, 13(6): 21-24.
Zhao H, Qi G, Dai Y. Study on conditions of submerged liquid cultivation of white rot fungi [J]. Biotechnology, 2003, 13(6): 21-24. (in Chinese)
- [11] 高大文, 文湘华, 周晓燕, 等. 微量元素对白腐真菌的生长影响和抑制酵母菌效果的研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(8): 1623 - 1626.
Gao D W, Wen X H, Zhou X Y, et al. Trace elements in the growth of white rot fungi and inhibit yeast the effect of the impact of research [J]. Environmental Science, 2006, 27(8): 1623-1626. (in Chinese)
- [12] 张德强, 黄镇亚, 张志毅. 绿色木霉纤维素酶 AS3. 3032 固态发酵的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(2): 57-60.
Zhang D Q, Huang Z Y, Zhang Z Y. Production of cellulase by tricho derma viride AS3. 3032 in solid state fermentation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(2): 57-60. (in Chinese)
- [13] 丁广辉, 许士玉. 木质素降解菌白腐菌的筛选 [J]. 黑龙江造纸, 2005, 4(2): 5-7.
Ding G H, Xu S Y. Screening of White-rot Fungi [J]. Heilongjiang Pulp & Paper, 2005, 4(2): 5-7. (in Chinese)
- [14] 李慧蓉. 白腐真菌的研究进展 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 69-77.
Li H R. Progress of research about white-rot fungi [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 69-77. (in Chinese)
- [15] 吴 涓, 肖亚忠, 王怡平. 挂膜生长的白腐真菌处理草浆造纸黑液废水 [J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(3): 370-374.
Wu J, Xiao Y Z, Wang Y P. Treatment of pulp black liquor wastewater by white rot fungi in biofilm [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(3): 370-374. (in Chinese)
- [16] 吴香波, 谢益民. 造纸废水微生物处理现状和发展 [J]. 湖北造纸, 2008, 4(3): 7-10.
Wu X B, Xie Y M. The situation and development about microbial technology at paper wastewater treatment processes [J]. Hubei Pulp & Paper, 2008, 4(3): 7-10. (in Chinese)