



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201812169

中图分类号 X703

文献标识码 A

袁鑫, 刘玉香, 梁涛. 青霉成球条件优化及其在固定化和脱色中的应用[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2434-2441.
YUAN Xin, LIU Yuxiang, LIANG Tao. Globular conditions optimization of *Penicillium* sp. and its application in immobilization and decolorization[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(10): 2434-2441.

青霉成球条件优化及其在固定化和脱色中的应用

袁鑫, 刘玉香*, 梁涛

太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024

第一作者: 袁鑫(1994—), 男, 硕士研究生。研究方向: 水污染控制。E-mail: 896136007@qq.com

*通信作者: 刘玉香(1969—), 女, 博士, 教授。研究方向: 水污染控制。E-mail: yuxiangliu2002@126.com

摘要 针对青霉菌丝球 L1 在废水处理中有效应用的问题, 通过调节培养时间、接种量和 pH 对菌丝球的性能进行优化; 采用 SEM 对优化后的菌丝球进行了表征, 研究了优化后的菌丝球负载混合细菌 FG-06 处理焦化废水的降解效果, 探讨了接种量、转速和重复利用次数对优化后的菌丝球吸附结晶紫的影响。结果表明: 优化后的菌丝球呈有规则的网状结构, 菌丝体粗壮; 在焦化废水处理实验中, 接种 90 颗负载 FG-06 的菌丝球后, 苯酚降解响应时间明显缩短, 氨氮和苯酚的降解速率均明显提升; 对 20 mL 浓度为 50 mg·L⁻¹ 的结晶紫吸附实验结果显示, 20 颗菌丝球、120 r·min⁻¹ 条件下拥有更好的吸附性能, 重复利用 3 次, 脱色率在 86% 以上。成球条件优化后的菌丝球是一种理想的固定化载体, 并拥有良好的脱色性能。

关键词 焦化废水; 染料吸附; 菌丝球; 优化; 微生物固定化

随着我国工业的快速发展, 工业废水产生量亦不断增加。由于工业废水处理成本高, 导致越来越多的工业废水没有得到有效处理而被排放, 因此, 水污染成为亟待解决的重大问题。尤其是在医药、化工、印染和焦化等行业, 其废水有机物浓度高、组分复杂、难降解物所占的比重大, 并且含有各类芳香族类组分、氨氮、氰化物、多氯联苯、邻苯二甲酸类等有毒有害物质^[1-4]。若不经恰当处理, 工业废水极有可能渗透到地下水中, 并对周围的居民和生态环境造成严重危害。

微生物固定化技术是强化工业废水处理最为经济有效的方法之一^[5]。菌丝球由于其特殊的多孔结构, 在实际废水处理中有较强的适应性和良好的传质效果。同时, 菌丝球安全、无毒、易得, 具备良好的沉降和吸附性能, 使用后易于分离, 从而使得菌丝球在废水处理中广受关注^[6-7]。DONG 等^[8]使用菌丝体颗粒作为生物质载体固定沼泽红假单胞菌, 研究其发酵特性和邻氯苯酚的生物降解性能, 通过响应曲面优化后, 邻氯苯酚的去除率达到了 92.6%。LU 等^[9]采用海洋真菌 *Aspergillus niger* ZJUBE-1 制备自固定菌丝体并研究其脱色能力, 结果表明, 生物吸附过程符合拟二级动力学和 Langmuir 等温模型, 菌丝体最大吸附容量 263.2 mg·g⁻¹, 并在生物吸附过程中表现出较高的盐度和酸度的耐受性。国巍^[10]以烟曲霉菌 G-13 菌丝球为载体, 固定具有降解纤维素能力的蜡样芽孢杆菌 X10-1-2, 形成可同时降解木质素和纤维素的复合菌丝球。

一直以来, 人们更多关注菌丝球营养条件的优化, 而忽略了一些环境因素(如 pH, 接种量

等)对菌丝球物理性能的影响,而这些因素的优化通常会使得菌丝球具有更好的效果^[11]。本研究通过研究孢子培养时间、培养基 pH 及菌丝球接种量对菌丝球物理性能的影响,探讨其最佳性能的培养条件,使用优化后的菌丝球进行废水脱色和固定化微生物处理焦化废水的研究,为难降解废水和染料废水的处理提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验试剂与仪器

试剂:蔗糖($C_{12}H_{22}O_{11}$)、丁二酸钠($C_4H_4Na_2O_4$)、硫酸铵($(NH_4)_2SO_4$)、七水合硫酸镁($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)、氯化钾(KCl)、磷酸氢二钾(K_2HPO_4)、七水合硫酸亚铁($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)、四水合硫酸锰($MnSO_4 \cdot 4H_2O$)、结晶紫($C_{25}H_{30}N_3Cl$),均为分析纯。

仪器:游标卡尺(8012型,上海赛拓五金工具有限公司);烘箱(101-1A,天津天泰仪器有限公司);分光光度计(721型,上海光谱仪器有限公司);扫描电镜(JSM-7100-F,日本电子株式会社)。

1.2 实验菌种和培养基

真菌菌种为异养硝化真菌 *Penicillium* sp. L1(KU163443)^[12],该菌筛选自焦化废水处理厂曝气池的活性污泥。复合菌丝球降解特性分析所用的细菌为混合细菌 FG-06,该菌筛选自焦化废水处理厂曝气池活性污泥,不动杆菌属和假单胞菌属是该菌群中的优势种属,具有出色的异养硝化性能^[13]。2种微生物均采用斜面 and 液体石蜡保藏法进行保藏。

L1 菌丝球培养基:蔗糖 $12.717 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, KCl $0.500 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $(NH_4)_2SO_4$ $0.614 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ $0.500 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ $0.010 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, K_2HPO_4 $0.500 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 7,使用前在灭菌锅中以 $115 \text{ }^\circ\text{C}$ 灭菌 30 min。

混合细菌 FG-06 培养基: $(NH_4)_2SO_4$ $0.472 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 丁二酸钠 $4.630 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ $0.050 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, K_2HPO_4 $0.200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ $0.010 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ $0.010 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 7,使用前在灭菌锅中以 $121 \text{ }^\circ\text{C}$ 灭菌 20 min。

由于焦化废水水质成分复杂,污染物浓度波动大,在实验期间,取回的焦化废水苯酚浓度较高,因此,使用混合细菌培养基和焦化废水以体积比为 2:1 配置混合废水,以增强废水的可生化性能,焦化废水与混合废水水质指标见表 1。

表 1 焦化废水与混合废水水质

Table 1 Water quality of cooking wastewater and mixed wastewater

| 水样 | pH | COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | TN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | NH_4^+-N /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 苯酚/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) |
|------|-------|---|--|---|--|
| 焦化废水 | 7~7.2 | 3 368~3 601 | 252.6~293.1 | 161.07~189.31 | 735.22~787.69 |
| 混合废水 | 7~7.1 | 3 110~3 212 | 151.2~168.5 | 115.15~127.42 | 225.39~245.07 |

1.3 实验方法

1) L1 菌丝球的制备与优化。菌丝球的制备采用孢子预培养方式,将斜面上孢子在 L1 培养基中活化 2 d 后用于研究。随机取一定数量的活化孢子接种至全新的培养基中再培养,培养一定时间后,制备菌丝球。若无其他说明,则所有的培养环境均为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,于 250 mL 锥形瓶分装 100 mL 培养基。

在 pH 为 7、接种 40 颗预培养后孢子的条件下,同时接种数瓶培养,每隔 24 h 取出 1 瓶,一共 5 d,测量菌丝球的性能,考察菌丝球培养时间对其性能的影响。在接种 40 颗预培养后的孢子,培养时间为 3 d 的条件下,通过改变 L1 培养基 pH 为 3、4、5、6、7(使用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 或

HCl), 确定在不同 pH 条件下的菌丝球的性能。在 pH 为 7、培养时间为 3 d 的条件下, 通过改变每瓶培养基的预培养孢子接种量 (20、40、60、80、100 颗) 来研究其对菌丝球性能的影响。

按照常见方法测定菌丝球的直径、干湿比、干重测量和沉降速度^[14]。在后续降解实验和吸附实验中均使用优化条件下制备的菌丝球。

2) L1 菌丝球在焦化废水中的降解。首先, 同时将 1% 的游离菌液和 30 颗菌丝球 (直径为 4.1 ± 0.2 mm) 加入到 FG-06 培养基中, 在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下, 共同培养 48 h 后取出备用, 完成菌丝球微生物的负载。然后, 以接种 5% 的游离菌液和 60 颗空白菌丝球作为对照组, 分别接种上述复合菌丝球 30、60 和 90 颗作为实验组, 分别在 120 mL 混合废水中研究其降解性能, 每种情况同时做 3 组平行实验, 取平均值。

3) L1 菌丝球吸附结晶紫的影响因素。实验均在 20 mL 浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的结晶紫溶液中进行, 在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 吸附 24 h 后, 在 583 nm 测吸光度并计算脱色率, 若无其他说明, 转速均为 $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。分别研究 10 颗和 20 颗菌丝球的吸附性能; 在 20 颗菌丝球条件下, 研究 0、60、120、180 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的影响; 在 20 颗菌丝球条件下, 以 24 h 为 1 周期, 重复 6 次吸附实验对菌丝球的影响。按式 (1) 计算脱色率。

$$R = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为脱色率; c_0 为空白对照处理后的溶液浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_t 为实验组处理结束后的溶液浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.4 分析方法

采用快速消解分光光度法测定 COD; 采用纳氏试剂分光光度法测定氨氮浓度; 采用酚二磺酸分光光度法测定硝态氮浓度; 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定亚硝态氮浓度; 采用 4-氨基安替比林光度法测定苯酚浓度; 菌落密度 OD_{600} 在分光光度计 600 nm 处测定; 结晶紫浓度在分光光度计 583 nm 处测定。

2 结果与讨论

2.1 L1 菌丝球的制备与优化

有研究^[15]表明, 菌丝球半径过大则比表面积减小, 吸附量降低; 半径过小, 虽然比表面积相对有所上升, 但菌丝球致密, 含水量减少, 导致传质和吸附性能下降; 菌丝球干重和干湿比越大, 表明菌丝球所含水分越少, 菌丝球强度也就越高。而菌丝球良好的沉降性能可以使菌丝球与水快速分离, 便于在水处理中的应用^[16]。因此, 在菌丝球应用于水处理前, 优化过程十分重要。

图 1 为培养时间、pH 及接种量对菌丝球性能的影响。从图 1(a) 可以发现, 菌丝球的直径和干重随时间递增, 而干湿比则呈现相反的趋势。当培养时间为 1 d 时, 虽然干湿比较高 (4.18%), 但此时菌丝球直径相对较小, 菌丝球较为密实。培养 2 d 时, 菌丝球有较大幅度的生长, 此时的直径和干湿比达到 4.2 mm 和 2.66%。2 d 以后, 随着菌丝球的继续生长, 直径逐渐增大, 结构越来越松散, 不利于菌丝球在水处理中的应用。图 1(b) 显示出培养基 pH 对菌丝球物理性能的影响, 随着 pH 的升高, 菌丝球的干湿比和沉降速率显著上升, 而直径则略微下降。真菌通常适合在酸性条件下生长, 但在酸性条件下菌丝球 L1 结构十分松散。在初始 pH 为 6 和 7 时, 菌丝球的直径 (3.8 mm, 3.7 mm)、干湿比 (3.35%, 3.36%)、沉降速率 ($16.76\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $16.90\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 相差不大。菌丝球的接种量影响见图 1(c), 随着接种量的增大, 菌丝球直径逐渐下降, 尤其是在接种量 80 颗和 100 颗时, 直径降到 3.2 mm 和 2.9 mm; 而干湿比则先在 60 颗接种量时上升至最高点 2.57%, 而后有轻微的下降; 虽然沉降速度随接种量增大呈下降趋势, 但变化幅度并不大。综和上述结果表明, 活化孢子在培养 2 d、

接种量为 60 颗菌丝球、pH=7 的条件下, 菌丝球 L1 的物理性能更好。

由图 2(a) 和图 2(b) 可知, 未优化前, 菌丝球颗粒结构松散, 直径相对较大, 难以维持球形整体; 而优化后的菌丝球颗粒饱满, 较为密实, 粒径略有减小。有研究^[17]表明, 真菌的吸附机制主要包括细胞表面吸附和细胞内积累, 由优化后菌丝球的电镜图(图 2(c)~(f))可知, 优化后的菌丝球有规则的网状结构, 网孔发达且分布均匀, 并且菌丝体结构粗壮完整, 有利于菌丝球在水处理中发挥载体的作用。

2.2 L1 复合菌丝球在实际废水中的降解性能

通过改变复合菌丝球的接种量, 研究了不同接种量对废水脱氮性能的影响。由图 3(a) 可知, 没有复合 FG-06 的菌丝球对废水中氨氮几乎没有去除效果, 游离细菌和接种 30 颗复合菌丝球在 96 h 具有相似的氨氮去除率(56.68%, 57.14%)。随着接种量的增加, 氨氮的去除率有所上升。当接种 90 颗复合菌丝球时, 24 h 的氨氮去除率为 81.10%, 之后氨氮浓度有所上升, 最终的降解率为 78.67%, 实验期间几乎没有发现硝氮和亚硝氮的积累。有研究^[18]表明, 焦化废水中硫氰化物和有机氮化合物是总氮的重要组成部分, 在好氧阶段, 这 2 种化合物会被降解为氨氮, 导致废水中氨氮的上升。pH 的变化情况见图 3(b), 仅接种菌丝球时, pH 基本维持在 7 左右。游离细菌和复合菌丝球实验组随着氨氮的降解, pH 呈上升趋势。

接种空白菌丝球时, COD 的去除有限(7.14%), 可能主要是菌丝球的吸附作用(见图 4)。

接种游离细菌组(76.57%)和复合菌丝球组(80.10%, 81.13%, 82.55%)COD 去除率相差不大, 较高的接种量对 COD 去除率的增加效果有限, 剩余的 COD 主要是一些焦化废水中的难降解污染物。而接种量对苯酚的降解影响较大, 随着复合菌丝球接种量的增加, FG-06 可以利用菌丝球为屏障来减弱焦化废水的影响, 缩短苯酚降解的响应时间, 显著提高苯酚的降解速率, 而游离细菌在 96 h 去除率仅为 81.88%。而接种 90 颗复合菌丝球时, 72 h 苯酚降解率为 95.54%, 最终降解率为 98.21%, 苯酚降解效果明显优于接种 30 颗和 60 颗复合菌丝球时的情况。

苯酚降解的主要中间产物(如丁烯二酸和草酸等)会使溶液 pH 降低^[19], 而使用菌丝球载体时, 通过菌丝球一定的吸附能力和固定化微生物更强的降解性能, 在一定程度上会减弱溶液 pH 的改变。在 60~72 h, 接种 30 颗和 60 颗菌丝球苯酚去除率分别为 24.30% 和 59.29%, 导致 pH 有略微下降(见图 3(b)); 而接种 90 颗菌丝球时, pH 一直保持稳定的上升趋势。由此表明, 90 颗接种量更适合该苯酚浓度下的废水。

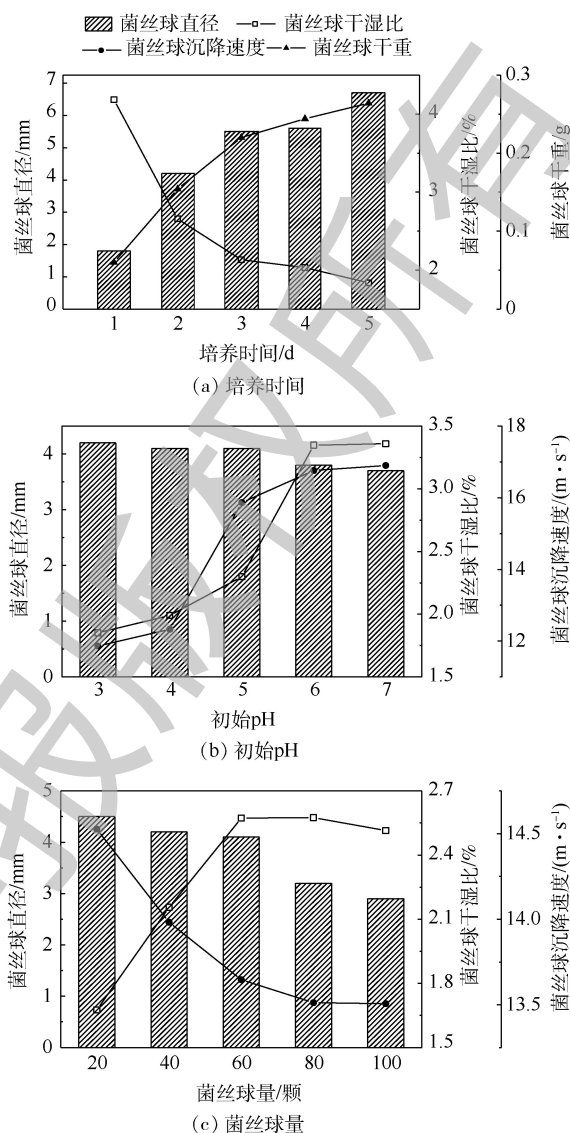


图 1 成球条件优化对菌丝球特性的影响

Fig. 1 Effect of globular conditions optimization on the characteristics of mycelial pellets

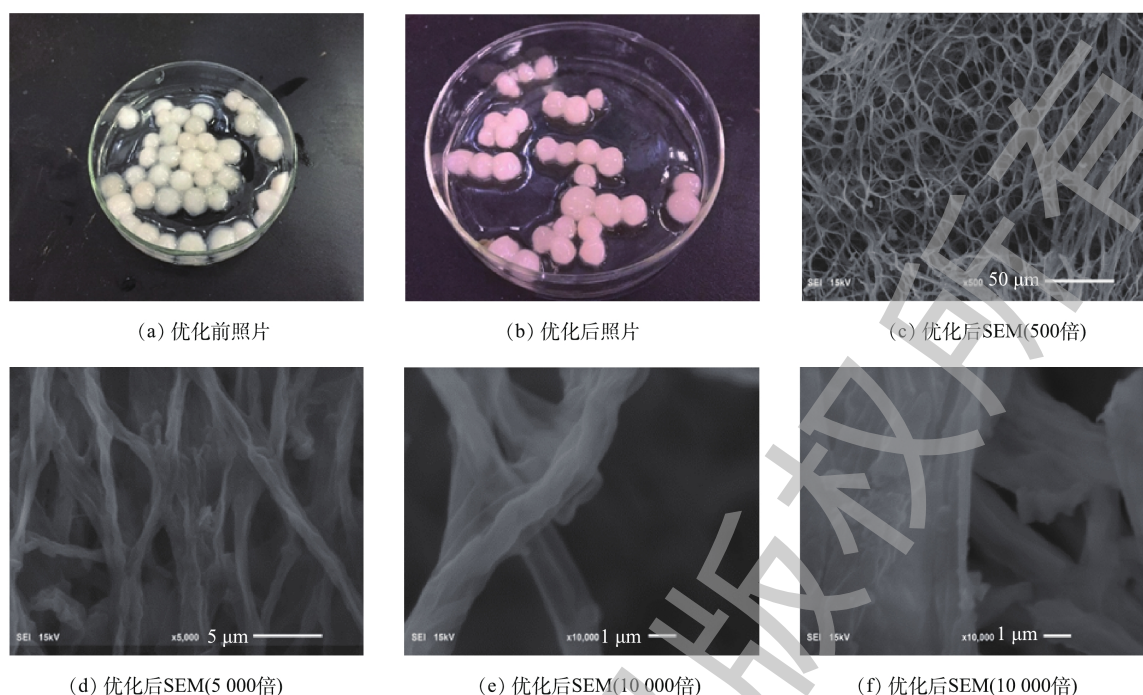


图2 菌丝球优化前后的实物图片和优化后不同倍数的SEM图

Fig. 2 Physical pictures before and after optimization and SEM images with different multiples of the optimized mycelial pellets

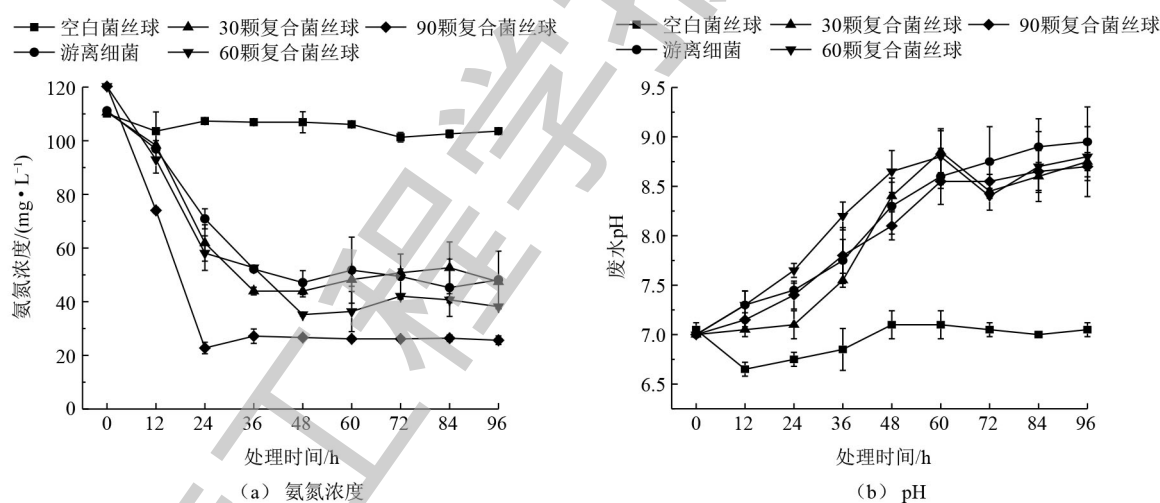


图3 不同接种量条件下氨氮浓度和pH的变化

Fig. 3 Changes of ammonia nitrogen concentration and pH under different inoculation conditions

2.3 L1 菌丝球吸附结晶紫的优化与应用

由图5(a)可知, 20颗菌丝球的脱色率为88.87%, 略高于10颗的脱色率(85.78%)。但使用20颗菌丝球会有更快的脱色速率, 达到平衡所需时间仅为6h左右; 而使用10颗菌丝球达到平衡所需时间为10h以上。结果表明, 对于同样浓度的染料废水, 使用较多的菌丝球可以有效地提高脱色速率。由图5(b)可知, 在静置状态下, 菌丝球脱色率最低, 仅为83.29%。在0~120 r·min⁻¹时, 脱色率随转速的增加而增加; 转速为60 r·min⁻¹时, 脱色率为87.89%; 在120 r·min⁻¹时, 脱色率达到了最大值, 为88.32%; 当转速大于120 r·min⁻¹时, 脱色率呈下降趋势; 在180 r·min⁻¹时, 脱色率为84.54%。在脱色过程中, 合适的转速一方面可增加溶解氧, 利于菌丝球的正常生长, 另一方面

可使菌丝球吸附位点与染料充分接触，增加传质，从而提高脱色率^[20]。结果表明，菌丝球 L1 脱色的最佳转速为 120 r·min⁻¹，进一步提高转速不会增加脱色率。

由图 6 可知，菌丝球对结晶紫的脱色率随使用次数的增加而不断降低。前 3 次使用对脱色率影响不大，第 1 次和第 3 次的脱色率分别为 87.32% 和 86.10%；第 4 次脱色率开始明显下降；第 5 次脱色率降低至 74.22%；第 6 次使用时，脱色率降低至 52.67%。从图 6 实际吸附照片可知，随重复使用次数的增加，菌丝球吸附位点持续减少，菌丝球颜色不断加深，脱色率在第 5 次使用时明显降低。结果表明，L1 菌丝球具有一定的脱色能力和重复使用的可能性，初步优化接种量和转速能有效提高菌丝球的脱色率，具有在固定化微生物处理废水的同时去除废水中的色度以及应用于染料废水处理中的潜力；菌丝球在本研究条件下可有效利用 3 次而不影响脱色率，继续使用会导致吸附位点数趋近于饱和状态，使吸附率明显下降。

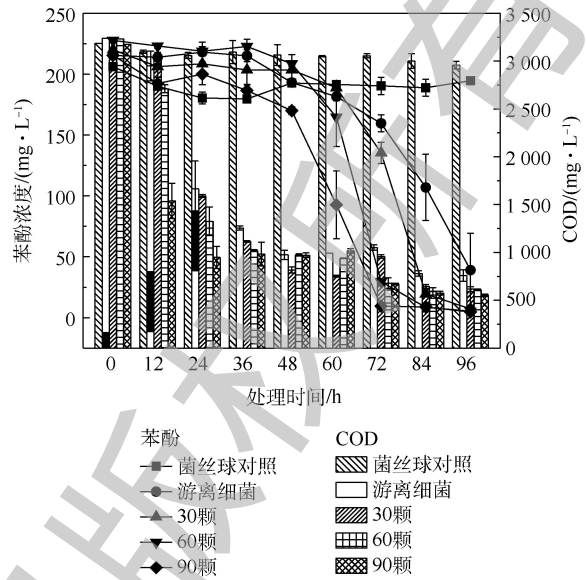


图 4 不同接种量条件下苯酚和 COD 的变化
Fig. 4 Changes of phenol and COD under different inoculation conditions

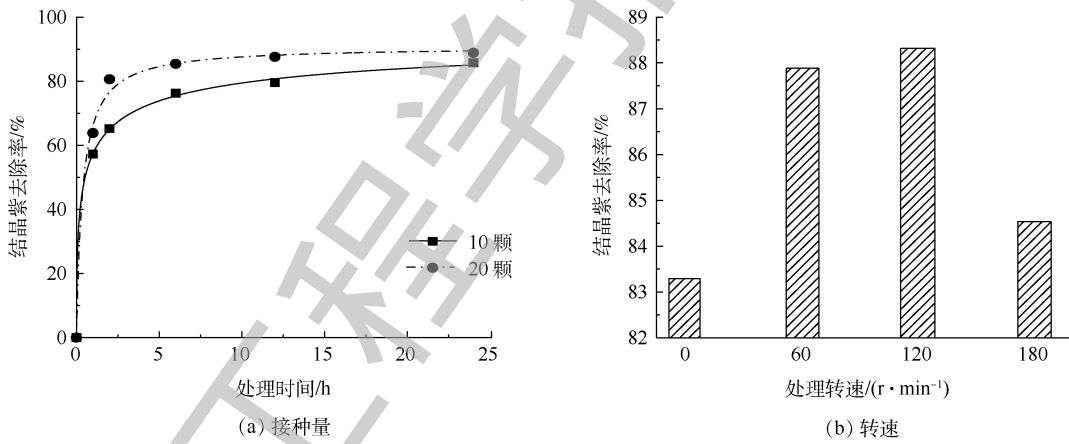


图 5 接种量和转速对 L1 菌丝球吸附结晶紫的影响

Fig. 5 Effect of inoculation size and rotation rate on adsorption of crystal violet by mycelial pellets

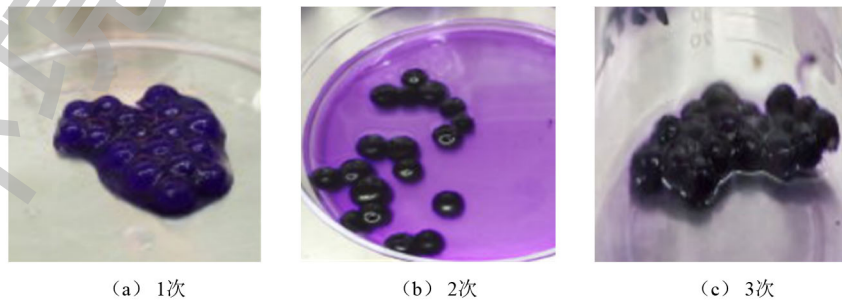


图 6 重复利用菌丝球吸附结晶紫实际效果

Fig. 6 Actual effect of crystal violet adsorption by the reused mycelial pellets

3 结论

1) 活化孢子培养时间、pH和接种量对菌丝球成球性能有较大影响。在活化孢子培养2 d, pH=7, 100 mL培养基接种60颗菌丝球的条件下, 菌丝球物理性能更佳。通过扫描电镜图片显示, 菌丝球优化后, 网状结构规则, 菌丝粗壮, 更适合充当固定化载体或吸附材料。

2) 混合菌群FG-06经菌丝球固定化后, 焦化废水的处理效果随复合菌丝球接种量的增加而增加。在90颗接种量条件下, 实验组氨氮和苯酚的去除率为78.7%和98.2%, 远高于对照组的56.7%和81.9%, 此研究为固定化微生物处理焦化废水提供了新的选择载体。

3) 接种量、转速和重复利用次数对菌丝球吸附染料的效果有明显影响。吸附20 mL浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的结晶紫溶液, 使用20颗菌丝球、 $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下拥有更好的吸附性能, 重复利用3次后, 脱色率仍能保持86.10%。菌丝球L1具有应用于染料废水脱色处理的潜力。

参考文献

- [1] SINGH U, ARORA N K, SACHAN P. Simultaneous biodegradation of phenol and cyanide present in coke-oven effluent using immobilized *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas stutzeri*[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2018, 49(1): 38-44.
- [2] 范举红, 俞大海, 万梅. 臭氧组合工艺深度处理混合印染废水技术经济比较[J]. *工业用水与废水*, 2016, 47(6): 31-35.
- [3] 杨玖坡, 陈梅梅, 张海涛. 固定化微生物技术处理石油石化废水研究进展[J]. *环境工程*, 2013, 31(5): 25-29.
- [4] 秦胜东, 郭嘉吻, 刘玉存, 等. 固定化微生物技术研究进展及其在水处理中的应用[J]. *水处理技术*, 2014, 40(10): 6-11.
- [5] DONG Y, ZHANG Z, JIN Y, et al. Nitrification performance of nitrifying bacteria immobilized in waterborne polyurethane at low ammonia nitrogen concentrations[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(3): 366-371.
- [6] 黄锦丽, 龙敏南, 傅雅婕. 产酸克雷伯氏菌的吸附固定及其产氢研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2005, 44(5): 710-713.
- [7] 刘效梅, 辛宝平, 徐文国. 微生物颗粒在废水处理中的应用与研究[J]. *工业水处理*, 2005, 25(8): 1-4.
- [8] DONG Y, LI L, HU X, et al. Optimization of o-chlorophenol biodegradation by combined mycelial pellets using response surface methodology[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2017, 228(11): 431.
- [9] LU T, ZHANG Q L, YAO S J. Efficient decolorization of dye-containing wastewater using mycelial pellets formed of marine-derive *Aspergillus niger*[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2017, 25(3): 330-337.
- [10] 国巍. 木质素降解真菌菌丝球自固定化细胞体系的建立[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [11] 李立欣, 张斯, 王冬, 等. 真菌菌丝球研究进展[J]. *化工学报*, 2018, 69(6): 2364-2372.
- [12] LIU Y, HU T, ZHAO J, et al. Simultaneous removal of carbon and nitrogen by mycelial pellets of a heterotrophic nitrifying fungus-*Penicillium* sp. L1[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2017, 123(2): 223-229.
- [13] YANG Y, LIU Y, YANG T, et al. Characterization of a microbial consortium capable of heterotrophic nitrifying under wide C/N range and its potential application in phenolic and coking wastewater[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, 120: 33-40.

- [14] 谢长青. 混合菌丝球的培养条件优化及生物强化处理氯酚废水的效能[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2016.
- [15] 李清彪, 洪丽玉. 白腐真菌菌丝球形成的物化条件及其对铅的吸附[J]. *环境科学*, 1999, 20(1): 33-38.
- [16] 袁丽梅, 张书军, 杨敏. 应用气升式反应器培养草酸青霉菌菌丝球的研究[J]. *微生物学报*, 2004, 44(3): 393-395.
- [17] 陆涛. 海洋黑曲霉菌丝球的形成机理及其对含染料废水的脱色作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [18] 吕鹏飞, 刘雷, 吴海珍. 焦化废水中总氮的构成及在生物工艺中的转化[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(10): 4789-4796.
- [19] 荆肇乾, 胡静, 虞婷. 臭氧氧化与生物法联合处理苯酚和苯胺废水研究[J]. *工业水处理*, 2015, 35(12): 61-63.
- [20] 王明霞, 姚善泾. 海洋微紫青霉菌粉对偶氮染料刚果红吸附性能研究[J]. *水处理技术*, 2015, 41(2): 11-16.

(本文编辑: 金曙光, 郑晓梅, 张利田)

Globular conditions optimization of *Penicillium* sp. and its application in immobilization and decolorization

YUAN Xin, LIU Yuxiang*, LIANG Tao

College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

*Corresponding author, E-mail: yuxiangliu2002@126.com

Abstract Aiming at the problem of effective application of *Penicillium* sp. L1 mycelial pellets in wastewater treatment, their performance was optimized through the culture time, inoculation size and pH, and SEM was used to characterize the optimized mycelium pellets. The degradation effect was studied when the optimized mycelial pellets loaded with mixed bacteria FG-06 treated coking wastewater, and the effects of inoculation size, rotation rate and reuse times on the adsorption of crystal violet onto the optimized mycelial pellets were investigated. The results showed that, the optimized mycelium pellets showed regular network structure with strong mycelium. In the experiment of treating coking wastewater, the degradation response time of phenol was significantly shortened using 90 mycelial pellets loaded with the mixed bacteria FG-06, and the degradation rate of ammonia nitrogen and phenol was significantly improved. In 20 mL crystal violet solution with initial concentration of $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 20 mycelial pellets had better adsorption performance at shaking rate of $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, and the reused mycelial pellets after 3 times still remained the decolorization efficiency above 86%. The mycelial pellet after optimization of the globular conditions is an ideal immobilization carrier with a good decolorization performance.

Keywords coking wastewater; dye adsorption; mycelial pellets; optimization; microbial immobilization