

综述与专论

# 生物质絮凝剂在水处理中的应用研究进展

姚培培, 王郑, 徐晶晶, 程星星, 仲米贵

(南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:**在水处理中,絮凝剂必不可少且种类繁多,现以无机及有机高分子絮凝剂使用最为广泛。但随着大众对于环境及水健康的关注度增大,其二者的毒性及难降解性使得大家将目光转向可实现无污染排放的绿色化絮凝剂—生物质絮凝剂。笔者在此就综述应用价值较高的几类生物质絮凝剂的研究进展,以期为理论研究和工程实践提供指导。

**关键词:**纤维素絮凝剂;微生物絮凝剂;水处理;研究进展

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2014)04-0011-04

## APPLICATION RESEARCH PROGRESS OF BIOMASS FLOCCULANT IN WATER TREATMENT

YAO Pei-pei, WANG Zheng, XU Jing-jing, CHENG Xing-xing, ZHONG Mi-gui

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Flocculant is necessary and various in water treatment. Inorganic and organic flocculants are widely used at present comparably. But with the increase of public concern for the environment and need for healthy water, the toxicity and refractory of the two referred above made everybody turn to green flocculant—biomass flocculant, which achieves the goal of no pollution emissions. I summarize the study progress of the biomass flocculant with higher application value to provide guidance for the theory research and engineering practice.

**Key Words:** Cellulose flocculant; Microbial flocculant; Water treatment; Application research progress

目前常用的化学絮凝剂分为两大类,一种是以铁盐和铝盐为代表的无机絮凝剂,另一种则是以聚丙烯酰胺为代表的高分子絮凝剂。虽然所用历史久远,但是其毒性和二次污染性使其发展势头减弱。取而代之的是绿色化的生物质絮凝剂。生物质絮凝剂是利用高级的生物技术,通过微生物

的提取、精炼或是通过提取各种植物、农作物中的纤维素、蛋白质等,对其进行改性加工培养而得到的一种絮凝剂。它不仅可以提高水中各种物质的可沉降性,而且无毒、高效,所取原材料为各种废弃物或供给充足且廉价的生物,满足人们对环保的要求,也符合一切绿色化的大环境,具有良好的发展前景。笔者综述了各类生物质絮凝剂在水处理中的研究进展,以期为理论研究和工程实践提供指导。

### 1 生物纤维素絮凝剂

自然界中的大多数植物、农作物都富含纤维素。纤维素作为一种天然的高分子物质,分子链上分布有大量的羟基、羧基等活性基团,对水中的污

收稿日期:2013-07-22

基金项目:住房和城乡建设部科学技术项目(2011-K7-2);江苏省高校自然科学基金基础研究项目资助(12KJB560004);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD);2012年国家级高等学校大学生实践创新训练计划项目;2012年江苏省高等学校大学生实践创新训练计划重点项目;南京林业大学2012年大学生实践创新训练计划立项项目。

第一作者简介:姚培培,女,1992年生,南京林业大学土木工程学院给排水专业学生,从事水处理技术方面研究,E-mail:15077861710@163.com。

染物质有良好的络合吸附、絮凝作用,且储量极大,易提取。但天然高分子絮凝剂电荷密度较小,相对分子质量低且易发生生物降解,故絮凝能力低,而改性后纤维素絮凝剂絮凝效果明显提高、具有较好的吸附效果且选择性大。目前,对生物纤维素改性的方法基本分为四种:水解、醚化、接枝共聚及酯化。

### 1.1 改性桦树片材纤维素絮凝剂

Sirvio 等<sup>[1]</sup>把干燥的漂白桦树片材所得的纸浆作为纤维素来源,利用高碘酸法将其制备成阳离子化二醛纤维素 DAC,取 0.2 g 非干燥的 DAC 于 100ml 烧瓶内,加入 20 ml 去离子水以及是醛摩尔量的 7.8、3.9 或 1.95 倍的 GT 试剂(吉拉尔特试剂 T)。用稀盐酸将 pH 调至 4.5,将混合物在 20~80℃ 搅拌 0.5 至 96 h。冷却至室温后,加入 150 ml 异丙醇以沉淀水溶性产品后再离心去除上清液,去除的 GT 通过加入硝酸银来监视,最终得到阳离子化产物 CDAC。实验以 CPAM 这一广为使用的商业絮凝剂作为对照,测定出 CDAC 的最大絮凝率高达 85%。又将阳离子化程度不同的 CDAC 加入 GCC 悬浮液(固体含量为 1%),得出阳离子化程度越高其相应的絮凝能力越高的结论,并在由高度氧化的纤维素在室温下反应 72 h 后得到 4.27 mmol/g 的最大阳离子化的 CDAC。

### 1.2 改性甘蔗纤维素絮凝剂

杨联敏等<sup>[2]</sup>采用甘蔗渣细粉为纤维素来源,与碱反应,再分别与丙烯酰胺、乙二胺、EDTA 二甲基二烯丙基氯化铵进行接枝共聚反应,然后在碱性条件下与二硫化碳作用得四种兼具氮、硫元素的绿色改性蔗渣纤维素絮凝剂-MFCS-1~MFCS-4,而由乙二胺和 EDTA 制得的改性蔗渣纤维素水处理剂 MFCS2-2 和 MFCS2-3 综合了氮、硫与金属离子较强的配位整合能力与重金属离子反应形成稳定的螯合物,具有很强的吸附重金属离子的能力。该类水处理剂对重金属离子有良好的吸附作用,对电镀废水中的重金属离子脱除率可达 95% 以上,且 MFCS 用 10% 氨水解吸附后可重复使用,利用率较高。

### 1.3 改性玉米芯粉絮凝剂

孙丹等<sup>[3]</sup>以玉米芯粉为原材料,用自制的阳离子醚化剂对其进行阳离子化改性以制备高分子改性絮凝剂。红外光谱扫描图谱显示其产物是含有季胺基团的胺基化纤维素和淀粉。用其絮凝沉淀处理

船舶压载水中微藻。实验证明,用量为 50 mg/L,作用 48 h 后其对新月菱形藻的去除率达到 59%,作用 72 h 后对小球藻达到同样效果。而由陈捷等<sup>[4]</sup>制成的改性阳离子型玉米芯絮凝剂 DSL 絮凝效果远高于聚丙烯酰胺,被证明可广泛用于城市污水、工业废水和地下水处理中。

### 1.4 改性秸秆纤维素絮凝剂

杨晓霞等<sup>[5]</sup>以秸秆为主要原料,先采用氢氧化钠水溶液进行碱化,再以氯乙酸为改性剂,通过醚化反应对秸秆进行羧甲基化改性,再与无机铝盐进行复合,制得一种基于铝盐的新型无机/有机复合絮凝剂材料。该絮凝剂对高岭土模拟污水以及实际的市政污水均有较好的混凝效果。而叶健与于淑萍<sup>[6]</sup>以废弃秸秆为原料,在 NaOH 催化条件下,与阳离子醚化剂环氧丙基三甲基氯化铵(CTA)反应,制备了一种阳离子絮凝剂材料。通过正交试验,考察了各种变量元素,发现在 pH 为 10 条件下,絮凝效果最佳。

叶健等还尝试利用微波催化方法制备上述阳离子秸秆絮凝剂材料,并深入探讨了微波合成絮凝剂的工艺条件,与在其它合成方法相比,微波法具有合成时间短,效率高的特点,对污水具有很好的絮凝效果。陆静超等<sup>[7]</sup>用碱液预处理秸秆后,将其发酵液作为产絮菌的底物,利用两段式发酵法生产生物絮凝剂,60 h 后絮凝率达 90%,证明了将其作为廉价生物碳源制取絮凝剂的可行性。相对于碱性条件,酸性在水解秸秆纤维素方面并无优势,需要更高的温度及压力条件。故 Herrera 等<sup>[8]</sup>研究了不同浓度的盐酸(2%~6%)以及反应时间对高粱秸秆水解的影响,以求最合适的条件。得到最优化条件为:100 h 在 6% HCl 中反应 83 min,滤液中各种物质的浓度分别为:木糖 234 g/L,葡萄糖 47 g/L,糖醛 8 g/L,乙酸 28 g/L。

蒋文新等<sup>[9]</sup>以稻壳为原料,经过预处理,与阳离子醚化剂十八烷基三甲基氯化铵反应,所得絮凝剂可用于处理生活废水和脱墨废水,当 pH=6 时,经它处理的废水的浊度去除率可分别达到 98.8% 和 99.7%,且有沉速快,絮状体大的特点。

## 2 生物蛋白质絮凝剂

除却纤维素,蛋白质也可作为絮凝剂的原料。之前就有报道称母鸡白蛋白和牛奶酪经甲基或乙基醇酯化后对硅藻土悬浮液具有较好絮凝效果。

Fraenkel-Conrat 等<sup>[10]</sup>曾报道过大豆甲基化的方法。Seki 等<sup>[11]</sup>则考虑到大豆蛋白质丰富,就尝试使用甲基化大豆 MESP 作为絮凝剂,加入硅藻土悬浮液中,用杯罐试验方法和沉降平衡法来表征硅藻土絮凝行为,通过上清液清晰度和絮体沉降速度与聚合氯化铝对比来检验甲基化大豆的絮凝能力。实验证明 MESP 絮凝能力较聚合氯化铝更强,且在 pH 为 3~10 内都具有较高的絮凝能力。Krentz 等<sup>[12]</sup>阳离子化了土豆、小麦还有玉米淀粉作为絮凝剂,以高岭土悬浮液为检验试剂,测得阳离子化土豆的絮凝能力可媲美聚丙烯酰胺,在 20 min 内可使悬浮液浊度降至 1%~2%。

### 3 微生物絮凝剂

微生物絮凝剂是生物质絮凝剂中最的一类,研究与应用也最为广泛。它的产生始于 20 世纪 50 年代,日本学者首先发现微生物培养液具有絮凝作用。1976 年后掀起研究微生物絮凝剂的热潮。其主要是菌细胞外分泌的高分子有机物,象糖蛋白、纤维素和 DNA 等,机理与前述的纤维素、蛋白质絮凝剂类似,成为絮凝剂产生菌。还有的是直接利用微生物的细胞外壁或细胞提取物,这些微生物普遍存在于土壤和活性污泥中。目前,在制备微生物絮凝剂时,纤维素等就多被研究作为培养微生物的底物中的优良碳源或是作为复合物与微生物共同作用提高絮凝效果,而不再是生物质絮凝剂的主原料。下面就几种比较特殊的微生物絮凝剂进行介绍。

#### 3.1 微藻絮凝剂

Yim 等<sup>[13]</sup>从海洋赤潮微藻 *G. impudicum* 中分离出微株藻 KG03(一种酸性杂多糖),制备出絮凝剂 p-KG03。利用了流体方程从流动剪切力层面研究了不同盐度、温度和 pH 对它絮凝活性的影响。分析得在 0.5~2.5 mg/L 段 p-KG03 都具有对高岭土悬浮液高达 90% 的絮凝率,且在浓度较低时絮凝能力更强。Kim 等<sup>[14]</sup>根据浊度去除效率(TRE)选取了六种微藻,并用粘土浑浊水和浑浊的现场样品测试性能,基于粘土颗粒对微藻细胞的粘附而完成的浊度去除在此利用 SEM 观察法得到证明。他们还研究了海藻浓度的影响,并用自然浊水作对比。结果 *Phormidium parhydematicum* 具有更高的水处理能力,因为粘土颗粒对它的粘附能力更强,而且它更能适应在高浊度水中的生

存。微藻絮凝剂不仅能用来预处理饮用水,还能被运用在富营养化水体中控制水华。

#### 3.2 土壤微生物絮凝剂

土壤微生物的种类较为全面,基本涵盖前述两种微生物絮凝剂。Zheng 等<sup>[15]</sup>利用从土壤中分离出的 *Bacillus sp* 及其产生的絮凝剂 MBFF19,并探究了 pH、碳源对其絮凝的影响。相较于其它产生菌 P2, P4, 其絮凝不需要离子化物的辅助。这使得生产成本大大降低。Gao 等<sup>[16]</sup>利用菲律宾哈仔粘土中分离出的絮凝剂产生菌 ZHT4-13, 当初始 pH 为 9, 温度为 20 °C 时, 由 ZHT4-13 产生的 MBF4-13 对 5 g/L 的高岭土有 86.22% 的絮凝率。它能够处理染料废水和重金属废水并提高活性污泥特性。Gong 等<sup>[17]</sup>将从土壤中分离出的,被鉴定为 *Serratia ficaria* 的微生物絮凝剂产生菌 S-14 进行培养。并对其培养条件和组成进行分析,且证明其对啤酒废水、酱油酿造废水和肉类加工废水均具有较高的絮凝能力。胞外生物高聚物絮凝剂产生菌如曲霉属 JS-42<sup>[18]</sup>, 杆状菌属 DP-152, *Enterobacter sp1* 和 *A. caligenes latus B-16*<sup>[19]</sup>均是从土壤中分离出的。何宁等<sup>[20]</sup>从土壤中分离出絮凝剂产生菌,初步确定为 *Nocardia sp*, 它能以廉价原料蔗糖为碳源生产出絮凝能力较强的生物絮凝剂。实验用有机溶剂沉淀结合柱层析法从 *Nocardia sp. CCTCC M201005* 的发酵液中提取到一种以半乳糖醛酸为主要结构单元的蛋白聚糖类新型生物絮凝剂 REA-11。其不仅有絮凝能力,还有较好的脱色能力,且较为稳定。

Zhang 等<sup>[21]</sup>从中国黄海之滨的海岸土壤样品中分离出,可以生长在高浓度(高达 7%)的 NaCl 中的海洋粘细菌菌株 NU-2,其主要成分为多糖以及蛋白质,可应用于废料工业废水处理。根据形态学特性和 16S rDNA 序列分析表明,菌株是 *Nannocystis* 属的一个新种。由其制备的絮凝 NU-2 絮凝剂的活性强烈地依赖于阳离子,絮凝剂产生了絮凝活性高值 90%,仍然维持在一个广泛的 pH 范围内(2.0~13.0)。之前粘细菌已被证明是一个丰富来源新的抗生素,但没有粘细菌菌株能够产生絮凝物质,然而该粘细菌存在于海洋环境证明了 16S rDNA 序列的系统发育分析,微生物絮凝剂制备 NU-2 属于一次重大的突破。

#### 3.3 活性污泥微生物絮凝剂

黄质菌属 110<sup>[22]</sup>, 菌胶团 MP6<sup>[23]</sup>, 菌胶团

ramigera<sup>[24]</sup>, 假单胞菌 C-120<sup>[25]</sup>, 诺卡氏菌属 amarae YK1<sup>[26]</sup> 和 Kluyveromyces cryocrescens KA-103<sup>[27]</sup> 都是从活性污泥中分离出来的絮凝剂产生菌。王丽丽等<sup>[28]</sup> 从成都市某污水处理厂二沉池活性污泥中分离获得 2 株酵母菌, 将之混合而成复合型絮凝剂产生菌 HJ4。将其放入制酒废水废水中培养以判断其生长条件并检验能否实现变废为宝。在将之加入实验用高岭土悬浮液的基础上还加入印染废水中测定浊度色度的改变, 以期其实用性。最终, 浊度和色度的去除率分别为 88.72% 和 91.80%, COD 去除率虽然较低, 但也达到了 52.14%。这说明以制酒废水作为替代培养基制取复合型生物絮凝剂 MFHJ4 不仅可以降低生产成本, 而且具有较好的絮凝性能, 实现了以废制废的目的。韩怀芬等<sup>[29]</sup> 从活性污泥中分离纯化出一种兼性厌氧固氮化能异养菌, 对其进行驯化后分析它对造纸、印染水的絮凝效果并由此得出该种菌的最佳培养条件。其间, 充分利用了固氮菌的功效, 将空气中的氮气还原为氨, 节约了成本, 还为微生物生长提供了良好的氮源。

#### 4 结论

目前的生物质絮凝剂以微生物絮凝剂和纤维素絮凝剂居多, 其分离及培养简单, 成本较低, 节能高效, 机理已基本确定, 很多人还在寻求成本更低的培养方式, 如啤酒废水等。而由秸秆、甘蔗等农作物废弃物制成的絮凝剂, 将其变废为宝, 以废治废, 更是可持续循环发展的需要。但是目前普遍的利用率偏低, 纤维素类絮凝剂的絮凝针对物太过单一。可以考虑嫁接别的功能基因或是研究复合型生物絮凝剂来提升絮凝剂的功效及全面性。同时, 目前还鲜少有类似桦树等的植物型生物絮凝剂和蛋白质絮凝剂, 酯类絮凝剂更是仅仅只有一种, 这值得进一步搜寻研究。同时, 市面上大量使用的还是无机或有机絮凝剂, 绿色的生物质絮凝剂的批量生产、广泛使用及絮凝效果值得更进一步的努力。

#### 参考文献

[1] Sirvio J, Honka A, Liimatainen H, et al. Synthesis of highly cationic water-soluble cellulose derivative and its potential as novel biopolymeric flocculation agent [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(1): 266~270.

[2] 杨联敏, 陈文纳. 改性蔗渣纤维素水处理剂的合成及吸附性能研究[J]. 广西师范学院学报: 自然科学版, 2008, 25(3): 73~77.

[3] 孙丹, 丁永生, 公维民, 庞艳华, 王俊. 高分子改性絮凝剂在船舶压载水有害生物治理中的应用[J]. 大连海事大学学报: 自然科学版, 2007, 6: 1~4.

[4] 陈捷, 丁永生, 曲有杰, 等. 天然高分子改性阳离子絮凝剂的絮凝性能和应用研究[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2005, 32(3): 47~50.

[5] 杨晓霞, 周启星, 华涛, 王铁良. 改性秸秆-铝盐复合絮凝剂的制作与应用[J]. 环境工程学报, 2008, 2(10): 1317~1321.

[6] 叶健, 于淑萍. 秸秆制备絮凝剂的研究[J]. 皮革化工, 2006, 23(5): 42~44.

[7] 陆静超, 严灵均, 李大鹏, 马放, 魏利, 姜振寰. 秸秆资源化制取生物絮凝剂[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(1): 161~164.

[8] Herrera A, Tellez-Luis SJ, Gonzalez-Cabrales JJ. Effect of the hydrochloric acid concentration on the hydrolysis of sorghum straw at atmospheric pressure [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(1): 103~109.

[9] 蒋文新, 张天胜, 张洁, 等. 天然改性阳离子絮凝剂的制备及其应用研究[J]. 工业水处理, 2005, 25(6): 43~46.

[10] Fraenkel-Conrat H, Olcott HS. Esterification of proteins with alcohols of low molecular weight [J]. Journal of Biological Chemistry, 1945, 161: 259~268.

[11] Seki H, Mañuyama H, Shoji Y. Flocculation of diatomite by a soy protein-based bioflocculant [J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 51: 14~18.

[12] Krentz DO, Lohmann C, Schwarz S, et al. Properties and flocculation efficiency of highly cationized starch derivatives [J]. Starch-stärke, 2006, 58(3-4): 161~169.

[13] Yim JH, Kim SJ, Ahn SH, et al. Characterization of a novel bioflocculant, p-KG03, from a marine dinoflagellate, Gyrodinium impudicum KG03 [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(2): 361~367.

[14] Kim CJ, Jung YH, Ahn CY, et al. Adsorption of turbid materials by the cyanobacterium Phormidium parchydematicum [J]. Journal of Applied Phycology, 2012, 22(2): 181~186.

[15] Zheng Y, Ye ZL, Fang XL, et al. Production and characteristics of a bioflocculant produced by Bacillus sp. F19 [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(16): 7686~7691.

[16] Gao Q, Zhu XH, Mu J, et al. Using Ruditaes philippinarum conglutination mud to produce bioflocculant and its applications in wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(21): 4996~5001.

[17] Gong WX, Wang SG, Sun XF, et al. Bioflocculant production by culture of Serratia ficaria and its application in wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 4668~4674.

[18] Nam JS, Kwon GS, Lee SO, et al. Bioflocculant produced by Aspergillus sp. JS-42 [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 1996, 60: 325~327.

[19] Kurane R, Nohata Y. A new water absorbing polysaccharide from Alcaligenes latus [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 1994, 58: 235~238.

与健康,2010,27(9):794-796.

[26]李和生,洪瑛颖,李道超.壳聚糖对锌离子和铜离子的吸附特性与比较研究[J].食品科技,2007,32(7):154-157.

[27]李增新,王国明,王彤,等.沸石-壳聚糖吸附剂吸附废水中的Ni<sup>2+</sup>[J].化工环保,2009,29(1):5-9.

[28]汪婷,谢宇,赵杰等.羟丙基壳聚糖纳米微粒的制备及其对Ni<sup>2+</sup>的吸附研究[J].环境污染与防治,2011,33(10):19-23.

[28]王浩,李永胜,简放陵等.不同处理剂对电镀废水重金属去除效果的研究[J].广东农业科学,2011,(2):161-168.

[29]罗道成,沈恒冠,安静.改性聚丙烯腈纤维处理电镀废水研究[J].水处理技术,2012,38(6):54-56.

[30]曾明敏,秦玉芳.一种高吸水树脂对电镀废水中铜离子的吸附研究[J].化学试剂,2012,34(5):460-462.

[31]舒文勃,杨娜娜,杜敏娟,李琛.天然植物材料处理电镀废水的研究现状[J].电镀与环保,2011,31(2):1-4.

[32]唐志华,刘军海.改性花生壳捕集废水中重金属离子研究[J].粮油加工,2009,(7):144-146.

[33]付瑞娟,薛文平,马春,等.花生壳活性炭对溶液中Cu<sup>2+</sup>和Ni<sup>2+</sup>的吸附性能[J].大连工业大学学报,2009,28(3):200-203.

[34]周隽,翟建平,吕慧峰,等.木屑和花生壳吸附去除水溶液中Cr<sup>3+</sup>的试验研究[J].环境污染治理技术与设备,2006,7(1):122-

125.

[35]谭婷,许秀成,杨晨等.胺基稻草纤维的制备及对电镀废水中Fe<sup>3+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>的吸附[J].现代化工,2011,31(6):45-47.

[36]骆巧琦,陈长平,梁君荣,等.利用藻类去除电镀废水中重金属的实验研究[J].厦门大学学报(自然科学版),2006,45(z1):277-280.

[37]王风贺,王国祥,王志良,等.重金属捕集剂XMT处理电镀废水中Cu<sup>2+</sup>的试验研究[J].水处理技术,2011,37(10):100-102.

[38]白滢,常青.高分子重金属絮凝剂PEX处理电镀废水研究[J].中国给水排水,2006,22(19):53-55.

[39]修莎,周勤,黄志勇.重金属捕集剂XL9对含铜电镀废水处理效果的研究[J].环境工程学报,2009,3(10):1812-1815.

[40]李琛.人工湿地处理电镀废水研究进展[J].电镀与环保,2011,31(3):4-6.

[41]陈明利,张艳丽,吴晓芙,等.人工湿地植物处理含重金属生活废水的实验研究[J].环境科学与技术,2008,31(12):164-168.

[42]孙和和.人工湿地处理电镀废水的净化效果与应用研究[D].杭州:浙江师范大学,2008.

[43]李星,刘鹏,徐根娣,等.人工湿地植物对电镀废水的净化和修复效果研究[J].浙江林业科技,2008,28(4):16-21.

(上接第5页)

[28]郑景华,董慧曦,王丽华.制革废水处理中粉煤灰改性条件的实验研究[J].水资源与水工程学报,2011,22(3):144-146.

[29]段海霞,万新国,曲家惠.改性粉煤灰去除硝基苯废水的研究[J].工业安全与环保,2009,35(6):25-26.

[30]曹书琴,刘德丞,张平,等.芬顿-粉煤灰协同处理有机实验废水的实验研究[J].非金属矿,2011,34(4):59-61.

[31]白玉洁,张爱丽,周集体.粉煤灰吸附-Fenton及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究[J].环境科学,2012,33(7):2419-2426.

[32]路达,马艳然,李占臣.粉煤灰和芬顿试剂协同处理印染废水的实验研究[J].河北化工,2006,5:52-54.

[33]付广龙,许兴友,费银华.芬顿试剂和粉煤灰沸石协同处理柠檬酸废水的试验研究[J].中国矿业,2007,12:59-61.

[34]王铮,李凤亭,吴胜举,等.Fenton试剂-改性粉煤灰处理苯酚废水的研究[J].无机盐工业,2011,43(3):50-53.

[35]宋凤敏.改性粉煤灰与过氧化氢联合作用深度处理皂素生产废水的研究[J].环境污染与防治,2011,33(9):38-41.

[36]何文丽,桂和荣,苑志华等.改性粉煤灰联合高铁酸钾处理造纸废水的试验研究[J].环境科学与技术,2010,33(5):154-158.

[37]陈英,谢文玉,潘向君.改性粉煤灰吸附-高级氧化法处理奥里油废水[J].化工环保,2008,28(5):437-442.

(上接第14页)

[20]何宁,李寅,陈坚.蛋白聚糖类生物絮凝剂 REA-11 的发酵和絮凝条件[J].过程工程学报,2002,2(1):62-66.

[21]Zhang J,Liu Z, Wang S, et al.Characterization of a bioflocculant produced by the marine myxobacterium Nannocystis sp.NU-2 [J]. Applied Microbiology and Biotechnology,2002,59(4-5):517-522.

[22]Endo T,Nakamura K , Takahashi H . Pronase susceptible floc-forming bacteria: relationship between flocculation and calciumion [J].Agricultural and Biological Chemistry,1976,40:2289-2295.

[23]Farrar SR, Unz RF. Isolation of exocellular polymer from Zoogloea M P6 and 106 form activated sludge [J]. Applied Environmental Microbiology, 1976,32:33-37.

[24]Tezuka Y.A Zoogloea bacterium with gelatinous ucopolysaccharide matrix [J].Journal of the Water Pollution Control Federation, 1973, 45:

531-536.

[25]Sakka K,Endo T,Watanabe M,et al.Deoxyribonuclease susceptible floc-forming pseudomonas sn[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1981,45:497-504.

[26]Takeda M , Koizumi J, Matsuoka Hs, Hikuma M . Factors affecting the activity of a protein bioflocculant produced by Nocardiaamarae[J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1992, 47: 408-409.

[27]Kakii K, Hasumi M, Shirakashi T, Kmiyama M .Involvement of Ca<sup>2+</sup> in the flocculation of Kluyver cryocrescens KA-103[J].Journal of Fermentation and Bioengineering,1990,69: 224-227.

[28]王丽丽,王向东,田哲.复合型生物絮凝剂 MFHJ4 的制备及其对印染废水絮凝性能的研究[J].水处理技术,2010,36(6):100-103.

[29]韩怀芬,王锐刚,金漫彤.微生物絮凝剂产生菌的筛选和应用[J].能源环境保护,2003,17(6):28-30.