

综述与专论

电镀重金属废水处理技术的研究进展

唐学芳, 罗雪梅

(四川省自然资源科学研究院, 四川 成都 610015)

摘要: 电镀废水成分复杂, 含有铬、铜、锌、镉、镍等多种重金属, 处理难度较大。介绍了当前电镀废水处理技术及新进展, 分析了各方法的优缺点, 并对发展趋势进行展望。

关键词: 废水处理; 电镀; 重金属离子

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2014)04-0006-05

RESEARCH PROGRESS ON TREATMENT TECHNOLOGY OF ELECTROPLATING HEAVY METAL WASTEWATER

TANG Xue-fang, LUO Xue-mei

(Sichuan Academy of Natural Resource Sciences, Chengdu, 610015, China)

Abstract: The electroplating wastewater has complicated composition, which contains various heavy metal ions, such as Cr, Cu, Zn, Cd, Ni, and is badly treatable. This paper introduces the treatment technology and new development in heavy metal wastewater of electroplating, the advantages and disadvantages of the various methods are analyzed, the article gives an outlook for its future.

Key Words: Wastewater treatment; Electroplating; Heavy metal ions

电镀废水处理是一种难以彻底治理且成分复杂的混合重金属废水处理, 常含有铬、铜、锌、镉、镍等重金属污染物, 毒性较大, 有些属于致癌、致畸、致突变的剧毒物质, 被列为当今全球三大污染工业之一^[1-3]。目前电镀废水的处理方法主要有化学法、电解法、膜分离技术、离子交换法、吸附法、微生物法、絮凝法等, 此外, 还有一些新型方法, 如人工湿地法、金属捕集剂法、壳聚糖螯合吸附法、高压脉冲电絮凝法、微电解法等。为了实现经济-社会-环境的协调发展, 在电镀废水总量控制和达标排放的基础上, 需要进行技术创新, 实现电镀废水中重金属资源化利用。本文对各种处理技术进行了较为详细的分析, 并分析了各方法的优缺点, 对电镀废水处理技术发展趋势进行展望。

1 电镀废水处理方法

1.1 化学法

目前, 电镀废水有 80% 采用化学处理法, 是目前国内外应用最广泛的电镀废水处理方法, 化学法是借氧化还原反应或中和沉淀反应将有毒有害的物质分解为无毒、无害的物质或将重金属经沉淀和上浮法从废水中除去。具有投资少、成立成本低、操作简单、技术上较为成熟等优点, 能承受大水量和高含量负荷冲击, 可适用各类电镀废水治理, 但化学法需要不断消耗化工原料, 并有污泥产生, 排出的水回用困难, 且占地面积较大。

1.1.1 化学沉淀法

该法是一种较为成熟实用的电镀废水处理技术, 处理成本低, 但是沉淀物的分离以及污泥的二次污染不容忽视^[4]。对于大型电镀工业园产生的综合电镀废水, 可采用酸化-氧化破络反应及氢氧化物和硫化物共沉淀的处理方法^[5], 孟勇用反相乳液

收稿日期: 2013-07-11

基金项目: 四川省公益性科研院所基本科研业务专项资金

第一作者简介: 唐学芳(1981-), 女, 助理研究员, 研究方向为环境污染与治理。

聚合合法合成的丙烯酰胺(AM)-丙烯酸(AA)-丙烯羟肟酸(AHA)共聚物乳液去除电镀废水中重金属离子^[6]。刘存海确定了硫酸铝钾、PAC、PFS及CPAM四种絮凝剂按50:35:28:3复配为复合絮凝剂,并将其应用在处理含铬、镍混合废水,处理后的废水符合国家允许的排放标准,可作为电镀车间的循环用水^[7]。邹敏敏通过实验研究确定了用硫酸亚铁二次反应和二次过滤的方法处理含铬废水和含铜、镍废水的最佳工艺条件,并且研究了其混合后的综合废水处理^[8]。陈梦君对比研究了中和沉淀法、硫化物沉淀法、Fenton-沉淀法、常温铁氧体法对电镀废水中Cu、Cr和Ni的去除效果。结果表明,在一定条件下,铁氧体-硫化物沉淀法联合处理效果最好,达到《电镀污染物排放标准》(GB 21900-2008)的排放标准^[9]。

1.1.2 化学还原法

化学还原法在电镀废水治理中最典型的是对含铬废水的治理,其方法就是在废水中加入还原剂 FeSO_4 、 NaHSO_3 、 Na_2SO_3 、 SO_2 或铁粉等使 Cr^{6+} 还原成 Cr^{3+} ,然后再加入 NaOH 或石灰乳沉淀分离。其中亚硫酸盐法处理量大,综合利用方便,在国内外应用最广。氧化还原法原理简单,操作易于掌握,对某些类型的电镀废水是行之有效的,但是其出水水质差,不能回用,处理混合废水时,易造成二次污染,而且通用氧化剂还有供货和毒性的问题尚待解决^[1]。

1.2 蒸发浓缩法

蒸发浓缩回收,是一种对重金属电镀废水进行蒸发,使溶液浓缩,并加以回收和利用的一种处理方法,一般用于处理含铬、铜、银及镍离子废水。蒸发浓缩法处理电镀重金属废水,工艺成熟简单,不需化学试剂,无二次污染,回用水或有价值的重金属,有良好的环境效益和经济效益;但因能耗大,操作费用高仅作为一种辅助处理手段^[10]。

1.3 电解法

电解法是利用电解作用处理或回收重金属,也有利用电解产生的金属氢氧化物的凝聚作用,一般应用于浓度较高或单一的电镀废水。该法处理效率高,能够同时除去多种金属离子,具有净化效果好,泥渣量少,占地面积小,噪声小等优点,但缺点是不适用于处理含较低浓度的金属废水,并且电耗大,成本高,浓度较高的含铜或镍的废液经电解后,铜、镍含量仍超过排放标准,无法直接排放^[1]。

朱小梅采用高压脉冲电絮凝法处理电镀废水,在最优条件下,处理后的废水 $\text{pH}=8.3$,总铬、 Cr^{6+} 、 Zn^{2+} 含量均达到国家规定的排放标准水平,该法运行方便,处理时间短、与直流电絮凝法相比能量效率高^[11]。张志军研究了铝炭微电解对含铜、镍电镀废水的处理效果,与铁炭微电解相比,其最佳反应时间由30 min减少到15 min; Cu^{2+} 去除率由95%提高到98%, Ni^{2+} 去除率由94%提高到97%,此项研究为铝炭微电解处理电镀废水的实际应用奠定了基础^[12]。

1.4 离子交换法

离子交换法是利用离子交换剂分离废水中有害物质的方法,含重金属废水通过交换剂时,交换剂上的离子同水中的金属离子进行交换,达到去除水中金属离子的目的。王德全利用一种新型无机离子交换树脂的高选择性,通过一系列条件及处理工艺,处理后可实现70%废水循环利用,同时回收各种贵金属,且它们有较高的纯度,达95%以上^[13]。离子交换法操作简单,残渣稳定,无二次污染,但由于离子交换剂选择性强,制造复杂,成本高,再生剂耗量大,工艺操作较复杂,不便于管理控制。因此,离子交换法作为辅助处理方法应用较多,直接处理废水的并不多^[14]。

1.5 离子浮选法

离子浮选法是利用表面活性剂物质在气-液界面上所产生的吸附现象,使离子与表面活性剂形成不溶的沉淀物,并附着在气泡上实现浮选分离。离子浮选法具有萃取法和离子交换法的优点,就动力学特性而言,离子浮选法处于液体萃取法的水平,就有机物的损失量来说,它接近于离子交换法水平^[15]。戴文灿进行离子浮选法处理电镀废水的研究,离子分离选择性递减顺序为: $\text{Cd}^{2+}>\text{Zn}^{2+}>\text{Fe}^{2+}>\text{Cu}^{2+}>\text{Ni}^{2+}$,当 $\text{CA}:\text{CMe}$ 为2.5~3:1, pH 为8.5~9,离子强度不高于0.0001 mol/L时,离子浮选对镉、锌、铜、镍等金属离子均有很高的去除率,处理后的电镀废水各污染物浓度均达到排放标准^[16]。

1.6 膜系统处理法

膜分离法是利用高分子所具有的选择性进行物质分离的技术,包括电渗析、反渗透、膜萃取等。利用膜分离技术一方面可以回收利用电镀原料,大大降低成本,另一方面可以实现电镀废水的高回收率和回用,电镀废水零排放或微排放,具有很好的经济和环境效益^[17-18]。

采用全膜法对综合废水和络合废水进行处理,能达到非常好的处理效果,排放水能稳定达标排放,中水回用率也能达到较高的水平,解决目前常规中水回用处理工艺普遍存在的回用率低、处理费用较高、投资成本高、处理出水不稳定、管理操作复杂等问题^[19]。用膜系统处理二级排放电镀废水,膜系统去除二价及以上重金属离子常有效,运用膜系统处理二级排放电镀废水可产生显著的经济与环境效益^[20]。

1.7 生化法

电镀废水的生化处理过程主要是利用微生物或微生物产生的代谢物进行絮凝沉淀的一种除污方法。一般由多糖、蛋白质、DNA、纤维素、糖蛋白、聚氨基酸等高分子物质构成,分子中含有多种官能团,能使水中胶体悬浮物相互凝聚沉淀。目前,对重金属有絮凝作用的约有十几个品种,生物絮凝剂中的氨基和羟基可与 Cu^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Ag^{+} 、 Au^{2+} 等重金属离子形成稳定的螯合物而沉淀下来,固定化菌对 Cd 和 Cr 的去除效果明显优于游离菌,从重金属污染物中筛选出的混合菌种进行重金属离子的去除,效果良好^[21]。微生物絮凝法处理废水具有安全方便、易于实现工业化等特点,具有广泛应用前景^[22,23]。

1.8 壳聚糖及其衍生物吸附法

壳聚糖是一种来源广泛、无毒、易降解的天然碱性高分子多糖,它是由海洋生物中甲壳动物提取的甲壳素经过脱乙酰基处理得到的,资源丰富,提取工艺操作简单,成本低。壳聚糖分子中含有大量游离 $-\text{NH}_2$, $-\text{NH}_2$ 邻位是 $-\text{OH}$, 这两个基团可以成为壳聚糖与金属离子发生螯合吸附作用的活性基,电镀废水中常含有 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 及 Cd^{2+} 等金属离子,故壳聚糖及其衍生物能够作为金属离子的富集剂或吸附剂,有效地去除电镀废水中的重金属离子^[24]。此外,壳聚糖可以完全被生物降解,不造成二次污染。近年来国内外对壳聚糖作为吸附处理剂的研究和应用取得了很大进展,壳聚糖及其衍生物未来的研究方向是通过进行适当改性或复合,合成机械性能、吸附性能均优良的壳聚糖吸附剂,同时深入研究其对复杂的工业废水的处理能力。壳聚糖及其衍生物系列产品进一步功能化、系列化之后,将在电镀废水处理方面具有更加广泛的应用前景^[25-27]。汪婷通过在碱性条件下将羟丙基引入到壳聚糖分子上,再利用离子凝胶法制备羟

丙基壳聚糖(HCS)纳米微粒,粒径小的 HCS 纳米微粒对 Ni^{2+} 的吸附容量要大于粒径大的吸附容量,HCS 取代度越高,则对 Ni^{2+} 吸附容量就越大,吸附能力越强^[28]。

1.9 吸附法

吸附法是利用吸附剂的独特结构去除重金属离子的一种方法。传统吸附剂有活性炭、腐殖酸、聚糖树脂、矽藻土等。王浩用粉煤灰、煤渣、膨润土、沸石 4 种处理剂分别对电镀废水进行吸附处理,结果表明,沸石对 Cu^{2+} 的去除效果最好,平均去除率达 97.35%;膨润土对 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的去除效果最好,平均去除率分别达到 100% 和 93.6%。沸石、粉煤灰、煤渣对 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 的去除效果都分别优于对 Ni^{2+} 的处理效果。用粉煤灰代替膨润土处理 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} ,能降低 80% 的成本。吸附法不同程度地存在投资大、运行费用高、污泥产生量大等问题,处理后的水难于达标排放^[28]。

新型高效廉价的吸附材料在电镀废水处理中的应用也屡见报道,改性 PAN 纤维在一定条件下处理电镀废水效果很好,其再生利用率高,可重复利用^[29]。以废弃聚乙烯(PE)塑料与具有亲水性基团的丙烯酸(AA)及其盐接枝共聚成一种高吸水性树脂,并将所得高吸水树脂用于溶液中 Cu^{2+} 的吸附,印制电路板生产中的含铜废水在经过一级处理后,采用合成树脂进行二次吸附,可使溶液中 Cu^{2+} 的残余浓度低于国家污水综合排放标准中的最高允许排放质量浓度^[30]。

利用天然植物材料通过吸附、降解、絮凝及沉降等过程有效地去除电镀废水中的多种金属离子的方法操作简单可靠,投资少,运行成本较低,化废为宝达到以废制废的目的,具有良好的经济效益和环境效益^[31]。改性花生壳^[32,33]、木屑^[34]、稻草^[35]、藻类^[36]、玉米芯、玉米茎秆、树皮、树叶、蔗渣木髓等天然植物材料具有很大的比表面积,经絮凝、沉淀能够有效地吸附废水悬浮性物质、有机物和重金属。

1.10 重金属捕集剂法

重金属捕集剂是一种水溶性的、能与多种重金属离子形成稳定不溶物的螯合物。王风贺以 XMT 作为重金属离子捕集剂,进行了电镀废水 Cu^{2+} 的捕集研究,探讨了 XMT 加入量、pH、絮凝剂加入量及反应时间等因素对 Cu^{2+} 捕集效率的影响,结果显示 Cu^{2+} 去除率在 99% 以上,残余 Cu^{2+} 质

量浓度小于 0.05 mg/L,出水满足排放要求^[37]。高分子重金属絮凝剂 PEX 和含有二硫代氨基甲酸盐的重金属捕集剂 XL9 对含铜电镀废水处理表明,均有较好的处理效果,处理水达到国家排放标准^[38-39]。

1.11 人工湿地法

近年,利用人工湿地处理电镀废水在一些电镀车间的废水处理中得到应用^[40]。湿地植物的根和茎叶能够吸收、富集及降解电镀废水中 Cr、Zn、Fe、Mn、Ni 和 Cu 等重金属进而使电镀废水达标排放,人工湿地由于具有很低的投资运行费用、良好的处理效果和显著的生态效益等优点,必将成为电镀废水处理的重要技术,目前我国在利用人工湿地系统处理电镀废水方面的研究尚处于起步阶段^[41-43]。

2 结语与展望

(1) 电镀废水传统处理技术各有利弊,存在成本较高、操作复杂、设备维护难等一项或多项问题。近几年新型处理方法,如金属捕集剂法、壳聚糖及其衍生物螯合吸附法、天然植物材料吸附法、高压脉冲电絮凝法、微电解法等在处理电镀废水方面有长足发展。

(2) 天然植物材料吸附法操作简单可靠,投资少,运行成本较低,具有良好的经济效益和环境效益,发展前景广阔。

(3) 通过优选试剂配比的多元重金属同步共沉淀技术在处理电镀废水方面具有投资少、建设成本低、操作简单、技术较为成熟等优点,能承受水量大和高含量负荷冲击,也是今后处理电镀废水的重点发展方向。

(4) 为实现电镀废水资源化利用,一是积极推行技术创新,依法淘汰落后技术、工艺、设备和产品,推行清洁生产和循环经济,从源头减少废物的产生,根据废水实际情况采用多种方法配合使用,实现由末端治理向污染预防和生产全过程控制转变,努力实现零排放。二是以生态化为目标建设生态工业园区,从提高产业关联度、延伸产业链和加大资源综合利用等方面入手,按照循环经济要求进行规划和建设,对进入园区的电镀企业提出土地、能源、水资源利用及废物排放等综合控制指标要求,加大园内供热、供水、供汽等基础设施集中建设和技术、信息共享平台建设,实现资源的集约利用。

参考文献

- [1] 王文星. 电镀废水处理技术研究现状及趋势[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(5): 43-46.
- [2] 曹从荣. 电镀企业排污达标执行能力分析[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(11): 28-31.
- [3] 廖志民, 朱小红, 杨圣云. 电镀废水处理与资源化回用技术发展现状与趋势[J]. 环境保护, 2008, (20): 71-73.
- [4] 陈文辉. 电镀含铬废水治理技术[J]. 中国环保产业, 1996, (2): 22-23.
- [5] 刘世德, 孙宝盛, 刘景允. 综合电镀废水处理技术的实验研究[J]. 工业水处理, 2010, 30(3): 85-88.
- [6] 孟勇, 苏胜培, 毛丽秋, 等. 丙烯酰胺-丙烯酸-丙烯羟胺共聚物乳液脱除电镀废水中的重金属离子[J]. 化工进展, 2009, 28(11): 2072-2075.
- [7] 刘存海, 韩利萍, 赖小娟. 电镀铬镍混合废水的絮凝处理[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(9): 39-46.
- [8] 邹敏敏, 陈足意, 曾冬铭, 刘中兴. 硫酸亚铁处理电镀废水中重金属离子的研究[J]. 电镀与环保, 2012, 32(3): 49-51.
- [9] 陈梦君, 罗园, 卢喜瑞, 等. 某电镀厂废水重金属去除工艺对比研究[J]. 工业水处理, 2011, 31(3): 64-67.
- [10] 魏子栋. 常压蒸发在电镀中的应用[J]. 电镀与精饰, 1998, 20(4): 31-33.
- [11] 朱小梅, 赵娜, 刘晓星. 高压脉冲电絮凝法处理电镀废水[J]. 河北大学学报, 2007, 27: 94-97.
- [12] 张志军, 陈整生, 胡娟. 铝炭微电解对含铜、镍电镀废水的处理实验研究[J]. 工业水处理, 2012, 32(7): 68-70.
- [13] 王德全, 张永胜, 刘新杰, 邵经峰, 史小阳. 电镀综合废水处理工艺研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 3(6): 144-147.
- [14] 陈文辉. 电镀含铬废水治理技术[J]. 中国环保产业, 1996.
- [15] A·B·拉杜舍夫, 张兴仁, 林森. 用于有色金属离子浮选的药物述评[J]. 国外金属矿选, 2006, 43(6): 4-9, 43.
- [16] 戴文灿, 陈涛, 孙水裕, 刘如意. 离子浮选法处理电镀废水实验研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(6): 1349-1352.
- [17] 王乐译, 李文国, 王炳厚. 膜法处理电镀废水[J]. 水处理技术, 2012, 3(7): 131-132.
- [18] 白心平, 郝文超, 许振良. 电镀废水的纳滤膜处理工艺及案例[J]. 膜科学与技术, 2010, 30(5): 67-70.
- [19] 赵旭雍, 罗青春, 蔡升云. 全膜法处理电镀重金属废水[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(2): 29-31.
- [20] 董佳, 彭丽花, 黄瑞敏. 膜系统处理电镀废水实验研究[J]. 环境工程, 2010, 28(3): 23-25.
- [21] 陈玲娜, 胥丁文, 包樱. 生化法去除电镀废水中重金属离子的研究[J]. 工业水处理, 2010, 30(10): 60-63.
- [22] 曾岭岭, 姚敏杰, 连宾. 深圳市电镀废水微生物处理初步研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2011, 30(3): 345-347.
- [23] 毛雪慧, 徐明芳, 刘辉. 固定化球形红假单胞菌处理电镀废水中 Cd 和 Cr 的研究[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 160-166.
- [24] 党明岩, 郭洪敏, 谭艳坤. 壳聚糖及其衍生物吸附电镀废水中重金属离子的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(7): 9-13.
- [25] 李芳, 丁纯梅. 壳聚糖微粒对水中铜离子吸附性能研究[J]. 环境

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Ni²⁺[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Ni²⁺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Cu²⁺和Ni²⁺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Cr³⁺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Fe³⁺、Ni²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺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Cu²⁺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 Ca²⁺ 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.