

包覆型改性纳米铁去除水中多氯联苯的研究

陈仪霖¹, 张克峰^{1*}, 王 珊¹, 李兴国², 刘 雷¹

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东 济南 250100; 2. 水发集团有限公司, 山东 济南 250100)

摘要:通过海藻酸钠固定化制备海藻酸钠负载纳米铁镍凝胶球(SA-Fe/Ni),用于去除水体中的多氯联苯。考察了 SA-Fe/Ni 质量浓度、初始多氯联苯浓度、初始 pH、反应温度等因素对材料去除多氯联苯的影响,同时探讨了去除反应过程中反应液总铁浓度的变化情况。结果表明,纳米铁镍材料(Fe/Ni)对 4-氯联苯(4-CBP)的去除能力优于 nZVI、Fe/Cu 等材料。经海藻酸钠包覆后,提高了 Fe/Ni 的抗团聚和抗氧化能力,并且易于从反应体系中回收再利用。在最佳条件下,SA-Fe/Ni 对 4-CBP 的去除率达到 93.70%。SA-Fe/Ni 在去除 4-CBP 的过程中,SA 及 Fe/Ni 具有吸附还原协同作用,最终 4-CBP 经连续脱氯被降解为联苯。

关键词:纳米铁;海藻酸钠;多氯联苯;包覆

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)09-0194-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.09.039

Removal of polychlorinated biphenyls from water by coated modified nano iron

CHEN Yi-lin¹, ZHANG Ke-feng^{1*}, WANG Shan¹, LI Xing-guo², LIU Lei¹

(1.School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, China;

2.Shuifa Group Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract:Nano scale iron-nickel bimetallic particles are prepared and fixed with sodium alginate, and nano iron-nickel gel spheres (SA-Fe/Ni) supported by sodium alginate are prepared for removing polychlorinated biphenyls (PCBS) from water. The effects of SA-Fe/Ni dosage, initial concentration of PCBS, initial pH and reaction temperature on the removal of PCBS are observed, and the changes of total iron concentration in the reaction solution during the removal process is also discussed. It is shown that the removal ability of nano iron-nickel materials (Fe/Ni) to 4-chlorinated biphenyls (4-CBP) is superior to that of nZVI and Fe/Cu materials. The anti-agglomeration and anti-oxidation ability of Fe/Ni are improved after coated with sodium alginate, and it is easy to be recycled from the reaction system. The removal rate of 4-CBP by SA-Fe/Ni reaches 93.70% under the optimal conditions. During the process of removing 4-CBP by SA-Fe/Ni, both SA and Fe/Ni have synergistic effect of adsorption reduction, and finally 4-CBP is degraded to biphenyl.

Key words:nano iron; sodium alginate; polychlorinated biphenyls; coating

多氯联苯(PCBs)是工业持久性有机污染物(POPs)的主要代表之一,自 1929 年开始便被广泛用作绝缘油、润滑油以及许多种工业产品的添加剂^[1-2]。多氯联苯具有良好的化学惰性、生物富集性及高度的迁移性,易通过消化和呼吸系统进入人体,最终在人体脏器、肌肉和脂肪中蓄积,引发不可逆的损害^[3-4]。虽然多氯联苯早在 40 年前就已被禁止生产和使用,但早期大量生产和排放的多氯联苯难以被降解,仍然存在于各种环境中,造成严重的污染^[5-6]。目前,多氯联苯在我国许多省份的地下水中仍被较高浓度地检出,其对人体的致病风险依然存在^[7]。

随着人们对水体中多氯联苯污染的逐渐重视,出现了物理吸附、高级氧化、生物降解等多种多氯联

苯的修复方法。其中,活性炭和碳纳米管(CNTs)由于比表面积大、独特的孔隙结构等优势在吸附中备受欢迎^[8-9]。但 CNTs 等只是将水体中的多氯联苯转移而没有降解,还存在解吸后的二次污染等问题。高级氧化法修复多氯联苯污染较为高效、彻底,但其反应条件要求较苛刻、经济性较低^[10]。纳米零价铁(nZVI)作为一种新型环境友好型材料,具有极小的粒径、独特的表面活性、较强的还原性等优点,在污染水体中氯化有机物的脱氯修复方面得到了显著效果^[11-12]。但是 nZVI 很容易团聚且易被氧化,导致其有效活性位点减少,从而限制了其应用。

近年来,有不少学者将纳米铁进行改性,如引入生物炭、壳聚糖等支撑材料^[13-14];投加 PAM、CMC 等表面活性剂^[15-16];与 Pd、Cu 等金属进行结合改性

收稿日期:2022-04-13;修回日期:2022-07-02

作者简介:陈仪霖(1997-),男,硕士研究生,研究方向为水处理理论与技术,chenyilin0220@163.com;张克峰(1964-),男,博士,教授,研究方向为水处理理论与技术,通讯联系人,13553195176@163.com。

等^[17-20]。目前,对氯代有机物去除的相关研究多为Pd改性纳米铁。但是Pd改性成本较高,反应后的Pd难以被回收利用。对此,笔者制备了铁镍双金属纳米颗粒,再用海藻酸钠固定,形成了SA-Fe/Ni凝胶球。改性后的纳米铁具有良好的钝化保护作用,减少了团聚现象,增加了反应活性。同时,考察SA-Fe/Ni投加量、初始4-CBP质量浓度、初始pH以及反应温度等因素对SA-Fe/Ni去除水体中4-氯联苯(4-CBP)的影响。

1 实验材料和方法

1.1 实验试剂和仪器

海藻酸钠(生化级)、4-氯联苯(4-CBP)、七水合硫酸亚铁、硼氢化钾、氯化铜、镍标准液、高纯氮气;无水氯化钙、盐酸羟胺、六水合氯化镍、1,10-菲罗啉、丁二酮肟、碘化钾、柠檬酸铵、氨水等均均为分析纯。

NKCP-C-SO4B 蠕动泵;TG16-WS 高速离心机;恒温水浴振荡器(SHA-CA, 常远恒睿仪器设备制造有限公司生产);JJ-1 机械搅拌器;紫外-可见分光光度计(UV-3200, 上海元析仪器有限公司生产);美国 Thermo 气-质联用仪(Trace1310-TSQ8000EVO)。

1.2 实验方法

1.2.1 Fe/Ni 的制备

首先制备纳米铁颗粒。称取一定量七水合硫酸亚铁溶解于三口烧瓶中,在氮气保护下,经蠕动泵滴入等体积的硼氢化钾溶液,硼氢化钾与七水合硫酸亚铁浓度比为2:1,投加结束后继续搅拌30 min,然后超声处理30 min。反应液离心后用去离子水及无水乙醇洗涤3遍,将制得的纳米铁颗粒保存于乙醇溶液中。

实验制备的纳米铁双金属颗粒中金属负载率均为3%^[21]。取一定量的纳米铁乙醇溶液置于三口烧瓶中,在氮气保护下,经蠕动泵滴入金属盐溶液并剧烈搅拌,投加完毕持续搅拌10 min使其充分改性,为防止颗粒氧化,向混合液持续通氮气脱氧,反应结束后高速离心,得到的产物用去离子水及无水乙醇分别洗涤3遍以去除杂质,同样保存于乙醇溶液中。

1.2.2 SA-Fe/Ni 的制备

在室温下制备2%质量浓度的海藻酸钠水凝胶(g/mL)。然后取定量的Fe/Ni(以铁质量计),缓慢投加到海藻酸钠水凝胶中,持续进行机械搅拌使其分散均匀,然后通过蠕动泵将混合溶液缓慢滴入

5%(质量分数)的CaCl₂溶液中使其成型,生成的凝胶球在CaCl₂溶液中继续交联2 h,然后迅速抽滤,冰箱冷冻12 h,最后放入冷冻干燥机干燥24 h,制得粒径为3~5 mm均匀的SA-Fe/Ni凝胶球^[22]。

1.2.3 实验步骤

实验均在装有200 mL溶液的锥形瓶中进行,将锥形瓶置于水浴振荡箱内反应,转速为180 r/min。反应开始后,每隔一段时间(0.5、1、2、4、6、8、12、24 h)用注射器取样5 mL置于10 mL离心管中,离心后取上清液过0.22 μm微孔滤膜,测定溶液4-CBP质量浓度及总铁质量浓度。实验中溶液总铁质量浓度采用邻菲罗啉法测定,4-CBP质量浓度采用气-质联用仪测定。4-CBP的去除率R的计算式为:

$$R = (1 - C_t/C_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_0 、 C_t 分别为初始时刻与反应t时刻后的4-CBP质量浓度,mg/L。

探究了不同纳米铁材料(nZVI、Fe/Cu、Fe/Ni)、SA-Fe/Ni质量浓度(0.5、1.0、3.0 g/L)、4-CBP初始质量浓度(0.5、3.0、5.0 mg/L)、反应温度(10、25、50℃)、初始pH(3、7、11)等条件下SA-Fe/Ni对水中4-CBP的去除效果。如无特别说明,反应条件为:SA-Fe/Ni质量浓度为1.0 g/L(以铁计)、4-CBP初始质量浓度为3.0 mg/L、初始温度为25℃、初始pH=7,每组处理设置3个平行实验。

2 结果与讨论

2.1 材料表征与分析

利用扫描电镜(SEM)及激光粒度分析仪对制备的纳米铁形貌结构进行分析。SEM分析发现,制备的纳米铁为片状结构,厚度在1~100 nm之间;通过粒度分析得出实验制备的纳米铁粒径分布在253~612 nm,平均粒径为389 nm。

SA-Fe/Ni的XRD谱图如图1所示。从图1中可以看出,SA-Fe/Ni样品在 $2\theta = 44.4^\circ$ 位置附近有明显的体心立方结构 α -Fe⁰(110)的衍射峰,表明合成的SA-Fe/Ni中存在非晶型纳米铁。由于Ni在

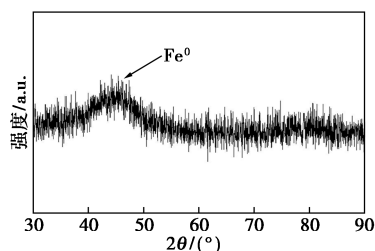


图1 SA-Fe/Ni的XRD谱图

材料中负载量较少, XRD 的谱图中没有明显检测到 Ni。此外, 在 SA-Fe/Ni 中并未发现铁氧化物的峰, 表明 SA 的包覆可以减缓纳米铁的氧化, 提高其稳定性。

SA 样品及 SA-Fe/Ni 的 SEM 图如图 2 所示。由图 2(a) 中可以看出, 未包覆纳米铁的 SA 凝胶球表面较为平滑。由图 2(b) 中可以看出, 包覆 Fe/Ni 后, 明显发现 SA 表面粗糙不平, 孔隙增多。由图 2(c) 中可以看出, 经放大显示, 其上附有大量片状颗粒, 证明 Fe/Ni 成功负载到 SA 中, 且团聚情况得到改善, 分散性较好。

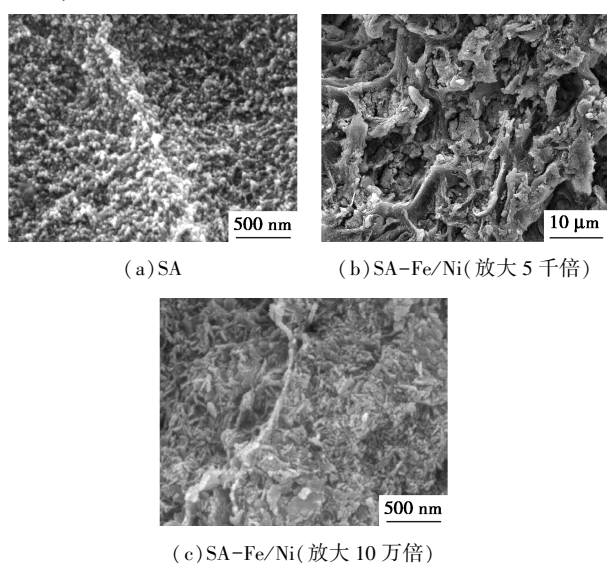


图 2 海藻酸钠凝胶球和 SA-Fe/Ni 的 SEM 图

2.2 不同纳米铁材料对 4-CBP 的去除效果

3 种反应材料对 4-CBP 的去除效果如图 3 所示。

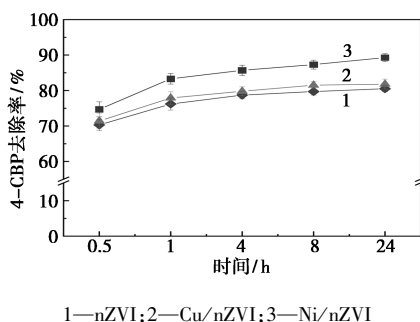


图 3 不同纳米铁材料对 4-CBP 的去除效果

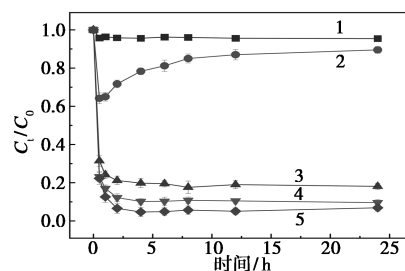
由图 3 可知, 在反应开始后的前 1 h 内, 3 种材料对 4-CBP 快速去除, 反应 1 h 后体系中的 4-CBP 去除率缓慢降低并趋于稳定。反应 1 h 后 nZVI、Fe/Cu、Fe/Ni 3 种材料体系对 4-CBP 的去除率分别为 69.90%、65.80%、72.00%; 反应 24 h 后 3 种材料对 4-CBP 的去除率分别为 80.50%、81.80%、89.30%,

Fe/Ni 材料较 Fe/Cu、nZVI 去除率分别提升了 9.70% 和 11.00%, 说明相同材料投加量下, 纳米铁镍双金属材料相比于 nZVI、Fe/Cu 等材料具有更好的反应活性, 对 4-CBP 的去除能力更强。

2.3 SA-Fe/Ni 去除 4-CBP 的影响因素

2.3.1 SA-Fe/Ni 质量浓度对去除 4-CBP 的影响

不同质量浓度下 SA-Fe/Ni 材料对 4-CBP 去除效果如图 4 所示。



1—空白; 2—SA; 3—材料质量浓度 0.50 g/L; 4—材料质量浓度 1.00 g/L; 5—材料质量浓度 3.00 g/L

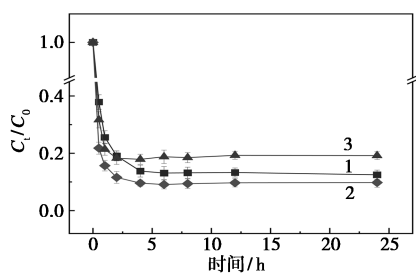
图 4 不同 SA-Fe/Ni 质量浓度下 4-CBP 去除效果

由图 4 可知, SA-Fe/Ni 在反应前 2 h 内对 4-CBP 的去除速率较快, 在 2 h 后对 4-CBP 去除缓慢最后趋于稳定。反应结束后 (24 h 后) 质量浓度为 0.50、1.00、3.00 g/L 的 SA-Fe/Ni 对 4-CBP 的去除率分别为 81.90%、92.10%、93.70%, 由此可见高质量浓度加大了 SA-Fe/Ni 材料与 4-CBP 的接触, 提高了 4-CBP 的去除率。这是因为随着 SA-Fe/Ni 质量浓度增大, 为 4-CBP 的去除提供了更多的吸附位点, 同时在小球内部也提供了更多的反应活性位点^[23]。但质量浓度继续提高时, 4-CBP 的去除率提高不大, 从经济成本考虑, SA-Fe/Ni 的最佳质量浓度为 1.00 g/L。

海藻酸钠对 4-CBP 主要以物理吸附方式去除, 其去除效果受限于海藻酸钠凝胶球的表面性质。通过对比可以看出, SA-Fe/Ni 对 4-CBP 的去除能力优于 SA 及 Fe/Ni, 因此, 经海藻酸钠包覆的 Fe/Ni 在去除 4-CBP 过程中, SA 及 Fe/Ni 具有吸附降解协同作用, 且在 Ni 的催化作用下 Fe⁰ 对 4-CBP 的降解贡献率较大。在相同投加量时, 经 SA 包覆的 Fe/Ni 对 4-CBP 的去除率优于豆磷脂包覆的 Fe/Ni^[24]。

2.3.2 初始 4-CBP 质量浓度对去除效果的影响

初始 4-CBP 质量浓度下 SA-Fe/Ni 材料对 4-CBP 去除效果如图 5 所示。



1—0.50 mg/L; 2—3.00 mg/L; 3—5.00 mg/L

图5 不同初始4-CBP质量浓度下4-CBP去除效果

由图5可见,在反应结束后,SA-Fe/Ni材料对初始质量浓度为3.00 mg/L的4-CBP去除率最高。过高或过低质量浓度的4-CBP都不利于去除,相比于低质量浓度,4-CBP初始质量浓度增加时,其分子间相互碰撞,4-CBP与SA-Fe/Ni接触的速度加快,其去除率增加。当4-CBP的质量浓度较大时,混合液中有大量4-CBP,其分子间相互碰撞虽然会导致降解速度的增大,但SA-Fe/Ni的总有效吸附面积不变,使得SA-Fe/Ni部分面积被快速占据,有效反应位点变少,SA-Fe/Ni对4-CBP的去除效果变差。

2.3.3 反应温度对SA-Ni/nZVI去除4-CBP的影响

在反应温度分别为283、298、323 K的条件下,SA-Fe/Ni对4-CBP的去除效果如图6所示。由图6可见,随着反应温度的升高,4-CBP的去除率呈现先升高后降低的趋势。在反应结束后,SA-Fe/Ni对4-CBP去除率在298 K时最高。温度从283 K升高到298 K时,溶液中4-CBP的分子运动速率变快,有利于其从溶液中迁移至海藻酸钠凝胶球中,与反应活性位点接触,从而提高了材料对4-CBP的去除效率;而当温度继续升高时,过高的温度会造成Fe/Ni的氧化生成钝化层,阻碍其与4-CBP的接触,降低了4-CBP的去除效果。所以在常温条件下更有利于4-CBP的降解。

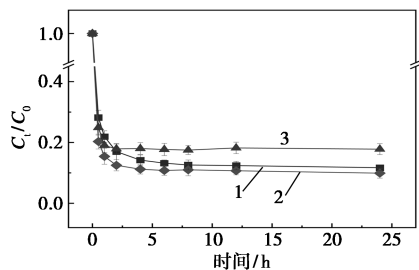
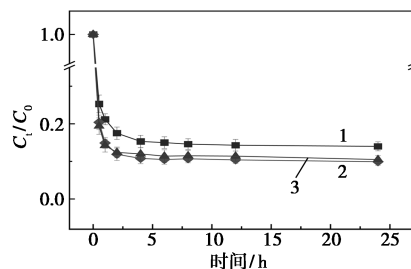
1— $T=283$ K; 2— $T=298$ K; 3— $T=323$ K

图6 不同反应温度下4-CBP去除效果

2.3.4 初始pH对SA-Fe/Ni去除4-CBP的影响

在初始pH分别为3、7、11的条件下,SA-Fe/Ni对4-CBP的去除效果如图7所示。由图7中可以看出,当pH为中性时,SA-Fe/Ni对4-CBP的去除效果最好。低pH下去除效率较差的原因是低pH不利于4-CBP迁移至SA-Fe/Ni小球内部,且在低pH下,溶液中的 H^+ 会加快Fe/Ni的腐蚀,进而影响SA-Fe/Ni的脱氯效果。而高pH时溶液中 H^+ 浓度减少,促进了4-CBP向SA-Fe/Ni小球内部迁移,且在高pH条件下,海藻酸钠的亲水性增强,这都有利于纳米铁与污染物的接触,促进反应进行^[25-26]。与未包覆纳米铁不同,pH对SA-Fe/Ni材料去除4-CBP效果影响不大,表明经海藻酸钠包覆后,Fe/Ni可以成功抵御外界环境pH变化的干扰。

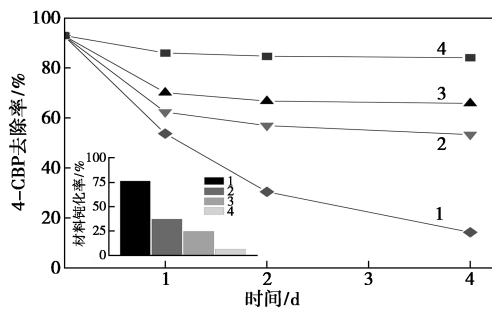


1—pH=3.0; 2—pH=7.0; 3—pH=11.0

图7 不同初始pH条件下4-CBP去除效果

2.3.5 不同陈化条件下SA-Fe/Ni对4-CBP去除效果分析

制备出的SA-Fe/Ni材料在不同介质中存储时,材料中的nZVI会与氧气接触而形成表面氧化层,促使nZVI钝化,影响材料的反应性能^[27]。将制备的SA-Fe/Ni材料分别置于空气、密闭空气、密闭水、真空充氮的容器中陈化1、2、4 d,其对4-CBP去除效果如图8所示。



1—空气; 2—密闭空气; 3—密闭水; 4—真空通氮

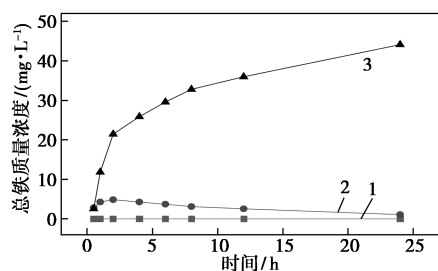
图8 不同陈化条件下SA-Fe/Ni对4-CBP去除效果

由图8中可以看出,暴露在空气中的SA-Fe/Ni

材料陈化 4 d 后去除率大幅衰减到了 14.20%,而在真空充氮密闭条件下,SA-Fe/Ni 材料陈化 4 d 后去除率仍保持在 84.10%。可见,密闭及隔氧的条件下更有利于 SA-Fe/Ni 材料的保存。

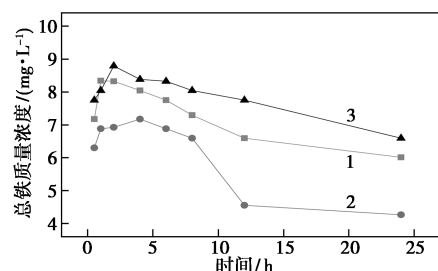
2.4 反应过程中上清液总铁浓度变化

对不同反应条件下反应过程中上清液总铁质量浓度进行检测,结果如图 9 所示。由图 9 可知,反应



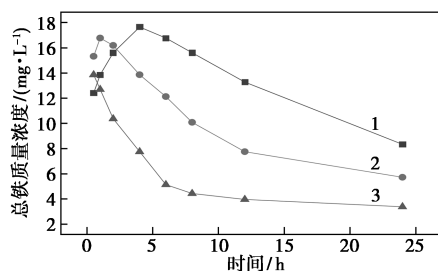
1—0.50 mg/L;2—3.00 mg/L;3—5.00 mg/L

(a) 不同 4-CBP 质量浓度



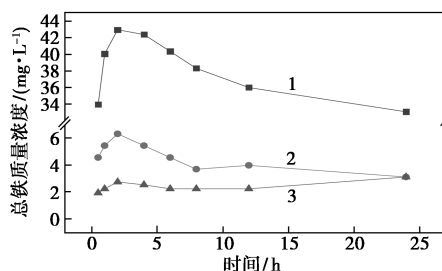
1—0.50 g/L;2—1.00 g/L;3—3.00 g/L

(b) 不同 SA-Fe/Ni 质量浓度



1— $T=283$ K;2— $T=298$ K;3— $T=323$ K

(c) 不同温度



1—pH=3.0;2—pH=7.0;3—pH=11.0

(d) 不同初始 pH

图 9 不同反应条件下反应过程中上清液总铁质量浓度变化情况

过程中反应液总铁质量浓度随着 SA-Fe/Ni 质量浓度的增加以及反应温度的降低而升高。在 pH 较低的条件,反应液中总铁质量浓度较高,表明酸性条件会使反应过程中 SA-Fe/Ni 材料内的 nZVI 反应产物大量释放到水体,致使反应液中的总铁质量浓度高于中性及碱性条件。在整个反应过程中,除有少量铁氢氧化物沉淀外,反应液中的总铁质量浓度远小于反应开始投加的 nZVI 质量浓度,原因是 nZVI 在海藻酸钠凝胶球内的结合性较为牢固,nZVI 不宜溶出,4-CBP 的去除反应绝大部分在海藻酸钠凝胶球表面及内部进行。

3 结论

(1) 制备了海藻酸钠负载纳米铁镍凝胶球 (SA-Fe/Ni),SEM 及 XRD 表征结果表明,Fe/Ni 成功固定在海藻酸钠小球中,且包覆后的 Fe/Ni 并没有被氧化。Fe/Ni 在海藻酸钠凝胶球内的结合牢固、分散性较好,且 nZVI 不宜溶出。

(2) SA-Fe/Ni 对 4-CBP 的去除率随反应体系中材料质量浓度的提高而增加,SA-Fe/Ni 在去除 4-CBP 过程中,具有 SA 吸附和 Ni 催化 nZVI 还原降解 4-CBP 的协同作用,且以 Fe/Ni 对 4-CBP 的催化降解去除为主。在 SA-Fe/Ni 质量浓度为 3 g/L,4-CBP 初始质量浓度为 3 mg/L、反应温度为 298 K、初始 pH 为 7 时,4-CBP 的去除率达到 93.70%。中性及常温条件下更有利于 SA-Fe/Ni 材料对 4-CBP 的降解。

(3) Fe/Ni 对 4-CBP 的去除能力优于 nZVI、Fe/Cu 等材料。SA-Fe/Ni 材料可以克服 nZVI 材料易团聚、易氧化和使用寿命短等缺陷,可以有效地降解自然水体中的 4-CBP,且去除效果优于豆磷脂包覆的 Fe/Ni。

参考文献

- [1] Brown J F, Bedard D L, Brennan M J, *et al.* Polychlorinated biphenyl dechlorination in aquatic sediments [J]. *Science*, 1987, 236(4802): 709-712.
- [2] Georg R, Barbara K, Johann R, *et al.* Impact of electric field at rough copper lines on failure time due to electrochemical migration in pcbs [J]. *Microelectronics Reliability*, 2021, 117: 114035.
- [3] Lap H R, Ten D G, Pj V L S, *et al.* High levels of dioxins and pcbs in meat, fat and livers of free ranging pigs, goats, sheep and cows from the island of curacao [J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128057.
- [4] Yiping C, Yan Z, M Z M, *et al.* Potential health risk assessment of HFRs, PCBs, and OCPs in the yellow river basin [J]. *Environmental*

- Pollution, 2021, 275(1): 116648.
- [5] Li W H, Tian Y Z, Shi G L, *et al.* Source and risk assessment of PCBs in sediments of Fenhe reservoir and watershed, China [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, 14(4): 1255–1262.
- [6] Shuduan M, Shuren L, Yuting Z, *et al.* The occurrence and sources of polychlorinated biphenyls (PCBs) in agricultural soils across china with an emphasis on unintentionally produced PCBs [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 271: 116171.
- [7] 国家环境分析测试中心. 持久性有机污染物 (POPs) 区域污染现状和演变趋势 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2015.
- [8] 曹秀芹, 程琳, 李志强. 碳纳米管对水中多氯联苯的吸附动力学 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(9): 5041–5048.
- [9] 岳亚萍. 不同炭质吸附剂对多氯联苯的长时间吸附特性研究及应用 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [10] 刘建福, 李青松, 郭淑娟. NZVI/ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ /超声复合法降解污染土壤 PCB-29 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(7): 2646–2651.
- [11] Teng B, Mezemir D M, Ahmad H, *et al.* Bentonite-supported nano zero-valent iron composite as a green catalyst for bisphenol a degradation: Preparation, performance, and mechanism of action [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 260: 105–110.
- [12] Jinhua W, Mingjia Y, Sihao L, *et al.* Preparation of highly dispersive and antioxidative nano zero-valent iron for the removal of hexavalent chromium [J]. *Chemosphere*, 2020, 262: 127733.
- [13] Yan J C, Han L, Gao W G, *et al.* Biochar supported nanoscale zero-valent iron composite used as persulfate activator for removing trichloroethylene [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 269–274.
- [14] 颜小星, 柳听义, 王中良. 壳聚糖-纳米零价铁球去除水中二价镉的研究 [J]. *天津师范大学学报 (自然科学版)*, 2014, 34(3): 42–46.
- [15] Wang W, Li S L, Lei H, *et al.* Enhanced separation of nanoscale zero-valent iron (nZVI) using polyacrylamide: Performance, characterization and implication [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 260: 616–622.
- [16] Dong H R, Xie Y K, Zeng G M, *et al.* The dual effects of carboxymethyl cellulose on the colloidal stability and toxicity of nanoscale zero-valent iron [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 1682–1689.
- [17] Amen T W M, Eljamal O, Khalil A M E, *et al.* Wastewater degradation by iron/copper nanoparticles and the microorganism growth rate [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 74: 19–31.
- [18] Lee S D, Mallampati S R, Lee B H. Enhanced removal of ethanalamine from secondary system of nuclear power plant wastewater by novel hybrid nano zero-valent iron and pressurized ozone initiated oxidation process [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(21): 17769–17778.
- [19] Khalil A M E, Eljamal O, Saha B, *et al.* Performance of nanoscale zero-valent iron in nitrate reduction from water using a laboratory-scale continuous-flow system [J]. *Chemosphere*, 2018, 197: 502–512.
- [20] 徐新华, 卫建军, 汪大群. Pd/Fe 及纳米 Pd/Fe 对氯酚的脱氯研究 [J]. *中国环境科学*, 2004, (1): 77–81.
- [21] 王清萍, 况焯, 金晓英, 等. 海藻酸钙包覆纳米 Ni/Fe 颗粒用于同时去除水中铜离子和氯苯 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(5): 1228–1235.
- [22] 周红艺, 陈勇, 梁思, 等. 海藻酸钠固定化纳米铁还原脱色活性红 X3B [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(12): 3576–3582.
- [23] Parshetti G K, Doong R A. Dechlorination of chlorinated hydrocarbons by bimetallic Ni/Fe immobilized on polyethylene glycol-grafted microfiltration membranes under anoxic conditions [J]. *Chemosphere*, 2011, 86(4): 392–399.
- [24] 丁舒. Ni/Fe 纳米颗粒与豆磷脂复合材料制备及其去除多氯联苯研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [25] 陈明木, 王春英, 庞杰, 等. 海藻酸钙凝胶特性影响因素的探讨 [J]. *现代食品科技*, 2002, 18(3): 4–6.
- [26] 高欣玉, 纵瑞强, 王平, 等. xDLVO 理论解析微滤膜海藻酸钠污染中 pH 值影响机制 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(4): 958–965.
- [27] Mu Y, Jia F L, Ai Z H, *et al.* Iron oxide shell mediated environmental remediation properties of nano zero-valent iron [J]. *Environmental Science-Nano*, 2017, 4(1): 27–45. ■

路博润松江工厂新增 TPU 生产线正式投产

近日,路博润公司宣布其上海松江生产基地的新增热塑性聚氨酯 (TPU) 生产线正式投产。随着新生产线的正式投产,路博润特种聚合物业务再次增强了包括 ESTANE® TPU 产品系列在内的 TPU 生产能力,以满足汽车、鞋类、电子等各种市场和应用日益增长的需求。

路博润特种聚合物业务亚太区高级总监蔡杰表示:“新生产线的投入表明了路博润对于亚太区市场的重视以及长期发展的坚定信心。”她补充道:“通过持续投资,我们不断提升本地化生产、产品研发和创新以及客户支持的能力。通过与我们的客户紧密合作,路博润可以充

分了解客户的多样化需求,并提供更多创新和量身定制的解决方案,帮助他们的产品获得与众不同的优势。”

ESTANE® TPU 不仅为最终产品带来高性能和美观性,在帮助客户实现可持续发展目标方面也具有至关重要的作用。2022 年初,路博润松江生产基地获得了国际质量平衡认证 (the International Sustainability Carbon Certification, ISCC Plus),意味着该生产基地具备向市场提供符合 ISCC 认证的 TPU 产品的能力,这也是路博润公司通过负责任的生产减少对环境影响的又一成功例证。

(范荣)