

水中硼的去除方法研究进展

侯若昕, 顾 平, 韦晓竹, 张光辉
(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

[摘要] 硼广泛应用于现代工业的各个领域,随之而来的含硼废水也开始引起人们的关注。苦咸水和海水由于硼含量较高,作为饮用水或灌溉水之前必须进行除硼处理。水中硼的去除方法逐渐成为人们关注和研究的热点之一。概述了硼的相关环境标准及水中硼的去除方法,分析了各种方法的优缺点,探讨了除硼方法的发展趋势。

[关键词] 除硼;选择性离子交换树脂;反渗透;吸附;电混凝

[中图分类号] X703 [文献标识码] A [文章编号] 1005-829X(2012)03-0014-05

Study on the removal of boron from water

Hou Ruoxin, Gu Ping, Wei Xiaozhu, Zhang Guanghui

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Boron has been widely used in every field of modern industries. Therefore, the boron-containing wastewater has caught more attention than ever before. Because of the high content of boron in brackish water and sea water, it is necessary to remove boron from brackish water and sea water before being used as drinking or irrigation water. Now, boron removal from water has gradually become one of the research hotspots and focus of attention. The environment standard relating to boron and the methods for removing boron from water are introduced briefly. The advantages and disadvantages of various methods are analyzed, and the development trends of boron removal are investigated.

Key words: boron removal; selective ion-exchange resin; reverse osmosis; adsorption; electro-coagulations

1 硼的应用及硼污染危害

1.1 硼及其应用

在自然界中,硼通常以硼酸、硼酸盐或者硼硅酸盐矿的形式存在^[1]。硼的应用极其广泛,工业上主要利用硼化合物制造绝缘玻璃纤维材料、硼硅酸盐玻璃和清洁剂^[1],或作为“冷却剂”应用于核反应堆,即在压水堆核电站运行的过程中,通过向反应堆添加硼酸来控制反应性,当换料或检修时也会向堆芯注入大量硼酸溶液保证安全性。含硼废水的主要成分是硼酸盐,并含有少量硝酸钠和磷酸钠等^[2]。

1.2 硼污染的危害

人们每日从食物及饮用水中会摄入 1~3 mg 硼,硼也是植物生长所必需的微量元素,但是硼的过量摄取或灌溉水中硼含量过高会对人体和作物产生危害^[1]。世界卫生组织(WHO)建议,成人每天摄入的硼应不超过 0.16 $\mu\text{g/g}$,过量的硼的摄入会引起恶心、头痛、腹泻、肝脏损害甚至会死亡^[1,3]。植物硼中毒会使叶片枯黄、脱落,最终会导致光合作用能力的

降低和产量的下降。因此,从水源及废水中除硼是极其必要的。

1.3 硼的相关环境标准

世界卫生组织在 1958 年、1963 年和 1971 年的饮用水标准中并未将硼列为毒性物质,直至 1993 年才对饮用水中的硼首次提出 0.3 mg/L 的临时性限定指标,1998 年规定为 0.5 mg/L,2010 年修订后仍为 0.5 mg/L。许多国家和组织也制定了相应的标准,例如欧盟 1998 年规定饮用水中硼的限值为 1.0 mg/L,新西兰饮用水标准中硼的限值为 1.4 mg/L^[1]。

综上所述,随着硼工业的发展及人们对水中硼污染重视的提高,水中硼的去除越来越引起人们的广泛关注,各种硼的去除方法成为研究热点之一。

2 处理方法

2.1 化学沉淀法

化学沉淀法是较早见诸报道的除硼方法,其中沉淀剂包括无机沉淀剂和有机沉淀剂。

早在 1978 年,有研究者^[3]系统地研究了石灰、铝化合物、锰化合物、锆化合物、镍化合物、铬化合物、锌化合物等无机沉淀剂对硼的去除效果。结果表明,当以石灰为沉淀剂、 $n(\text{B}):n(\text{Ca})$ 为 2.65:1、pH 为 10、温度为 25 °C、反应时间为 1~4 d 时,硼酸溶液中硼的质量浓度可从 6 200 mg/L 降至 450 mg/L; 另有研究表明^[3],室温条件下,过量的聚乙烯醇对硼质量浓度为 150 mg/L 的水中的硼的去除率可达 60%。卤水经制盐工序后母液中硼酸含量较高,唐明林等^[4]采用石灰乳沉淀质量浓度为 31.50 g/L 的卤水制盐后母液中的硼酸,结果表明,硼去除率大于 70%。张兴儒等^[5]的研究表明,采用石灰乳从硼酸母液中沉淀硼时,硼的去除率随 pH 的增加和反应温度的提高而增大,当 pH 为 8.7、反应温度为 60 °C、反应时间为 50 min 时,硼去除率可达 96.13%。

化学沉淀法除硼通常需要调节 pH 至碱性,由此产生大量沉淀物的同时会使水中的盐度增加;另外,沉淀剂的大量消耗和沉淀物的后处理是其在工业应用中所面临的主要问题。

2.2 硼选择性离子交换树脂

利用硼选择性离子交换树脂的活性基团与水中的硼发生交换反应,可迅速高效地去除水中的硼,其在饮用水、含硼废水、海水淡化等除硼领域已展现出良好的处理效果和广泛的应用前景^[6-13]。目前,已商业化应用的硼选择性离子交换树脂主要为含 *N*-甲基葡萄糖胺官能团的螯合树脂,如 D564、Amberlite IRA 743、Diaion CRB 01、Diaion CRB 02 等。

硼选择性离子交换树脂的除硼效果主要受水中其他离子、树脂粒径等因素的影响。

2.2.1 水中其他离子的影响

M. Badruk 等^[6]应用 Diaion CRB 02 和 Purolite S 108 树脂处理 0.01 mol/L 的硼酸溶液,结果表明,钠和氯离子的存在并没有对 2 种树脂的硼吸附性能产生太大的影响,而 N. Ozturk 等^[10]的研究结果表明, Na_2SO_4 和 CaCl_2 的存在会极大地影响 Dowex 2×8 树脂的硼吸附性能。

2.2.2 树脂粒径的影响

I. Yilmaz-Ipek 等^[9]应用 Lewatit MK 51 树脂处理硼质量浓度为 10.7 mg/L 的地热水,结果表明,除硼效果受树脂粒径影响较大,当树脂粒径为 0.500~0.710 mm、树脂用量为 4.0 g/L 时,硼去除率达 90%。N. Kabay 等^[7]研究了树脂粒径对 Diaion CRB 02 和 Dowex XUS 43594.00 树脂除硼效果的影响,结果表

明,当树脂粒径分别为 0.355~0.500 mm 和 45~75 μm 时,硼去除率可达到 90%,此时树脂用量分别为 2 g/L 和 1 g/L,粒径的减小可提供更大的吸附表面积,减少树脂的用量。

2.2.3 吸附容量的研究

N. Kabay 等^[8]采用 Diaion CRB 02 和 Dowex XUS 43594.00 树脂对硼质量浓度为 1.5 mg/L 的海水淡化装置产水进行除硼,以 0.2 mg/L 为泄漏质量浓度,结果表明,2 种树脂的处理体积可达到 1 000 倍床层体积(BV)左右。N. Ozturk 等^[10]的研究表明,当 pH 为 9、温度为 25 °C 时,Dowex 2×8 树脂的最大吸附容量为 16.98 mg/g。T. E. Kose 等^[11]的研究表明,在柱交换实验中,当流速分别为 39、45 mL/h 时,Dowex 2×8 树脂的吸附容量分别为 13.94、13.13 g/L,树脂经过 3 次再生后,吸附容量没有明显变化。

此外,M. F. C. Arias 等^[12]通过小试实验对应用 3 种硼选择性离子交换树脂去除海水淡化出水中硼的费用进行了评估(包括树脂安装费用、树脂费用、能源消耗、试剂费用、维护费用),结果表明,在不同运行状态下费用均在 3.67~10.10 欧分/m³ 之间。

吸附饱和后的树脂须经过再生才能再次使用,通常是将其用硫酸或盐酸洗脱,经蒸馏水洗涤后,用氢氧化钠再生,最后再经蒸馏水洗涤即完成再生过程^[11]。但树脂经多次再生使用后,会造成其颗粒结构的改变及活性基团的损失,使其除硼性能降低,同时,再生液的处理也是其应用中必须面临的问题。

2.3 反渗透膜技术

反渗透膜技术在水处理领域已得到广泛的研究和应用,对某些领域,例如地下水、海水、垃圾渗滤液中硼^[14-17]的去除也有实际应用。

反渗透膜对水中硼的去除主要受水的 pH、压力、膜材料等因素的影响。D. Prats 等^[18-19]报道了用常规 RO 膜处理苦咸水时 pH 和压力对硼去除率的影响,即当 pH<9.5 时,硼的去除率为 50%左右,当 pH 升至 10.5 时,硼的去除率已接近 100%,且硼的去除率随着压力的升高而提高。这是因为当 pH<7.0 时,硼主要以 $\text{B}(\text{OH})_3$ 的形式存在^[20],而随着 pH 的升高, $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 的比例也随之升高,相对于 $\text{B}(\text{OH})_3$, $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 更易于被反渗透膜截留^[19]。然而,H. Koseoglu 等^[21]的研究结果表明,硼的截留率随压力的变化与膜相关,Toray™ UTC-80-AB 反渗透膜对硼的去除随压力的增加而提高,但 Filmtec™ SW30HR 反渗透膜对硼的去除随压力的增加而降低。增加盐度会使

酸解常数(pK_a)降低,从而增大 $B(OH)_4^-$ 的比例,因而理论上增加盐度可提高硼的去除率;然而 M. H. Oo 等^[22]的研究表明,当 pH 为 9、10, NaCl 盐度由 500 mg/L 增加到 15 000 mg/L 时,硼的去除率分别由 81% 降至 71%、61% 降至 45%。H. Hyung 等^[23]应用 4 种 RO 膜(SWC4+、LE、TM820、TM820A)在 pH 分别为 6.2 和 9.5 的条件下,考察了温度对硼去除率的影响,结果表明,硼的去除率随着温度的升高而降低。M. F. C. Arias 等^[12]通过小试实验对应用 3 种反渗透膜去除海水淡化出水中硼的费用进行了评估(包括膜安装费用、膜费用、能源消耗、试剂费用、维护费用),结果表明,在不同运行状态下费用均在 2.82~12.61 欧元/ m^3 之间。

反渗透除硼受 pH 影响较大,高 pH 有利于除硼但不利于操作,对膜损害也大;同时,膜污染、RO 浓水的处理等也是其应用中所面临的主要问题。

2.4 电混凝法

以铝或铁作电极,采用电混凝法除硼时,阳极会溶出 Al^{3+} 或 Fe^{2+} 等离子,其在水中水解而发生混凝或絮凝作用。通常,该方法同时伴随电气浮和电氧化过程,使水中的胶体和悬浮态污染物得到有效去除。

A. E. Yilmaz 等^[24]对化学沉淀法和电混凝法除硼进行了比较,结果表明,电混凝法比化学沉淀法有更好的硼去除效果,在最佳实验条件下(pH 为 8、铝离子质量浓度为 7.45 g/L),硼的去除率分别为 94.0% 和 24.0%。A. E. Yilmaz 等^[25]应用电混凝法对硼质量浓度为 24 mg/L 的地热水进行除硼研究,结果表明,在电流密度为 6.0 mA/ cm^2 、pH 为 8、电解时间为 30 min 的条件下,硼的去除率达到了 96%,处理后水中的硼降至 1.0 mg/L 以下,达到农业灌溉用水标准的要求。J. Q. Jiang 等^[26]对比了采用铝电极的电混凝法和以明矾为混凝剂的化学沉淀法对硼的去除效果,研究表明电混凝法具有更高的去除率和更好的经济性,不管是处理硼模拟废水还是含硼工业废水,在相同的条件下,电混凝法的硼去除率比化学沉淀法高 15%~20%;当含硼工业废水中硼的去除率达到 75% 时,化学沉淀法的费用是电混凝法的 6.2 倍。N. Bektas 等^[27]应用电混凝法处理 2.5 g/L 的含硼废水,在电流密度为 20 mA/ cm^2 、电解时间为 20~30 min 的条件下,硼的去除率达 90% 左右,电耗为 2.5~4.5 kW·h/ m^3 ,显示了良好的去除效果。以铝为阳极的电混凝法,水中剩余的铝会对人类的健康产生影响,而以镁为阳极则不会产生这一问题^[28]。S. Vasudevan

等^[28]的研究结果表明,以镁为阳极、不锈钢为阴极,当硼质量浓度为 3~7 mg/L、电流密度为 0.2 A/ dm^2 、pH 为 7 时,硼的去除率可达 86.20%。

2.5 吸附法

吸附法是利用吸附剂吸附去除水中的硼,常用的吸附剂为活性炭、金属氧化物、双层羟基化合物等。

2.5.1 活性炭吸附

J. Kluczka 等^[29-30]的实验表明,活性炭经过氯化钙、酒石酸、甘露醇等浸渍改性后,能显著提高其吸附性能,经甘露醇改性后的粒状 WG-12 活性炭对质量浓度为 25~70 mg/L 的含硼工业废水有良好的处理效果,其吸附容量可达 4.95 mg/g。Z. C. Celik 等^[31]研究了经水杨酸改性的活性炭对质量浓度为 5~50 mg/L 的硼的去除效果,结果表明,改性后的活性炭能显著提高对硼的吸附性能,且其吸附性能随着温度、pH、吸附剂用量的增加而提高,搅拌速率对其吸附性能影响不大。闫春燕等^[32]应用活性炭处理某海水中的硼(4.42 mg/L),一次除硼率可达 90% 以上,处理后出水硼质量浓度低于 0.3 mg/L,符合 WHO 规定的饮用水水质标准的要求。

2.5.2 金属氧化物吸附

W. Bouguerra 等^[33]应用活性氧化铝处理含硼水,结果表明,当投加量分别为 8 g/L 和 50 g/L,硼初始质量浓度分别为 5 mg/L 和 50 mg/L 时,硼的去除率可分别达 40% 和 65%。王路明^[34]利用 $Mg(OH)_2$ 吸附海水中的硼,当吸附剂用量(以 MgO 计)为 5 g/L 时,硼去除率可达 80%。

2.5.3 双层羟基化合物吸附

双层羟基化合物(DLHs)的结构为阴阳离子交替的层状结构^[35-36]。O. P. Ferreira 等^[35]的研究结果表明,当硼质量浓度为 5~500 mg/L 时,DLH-60 和 DLH-450 的吸附容量分别为 1.2~13、5.4~17.3 mg/g。Jiaqian Jiang 等^[36]的研究结果表明,处理硼质量浓度为 17 mg/L 的工业废水,当 DLH-60 和 DLH-450 的用量分别为 36 g/L 和 16 g/L 时,硼去除率分别达到 86.6% 和 95.3%,且处理效果不受 pH 影响,但吸附剂经过 6 次再生使用后,硼去除率降至 40%。

由于活性炭、金属氧化物等吸附剂处理和再生费用相对较高,因此,选用低费用吸附剂及以废弃物作为吸附剂引起了研究者广泛的关注。Y. Cengeloglu 等^[37]研究了中性红土(矾土精炼厂的剩余物)的除硼效果,研究表明,当 pH 为 2~7 时,pH 对

处理效果影响较小,且反应 20 min 即达到平衡。S. Yuksel 等^[38]对以粉煤灰去除水中的硼进行了研究,结果表明,对浓度为 1 mmol/L 的含硼废水,在温度为 25 ℃、pH 为 10、吸附时间为 24 h 的条件下,当粉煤灰投加量从 20 g/L 增至 100 g/L 时,硼的去除率从 47% 增至 94%。M. F. Chong 等^[39]采用棕榈油厂锅炉底灰为吸附剂处理硼质量浓度为 15 mg/L 的陶瓷工业废水,在底灰(粒径>2 mm)用量为 133 g/L、pH 为 8、反应时间为 1 h、搅拌速度为 100 r/min 的条件下,处理后出水中的硼可降至 3 mg/L。

2.6 组合工艺

综合考虑各种方法的优缺点及废水的组成,采用各种工艺的组合工艺处理水中的硼,可获得更好的除硼效果,如吸附-微滤组合工艺(AMF)、吸附/共沉淀-反渗透工艺等。

M. Turek 等^[17]采用吸附/共沉淀-反渗透方法处理硼质量浓度为 80 mg/L 的垃圾填埋场渗滤液,经多级反渗透处理后,硼质量浓度可降至低于 1 mg/L;产生的 RO 浓水中的硼质量浓度约为 300 mg/L,此浓水经过以氢氧化铝(或氢氧化铁)为吸附剂的吸附/共沉淀工艺处理后,其中的硼可降至 95 mg/L,处理后水可回到反渗透系统进行处理。

AMF 工艺具有高产水率及良好的分离效果,典型的工艺流程为^[40]:(1)硼选择性树脂吸附。(2)微滤膜将饱和树脂从水中分离。(3)盐酸或硫酸将硼从树脂中解吸。(4)微滤膜将解吸后的树脂从水中分离。(5)树脂通过碱液再生。J. Wolska 等^[41]研究了将 *N*-甲基-D-葡萄糖胺聚合物微球材料树脂应用于 AMF 的除硼效果,研究表明树脂的用量及流速是影响除硼率的关键因素,当树脂用量为 1 g/L、流速为 1 mL/min 时,数分钟后硼浓度即下降 50%,出水硼质量浓度约为 0.5 mg/L。M. Bryjak 等^[42]探讨了以 Dowex XUS 43594.00 为吸附剂、微滤膜孔径为 0.4 μm 的 AMF 系统对单级反渗透系统出水的除硼效果,结果表明,在树脂粒径为 20 μm、用量为 1 g/L 的条件下,出水中的硼从 2 mg/L 降至 0.5 mg/L;系统运行 48 h 后,并未出现因吸附剂造成的膜污染,树脂重复使用 20 次后并未造成颗粒粒径的改变。

3 结论与展望

含硼废水的处理方法中,化学沉淀法能处理高浓度含硼废水,但需面对化学试剂消耗量大及沉淀物需后处理等问题。硼选择性离子交换树脂可使处

理后出水中的硼浓度达到饮用水及灌溉水标准的要求,但树脂的再生及再生废水的处理是其面临的主要问题。反渗透膜处理技术已广泛应用于海水淡化除硼等领域,其主要面临的问题为高 pH 对膜的损害、膜污染及 RO 浓水的处理等。电凝法可处理高浓度的含硼废水且较化学混凝法有更高的硼去除率及更好的经济性,但在其应用中须考虑极板的消耗、能耗、沉淀的产生量及后处理等问题。由于活性炭、金属氧化物等吸附剂的处理和再生费用相对较高,低费用吸附剂及以废弃物作为吸附剂成为研究热点。组合工艺的选择应根据废水的成分、出水的要求及各处理方法的优缺点进行综合考虑。

[参考文献]

- [1] 全跃. 硼及硼产品研究与进展[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2008:332.
- [2] IAEA. Processing of nuclear power plant waste streams containing boric acid[R]. Vienna: IAEA, 1996.
- [3] Xu Yonglan, Jiang Jiaqian. Technologies for boron removal[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2008, 47(1): 16-24.
- [4] 唐明林, 邓天龙, 廖梦霞. 沉淀法从盐后母液中提取硼酸的研究[J]. 海湖盐与化工, 1994, 23(5): 17-19.
- [5] 张兴儒, 王彬, 张煜发, 等. 用石灰乳从硼酸母液中沉淀硼影响因素研究[J]. 无机盐工业, 2005, 37(10): 21-23.
- [6] Badruk M, Kabay N, Demircioglu M, et al. Removal of boron from wastewater of geothermal power plant by selective ion-exchange resins. I. batch sorption-elution studies[J]. Separation Science and Technology, 1999, 34(13): 2553-2569.
- [7] Kabay N, Sarp S, Yuksel M, et al. Removal of boron from seawater by selective ion exchange resins[J]. Reactive and Functional Polymers, 2007, 67(12): 1643-1650.
- [8] Kabay N, Sarp S, Yuksel M, et al. Removal of boron from SWRO permeate by boron selective ion exchange resins containing *N*-methyl glucamine groups[J]. Desalination, 2008, 223(1/2/3): 49-56.
- [9] Yilmaz-Ipek I, Koseoglu P, Yuksel U, et al. Separation of boron from geothermal water using a boron selective macroporous weak base anion exchange resin[J]. Separation Science and Technology, 2010, 45(6): 809-813.
- [10] Ozturk N, Kose T E. Boron removal from aqueous solutions by ion-exchange resin: Batch studies[J]. Desalination, 2008, 227(1/2/3): 233-240.
- [11] Kose T E, Ozturk N. Boron removal from aqueous solutions by ion-exchange resin: Column sorption-elution studies[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 744-749.
- [12] Arias M F C, Bru L V, Rico D P, et al. Approximate cost of the elimination of boron in desalinated water by reverse osmosis and ion exchange resins[J]. Desalination, 2011, 273(2/3): 421-427.
- [13] Wei Yuting, Zheng Yuming, Chen J P. Design and fabrication of an

- innovative and environmental friendly adsorbent for boron removal [J]. Water Research, 2011, 45(6): 2297-2305.
- [14] Georghiou G, Pashafidis L. Boron in groundwaters of Nicosia (Cyprus) and its treatment by reverse osmosis [J]. Desalination, 2007, 215(1/2/3): 104-110.
- [15] Bonnelye V, Sanz M A, Francisci L, et al. Curacao, Netherlands Antilles; A successful example of boron removal on a seawater desalination plant [J]. Desalination, 2007, 205(1/2/3): 200-205.
- [16] Glueckstern P, Priel M. Optimization of boron removal in old and new SWRO systems [J]. Desalination, 2003, 156(1/2/3): 219-228.
- [17] Turek M, Dydo P, Trojanowska J, et al. Adsorption/co-precipitation-reverse osmosis system for boron removal [J]. Desalination, 2007, 205(1/2/3): 192-199.
- [18] Prats D, Chillón-Arias M F, Rodríguez-Pastor M. Analysis of the influence of pH and pressure on the elimination of boron in reverse osmosis [J]. Desalination, 2000, 128(3): 269-273.
- [19] Pastor M R, Ruiz A F, Chillón M F, et al. Influence of pH in the elimination of boron by means of reverse osmosis [J]. Desalination, 2001, 140(2): 145-152.
- [20] Magara Y, Tabata A, Kohki M, et al. Development of boron reduction system for sea water desalination [J]. Desalination, 1998, 118(1/2/3): 25-33.
- [21] Koseoglu H, Kabay N, Yuksel M, et al. Boron removal from seawater using high rejection SWRO membranes: Impact of pH, feed concentration, pressure, and cross-flow velocity [J]. Desalination, 2008, 227(1/2/3): 253-263.
- [22] Oo M H, Song L F. Effect of pH and ionic strength on boron removal by RO membranes [J]. Desalination, 2009, 246(1/2/3): 605-612.
- [23] Hyung H, Kim J H. A mechanistic study on boron rejection by sea water reverse osmosis membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2006, 286(1/2): 269-278.
- [24] Yilmaz A E, Boncukcuoglu R, Kocakerim M M. A quantitative comparison between electrocoagulation and chemical coagulation for boron removal from boron-containing solution [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 149(2): 475-481.
- [25] Yilmaz A E, Boncukcuoglu R, Kocakerim M M, et al. Boron removal from geothermal waters by electrocoagulation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153(1/2): 146-151.
- [26] Jiang J Q, Xu Y, Simon J, et al. Removal of boron (B) from waste liquors [J]. Water Science and Technology, 2006, 53(11): 73-79.
- [27] Bektas N, Oncel S, Akbulut H Y, et al. Removal of boron by electrocoagulation [J]. Environmental Chemistry Letters, 2004, 2(2): 51-54.
- [28] Vasudevan S, Sheela S M, Lakshmi J, et al. Optimization of the process parameters for the removal of boron from drinking water by electrocoagulation: A clean technology [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2010, 85(7): 926-933.
- [29] Kluczka J, Trojanowska J, Zolotajkin M, et al. Boron removal from wastewater using adsorbents [J]. Environmental Technology, 2007, 28(1): 105-113.
- [30] Kluczka J, Ciba J, Trojanowska J, et al. Removal of boron dissolved in water [J]. Environmental Progress, 2007, 26(1): 71-77.
- [31] Celik Z C, Can B Z, Kocakerim M M. Boron removal from aqueous solutions by activated carbon impregnated with salicylic acid [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(1): 415-422.
- [32] 闫春燕, 伊文涛, 邓小川, 等. 活性炭对海水中硼的吸附研究 [J]. 无机盐工业, 2007, 39(3): 34-36.
- [33] Bouguerra W, Mnif A, Hamrouni B, et al. Boron removal by adsorption onto activated alumina and by reverse osmosis [J]. Desalination, 2008, 223(1/2/3): 31-37.
- [34] 王路明. $Mg(OH)_2$ 对海水中硼的吸附效果 [J]. 盐湖盐与化工, 2003, 32(5): 5-7.
- [35] Ferreira O P, Moreas S G, Duran N, et al. Evaluation of boron removal from water by hydrotalcite-like compounds [J]. Chemosphere, 2006, 62(1): 80-88.
- [36] Jiang Jiaqian, Xu Yonglan, Quill K, et al. Laboratory study of boron removal by Mg/Al double-layered hydroxides [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2007, 46(13): 4577-4583.
- [37] Cengelloglu Y, Tor A, Arslan G, et al. Removal of boron from aqueous solution by using neutralized red mud [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 142(1/2): 412-417.
- [38] Yuksel S, Yurum Y. Removal of Boron from aqueous solutions by adsorption using fly ash, zeolite, and demineralized lignite [J]. Separation Science and Technology, 2010, 45(1): 105-115.
- [39] Chong M F, Lee K P, Chieng H J, et al. Removal of boron from ceramic industry wastewater by adsorption-flocculation mechanism using palm oil mill boiler (POMB) bottom ash and polymer [J]. Water Research, 2009, 43(13): 3326-3334.
- [40] Kabay N, Yilmaz I, Bryjak M, et al. Removal of boron from aqueous solutions by a hybrid ion exchange-membrane process [J]. Desalination, 2006, 198(1/2/3): 158-165.
- [41] Wolska J, Bryjak M, Kabay N. Polymeric microspheres with *N*-methyl-D-glucamine ligands for boron removal from water solution by adsorption-membrane filtration process [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2010, 32(4): 349-352.
- [42] Bryjak M, Wolska J, Soroko I, et al. Adsorption-membrane filtration process in boron removal from first stage seawater RO permeate [J]. Desalination, 2009, 241(1/2/3): 127-132.

【作者简介】 侯若昕(1988—),在读硕士研究生。E-mail: hrxlove@163.com。联系人: 张光辉, 电话: 022-27405059, E-mail: zgh@tju.edu.cn。

【收稿日期】 2011-11-14(修改稿)