

重金属废水处理技术概述

刘敏敏¹, 于水利¹, 侯立安^{1,2}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 第二炮兵后勤科学技术研究所, 北京 100011)

[摘要] 水体重金属污染正成为全世界最严重的环境问题之一, 多种多样的技术已被用于重金属废水的处理。本文综述了近年来用于重金属废水处理的常见工艺, 包括化学沉淀法、混凝-絮凝、电化学法、膜分离、离子交换法和吸附法等, 并对相关工艺进行了评述。

[关键词] 重金属废水; 膜分离; 离子交换; 吸附

[中图分类号] TQ424 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)07-0100-06

1 前言

随着经济社会发展, 重金属废水种类日趋增加, 电镀、采矿和金属制造业、工业机器生产、摄影和彩绘、农药和纺织工业等排放废水常含有镉、铜、镍、锡和钙等重金属。重金属废水的大量排放使得重金属已经成为了环境水污染的重要污染物之一。与有机污染物不同的是重金属不会衰减, 因此, 水一旦被重金属污染, 很难被修复。另外, 重金属产生的生物效应是长期存在的, 环境中的重金属会通过生物富集作用对生物体造成更大的伤害。

重金属离子的有效去除与分离是一项极具挑战性的工作, 目前重金属废水处理方法主要有三类: a. 化学法, 通过化学反应去除废水中重金属离子, 主要有化学沉淀、混凝-絮凝和电化学法等; b. 物理法, 在保持重金属离子原有化学形态的情况下, 通过浓缩、吸附而分离的方法, 主要包括膜分离、离子交换和吸附等; c. 生物法, 借助微生物或植物的絮凝、吸收及富集等作用去除重金属。

2 水体重金属污染状况

重金属对水环境的污染来源于自然和人为的

污染, 而人为污染是最重要的污染源。人类的活动使得水环境中的重金属浓度逐渐地上升, 对环境的危害日益严重, 我国水体的重金属污染问题十分突出。1983年, 京杭大运河杭州段发生了严重的重金属污染事件。近年来, 水环境中的镉污染也变得越来越严重。1994—1995年的上海市的水质普查报告显示: 污染水体的主要重金属污染物是镉, 其次是汞。近期的黄浦江水系表层沉积物中的污染物调查研究发现: 水中镉和铅的浓度超标, 汞的浓度明显地升高, 九条支流中铜、锌、镉和铅污染较严重, 苏州河流中铅浓度全部超标, 75%的河流存在镉浓度超标现象, 62.5%的河流中汞浓度超标^[1]。根据1993—1999年采集的太湖流域表层沉积物中重金属含量的年平均值显示: 总砷含量为467~1688 mg/kg, 总汞含量为0.062~0.125 mg/kg, 总铬含量为64.4~92.18 mg/kg, 总铜含量为18.1~155.7 mg/kg^[2]。2003年, 黄河、淮河、松花江和辽河等十大流域的重金属污染程度均超V类水体^[3]。城市河流中, 35.11%的河流的总汞浓度超过地表水Ⅲ类水体的标准, 18.46%的河流的总镉浓度超过地表水Ⅲ类水体的标准, 25%的河流存在总铅的超标现象^[4]。由长江、珠江和黄河等河流携带入海的重金

[收稿日期] 2014-05-23

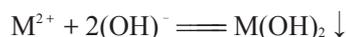
[作者简介] 于水利, 1962年出生, 男, 山东荣成人, 教授, 博士, 研究方向为水处理与技术及水的膜分离技术; E-mail: ysl@tongji.edu.cn

属污染物总量约为 3.4×10^4 t,对海洋水体造成了严重的污染。在我国近岸海域采集的海水样品中,铅的超标率达62.9%,铅浓度的最大值超一类海水标准49倍,铜的超标率为25.9%,汞和镉的浓度也出现超标现象^[5]。在大连湾的60%的观测站中采集的沉积物样品中镉的含量均超标,位于锦州湾的部分观测站的排污口邻近海域的沉积物中锌、镉和铅的含量均超过海洋沉积物Ⅲ类标准^[5]。总而言之,水体的重金属污染已成为我国最严重的环境污染之一。

3 重金属废水处理技术

3.1 化学沉淀法

化学沉淀法是指利用化学沉淀剂和水中的重金属离子反应,形成难溶的沉淀物,然后通过沉淀或过滤工艺,从水中分离出来。水中的重金属通过化学沉淀法得以去除的机理如下式所示:



M^{2+} 和 OH^- 分别表示水中溶解的金属离子和沉淀剂,而 $M(OH)_2$ 是难溶的金属氢氧化物。

化学沉淀法可以有效去除工业废水中的重金属,而且操作简单。在水处理中广泛使用的化学沉淀剂包括氢氧化物和硫化物。在氢氧化物沉淀的工艺中,Charerntanyarak采用石灰有效去除了废水中的Zn、Cd、Mn和Mg^[6]。Erdem采用黄铁矿和硫化铁,通过硫化物的沉淀作用,去除了水中的Cu、Cd和Pb^[7]。但是,化学沉淀法实际应用中存在一些局限性。化学沉淀法对于低浓度重金属废水的处理效果欠佳,因为氢氧化物的沉淀作用会产生大量低密度的沉淀物,不但大幅度地增加了脱水和处置沉淀物的工作量,而且在酸性条件下,硫化物沉淀剂也产生了如 H_2S 等次级污染物。

3.2 混凝-絮凝

混凝是通过中和胶体颗粒间的斥力而使得胶体颗粒失稳,从而产生絮体沉淀的过程。絮凝则是将不稳定的颗粒凝聚成大体积的絮体,絮体的体积不断地增大的过程。常见的混凝和絮凝方法为调整pH和添加硫酸亚铁、氯化铁、铝盐等作为絮凝剂,以便克服颗粒间的斥力。Li等利用氯化铁和聚合氯化铝两种商业絮凝剂去除水中重金属^[8]。研究发现当絮凝剂的浓度存在最优值,即水中重金属的去除率存在最大值。Kabdasli等通过将黄铁酸钠结合到聚乙烯亚胺上,制成新型的絮凝剂,并用于去除带

负电荷的金属^[9]。Ölmez等采用二乙基二硫氨甲酸对传统的混凝-絮凝工艺进行改进,实现了电镀废水中金属铜的有效去除^[10]。

混凝-絮凝工艺通常用于处理金属浓度低于100 mg/L或高于1 000 mg/L的无机废水,但也存在有局限性。混凝-絮凝工艺的操作成本较高,且其过程产生的污泥体积不断地增加,可能会阻碍废水处理中污泥对重金属的吸附作用,因此,需要将含有重金属的污泥转变成稳定的物质,以免重金属从污泥中泄露。

3.3 电化学法

电化学法通常包括电混凝、电渗析、电浮选和电化学沉淀等。电混凝技术是指通过添加富含电荷的聚合金属氢氧化物,将废水中的金属、胶体颗粒和无机污染物去除。Ipek等研究了采用不锈钢电极的电混凝处理含Ni(Ⅱ)和Zn(Ⅱ)的重金属废水,结果发现当电流密度为9 mA/cm²时,几乎100%的Ni(Ⅱ)和Zn(Ⅱ)重金属被去除^[11]。Kandah等研究了电混凝技术处理浓度为1 470 mg/L的含Cr(Ⅵ)的重金属废水^[12],实验结果表明:在最佳实验条件下,所有的Cr(Ⅵ)可以被去除。Shafaet等研究发现当电流密度为6.25 mA/cm²时,重金属废水中78.2%的Mn(Ⅱ)可以通过电混凝工艺被去除^[13]。

电渗析是指在一定的电势下分离水中离子的一种膜分离技术。Nataraj等比较了两种阳离子交换膜(全氟磺酸117和聚偏二氟乙烯膜)处理重金属废水的效果,结果显示当废水中重金属的初始浓度为0.84 mg/L和11.72 mg/L时,全氟磺酸117膜具有较好的去除效果,可以分别去除废水中90%的Co(Ⅱ)和69%的Ni(Ⅱ)^[14]。

电浮选是通过电解水所产生的微小的氢气和氧气气泡,将污染物上浮至水体表面的一种固液分离工艺。Sudilovskiy等研究了采用铝电极的电浮选工艺处理重金属废水,实验结果表明此工艺可以去除废水中99%的重金属离子,例如Fe、Ni、Cu、Zn、Pb和Cd^[15]。

电化学沉淀法是通过改进传统的化学沉淀法,使废水中重金属的去除率达到最大。Sadzadeha等发现电化学沉淀法可有效去除电镀废水中Cr(Ⅵ)^[16]。Plattes等采用超声和电化学沉淀法处理含有乙二胺四乙酸(EDTA)和铜的废水,发现95.6%的铜可被去除^[17]。

电化学法被认为是一种快速和有效地去除水

中重金属的技术。电化学处理技术所需化学试剂少、重金属去除率高、产生的污泥较少。但是,电化学处理技术需要很高的投资成本和昂贵的电费,因此限制了它在处理重金属废水中的广泛应用。

3.4 膜分离

膜分离工艺效率高,而且节省空间,因此膜分离在重金属废水处理领域具有很好的应用前景。常见的膜分离工艺包括微滤、超滤、纳滤和反渗透。

微滤和超滤是膜分离中最常用的两种工艺。微滤和超滤是基于膜孔大小,通过筛滤作用,去除水中悬浮物或胶体颗粒。微滤膜的孔径一般为 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$,而超滤膜的孔径为 $5 \sim 50 \text{ nm}$ 。Juang和Shiau等研究了采用壳聚糖对膜进行改性,去除废水中的Cu和Zn,结果表明改性后的膜能够去除水中100%的Cu和95%的Zn^[18]。

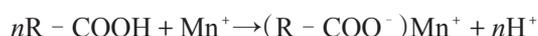
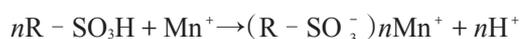
纳滤和反渗透被广泛应用于去除水中溶解性污染物,例如软化水或脱盐。纳滤膜适用于去除分子量为 $200 \sim 1\,000 \text{ Da}$ 的颗粒,而反渗透膜则适用于去除分子量小于 100 Da 的颗粒。纳滤膜常用于处理金属浓度为 $2\,000 \text{ mg/L}$ 的无机废水。Figoli等利用两种商业纳滤膜(NF90和NF30)去除模拟废水中的As(V)^[19],研究结果发现,通过增加溶液的pH,降低反应温度和进水砷的浓度,都能提高纳滤膜对水中砷的去除率。反渗透膜可以去除水中一系列的溶解态污染物。Ozaki研究发现超低压反渗透可以有效去除模拟和实际电镀废水中的Cu(II)和Ni(II)离子^[20]。Qdais等发现通过采用反渗透技术可以去除水中98%的Cu(II)和99%的Cd(II)离子^[21]。虽然纳滤对水中重金属的去除率并没有反渗透高,但纳滤所需压力比反渗透膜低,使其在实际水处理工艺中更受欢迎。

膜分离(微滤、超滤、纳滤、反渗透)能够高效去除水中的重金属离子,同时也存在一些局限性,例如膜易污染、堵塞和透过率比较低等。

3.5 离子交换

离子交换是一种固相和液相之间发生离子可逆交换的过程,首先离子交换剂去除电解质溶液中的离子,然后等量的其他离子释放到溶液中。典型的离子交换剂包括离子交换树脂、沸石、蒙脱石、泥土和土壤腐殖质,其中最常用的为离子交换树脂。通常选择的离子交换树脂是普通的阳离子交换树脂,包括带有磺酸基团 $-\text{SO}_3\text{H}$ 的强酸树脂和带有羧酸基团 $-\text{COOH}$ 的弱酸树脂。金属离子与树脂

上的氢离子进行离子交换反应的过程如下:



($\text{R} - \text{SO}_3^-$)和M分别代表阳离子交换树脂上的阴离子族和金属阳离子, n 是与金属离子氧化态相关的反应组分的系数。

Srivastava等研究了离子交换树脂去除废水中的有毒重金属(Cu、As、Pb)和有机污染物,实验结果表明改性后的离子交换树脂是去除重金属和有机物的有效介质^[22]。其他的离子交换树脂,如Amberlite IR-120和Dowex 2-X4也被用于去除实际电镀废水中的Zn(II)、Cr(III)和Cr(VI)重金属离子^[23]。离子交换树脂处理重金属废水的过程中同样存在局限性。首先,重金属废水需要进行合适的预处理,例如去除待处理废水中的悬浮固体;其次,离子交换树脂不能适用于去除所有的重金属,为了去除废水中不同类型的重金属,需要采用不同的离子交换树脂。

3.6 吸附

吸附是一种物质从液相传递到固相(吸附剂)的表面,并且通过物理或化学作用结合起来。由于吸附剂具有大的比表面积、高的吸附容量和很高的表面活性,因此吸附被认为是一种去除废水中重金属的有效、经济的方法。活性炭吸附剂、碳纳米管吸附剂、廉价的吸附剂、生物吸附剂和介孔硅吸附剂都被广泛应用于处理重金属废水中。

很多研究者研究了活性炭或改性活性炭去除废水中的重金属,Shafaei等研究了桉树皮制成的活性炭吸附废水中的Cu(II)和Pb(II),发现活性炭对Cu(II)和Pb(II)的最大吸附容量分别是 0.45 和 0.53 mmol/g ^[24]。Tzanetakis等基于家禽的羽毛而制备成活性炭,并用于处理重金属废水,发现它具有比商业活性炭更大的吸附力和吸附容量^[25]。Belkacem等研究了利用棕榈仁壳制成的改性活性炭去除水中的钙离子和锌离子的可行性^[26]。其他改性活性炭,例如海藻酸、单宁酸、镁和表面活性剂等改性后的活性炭,也可以提高其对水中重金属的去除率^[27]。

碳纳米管是Iijima在1991年被发现的一种新型吸附剂,主要包括单壁碳纳米管和多壁碳纳米管。研究报道碳纳米管在去除污染水体中的重金属方面具有很大的潜力。碳纳米管吸附金属离子的机制主要包括:静电引力、吸附-沉淀、金属离子和碳纳米管的表面官能团之间的化学反应^[28]。Babel等

用碳纳米管去除水中的某些二价重金属阳离子(Cu、Zn、Pb、Cd、Co),研究发现重金属吸附在碳纳米管上的顺序是 $Pb > Cd > Co > Zn > Cu$ ^[29]。研究报告碳纳米管还可以去除水中的Ca、Cd、Cu和Ni^[30]。Guo等利用酸化后的多壁碳纳米管吸附水中的Pb(II),发现改性后的碳纳米管不但可以吸附水中75.3%的Pb(II),而且中Pb(II)的吸附量比改性前大^[31]。

目前,很多的研究者致力于研究廉价的吸附剂。据Babel等报道,由农业废弃物、工业废弃物和天然物质制成的不同类型的廉价吸附剂在对污水中金属离子高吸附容量方面具有明显的优势,如天然壳聚糖(815 mg/g的Hg、273 mg/g的Cr和250 mg/g的Cd)、天然沸石(175 mg/g的Pb和137 mg/g的Cd)、废弃浆液(1 030 mg/g的Pb、560 mg/g的Hg和540 mg/g的Cr)和木质素(1 865 mg/g的Pb)等均具有较高的吸附容量^[32, 33]。

介孔材料因具有高的比表面积、规则的孔径和丰富的有机组分,从而具有对水中重金属的高去除率、高选择性和易于操作等特点,因此被广泛应用于去除废水中的重金属。Feng等通过将带有终端巯基族的单层的三硫基-丙基硅烷分子负载在介孔硅表面,并将此吸附剂用于去除污水中的汞、银和铅离子,发现出水水质可以达到饮用水的标准^[34]。Sangvanich等发现改性后的规则介孔材料可以对水或海水中的铜、铈和铊进行选择性地去除^[35]。Ide等研究了层状硅酸盐介孔材料选择性吸附海水中的锌离子^[36]。Chen等采用不同的有机硅烷对MCM-41分子筛进行改性,并将改性后的MCM-41分子筛应用于去除水中有害的金属(铜、钙、镉、砷、钴、锌等),然后从金属废水中分离金属氧化物(如 AsO_4^{3-} 、 CrO_4^{2-})并从混合物中回收贵金属(银、金、铂)等^[37]。

生物吸附剂因具有广泛的原料来源、低廉的价格和快速吸附的特点,在重金属废水处理领域吸引了众多研究者的关注。生物吸附剂适用于处理低浓度的重金属废水。生物吸附剂的主要来源分为三类:a.无生命的微生物例如树皮、木质素、虾、鱼苗、墨鱼、蟹壳和丝胶;b.海藻生物;c.微生物例如细菌、真菌和酵母菌等^[38]。Apiratikul等利用海洋绿大藻生物吸附剂吸附水中的Cu(II)和Zn(II),结果表明当生物吸附剂的投加量为20 g/L和pH为5时,海洋绿大藻能分别吸附1.46 mmol/g Cu(II)和1.97 mmol/g Zn(II)^[39]。Chen等研究了利用生物吸

附剂回收水中贵金属,实验结果表明丝胶和壳聚糖分别能吸附1.0和3.3 mmol/g的金,并且丝胶回收的金的纯度是99.5%^[40]。生物吸附剂的吸附机理非常复杂,尚处在研究阶段。此外,吸附后的生物吸附剂难以进行分离操作。

4 结语

水体重金属污染正成为是全世界最严重的环境问题之一,多种多样的技术已被用于处理重金属废水,但各有利弊。实际应用中应当针对不同类型重金属废水选择合适的方法或者将几种方法联用,以取得较好的处理效果。在今后的重金属废水处理研究中,应当加强对环境无影响的试剂的研究和利用,同时不断探索新的处理方法和思路并实现与传统处理工艺的有机结合。此外,重金属作为一类宝贵的资源,具有极高的使用价值,今后也应当加强重金属回用技术的研究。

参考文献

- [1] Yuan C G, Shi J B, He B. Speciation of heavy metals in marine sediments from the east china sea by ICP-MS with sequential extraction[J]. *Environment International*, 2004, 30(6): 769-783.
- [2] Ahn C K, Park D, Woo S H, et al. Removal of cationic heavy metal from aqueous solution by activated carbon impregnated with anionic surfactants[J]. *Journal of Hazardous Material*, 2009, 164, 1130-1136.
- [3] Chen C L, Hu J, Shao D D, et al. Adsorption behavior of multi-wall carbon nanotube/iron oxide magnetic composites for Ni(II) and Sr(II) [J]. *Journal of Hazardous Material*, 2009, 164, 923-928.
- [4] Chen Q Y, Luo Z, Hills C, et al. Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide[J]. *Water Research*, 2009, 43, 2605-2614.
- [5] Deng L P, Su Y Y, Su H, et al. Sorption and desorption of lead (II) from wastewater by green algae *Cladophora fascicularis*[J]. *Journal of Hazardous Material*, 2007, 143, 220-225.
- [6] Charemtanyarak L. Heavy metals removal by chemical coagulation and precipitation[J]. *Water Science & Technology*, 1999, 39(10-11): 135-138.
- [7] Özverdi A, Erdem M. Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} adsorption from aqueous solutions by pyrite and synthetic iron sulphide[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(1): 626-632.
- [8] Li Y, Zeng X, Liu Y. Study on the treatment of copper-electroplating wastewater by chemical trapping and flocculation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2003, 31(1): 91-95.
- [9] Kabdasli I, Arslan T, Ölmez-Hancı T. Complexing agent and heavy metal removals from metal plating effluent by electrocoagulation with stainless steel electrodes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165(1-3): 838-845.
- [10] Ölmez T. The optimization of Cr(VI) reduction and removal by electrocoagulation using response surface methodology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162 (2-3): 1371-1378.

- [11] Ipek U. Removal of Ni(II) and Zn(II) from an aqueous solution by reverse osmosis[J]. *Desalination*, 2005, 174, 161–169.
- [12] Kandah M I, Meunier J L. Removal of nickel ions from water by multi-walled carbon nanotubes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 146, 283–288.
- [13] Nanseu-Njiki C P, Tchamango S R, Ngom P C, et al. Mercury (II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168, 1430–1436.
- [14] Nataraj S K, Hosamani K M, Aminabhavi T M. Potential application of an electrodialysis pilot plant containing ion-exchange membranes in chromium removal[J]. *Desalination*, 2007, 217, 181–190.
- [15] Sudilovskiy P S, Kagramanov G G, Kolesnikov V A. Use of RO and NF for treatment of copper containing wastewaters in combination with flotation[J]. *Desalination*, 2008, 221, 192–201.
- [16] Sadrzadeha M, Mohammadi T, Ivakpour J, et al. Neural network modeling of Pb²⁺ removal from wastewater using electrodialysis[J]. *Chemical Engineering Process*, 2009, 48, 1371–1381.
- [17] Plattes M, Bertrand A, Schmitt B, et al. Removal of tungsten oxyanions from industrial wastewater by precipitation, coagulation and flocculation processes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 148, 613–615.
- [18] Juang R -S, Shiau R -C. Metal removal from aqueous solutions using chitosan- enhanced membrane filtration[J]. *Journal of Membrane Science*, 2000, 165(2): 159–167.
- [19] Figoli A, Cassano A, Criscuoli A. Influence of operating parameters on the arsenic removal by nanofiltration[J]. *Water Research*, 2010, 44(1): 97–104.
- [20] Ozaki H, Sharma K, Saktaywin W. Performance of an ultra-low-pressure reverse osmosis membrane (ULPROM) for separating heavy metal: Effects of interference parameters[J]. *Desalination*, 2002, 144(1-3): 287–294.
- [21] Qdais H A, Moussa H. Removal of heavy metals from wastewater by membrane processes: A comparative study[J]. *Desalination*, 2004, 164(2): 105–110.
- [22] Srivastava N K, Majumder C B. Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151, 1–8.
- [23] Sheng G D, Wang S W, Hua J, et al. Adsorption of Pb(II) on diatomite as affected via aqueous solution chemistry and temperature[J]. *Colloid Surf*, 2009, 339, 159–166.
- [24] Shafaei A, Rezayee M, Arami M. Removal of Mn²⁺ ions from synthetic wastewater by electrocoagulation process[J]. *Desalination*, 2010, 260(1-3): 23–28.
- [25] Tzanetakis N, Taama W M, Scott K. Comparative performance of ion exchange membranes for electrodialysis of nickel and cobalt[J]. *Separation and Purification Technology*, 2003, 30(2): 113–127.
- [26] Belkacem M, Khodir M, Abdelkrim S. Treatment characteristics of textile wastewater and removal of heavy metals using the electroflotation technique[J]. *Desalination*, 2008, 228(1-3): 245–254.
- [27] Kongsricharoern N C, Polprasert, Electrochemical precipitation of chromium (Cr⁶⁺) from an electroplating wastewater[J]. *Water Science & Technology*, 1995, 31(9): 109–117.
- [28] Pan B, Pan B, X. Chen X. Preparation and preliminary assessment of polymer-supported zirconium phosphate for selective lead removal from contaminated water[J]. *Water Research*, 2006, 40(15): 2938–2946.
- [29] Babel S, Kurniawan T A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 97(1-3): 219–243.
- [30] Kongsuwan A, Patnukao P, Pavasant P. Binary component sorption of Cu(II) and Pb(II) with activated carbon from eucalyptus camaldulensis dehn bark[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2009, 15(4): 465–470.
- [31] Guo M, Qiu G, Song W. Poultry litter-based activated carbon for removing heavy metal ions in water[J]. *Waste Management*, 2010, 30(2): 308–315.
- [32] Rao G P, Lu C, Su F. Sorption of divalent metal ions from aqueous solution by carbon nanotubes: A review[J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, 58(1): 224–231.
- [33] Wang H, Zhou A, Peng F. Mechanism study on adsorption of acidified multiwalled carbon nanotubes to Pb(II) [J]. *Colloid & Interface Sci.*, 2007, 316(2): 277–283.
- [34] Feng X, Fryxell G E, Wang L Q. Functionalized monolayers on ordered mesoporous supports[J]. *Science*, 1997, 276(5314): 923–926.
- [35] Sangvanich T, Sukwarotwat V, Fryxell G E. Selective capture of cesium and thallium from natural waters and simulated wastes with copper ferrocyanide functionalized mesoporous silica[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 182(1-3): 225–231.
- [36] Ide Y, Ochi N, Ogawa M. Effective and selective adsorption of Zn²⁺ from seawater on a layered silicate[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2011, 50(3): 654–656.
- [37] Chen X Q, Lam K F, Yeung K L. Synthesis of highly selective magnetic mesoporous adsorbent[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(22): 9804–9813.
- [38] Jiang M Q, Jin X Y, Lu X Q. Adsorption of Pb(II), Cd(II), Ni(II) and Cu(II) onto natural kaolinite clay[J]. *Desalination*, 2010, 252(1-3): 33–39.
- [39] Apiratikul P P R. Batch and column studies of biosorption of heavy metals by caulerpa lenillifer. *Bioresour[J]. Technol*, 2008, 99: 2766–2777.
- [40] Chen X, Lam K F, Mak S F. Precious metal recovery by selective adsorption using biosorbents[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1): 902–910.

Review on treatment technologies for heavy metal wastewater

Liu Minmin¹, Yu Shuili¹, Hou Li'an^{1,2}

(1.College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute for Logistic Science and Technology of the Second Artillery, Beijing 100011, China)

[Abstract] Heavy metal wastewater is becoming one of the most serious environmental problems today, a variety of technologies have been used to treat heavy metal wastewater. In this paper, the frequently-used treatment methods, which include chemical precipitation, coagulation-flocculation, electrochemical methods, membrane separation, ion-exchange and adsorption, were introduced, and their advantages and disadvantages were summarized.

[Key words] heavy metal pollution; ion-exchange; adsorption; membrane separation