

# 环境矿物材料去除废水中汞的研究现状

王 洁

(中国煤炭科工集团杭州研究院, 杭州 311201)

**摘要:**环境矿物材料是一类来源广泛、使用性能良好、对环境影响小的新材料,对含汞废水具有较好的吸附效果。本文综述了十多种环境矿物材料处理含汞废水的研究进展,并对未来应用环境矿物材料治理含汞废水提出了几点建议及展望。

**关键字:**环境矿物材料; 含汞废水; 吸附

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号: 1006-8759(2013)03-0014-05

## ENVIRONMENT MINERAL MATERIAL REMOVAL OF MERCURY IN WASTEWATER RESEARCH STATUS

WANG Jie

(Hangzhou Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Hang Zhou, 311201, China)

**Abstract:** Environment mineral source material is a kind of broad, good performance, small environmental impact of the new material on the mercury-containing wastewater treatment has good effects. This paper reviews the more than ten kinds of mineral materials on the environment of mercury-containing wastewater progress, and future application of environmental management of mineral materials made of mercury-containing wastewater suggestions and prospect.

**Keywords:** environment mineral material; mercury-containing wastewater; adsorption

### 1 概述

随着现代工业的发展,大量含有重金属的工业废水被排入江河湖泊中,重金属污染已经成为当前水污染的一个重要方面。汞具有特异的物理化学性能,因此被广泛用于冶金、化学、电气、仪表及军事工业等。

汞对人体的危害性极大,我国《污水综合排放标准》(GB8978-1996)中规定第一类污染物总汞最高允许排放浓度为0.05mg/L。据估算,全球每年排放到环境中的汞约为1.2万t,并且还在逐年增加(王吉中等,2005)。汞进入环境中后,由于不易被生物降解,通过土壤、水体等途径产生污染,尤其通过食物链在生物体内富集,对人体及其他生物可

造成严重危害。因此,去除或降低废水中的汞离子成为重金属污染治理领域中一项重要任务。

去除废水中重金属离子的方法较多,多年来人们一直把研究重点放在生物修复和物理化学修复上,大量如化学沉淀、络合、萃取、离子交换、氧化还原、硫化物沉淀法等方法(Orhan et al, 1993)。但传统的处理方法普遍存在二次污染、成本高、处理效果不理想等问题。因此,寻求新的治理技术是十分必要的。与传统方法相比,化学吸附法具有许多优点,它可以有选择性并有效地去除废水中低浓度重金属离子(Huang et al, 1984)。环境矿物材料以其来源广泛、成本低廉和无二次污染等特点,近年来在废水治理方面表现出了众多的优势,为治理重金属污染找到了一条新的途径(鲁安怀, 2002)。利用环境矿物材料去除水中汞离

子的方法主要有两种:一是物理吸附,即利用环境矿物材料疏松多孔的结构和表面积很大的特征,将汞离子从水中清除;二是化学吸附,即利用环境矿物材料的化学性质使吸附剂和汞离子结合,形成沉淀从而从水中清除。

## 2 天然环境矿物材料处理含汞废水

### 2.1 天然锰钾矿吸附水溶液中 $Hg^{2+}$

天然锰钾矿主要存在于大洋锰结核中,而大洋锰结核常见于 4000~6000m 的海底沉积物表层。结核中含有 40 多种矿物:主要锰矿物有钡镁锰矿、水羟锰矿和钠水锰矿 3 种。大洋锰结核具有比表面积大、孔隙率大、隧道孔结构特殊、层片状结晶结构等环境矿物学性质,因此锰结核有较强的吸附能力。前人如 Morgan (Morgan, 1964) 和 Posselt (Posselt et al, 1968) 指出了其高吸附机理包括离子交换和表面络合作用。Parida (Parida et al, 1996) 研究认为,锰结核对金属离子的吸附量与金属离子的水解常数、锰结核本身的零电点(锰结核的零电点  $pH_{zpc} \approx 4.5$ ) 以及锰结核表面的  $MOH^+$  (M 代表金属元素) 基团之间有一定的联系(韩洁, 2004)。锰钾矿( $KMnO_2$ ) 具有良好的环境属性,其晶体结构中  $2 \times 2$  共边的  $MnO_6$  八面体链构成一维孔道,孔径为 4.7。它通常具有较强的活性表面,不仅参与表面吸附,还会以离子交换的形式参与反应(Loganathan et al, 1973)。

高翔等(高翔等, 2001) 对天然锰钾矿的研究表明,锰钾矿具有表明吸附、离子交换、孔道效应和纳米效应等良好的环境属性,在污染水净化方面具有广阔前景。郑德圣等(郑德圣等, 2001) 试验研究发现:吸附反应 1 小时便能达到平衡吸附量的 80% 以上,20 小时以后接近吸附平衡。等温吸附曲线大致分为 2 段,在较低浓度阶段能较好地符合 Langmuir 吸附曲线,在该实验条件下其理论计算最大吸附量为 27.6 mg/g。pH 值较高或较低时均会影响对  $Hg^{2+}$  的吸附效率,在中性条件下吸附率较高。氯化物的存在影响吸附率的程度随 pH 值增高而减小,即在弱碱性条件下出现较高吸附率。样品对  $Hg^{2+}$  的吸附量随样品粒径的减小而增大。不同电解质的存在均会使吸附量降低,这主要归因于高价阳离子与  $Hg^{2+}$  在表面的吸附竞争及  $Cl^-$  与  $Hg^{2+}$  的络合。样品吸附  $Hg^{2+}$  达到平衡后,在受多种电解质干扰时其解吸率较低,不超过 20%。一般

在同种电解质影响下吸附量较大时解吸量较小。

### 2.2 天然褐铁矿处理含 $Hg^{2+}$ 废水

天然褐铁矿主要由  $FeO$ 、 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  以及少量的  $TiO_2$ 、 $CaO$ 、 $Cr_2O_3$  组成。天然铁的氧化物具有良好的吸附溶液中的重金属离子的性能主要是由于:在水中,金属氧化物和氢氧化物矿物表面结合有配位水构成水合金属氧化物和氢氧化物,大量的  $-OH$  基团,或单独存在或相互缔合,使矿物的界面羟基化。不同介质条件下,界面羟基可得到质子或者失去质子,因此界面羟基是两性基团。水中的金属阳离子、阴离子或弱酸根离子可以在这种矿物表面进行络合配位。

陈洁等(陈洁等, 2003) 研究了含  $Hg^{2+}$  废水 pH 值、浓度、离子强度、试样粒径、用量、时间这些因素的改变对  $Hg^{2+}$  的吸附率的影响,发现其中 pH 值的影响最大。一定初始  $Hg^{2+}$  浓度、一定条件下、吸附时间为 60min 时的吸附率可达到约 98%。

### 2.3 沸石分子筛处理含 $Hg^{2+}$ 废水

沸石(Zeolite)是沸石族矿物的总称,是一种架状的含水的碱式碱土金属铝硅酸盐矿物,是硅酸盐矿物中硅酸根中的硅被铝替换而形成的。沸石具有由  $Si-O$  和  $Al-O$  四面体所构建并由充填其中,有良好的过滤性能。位于孔道内的阳离子  $Na$  和  $Ca$  等与  $Si-Al$  骨干的联系力较弱,可进行孔道内的离子交换而不破坏晶格。沸石具有很高吸附能力和阳离子交换容量,利用这一特性可以去除水中的汞离子(T.Gebremedhin-Haile et al, 2003)。

江伟武等(江伟武等, 2000) 以沸石子筛进行处理含汞废水的研究,1g 分子筛的处理容量高达  $38mgHg^{2+}$ , 在  $pH=3\sim6$ ,  $pHg^{2+}=300mg/L$  范围内,去除率大于 99%。

### 2.4 天然磁铁矿处理含 $Hg^{2+}$ 废水

近年来的试验研究(赵谨等, 2001) 表明,天然磁铁矿对含  $Hg^{2+}$  废水处理效果良好。当温度为  $25^\circ C$ 、吸附平衡时间为 60min、试样用量为 20g/L、pH 为 6.40、离子强度为零时,初始浓度为 1.12mg/L 的  $Hg^{2+}$  在天然磁铁矿上的吸附率可达 98% 以上。介质 pH 值和离子强度、试样粒径和用量、废水浓度、实验温度及反应时间均对  $Hg^{2+}$  的吸附率有一定影响,其中 pH 的影响最大,而温度、试样粒径、用量和  $Hg^{2+}$  的初始浓度则影响较小。此外,研究还发现  $Hg^{2+}$  在天然磁铁矿上的吸附并不简单

遵守 Langmuir 或 Freundlich 等温吸附曲线,而是由两条首尾相连的 S 型曲线组成。这符合分级离子/配位离子交换等温曲线(Vaughan et al, 1995),反应  $\text{Hg}^{2+}$  在天然磁铁矿上的吸附过程具有多步骤吸附的特点。

## 2.5 硅藻土吸附废水中 $\text{Hg}^{2+}$

硅藻土( $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )是由海河中的单细胞低等水生植物硅藻的遗骸经过几百万年的沉积矿化作用而形成的生物矿物材料,本质是无定型的非晶质  $\text{SiO}_2$ ,含有少量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和有机质,其矿物成分为蛋白石。由于其生物成因,具有独特的有序排列的微孔结构、孔隙率高、孔体积大、质量轻、堆积密度小、比表面积大( $50 \sim 200 \text{m}^2/\text{g}$ )、导热系数低、吸附性强、活性好等优点,并且其分布广泛,价格低廉(Creedy et al, 1991)。

杜玉成等(杜玉成等,2004)阐述了硅藻土天然的微孔结构对污水中重金属离子的吸附作用及影响对重金属离子吸附速率的因素。袁笛等(袁笛等,2005)通过实验研究发现硅藻土对汞离子具有较好的出去效果,适宜吸附条件为: $t=10 \text{min}$ , $m=100 \text{g/L}$ , $\text{pH}=6 \sim 7$ , $C_0=180 \text{mg/L}$ 。硅藻土的微孔和表面积是进行吸附的重要部位,其吸附汞离子的作用机理主要有微孔吸附、表面配位吸附、表面配合吸附、离子交换吸附等。吸附后硅藻土经过处理可以用于砖的制备或是进行再生,处理设备简单,且没有二次污染,具有良好地应用前景。

## 3 改性环境矿物材料处理含汞废水

### 3.1 改性膨润土对 $\text{Hg}^{2+}$ 的吸附

膨润土是以蒙脱石为主要矿物成分的粘土,还含有少量石英、伊利石和高岭土。而蒙脱石成分为  $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,具有 2:1 型的层状硅酸盐结构,具有很强的吸附能力和离子交换能力。膨润土吸附水体中的  $\text{Hg}^{2+}$  是基于蒙脱石层间所吸附的阳离子与水体中这两种重金属离子的交换作用。离子交换吸附作用可表示为: $Z-M^++N^+=Z-N^++M^+$ ,式中 Z 为蒙脱石; $M^+$  为蒙脱石晶胞中的金属阳离子, $N^+$  为  $\text{Hg}^{2+}$ 。但是直接利用膨润土吸附  $\text{Hg}^{2+}$  效果并不明显,为获得更高的性能,需对膨润土进行改性。

李梦耀等(李梦耀等,2003)对膨润土进行了酸活化改性、钠该性、阳离子表面活性剂改性以及

焙烧活化改性,结果表明经过改性的膨润土去除效果比未经过改性的效果均好,在四种方法中,450℃焙烧 2h 活化改性效果最好,可使膨润土对  $\text{Hg}^{2+}$  的去除率提高 109%,且这种方法简单,不需加入改性试剂,对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附效果明显增强。

### 3.2 改性海泡石对 $\text{Hg}^{2+}$ 的吸附

海泡石(Sepiolite),化学通式为  $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,属斜方晶系,为链层状水镁硅酸盐或镁铝硅酸盐矿物,具有层链状结构的含水镁硅酸盐或镁铝石质硅酸盐矿物,呈纤维状。由于这种独特的结构,使海泡石具有较大的比表面积和一定的离子交换能力。但天然海泡石的吸附性和离子交换性很弱,其比表面积远未达到理论值。经研究证明,通过加热(烘烤、焙烧)、水热化、酸处理和离子交换等方法对其进行改性处理,改性后的海泡石其比表面积增大,吸附性能增强,离子交换容量增大,对  $\text{Hg}^{2+}$  有着较强的去除效果。

罗道成等(罗道成等,2003)对海泡石进行酸改性,在 20℃,滤速为 5mL/min, pH=5 时,浓度为 100mg/L 的  $\text{Hg}^{2+}$  溶液,经改性海泡石吸附后,其去除率达 98% 以上。实验发现 pH 值是影响吸附作用的重要因素,当  $\text{pH} \geq 5$  的弱酸性和弱碱性条件下吸附效果好。改性海泡石对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附主要是离子交换和表面络合吸附作用的结果。改性海泡石处理后废水中  $\text{Hg}^{2+}$  的含量显著低于国标容许的最高排放浓度。

### 3.3 煤系硫铁矿处理含 $\text{Hg}^{2+}$ 废水

煤系硫铁矿,一般存在于煤层的顶、底板或夹矸中,其含硫量在 18% 以上。有些夹矸中的硫铁矿呈结核状,含硫量达 30% 以上,这些硫铁矿多随煤采出或在煤炭洗选加工过程中以矸石形式排入矸石山,既污染环境又浪费资源。

陈冬梅等(陈冬梅等,2005)对天然煤系硫铁矿(SFeC)进行改性,将其与还原铁粉按一定比例混合制成改性煤系硫铁矿(GSFeC),从而对含汞废水的去除效果进行了研究,结果表明煤系硫铁矿对汞的去除能力很大,其加入量、粒度、pH 值、搅拌方式及反应温度对汞的去除率都有显著影响。煤系硫铁矿在改性后处理能力进一步增强,粒径在 0.08mm,处理温度为 200~2500C 时, pH 值在 5~6 时,去除汞的效果最好。利用煤系硫铁矿处理含汞废水,工艺简单、处理费用低、操作方便,实现

了“以废治废”的目的,开辟了煤系硫铁矿资源化利用新途径。

### 3.4 活性炭纤维吸附汞

活性炭(Activated Carbon)是一种孔隙结构发达、比表面积大的多孔炭素材料 (Dou Zhi feng, 2006)。活性炭在 100~200℃下可作为重金属的吸附剂(Kazukiko et al, 1997)。由于吸附剂用于吸附的主要是微孔,而活性炭纤维(ACFs)不仅其比表面积大 (是活性炭的两倍以上),而且微孔多(1.42nm),所以 ACFs 吸附速度更快,吸附容量更大。近年研究发现,用活性炭做成的纤维状的滤网可吸附汞。这种方法由于再生能力强,吸附效率高而非常具有潜力。活性炭材料的吸附性能取决于吸附剂的表面化学性质。可通过催化活性处理(Radisav et al, 2001),使材料表面上增加碱性或酸性官能团,增多表面上的吸附中心,从而极大地促进吸附。

美国匹兹堡大学的 Radisav D. Vidic 通过实验指出活性炭经硫、氯化物浸泡后对汞的吸附性能有了极大的提高,最高效率达到了 95%~98% (Radisav, 2001)。金峰采用了  $ZnCl_2$  溶液浸泡活性炭,进行了汞的吸附试验研究(金峰, 2003)。Soon-Jai Khan (Soon-Jai Khan, 1999)用活性炭制成的纤维状滤网进行了吸附单质汞的实验,吸附效率在 99%以上。

### 3.5 改性蛭石吸附废水中 $Hg^{2+}$

蛭石储量丰富,价格低廉,用于工业废水的处理是可行的。李晖等(李晖等, 2001)研究表明,蛭石对汞具有较强的吸附作用,吸附速度快,pH 是影响吸附的主要因素,pH 较小的酸性环境不利于吸附,pH 较高的中性至碱性条件下吸附效果好。蛭石经溴代十六烷基三甲胺(CTMAB)改性后对汞的吸附能力显著提高,蛭石和 CTMAB-蛭石对汞的吸附均满足 Langmuir 吸附等温式,饱和吸附容量分别为 3.11mg/g、24.33mg/g。饱和吸附量金属离子的蛭石,可以用 HCl 或 NaCl 进行多次再生,重复使用。被洗脱下来的重金属离子的浓度较高,可用化学法沉淀,回收利用。多次使用后废弃的蛭石可用作制砖的填料。此外,还发现蛭石与絮凝剂聚硫酸铝联合处理汞的效果好,去除率一般能达到 80%以上。

## 4 工业废弃物处理含汞废水

粉煤灰是发电厂的废产品,主要成分为碳和硅的氧化物、铝氧化物、铁氧化物及钙、镁、钠、钾、硫的氧化物。AsitK.Sen 认为粉煤灰对  $Hg^{2+}$  的吸附效果甚至比活性炭优异,去除率可达 99.99% 以上。王代芝等(王代芝等, 2004)研究了粉煤灰在不同条件下处理含  $Hg^{2+}$  废水的能力。结果表明,在 pH 值为 9.5 左右、吸附时间为 40min 的条件下,用粉煤灰可将含  $Hg^{2+}$  废水浓度从 1.6mg/L 降低到 0.022mg/L,去除率达 98.6%。处理费用约为 0.4 元/t 左右。废水达标后可直接排放,符合国家规定的排放标准,无二次污染。

## 5 展望

综上所述,环境矿物材料来源广泛并具有良好的使用性能,环境矿物治理方法具有设备简单、成本低廉、效果好且无二次污染等特点,因此在废水净化应用方面具有广阔的前景。

从目前的利用方面来看,虽然环境矿物材料在我国资源丰富,但利用程度却很低,而且大多数材料的利用还都处在实验室的研究阶段,距实际的大规模综合利用还有较大的距离。笔者对今后环境矿物材料在废水治理的应用有以下几点建议与展望:

(1) 进一步深入研究矿物表面的物理化学特征,完善矿物去除重金属离子的理论。为今后深入研究打下基础。

(2) 用环境矿物材料治理汞污染时,不能根除其毒性,建议今后在实际应用中加强从吸附后的矿物材料中回收利用汞的方法的研究。

(3) 利用环境矿物材料制备吸附剂,原料来源广,制备容易、价格低廉,但吸附剂使用寿命短,希望以后通过合理改性延长使用寿命。

(4) 加强利用矿物材料治理重金属污染的工艺流程的研究,以期早日形成较成熟、大规模的处理工艺。

尽管目前大规模利用矿物材料处理废水还存在很多问题和困难,但随着对环境矿物材料的不断开发,环境矿物材料在废水治理方面研究的不断深入,环境矿物材料在水处理领域将发挥越来越重要的作用。

## 参考文献

[1]宋书巧,梁利芳,周永章等.广西习江沿岸农田受矿山重金属污

- 染现状与治理对策 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22 (2): 152~155.
- [2] Orhan Y, Buyukungor H. 1993. The method to dispose the metal ion [J]. Water Sci. Technol, 28(5): 247~251.
- [3] Morgan J J, Stumm W. 1964. Colloid chemical properties of manganese dioxide [J]. J. Colloid Interface Sci, 19: 347~359.
- [4] Posselt H S, Erson F J, Weber W J. 1968. Cation sorption on colloidal hydrous manganese oxide [J]. Environ. Sci. Technol, 2: 1087~1093.
- [5] Parida k M, Satapathy P K, Das N N. 1996. Studies on Indian Ocean Manganese Nodules IV: Adsorption of some bivalent heavy metal ions onto ferromanganese nodules. [J]. Colloid Interface Sci, 181: 456~462.
- [6] 胡宁静, 李泽琴, 黄朋等. 我国部分市郊农田的重金属污染与防治途径 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(3): 251~254.
- [7] 王亚平, 裴韬, 成杭新等. B 城近郊土壤柱状剖面中重金属元素分布特征研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 144~148.
- 鲁安怀. 矿物环境属性与无机界天然自净化功能 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(3): 192~197.
- [8] 高翔, 鲁安怀, 秦善等. 天然锰钾矿晶体化学特征环境属性表现研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 477~484.
- [9] 郑德圣, 鲁安怀, 秦善等. 天然锰钾矿吸附水溶液中  $Hg^{2+}$  的实验研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 559~564.
- [10] 陈洁, 鲁安怀, 赵谨等. 天然褐铁矿处理含  $Hg(II)$  废水的实验研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(4): 355~359.
- [11] T. Gebremedhin-Haile, M. T. Olguín and M. Solache-Ríos. Removal of Mercury Ions from Mixed Aqueous Metal Solutions by Natural and Modified Zeolitic Minerals [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2003, 148: 179~200.
- [12] 江伟武, 雷恒毅, 张小红. 沸石分子筛处理含汞废水研究 [J]. 广大工业大学学报, 2000, 17(3): 97~99.
- [13] 赵谨, 鲁安怀, 姜浩等. 天然磁铁矿处理含  $Hg(II)$  废水实验研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 549~554.
- [14] Creedy J, Slottje D J. 1991. Conspicuous consumption in Australia [D]. Melbourne: University of Melbourne.
- [15] 杜玉成, 叶力佳, 刘燕琴. 硅藻土吸附重金属离子  $Cd^{2+}$  的动力学研究 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2004, 7(38): 38~40.
- [16] 袁笛, 王莹, 李国宏等. 硅藻土吸附工业废水中汞离子的研究 [J]. 环境保护科学, 2005, 128(31): 27~29.
- [17] 李梦耀, 刘建. 膨润土的改性研究及其应用 [J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(2): 76~78.
- [18] 李梦耀, 车红荣. 膨润土的改性研究及在污水治理中的应用 [J]. 长安大学学报(建筑与环境科学版), 2004, 21(2): 42~45, 51.
- [19] 李梦耀, 王莉平, 车红荣. 改性提高膨润土阳离子交换容量研究 [J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(3): 30~32.
- [20] 罗道成, 易平贵, 陈安国等. 改性海泡石对废水中  $Pb^{2+}$ 、 $Hg^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  吸附性能的研究 [J]. 水处理技术, 2003, 29(2): 89~91.
- [21] 陈冬梅, 王强. 煤系硫铁矿处理含汞废水的研究 [J]. 洛阳师范学院学报, 2005, 5: 43~45.
- [22] 金峰. 催化活性炭脱硫脱硝除汞的试验研究. [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2003: 25~30.
- [23] Kazukiko Tsujii and Kwo Shiraishi. Combined desulfurization denitrification and reduction of air toxics using activated coke. 1. Activity of activated coke [J]. Fuel, 1997, 76(6): 549~553.
- [24] Radisav D V and Douglas P S. 2001. Vapor-phase elemental mercury adsorption by activated carbon impregnated with chloride and chelating agents [J]. Carbon, 39(1): 3~14.
- [25] Radisav D. 2001. Vapor-phase elemental mercury adsorption by activated carbon impregnated with chloride and chelating agents [J]. Carbon, 39: 3~14.
- [26] Soon -Jai Khang, Keener T C. Advanced technologies for reduction of emissions from coal usage. Fuel, 1999, 79: 243~248.
- [27] 李晖, 谭光群, 李瑞. 蛭石对汞的吸附性能研究 [J]. 重庆环境科学, 2001, 2(23): 65~67.
- [28] 王代芝, 赵艳萍. 粉煤灰处理含汞废水的研究 [J]. 化学与生物工程, 2004, 6: 49~50.
- [29] Asit K. Sen et al. 1987. Adsorption of Mercury(II) by Coal Fly Ash [J]. Water Research, 21.