

# 用于水处理的高效除磷型粉煤灰陶粒滤料的研制

罗沛聪<sup>1,2,3</sup> 刘怡<sup>1\*</sup> 罗隽<sup>2</sup> 王振兴<sup>2</sup> 闫梦玥<sup>2,4</sup> 朱满<sup>2,4</sup>

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655;  
3. 审计署驻广州特派员办事处, 广州 510623; 4. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

**摘要** 为制备用于处理含磷废水的新型功能陶粒滤料, 研究了以粉煤灰为主要原料的高效除磷型陶粒烧结制备工艺。通过 $L_9(3^4)$ 正交实验和极差分析, 结合筒压强度实验得到最佳烧结条件为: 预热时间 30 min, 烧结温度 950℃, 烧结时间 30 min; 各因子对除磷效率的影响程度为: 烧结温度 > 烧结时间 > 预热时间。通过理化性质测试得出最佳工艺制备的陶粒特性: 堆积密度为 877 kg/m<sup>3</sup>, 表观密度为 1 509 kg/m<sup>3</sup>, 空隙率为 41.9%, 筒压强度 6.94 MPa, 盐酸可溶率为 2.3%。应用最佳工艺条件所制备的陶粒处理 10 mg/L 含磷废水获得高达 99.83% 的磷酸盐去除率。通过最佳烧结工艺能够制备高效除磷型粉煤灰陶粒滤料, 在处理含磷废水方面具有一定的应用前景。

**关键词** 陶粒 粉煤灰 除磷 滤料 烧结工艺

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)11-3849-06

## Preparation of fly ash ceramsite with high phosphorus removal efficiency used for filter material

Luo Peicong<sup>1,2,3</sup> Liu Yi<sup>1</sup> Luo Jun<sup>2</sup> Wang Zhenxing<sup>2</sup> Yan Mengyue<sup>2,4</sup> Zhu Man<sup>2,4</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;  
2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China;  
3. CNAO's Guangzhou Resident Office, Guangzhou 510623, China;  
4. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract** To manufacture a new ceramsite filter for phosphorous wastewater treatment, the sintering process of fly ash ceramsite was experimentally investigated. The orthogonal experiment  $L_9(3^4)$ , range analysis and cylindrical compress strength experiments were conducted and the optimum conditions for sintering process were obtained as follows: preheating temperature of 400℃, preheating time of 30 min, sintering temperature of 950℃, and sintering time of 30 min. In addition, the influential degree of phosphorus removal efficiency was ranked: sintering temperature > sintering time > preheating time. The physical-chemical parameters of fly ash ceramsite were tested: piled density was 877 kg/m<sup>3</sup>, apparent density was 1 509 kg/m<sup>3</sup>, void fraction was 41.9%, cylindrical compress strength was 6.94 MPa, and solubility in hydrochloric acid was 2.3%. Phosphate (concentration of 10 mg/L) removal efficiency of 99.83% was obtained by ceramsite produced under optimum conditions. The new ceramsite filter with high phosphorous removal efficiency could be achieved by the optimum sintering process, and showed an application prospect for treating phosphorous wastewater.

**Key words** ceramsite; fly ash; phosphorus removal; filter material; sintering process

近年来, 固体废弃物和资源保护问题在全球范围受到广泛关注。粉煤灰是热电厂燃煤发电产生的废弃物, 其主要成分为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO 和其他氧化物。2009 年, 我国粉煤灰年产量近 3.8 亿 t, 随着电力工业的发展还有逐年增加的趋势, 由于其回收利用率较低(国内 2008 年为 67%), 对环境造成了沉重压力, 如何实现粉煤灰的资源化处置

利用成为现阶段研究的热点<sup>[1-8]</sup>。

基金项目: 国际科技合作项目(2009DFA91780); 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2008ZX07211-04)

收稿日期: 2011-09-05; 修订日期: 2011-11-08

作者简介: 罗沛聪(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事水污染控制工程方面的研究工作。E-mail: luopc33@gmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: 364285304@qq.com

利用粉煤灰处理含磷废水成为其资源化利用的研究方向之一。Kuziemska<sup>[9]</sup>于1980年首次报道了利用褐煤粉煤灰用作磷酸盐絮凝沉淀剂的研究。Ugurlu等<sup>[10]</sup>探索了粉煤灰对磷酸盐具有高效吸附性能的机理。Cheung等<sup>[11-13]</sup>研究了不同钙、铁、硅和铝含量的粉煤灰对磷酸盐去除性能的影响。另外,粉煤灰可作为陶粒生产的原料,用于水处理滤料和填料。Zhao等<sup>[14]</sup>制备的污泥-粉煤灰陶粒比粘土陶粒具有更好的COD和NH<sub>3</sub>-N去除功能;齐元锋等<sup>[15]</sup>利用脱水污泥和粘土,添加粉煤灰烧结了用作水处理填料的超轻陶粒;郝斐等<sup>[16]</sup>研制了轻质/超轻粉煤灰陶粒并对其烧胀机理进行研究;Han等<sup>[17,18]</sup>将污泥-粉煤灰陶粒用于厌氧生物反应器填料并与商品陶粒进行了对比研究;刘宝河等<sup>[19]</sup>制备了具有吸附除磷特性的TBX多孔陶粒滤料;蒋丽等<sup>[20]</sup>对粉煤灰陶粒进行了磷酸盐的吸附实验,并对除磷机理进行了研究。

虽然已有研究发现粉煤灰具有良好的除磷性能,并且可用其制造水处理陶粒,但在这些研究中多是将粉煤灰作为一种辅料(而非主要原料)用于制备,或主要对除磷机理进行探讨,并未深入研究其最佳的烧结制造工艺。同时,市场上出售的水处理陶粒多为生物陶粒,用作生物膜载体,并未赋予陶粒特别的吸附除磷和沉淀除磷等功能。考虑到我国对于营养型污染物氮磷要求越来越严,而城市二级污水处理厂对磷的去除效果仍难达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)的总磷排放一级A标准(0.5 mg/L)<sup>[21]</sup>。因此,本实验开展了用粉煤灰做主要原料的高效除磷型陶粒滤料烧结制造工艺研究,应用正交实验,以除磷效率为评价指标,运用极差法对各因子水平下的磷酸盐去除率进行分析,结合筒压强度指标,开发了制备高强高效除磷型粉煤灰陶粒滤料的烧结工艺,为粉煤灰资源化提出一条新途径,及在用作水处理滤料强化废水除磷,以升级改造现有一些除磷工艺、入河入湖污染控制和水体富营养化控制等方面提供了参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料及试剂

粉煤灰取自广东某电厂,膨润土和熟石灰产自武汉某矿业公司,商品陶粒A和商品陶粒B分别产自江西和山东,均为粘土陶粒;磷酸二氢钾

(分析纯,广州化学试剂厂)用于配制模拟含磷污水;钼酸铵(分析纯,天津市化学试剂四厂)、抗坏血酸(分析纯,天津市大茂化学试剂厂)和硫酸(分析纯,广州化学试剂厂)用于测定溶液中磷酸盐的浓度。

#### 1.1.2 实验仪器

使用圆盘成球机造粒,马福炉(KLS05/13,德国Therm-Concept公司)烧结成型,紫外可见分光光度计(DR5000,美国HACH公司)检测溶液中磷酸盐的浓度,CMT5504型电子万能力学实验机测定筒压强度,扫描电子显微镜(日本HITACH公司,S-3700N)观察陶粒微观结构。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 原料化学成分测定

原料化学成分按照《水泥化学分析方法》(GB/T176-2008)检测,以元素氧化物质量分数的形式进行描述(表1)。

表1 原料化学成分分析

Table 1 Chemical component analysis of raw materials  
(质量百分数)

原料	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	烧失量
粉煤灰	46.51	34.61	5.08	3.72	0.96	0.93	0.73	5.37
膨润土	58.43	11.26	1.06	1.78	1.50	—	—	—

### 1.2.2 粉煤灰陶粒制备流程

按照50%(质量分数,下同)粉煤灰(过200目筛),35%膨润土,10%熟石灰和5%自来水的配比,把原料放入圆盘成球机中机械成球,使之粒径在6mm左右,然后平铺到高温托盘上,设定马福炉升温程序,升至400℃时放入炉中。待烧结完成,自然冷却后即得粉煤灰陶粒(粒径约5mm),装袋备用。制备流程如图1所示。

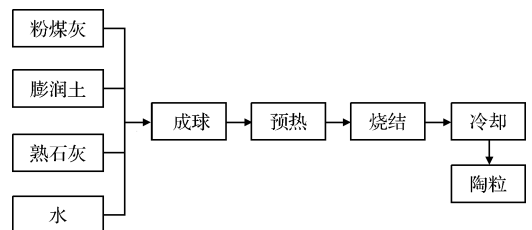


图1 粉煤灰陶粒制备流程

Fig. 1 Flow chart of fly ash ceramsite preparation

### 1.2.3 静态除磷实验

磷酸二氢钾溶于去离子水配制浓度为50 mg/L

的储备液,实验时取一定量稀释至 10 mg/L 使用,取 50 mL 倒入 100 mL 锥形瓶, pH 为自然值(约为 7.0),称量 1.00 g 陶粒放入瓶中塞紧盖子并放入恒温振荡器,实验条件为:温度 25℃,振荡速率 150 r/min,振荡时间 24 h。振荡完毕后在 3 000 r/min 的条件下离心溶液 10 min,取上清液参照《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893-1989)测定磷酸盐浓度。

#### 1.2.4 陶粒理化性质测定

筒压强度参照《轻集料及其试验方法 第 2 部分:轻集料试验方法》(GB/T 17431.2-1998)测定,堆积密度、表观密度、空隙率和盐酸可溶率等指标参照《水处理用人工陶粒滤料》(CJ/T 299-2008)测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素实验

为得出高除磷效率粉煤灰陶粒的烧结工艺,拟采用  $L_9(3^4)$  正交法进行实验研究,选取了预热时间、烧结温度和烧结时间 3 个因子。为确定各因子的水平,设计出正交表,进行了一系列单因素实验。

#### 2.1.1 预热时间探索

预热的作用主要是将原料中的有机物氧化并去除各种形式的水,根据经验将预热温度定在 400℃。在探索预热时间上,进行了时间间隔分别为 5 min 和 10 min 的 2 组实验,结果如表 2 所示。

表 2 预热时间间隔为 5 min 和 10 min 的除磷效率比较

Table 2 Comparison of phosphorus removal efficiency at preheating time intervals of 5 min and 10 min

时间间隔 (min)	预热温度 (℃)	预热时间 (min)	烧结温度 (℃)	烧结时间 (min)	磷酸盐去除率 (%)
5	400	25	950	30	99.06
		30	950	30	99.57
10	400	15	1 000	45	71.98
		25	1 000	45	40.62

由表 2 可知,间隔为 5 min 时,2 组试样的磷酸盐去除率基本没有差异,而当间隔为 10 min 时差异明显,因此确定预热时间的间隔为 10 min。

#### 2.1.2 烧结温度与烧结时间探索

对在预热温度为 400℃,预热时间 25 min,烧结时间 45 min,烧结温度分别为 850、900、950、1 000、1 050、1 100 和 1 150℃ 条件烧结的陶粒进行了静态除磷实验,结果如图 2 所示。当烧结温度为 950℃ 时,磷酸盐去除率最高,接近 100%,而随着温度的再升高,磷酸盐去除率逐渐下降,在 1 150℃ 时,几乎没有除磷效果。

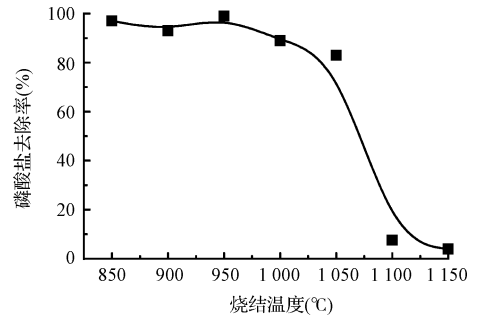


图 2 烧结温度对磷酸盐去除率的影响

Fig. 2 Influence of sintering temperature on phosphate removal rate

通过观察发现,造粒成型而未烧结的粉煤灰陶粒表面和剖面均呈灰色,含水率越高颜色越深;烧结充分的粉煤灰陶粒其表面和剖面呈均匀黄色,烧结温度越高,颜色越深;而未烧透的粉煤灰陶粒表面显黄色,剖面却有部分呈现未烧结时的灰色,灰色部分越多表明烧结越不充分。

对上述不同温度烧结的陶粒剖面进行观察时发现,850℃ 烧结的陶粒虽然表面呈现黄色,但剖面仍有部分呈灰色,其他温度下烧结的陶粒其表面和剖面都呈现均匀的黄色,表明粉煤灰陶粒在 850℃ 下未能烧透。结合除磷效率选取 900、950 和 1 000℃ 作为烧结温度的 3 个水平。

此外,在预热温度为 400℃,预热时间为 25 min,烧结温度为 900℃ 时,选取烧结时间分别为 10、20、30 和 40 min 进行了烧结实验,通过剖面观察发现烧结时间少于 30 min 时陶粒剖面球心部分仍呈现未烧结状态下的灰色,表明此条件下未能充分烧结;只有烧结时间不少于 30 min 时,陶粒剖面才呈现表明充分烧结的均匀黄色,因此,烧结时间不应少于 30 min。

### 2.2 正交实验

根据单因素实验结果,设计了表 3 所示的  $L_9(3^4)$  正交实验方案,实验结果如表 4 所示。

表3  $L_9(3^4)$  因子水平表Table 3 Factors and levels of  $L_9(3^4)$ 

因子	水平1	水平2	水平3
A 烧结时间 (min)	30	40	50
B 烧结温度 (°C)	900	950	1 000
C 预热时间 (min)	10	20	30

表4  $L_9(3^4)$  实验结果和极差分析Table 4 Experimental results and range analysis of  $L_9(3^4)$ 

实验号	A	B	C	磷酸盐去除率 (%)
1	1	1	1	99.11
2	1	2	2	99.51
3	1	3	3	80.93
4	2	1	2	98.93
5	2	2	3	98.60
6	2	3	1	69.65
7	3	1	3	97.53
8	3	2	1	97.53
9	3	3	2	42.30
$K_1$	279.55	295.57	266.29	240.01
$K_2$	267.19	295.64	240.74	266.69
$K_3$	237.37	192.88	277.06	277.39
$k_1$	93.18	98.52	88.76	80.00
$k_2$	89.06	98.55	80.25	88.90
$k_3$	79.12	64.29	92.35	92.46
极差 R	14.06	34.25	12.11	12.46

不同工况烧结的9组陶粒中,6组的除磷效率均在97%以上,只有3组小于90%,其中除磷效率最高达99.51%,最低为42.30%。

各因子水平中,磷酸盐平均去除率最高的为烧结温度水平2,即950°C,达到98.55%,最低的是烧结温度水平3,即1 000°C,为64.29%,烧结温度的极差达34.25%,是其他因子的2倍多,可见烧结温度对除磷效率的影响程度最高。影响程度排第二的是烧结时间,极差为14.06%,但仅比预热时间大不足2%。因此,各因子对除磷效率的影响程度为B > A > C,即烧结温度 > 烧结时间 > 预热时间。

对于烧结时间,3个水平中平均除磷效率最高的为30 min,达93.18%;对于预热时间,最高的为30 min,达92.46%。对于烧结温度,最高的为950°C,达98.55%,但与900°C相差不大;为了进一步确定最佳烧结温度,对在预热温度为400°C,预热和烧结时间均为30 min,烧结温度分别为900°C和950°C条件下烧结的陶粒进行了筒压强度实验。实

验结果表明,900°C和950°C条件下的陶粒其筒压强度分别为6.39 MPa和6.94 MPa,而《轻集料及其试验方法 第1部分:轻集料》(GB/T 17431.1-1998)要求不低于6.5 MPa,因此选取950°C作为最佳烧结温度才能使陶粒达到高强标准。由此得最佳烧结工艺为 $A_1B_2C_3$ ,即预热时间30 min,烧结温度950°C,烧结时间30 min。

三因子对磷酸盐去除率的影响如图3所示,随烧结时间的延长,磷酸盐去除率先缓后快地下降,从30 min升至40 min时下降约4%,而从40 min升至50 min时降低至80%以下,降幅近10%,可见随着烧结时间的进一步增加,除磷效率的下降幅度将逐渐加大。研究表明,沉淀作用和吸附作用是陶粒除磷的两大作用机理,陶粒中富含能供碱和释放与磷发生沉淀反应的钙、镁等金属离子的有效矿物成分,及其较大的比表面积可以提高除磷效率<sup>[19]</sup>。在高温条件下,原料中的 $SiO_2$ 和 $Al_2O_3$ 成分在陶粒表面形成釉质层,并进一步玻璃化<sup>[15]</sup>,延长烧结时间将提高形成玻璃体的化学反应程度,生成更多的玻璃体,而玻璃体是难以溶解并释放有效的除磷成分的,玻璃体的生成使陶粒中能供碱和溶出钙、镁等离子的矿物成份含量下降,削弱沉淀作用,导致除磷效率降低。

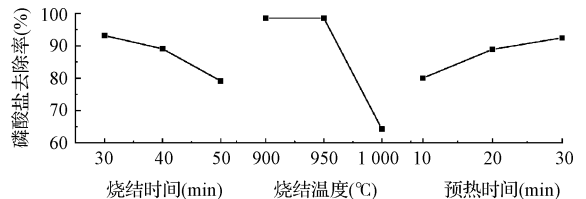


图3 三因子对磷酸盐去除率的影响

Fig. 3 Influence of 3 factors on phosphate removal rate

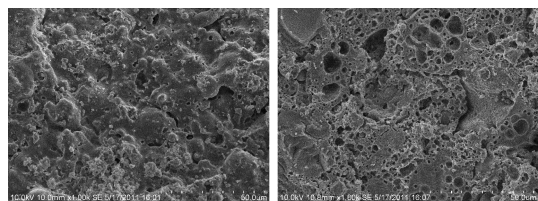
同样地,随着烧结温度的升高,除磷效率随之下降,从900°C到950°C时,下降趋势不明显,但升至1 000°C时,除磷效率急剧下降,降幅超过30%。推测这是由于超过950°C之后,烧结的陶粒其结构和矿物成分发生了很大的变化,使除磷性能下降,烧结温度成为能否制备出高效除磷型粉煤灰陶粒的关键因素。在900°C的高温条件下,陶粒表层初步成釉,同时原料中的碳酸盐成分逐渐融化和分解<sup>[16]</sup>,当烧结温度升至950°C时,碳酸盐成分进一步融化分解,逸出的气体使表面成孔增多,从而使比表面积加大,钙、镁等金属离子溶出通道随之增加,同时也提高了陶粒的抗压强度,使其达到了高强轻集料的强度标

准。但随着温度继续升高,釉质层变得更加致密,厚度更大,玻璃化程度更高<sup>[15]</sup>,原本具有除磷功能的矿物成分逐渐减少,大量生成玻璃体,这导致陶粒的除磷效率大幅下降,可见烧结温度不宜超过 950℃。

另外,随着预热时间的延长,磷酸盐去除率小幅上升,因为预热时水分蒸发使陶粒表面形成微孔,既增大了比表面积,也有利于金属离子溶出,但过度延长时间会增厚陶粒表层壳体<sup>[22]</sup>,影响溶出金属离子,导致除磷效率下降<sup>[19]</sup>。

### 2.3 粉煤灰陶粒的微观结构分析(SEM)

对最佳生产工艺制备的陶粒进行了扫描电镜观察,分别对其表面和剖面放大 1 000 倍(图 4)。图 4(a)显示陶粒表面凹凸不平,粗糙程度高,微孔分布广,其孔径主要集中在 1~5 μm。粗糙不平和多微孔的表面增大了陶粒的比表面积,增加了有效除磷成分的溶出路径,从而有利于强化废水除磷功能。



(a) 表面(×1 000)

(b) 剖面(×1 000)

图 4 陶粒表面和剖面 SEM 照片

Fig. 4 Pictures of ceramsite surface and profile by SEM

图 4(b)显示其剖面孔隙结构发达,呈蜂窝状,孔径大小不一,大的可达 10 μm,小的约 0.5 μm,同时其微孔较深。由此推测,当陶粒在长期水力冲刷条件下磨损表面后,原本的内部将成为新的陶粒表面,此时丰富的孔隙结构将使比表面积更大,矿物溶出路径更多,更有利于除磷,延长了陶粒的使用寿命。

### 2.4 粉煤灰陶粒的理化性质测定

对最佳工艺烧结的陶粒进行了相关理化性质测定,其中堆积密度为 877 kg/m<sup>3</sup>,密度等级为 900 级,比国内常见粉煤灰陶粒产品的堆积密度(700~850 kg/m<sup>3</sup>)<sup>[23]</sup>略高,这是为了提高陶粒的力学性能,在使用圆盘成球机造粒时制备了结构更加致密的规整颗粒,其烧结后的筒压强度达到 6.94 MPa,超过国家标准中对高强轻集料 6.5 MPa 的要求。另外,自制陶粒的表观密度、盐酸可溶率、空隙率分别为 1 509 kg/m<sup>3</sup>、2.3% 和 41.9%,具有较强的耐酸蚀性能和适度的颗粒间空隙。

## 3 结 论

(1)以粉煤灰为主要原料,添加一定量膨润土和熟石灰,能够烧结出高效除磷型陶粒,由正交实验并结合筒压强度实验,结果显示最佳工艺条件为:预热温度 400℃,预热时间 30 min,烧结温度 950℃,烧结时间 30 min。

(2)正交实验各因子对除磷效率的影响程度为烧结温度>烧结时间>预热时间,随着烧结温度和烧结时间的继续升高与延长,除磷效率快速降低。

(3)利用 SEM 观察最佳工艺烧制的陶粒发现其表面粗糙多微孔,内部孔隙发达,呈蜂窝状结构。经理化性质测定显示其堆积密度为 877 kg/m<sup>3</sup>,表观密度为 1 509 kg/m<sup>3</sup>,空隙率为 41.9%,筒压强度为 6.94 MPa,盐酸可溶率为 2.3%。

(4)按实验条件应用最佳工艺制备的陶粒处理 10 mg/L 含磷废水时可得出高达 99.83% 的磷酸盐去除率,在处理含磷废水方面和富营养化水体修复方面有一定的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 郭常颖,李多松,万田英. 粉煤灰资源化现状研究. 煤炭工程,2005,51(11): 68-69  
Guo Changying, Li Duosong, Wan Tianfang. Status study on fly ash recycling. Coal Engineering, 2005, 51(11): 68-69 (in Chinese)
- [2] Iyer R. S., Scott J. A. Power station fly ash — A review of value-added utilization outside of the construction industry. Resources, Conservation and Recycling, 2001, 31(3): 217-228
- [3] 邓琨. 固体废弃物综合利用技术的现状分析——对粉煤灰、煤矸石、尾矿、脱硫石膏和秸秆综合利用技术专业化的探析. 中国资源综合利用,2011,29(1): 33-42  
Deng Kun. Integrated utilizing technology of solid wastes the discussion of industrial application on how to use coal refuses fly ash gangue FGD and straw efficiently. China Resources Comprehensive Utilization, 2011, 29(1): 33-42 (in Chinese)
- [4] Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(3): 327-363
- [5] 杨崇豪,周瑞云. 粉煤灰技术在污水处理中的应用研究及存在问题讨论. 环境污染治理技术与设备,2003,4(2): 49-53  
Yang Chonghao, Zhou Ruiyun. Study on application of fly

- ash in urban sewage treatment and discussions about existing problems. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, **2003**, 4(2):49-53 (in Chinese)
- [6] 苗文凭, 林海, 卢晓君. 粉煤灰吸附除磷的改性研究. *环境工程学报*, **2008**, 2(4): 502-506  
Miao Wenping, Lin Hai, Lu Xiaojun. Adsorption of phosphate using modified fly ash from water solution. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2008**, 2(4): 502-506 (in Chinese)
- [7] 姜应和, 柳君侠. 粉煤灰碎砖颗粒除磷实验研究. *环境工程学报*, **2011**, 5(7): 1532-1537  
Jiang Yinghe, Liu Junxia. Experimental study on phosphorus removal by fly ash brickbat particle. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2011**, 5(7): 1532-1537 (in Chinese)
- [8] 王宇, 谌建宇, 李小明, 等. 镧改性粉煤灰合成沸石的同步脱氮除磷研究. *中国环境科学*, **2011**, 31(7): 1152-1158  
Wang Yu, Chen Jianyu, Li Xiaoming, et al. Simultaneous removal of ammonium and phosphate in waste water by La-modified synthetic zeolite from coal fly. *China Environmental Science*, **2011**, 31(7): 1152-1158 (in Chinese)
- [9] Kuziemska I. Application of water extract of brown coal fly ash to phosphate precipitation from polluted waters. *Water Research*, **1980**, 14(9): 1289-1293
- [10] Ugurlu A., Salman B. Phosphorus removal by fly ash. *Environment International*, **1998**, 24(8): 911-918
- [11] Cheung K. C., Venkitachalam T. H. Improving phosphate removal of sand infiltration system using alkaline fly ash. *Chemosphere*, **2000**, 41(1-2): 243-249
- [12] Oguz E. Sorption of phosphate from solid/liquid interface by fly ash. *Colloids and Surfaces A*, **2005**, 262(1-3): 113-117
- [13] Chen J., Kong H., Wu D., et al. Phosphate immobilization from aqueous solution by fly ashes in relation to their composition. *Journal of Hazardous Materials*, **2007**, 139(2): 293-300
- [14] Zhao Y., Yue Q., Li R., et al. Research on sludge-fly ash ceramic particles (SFCP) for synthetic and municipal wastewater treatment in biological aerated filter (BAF). *Bioresource Technology*, **2009**, 100(21): 4955-4962
- [15] 齐元峰, 岳钦艳, 岳敏, 等. 用于水处理填料的超轻污泥-粉煤灰陶粒的研制. *功能材料*, **2010**, 41(6): 1097-1101  
Qi Yuanfeng, Yue Qinyan, Yue Min, et al. Preparation of ultra-lightweight ceramic from sewage sludge and fly ash used for fillers. *Journal of Functional Materials*, **2010**, 41(6): 1097-1101 (in Chinese)
- [16] 郝斐, 赵大传. 轻质/超轻粉煤灰陶粒的研制及陶粒膨胀机理的探讨和应用. *功能材料*, **2010**, 41(S3): 518-523  
Xi Fei, Zhao Dachuan. Preparation of ultra-lightweight fly ash ceramic (ULFAC), investigation and application of the bloating mechanism. *Journal of Functional Materials*, **2010**, 41(S3): 518-523 (in Chinese)
- [17] Han S., Yue Q., Yue M., et al. The characteristics and application of sludge-fly ash ceramic particles (SFCP) as novel filter media. *Journal of Hazardous Materials*, **2009**, 171(1-3): 809-814
- [18] Yue Q., Han S., Yue M., et al. The performance of biological anaerobic filters packed with sludge-fly ash ceramic particles (SFCP) and commercial ceramic particles (CCP) during the restart period: Effect of the C/N ratios and filter media. *Bioresource Technology*, **2009**, 100(21): 5016-5020
- [19] 刘宝河, 张林生, 孟冠华, 等. TBX 多孔陶粒滤料制备及废水吸附除磷试验研究. *北京大学学报(自然科学版)*, **2010**, 46(3): 389-394  
Liu Baohe, Zhang Linsheng, Meng Guanhua, et al. Research on phosphorus removal from wastewater by TBX porous ceramsite filter media. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, **2010**, 46(3): 389-394 (in Chinese)
- [20] 蒋丽, 谌建宇, 李小明, 等. 粉煤灰陶粒对废水中磷酸盐的吸附试验研究. *环境科学学报*, **2011**, 31(7): 1413-1420  
Jiang Li, Chen Jianyu, Li Xiaoming, et al. Adsorption of phosphate from wastewater by fly ash ceramsite. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2011**, 31(7): 1413-1420 (in Chinese)
- [21] 王世和. *人工湿地污水处理理论与技术*. 北京: 科学出版社, **2007**
- [22] 钱觉时, 罗晖, 陈伟, 等. 污水污泥页岩陶粒的烧成工艺与性能. *材料科学与工艺*, **2010**, 18(6): 852-856  
Qian Jueshi, Luo Hui, Chen Wei, et al. Calcining process and performance of expanded shale made from shale and sewage sludge. *Materials Science & Technology*, **2010**, 18(6): 852-856 (in Chinese)
- [23] 闫振甲, 何艳君. *陶粒生产实用技术*. 北京: 化学工业出版社, **2006**