

史丽, 彭先佳, 栾兆坤, 等. 2009 活化赤泥去除猪场废水生化处理出水中的磷和重金属 [J]. 环境科学学报, 29(11): 2282-2288

Shi L, Peng X J, Luan Z K, et al. 2009. Use of activated red mud to remove phosphate and heavy metals from the effluent of biologically treated swine wastewater [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(11): 2282-2288

活化赤泥去除猪场废水生化处理出水中的磷和重金属

史丽, 彭先佳*, 栾兆坤, 魏宁, 王琪, 赵颖

中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

收稿日期: 2009-02-25 修回日期: 2009-05-06 录用日期: 2009-09-09

摘要: 以铝矿工业废渣赤泥为原材料, 采用焙烧活化方法进行活化处理, 并将其用于畜禽废水生化处理出水中磷和重金属的吸附去除. 同时, 研究考察了吸附剂除磷、除重金属的能力以及投加量、pH 值和反应时间对去除效果的影响. 结果表明, 赤泥和活化赤泥对磷、铜、锌、砷吸附规律符合 Langmuir 吸附等温方程; 焙烧改性后, 赤泥对磷、铜、锌、砷的去除能力显著提高, 900°C 焙烧活化饱和吸附量可分别由 46.26、18.18、15.45、18.83 mg g⁻¹ 提高至 149.00、65.17、99.20、27.51 mg g⁻¹; pH 显著影响除磷、除重金属的效果, 高 pH 条件有利于磷、铜、锌、砷的去除; 赤泥和活化赤泥除磷、铜、锌、砷的作用机理包含金属氧化物表面的表面络合作用机理, 其对砷和磷的去除机理还包括共沉淀作用.

关键词: 赤泥; 焙烧; 磷; 重金属; 猪场废水

文章编号: 0253-2468(2009)11-2282-07 中图分类号: X703 文献标识码: A

Use of activated red mud to remove phosphate and heavy metals from the effluent of biologically treated swine wastewater

SHI Li, PENG Xianjia*, LUAN Zhaokun, WEI Ning, WANG Qi, ZHAO Ying

Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Science, Beijing 100085

Received 25 February 2009; received in revised form 6 May 2009; accepted 9 September 2009

Abstract Red mud (RM), a waste tailing from the alumina industry, was calcined at different temperatures and the calcined RM was used as adsorbent for removal of phosphate and heavy metals from the effluent of swine wastewater treated with a sequencing batch reactor (SBR). Adsorption of phosphate and heavy metals to raw RM and activated RM was studied as a function of dosage, pH and reaction time. The adsorption of phosphate, copper, zinc and arsenic to both RM and activated RM fit the Langmuir isotherm. Calcination enhanced the adsorption capacity greatly. The adsorption capacity of RM calcined at 900°C for phosphate, copper, zinc and arsenic increased from 46.26, 18.18, 15.45 and 18.83 mg g⁻¹ to 149.00, 65.17, 99.20, 27.51 mg g⁻¹, respectively. The pH has an obvious effect on the removal and high pH favors the removal of phosphate, copper, zinc and arsenic. The adsorption mechanism is suggested to include surface complexation reactions and the mechanism of phosphate and arsenic removal may include coprecipitation.

Keywords red mud; calcination; phosphate; heavy metal; swine wastewater

1 引言 (Introduction)

我国是肉、蛋生产和消费大国, 随着畜禽养殖业的迅速发展, 近年我国畜禽养殖废水引起的环境污染问题日趋严重. 畜禽养殖废水中化学需氧量 (COD) 高达 2500~46800 mg L⁻¹, 氨氮含量为 1270~1780 mg L⁻¹, 总磷含量高达 32~293 mg L⁻¹, 同时还含有多种有害重金属 (王凯军等, 2000; 张树清等, 2005). 目前, 畜禽养殖废水处理多采用生化法,

其对 COD 和氨氮具有较好的去除效果. 然而, 常规生化处理过程对磷和重金属去除效果极为有限, 经常规生化处理, 磷和重金属难以得到高效去除, 尤其是生物法要实现磷的高效去除, 通常需要添加专门除磷工艺段, 从而造成工艺复杂、运行维护困难、水力停留时间长等问题. 因此, 对于畜禽养殖废水常规生物处理出水中的磷和重金属的高效去除, 亟待采用更为简便、高效的方法.

赤泥是氧化铝生产过程产生的废渣, 富含钙、

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (No. 2007AA06Z344)

Supported by the Hi-Tech Research and Development Program of China (No. 2007AA06Z344)

作者简介: 史丽 (1983-), 女, E-mail: chloesh83@gmail.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: xjpeng@rcees.ac.cn

Biography: SHI Li (1983-), female, E-mail: chloesh83@gmail.com; * Corresponding author, E-mail: xjpeng@rcees.ac.cn

铁、铝等氧化物,能有效吸附去除磷等含氧阴离子污染物和重金属阳离子污染物(张书武等,2007;李燕中等,2006;Li et al.,2006;Zhu et al.,2007)。以赤泥为吸附剂、采用吸附法去除磷和重金属具有如下优点:①赤泥为工业废渣,且我国赤泥产生量大,廉价易得、成本低廉;②赤泥富含的金属氧化物能高效除磷、除重金属活性成分,采用赤泥为吸附剂,可实现磷和重金属的高效去除;③相对于采用生物法,吸附法的采用具有停留时间短、运行效果稳定、维护简单便捷等优点;④可实现工业废渣二次资源再利用,符合循环经济发展要求。为了进一步提高赤泥吸附磷及重金属的性能,本研究则以铝矿赤泥工业废渣为原材料,经活化处理后作为吸附剂,采用吸附法研究其对畜禽养殖废水生物处理出水中磷和重金属的去除效果。

表2 SBR出水指标

Table 2 Characteristics of wastewater samples collected from the effluent of the SBR

mg L⁻¹

COD	TP	TN	NH ₄ ⁺ -N	Cu	Zn	As	pH
150~230	4.3~13	12~14	0~1.6	0.2~0.5	0.2~0.3	0.1~0.35	8.0~8.7

2.2 实验仪器

实验主要仪器主要包括:高温马弗炉(KEDA.SCIENTIFIC.CO.,LTD 48000);HZQ-C型空气浴恒温振荡器(哈尔滨东明医疗仪器厂);手提式高压蒸汽灭菌器(博讯 YXQ-SG46-280SA);紫外-可见分光光度计(HACH DR5000);快速COD测定仪(Lovbond ET125SC);电感耦合等离子原子发射光谱仪(Leeman Prodigy);比表面与孔径测定仪(Micromeritics ASAP2000);扫描电子显微镜(Hitachi S-3000N);热重分析仪(TA Q5000)。

2.3 实验方法

2.3.1 污染物浓度分析方法 氨氮采用纳氏试剂光度法测定,总氮采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定,总磷采用抗坏血酸分析方法测定,重金属通过电感耦合等离子体发射光谱法测定,化学需氧量采用重铬酸钾法测定(国家环境保护总局,2002)。

2.3.2 赤泥改性方法 分别取10g赤泥在300、500、700、900℃下于马弗炉中焙烧2h,焙烧结束后冷却至室温,研磨过100目筛备用。

2.3.3 吸附实验方法 吸附实验采用静态法,取100mL待处理水样置于三角锥形瓶中,加入0.5g赤泥,室温下以160r·min⁻¹在空气振荡浴中振荡16h,

2 材料和方法 (Materials and methods)

2.1 实验材料

2.1.1 赤泥来源 赤泥样品来自中国铝业山东股份有限公司,其主要元素组成如表1所示。

表1 赤泥主要成分

Table 1 Composition of the raw mud

成分	质量分数	成分	质量分数
CaO	36.82%	TiO ₂	1.08%
SiO ₂	19.11%	Na ₂ O	2.37%
Fe ₂ O ₃	14.93%	K ₂ O	1.20%
Al ₂ O ₃	6.93%	MgO	1.13%

2.1.2 废水来源 废水水样是畜禽养殖废水经序批式活性污泥工艺(SBR)处理后的出水,其主要水质指标如表2所示。

离心,取上清液测定磷及重金属的残留浓度,磷的吸附量以下式计算:

$$Q = (C_i - C_e)V/m \quad (1)$$

式中, Q 为吸附量(mg·g⁻¹); C_i 为初始污染物浓度(mg·L⁻¹); C_e 为平衡时的污染物浓度(mg·L⁻¹); V 为废水体积(L); m 为吸附剂的量(g)。

3 结果 (Results)

3.1 吸附等温线

在考察赤泥及改性赤泥去除畜禽养殖废水中磷及重金属的效果之前,初步考察了赤泥及改性赤泥对磷酸盐溶液和重金属水溶液中磷及重金属吸附去除的效果,并测定其吸附等温线。在pH=7,反应时间为24h条件下,分别考察了原状赤泥和不同温度焙烧的赤泥对不同初始浓度溶液中磷、砷、铜、锌的饱和吸附量,结果如图1所示。从图1可以看出,赤泥经焙烧活化后,吸附除磷、砷、铜、锌的能力增加,且吸附量随着活化处理温度的升高而升高。

采用Langmuir吸附等温模型对实验结果进行拟合。Langmuir等温吸附方程为:

$$Q = Q_0 bC / (1 + bC) \quad (2)$$

式中, Q 是吸附到吸附剂上的量(mg·g⁻¹); Q_0 是饱和吸附量(mg·g⁻¹); C 是平衡浓度(mg·L⁻¹); b 是

吸附系数。

Langmuir线性回归处理结果见表 3 由表 3 可知, 赤泥及不同温度焙烧赤泥的吸附等温线符合

Langmuir吸附等温线. 经 300、500、700和 900℃焙烧活化, 改性赤泥对磷、铜、锌、砷的饱和吸附量均相对原状赤泥大幅度提高。

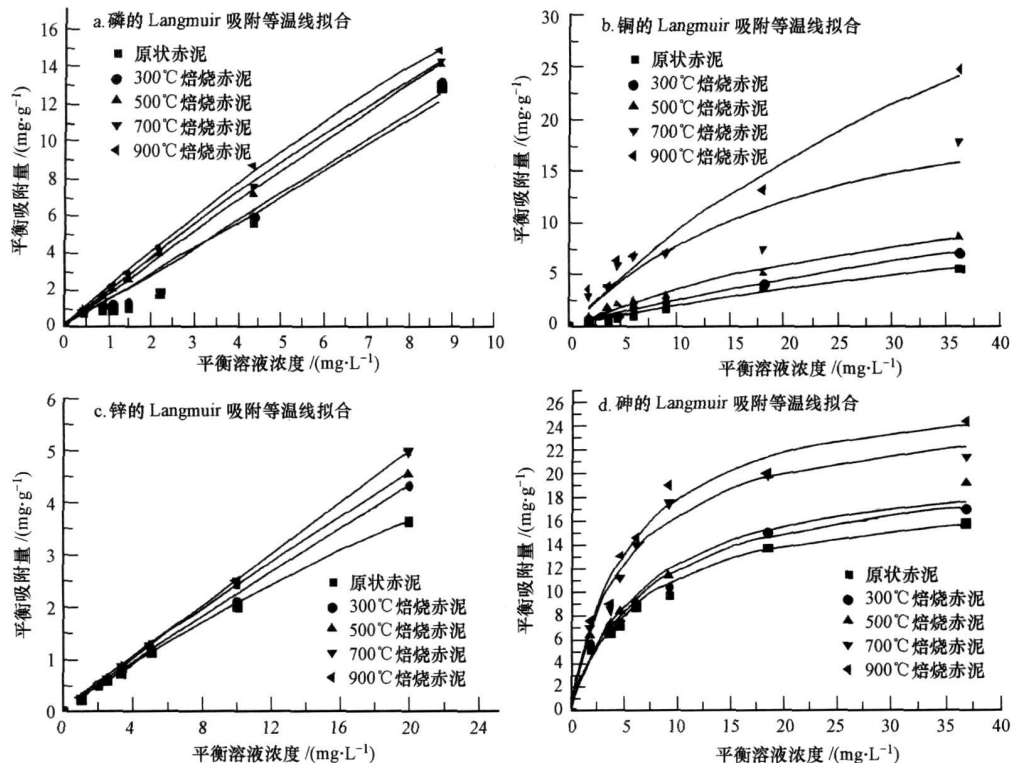


图 1 不同活化方法的吸附剂吸附磷、铜、锌、砷 Langmuir等温吸附曲线拟合

Fig 1 Langmuir adsorption isotherm of phosphate removal using RM with different activation treatment

表 3 Langmuir吸附等温常数

Table 3 Langmuir isotherm parameters for phosphate adsorption

吸附剂	磷			铜			锌			砷		
	Q_0	b	R^2	Q_0	b	R^2	Q_0	b	R^2	Q_0	b	R^2
原状赤泥	46.26	0.039	0.993	18.18	0.01	0.979	15.45	0.01	0.999	18.33	0.15	0.978
300℃焙烧赤泥	60.70	0.033	0.981	21.23	0.01	0.981	41.16	0.01	0.998	20.24	0.14	0.988
500℃焙烧赤泥	100.12	0.024	0.999	25.32	0.02	0.997	60.56	0.02	0.999	21.06	0.14	0.979
700℃焙烧赤泥	130.59	0.019	0.960	37.31	0.03	0.995	99.20	0.04	0.996	25.34	0.19	0.997
900℃焙烧赤泥	149.29	0.013	0.999	65.17	0.01	0.998	99.20	0.02	0.997	27.51	0.18	0.998

3.2 投加量对磷及重金属去除效果的影响

吸附剂投加量是影响去除效果的主要因素之一. 实验在初始 pH 为 7.8 反应时间为 24h 废水中磷、铜、锌、砷的初始浓度分别为 11.42、0.50、0.30、0.35 mg L⁻¹ 的条件下, 考察了吸附剂投加量对废水水样磷和重金属去除效果影响 (图 2). 由图 2 可知, 随着吸附剂量的增加, 磷的去除率逐渐增加. 几种焙烧赤泥与原状赤泥相比, 在相同投加量情况下, 焙烧后的赤泥对磷的吸附量比原状赤泥有所增加, 而且焙烧温度越高的赤泥对磷的吸附量越大. 相同投加量 (5 g L⁻¹) 下, 原状赤泥对溶液中磷的去除率为 82.9%, 300℃焙烧赤泥对磷去除率增加至

85.9%, 其他焙烧温度的赤泥除磷率可达 90% 以上. 这说明赤泥和焙烧活化赤泥作为吸附剂可有效用于畜禽废水的除磷.

同时, 当吸附剂的投加量为 5 g L⁻¹ 时, 焙烧赤泥对砷的去除率可由原状赤泥对砷的去除率为 61.7% 增加到 85.3%, 说明焙烧后的赤泥对于砷的去除具有显著的效果. 原状赤泥与焙烧赤泥对铜、锌均具有效果良好的去除, 不同投加量下, 原状赤泥对铜、锌的去除率均能达到 90% 以上, 不同活化方法的赤泥对铜、锌的去除率均能达到 94.0% 以上.

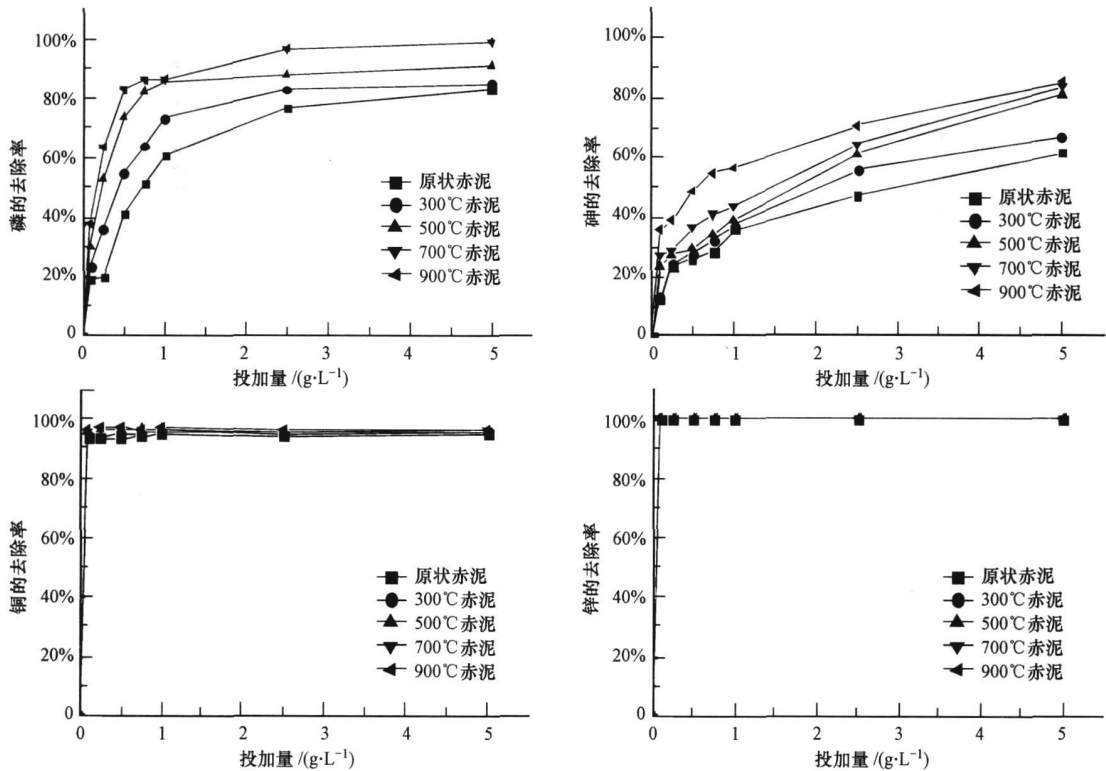


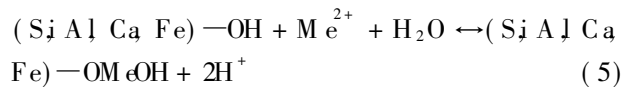
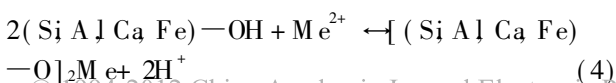
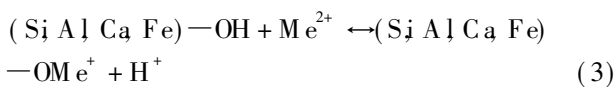
图 2 不同焙烧温度下活化赤泥对畜禽养殖废水 SBR 出水磷、砷、铜、锌的去除率

Fig 2 Phosphorus removal from SBR effluent with different activated red muds

3.3 pH 对磷及重金属去除效果的影响

赤泥的投加量为 $0.33 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 调节废水水样 pH 值为 3.0~10.0 考察 pH 值对赤泥吸附除磷及除重金属的影响, 结果如图 3 所示. 由图 3 可知, pH 对吸附剂除磷效果影响明显, 在 pH = 3.0~5.0 范围内, 磷的去除率随 pH 升高而逐渐降低, 主要原因可能是酸性条件有利于赤泥中 Ca^{2+} 的释放, 有利于磷酸根与 Ca^{2+} 通过结晶沉淀作用去除, 而 pH 值的增加会使赤泥释放的 Ca^{2+} 量减少, 从而导致赤泥对磷的去除率下降; 在 pH = 5.0~10.0 范围内, 磷的去除率随 pH 升高而逐渐增加, 主要原因可能是高 pH 条件更有利于磷酸盐与钙离子形成不溶物而共沉淀得以去除 (林建伟, 2006).

同样, pH 对吸附剂去除铜、锌、砷的影响也很明显. 在 pH 从 3.0 增加到 10.0 的过程中, 铜、锌、砷的去除率均显示为逐渐增加的趋势. 主要原因是重金属与吸附剂表面发生络合反应 (Apak, 1998):



由上式可知, 在酸性条件下, 当 H^{+} 浓度增加时, 平衡向解析方向进行, 去除率减少; 反之, 在碱性条件下, 随着 OH^{-} 增加, 反应向有利于吸附方向进行, 因而去除率增加.

3.4 吸附反应时间对去除效果的影响

赤泥的投加量为 $0.67 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 初始 pH 为 7.8 条件下, 考察了赤泥去除磷和重金属效果随反应时间变化情况, 实验结果如图 4 所示. 由图 4 可知, 在吸附反应时间 15min 内, 原状赤泥和焙烧活化赤泥对磷和重金属的去除率迅速提高. 在 1h 时原状赤泥与焙烧赤泥对磷的去除率分别达到 22.3%、23.5%、36.4%、75.7%、82.0%; 在 1h 时原状赤泥与焙烧赤泥对铜的去除率分别达到 26.9%、34.3%、34.4%、34.5%、36.2%; 在 1h 时原状赤泥与焙烧赤泥对锌的去除率分别达到 95.0%、96.6%、99.1%、100%、100%; 在 1h 时原状赤泥与焙烧赤泥对砷的去除率分别达到 44.1%、45.6%、53.3%、60.9%、62.2%; 其后去除率增加缓慢. 同时, 由图 4 还可知, 在相同投加量、相同反应时间下, 焙烧活化的赤泥对磷的

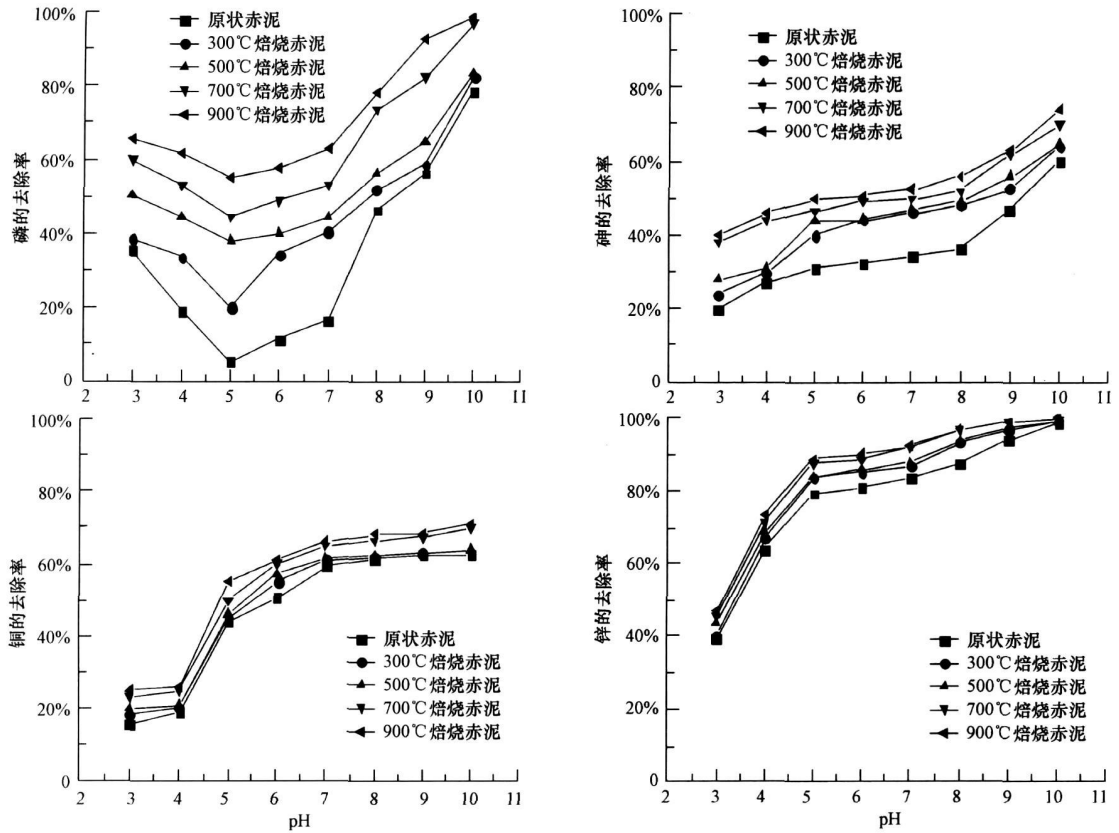


图3 pH值对活化赤泥除磷、砷、铜、锌效果的影响

Fig. 3 Effect of pH on phosphorus removal from SBR effluent with different activated red muds

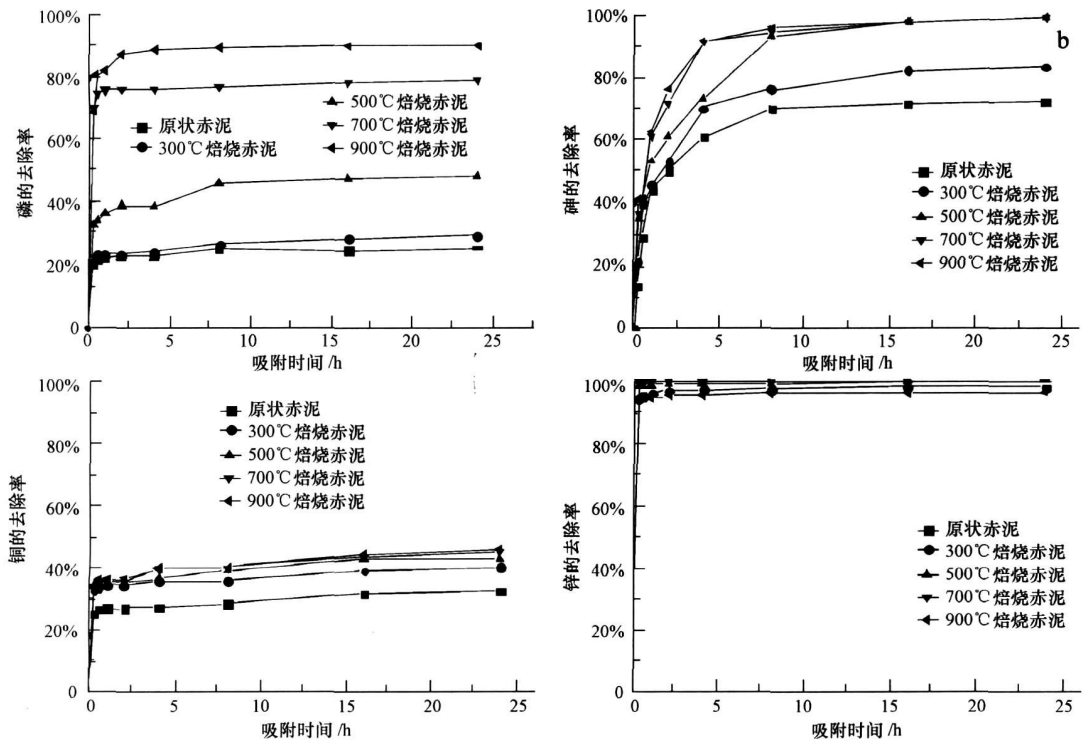


图4 吸附反应时间对活化赤泥除磷、砷、铜、锌效果的影响

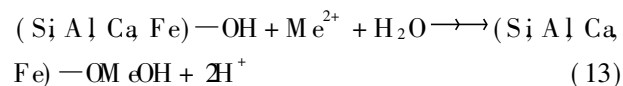
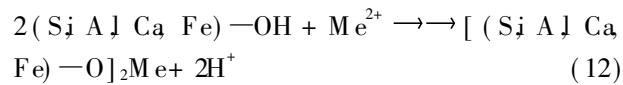
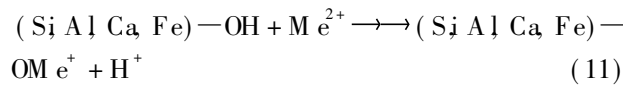
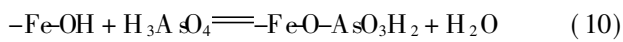
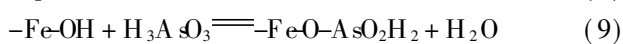
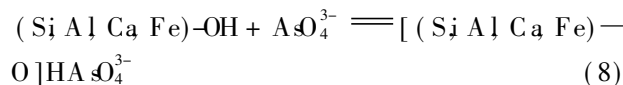
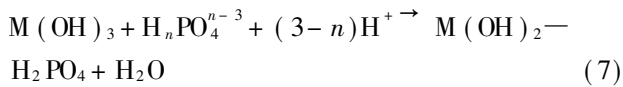
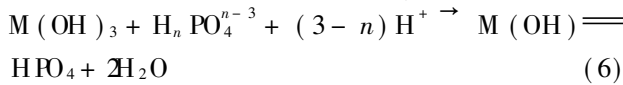
Fig. 4 Effect of adsorption time on phosphate and heavy metal removal from SBR effluent with different activated red muds

去除率明显大于原状赤泥对磷的去除率,而且活化温度越高的赤泥除磷能力越高,说明高温焙烧有利于提高赤泥对磷的吸附.同样,赤泥经焙烧活化后对砷及铜的去除效果也显著高于原状赤泥对砷及铜的去除效果,而焙烧赤泥与原状赤泥对锌的去除效果差别不大,均具有较高的去除率.

4 讨论 (Discussion)

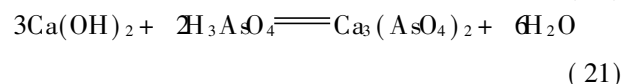
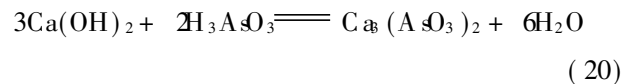
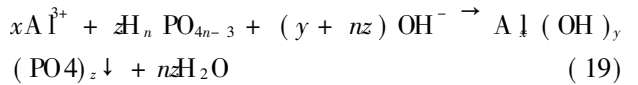
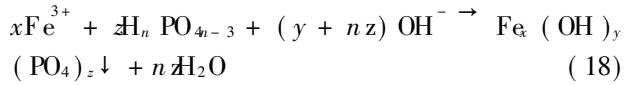
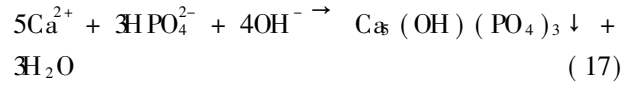
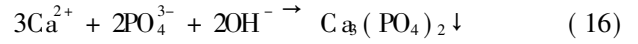
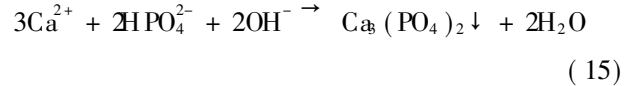
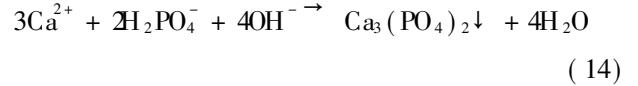
4.1 污染物去除机理探讨

目前的观点普遍认为,含氧阴离子和金属阳离子在金属氧化物表面会发生表面络合反应,从而实现含氧阴离子和金属阳离子在金属氧化物吸附剂表面的吸附.由于赤泥中含有多种金属氧化物,赤泥对磷、砷、铜、锌的去除机理主要为这些污染物在赤泥金属氧化物表面的络合作用.赤泥中铁、铝等金属氧化物表面在水相中结合配位水构成水合金属氧化物和氢氧化物,即在固体界面上产生大量-OH基团,这些-OH基团或单独存在或相互缔合,使赤泥表面成羟基化界面,磷、砷、铜、锌与表面羟基发生络合反应 (Shiao 1977; Pradhan 1998; Huang 2008; Genç 2003; 朱春雷, 2007):



对于含氧阴离子与金属氧化物表面间的表面络合反应,吸附量会随pH升高而下降.而研究表明,赤泥对磷和砷阴离子的去除在pH > 5.0条件下随着pH升高而升高,这是因为赤泥除磷、除砷机理除表面络合作用外,还包含其他作用机理,这种作用机理还包含共沉淀作用,且共沉淀机理为主要作用.因此,赤泥对磷和砷的去除机理是表面络合作用与共沉淀作用的加和.磷、砷与赤泥中溶出的

Ca²⁺、Fe³⁺、Al³⁺、发生共沉淀反应,反应如下 (Pradhan, 1998; Galameau 1997; Ronald 2005; 向雪松, 等, 2006):



在共沉淀反应中,碱性条件有利于化学平衡向右移动,从而高pH条件有利于污染物的去除.

4.2 焙烧活化提高赤泥去除能力机理探讨

上述实验结果表明,赤泥经焙烧活化除磷能力增加,并且吸附量随着焙烧温度的升高而增加.实验通过比表面积测定以及热分析探讨了热处理过程对赤泥的影响,比表面积测定结果如表4所示.由表4可知,赤泥经300℃、500℃焙烧处理,比表面积逐渐增大,比表面积的增大有利于吸附的进行.因此,300℃、500℃焙烧处理可显著提高活化赤泥除磷除重金属效果.然而,当温度达到700℃和900℃时,焙烧赤泥比表面积逐渐下降,但其去除能力仍然提高.对赤泥进行微商热重分析,结果如图5所示.由图5可知,赤泥微商热重曲线从690℃开始出现强峰,这主要是由于赤泥中碳酸盐发生分解生成为金属氧化物所致 (Alundgan 2003).因此,可以认为赤

表4 原状赤泥和活化赤泥的BET表面积

Table 4 BET surface area of the raw and activated red mud

吸附剂	比表面积 /(m ² ·g ⁻¹)	平均孔径 /(nm ³ ·g ⁻¹)	平均孔径 /nm
原状赤泥	12.21	0.041	135.25
300℃赤泥焙烧	19.81	0.068	137.74
500℃赤泥焙烧	27.46	0.085	123.52
700℃赤泥焙烧	15.53	0.041	105.37
900℃赤泥焙烧	8.29	0.007	34.81

泥经 700℃和 900℃焙烧,除磷除重金属能力的提高主要是由于焙烧活化将赤泥中碳酸盐转化为氧化物,增加了赤泥中有效吸附组分的含量。

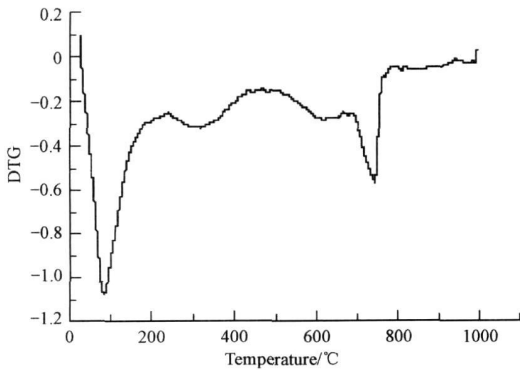


图 5 赤泥的微商热重分析图

Fig 5 Differential thermogravimetry (DTG) of red mud

5 结论 (Conclusions)

1)赤泥和焙烧活化赤泥对磷和铜、锌、砷的吸附符合 Langmuir 吸附等温模型。2)焙烧活化增大了赤泥去除猪场废水生化处理出水中磷、铜、锌、砷的能力,饱和吸附量随焙烧温度的增加而增加。900℃焙烧活化赤泥对磷和重金属的饱和吸附量最大,其值分别为 149.00、65.65、17.20、27.51 mg g^{-1} 。3)磷、铜、锌以及砷的去除能力受 pH 影响显著,高 pH 条件有利于磷、铜、锌、砷的去除。4)赤泥和活化赤泥除磷、铜、锌、砷的作用机理为金属氧化物的表面络合作用机理,其对砷和磷的去除机理还包括共沉淀作用。

责任作者简介:彭先佳(1977—),男,博士,副研究员。主要从事水质转化的基础研究、应用基础研究和应用研究,具体包括:污染物水环境迁移转化过程、机制以及水质净化技术与材料,特别是新型 高效吸附材料研发与应用。近年主持国家自然科学基金面上项目、“863”目标导向课题之子课题等科研项目,发表 SCI 论文 10 余篇。

参考文献 (References):

Alundgan H S, Turen E. 2003. Removal of phosphates from aqueous solutions by using bauxite II The activation study [J]. *J Chem Technol Biot* 78: 824—833

国家环保局. 2002 水和废水监测分析方法(第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 246—298

State Environmental Protection Administration of China. 2002. The Methods of Water and Wastewater Monitor (4th edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 246—298 (in Chinese)

Galameau E, Gehr R. 1997. Phosphorus removal from wastewaters: experimental and theoretical support for alternative mechanisms [J]. *Wat Res* 31(2): 328—338

Genc H, Tjell J C, McConchie D, *et al*. 2003. Adsorption of arsenate from water using neutralized red mud [J]. *J Colloid Interface Sci* 264: 327—334

李燕中, 刘昌俊, 栾兆坤, 等. 2006. 活化赤泥吸附除磷及其机理的研究 [J]. *环境科学学报*, 26(11): 1775—1779

Li Y Z, Liu C J, Luan Z K, *et al*. 2006. Phosphate removal from aqueous solutions using activated red mud [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(11): 1775—1779 (in Chinese)

Li Y Z, Liu C J, Luan Z K, *et al*. 2006. Phosphate removal from aqueous solutions using raw and activated red mud and fly ash [J]. *J Hazard Mater* B137: 374—383

林建伟, 朱志良, 赵建夫, 等. 2006. 方解石去除水中磷酸盐的影响因素研究 [J]. *中国给水排水*, 22(15): 67—70

Lin J W, Zhu Z L, Zhao J F, *et al*. 2006. Influencing factors of efficiency of phosphate removal by calcite [J]. *China Water & Wastewater* 22(15): 67—70 (in Chinese)

Pradhan J, Das J, Das S N, *et al*. 1998. Adsorption of phosphate from aqueous solution using activated red mud [J]. *J Colloid Interface Sci* 204: 169—172

Apak R, Guclu K, Turgut M H. 1998. Modeling of Copper (II), Cadmium (II), and Lead (II) adsorption on red mud [J]. *J Colloid Interface Sci* 203: 122—130

Ronald L, Vaughan J R, Brian E R. 2005. Modeling As(V) removal by iron oxide impregnated activated carbon using the surface complexation approach [J]. *Wat Res* 39: 1005—1014

Shiao S J, Akashi K. 1977. Phosphate removal from aqueous solution from activated red mud [J]. *J WPCF*, 49(2): 280—285

Huang W W, Wang S B, Zhu Z H, *et al*. 2008. Phosphate removal from wastewater using red mud [J]. *J Hazard Mater* 158(1): 35—42

向雪松, 柴立元, 闵小波, 等. 2006. 含砷废水治理技术研究进展 [OL]. 2008-10-20. <http://www.infognet.cn/Detail/2006081012-05649814/>

Xiang X S, Chai L Y, Yan X B, *et al*. 2006. Research progress of Arsenic-containing wastewater treatment [OL]. 2008-10-20. <http://www.infognet.cn/Detail/200608101205-649814/> (in Chinese)

王凯军, 金冬露, 赵淑霞, 等. 2000. 畜禽养殖污染防治技术与政策 [M]. 北京: 化学工业出版社, 19—23

Wang K J, Jin D X, Zhao S X, *et al*. 2000. Technology and Policy of Livestock Farming Pollution Prevention [M]. *Chemical Industry Press* 19—23 (in Chinese)

张树清, 张道夫, 刘秀梅, 等. 2005. 规模化养殖场畜禽粪主要有害成分测定分析研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 11(6): 822—829

Zhang S Q, Zhang D F, Liu X M, *et al*. 2005. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots [J]. *Plant Nutr Fert Sci* 11(6): 822—829 (in Chinese)

张书武, 刘昌俊, 栾兆坤, 等. 2007. 铁改性赤泥吸附剂的制备及其除砷性能研究 [J]. *环境科学学报*, 27(12): 1972—1977

Zhang S W, Liu C J, Luan Z K, *et al*. 2007. Preparation of Ferric modified red mud and its adsorption characteristics of arsenate [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27(12): 1972—1977 (in Chinese)

朱春雷. 2007. 粒状赤泥吸附剂研制及其在水处理中的应用研究 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 73—74

Zhu C L. 2007. Preparation and Application of Granular Red Mud (GRM) Adsorbent in Water Treatment [D]. Beijing Research Center for Eco-Environmental Sciences, China Academy of Sciences, 73—74 (in Chinese)

Zhu C L, Luan Z K, Wang Y Q, *et al*. 2007. Removal of cadmium from aqueous solutions by adsorption on granular red mud (GRM) [J]. *Sep. Purif Technol*, 57(1): 161—169