

土工合成黏土衬垫对煤矸石渗滤液中 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 的吸附特性

董兴玲^{1,2}, 董书宁², 王 宝³, 周振方², 朱世彬²

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为验证土工合成黏土衬垫(GCL)作为煤矸石处置场衬垫层建设材料的可行性,采用批式吸附试验研究了GCL中膨润土对重金属 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 的吸附性能,分析了土悬液土水比和 pH 对膨润土吸附重金属性能的影响。结果表明:土悬液的土水比和 pH 对膨润土吸附重金属的性能产生重要影响,当土水比从 1:200 升高至 1:20 时,膨润土对重金属的吸附量降低了 50%~90%;当土悬液 pH 从 10 降低至 2 时,膨润土对重金属的吸附量降低了 50%~70%。即使是在最不利条件下,GCL 中膨润土对 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 的吸附量仍大于其他黏土材料。研究结果表明 GCL 可以作为煤矸石处置场衬垫层的建设材料。

关键词:煤矸石; 土工合成黏土衬垫; 重金属; 渗滤液

中图分类号: X752

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)12-0007-06

Adsorption performance of Zn^{2+} and Mn^{2+} from coal gangue leachate on geosynthetic clay liners

DONG Xingling^{1,2}, DONG Shuning², WANG Bao³, ZHOU Zhenfang², ZHU Shibin²

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp.,

Xi'an 710054, China; 3. School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to verify the feasibility of geosynthetic clay liners (GCL) as liners material for coal gangue impoundment, batch tests were conducted to determine the adsorption capacity of bentonites sandwiched in GCL for Zn^{2+} and Mn^{2+} prior to using in situ. In this study, the parameters evaluated were solid and solution ratio and the pH of solution. The test results showed that the solid and solution ratio and the pH of solution had a significant effect on the adsorption capacity of bentonite. The adsorption capacity of the bentonites decreased 50%~90% when the solid and solution ratio increased from 1:200 to 1:20, and decreased 50%~70% as the solution pH decreased from 10 to 2. However, while under most extreme conditions, the adsorption capacity of bentonite was higher than that of most other clay soils. All the test results indicated that GCL could be used as a liner material for the coal gangue impoundment.

Key words: coal gangue; geosynthetic clay liners; heavy metals; leachate

0 引 言

煤矸石是煤矿区最主要的固体废弃物,由于资源化利用率低,大量煤矸石只能露天堆放。长期风化和淋滤作用使煤矸石,特别是高硫煤矸石,发生一系列的物理、化学及生物反应,生成含有大量无机盐、重金属以及各类有机污染物的酸性渗滤液。在降水的冲

刷带动作用,酸性渗滤液可以通过各种水力联系进入到地下水环境中,对矿区周围地下水造成严重污染^[1-3]。而地下水是矿区生产和生活的重要水源,一旦被污染将给矿区的工业生产和生活带来严重影响。因此,如何控制煤矸石对周围地下水的污染已经成为矿山企业和环境保护部门关注的重要问题,科研人员对此也展开了大量的研究^[4-7]。

收稿日期: 2017-08-08; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.12.002

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501104); 中煤科工集团西安研究院科技创新基金资助项目(2015XAYMS21)

作者简介: 董兴玲(1982—),女,山东枣庄人,博士研究生。Tel: 15229356560, E-mail: dongxingling@cctexian.com

引用格式: 董兴玲,董书宁,王 宝,等. 土工合成黏土衬垫对煤矸石渗滤液中 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 的吸附特性[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 7-12.

DONG Xingling, DONG Shuning, WANG Bao, et al. Adsorption performance of Zn^{2+} and Mn^{2+} from coal gangue leachate on geosynthetic clay liners[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 7-12.

在煤矸石处置场底部铺设衬垫层,阻隔煤矸石渗滤液进入地下水环境,是控制煤矸石污染地下水的一种可行方法^[8]。目前可供选择的衬垫层建设材料主要有压实黏土、土工膜和土工合成黏土衬垫(Geosynthetic Clay Liner, GCL)。GCL是一种由土工合成材料夹封钠基膨润土而制成的防渗材料。GCL中所夹封的膨润土具有巨大的比表面积和表面剩余电荷,能够大量吸附污染物,从而有效限制其向外迁移,这一特点是压实黏土和土工膜所不具备的。所以,GCL有可能是煤矸石处置场衬垫层建设的最佳材料。为验证GCL用作煤矸石处置场衬垫层的可行性,需要研究其所含膨润土对煤矸石渗滤液中污染物的吸附特性。目前,有关膨润土吸附重金属的研究主要集中在污水处理领域^[9-11]和土壤修复领域^[12-13],而在衬垫层领域至今还未有研究。当GCL用作煤矸石处置场底部衬垫层时,煤矸石渗滤液不断进入到GCL中,膨润土接触到的渗滤液体积逐渐增大,而孔隙液的pH却不断降低,为确定这种极端条件下膨润土对重金属的吸附情况,笔者利用批式吸附试验研究GCL中膨润土对煤矸石渗滤液中重金属Zn²⁺和Mn²⁺的吸附特性,重点探讨土水比和pH值对吸附性能的影响,以期为GCL用于煤矸石处置场衬垫层提供理论依据和技术支撑。

1 试验材料

1.1 GCL与膨润土

试验所用膨润土取自商品化的GCL,其中所含膨润土为人工改性钠基膨润土。我国膨润土储量巨大,但大部分都是钙基膨润土,其性能无法与天然钠基膨润土相比。为满足市场对钠基膨润土的需要,需要将钙基膨润土人工转化为钠基膨润土^[13]。将GCL中的针刺线剪断,取出其中所含膨润土,在实验室内风干,过2 mm土工筛,装入自封袋中待用。膨润土的基本性质如下:

pH	9.49
电导率/(mS·cm ⁻¹)	2.09
含水率/%	12.78
阳离子交换容量/[meq·(100g) ⁻¹]	69.34
蒙脱石质量分数/%	62
伊利石质量分数/%	4
勃姆石质量分数/%	5
方石英质量分数/%	8

石英质量分数/%	7
长石质量分数/%	4
方解石质量分数/%	6

1.2 重金属溶液配制

参照煤矸石酸性渗滤液中重金属Zn²⁺和Mn²⁺的浓度范围,在实验室进行人工配置重金属溶液。将分析纯ZnSO₄·7H₂O和MnSO₄·H₂O溶于去离子水,配制可溶态Zn²⁺和Mn²⁺的质量浓度均为500 mg/L的混合溶液,随后使用去离子水将其质量浓度稀释至250、100、50、20 mg/L。以上配制的溶液用于测定不同土水比和不同pH条件下膨润土对重金属的吸附性能。

2 试验方法

2.1 不同土水比条件下GCL中膨润土的重金属吸附试验

为研究不同土水比条件下GCL中膨润土吸附重金属的性能,向体积100 mL的锥形瓶中注入50 mL重金属混合溶液,溶液中重金属的初始浓度为20~500 mg/L。随后向锥形瓶中添加干基质量为0.25、0.50、1.25、2.50 g的膨润土,形成土水比为1:200、1:100、1:40、1:20的土悬液。将锥形瓶置于水平振荡器上,调节振荡频率为(200±10) r/min,振幅为40 mm,在室温(23±2)℃下振荡,振荡时间持续24 h。振荡完成后,将土悬液转移至体积为50 mL的塑料离心管中,以10 000 r/min的转速离心10 min,取上清液。使用火焰原子吸收分光光度法测定上清液中重金属的浓度,采用式(1)计算膨润土对重金属的吸附量,分析土水比对膨润土吸附重金属性能的影响。

$$C_s = \frac{C_o - C_e}{m_s} V \quad (1)$$

式中: C_s 为单位质量膨润土吸附重金属的质量,mg/kg; C_o 为溶液中重金属初始浓度,mg/L; C_e 为吸附平衡时溶液中重金属浓度,mg/L; V 为重金属溶液体积,L; m_s 为膨润土质量,kg。

2.2 不同pH条件下GCL中膨润土的重金属吸附试验

取2.5 g膨润土(干基质量)和50 mL含有不同浓度重金属(20~500 mg/L)的溶液在体积为100 mL的锥形瓶中混合,配制成一系列土水比固定为1:20的土悬液。在此条件下研究溶液pH对吸

附性能的影响,以减少土水比对试验结果可能产生的影响。然后用 0.1 mol/L 的浓硫酸和 0.1 mol/L 的氢氧化钠溶液将土悬液的 pH 调整为 2、3、4、7、8、10。将锥形瓶置于水平振荡器上,调节振荡频率为 (200 ± 10) r/min,振幅为 40 mm,在室温 (23 ± 2) °C 下振荡 12 h。随后,使用 0.1 mol/L 的浓硫酸和 0.1 mol/L 的氢氧化钠,对土悬液 pH 进行再次调整,并再次振荡 12 h。振荡完成后,将土悬液以 10 000 r/min 的转速离心 10 min,取上清液。使用火焰原子吸收分光光度法测定上清液中重金属的浓度,通过式(1)计算膨润土对重金属的吸附量,分析土悬液 pH 对膨润土吸附重金属性能的影响。

3 试验结果与分析

3.1 不同土水比条件下 GCL 中膨润土的重金属吸附性能

土水比对 GCL 中膨润土吸附重金属性能的影响如图 1 所示。

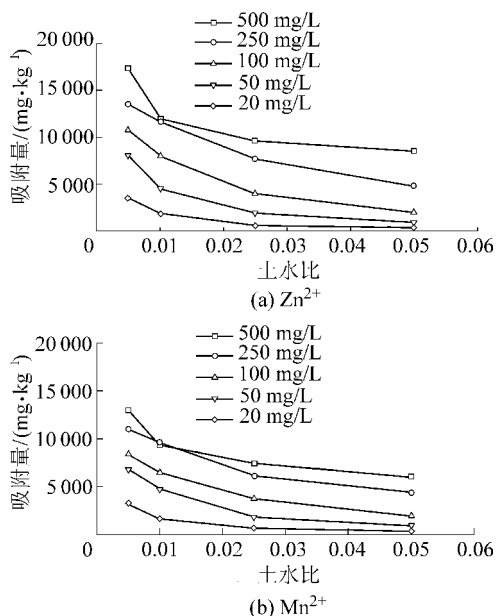


图 1 不同土水比条件下膨润土对重金属的吸附量
Fig. 1 Adsorption capacity of bentonite to heavy metal at different soil and water ratio

从图 1 可以看出,随着土水比的增大,单位质量膨润土对重金属的吸附量持续下降。这是因为,土水比的增大意味着单位体积土悬液中膨润土的数量增多,膨润土数量的增多使溶液中 Ca^{2+} 的浓度升高(人工改性的钠基膨润土中含有大量的 Ca^{2+}),而 Ca^{2+} 可以与重金属竞争膨润土表面上的吸附点位,最终导致膨润土对重金属的吸附性能下降。除此之

外,当单位体积土悬液中膨润土数量增多后,颗粒之间会形成较大的絮凝体,这会减少比表面积,导致吸附性能相对下降。ROY 等^[14]、DU 等^[15]在使用批式吸附试验研究黏土体对重金属污染物吸附性能时,也发现黏土对重金属污染物的吸附性能随着土水比的增大而不断减小。

土水比对膨润土吸附重金属性能的影响因土悬液中重金属浓度的不同而存在差异,如图 2 所示。当土悬液中重金属浓度为 500 mg/L 时,土水比从 1:200 增加到 1:20 导致膨润土的吸附性能下降了 50%。而当土悬液中的重金属浓度为 20 mg/L 时,同样土水比的变化则使膨润土的吸附性能降低了 90%左右。这是因为,对于重金属浓度为 500 mg/L 的土悬液,尽管土水比增大,但土悬液中重金属的浓度相对于膨润土析出阳离子(主要是 Ca^{2+} 和 Na^{+})的浓度仍然偏高,其可以与析出阳离子相互竞争并最终吸附到膨润土黏粒的表面。而对于重金属浓度为 20 mg/L 的土悬液,当土水比增大后,土悬液中重金属的浓度要比膨润土析出阳离子的浓度低得多,因其竞争不过析出阳离子,无法吸附到膨润土黏粒表面,故在宏观上表现为膨润土对重金属的吸附性能急剧下降。

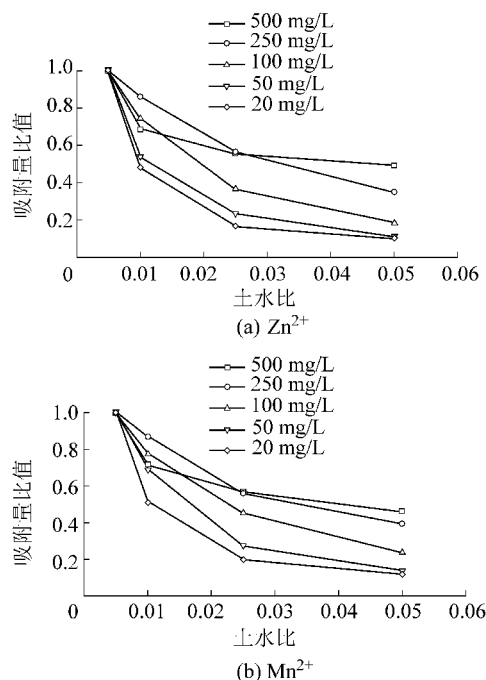


图 2 不同土水比条件下膨润土对重金属的吸附量与土水比为 1:200 条件下吸附量的比值
Fig. 2 Ratio of adsorption capacity of bentonite to heavy metal at different soil and water ratio to that at 1:200

从以上分析可以看出,土水比对膨润土吸附重金属的性能具有重要影响。在对煤矸石处置场衬垫层进行设计和建设时,往往需要遵循相对保守的原则,所以在进行 GCL 中膨润土吸附性能评价时,应该在尽可能大的土水比条件下开展批式吸附试验。

3.2 不同 pH 条件下 GCL 中膨润土的重金属吸附性能

土悬液 pH 对膨润土吸附重金属性能的影响如图 3 所示。总体上看,随着土悬液 pH 的降低(酸性渗滤液持续渗透使 GCL 中膨润土逐渐酸化,所以从 pH 由高到低对试验数据进行分析),膨润土对重金属的吸附性能逐渐降低。这是因为,随着 pH 的降低,土悬液中 H^+ 的浓度不断升高, H^+ 一方面会与土悬液中的 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 竞争膨润土黏粒表面上的吸附点位,从而抑制了膨润土对重金属的吸附^[16];另一方面, H^+ 浓度升高会导致膨润土黏粒表面负电荷密度降低,这也会促使膨润土对重金属吸附性能下降。另外,随着土悬液 pH 持续降低,原来在高 pH 条件下形成的重金属氢氧化物沉淀物以及各种羟基络合物都会溶解为 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} ,而它们无法与膨润土黏粒形成集合体而聚沉,这是低 pH 条件下膨润土吸附性能下降的另一个原因。

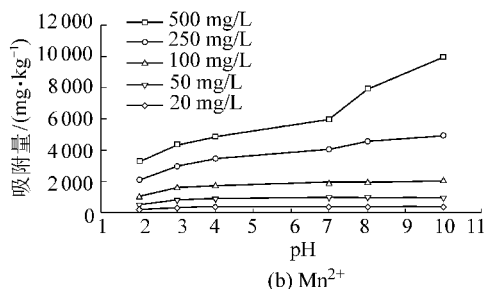
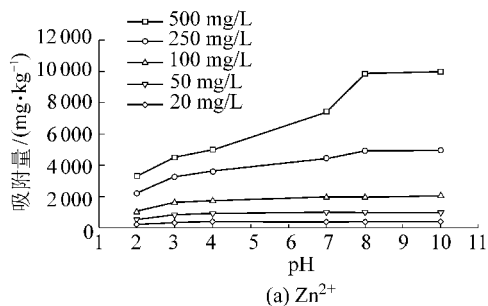


图 3 不同 pH 条件下膨润土对重金属的吸附量

Fig. 3 Adsorption capacity of bentonite to heavy metal at different pH

各 pH 条件下膨润土对重金属的吸附量与 pH=10 时膨润土对重金属吸附量的比值如图 4 所示。从图 4 可以看出,当 pH 从 10 降低到 2 时,膨润土对

重金属的吸附量降低了 50%~70%,具体降低幅度因土悬液中重金属的初始浓度不同而有所差异。需要指出的是,吸附能力下降大部分发生在 $pH < 8$ 以后,这与周利民等^[17]的研究结果类似,其在研究粉煤灰吸附重金属特性时发现,当溶液 pH 低于 8 后,粉煤灰对重金属的吸附能力急剧下降。之所以会出现这样的现象,是因为 $pH=8$ 是重金属 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 形成氢氧化物沉淀物以及各种羟基络合物的分界点,当土悬液 pH 低于此值时,重金属氢氧化物沉淀物以及各种羟基络合物会溶解为 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 而无法聚沉。

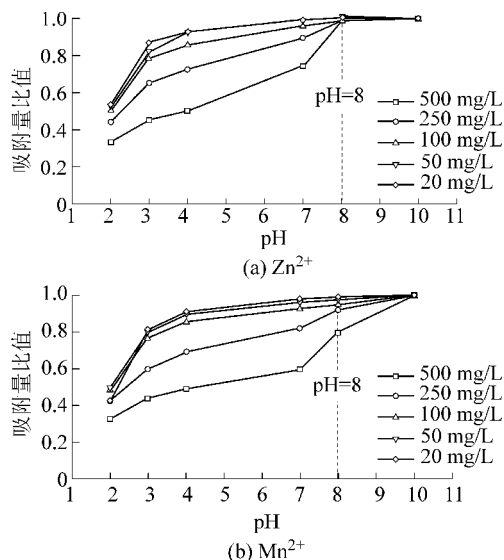


图 4 各 pH 条件下膨润土对重金属的吸附量与 pH=10 时膨润土对重金属吸附量的比值

Fig. 4 Ratio of adsorption capacity of bentonite to heavy metal at different pH to that at pH 10

从以上分析可以发现,膨润土对重金属的吸附性能与土悬液的 pH 有着显著关系。煤矸石渗滤液,特别是高硫煤矸石所产生的渗滤液,大多为酸性,其长期渗透必将使 GCL 中的膨润土酸化。为此,在对 GCL 内膨润土的重金属吸附性能进行评价时,应该在较低的 pH 条件下进行。

4 工程应用

为了与其他黏土材料进行比较,需要计算出 GCL 中膨润土对重金属的最大吸附量。使用 Langmuir 模型对土水比为 1:20、pH 为 2 的土悬液中重金属等温吸附数据进行拟合。之所以选择土水比为 1:20、pH=2 的土悬液,是因为此条件为最不利条

件,在此条件下膨润土对重金属的吸附性能最差,用此条件下所得拟合结果与已有数据进行比较最为保守。Langmuir 模型被广泛用于描述土体对各种溶质的吸附过程,其数学表达式为

$$C_s = \frac{C_{s,max}KC_e}{1 + KC_e} \quad (2)$$

式中: C_s 为反应平衡时膨润土对重金属吸附的质量,mg/kg; $C_{s,max}$ 为膨润土吸附重金属的最大吸附量,mg/kg; K 为与键能有关的 Langmuir 常数,L/mg; C_e 为吸附平衡时重金属质量浓度,mg/L。

吸附拟合结果如图 5 和表 1 所示。由拟合方程的决定系数 R^2 可以看出,使用 Langmuir 方程拟合试验数据是合适的。

表 2 统计了已有研究成果中其他黏土材料对重金属 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 的吸附量。从表 2 可以看出,即使是在最不利条件下,GCL 中膨润土对重金属的吸附量仍然大于其他大多数黏土材料。这表明 GCL 完全可以作为煤矸石处置场底部衬垫层的建设材料。

表 2 不同黏土矿物对重金属的最大吸附量

Table 2 Comparison of the max sorption capacity of heavy metals on different soils

黏土类型	污染源	土水比	最大吸附量(mg·kg ⁻¹)		参考文献
			Zn ²⁺	Mn ²⁺	
膨润土	煤矸石渗滤液	1:20	5 542.48	6 044.85	本研究
高岭土	工业废水	1:100	—	4 800.00	文献[18]
黄土	废弃物渗滤液	1:100	—	7 840.00	文献[19]
膨润土+石英砂+菱沸石	废弃物渗滤液	1:4	5 080.00	—	文献[20]
海相黏土	生活垃圾渗滤液	1:25	2 200.00	—	文献[21]

5 结 论

1) 土水比对 GCL 中膨润土吸附重金属的性能会产生显著影响,当土水比从 1:200 增加到 1:20 时,膨润土对重金属的吸附量降低了 50%~90%。因此,在进行 GCL 中膨润土吸附性能评价时,应该尽可能选择接近现场实际情况的土水比。

2) 土悬液 pH 对 GCL 中膨润土吸附重金属性能有着重要影响。当土悬液的 pH 从 10 降低到为 2 时,膨润土对重金属的吸附量下降了 50%~70%。所以,在对 GCL 中膨润土的重金属吸附性能进行评价时,应该在较低的 pH 条件下进行。

3) 即使是在最不利条件下,GCL 中膨润土对重金属 Zn^{2+} 和 Mn^{2+} 的吸附量仍然大于绝大多数黏土材料,所以其可以作为煤矸石处置场衬垫层的建设

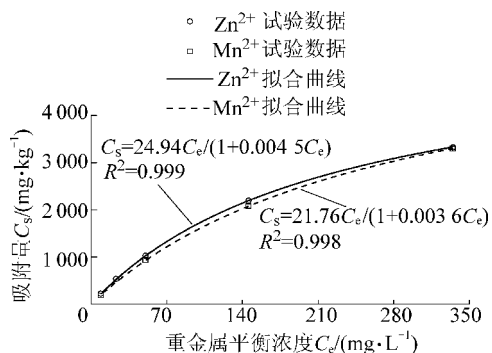


图 5 土水比 1:20 和 pH=2 条件下重金属吸附量 Langmuir 拟合曲线

Fig. 5 Langmuir isotherms for heavy metals at pH 2 and soil and water 1:20 plotted according to Langmuir isotherm equation

表 1 吸附试验结果 Langmuir 拟合参数

Table 1 Langmuir Fitting parameters of adsorption results

项目	土水比	pH	$K/$ (L·mg ⁻¹)	$C_{s,max}/$ (mg·kg ⁻¹)	$KC_{s,max}/$ (L·kg ⁻¹)	R^2
Zn ²⁺	1:20	2	0.004 5	5 542.48	24.94	0.999
Mn ²⁺	1:20	2	0.003 6	6 044.85	21.76	0.998

材料。

参考文献(References):

- [1] 王心义, 杨建, 郭慧霞. 煤矸石山周围地下水污染状况[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(2): 326-330.
WANG Xinyi, YANG Jian, GUO Huixia. Groundwater pollution near coal waste rock dump[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(2): 326-330.
- [2] 梁冰, 薛强, 刘晓丽. 煤矸石中硫酸盐对地下水污染的环境预测[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 27-30.
LIANG Bing, XUE Qiang, LIU Xiaoli. Environmental prediction on coal mine spoil of sulphate for groundwater pollution[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5): 27-30.
- [3] SRACEK Ondra, GZYL Grzegorz, FROLIK Adam, et al. Evaluation of the impacts of mine drainage from a coal waste pile on the surrounding environment at Smolnica, southern Poland[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 165(1): 233-254.
- [4] 胡振琪, 张明亮, 马保国, 等. 粉煤灰防治煤矸石酸性与重金

- 属复合污染[J].煤炭学报, 2009, 34(1): 79-83.
- HU Zhenqi, ZHANG Mingliang, MA Baoguo, *et al.* Fly ash for control pollution of acid and heavy metals from coal refuse [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 79-83.
- [5] 胡振琪, 张明亮, 马保国, 等. 利用专性杀菌剂进行煤矸石山酸化污染原位控制试验[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 23-26.
- HU Zhenqi, ZHANG Mingliang, MA Baoguo, *et al.* Selective bactericides for at-source pollution control of acid coal waste piles [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(5): 23-26.
- [6] 马保国, 胡振琪. 污泥和粉煤灰覆盖煤矸石山防治污染的模拟试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1553-1559.
- MA Baoguo, HU Zhenqi. Simulation experiment on control of coal gangue pollution using sewage-sludge and fly ash covering [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1553-1559.
- [7] 毕银丽, 苏高华, 郭婧婷, 等. 碱性粉煤灰对煤矸石硫污染防治技术[J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 622-625.
- BI Yinli, SU Gaohua, GUO Jingting, *et al.* Alkali-fly ash preventing technic on sulfur pollution of coal wastes [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6): 622-625.
- [8] 王国强, 赵华宏, 吴道祥, 等. 两淮矿区煤矸石的卫生填埋与生态恢复[J]. 煤炭学报, 2001, 26(4): 28-31.
- WANG Guoqiang, ZHAO Huahong, WU Daoxiang, *et al.* Gangue sanitary landfill and recovering ecological environment in Huaibei and Huainan Mining Area [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(4): 28-31.
- [9] 孙洪良, 朱利中. 十六烷基三甲基季铵盐-乙硫醇铵盐复合改性膨润土吸附性能研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(5): 1037-1042.
- SUN Hongliang, ZHU Lizhong. The performance of the HDTMA-AET modified bentonite as a sorbent for Cd and p-nitrophenol [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(5): 1037-1042.
- [10] 肖利萍, 潘纯林, 邓特钢. 膨润土在水处理中的应用研究与展望[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 28-33.
- XIAO Liping, PAN Chunlin, DENG Tegang. Application research and prospect of bentonite in water treatment [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(4): 28-33.
- [11] MALAMIS S, KATSOU E. A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: examination of process parameters, kinetics and isotherms [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 252/253: 428-461.
- [12] 胡克伟, 贾冬艳, 丽颜, 等. 膨润土对重金属离子的竞争性吸附研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 467-470.
- HU Kewei, JIA Dongyan, LI Yan, *et al.* Effect of bentonite on competitive adsorption of heavy metals ions [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(2): 467-470.
- [13] 杨秀敏, 胡振琪, 李 宁, 等. 钠基膨润土对重金属离子 Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} 的吸附实验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 819-822.
- YANG Xiumin, HU Zhenqi, LI Ning, *et al.* Adsorption of heavy metal Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} in Na-bentonite [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 819-822.
- [14] ROY W R, KRAPAC I G, CHOU S F J, *et al.* Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals [R]. Washington: the United States Environmental Protection Agency, 1991.
- [15] DU Y J, HAYASHI S. A study on sorption properties of Cd^{2+} on ariake clay for evaluating its potential use as a landfill barrier material [J]. Applied Clay Science, 2006, 32(1/2): 14-24.
- [16] 张明亮. 粉煤灰对煤矸石酸性重金属淋滤液的修复作用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 654-658.
- ZHANG Mingliang. Utilization of fly ash for remediation of heavy metals from acid coal waste leachate [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 654-658.
- [17] 周利民, 刘峙嵘, 黄群武. 粉煤灰对二价金属离子的吸附特性[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 416-419.
- ZHOU Limin, LIU Zhirong, HUANG Qunwu. Adsorption properties of fly ash towards bivalent metal ions [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 416-419.
- [18] YAVUZ Ömer, ALTUNKAYNAK Yalçın, GÜZEL Fuat. Removal of copper, nickel, cobalt and manganese from aqueous solution by kaolinite [J]. Water Research, 2003, 37(4): 948-952.
- [19] 王 艳, 唐晓武, 刘晶晶, 等. 黄土对锰离子的吸附特性及机理研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2292-2298.
- WANG Yan, TANG Xiaowu, LIU Jingjing, *et al.* Adsorption behavior and mechanism of loess soil towards manganese ions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2292-2298.
- [20] HONG Catherine S, SHACKELFORD Charles D, MALUSIS Michael A. Adsorptive behavior of zeolite-amended backfills for enhanced metals containment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(7): 4016021.
- [21] CHALERMYANONT Tanit, ARRYKUL Surapon, CHAROENTHAISONG Nanthanit. Potential use of lateritic and marine clay soils as landfill liners to retain heavy metals [J]. Waste Management, 2009, 29(1): 117-127.