

# 电厂粉煤灰场氟离子对地下水影响的试验

白继红, 张永波

(太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 在总结前人研究的基础上得知, 在自然淋溶条件下, 氟离子经常超过生活饮用水卫生标准甚至经常超过污水综合排放标准, 是粉煤灰中的主要污染因子。通过室内淋溶试验模拟大气降水对粉煤灰的淋溶过程, 以氟离子为模拟因子分析淋溶液对土壤和浅层地下水水质的影响, 模拟试验结果表明: 不同土层对氟离子都有不同程度的吸附能力; 位于不同地层的干灰场对地下水影响不同, 并且在干灰场底部增加黏土作为防渗层, 可有效缓解其对地下水的污染。

**关键词:** 粉煤灰; 氟离子; 地下水; 污染

**中图分类号:** X523 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)04-0408-04

## Experimental Study on Influence of Fluorine Ions Produced by Fly Ash Pond of Power Plant on Groundwater

BAI Ji-hong, ZHANG Yong-bo

(School of Water Conservancy Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract** The coal ash contains massive trace elements. During their long-term storage process, as the result of the rain water leaching, they possibly cause the pollution of groundwater environment. On the basis of summarizing the predecessor's studies,  $F^-$  often exceeds hygiene standard on drinking water, even exceed comprehensive drainage standard on waste water under natural leaching conditions, and is the main pollution factor in the coal ash. Through the leach experiment indoor, in which  $F^-$  is considered as a simulation factor, the process of atmosphere precipitation to the coal ash is simulated to analyze the influence of the solution to the soil and the shallow layer groundwater quality. It is found from the simulation that different soil layer has varying degree of  $F^-$  adsorptive capacity, the dry ash field located in different strata influences the groundwater differently and it can effectively alleviate the pollution of the groundwater by adding the clay as against infiltration level on the dry fly ash pond base.

**Key words:** fly ash; fluorine ion; groundwater; pollution

## 0 引言

粉煤灰是以煤为燃料的火力发电厂排放的废弃物。目前虽然许多大型电厂都采用了干贮灰技术, 但是雨水的淋滤作用仍然会引起渗漏, 粉煤灰中的有害物质, 将会通过包气带向下入渗。由于垂向入渗系数小, 渗透速度很慢, 在短期内对地下水污染不会有较大影响。但在长期淋溶作用下, 土壤

的环境容量将逐渐减小, 对地下水污染可能会逐渐加重。同时, 粉煤灰的大量堆放改变了原灰场的地形地貌, 使浅层地下水由无压变为有压, 这也可能对地下水产生一定影响。地下水流动性差, 一旦被污染将很难治理, 尤其对于中国水资源缺乏的地区, 必须引起重视。

国内外对干贮灰场的环境影响也进行过一些研究, 李定龙<sup>[1]</sup>在对淮南市窑河灰场环境水文地质

调研的基础上, 对拟建窑河洼灰场及该区浅层地下水环境质量现状进行了模糊数学评价, 以氟离子作为模拟因子, 对其 5 年后的污染范围和程度进行了预测评价。结果表明, 拟建新灰场运行后对周围地下水环境将会产生一定程度的影响, 而且从长远看, 这种影响不可忽视。Gilleg N<sup>[2]</sup> 等以 Seyitomer 电厂为例对灰场周围的土壤和水作了影响分析, 说明镉、铅、锌、铜主要来自灰场的粉煤灰, 铬、钴尽管浓度较高但对水和土壤不构成污染, 铅、铜对土壤有中等程度的污染。傅嘉媛等<sup>[3]</sup> 通过系统模拟试验研究了粉煤灰中主要有害元素在灰场正常运行条件下的浸出与迁移规律。结果表明, 这种废水中的主要污染物是氟和镉, 废水的 pH 值严重超标。这些研究多数是基于某一研究区域的, 针对性比较强, 不具普遍性。因此对火电厂干贮灰场粉煤灰在不同地质条件下的淋溶特性进行研究具有非常重要的意义。

笔者采用室内淋溶试验, 分别以粗砂、细砂、粉土和黏土模拟不同的地层, 通过氟离子分析位于不同地层的干灰场对地下水影响的不同, 从而为干贮灰场建设的可行性和地下水资源的保护提供依据。

### 1 试验材料

试验材料主要有粗砂、细砂、粉土、黏土, 取自太原一电厂干灰场的粉煤灰和自来水。

#### 1.1 试样的物理性质

同一材料由于颗粒的差异对试验有一定影响, 所以对试验材料进行了颗粒分析试验<sup>[4]</sup>, 结果如图 1、2。为了确定室内淋溶试验所需要的渗透系数, 对各种材料进行了渗流试验<sup>[4]</sup>, 结果如表 1。同时, 由于规定贮放粉煤灰需按最大干密度将其压实, 而黏土作为防渗层也要按最大干密度压实, 所以采用轻

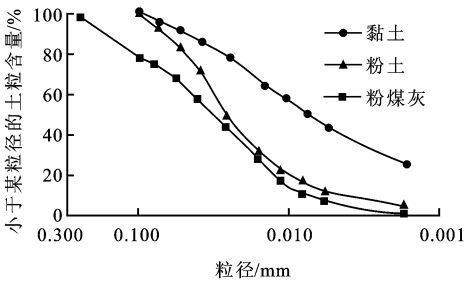


图 2 粉土、黏土和粉煤灰的颗粒分布曲线  
Fig. 2 Grain Size Distribution Curve of Silt, Clay and Fly Ash

型击实筒分别对粉煤灰和黏土做了击实试验, 测定黏土和粉煤灰的最大干密度分别为 1.655 2、1.126 8 g/cm<sup>3</sup>, 最优含水率分别为 21.26%、27.2%。

表 1 各种材料的压实干密度和渗透系数  
Tab. 1 Permeability Coefficient and the Dry Compaction Density of All Kinds of Material

岩层材料	黏土	粉土	细砂	粗砂	粉煤灰
压实干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.444	1.300	1.508	1.589	1.126 8
渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> )	0.006	0.130	9.570	20.800	0.080 0

#### 1.2 试样的化学性质

由于试验主要对氟离子进行测定, 所以有必要给出各种试验材料的氟离子本底值。按照《固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法》<sup>[5]</sup> 的要求对各种试样进行振荡浸取试验, 用 F-1 型氟离子浓度计测定其浸出液中的氟离子浓度<sup>[6]</sup>, 结果如表 2。

表 2 各种试样的 F<sup>-</sup> 本底值  
Tab. 2 F<sup>-</sup> Background of All Kinds of Test Sample

试样	灰水比	浸出时间	c(F <sup>-</sup> )/10 <sup>5</sup> (mol·L <sup>-1</sup> )
粗砂	1:10	振荡 8 h 后静置 16 h	2.875
细砂	1:10	振荡 8 h 后静置 16 h	2.571
粉土	1:10	振荡 8 h 后静置 16 h	4.178
黏土	1:10	振荡 8 h 后静置 16 h	3.183
粉煤灰	1:10	振荡 8 h 后静置 16 h	7.372
自来水		振荡 8 h 后静置 16 h	2.138

### 2 粉煤灰的淋溶试验

#### 2.1 试验器材及条件

试验器材主要有马氏瓶, 125 cm 高的 PVC 管和 F-1 型氟离子浓度计。淋溶试验采用内径为 14.5 cm、长 125 cm 的 PVC 管做淋溶柱, 淋溶柱固定在铁架上, 在淋溶柱的顶部放置 5 L 的可进行控制流量的马氏瓶, 用来盛放淋溶液, 在淋溶过程中连续不断地供水。PVC 管淋溶柱顶部一定高度处

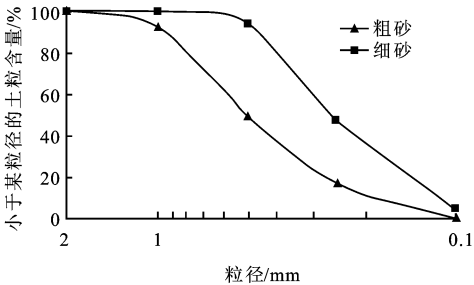


图 1 粗砂和细砂的颗粒分布曲线

Fig. 1 Grain Size Distribution Curve of Coarse Sand and Fine Sand

设有溢水孔,使试验保持定水头,在淋溶柱底部装有微孔塑料筛板和孔径为 0.154 mm 的铜网,以防装有的土层漏下,出口处设有接水容器。试验以自来水为淋溶液,采用定水头昼夜连续试验。在有淋溶液渗出时,每隔 12 h(对于黏土则每隔 24 h)用 F-1 型氟离子浓度计对所收集的淋溶液进行测量<sup>[3]</sup>。当收集的淋溶液所测得的数据在一定时间内变化不大时,停止试验。试验装置如图 3。

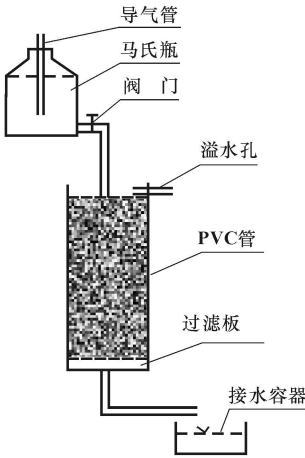


图 3 淋溶试验装置  
Fig. 3 Diagram of Leach Experiment Installation

2.2 试验方案

(1)纯灰的淋溶试验:纯灰高度为 0.4 m,按照击实试验测定的压实度装入 PVC 管中。这主要是为了说明纯灰中氟离子浓度的变化情况。

(2)在不采取措施即没有防渗层的情况下,不同土层上堆积粉煤灰的淋溶试验:柱子分为两层,土层位于柱子底部,高 0.7 m,粉煤灰层位于上部,高 0.4 m,土层按照渗透系数测定的模拟情况装柱,粉煤灰按照击实试验测定的压实度装柱,以此分析不同地层中氟离子渗透及其对地下水的影响。淋溶试验结束后卸下土柱,在每个柱子中距粉煤灰底部不同高度各取土样少许,对其作浸出试验,来说明粉煤灰中残留氟离子试验结束后在土层中的分布情况。

(3)在采取措施即增加防渗层的情况下,不同土层中堆积粉煤灰的淋溶试验:本试验采用黏土作为防渗层。柱子分为 3 层,土层位于底部,高 0.7 m。黏土位于土层上方,高 0.1 m,黏土按最大干密度来装。粉煤灰位于最顶部,高 0.3 m。该试验的目的在于分析有无防渗层对氟离子污染地下水程度的不同影响。

2.3 试验步骤

(1)将内径为 14.5 cm、长 125 cm 的 PVC 管淋溶柱固定在铁架上。

(2)分层装土样和粉煤灰样。土样位于底部,每次称取 2 000 g,按照渗透试验压实度装(表 1),

土样总高度 70 cm;粉煤灰位于土层上方,每次称取 1 500 g,按击实试验测得的最优含水率拌湿,按最大干密度  $1\,126.8\text{ g/cm}^3$  压实,粉煤灰高 40 cm。

(3)淋溶柱装好后,以自来水为淋溶液进行淋溶。采用定水头昼夜连续淋滤,水层厚度为 10 cm。

(4)当有渗透液时,每隔 12 h(粗砂、细砂、粉土和粉煤灰)或 24 h(黏土)测定该时段内淋出液的体积和氟离子浓度。

(5)淋溶试验结束后,卸下淋溶柱,距柱子底部 20、40、60 cm 处分别取一定质量的土样进行浸出试验,粗砂和细砂各取 115 g,加入 985 mL 自来水进行浸出试验;粉土和黏土各取 140 g,加入 960 mL 自来水进行浸出试验,以测定粉煤灰层下部不同高度处土样中所含氟离子的浓度。

(6)整理数据,绘出时间-氟离子浓度曲线。

3 试验结果分析

(1)纯灰的淋溶试验:用 F-1 型氟离子浓度计对每隔 12 h 收集 1 次的淋溶液进行测定,所得淋溶液中氟离子的浓度见图 4。从图 4 可看出,纯灰淋溶液中氟离子的浓度随时间增加先增大,达到一峰值后逐渐减小,最后稳定在  $5\times 10^{-5}\text{ mol/L}$  周围。分析出现该浸出现象的原因为,粉煤灰中所含氟化物以可溶性氟化物(凝聚在细粒飞灰表面的 HF 等)和难溶性氟化物( $\text{CaF}_2$ 、 $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  等)形态存在,刚开始淋溶时,可溶性氟化物溶解较多,随着淋溶时间增长,可溶性氟化物逐渐溶解析出,淋溶液中氟离子迅速减少,在此过程中,难溶性氟化物随着淋溶时间的增长也在缓慢溶解,二者结合即出现氟离子淋溶释放过程。通过曲线模拟,其变化趋势大致呈指数变化。

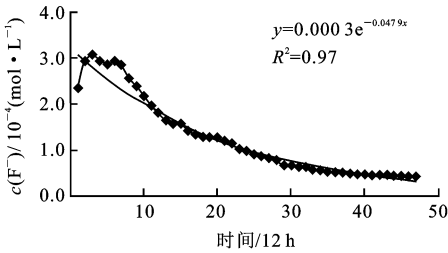


图 4 纯灰柱淋溶液中氟离子的浓度变化曲线  
Fig. 4 Change Curve of  $\text{F}^-$  Concentration of Leachate from Fly Ash Column

(2)在不采取措施的情况下,不同土层上堆积粉煤灰的淋溶试验:用 F-1 型氟离子浓度计对每隔 12 h 或 24 h 收集 1 次的淋溶液进行测量,其结果

如图 5、6。

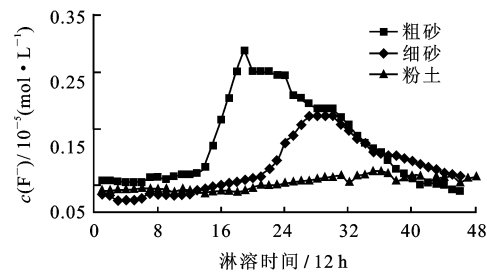


图 5 粗砂、细砂和粉土淋溶液中氟离子的浓度变化曲线  
Fig. 5 Change Curve of F<sup>-</sup> Concentration of Leachate from Coarse Sand, Fine Sand and Silt

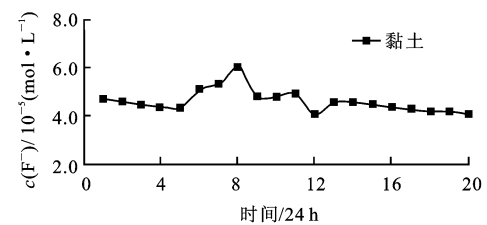


图 6 黏土淋溶液中氟离子的浓度变化曲线  
Fig. 6 Change Curve of F<sup>-</sup> Concentration of Leachate from Clay

从图 5、6 的粗砂、细砂、粉土和黏土淋溶液中氟离子浓度随时间的变化中可以看出, 粗砂和细砂淋溶液中氟离子浓度都是随时间的增加先缓慢增加, 一定时间后急剧增加, 达到峰值后再缓慢减少, 但是细砂出现峰值的时间要滞后, 这是因为粗砂的渗透性比细砂强, 所以在粗砂土层中, 粉煤灰中的氟离子能很快淋溶出来。而粉土和黏土淋溶液中氟离子的浓度随时间变化不大。在粗砂、细砂和粉土这 3 种土层淋溶液中的氟离子浓度在试验结束时大致都保持在  $5.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 。而黏土淋溶液中的氟离子在相同时间内远低于上述 3 种土层。可见黏土对氟离子的吸附能力很强。另外从表 1 还可以得出, 渗透系数越大的土层, 对氟离子的吸附能力越弱。

淋溶试验结束后的每个柱子中距粉煤灰底部不同高度所取土样作浸出试验, 整理数据得图 7。从图 7 可以看出, 距粉煤灰越远的土层对氟离子的吸附越少。在 4 种土层中, 粗砂和细砂中所含氟离子要普遍低于粉土和黏土, 而且粗砂对氟离子的吸附随粉煤灰距离的远近变化不大。粉土中所含氟离子要高于黏土, 这大概是由于粉土本身的氟离子本底值高于黏土造成的(表 2)。

(3)在采取措施的情况下, 不同土层中堆积粉

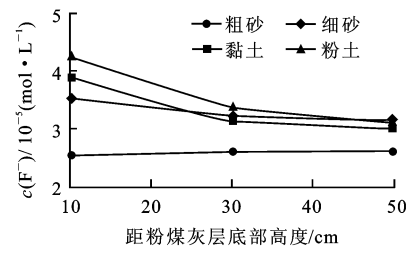


图 7 不同高度处土样层的氟离子的浓度变化曲线  
Fig. 7 Change Curve of F<sup>-</sup> Concentration of Lixivation Solution of the Soil Layer at Different Altitude

煤灰的淋溶情况: 本试验只做了粗砂和细砂两种土层加 10 cm 黏土层的淋溶试验, 经过 90 d 一直未见有淋溶液。由于黏土按最大干密度来装时, 渗透系数为  $1.21 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ , 按该渗透系数计算, 经过大概 2.6 年时间才能通过 10 cm 的黏土层。

## 4 结语

(1)粉煤灰淋溶液中氟离子浓度随时间的变化趋势大致呈指数变化, 即  $y$  为  $0.0003e^{-0.0479x}$ , 其相关系数  $R$  为 0.98。

(2)淋溶液中氟离子的浓度大都呈现由小逐渐增大, 达到峰值后再逐渐减小, 但各自达到峰值的时间不同, 这与各种土层的渗透系数和对氟离子的吸附能力有关。

(3)不同土层对氟离子均有一定的吸附能力, 但吸附力强弱不同。土层渗透系数越小对氟离子的吸附能力越大, 即粉土和黏土对氟离子的吸附能力要比细砂和粗砂的强。

(4)在使用黏土作防渗层处理后, 可以有效降低粉煤灰中氟离子对地下水的污染。

## 参考文献:

[ 1 ] 李定龙. 拟建窑河洼电厂灰场对地下水环境的影响评价[ J ]. 江苏石油化工学院学报, 2000, 12(1): 44-48.  
[ 2 ] Gilleg N, Canci G B, Erler A. Assessment of Soil and Water Contamination Around an Ash-disposal Site; a Case Study from the Seyitbmer Coal-fired Power Plant in Western Turkey [ J ]. Environmental Geology, 2001, 40(3): 331-344.  
[ 3 ] 傅嘉媛, 董 榕. 粉煤灰中主要有害元素的浸出与迁移试验研究[ J ]. 福州大学学报: 自然科学版, 2004, 32(1): 123-126.  
[ 4 ] 袁聚云, 徐 超, 赵春风, 等. 土工试验与原位测试[ M ]. 上海: 同济大学出版社, 2004.  
[ 5 ] GB 5086.2—1997 固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法[ S ].  
[ 6 ] GB/T 15555.11-1995, 固体废物氟化物的测定离子选择性电极法[ S ].