

# 宽粒级煤泥浮选机流体动力学模拟与试验研究

杨润全，王怀法

(太原理工大学 矿业工程学院，山西 太原 030024)

**摘要：**针对常规浮选中粗颗粒与气泡碰撞概率低，且与气泡粘附后也会因矿浆的强烈湍流运动而极易从气泡上脱落的问题，结合粗、细粒矿物浮选特点，设计了一种适合于粗、细粒矿物分选的宽粒级煤泥浮选机。采用 FLUENT 软件对该浮选机进行了气-液两相流场数值模拟研究，通过对浮选机内流体速度、湍流强度和气相浓度的分析，验证了该结构浮选机可为粗粒和细粒矿物浮选提供各自所需的流体力学环境。采用组建的实验室宽粒级煤泥浮选试验系统对章村矿选煤厂 0~1 mm 煤泥进行了浮选试验。结果表明，通过选择合适的浮选工艺条件，采用该浮选机对 0~1 mm 宽粒级煤泥浮选时，浮选精煤数量指数和可燃体回收率分别为 96.33% 和 92.07%。

**关键词：**煤泥；浮选；宽粒级；流体动力学；气-液两相流

**中图分类号：**TD94      **文献标志码：**A      **文章编号：**0253-2336(2012)11-0120-05

## Study on Fluid Dynamics Simulation and Experiment of Wide Particle Grade Slime Floatator

YANG Run-quan, WANG Huai-fa

(School of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Due to the coarse particles were heavy and had a low probability to the bubble collision in the conventional floatation, once sticking on the bubbles, the particles would be easily detached from the bubbles by the strong turbulence movement of slurry. In combination with the floatation features of the coarse and fine particle minerals, a wide particle grade coal floatator suitable for coarse and fine minerals separation was designed. The FLUENT software was applied to the numerical simulation study on the gas - fluid two phase flow filed of the floatator. With the analysis on the inner fluid velocity, turbulence intensity and gas - phase concentration of the floatator, the structure floatator was approved to provide each fluid dynamics environment required for the coarse and fine coal floatation. A wide particle grade slime floatation experiment system set in the lab was applied to the floatation experiment on the slime with 0~1 mm in Zhangcun Mine Coal Preparation Plant. The results showed that with a suitable floatation technique condition selected, when the floatator was applied to the floatation of the 0~1 mm wide grade slime, the quantity index of the floated clean coal and the combustible mass recovery rate were 96.33% and 92.07% individually.

**Key words:** slime; floatation; wide particle grade; fluid dynamics; gas - fluid two phase flow

近年来，随着机械化采煤技术的发展与广泛应用，原煤中小于 1 mm 粒级含量有逐渐增大的趋势，而介于粒级 1~0.15 mm 的粗煤泥是重选方法处理的下限范围和常规浮选技术处理的上限范围，加之部分选煤厂采用脱泥分选工艺，使得粗煤泥的高效分选成为制约当前选煤工艺技术发展和选煤厂

技术经济效益提高的瓶颈。因此，研究扩大浮选适宜的粒度范围，特别是提高浮选粒度上限有重要意义。常规浮选过程中，由于较粗的矿粒比较重，在浮选机中不易悬浮，与气泡碰撞概率低且矿粒易从气泡上脱落，浮选效果较差，这也是粗颗粒浮选研究过程中的难题。针对粗粒浮选效果差的主要原

收稿日期：2012-04-17；责任编辑：代艳玲

基金项目：山西省科技攻关资助项目（20080321066）；山西省科技创新计划资助项目（2010102010）

作者简介：杨润全（1975—），男，山西代县人，讲师，博士研究生。联系人：王怀法，教授，博士生导师，E-mail: tyut01@126.com

网络出版时间：2012-11-16 11:08:01；网络出版地址：<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20121116.1108.031.html>

引用格式：杨润全，王怀法. 宽粒级煤泥浮选机流体动力学模拟与试验研究 [J]. 煤炭科学技术，2012，40 (11): 120~124, 128.

因, 文献 [1] 认为, 矿粒-气泡感应时间的增加使两者不能粘着是根本原因; Schultze H. J. [2] 认为粗粒浮选恶化的根源在于矿粒极易从气泡上脱落。文献 [3-5] 对浮选槽内矿浆湍流强度进行了研究, 指出机械搅拌式浮选机内矿浆的强烈湍流运动, 是阻碍矿粒, 特别是粗矿粒与气泡粘附及使其从气泡上脱落的根源。因此, 降低矿浆运动的湍流强度是保证粗粒浮选的根本措施。为了强化粗粒矿物的浮选, 国内外学者均对粗粒浮选工艺及设备进行了大量研究工作, 开发了多种粗粒浮选机<sup>[6-11]</sup>。与此同时, 随着计算流体动力学 (CFD) 的发展, 在浮选研究领域, 浮选机内部流场分析和预测得到了广泛应用<sup>[12-19]</sup>。针对常规浮选机对粗颗粒浮选过程中出现的问题, 设计了一种新型宽粒级煤泥浮选机, 以实现上限 1 mm 煤泥的宽粒级浮选。

## 1 宽粒级煤泥浮选机分选原理

宽粒级煤泥浮选机整体结构如图 1 所示, 其主要部件是由外筒体、内筒体、叶轮机构、定子、格栅板、循环通道、矿浆分配箱等组成。

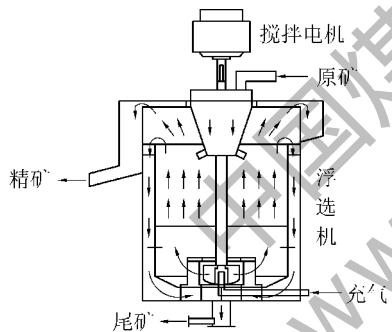


图 1 宽粒级煤泥浮选机结构示意

浮选机工作时, 电动机通过传动机构带动叶轮旋转, 来自鼓风机的压缩空气通过充气管加入叶轮旋转区, 与矿浆充气混合后, 从叶轮周边甩出, 与定子挡板强烈碰撞后, 穿过定子挡板进入浮选机格栅板下部细粒矿化区, 此时内筒中细粒矿化区内的矿浆中含有大量气泡, 矿浆和气泡以一定的速度上升通过格栅板, 与矿浆分配箱流出的矿浆相遇, 形成流态化悬浮层, 在上升水流和上升气泡流的共同作用下, 矿化泡沫上升到液面形成泡沫层, 因气泡负载能力不足而脱落的颗粒, 在叶轮抽吸和压差力的作用下, 可经内筒和外筒之间的矿浆循环区再次进入叶轮搅拌区实现二次矿化, 尾矿则由浮选机底

部的排放口排出。

该浮选机的结构特点是: ①采用格栅板稳流技术, 将细粒浮选强紊流区与粗粒浮选弱紊流区分离, 为细粒与粗粒浮选提供不同的流体力学环境; ②浮选机内矿浆运动形式强化了矿浆循环, 采用假底技术, 增强了底部循环, 消除了粗粒在槽底的沉积, 同时也为矿化颗粒从气泡上脱落后再次浮选提供了条件; ③入料矿浆采用中心入料, 直接送至格栅板上方的高气含率流态化区域内, 缩短了粗颗粒上浮的路程, 加快了浮选速度, 提高了分选效果。

为了验证浮选机结构设计的合理性, 对浮选机分别进行了流场数值模拟和实验室试验研究。

## 2 浮选机内部流场数值模拟

### 2.1 模型建立和网格划分

根据实验室宽粒级煤泥浮选机主体结构特征, 采用 FLUENT 软件的前处理工具 GAMBIT 进行浮选机三维物理模型的构建, 如图 2 所示。

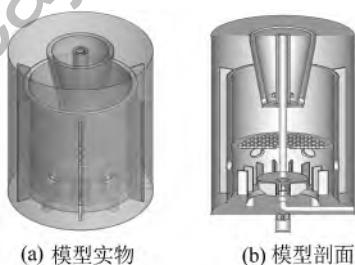


图 2 浮选机物理模型

浮选机中包含叶轮-定子系统以及辅助构件, 结构相对比较复杂, 对模型采用分块划分网格的办法, 将整个计算域分割成若干小区域, 在规则区域内利用六面体和棱柱单元体进行区域离散, 而对于非规则区域, 则采用四面体和金字塔形单元体进行区域离散, 将整个计算域划分为约 65 万个混合型网格。

### 2.2 数值计算方法和边界条件确定

数值模拟采用 FLUENT 6.3.16 软件, 液相选取水, 气相选取空气, 流动模型选择 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型。由于浮选机中有叶轮的机械搅拌过程, 因而将计算域分成 2 部分: 包含叶轮的旋转运动域和其余部分的静态域, 对旋流域流场计算采用多重参考系法 (MRF)。多相流模型选取 EULERIAN 双流体模型, 同时采用 Phase Coupled SIMPLE 算法处理压力-速度耦合计算。由于浮选机属于多

进口多出口，收敛相对比较困难，因而模拟采用非稳态算法，迭代残差设置为0.001。

计算域的2个入口均设置为速度入口，进水口按入料量 $0.05\text{ m}^3/\text{h}$ 进行速度计算，进气口按浮选机充气量 $0.925\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 进行速度计算，同时假定绝大部分流体由浮选机下部的尾矿排放口排出，为了控制排放量，选择下出口为速度出口，出口速度按照矿浆通过量和下出口截面进行估算，而上部的精矿出口采用压力出口，假定出口压力为1个标准大气压，浮选机叶轮主轴转速定为1000 r/min，其圆周速度约为2.62 m/s。对浮选机内近壁区湍流流动采用标准壁面函数进行计算，计算过程中引入重力，分析其对流场的影响。

### 2.3 数值计算结果分析

1) 速度场分布。浮选机内水相和气相的速度分布云图如图3所示。由图3可以看出，在浮选机内筒格栅板下部以及靠近叶轮搅拌区，其液相和气相速度值高于格栅板上部，这种高速流动为细颗粒与气泡的碰撞和粘附创造了有利条件，而在格栅板上部，液相和气相的速度趋于平稳，且形成稳定的上升流，由此为粗粒浮选创造了有利的流体力学环境，可促使粗粒矿物在上升气泡流和上升水流的共同作用下，升浮进入泡沫产品。这种流态为粗粒和细粒矿物浮选提供了各自所需的流体力学条件，从而可实现粗、细粒矿物分区分选。

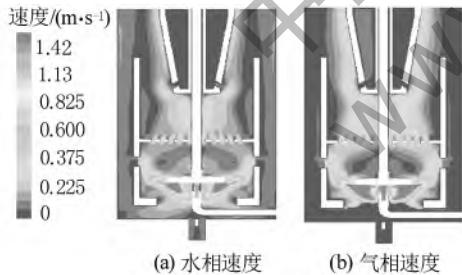


图3 水相速度和气相速度分布云图

2) 湍流强度分布。浮选机湍流强度分布云图如图4a所示。由图4a可以看出，浮选机格栅板下部叶轮搅拌区形成强烈的湍流，从而在保证颗粒悬浮的同时，可有效增加细颗粒与气泡的碰撞概率，有利于细粒矿化，而在格栅板上部则是弱湍流环境，因此在保证矿化颗粒不易从气泡上脱落的同时，为粗颗粒浮选创造了有利的流体力学环境。这种格栅板上部和下部形成的不同湍流环境，可促进粗、细颗粒实现有效分选。

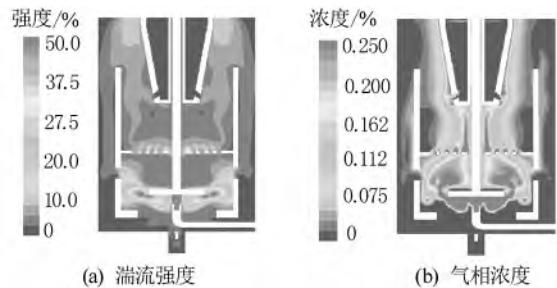


图4 湍流强度与气相浓度分布

3) 气相浓度分布。浮选机内气相浓度分布云图如图4b所示。由图4b可以看出，在格栅板下方，气泡浓度明显高于格栅板上方，这种高浓度的气泡可使槽体内形成足够的气-液分选界面，增加细粒矿物与气泡的碰撞概率，在到达格栅板上部后，携带有细粒的矿化气泡以及空气泡与加入的新鲜矿浆相遇后，矿浆中的矿粒在上升水流和上升气泡流的共同作用下，形成气-固-液三相流态化床层，促使粗粒和细粒疏水矿物粘附到气泡上形成矿化泡沫，并随上升流一起升浮形成泡沫产品。这种分选过程可使承载粗粒矿物的气泡升浮距离变短，更有利粗粒矿物的浮选。

## 3 浮选试验

### 3.1 试验系统

宽粒级浮选试验系统如图5所示，采用 $\phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 粗粒浮选机作为关键分选设备， $\phi 500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 搅拌桶作为调浆设备，采用蠕动泵给料，充气由气泵从外界压入浮选机。浮选过程中，矿浆在搅拌桶中调制合适的浓度，再加入浮选药剂经充分调浆后，由给料蠕动泵送入浮选机矿浆分配箱中，空气由气泵压入浮选机下部的叶轮搅拌区，经浮选机分选后，浮选泡沫从浮选机上部溢出成为精矿产品，尾矿由浮选机底部排出，浮选机内液面高度由尾矿出口安装的排料阀进行调节。在整个系统运转过程中，采用变频器来调节给料蠕动泵和浮选机搅拌电动机的转速，从而实现浮选机给料量和浮选机叶轮转速达到试验要求，充气量则通过浮子流量计来监测浮选机中的进气量，从而完成整个浮选过程条件的控制。

### 3.2 试验煤样及特性

为了考察浮选机对宽粒级煤泥的浮选效果，采用漳村矿选煤厂 $1\sim0\text{ mm}$ 粒级原煤煤样，按GB/T

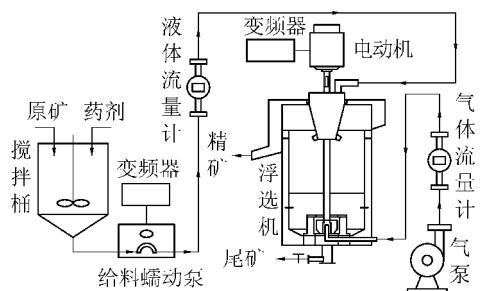


图 5 宽粒级煤泥浮选试验系统

19093—2003《煤粉筛分试验方法》对煤样进行筛分试验,结果见表1。由表1可以看出,入浮煤泥中,大于0.5 mm粒级煤泥含量占23.74%,小于0.25 mm粒级占59.71%,各粒级灰分分布比较平均,均在16%左右,只有小于0.045 mm粒级灰分较高,为19.28%。由小筛分试验结果可知,煤样中大于0.5 mm粒级含量约占全级的1/4,若采用常规浮选方法很难实现对该粒级煤的有效分选。

表1 煤样筛分试验结果

粒级/mm	产率/%	灰分/%	累计产率/%	累计灰分/%
0.71~1	2.81	17.01	2.81	17.01
0.5~0.71	20.94	16.79	23.74	16.82
0.25~0.5	16.55	16.32	40.29	16.61
0.125~0.25	24.25	15.79	64.54	16.30
0.074~0.125	7.91	15.54	72.46	16.22
0.045~0.074	8.22	15.91	80.68	16.19
-0.045	19.32	19.28	100	16.79
合计	100	16.79	—	—

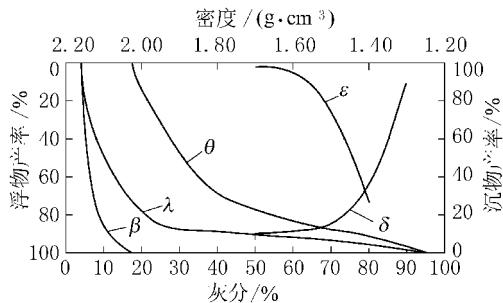
表2 转速对不同粒级产品产率和灰分的影响

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	精煤产率/%			精煤灰分/%			尾煤产率/%			尾煤灰分/%		
	0.5~1	0.25~0.5	-0.25	0.5~1	0.25~0.5	-0.25	0.5~1	0.25~0.5	-0.25	0.5~1	0.25~0.5	-0.25
840	76.06	85.55	82.72	8.13	8.27	11.81	23.94	14.45	17.28	49.37	56.43	40.62
980	77.99	90.30	86.39	8.61	8.86	12.90	22.01	9.70	13.61	60.43	65.40	39.49
1120	77.91	92.75	74.62	8.63	8.84	12.22	22.09	7.25	25.38	47.90	47.84	40.12

注: 粒级单位为 mm。

由表2可以看出,叶轮不同转速下,精煤灰分随粒度减小呈增大趋势,而0.25~1 mm粒级精煤灰分不超过9%的同时,尾煤灰分均高于45%,尤其是叶轮转速为980 r/min时,尾煤灰分均高于60%。将浮选产品各粒级综合后,精煤灰分为10%时,精煤综合产率均在80%以上,尾煤灰分在40%以上,尤其是叶轮转速为980 r/min时,尾煤灰分在55%以上,由此说明该浮选机可对1~0 mm宽粒级煤泥实现有效分选。

按GB/T 19092—2003《煤粉浮沉试验方法》,对漳村矿选煤厂1~0 mm粒级煤泥进行浮沉试验,并绘制可选性曲线,如图6所示。



λ—灰分特性曲线; β—浮物曲线; θ—沉物曲线;  
ε—密度曲线; ε—密度±0.1曲线

图6 1~0 mm粒级原煤可选性曲线

由图6可以看出,该厂1~0 mm煤泥在精煤灰分为10%时,精煤理论产率为87.97%,原煤泥可选性等级属易选煤。

### 3.3 试验结果与讨论

实验室浮选药剂选用煤油作为捕收剂,用量1 000 g/t,仲辛醇作为起泡剂,用量100 g/t,试验采用连续浮选试验,分别对浮选机叶轮转速和入料矿浆浓度进行试验研究。

1) 叶轮转速对浮选结果的影响。矿浆入料质量浓度100 g/L,充气量0.925 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·min),浮选机叶轮主轴转速分别取840、980、1 120 r/min,其圆周速度分别为2.199、2.566、2.932 m/s时,浮选产品各粒级产率和灰分见表2。

2) 矿浆浓度对浮选结果的影响。该组试验选取浮选机叶轮主轴转速980 r/min,充气量0.925 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·min),矿浆入料质量浓度分别选取75、100、150 g/L时,产品各粒级占本级产率与灰分见表3。由表3可知,矿浆入料质量浓度为100 g/L时,0.5~1和0.25~0.5 mm粒度级精煤灰分分别为8.61%和8.86%,而尾煤灰分则达到60.43%和65.40%,说明在矿浆质量浓度为100 g/L时,浮选机对0.25~1 mm粗煤泥可达到较好的分选效

果。同时综合各粒级产品后发现,不同矿浆浓度下,在保证精煤灰分10%,综合产率80%以上的

同时,尾煤灰分可保持在40%以上,尤其是矿浆浓度为100 g/L时,尾煤灰分在55%以上。

表3 矿浆浓度对不同粒级浮选产品产率和灰分的影响

矿浆质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	精煤产率/%			精煤灰分/%			尾煤产率/%			尾煤灰分/%		
	0.5~1	0.25~0.5	-0.25	0.5~1	0.25~0.5	-0.25	0.5~1	0.25~0.5	-0.25	0.5~1	0.25~0.5	-0.25
75	71.85	88.22	85.77	8.11	9.81	12.26	28.15	11.78	14.23	41.41	56.98	40.45
100	77.99	90.30	86.39	8.61	8.86	12.90	22.01	9.70	13.61	60.43	65.40	39.49
150	69.88	88.35	77.19	8.01	8.64	11.56	30.12	11.65	22.81	44.62	54.52	35.48

注:粒级单位为mm。

3) 浮选效果评定。参照MT 180—1988《选煤厂浮选工艺效果评定方法》和GB/T 16417—1996《煤炭可浮性评定方法》,对宽粒级煤泥浮选机的浮选效果采用浮选精煤数量指数和浮选精煤可燃体回收率进行评定。

通过实验室试验结果可知,当浮选机叶轮转速为980 r/min、矿浆入料浓度为100 g/L时,浮选精煤产率为85.27%,灰分为10.15%,依据标准分别计算了浮选精煤数量指数和浮选精煤可燃体回收率。计算浮选精煤数量指数时,由原煤可选性曲线查得精煤灰分为10.15%时,精煤理论产率为88.52%,以此值来代替标准浮选精煤产率。计算可得浮选精煤数量指数为96.33%,浮选精煤可燃体回收率为92.07%,由此说明该宽粒级浮选机有效分选粒度上限可达1 mm。

## 4 结 论

针对目前常规机械搅拌式浮选机对粗颗粒浮选效果较差的问题,结合粗、细粒矿物浮选所需的流体力学条件不同,采用格栅板稳流技术设计了一种可形成流态化悬浮层的新型宽粒级煤泥浮选机。利用FLUENT软件对浮选机内部流场进行了气-液两相流数值模拟。结果表明,该浮选机结构可同时提供粗粒浮选所需的弱湍流流体力学环境和细粒浮选所需的强湍流流体力学环境,从而实现粗、细颗粒的有效分选。采用组建的实验室浮选系统对1~0 mm煤泥进行了浮选试验,结果表明,该浮选机可对1 mm以下煤泥达到较好的分选指标。

## 参考文献:

- [1] Jowett A. Formation and Disruption of Bubble-particle Aggregates in Flotation [C] //P Somasundaran. Fine Particle Processing: Proceeding of the International Symposium, Las Vegas, Nevada, AIME, New York, 1980: 720~754.

- [2] Schultze H J. New Theoretical and Experimental Investigational on Stability of Bubble-particle Aggregates in Flotation: a Theory on the Upper Particle Size of Floatability [J]. International Journal of Mineral Processing, 1977, 4 (3): 241~259.
- [3] 曾克文,余永富.浮选矿浆紊流强度对矿物浮选的影响[J].金属矿山,2000 (9): 17~20.
- [4] 曾克文,薛玉兰,余永富.浮选槽中固-液-气三相流中颗粒的速度[J].金属矿山,2001 (5): 21~23.
- [5] 曾克文,余永富,薛玉兰.浮选槽中颗粒的速度及对浮选的影响[J].化工矿物与加工,2002 (6): 1~4.
- [6] 贝楚依登霍特 G. 贝特曼浮选机 [J]. 国外金属矿选矿, 1996 (9): 33~37.
- [7] 董干国,刘桂芝.BF-L型浮选机的研究 [J].稀有金属, 2006, 30 (S1): 115~118.
- [8] 刘慧林,刘振春,王勇,等.粗颗粒浮选机的研制与应用[J].矿冶,1998,7 (2): 58~62.
- [9] 曹亮,陈东,张文明,等.一种粗颗粒机械搅拌式浮选机的研究 [J].有色金属(选矿部分),2007 (4): 26~28.
- [10] 刘振春,沈政昌,刘惠林.CLF粗粒浮选机的研制 [J].有色金属(选矿部分),1992 (2): 15~20.
- [11] Cowbum J, Harbort G, Manlapig E, et al. Improving the Recovery of Coarse Coal Particles in a Jameson Cell [J]. Minerals Engineering, 2006 (19): 609~618.
- [12] Koh P T L, Schwarz M P. CFD Model of a Self-aerating Flotation Cell [J]. International Journal of Mineral Processing, 2007, 85: 16~24.
- [13] Koh P T L, Schwarz M P. CFD Modelling of Bubble-particle Attachments in Flotation Cells [J]. Minerals Engineering, 2006 (19): 619~626.
- [14] Juha Tiitinen, Jussi Vaarno, Sami Gronstrand. Numerical Modelling of an Outokumpu Flotation Device [C]. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 2003: 167~170.
- [15] Liu T Y, Schwarz M P. CFD-based Modeling of Bubble-particle Collision Efficiency with Mobile Bubble Surface in a Turbulent Environment [J]. International Journal of Mineral Processing, 2009, 90: 45~55.

(下转第128页)

闭合，也可能仍然留存，这符合事物的发展规律。

2) 经过探地雷达测试和高密度电法测试，漏水水田无明显裂缝，但存在漏水区域。根据图1 地质综合柱状，该地区第四系组成为黏土、砂质、砾石等，黏土层以下土壤空隙大；第三系上部位为灰色、粉红色石灰岩，白云质灰岩及白云岩，中夹巨厚层砾状灰岩，底部为白云质灰岩，岩石本身不透水，但经过采煤影响，有可能出现岩石破碎、裂隙发育。因此从土壤中渗漏的水分向下进入深部隔水层。

3) 结合采煤塌陷的地表移动规律<sup>[16]</sup>可知，采煤导致塌陷裂缝，同时岩体受采煤塌陷和地球重力影响下的拉伸、收缩过程，影响水田土壤的水环境，使地表土壤层出现裂隙，并导致水田漏水。

4) 结合农学知识可知，正常情况下水田的犁底层，即土壤中的隔水层约在地表以下30 cm 处，犁底层经过地表田间作业的压实，且没有受到翻耕作业，导致土体密实，可以对水田生产起到很好的保水作用，水稻根系分布主要集中在地下30 cm 土层中，位于犁底层上方，因此可认为保护水田水分的第1道防护为土壤中的犁底层，而煤炭开采活动破坏了犁底层的这一保护作用，导致犁底层向下土壤层内存在裂缝或土体松动等情况，最终使水田中的水下渗。

5) 水田漏水从另一个角度看，水田的供水量小于渗水量和蒸发量之和，其中渗水量大于常规渗水量，导致供水不足是根本原因，因此可以从增加供水量和减少渗水量2个方面解决这一问题。

## 4 结 论

从现场调查和入渗试验，可以发现采煤塌陷对水田的破坏主要有3种形式：塌陷田、漏水田、裂缝田，与正常生产条件土壤渗透系数对照，表现在土壤层次不明显，变化范围较大，部分地方的土壤稳定渗透系数在适合水稻田生长的正常范围内，部分地方的土壤稳定渗透系数较高，符合水田漏水后废弃的发展规律。探地雷达和高密度电法对采煤塌陷水田的探测，均出现异常，说明该地区都有裂缝或土壤扰动导致的裂损。这种裂损出现的根本原因是地下开采活动引起，直接原因是田面根茬下方的隔水层没有起到隔水保障作用。

## 参考文献：

- [1] 严家平,赵志根,许光泉,等.淮南煤矿开采塌陷区土地综合利用[J].煤炭科学技术,2004,32(10):56-58.
- [2] 魏忠义,胡振琪,司继涛,等.采煤沉陷地粉煤灰充填复垦土壤元素淋溶特性实验研究[J].农业环境保护,2002,21(1):13-15,18.
- [3] 王霖琳,胡振琪,赵艳玲,等.中国煤矿区生态修复规划的方法与实例[J].金属矿山,2007(5):17-20.
- [4] 王莹,董霁红.徐州矿区充填复垦地重金属污染的潜在生态风险评价[J].煤炭学报,2009,34(5):650-655.
- [5] 鲁叶江.压实处理对矸石充填复垦土壤水分的影响[J].煤炭科学技术,2010,38(11):125-128.
- [6] 胡振琪,魏忠义,秦萍.矿山复垦土壤重构的概念与方法[J].土壤,2005,37(1):8-12.
- [7] 胡振琪,贺日兴,魏忠义,等.一种新型沉陷地复垦技术[J].煤炭科学技术,2001,29(1):17-19.
- [8] 顾和和,胡振琪,秦延春,等.泥浆泵复垦土壤生产力的评价及其土壤重构[J].资源科学,2000,22(5):37-40.
- [9] 康惊涛,冯永军,王晓玲.新型复垦基质的植物生长适应性研究[J].煤炭科学技术,2007,35(9):55-57.
- [10] 王巧妮,陈新生,张智光.采煤塌陷地复垦研究综述[J].中国国土资源经济,2009(6):23-24.
- [11] 汤洪志,黎正根,贺小军,等.探地雷达在管线探测与工程勘察中的应用[J].华东地质学院学报,1999,22(2):156-166.
- [12] 钟韬,邓艳平.高密度电法在西部岩溶地区勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2009,6(S1):80-85.
- [13] 田卫东.瞬变电磁探测岩溶水的应用效果[J].山西煤焦科技,2003(8):41-43.
- [14] 方堃,陈效民,张佳宝,等.红壤地区典型农田土壤饱和导水率及其影响因素研究[J].灌溉排水学报,2008,27(4):67-69.
- [15] 李燕杰.综合物探在新生黄土裂缝探测中的应用[J].勘察科学技术,2008(5):62-64.
- [16] 邹友峰,邓喀中,马伟民.矿山开采沉陷工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.

(上接第124页)

- [16] Liu T Y, Schwarz M P. CFD-based Multiscale Model of Bubble particle Collision Efficiency in a Turbulent Flotation Cell [J]. Chemical Engineering Science, 2009 (64): 5287-5301.
- [17] XIA Ji-liang, Antti Rinne, Sami Gronstrand. Effect of Turbulence Models on Prediction of Fluid Flow in an Outotec Flotation Cell [J]. Minerals Engineering, 2009 (22): 880-885.
- [18] 刘春艳,程宏志,石焕.XJM-S8型浮选机数值模拟及槽内矿浆流态分析[J].选煤技术,2009(3):20-22.
- [19] 李仁年,唐堃,韩伟,等.气液固三相流在机械搅拌充气式浮选机内运动的数值模拟[J].兰州理工大学学报,2009,35(1):37-40.