

# 离层充填开采注浆液运移通道与溶质扩散特征研究

樊 振 丽<sup>1,2</sup>

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013;2. 煤炭科学研究院 开采研究分院,北京 100013)

**摘要:**基于淮北矿区粉煤灰离层充填开采工程实践,为了查明粉煤灰离层充填体的赋存空间、水平与垂向运移通道、溶质在采动条件下的扩散特征,运用示踪试验和数值分析方法,对离层注浆液的储存位置、运移通道和溶质扩散特征进行了研究,研究发现离层等采动裂隙随工作面的推进而动态演化,粉煤灰浆液主要集中在离层带中,少量浆液通过采动裂隙和构造裂隙进入采掘空间,浆液对地下水的影响范围随时间的变化而逐渐减小,影响程度逐渐减弱。研究结果表明:试验矿井的导水裂隙带达到峰值并逐渐稳定后,顶板63~77 m上部区域出现了大面积的水平离层区,是粉煤灰充填体主要储存空间;粉煤灰浆液受地下水的稀释和净化作用,注浆20年后基本消除浆液对地下水水质的影响。

**关键词:**离层充填开采;粉煤灰浆液;运移通道;溶质扩散特征

**中图分类号:**P641.69;X523    **文献标志码:**A    **文章编号:**0253-2336(2017)07-0172-08

## Grouting liquid migration pathway and solute diffusion characteristics of abscission layer mining with filling

Fan Zhenli<sup>1,2</sup>

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. Mining Research Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:**Based on engineering practice of abscission layer mining with filling in Huabei Mining Area, in order to find out the spatial relationship of filling body of fly ash in abscission layer, horizontal and vertical migration pathways and solute diffusion characteristics under the condition of coal mining by using the methods of tracer test and numerical analysis, the author studied the storage space, transmitting pathway and solute diffusion characteristics. Results showed that with the advancing of workface, the mining fracture was evolved dynamically, fly ash slurry was mainly concentrated in the abscission zone, a small amount of slurry was poured into mining space by mining fissures and structural fissures. The influence scope of the slurry on the ground water decreased gradually with the change of time, and the effect degree decreased gradually. Results also showed that, 63~77 m region of upper roof appeared horizontal abscission zone with large area, which was the main storage space of fly ash filling body. Affected by dilution and purification of groundwater, with 20 years' grouting, the influence of slurry on the quantity of groundwater could be eliminated.

**Key words:**abscission layer mining with filling; fly ash grouting liquid; migration pathway; solute diffusion characteristics

## 0 引言

离层带注浆充填开采是将注浆液作充填体和承载体,不仅减小了上覆岩层的下沉空间,而且有

利于分担工作面隔离煤柱所承受的覆岩载荷,最终利用煤层覆岩的自承载能力控制弯曲下沉的部分开采方法<sup>[1]</sup>。注浆材料随着离层带岩层的弯曲、变形甚至破裂,在高压泵送作用下扩散、运移、

收稿日期:2016-12-12;责任编辑:曾康生    DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.07.031

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045007-003)

作者简介:樊振丽(1983—),男,河南新密人,副研究员,博士。Tel:13811597727, E-mail:fanzhenli@tdkcsj.com

引用格式:樊振丽.离层充填开采注浆液运移通道与溶质扩散特征研究[J].煤炭科学技术,2017,45(7):172-179.

Fan Zhenli. Grouting liquid migration pathway and solute diffusion characteristics of abscission layer mining with filling[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 172-179.

堆集并逐渐充实离层空间。淮北矿区地面村庄密集,存在严重的村庄压煤问题,为此,矿区开发并推广应用了“采动覆岩分区隔离注浆充填不迁村采煤技术”,地面减沉效果良好,创造了巨大的经济和社会价值。然而,充填体并非仅存在于离层空间,浆液的运移沿天然岩体裂隙、构造裂隙和采动裂隙逐渐扩散,甚至可能对采煤工作面安全回采造成影响,离层注浆充填工程带来的环境和安全问题必须引起足够的重视。

目前,国内学者对离层带注浆开采的研究主要集中在离层注浆充填开采技术的基础理论、注浆材料、工程设计、减沉效果的检测等方面。朱卫兵等<sup>[1]</sup>提出了“充填体+关键层+分区隔离煤柱”作为统一承载体的离层注浆减沉理论与技术,并在充填工艺方面进行了改革,在淮北矿区进行了大规模工程应用;王成真等<sup>[2]</sup>为了解决离层浆液水问题,尝试研究了超高水材料充填技术;文献[3-4]对离层带注浆充填水压裂缝延展机理、注浆工艺参数、注浆效果评价和工程检测方法进行了深入研究;赵德深等<sup>[5]</sup>针对离层注浆充填效果进行了综合评价,实测地表减沉率达到了38.5%。综上所述,国内学者在基础理论、注浆装备与工艺、减沉效果评价与检测等方面的研究相对成熟,然而,对离层注浆充填体的溶质扩散规律的研究鲜有文献记载<sup>[6]</sup>,且部分理论成果与工程实际常不一致,加强钻孔探测、示踪试验等现场测试工作,并结合数值计算等先进方法是研究该问题的必然选择和有效途径<sup>[7-9]</sup>。

为了探明离层注浆液的储存空间和可能的运移通道,在研究了采动裂隙和离层带分布特征的基础上,对浆液运移通道进行了示踪试验探测,并开展了浆液运移规律模拟研究,为工作面安全回采和离层带安全、高效注浆提供了有力的支撑。

## 1 离层注浆充填工作面地质采矿条件

7226工作面为袁店二矿82采区首采工作面,工作面采高2.7~4.8 m,工作面长度180 m,推进总长820 m,倾角3°~13°。工作面上覆松散层厚度平均260 m,基岩厚度198~218 m,平均208 m;开采深度463~483 m,平均约473 m。开采方法为综采一次采全高,全部垮落法管理顶板。7226工作面受地面高长营和谐新村影响,且搬迁难度大,对该工作面进行了地面注浆充填不迁村开采。

7226工作面注浆站设置在工业广场东南部,

通过输浆管道分别向注1、注2、注3和注4孔注浆(图1)。设计的注浆层位上限在松散层以下40~65 m位置处,注浆层位下限在煤层顶板导水裂隙带之上的离层带中,导水裂隙带顶部至离层带间留一定厚度的保护带,典型的注浆钻孔结构如图2所示。



图1 7226工作面注浆站与注浆孔分布

Fig. 1 Grouting station and distribution of grouting holes in Workface 7226

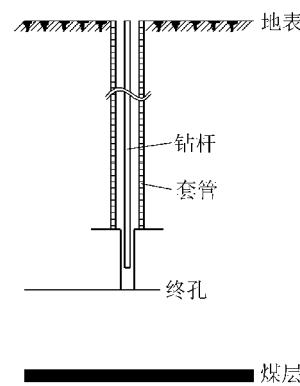


图2 典型注浆钻孔结构示意

Fig. 2 Typical drilling structure of grouting hole

## 2 导水裂隙带、离层带发育特征与注浆层位空间关系

天然裂隙和采动裂隙等空隙是注浆体赋存和运移的主要空间和通道,注浆体能否被准确注入离层位置及保护带能否有效地阻止高压浆液进入井巷是离层注浆充填开采的关键,而有效预计采动裂隙的发育高度是查明注浆层位空间关系和评价保护带抵抗注浆压力能力的基础。

## 2.1 导水裂隙带和离层带发育特征

### 2.1.1 垮落带、导水裂隙带发育高度预计

1)经验公式法预计。7226工作面采高为2.7~4.8 m,利用文献[10]中硬覆岩的经验公式预计垮落带和导水裂隙带高度。即:

$$H_m = \frac{100 \sum M}{4.7 \sum M + 19} \pm 2.2 \quad (1)$$

$$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6 \quad (2)$$

式中: $H_m$ 为垮落带发育高度,m; $H_{li}$ 为导水裂隙带发育高度,m; $\sum M$ 为累计采高,m,单层采高1~3 m,累计采高不超过15 m。

将采高极值分别代入式(1)和式(2)中,式中的中误差取正值,得出该工作面垮落带高度为10.72~13.75 m,导水裂隙带高度为39.69~48.15 m。

由于预计7226工作面采高为2.7~4.8 m,综采一次采全高,部分区域采高超出了经验公式中单层采高不超过3 m的适用范围,因此对超过3 m的区域采用类比法预计“两带”高度。

2)类比法预计。根据相似覆岩类型矿井的“两带”实测数据<sup>[11~13]</sup>(表1),类比分析7226工作面采高3.0~4.8 m时的“两带”高度。

依据表1中垮采比和裂采比平均值,计算采高为3.0~4.8 m时, $H_m = 11.43 \sim 18.29$  m, $H_{li} = 44.13 \sim 70.61$  m。因此,综合经验公式法和类比法的预计结果,当采高为2.7~4.8 m时, $H_{li} = 39.69 \sim 70.61$  m。

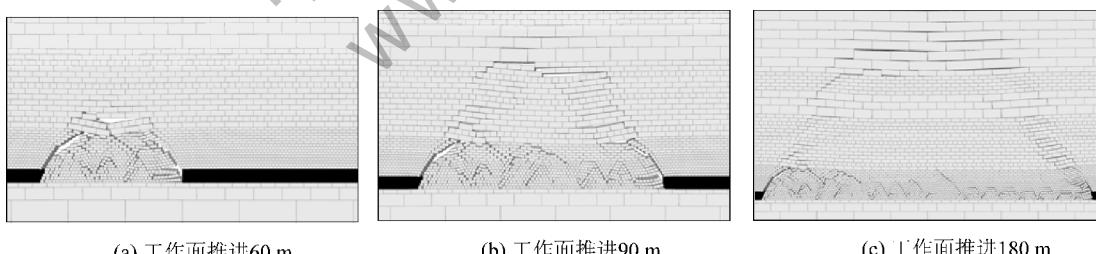


图3 覆岩破坏高度动态发育过程

Fig. 3 Dynamic development process of damage height of overburden rock

上部区域又出现了较大范围的水平离层区,之前离层区被裂缝带取代;工作面推进至110~180 m时(图3c),导水裂隙带达到峰值并逐渐稳定,顶板63~77 m上部区域出现了大面积的水平离层区。因此,随着工作面的推进导水裂隙带发育经历了“发生→发展→达到最大→压缩降低”的过程,覆岩破坏高度逐渐由小至大,在此过程中伴随着离层的“发生→向上发展→出现导水裂隙带顶部稳定发育

表1 中硬覆岩综采一次采全高“两带”实测数据

Table 1 Medium hard strata “two belts” measured data of fully-mechanized and full-seam cutting

实测地点	采高/m	$H_m/m$	垮采比	$H_{li}/m$	裂采比
祁东煤矿 7130	3.00	11.94	3.98	29.51	9.84
五沟矿 1013	3.10	14.23	4.59	67.35	21.73
五沟矿 1016	3.50	—	—	64.40	18.40
五沟矿 1017	3.50	—	—	48.40	13.83
祁南煤矿 345	3.10	11.70	3.77	41.70	13.45
桃园煤矿 1031	3.70	11.70	3.16	54.30	14.68
桃园煤矿 1062	3.00	13.82	4.61	53.41	17.80
张庄矿 514	3.50	8.10	2.31	34.00	9.71
潘一矿	3.40	16.24	4.78	45.10	13.26
潘一矿	3.40	11.27	3.31	48.90	14.38
平均值	3.32	12.38	3.81	48.71	14.71

### 2.1.2 离层带动态发育特征

煤层采出后,顶板岩层由原来的三维受力状态变为二维的受力状态,当达到岩体的抗拉剪强度极限时,岩体沿着原生或次生的节理裂隙破断形成较小的岩块,煤层采空后岩块垮落形成垮落带、导水裂隙带,软硬岩层间形成离层,离层空间随工作面的推进而不断变化。

7226工作面利用UDEC分析显示(图3):模拟工作面开采20~70 m时(图3a),导水裂隙带开始发生破坏并向上发展,裂缝带顶部25~27 m上部区域有小面积离层出现;工作面推进至80~100 m时(图3b),导水裂隙带继续向上发育,顶板36~41 m

区→闭合”的过程。

### 2.2 粉煤灰浆液空间赋存

导水裂隙带随着工作面推进尺寸和时间的增加呈现先增大后稳定的趋势,在此期间伴随着离层带的发生、发展、压缩、消失的过程,且离层带发育层位高度也呈现由低至高的趋势,但范围在不断扩大,始终保持在导水裂隙带主、亚关键层附近区域<sup>[14~15]</sup>。

当水平离层区出现后,如果水平离层间没有得

到充填, 离层区以上的覆岩层将在竖直应力的作用下弯曲下沉, 从而使得水平离层区逐渐闭合, 并随着工作面的推进, 覆岩不断弯曲下沉, 从而后续工作面推进过程中的水平离层发育程度明显降低。

如果水平离层间得以充填, 厚硬岩层(主关键层或亚关键层)的弯曲下沉得到控制, 使得覆岩内部的弯曲下沉向上发育扩展不明显, 厚硬岩层挠度较小, 将以固支梁的形式存在于覆岩中, 从而控制覆岩移动变形与地表沉陷。

7226工作面主要注浆孔的注浆层位见表2, 由表2可知, 注浆孔的终孔位置均处于导水裂隙带之上, 注浆段高在裂缝带之上地层中, 该段高是离层带发育区段, 即7226工作面的粉煤灰浆液被准确注入该面煤层顶板的离层带中。由覆岩破坏高度预计结果可知, 保护带厚度为10~60 m, 一般30~40 m, 注浆液未直接注入导水裂隙带中。

表2 7226工作面钻孔注浆层位

Table 2 Grouting layer of drilling holes of Workface 7226

钻孔	终孔深度/m	终孔距煤层顶板高度/m
注1	388	80
注2	367	100
注3	387	80
注4	350	122

### 3 浆液运移通道示踪试验探测

#### 3.1 浆液运移通道分析

煤矿区水体的运动主要通过孔隙淋滤入渗、天然构造等、采动裂隙(地裂缝、导水裂隙带)和人工工程(钻孔等)等过水通道进入地下<sup>[16]</sup>。袁店二矿注浆区域被巨厚松散层覆盖, 地表不受地质构造和封孔不良钻孔影响, 且地裂缝不发育, 地表注浆站区域以松散孔隙淋滤入渗形式为主(图4)。

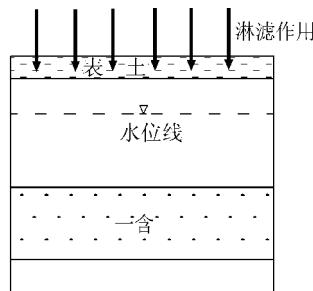


图4 粉煤灰地表淋滤入渗作用示意

Fig. 4 Surface leaching infiltration effect of fly ash

袁店二矿粉煤灰浆液通过管道输送到地下基岩40~65 m位置, 且高于裂隙带, 进入二叠系, 故该矿地下浆液主要影响二叠系石盒子组和山西组砂岩裂

隙含水层。袁店二矿地层结构与注浆层位及其影响含水层层位如图5所示。

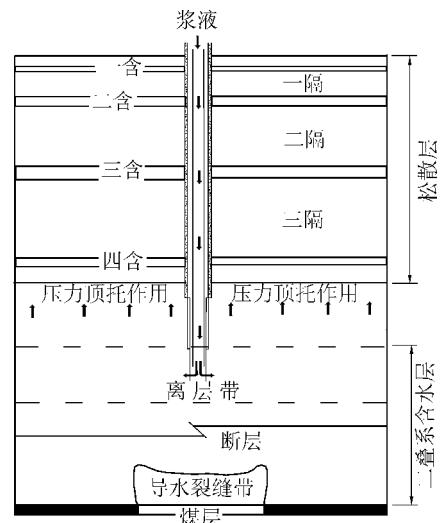


图5 袁店二矿地层结构与注浆层位及其影响的含水层

Fig. 5 Stratum structure and grouting influencing aquifer in Yuandian No. 2 Coal Mine

由图5袁店二矿地层结构可知, 浆液进和注入浆层位(离层带)后, 在注浆压力的作用下, 向下有通过断层、导水裂隙带等通道进入采掘工作面的可能, 向上在托顶作用下, 可能在离层带上部一定范围内形成越流、渗透, 由于松散层的三隔厚度较大, 不会影响饮用水源层的一含、二含和三含。

#### 3.2 浆液运移通道示踪试验探测

为了探明离层粉煤灰浆液运移通道及其与井巷空间的连通性, 将6 t工业NaCl和200 t粉煤灰作为示踪剂以瞬时投放方式由注3孔输送至离层区。根据袁店二矿井下突水点位置及突水点水量, 选择82采区下部泄水巷口I、7226运输巷封闭墙处II、7223运输巷J29点III作为示踪剂监测点, 如图6所示。

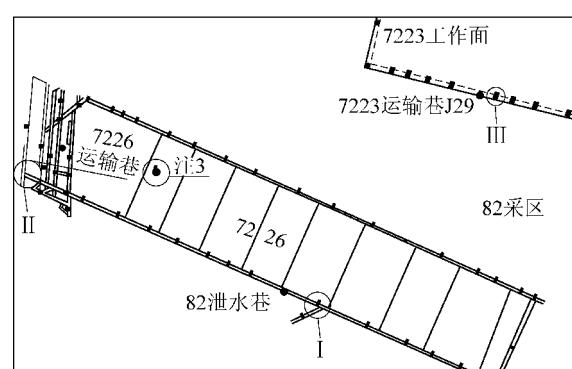


图6 投源孔与监测点位置

Fig. 6 Locations of source hole and monitoring points

通过对3个监测点水化学背景值、水样连续取样测试,得到了监测离子浓度 $\rho$ 随时间的变化特征(图7—图12)。

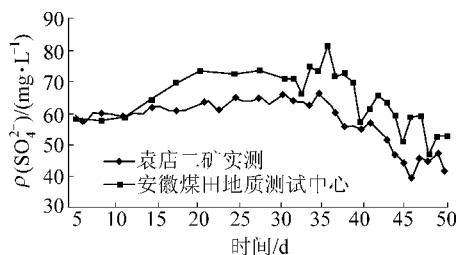


图7 I监测点 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度随变化

Fig. 7  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration change in Monitoring Point I

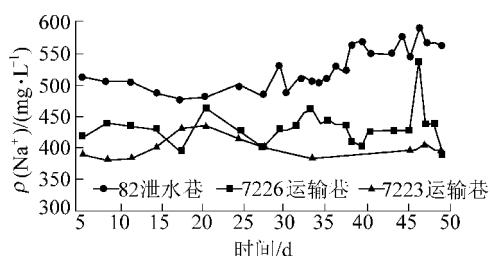


图8 井下监测点 $\text{Na}^+$ 浓度随时间变化特征

Fig. 8  $\text{Na}^+$  concentration change characteristics of coal mine monitoring points

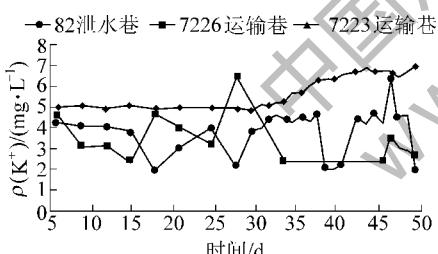


图9 井下监测点 $\text{K}^+$ 浓度变化特征

Fig. 9  $\text{K}^+$  concentration change characteristics of coal mine monitoring points

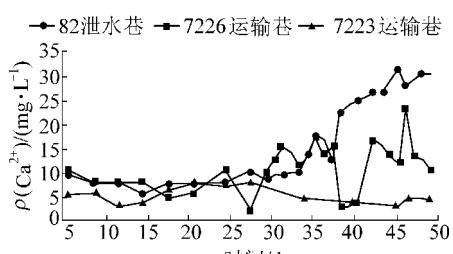


图10 井下监测点 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度随时间变化特征

Fig. 10  $\text{Ca}^{2+}$  concentration change characteristics of coal mine monitoring points

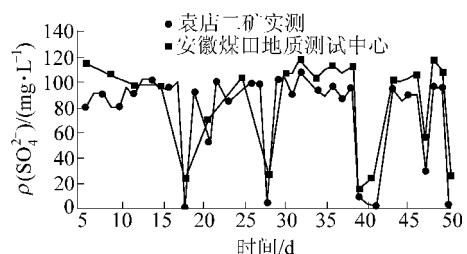


图11 II监测站 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度变化特征

Fig. 11 Characteristics of  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration change in Monitoring Point II

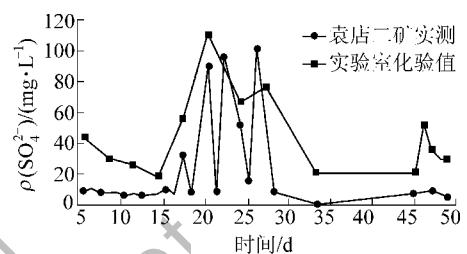


图12 III监测站 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度变化特征

Fig. 12 Characteristics of  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration change in Monitoring Point III

1) 82采区下部泄水巷口处监测点 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度变化特征表明,示踪试验进行到20 d时,地下水中的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度出现明显的趋势性增高,示踪离子浓度具有异常增高的特点,岩层裂隙与巷道间具有水力联系。到达峰值区时间区段为36~39 d,即示踪剂从投源孔到达82采区下部泄水巷口的时间为38 d左右。

2) 7226运输巷封闭墙处监测点 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度变化特征均表明,这些离子浓度仅出现小幅度波动或增高,未出现明显的浓度增高峰值区间,表明示踪剂未到达7226运输巷封闭墙处监测点。

3) 7223运输巷J29监测点水样中的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度变化特征十分类似,地下水 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度均有不同程度的增高,形成了一个时长约20 d的峰值区间,并与 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度随时间变化特征相吻合,表明示踪剂经过15 d左右进入7223运输巷J29监测点,岩层裂隙与巷道间具有水力联系。

示踪试验表明:正常块段粉煤灰浆液溶质通过采动裂隙以矿井水为载体渗入至井下,注浆液与采掘空间存在水力联系,但未形成规模性的管流等浆液涌出现象。然而,矿井在生产过程中,曾发生在断层破碎带跑浆现象,表明天然的地质构造是浆液运

移的一类重要通道。因此,离层粉煤灰浆液运移的主要通道是采动裂隙和地质构造。

#### 4 浆液扩散规律模拟分析

离层带中的粉煤灰浆液溶质随地下水水流场而扩散,利用GMS软件建立溶质运移模型模拟研究开采条件下粉煤灰浆液中典型溶质 $\text{SO}_4^{2-}$ 的运移规

律<sup>[17-19]</sup>。根据区域水文地质调查、水文地质勘探资料及水文地质试验结果,分析研究区地质、水文地质条件,对含水层和隔水层的不同岩性地层分别赋予不同的渗透系数和储水系数,并依据水文地质参数和现场示踪试验,对浆液运移弥散参数进行识别,作为浆液运移计算模型的赋值参数<sup>[20-22]</sup>,见表3。

表3 地层水文地质参数

Table 3 Main strata hydro-geological parameters

层号	水文地质层	水平渗透系 数 $K_h/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	储水系数	有效孔 隙度	纵向弥散系数 $D_L/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
1	新生界松散层第一含水层(组)	0.550~1.590	$(9.2\sim13.0)\times10^{-4}$	0.15	28.2
2	新生界松散层第一隔水层(段)	0.011~0.056	$(1.3\sim2.6)\times10^{-5}$	0.03	4.5
3	新生界松散层第二含水层(组)	0.340~1.270	$(2.6\sim9.2)\times10^{-3}$	0.17	23.3
4	新生界松散层第二隔水层(段)	0.029~0.054	$(1.3\sim2.6)\times10^{-5}$	0.04	1.9
5	新生界松散层第三含水层(组)	0.132~0.755	$(4.9\sim10)\times10^{-4}$	0.15	29.5
6	新生界松散层第三隔水层(段)	0.015~0.047	$(4.9\sim26.0)\times10^{-5}$	0.03	3.5
7	新生界松散层第四含水层(组)	0.059~0.123	$(1.3\sim26.0)\times10^{-4}$	0.23	21.9
8	3煤上隔水层	0.011~0.018	$(1.3\sim4.9)\times10^{-5}$	0.05	3.1
9	3~4煤间砂岩(K3)裂隙含水层(段)	0.034~0.093	$(4.9\sim13.0)\times10^{-4}$	0.21	27.3
10	4~6煤间隔水层(段)	0.005~0.012	$(1.3\sim20.0)\times10^{-5}$	0.01	1.3
11	7~8煤上、下砂岩裂隙含水层(段)	0.019~0.088	$(1.0\sim4.9)\times10^{-4}$	0.17	22.7
12	8煤下铝质泥岩隔水层(段)	0.005~0.010	$(2\sim26)\times10^{-5}$	0.01	4.8
13	10煤顶底板砂岩裂隙含水层(段)	0.034~0.036	$(1.3\sim10)\times10^{-4}$	0.02	21
14	10煤至太原组灰岩隔水层(段)	0.012	$2.6\times10^{-5}$	0.02	2.2
15	石炭系太原组石灰岩岩溶裂隙含水层(段)	0.015~36.4	$1.0\times10^{-5}$	0.15	28.9
16	石炭系本溪组铝质泥岩隔水层(段)	0.010	$2.6\times10^{-5}$	0.01	4.9
17	奥陶系石灰岩岩溶裂隙含水层(段)	0.0072~60.2400	$1.3\times10^{-3}$	0.15	24.6

注:渗透系数数据来源于安徽三队编制的《袁店二井煤矿矿井水文地质类型划分报告》;储水系数参考该报告中水文钻探数据以及中国地质调查局《地下水数值模拟技术要求》(2004)。

在示踪溶质运移模型中,泄漏源强通过Well子程序包来实现。根据示踪试验情景分析, $\text{SO}_4^{2-}$ 初始浓度设为1 344.1 mg/L,利用MODFLOW和MT3D计算包,联合运行水流和水质模型,得到示踪试验时各监测点 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度曲线监测结果,如图13和图14所示。

由图13和图14可以看出,正常情况下,整个模拟区地下水 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度的变化情况。图中数据表明,这2个监测点 $\text{SO}_4^{2-}$ 实测浓度曲线与模拟浓度曲线拟合较好,表明溶质运移模拟计算模型构建合理。

根据示踪试验200 t粉煤灰浆液配比,计算并设置 $\text{SO}_4^{2-}$ 初始浓度为1 344.1 mg/L,注浆量为744

$\text{m}^3/\text{d}$ ,持续时间约1年时, $\text{SO}_4^{2-}$ 扩散羽前锋距注浆井中心距离约为200 m(图15a)。

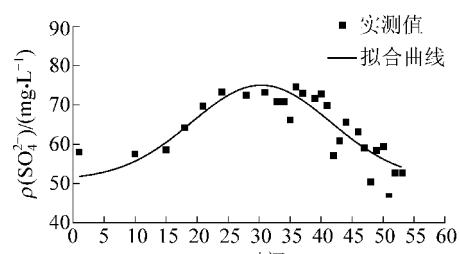


图13 82采区监测点 $\text{SO}_4^{2-}$ 实测与模拟浓度拟合

Fig.13  $\text{SO}_4^{2-}$  measured and simulated fitting concentration of monitoring point in Mining Area 82

注浆结束后继续监测溶质运移特征,模拟发现 $\text{SO}_4^{2-}$ 羽锋随时间的推移逐渐向周边运移扩散,且采空区一侧运移范围较大(图15)。由于地下水的稀释和矿井排水作用,在注浆后的第3年 $\text{SO}_4^{2-}$ 污染羽中心浓度便降到50 mg/L以下,5年以后 $\text{SO}_4^{2-}$ 羽最高浓度30 mg/L以下,若不考虑地下水本底值,地下水 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度远小于《地下水质量标准》(GB/T 14848—1993)中Ⅲ类标准限值250 mg/L,对地下水污染影响小。 $\text{SO}_4^{2-}$ 羽的前锋范围在5年范围达到最大,扩散至7223工作面的中部,迁移半径在1 km范围内。随后迁移范围由于地下水的

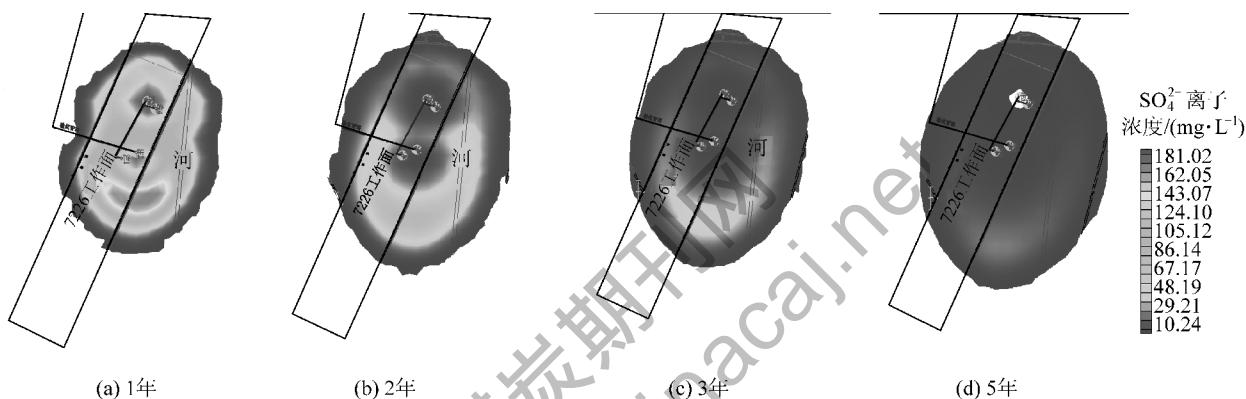


图15 7226工作面开采条件下不同时间节点 $\text{SO}_4^{2-}$ 羽分布范围

Fig. 15  $\text{SO}_4^{2-}$  feather distribution range under the mining condition during different time slots in Workface 7226

## 5 结 论

1) 煤层开采过程中离层带动态出现在导水裂隙带顶部区域,并随工作面的回采而呈现发生—发展—闭合的阶段性发育规律。粉煤灰浆液充填于离层带内,没有直接进入导水裂隙带,离层充填开采有效控制了覆岩移动变形。

2) 示踪试验和矿井开采实践表明储存于离层带的粉煤灰浆液运移的主要通道是采动裂隙和地质构造。

3) 数值模拟计算结果显示:粉煤灰浆液连续注入离层1年后浆液初始扩散半径为200 m,5年后溶质扩散范围达到最大,迁移半径约1 km。粉煤灰浆液受地下水的稀释和矿井开采的影响,溶质羽随时间的延长而缩小,注浆20年后基本消除浆液对地下水水质的影响。

致谢:该研究是淮北矿区离层注浆对地下水影响研究课题的部分成果,感谢参与该项目的全体人

员!特别感谢胡炳南研究员、刘金辉教授、陈功新教授在项目研究中给予的帮助以及袁店二矿侯善军科长在现场试验过程中给予的帮助!

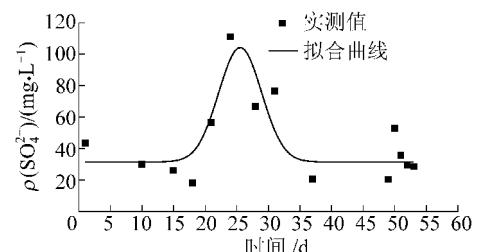


图14 7223工作面J29监测点 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度实测与拟合

Fig. 14  $\text{SO}_4^{2-}$  measured and simulated concentration fitting figure in Monitoring Point J29 of Workface 7223

员!特别感谢胡炳南研究员、刘金辉教授、陈功新教授在项目研究中给予的帮助以及袁店二矿侯善军科长在现场试验过程中给予的帮助!

## 参考文献(References):

- [1] 朱卫兵,许家林,赖文奇,等.覆岩离层分区隔离注浆充填减沉技术的理论研究[J].煤炭学报,2007,32(5):458-462.  
Zhu Weibing, Xu Jialin, Lai Wenqi, et al. Research of isolated section-grouting technology for overburden bed separation space to reduce subsidence [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 458-462.
- [2] 王成真.村庄下厚煤层开采方法研究[J].煤炭科学技术,2016, 44(1):114-119.  
Wang Chengzhen. Research on mining methods of thick coal seam under villages [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 114-119.
- [3] 郭维嘉.覆岩离层带注浆充填基本参数研究[J].煤炭学报,2000,25(6):602-606.  
Guo Weijia. Study on the parameters of grouting bed-separation in mining-affected overburden [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6): 602-606.

- [4] 高延法,牛学良,廖俊展.矿山覆岩离层注浆时的注浆压力分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(S2):5244-5247.  
Gao Yanfa, Niu Xueliang, Liao Junzhan. Analysis on grouting pressure when grouting in overburden bed-separations in mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (S2): 5244-5247.
- [5] 赵德深,王忠昶,张文泉.覆岩离层注浆充填效果的综合评价[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2009,28(5):766-769.  
Zhao Deshen, Wang Zhongchang, Zhang Wenquan. Comprehensive evaluation of grouting effect in separate strata layers of overburden [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2009, 28 (5): 766-769.
- [6] 张霄.地下工程动水注浆过程中浆液扩散与封堵机理研究及应用[D].济南:山东大学,2011.
- [7] 张庆松,高延法,田光辉,等.注浆减沉时浆液水的渗流规律研究[J].矿山压力与顶板管理,2002,20(2):99-100,65.  
Zhang Qingsong, Gao Yanfa, Tian Guanghui, et al. Research on the seepage law of reduce subsidence grouting slurry water [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 20 (2): 99-100, 65.
- [8] 刘健,刘人太,张霄,等.水泥浆液裂隙注浆扩散规律模型试验与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2445-2452.  
Liu Jian, Liu Rentai, Zhang Xiao, et al. Diffusion law model test and numerical simulation of cement fracture grouting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (12): 2445 - 2452.
- [9] 刘人太,李树才,张庆松,等.示踪试验分析方法在地下工程水害治理中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):814-821.  
Liu Rentai, Li Shucai, Zhang Qingsong, et al. Research on application of tracer experiment analysis method to water hazards management in underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (4): 814-821.
- [10] 国家煤炭工业局.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [11] 樊振丽.纳林河复合水体下厚煤层安全可采性研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [12] 樊振丽.煤矿陷落柱水害特征与防治技术研究[J].煤炭工程,2011(8):93-95.  
Fan Zhenli. Coal mine collapse column water damage characteristics and the prevention and control technology research [J]. Coal Engineering, 2011 (8): 93-95.
- [13] 樊振丽,胡炳南,申宝宏.煤层底板采动导水破坏带深度主控因素探究[J].煤矿开采,2012,17(1):5-7.  
Fan Zhenli, Hu Bingnan, Shen Baohong. Research on main factors of water-conductive fissure zone in floor by induced-mining [J]. Coal Mining Technology, 2012, 17 (1): 5-7.
- [14] 滕永海,闫振斌.采动过程中覆岩离层发育规律的研究[J].煤炭学报,1999,24(1):25-28.  
Teng Yonghai, Yan Zhenbin. Study on law of overburden split developing in mining process [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24 (1): 25-28.
- [15] 林青,乔伟.崔木煤矿顶板离层水防治技术[J].煤炭科学技术,2016,44(3):129-134.  
Lin Qing, Qiao Wei. Water prevention and control technology of roof bed separation in Cuimu Mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44 (3): 129-134.
- [16] 尹尚先,徐斌,徐辉,等.化学示踪连通试验在矿井充水条件探查中的应用[J].煤炭学报,2014,39(1):129-134.  
Yin Shangxian, Xu Bin, Xu Hui, et al. The application of chemical tracer experiments on exploring the mine water filling conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (1): 129-134.
- [17] 郝永艳,郝峰,陈军锋,等.电厂粉煤灰堆放对水环境的影响及防治对策[J].山西水利,2010(11):19-21.  
Hao Yongyan, Hao Feng, Chen Junfeng, et al. The effect of power plant fly ash piled up on the water environment and prevention countermeasures [J]. Shanxi Water Resources, 2010 (11): 19-21.
- [18] 尹国勋,余功耀,王亮.粉煤灰堆放场灰水与基底灰岩的水-岩作用[J].安全与环境学报,2006,6(6):32-34.  
Yin Guoxun, Yu Gongyao, Wang Liang. Water-rock interactive effect between ash-water on ash-piling site and its limestone basis [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6 (6): 32-34.
- [19] 魏林宏,叶念军,朱春芳,等.露天堆放粉煤灰对地下水的污染研究[J].高校地质学报,2013,19(4):683-691.  
Wei Linhong, Ye Nianjun, Zhu Chunfang, et al. Effects of exposed coal fly ash on groundwater contamination [J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19 (4): 683-691.
- [20] 张金利.填埋场污染物运移数值分析及安全防渗系统设计方法探讨[D].大连:大连理工大学,2005.
- [21] 胡舸,彭帅,张胜涛.土壤环境下污染物运移问题的数值模拟研究[J].环境工程学报,2010,4(7):1659-1663.  
Hu Ge, Peng Shuai, Zhang Shengtao. Research on numerical Simulation for transmission of contaminants in soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4 (7): 1659-1663.
- [22] 鲁程鹏,束龙仓,苑利波,等.基于示踪试验求解岩溶含水层水文地质参数[J].吉林大学学报:地球科学版,2009,39(4):717-721.  
Lu Chengpeng, Shu Longgang, Yuan Libo, et al. Determination of hydrogeologic parameters of karst aquifer based on tracer test [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39 (4): 717-721.