彭景亮,陈秋南,李俊,等.南平硐煤矿宝莉断层导水性评价[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(4):1-8.doi:10. 13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.001

PENG J L, CHEN Q N, LI J, et al. Evaluation of the Hydraulic Conductivity of the Baoli Fault at Nanping Refuge Mine [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(4):1-8.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.001

# 南平硐煤矿宝莉断层导水性评价

### 彭景亮<sup>1</sup>,陈秋南<sup>2\*</sup>,李俊<sup>1</sup>,饶斌<sup>1</sup>

(1.湖南省水文地质环境地质调查监测所,湖南长沙 410129;2. 湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘 要:煤矿水害是影响煤矿安全生产的重要因素,断层导水性评价是煤矿水害研究的核心问题之一.采用单一方法对断 层导水性进行评价时会出现较大的偏差,不利于煤矿水害的精准防治.文章基于断层泥比率(SGR)法定量评价南平硐煤矿 宝莉断层的封闭性,通过水文地质钻孔综合测井确定钻孔内地层渗水点及断层破碎带的详细位置,对钻孔内含水层进行分 层抽水试验定量评价宝莉断层的渗透系数,进而评价断层的富水性和导水性,并采用水化学分析验证地表水与地下水之间 的补给关系.研究结果表明:多方法多因素综合评价断层导水性方法对具体断层和具体部位的导水性评价较传统的单一模 型分析法的判断结果更加准确.

## Evaluation of the Hydraulic Conductivity of the Baoli Fault at Nanping Refuge Mine

PENG Jingliang<sup>1</sup>, CHEN Qiunan<sup>2</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, RAO Bin<sup>1</sup>

Hunan Provincial Survey and Monitoring Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Changsha 410129, China;
School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Water damage in coal mines is an important factor in the safe production of coal mines, and the evaluation of fault hydraulic conductivity is one of the core issues in the study of water hazards in coal mines. Using a single method to evaluate them often results in large deviations, which is not conducive to the accurate prevention and control of water hazards in coal mines. The shale gouge ratio (SGR) method is used to quantify the confinement of the Baoli Fault at the Nanping Refuge Mine. The hydrogeological boreholes are logged to determine the location of the seepage points and fault fracture zones in the boreholes, and the permeability of the Baoli Fault is quantified through stratified pumping tests of the water-bearing layers in the boreholes. Results of the study show that the multi-method and multi-factor approach is carried out to quantify the permeability of the fault, and this method to evaluate the hydraulic conductivity of the fault is more accurate than that of the traditional single-model analysis method.

**Keywords**: water damage in coal mines; evaluation of the hydraulic conductivity of faults; shale gouge ratio (SGR); integrated logging; pumping tests; water chemistry analysis; Nanping Refuge Mine

收稿日期:2022-12-23 修改日期:2024-10-17

基金项目:湖南省交通运输科技项目资助(202308)

<sup>\*</sup>通信作者,E-mail:394339098@qq.com

煤矿勘查过程主要是对资源储量的评价和对矿界范围内的断层仅进行一些初步的勘查,而断层的导水性会对煤矿开采造成重大影响,按照规范的要求,需要对断层两侧预留足够的保安煤柱.随着煤矿资源的大量开采,资源接近枯竭,为了提高煤矿的服务年限,需要在安全的前提下对一些断层保安煤柱进行回采.许多学者从地下水化学时空变化特征的角度,采用放水试验及数值模拟等方法研究断层的导水性,如张胜军等<sup>[1]</sup>采用放水试验研究含水层的连通性和水化学特征来判断断层的导水性;尹会永等<sup>[2]</sup>采用断层泥比率(SGR)法和断层活化规律的数值模拟法研究断层的导水性;李光辉等<sup>[3]</sup>通过 SGR 法和断层面正压力判断法评价断层的导水性;杨智等<sup>[4]</sup>采用 YIELDING 等<sup>[5]</sup>提出的 SGR 法对断层的侧向封闭性进行评价,从而判断断层两侧的连通性.上述文献评价断层的导水性以定性分析为主,对煤矿精准防治水的指导性不强.本文利用 SGR 法、综合测井、分层抽水试验和水化学分析等方法对南平硐煤矿宝莉断层的导水性进行综合分析与评价,为防水保安煤柱的留设及防治水害提供依据.

1 地质概况

南平硐煤矿为湘煤集团所属煤矿,位于湖南省资兴市,井田地形多为侵蚀剥蚀中低山地貌及侵蚀堆积 河谷地貌,总体地势为南高北低,东高西低,东面山高坡陡,西面趋于平缓至三都平缓地带.山区地表多为 茅仙岭组厚层砂岩覆盖,平缓处多为冲洪积层覆盖.最高海拔标高在罗仙岭山顶,标高为960.3 m,最低海 拔标高在宝源河下游的上茅坪,标高约为135.5 m,地形最大高差为825 m.山势走向北东-南西,山脊呈条 带状,山顶较浑圆,区内山坡总体倾向北西,坡向与地层倾向斜交,山坡坡度为15°~35°,局部陡峭处坡度 可达70°.地层倾角为18°~25°,山体植被较茂盛.区内沟谷较发育,宝源河河谷总体呈U型,河谷走向与地 层倾向基本一致.矿井含煤地层为三叠系上统杨梅垅组和出炭垅组,三、四煤层为主采煤层,三煤层厚度为 0~4.06 m,平均厚度为1.02 m,四煤层厚度为0~1.85 m,平均厚度为1.14 m.地面标高为135.5~960.3 m, 最低开采标高为-100 m.

研究区断层位置如图1所示.研究区位于资汝断隆的中部,矿区总体为单斜构造,断层较为发育.地层 走向北东,倾向北西,倾角一般为18°~20°.研究区内断裂构造可分为3个层次:(1)主干断层,仅1条为三 都平野断层;(2)二级断层,与主干断层垂直的次级张性断裂,主要为宝莉断层、老平庵断层等;(3)三级断 层,为矿井常见的小断层,对煤层会造成不同程度的破坏.



图1 研究区断层位置

宝莉断层属斜向正断层,走向 NW300°~330°,倾向 SW,倾角上陡下缓,平均为 45°,落差为 50~180 m, 浅部大,深部小(图 2),地表切割宝源河.



2 基于断层侧向封闭性的导水性评价

2.1 SGR 法

断层上下盘含隔水层的接触关系以及断层破碎带的渗透性共同决定断层侧向的导水性, YIELDING 等<sup>[5]</sup>提出的 SGR 法可以对宝莉断层带的侧向封闭性进行定量评价.本文采用 SGR 法评价断层的封闭性, 进而评价其导水性.SMITH 等<sup>[6-8]</sup>等认为断层活动过程中泥页岩的可塑性大,在区域挤压应力或岩层自身 重力的作用下,泥页岩被挤压成黏土,黏土颗粒挤入砂岩孔隙裂隙中,形成一个糜棱岩化黏土隔层,对断层 形成有效封闭.YIELDING 等<sup>[5]</sup>提出的断层泥比率法的计算公式为

$$\text{SGR} = \frac{\sum A_i P_i}{A} \times 100\%.$$

式中: $A_i$ 为断移地层 i 的厚度, m; $P_i$ 为断移地层 i 的泥质百分含量;A为断移总断距, m.

SGR 值表示在断层发育挤压的过程中,断层两侧通过各种机理挤入断层破碎带的泥页岩比例.王超 等<sup>[9]</sup>对基于 SGR 法评价断层侧向封闭性的方法进行改进,认为 SGR<15%时,断层破碎带形成碎裂岩,导 水性好;15% < SGR < 40%时,断层破碎带形成层状硅酸盐框架结构断层岩,断层侧向封闭性较好,导水性 差;SGR>40%时,断层破碎带形成泥岩涂抹,断层侧向封闭性好,导水性差.采用 SGR 值定量评价断层侧向 的封闭性,断层附近岩性中泥页岩所占的比例越高,断层带中形成涂抹的黏土隔层的可能性就越大,砂岩 孔隙裂隙的渗透性就越差,封闭性越好,导水性越差<sup>[10-11]</sup>.

#### 2.2 宝莉断层侧向导水性评价

水文地质钻孔穿过宝莉断层,并结合矿山勘探时期的钻孔资料和井下巷道工程揭露情况,得到研究区内断层上下盘岩性为三叠系上统出炭垅组(T<sub>3</sub>c)煤、砂质泥岩夹细砂岩、长石石英砂岩夹细砂岩,杨梅垅 组(T<sub>3</sub>y)粗、中、细粗砂岩,砂质页岩,黑色页岩和煤;侏罗系下统唐垅组(J<sub>1</sub>t)长石石英粗砂岩、薄层状细砂 岩与粉砂岩互层、粉砂岩、砂质泥岩及页岩;茅仙岭组(J<sub>1</sub>m)中、细粒砂岩.水文钻孔柱状图如图 3 所示,宝 莉断层泥比率法计算及评价如表 1 所示.

地质	刮地层及 地层			
年代	代号	柱状	地层宕性	度/m
			砂质泥岩	4.7
	茅			
	仙			
	岭		中粒砂岩	45.7
	爼 Im			
	J <sub>1</sub> m			
侏	唐 垅 红 Jt		砂质泥岩, 细砂岩互层	7.2
			中细粒砂岩	9.0
罗			砂质泥岩,细砂岩互层	8.4
糸工			石英细粒砂岩	5.2
下统			砂质泥岩, 细砂岩互层	9.1
-96			中−粗细粒砂岩	7.7
		•••••	砂质泥岩,细砂岩互层	7.2
			砂质泥岩 细砂岩五层	12.8
			心质化石, 知论石玉丛	12.0
			中砾粗砂岩	14.0
		••••		1.1.0
	杨 梅 垅 组 T <sub>3</sub> y		一煤	0.9
			砂质泥岩, 细砂岩互层	16.3
			二、三煤	3.0
			如孙当五日 孙禹泥当	10.0
			知论石立层, 论质泥石	17.0
			<u>\</u> 付三煤	0.7
			细砂岩互层,砂质泥岩。	9.5
			四煤	0.9
Ξ			五煤,砂质泥岩	6.3
登工			<b>\</b>	
系 上 统		··· ··· ···	砂质泥岩,细砂岩	34.8
		· · · · ·		
	出 炭 堤 T <sub>3</sub> c		九煤:复杂结构,鳞片状,	0.6
			半暗型,劣质不可采	
			砂质泥岩本细砂岩, 底	30.0
			部夹有燧石砾岩	
				26.0
			砾岩夹中-粗粒长石,	20.8
			石英砂岩夹细砂岩	
			砂质泥岩含煤线、属土	11.1
石	石		一煤层位	
炭	7 磴子组	╞┯╧┲┻┲┸		
系			灰──深灰色石灰岩:裂	厚度
下			隙发育,充填次生方解	不详
统	$C_{1}s$		石脉	

图 3 地层柱状图

表1 宝莉断层泥比率法计算及评价

断开的层位	断层垂直断距/m	断移地层泥页岩累计厚度/m	SGR/%	评价等级
茅仙岭组	50.4	6.8	13.5	断层封闭性差
唐垅组	80.6	29.2	36.2	断层封闭性较好
杨梅垅组	91.4	43.5	47.6	断层封闭性好
出炭垅组	68.5	23.1	33.7	断层封闭性较好

由图 3 及表 1 可知: 宝莉断层下部断移地层杨梅垅组、出炭垅组的 SGR 较高(分别为 47.6%, 33.7%), 断

层封闭性较好,导水性差;宝莉断层中部的断移地层唐垅组的 SGR 较高(36.2%),断层封闭性较好,导水性差;宝莉断层上部的茅仙岭组的 SGR 较低(13.5%),断层部位形成破碎岩,断层侧向的导水性好.

3 基于抽水试验的断层导水性评价

#### 3.1 地质勘探各地层的水文参数

根据矿区勘探资料,地质勘探在南平硐煤矿矿区内施工水文地质钻孔并开展抽水试验,研究区主要含 水层为

1) 茅仙岭组(J<sub>1</sub>m) 砂岩裂隙含水层, 单位涌水量为 0.050~0.075 L/(m·s), 渗透系数为 0.02~0.03 m/d.

2) 唐垅组顶部(J<sub>1</sub>t上) 砂岩裂隙含水层, 单位涌水量为 0.093 L/(m·s), 渗透系数为 0.067 m/d.

3) 唐垅组底部(J<sub>1</sub>t下)砂岩裂隙含水层,单位涌水量为 0.013~0.08 L/(m・s),渗透系数为 0.066~0.270 m/d,钻 7 孔揭露时涌水量为 4.6 L/s(ZK2101).

4)杨梅垅组(T<sub>3</sub>y)中间砂岩裂隙含水层,渗透系数为0.032 m/d.

5)杨梅垅组(T<sub>3</sub>y)底部粗砂岩裂隙含水层的单位涌水量为 0.012~0.078 L/(m・s),渗透系数为 0.074~0.290 m/d,水温达 37.0~37.5 ℃;含水层为富水性中等的裂隙水.

6)出炭垅组上段和下段为砂质泥岩、碳质泥岩或煤,可视为相对隔水层.

宝莉断层为南平硐与北平硐的分界线,采用地质勘探对断层进行控制,本次施工水文钻孔 SK-01 穿 过宝莉断层.

#### 3.2 钻孔综合测井

SK-01 钻孔综合测井成果如图 4 所示.由图 4 可知:钻孔深度为 40.20~55.50 m 时,岩性整体以石英 砂岩为主,岩体较破碎,裂隙发育,与钻孔揭露宝莉断层的位置较吻合,综合钻孔编录及测井可以判断宝莉 断层的位置为 34.4~45.0 m.流体电阻率显示:该孔套管脚 40.20 m 处涌水,向上补给;98.05~98.50 m 段的 岩性为砂岩夹泥岩,含水层,向上补给;105.10~105.56 m 段的岩性为石英砂岩,含水层,向上补给:综合钻 孔资料可知:钻孔含水层主要为 2 段,第一含水层为宝莉断层附近,第二含水层为 105.10~105.56 m 段.



图 4 SK-01 钻孔综合测井成果

#### 3.3 基于抽水试验的断层导水性评价

水文钻孔揭露钻孔的主要地下水类型为基岩裂隙水,抽水试验形成*S*=*f*(*t*)曲线(*S* 为水位,m;*t* 为时间,h),承压完整井计算探井渗透系数和影响半径的公式为<sup>[12-14]</sup>

$$K = \frac{Q}{2\pi SM} \ln \frac{R}{r};$$

 $R = 10S\sqrt{K}$ . 式中: *K* 为渗透系数, m/d: *O* 为涌水量, L/s: *M* 为含水层厚度, m: *R* 为影响半径, m: *r* 为抽水钻孔半径, m.

抽水试验对 2 个含水层分 3 个降深进行混合抽水,混合抽水前的静止水位为 2.73 m,混合抽水 Q, S= f(t)曲线如图 5 所示,混合抽水 Q=f(S)曲线如图 6 所示.由图 5 和图 6 可知:单孔抽水降深分别为 19.04, 7.34, 4.60 m,抽水钻孔半径为 0.055 m,涌水量分别为 1.446, 0.716, 0.468 L/s,单位涌水量分别为 0.076, 0.098, 0.102 L/(m·s),3 次降深得出的渗透系数分别为 0.231 2, 0.261 3, 0.252 3 m/d,平均渗透系数为 0.248 3 m/d.



混合抽水后,用水泥浆将断层带下部的含水层封堵,封堵位置为 120.0~45.0 m,即宝莉断层以下的含水层均采用水泥浆封堵,由于断层及以上含水层的厚度较小,对该含水层只进行 1 个降深抽水试验,断层部位抽水 Q, S=f(t)曲线如图 7 所示,断层部位抽水 Q=f(S)曲线如图 8 所示.由图 7 和图 8 可知:单孔抽水降深为 9.87 m,抽水钻孔半径为 0.055 m,涌水量为 0.126 L/s,单位涌水量为 0.013 L/(m・s),得出渗透系数为 0.145 m/d.



水文钻孔揭露地层主要为唐垅组砂岩裂隙含水层和杨梅垅组砂岩裂隙含水层,根据本次勘查混合抽水试验,获得含水层的平均渗透系数为 0.248 3 m/d(2.87×10<sup>-4</sup> cm/s),依据《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287—2008)可知:唐垅组和杨梅垅组砂岩裂隙含水层的渗透性等级为中等透水.混合抽水试验获得含水层的单位涌水量为 0.076~0.102 L/(m·s),根据《矿区水文地质工程地质勘查规范》(GB/T 12719—2021)可知:唐垅组和杨梅垅组砂岩裂隙含水层的富水性中等,导水性中等.

钻孔揭露断层前未见含水层,混合抽水后对断层破碎带下部含水层进行封堵,根据断层破碎带含水层

的抽水试验结果可知:断层破碎带的渗透系数为 0.145 m/d(1.68×10<sup>-4</sup> cm/s),单位涌水量为 0.013 L/(m·s).依据上述规范,可知断层破碎带的渗透性等级为中等透水,富水性弱,导水性中等.另一 方面,本次抽水试验在将断层下盘含水层用水泥止水后,对断层破碎带进行抽水试验,发现涌水量显著减 少,断层下盘承压含水层通过断层破碎带向上补充断层破碎带的水量较小,即断层下盘含水层与断层破碎 带含水层的水力联系较弱.

基于水化学分析的断层导水性评价 4

对钻孔混合抽水水样、断层带抽水水样、南平硐井下矿坑水样和地表宝源河水样分别进行水样常规离 子分析,结果如表2所示.根据水化学分析资可知:本区地表水和地下水水化学类型分为 SO<sub>4</sub>-Ca型、HCO<sub>3</sub>· SO<sub>4</sub>-Ca·Mg 型和 HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg 型,断层带抽水样为 HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg 型,混合抽水水样为 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Mg型,宝源河地表水样为SO<sub>4</sub>-Ca型.经分析可知:矿坑水、混合抽水和断层带抽水除 HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2</sup>的 质量浓度有较大差异,其余离子的数量相当,与实际情况相符.矿坑水、混合抽水主要为煤系地层含水层补 给,SO4 的含量较大,宝源河地表水受矿坑排水的影响,SO4 的质量浓度也较大,断层带抽水主要受大气 降水补给, SO<sup>2-</sup> 的质量浓度有较大差异, 与实际情况相符<sup>[15-16]</sup>.

	表	〔2 水样常规离子数:	据	单位:mg/L
指标	混合抽水	断层带抽水	矿坑水	地表水
K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup>	12.16	8.04	8.17	19.35
Ca <sup>2+</sup>	32.86	44.33	48.88	32.29
$Mg^{2+}$	12.18	26.15	31.79	6.35
Cl-	9.52	4.76	6.35	7.94
$\mathrm{SO}_4^{2-}$	100.00	50.00	100.00	100.00
$HCO_3^-$	52.30	168.53	162.72	5.81
TDS	193.73	240.79	299.54	186.23

表2 水样常规离子数据

钻孔 SK-01 混合抽水、断层带抽水的 HCO; 的质量浓度为 52.30~168.53 mg/L, 而地表水的 HCO; 的 质量浓度为 5.81 mg/L,SK-01 混合抽水、断层带抽水的 HCO3 的质量浓度较地表水大.由于地下水在流动 的过程中,重碳酸根离子会随着径流运移,其质量浓度随运移深度的增加而增加,混合抽水来源为基岩裂 隙水和断层带水,断层渗透系数小,基岩裂隙水占主导,断层带抽水的 HCO<sub>3</sub> 的质量浓度较混合抽水大,断 层带水的运移路径更长,可知地表水与断层破碎带地下水的循环条件较差,进入南平硐煤矿矿坑的水难以 通过地表河水得到充沛的补给,即宝源河水通过断层破碎带对矿坑的补给较少,宝莉断层的导水性差.

5 结论

1)研究区南平硐煤矿宝莉断层上下盘岩性为岩性为三叠系上统出炭垅组(T<sub>3</sub>c)煤、砂质泥岩夹细砂 岩、长石石英砂岩夹细砂岩,杨梅垅组(T<sub>3</sub>y)粗、中、细粗砂岩,砂质页岩,黑色页岩和煤,侏罗系下统唐垅 组(J,t)长石石英粗砂岩、薄层细砂岩与粉砂岩互层、粉砂岩、砂质泥岩及页岩,茅仙岭组(J,m)中、细粒砂 岩.采用 SGR 法定量评价, 宝莉断层下部的断移地层杨梅垅组和出炭垅组的 SGR 值较高, 杨梅垅组和出炭 垅组的断层封闭性较好,导水性差;宝莉断层中部的断移地层唐垅组的封闭性较好,导水性差;宝莉断层上 部的茅仙岭组断层部位形成破碎岩,断层的侧向导水性好.

2)采用水化学分析方法进行半定量评价,发现断层的导水性差.

3)采用水文地质钻孔综合测井、抽水试验方法对宝莉断层进行定量评价,断层破碎带的渗透性中等, 导水性中等,水文地质参数对研究区的防治水害具有指导意义.

4) 通过 SGR 法、水文地质钻孔综合测井、抽水试验法和水化学分析法等多因素多方法进行综合评价, 认为宝莉断层破碎带在该区段的渗透性等级为中等,导水性中等,富水性中等.

#### 参考文献:

- [1] 张胜军,丁亚恒,姜春露.深部矿井大型边界断层导水性试验研究[J].矿业研究与开发,2017,37(10):11-14.
- [2] 尹会永,郎宁,周鑫龙,等.基于断层封闭性与数值模拟的断层导水性综合评价[J].煤矿安全,2022,53(3):200-207.
- [3] 李光辉, 王杰, 谢道雷, 等. 基于断层封闭性的导水性评价及防隔水煤柱设计[J]. 中国矿业, 2021, 30(3): 138-143.
- [4] 杨智,何生,王锦喜,等.断层泥比率(SGR)及其在断层侧向封闭性评价中的应用[J].天然气地球科学,2005,16(3): 347-351.
- [5] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM T. Quantitative fault seal prediction [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81 (6):897-917.
- [6] SMITH D A. The eoretical consideration of sealing and non-sealing faults [J]. AAPG Bulletin, 1966, 50:363-374.
- [7] LINDSAY N G, MURPHY F C, WALSH J J, et al. Outcrop studies of shale smears on fault surfaces [M]. New Jersey: Wiley, 1992.
- [8] BOUVIER J D, KAARS-SIJPESTEIJN C H, KLUESNER D F, et al. Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River Field, Nigeria [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1989, 73 (11): 1397-1414.
- [9] 王超,付广,董英洁,等.基于 SGR 算法的断层侧向封闭性评价方法改进及其应用[J].地质学报,2017,91(7): 1641-1650.
- [10] 付晓飞,付广,赵平伟.断层封闭机理及主要影响因素研究[J].天然气地球科学,1999,10(3-4):54-62.
- [11] 张培森,许大强,付翔,等.基于断层封闭性研究评价其导水性[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(2):5-14.
- [12] 刘程慧,唐朝永,谭稳,等.湘东北虎形山钨多金属矿断层导水性初探[J].国土资源导刊,2022,19(4):26-31.
- [13] 赵云龙,程振雨.黑龙江省鹤岗鸟山煤矿断层富(导)水特征分析[J].中国煤炭地质,2022,34(增刊1):100-103.
- [14] 赵宝峰,吕玉广.基于抽水试验和放水试验的断层导水性分析[J].煤矿安全,2022,53(1):56-62.
- [15] 石磊,徐楼英.基于水化学特征的聚类分析对矿井突水源判别[J].煤炭科学技术,2010,38(3):97-100,124.
- [16] 孙福勋,魏久传,万云鹏,等.基于 Fisher 判别分析和质心距评价法的矿井水源判别[J].煤田地质与勘探,2017,45(1): 80-84.