

# 水-力耦合下隔水关键层渗透性演化特征\*

谢国良<sup>1</sup>, 胡博<sup>2</sup>, 单成方<sup>1</sup>, 杨旭<sup>2</sup>, 龙岩<sup>1</sup>, 牛昆<sup>2</sup>, 王海洋<sup>1</sup>

(1. 库车市榆树岭煤矿有限责任公司, 新疆 库车市 842014;

2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州市 221116)

**摘要:** 隔水关键层对水体及含水层下煤层安全开采影响重大。为了研究隔水关键层渗透性演化规律及采动隔水关键层的隔水性能,以新安煤矿15130工作面水库下采煤为工程背景,开展隔水关键层水-力耦合渗流试验和采动隔水关键层隔水性能数值模拟试验。结果表明:承载压缩下隔水关键层渗透系数-应变曲线可分为4个阶段,且与应力-应变曲线的4个阶段对应,分别为渗透系数骤减阶段、渗透系数缓慢递减阶段、渗透系数缓慢回升阶段、渗透系数骤增阶段;压密阶段围压的变化更容易引起隔水关键层渗透系数的变化,水压与渗透系数在1~2 MPa范围内不成正相关关系;15130工作面上方隔水关键层在采动影响下发生弯曲变形,但整体上看,隔水关键层依然具有良好的隔水性能。研究结果对水体下采煤具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 隔水关键层;隔水性能;水-力耦合;渗透系数;水体下采煤

中图分类号:TD823.83 文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2024)04-0114-09

## 0 引言

隔水关键层对水体及含水层下煤层的安全开采起着关键性的作用,若隔水关键层受煤层开采扰动使其渗透性发生变化,会导致地表水或含水层水涌入工作面,造成突水事故。因此,进行隔水关键层渗透性的研究,对进一步发展和完善水体及含水层下采煤具有重要意义。

相关学者在隔水关键层渗透性方面做了大量研究。董永等<sup>[1]</sup>基于隔水关键层理论和断裂力学,从应力和渗流两个方面对断层导水进行探讨;孙强等<sup>[2]</sup>构建了充填开采隔水关键层渗流稳定性力学模型,研究了充填开采围岩裂隙演化与渗透性分布特征;孟紫文<sup>[3]</sup>从理论上分析了水体下采煤隔水关键

层的隔水机理及力学模型;徐智敏等<sup>[4]</sup>通过现场实测和公式推导等方法,结合已有的隔水能力评价方法,初步提出了可以判断底板隔水层隔水能力的结构比例系数;马凯等<sup>[5]</sup>建立了适用于局部高承压水的力学模型,并且运用弹性力学来分析力学模型,从而得到了两个判断隔水关键层屈服破坏的平衡方程;鲁海峰等<sup>[6]</sup>通过数值模拟系统研究了隔水关键层在水压和地应力联合作用下的破坏模式,并给出相应力学依据;王妍等<sup>[7]</sup>将弹性力学计算的结果与FLAC3D模拟的结果进行对比,研究成果可为底板突水预测提供理论支撑;孙建等<sup>[8-9]</sup>建立了底板隔水关键层模型,通过数值模拟研究了其挠度特性、应力分布及失稳特征,通过力学推导及参数引入分析了隔水关键层的隔水性能;姚邦华等<sup>[10]</sup>根据能量法推导得到了隔水层应力分布特性,并通过数值模拟进行了隔水关键层稳定性分析;赵兵朝等<sup>[11]</sup>通过理论分析、物理相似模拟试验和工程实例验证等方法研究了覆岩隔水层的稳定性;刘瑞强等<sup>[12]</sup>通过试验研究与宏观特征分析,研究了奥陶系顶部岩层的隔水性能;张杰等<sup>[13-14]</sup>通过固-液耦合相似材料模拟试验,探讨了土层隔水层在采动及渗流影响下的损伤变化规律,并且采用理论分析和试验研究揭示了隔水土层的破坏机理;郭盛彬等<sup>[15]</sup>通过X射线荧光光谱分析、岩石微观结构分析等物理试验,研究了屯兰矿奥陶系隔水关键层的隔水性能;张思蔚<sup>[16]</sup>通过理论分析和数值模拟研究了采动隔水关键层的破坏问题;冯国瑞等<sup>[17]</sup>通过理论分析和数值模拟研究了复合采动对层间隔水层的影响;周少玺<sup>[18]</sup>研究了水体下采煤隔水关键层的判别规律及其应用。综上所述,关于隔水关键层渗透性与本构关系耦合研究的

\* 收稿日期:2023-06-14

作者简介:谢国良(1983—),男,河南浙川人,高级工程师,主要从事矿山安全管理工作,E-mail:348647534@qq.com。

通信作者:胡博(2000—),男,山西朔州人,硕士研究生,主要从事绿色开采方面的研究,E-mail:TS22020019A31@cumt.edu.cn。

相关方法有理论推导、数值模拟研究等,但是将实验室试验结果进行拟合,结合拟合结果开展数值模拟来指导工程实践的研究较少。

本文以新安煤矿 15130 工作面水库下采煤为背景,开展了隔水关键层水-力耦合渗流试验,并结合数值模拟试验研究了采动隔水关键层渗透性演化特征,可为水体下采煤提供参考。

## 1 工作面采煤面临的问题

新安煤矿井田走向长约为 15.5 km,倾向长约为 3.5 km,煤层埋深为 268 m,平均煤厚为 3.4 m,保有储量超 2 亿 t,其中水库下压煤约为 5500 万 t,而 15130 工作面切眼位于水库淹没区正下方,水库与工作面的层位关系如图 1 所示。

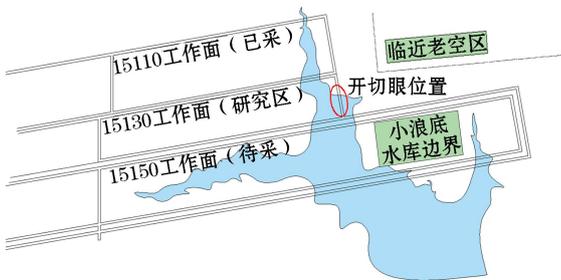


图 1 工作面与水库的层位关系

Fig.1 The layer relationship between working face and reservoir

15130 工作面上方存在砂岩裂隙含水层,水库蓄水前,砂岩裂隙含水层为煤层的直接充水含水层,当煤层开采时,可通过泄水孔与机械排水等方法进行疏干排水,不影响煤层开采;水库在蓄水期时,水库通过补给含水层进而对煤层开采造成影响。隔水关键层厚度约为 20 m,主要岩性为中砂岩,若受采动影响使隔水关键层渗透性增加,促使水库的水进入工作面,势必会引发矿井突水灾害。因此,亟需对隔水关键层渗透性进行研究。研究区层位柱状图如图 2 所示。

## 2 试验方案

### 2.1 试验设备

本次试验采用的岩样来自于新安煤矿 15130 工作面上方的隔水关键层,试验试件为  $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的标准圆柱体试件,试验仪器采用中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的岩石力学试验系统,该系统由加载系统、水压系统、监测系统 3 部分组成。

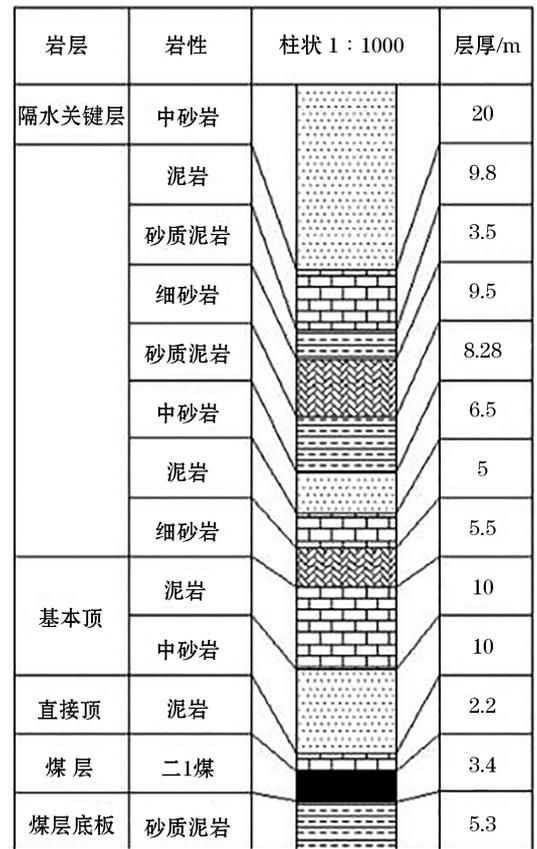


图 2 研究区地质柱状图

Fig.2 Geological histogram of the study area

加载系统包括:承压钢桶、压力机和油压系统。承压钢桶从上至下接口依次为入水口、出油口、进油口和出水口,水通过入水口进入承压柱,再通过试件上方布水板均匀接触试件,透过试件后通过下方出水口流出;压力机通过提升承压钢桶,为试件施加轴压;油压系统通过油泵将液压油从承压钢桶下部进油口注入,为试件施加围压。

水压系统包括:气泵、储气罐和水箱。气泵吹出的高压气体由减压阀控制后进入储气罐,储气罐中气体达到一定的压力后由调节阀控制进入水箱,将水压入承压钢桶上部入水口,为试件提供水压。

监测系统包括:应力监测、应变监测、围压监测、水压监测和流量监测。通过电脑终端对应力、应变、围压和水压进行监测,保证各值处在试验范围内,对流量进行监测,从而计算出渗透系数。

### 2.2 试验原理

本次试验是在试验系统分别提供轴压和围压的条件下,通过高压气体推动水流透过试件,得出一定时间范围内透过试件的流量,根据式(1)<sup>[19]</sup>计算试件渗透系数。

$$k = \frac{QL\gamma_w}{pA} \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中,  $k$  为渗透系数,  $\text{cm/s}$ ;  $Q$  为通过试件的流量,  $\text{mL/s}$ ;  $L$  为试件的长度,  $\text{mm}$ ;  $\gamma_w$  为水的容重,  $\text{kN/m}^3$ ;  $p$  为试件上下两端的压差,  $\text{MPa}$ ;  $A$  为试件的截面积,  $\text{mm}^2$ 。

### 2.3 试验步骤

在试验开始前, 预先将试件进行饱水处理, 排出试件内部的空气, 减小试验过程中因试件内部空气产生的误差。在试验过程中, 根据岩石所处的真实环境依次设置围压和水压, 围压设置为 3 MPa、4 MPa、5 MPa 三个梯度, 水压设置为 1.5 MPa、2 MPa、2.5 MPa 三个梯度。为保证试验过程的安全性与试验结果的准确性, 应始终保持轴压  $\geq$  围压  $\geq$  水压, 且加载顺序依次为轴压、围压、水压。在加载过程中, 先调节压力机使其与钢桶接触, 再逐渐增加轴压使其压力数值大于或等于设定围压, 且压力机的加载速度设定为 0.1 mm/min。试验结束后, 按照水压、围压、轴压的顺序依次卸载。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 承载压缩下岩石应力-应变-渗透系数变化特征

根据隔水关键层承载压缩下渗透性试验结果绘制应力-应变-渗透系数曲线, 发现不同围压、不同水压下曲线整体趋势相近, 本节选取围压为 3 MPa、水压为 1 MPa 条件下的曲线进行阐述, 具体曲线如图 3 所示。

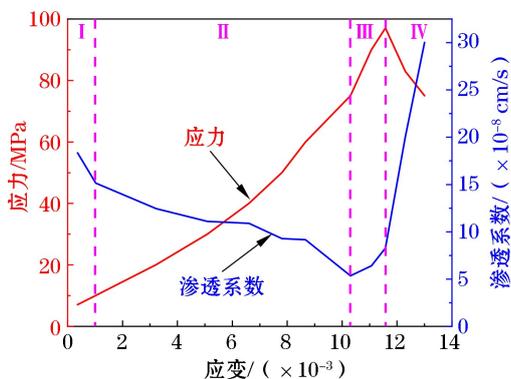


图 3 应力-应变-渗透系数曲线

Fig.3 Stress-strain-permeability coefficient curves

从图 3 可以看出, 依据应力-应变曲线的 4 个阶段, 渗透系数-应变曲线与之对应也可以分为 4 个阶段, 分别为渗透系数骤减阶段、渗透系数缓慢递减阶段、渗透系数缓慢回升阶段、渗透系数骤增阶段。

(1) 渗透系数骤减阶段: 该阶段对应岩石应力-

应变曲线的压密阶段, 随着轴压的升高, 岩石内部的孔隙和原生裂隙被压实, 压实增长率大, 致使渗透系数骤减。

(2) 渗透系数缓慢递减阶段: 该阶段对应岩石应力-应变曲线的弹性阶段, 随着轴压的升高, 岩石发生弹性形变, 岩石内部孔隙和原生裂隙被进一步压实, 压实增长率较小, 此时岩石内部仅有原生裂隙和孔隙, 并无新裂隙产生。因此, 该阶段渗透系数仍在减小, 但较渗透系数聚减阶段减小速率明显变缓。

(3) 渗透系数缓慢回升阶段: 该阶段对应岩石应力-应变曲线的塑性阶段, 随着轴压的升高, 岩石发生塑性形变, 岩石内部产生新的裂隙并逐渐发育为贯通裂隙形成过水通道, 岩石的体积由渗透系数缓慢递减阶段的压缩变成扩容。因此, 该阶段渗透系数开始上升。

(4) 渗透系数骤增阶段: 该阶段对应岩石应力-应变曲线的破坏阶段, 随着轴压的升高, 岩石发生破坏, 岩石内部裂隙贯通形成宏观破裂面, 宏观破裂面作为导水通道使岩石的渗透系数显著增加。因此, 该阶段渗透系数骤增。

### 3.2 不同围压下隔水关键层渗透性演化规律

本节分别对水压为 1 MPa、1.5 MPa、2 MPa 时, 不同围压条件下隔水关键层的应力-应变-渗透系数曲线进行分析, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 同一水压同一轴压下, 随着围压的升高, 岩石的渗透系数逐渐降低, 这是由于在围压作用下岩石内部的孔隙与原生裂隙被压密。但是在岩石不同的形变阶段, 渗透系数降低的程度不同。以水压 2 MPa 为例, 在压密阶段, 围压 4 MPa 和 5 MPa 与围压 3 MPa 相比, 渗透系数分别下降了  $10.6 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$  和  $12.8 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ; 在弹性阶段, 围压 4 MPa 和 5 MPa 与围压 3 MPa 相比, 渗透系数分别下降了  $7.2 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$  和  $9.3 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ; 在塑性阶段, 围压 4 MPa 和 5 MPa 与围压 3 MPa 相比, 渗透系数分别下降了  $3.9 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$  和  $5.2 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 。当应力超过极限强度时, 岩石瞬间破坏, 无法分析破坏阶段渗透系数和围压的关系, 因此, 只分析前 3 个阶段渗透系数和围压的关系。根据以上数据可得, 围压对不同形变阶段影响程度从大到小依次为压密阶段、弹性阶段和塑性阶段。水压 1 MPa 和 1.5 MPa 条件下, 围压的影响规律与水压 2 MPa 条件下围压影响规律大致相同。

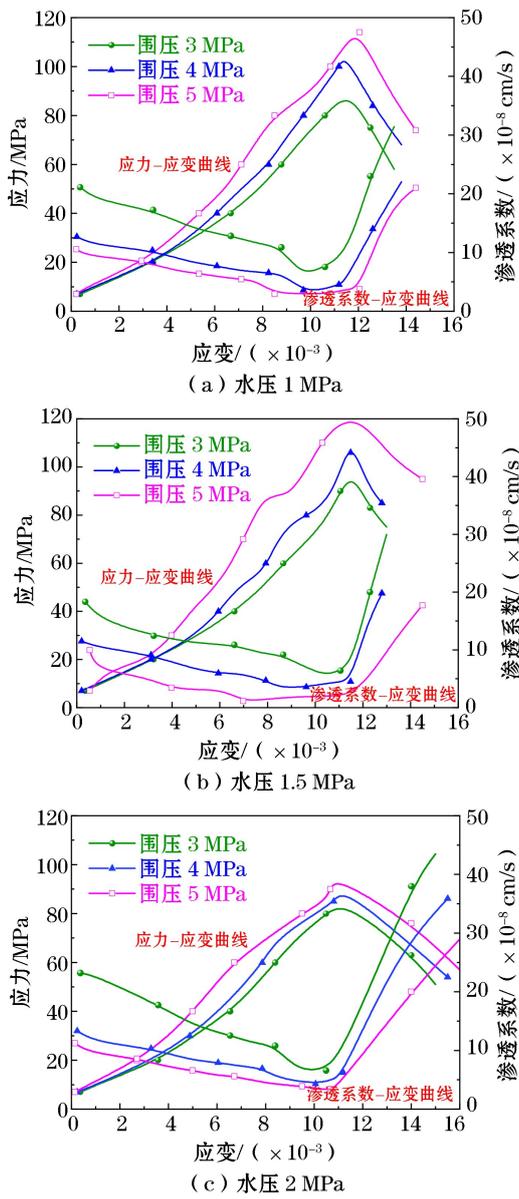


图4 不同围压下隔水关键层渗透系数曲线  
Fig.4 Permeability coefficient curves of water-resisting key layer under different confining pressures

在压密阶段,随着轴压的增加,低围压条件下岩石的渗透系数下降较为明显;继续增大轴压,进入塑性阶段,岩石内部的孔隙和裂隙被压密,此时不同围压对岩石渗透系数的影响大致相同且影响较小,这是由于当轴压远大于围压时,岩石内部裂隙和孔隙基本被压实,主要影响因素为轴压。因此,在压密阶段围压的变化对渗透性的影响更为剧烈。

### 3.3 不同水压下隔水关键层渗透特性演化规律

轴压和围压通过影响岩石内部裂隙与孔隙的开度和数量从而影响岩石的渗透性,在一定轴压和围压条件下,岩石渗透性也受岩石上下两端水压的影响,本节选取围压分别为 3 MPa 和 5 MPa 时,不同水压条件下隔水关键层的应力-应变-渗透系数曲线进行分析,如图 5 所示。

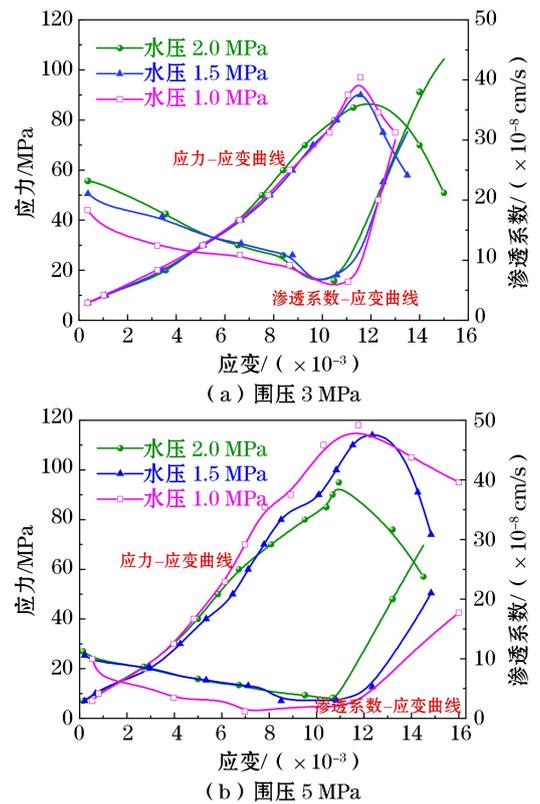


图5 不同水压下隔水关键层渗透系数曲线  
Fig.5 Permeability coefficient curves of water-resisting key layer under different water pressures

由图 5 可知,在围压为 3 MPa 时,同一轴压下,随着水压的升高,渗透系数逐渐增大,这是由于在裂隙和孔隙一定的情况下,随着水压的增加,单位时间内流过岩石的流量增加;增大轴压时,不同水压下岩石的渗透系数逐渐降低且趋于某一特定的值,这是由于当轴压远大于围压时,岩石内部裂隙和孔隙被压密,此时轴压为主要影响因素,水压对渗透系数的影响较小。当岩石破裂时,2 MPa 水压条件下的渗透系数明显大于 1 MPa 和 1.5 MPa 水压条件下的渗透系数,这是由于岩石破裂时产生宏观过水通道,此时水压越大,渗透系数越高。对比围压为 5 MPa 时应力-应变-渗透系数曲线可得,围压升高时,初始阶段岩石渗透系数较为接近。而随着轴压的增加,1 MPa 水压条件下岩石渗透系数显著降低,1.5 MPa 和 2 MPa 水压条件下岩石渗透系数基本相同。因此,1~2 MPa 范围内水压与岩石渗透系数不成正相关关系。

## 4 采动隔水关键层渗透性演化特征

### 4.1 采动隔水关键层渗流数值模型构建

根据新安煤矿 15130 工作面地质条件,设计模型尺寸为 400 m×250 m×170 m(长×宽×高),模

型采用摩尔-库伦屈服准则,底部设置固定条件,四周限制位移条件,顶部为自由边界并施加 3.225 MPa 的应力模拟未建地层。工作面推进距离为 200 m,开挖步距为 10 m,开挖 20 次。建模具体参数见表 1,数值模拟模型如图 6 所示。

表 1 建模参数

Table 1 Modeling parameters

序号	岩性	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	弹性 模量/ GPa	泊松比	黏聚 力/ MPa	内摩 擦角/ (°)	抗拉 强度/ MPa
1	细砂岩	2.65	12.48	0.224	22.33	33.08	6.25
2	砂质泥岩	2.68	4.79	0.283	13.62	30.05	3.31
3	泥岩	2.78	1.63	0.323	9.35	20.28	1.48
4	中砂岩	2.61	9.75	0.264	23.63	30.10	5.31
5	泥岩	2.78	1.63	0.323	9.35	20.28	1.48
6	砂质泥岩	2.68	4.79	0.283	13.62	30.05	3.31
7	细砂岩	2.65	12.48	0.224	22.33	33.08	6.25
8	砂质泥岩	2.68	4.79	0.283	13.62	30.05	3.31
9	中砂岩	2.61	9.75	0.264	23.63	30.10	5.31
10	泥岩	2.78	1.63	0.323	9.35	20.28	1.48
11	细砂岩	2.65	12.48	0.224	22.33	33.08	6.25
12	泥岩	2.78	1.63	0.323	9.35	20.28	1.48
13	中砂岩	2.61	9.75	0.264	23.63	30.10	5.31
14	泥岩	2.78	1.63	0.323	9.35	20.28	1.48
15	煤	2.50	1.21	0.27	2.05	25.35	1.22
16	砂质泥岩	2.68	4.79	0.283	13.62	30.05	3.31
17	泥岩	2.78	1.63	0.323	9.35	20.28	1.48

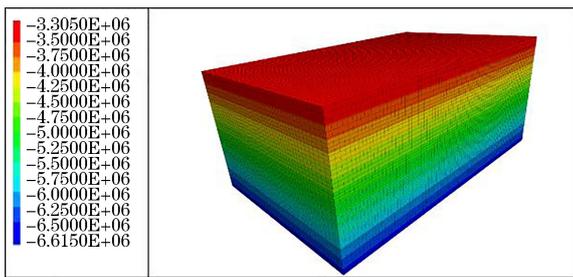


图 6 数值模拟模型

Fig.6 Model of numerical simulation

基于上述模型,结合图 4、图 5 分析得出的应力-应变-渗透系数关系,对渗透系数-应变曲线进行 Gauss 函数拟合<sup>[20]</sup>,拟合结果见表 2。将拟合结果输入到 FLAC3D 中,通过 FLAC3D 的自定义函数功能,将煤层采动过程中的应变转化为渗透系数,绘制渗透系数分布云图,分析采动过程中隔水关键层渗透系数变化规律。

Gauss 函数见式(2)。

$$y = y_0 + \frac{A}{\omega \sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(x-x_c)^2}{\omega^2}} \quad (2)$$

式中, $y_0$ 、 $A$ 、 $\omega$ 、 $x_c$ 均为常数; $x$ 为某围压、水压条件下的应变值; $y$ 为该条件下的渗透系数。

表 2 Gauss 函数拟合参数

Table 2 Fitting parameters of Gauss function

围压/水压/ MPa MPa	$y_0$	$x_c$	$\omega$	$A$	$R^2$
3 1.0	3.060 45E-7	0.006 92	0.010 82	-3.150 38E-9	0.750 61
3 1.5	3.174 55E-7	0.007 39	0.009 57	-2.716 63E-9	0.782 29
3 2.0	4.490 44E-7	0.006 87	0.010 16	-4.706 64E-9	0.839 40
4 1.0	2.026 48E-7	0.006 87	0.010 04	-2.046 75E-9	0.778 50
4 1.5	2.218 90E-7	0.007 40	0.010 72	-2.327 30E-9	0.788 45
4 2.0	3.759 17E-7	0.006 31	0.012 18	-5.126 95E-9	0.870 93
5 1.0	1.829 63E-7	0.006 85	0.010 54	-2.311 10E-9	0.887 21
5 1.5	2.166 62E-7	0.007 16	0.011 38	-2.599 30E-9	0.774 62
5 2.0	3.919 31E-6	0.006 56	0.053 18	-2.591 24E-7	0.892 11

列举围压为 5 MPa,水压为 2 MPa 条件下的砂岩拟合曲线,如图 7 所示。

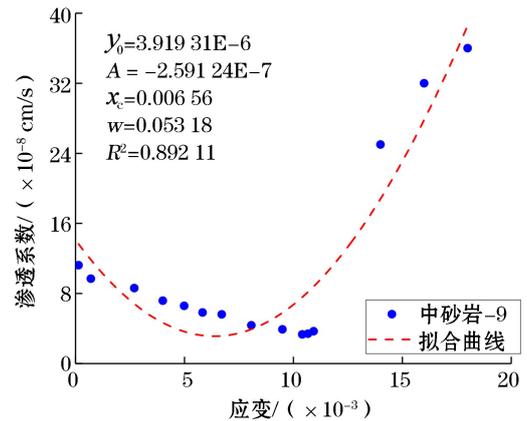


图 7 围压为 5 MPa,水压为 2 MPa 条件下的砂岩拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of sandstone under the condition of confining pressure of 5 MPa and water pressure of 2 MPa

将 FLAC3D 绘制的渗透系数云图导入 COMSOL 中,施加相应的边界条件和水压得出流速矢量图,从而分析煤层采动对隔水关键层隔水性能的影响规律。

#### 4.2 模拟结果分析

煤层开采前和分别推进 50 m, 100 m, 150 m, 200 m 时隔水关键层的渗透系数云图和流速矢量图如图 8 至图 12 所示。以此分析采动影响下隔水关键层渗透性演化特征及其隔水性能。

由图 8 可知,煤层未开采时,隔水关键层的渗透系数较小,约为  $2.7 \times 10^{-8}$  cm/s,且隔水关键层内部流速矢量基本相同,约为  $3.61 \times 10^{-10}$  m/s。此时隔水关键层结构稳定。

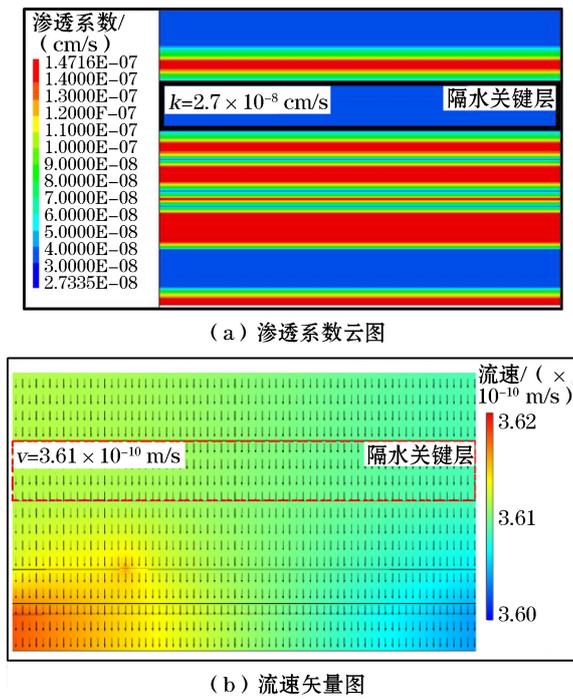


图 8 煤层开采前覆岩渗透系数及流速分布  
Fig.8 Permeability coefficient and velocity distribution of overlying strata before coal seam mining

由图 9 可知,当煤层推进 50 m 时,隔水关键层渗透系数未发生明显变化,且隔水关键层内部流速大小和方向也未发生明显变化。但隔水关键层下部水体小区域内流速矢量发生变化,这是由于裂隙带发生张拉破坏,使其渗透系数增加,从而导致水体流速增大。

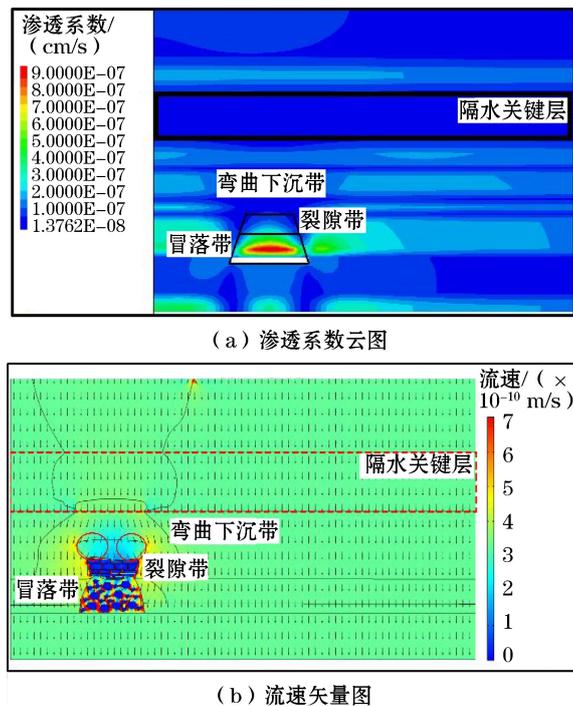


图 9 煤层推进 50 m 时覆岩渗透系数及流速分布  
Fig.9 Permeability coefficient and velocity distribution of overlying strata when the coal seam is advanced by 50 m

由图 10 可知,当煤层推进 100 m 时,隔水关键层弯曲下沉带中上部受到影响,由于弯曲使其下部

被压密,渗透系数减小,但减小的程度较小,因此采动对渗透性的影响较小。此时,隔水关键层下方水体流速矢量变化较明显,裂隙带两侧的流速明显变大,且方向发生改变,这是由于裂隙带两侧区域受拉伸的影响导致渗透系数增大。

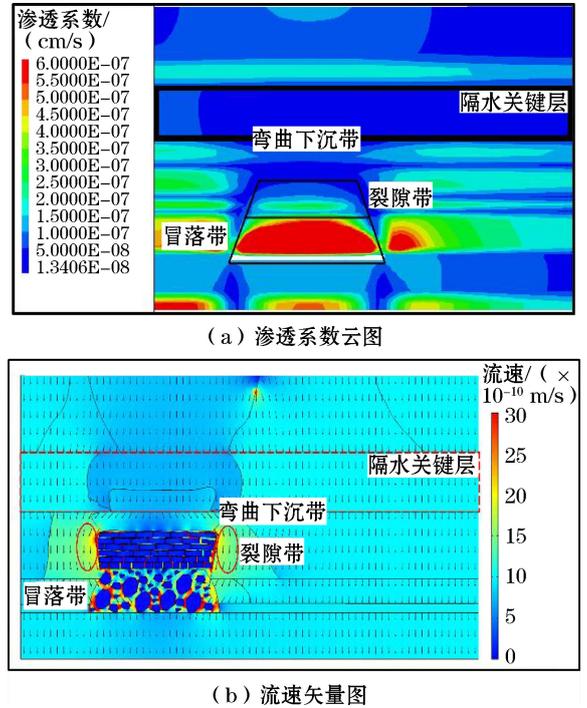


图 10 煤层推进 100 m 时覆岩渗透系数及流速分布  
Fig.10 Permeability coefficient and velocity distribution of overlying strata when the coal seam is advanced by 100 m

由图 11 可知,当煤层推进 150 m 时,裂隙带发育至隔水关键层下方,此时隔水关键层的渗透系数约为  $1.36 \times 10^{-8}$  cm/s,较初始值下降了  $1.34 \times 10^{-8}$  cm/s,但其下部小部分区域内渗透系数略有增加,这是由于隔水关键层发生弯曲变形,上部被压实,下部被拉伸。隔水关键层下方裂隙带两侧水体流速矢量变化趋势与煤层推进 100 m 时大致相同,但隔水关键层上方水体开始有向两侧扩散的趋势,这是由于隔水关键层发生弯曲变形,上部被压密导致其纵向渗透系数降低,两侧被拉伸导致其横向渗透系数增加,水体向两侧扩散。

由图 12 可知,当煤层推进 200 m 时,隔水关键层依然处于弯曲下沉带,没有断裂,其下部有小部分区域内渗透系数略有增加,此时区域范围较煤层推进 150 m 时大,约为隔水关键层整体厚度的 1/3,但隔水关键层大部分区域渗透系数稳定在  $1.4 \times 10^{-8}$  cm/s 左右,其上部岩层渗透系数较之前无明显变化。隔水关键层下方水体流速增大,此时采空区处于导通状态,水流向采空区汇集。隔水关键层上方

部分区域内水体向两侧扩散,但该区域面积有限,且对其他区域影响较小,由此可见,隔水关键层依然有良好的隔水性能。

进行了三轴压缩条件下渗透特性试验及数值模拟试验,研究了轴压、围压、水压以及采动下隔水关键层渗透特性演化规律,主要结论如下所述。

(1) 在承载压缩过程中,隔水关键层渗透系数-应变曲线对应于应力-应变曲线的4个阶段也可分为渗透系数骤减、渗透系数缓慢递减、渗透系数缓慢回升、渗透系数骤增4个阶段。

(2) 当轴压小于围压时,3~5 MPa 范围内围压对不同形变阶段岩石渗透系数影响不同,影响程度从大到小依次为压密阶段、弹性阶段和塑性阶段;1~1.5 MPa 范围内水压对不同形变阶段岩石渗透系数影响也不同,在初始压密阶段,同一轴压下,随着水压升高,岩石渗透系数显著增大,当岩石受压致密后,水压对其渗透系数影响较小。当轴压大于围压时,围压和水压对岩石渗透性影响较小,轴压为主要影响因素。

(3) 采动影响下隔水关键层发生弯曲变形,纵向被压密使纵向渗透系数减小,两侧被拉伸使横向渗透系数增加,隔水关键层上方水体沿关键层内部横向裂隙两侧扩散,最终汇向采空区,但整体上看,隔水关键层依然具有良好的隔水性能。

参考文献(References):

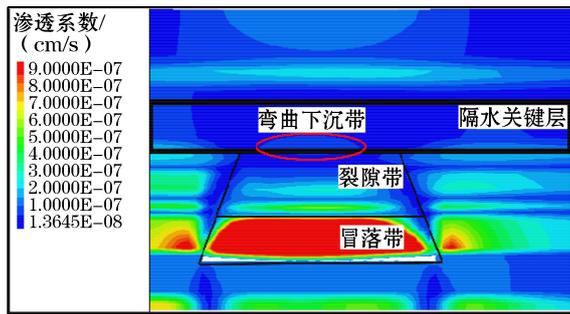
[1] 董永,梁辉,周子龙.底板断层导水的分段力学分析[J].现代矿业,2016,32(7):30-33.  
DONG Yong, LIANG Hui, ZHOU Zilong. Segment mechanical analysis of backplane fault of water conductivity [J]. Modern Mining, 2016, 32(7): 30-33.

[2] 孙强,刘恒凤,张吉雄,等.充填开采隔水关键层渗流稳定性力学模型及分析[J].采矿与安全工程学报,2022,39(2):273-281.  
SUN Qiang, LIU Hengfeng, ZHANG Jixiong, et al. Mechanical model and analysis of seepage stability in key aquiclude strata during backfill mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 273-281.

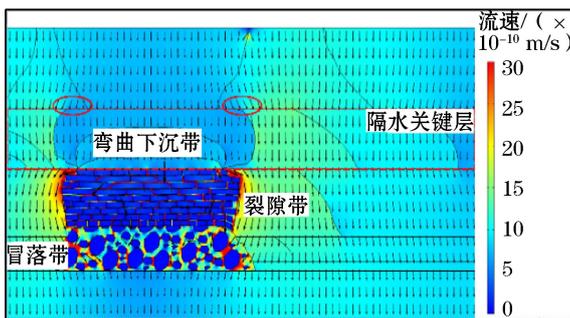
[3] 孟紫文.水体下采煤隔水关键层判别及透水性分析[J].山西煤炭,2018,38(4):55-57.  
MENG Ziwen. Water-resisting key strata identification and water permeability analysis for coal mining under water body [J]. Shanxi Coal, 2018, 38(4): 55-57.

[4] 徐智敏,刘栓栓,李剑锋,等.煤层底板水文地质结构划分及阻隔水能力定量评价方法研究[J].煤炭科学技术,2022,50(2):187-194.  
XU Zhimin, LIU Shuanshuan, LI Jianfeng, et al. Study on quantitative evaluation method of hydrogeological structure and water-blocking capacity of coal seam floor [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 187-194.

[5] 马凯,尹立明,陈军涛,等.深部开采底板隔水关键层受局部高承压水作用破坏理论分析[J].岩土力学,2018,39(9):3213-3222.



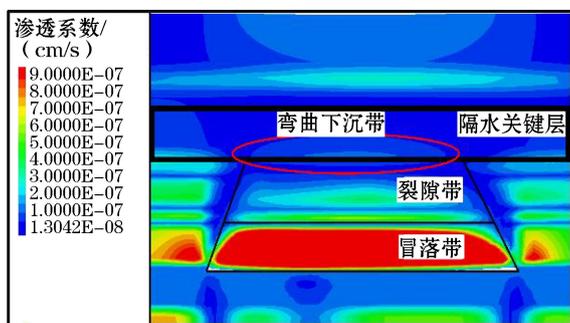
(a) 渗透系数云图



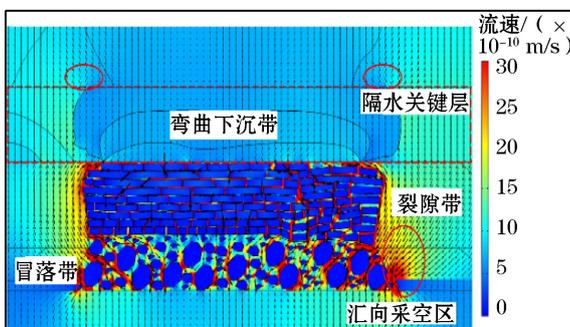
(b) 流速矢量图

图 11 煤层推进 150 m 时覆岩渗透系数及流速分布

Fig.11 Permeability coefficient and velocity distribution of overlying strata when the coal seam is advanced by 150 m



(a) 渗透系数云图



(b) 流速矢量图

图 12 煤层推进 200 m 时覆岩渗透系数及流速分布

Fig.12 Permeability coefficient and velocity distribution of overlying strata when the coal seam is advanced by 200 m

5 结论

本文对新安煤矿 15130 工作面上方隔水关键层

- MA Kai, YIN Liming, CHENG Juntao, et al. Theoretical analysis on failure of water-resisting key strata in the floor by local high confined water in deep mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 3213-3222.
- [6] 鲁海峰, 孟祥帅, 张元, 等. 采场底板层状结构关键层隔水性能力学分析[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6): 1057-1066.
- LU Haifeng, MENG Xiangshuai, ZHANG Yuan, et al. Mechanical analysis of water barrier performance of floor layered structure key stratum on coal face [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6): 1057-1066.
- [7] 王妍, 姚多喜, 鲁海峰. 高水压作用下煤层底板隔水关键层弹性力学解[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(1): 127-132+137.
- WANG Yan, YAO Duoxi, LU Haifeng. Elastic mechanics solution of water proof key layer in coal seam floor under high water pressure[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(1): 127-132+137.
- [8] 孙建, 王连国, 鲁海峰. 基于隔水关键层理论的倾斜煤层底板突水危险区域分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 655-662.
- SUN Jian, WANG Lianguo, LU Haifeng. The analysis of the water-inrush dangerous areas in the inclined coal seam floor based on the theory of water-resisting key strata [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(4): 655-662.
- [9] 孙建, 王连国, 侯化强. 底板复合隔水关键层的隔水性能研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 560-566.
- SUN Jian, WANG Lianguo, HOU Huaqiang. Resurch on water-isolating capacity of the compound water-resisting key strata in coal seam floor [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 560-566.
- [10] 姚邦华, 白海波, 黄汉富, 等. 采动覆岩隔水层稳定性力学模型及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 307-311.
- YAO Banghua, BAI Haibo, HUANG Hanfu, et al. Mechanical model of stability of water-resistant strata under mining and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 307-311.
- [11] 赵兵朝, 郭亚欣, 孙浩, 等. 基于主关键层位置的近浅埋煤层采动覆岩隔水层稳定性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 653-662.
- ZHAO Bingchao, GUO Yaxin, SUN Hao, et al. Stability research on the water-resistant strata under mining in nearly shallow coal seam based on location of main key stratum [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(4): 653-662.
- [12] 刘瑞强, 王延蒙. 龙固煤矿奥陶系顶部岩层隔水性研究[J]. 能源技术与管理, 2015, 40(2): 55-57.
- LIU Ruiqiang, WANG Yanmeng. Study on water insulation of top strata of Ordovician in Longgu coal mine [J]. Energy Technology and Management, 2015, 40(2): 55-57.
- [13] 张杰, 杨涛, 田云鹏, 等. 采动及渗流作用下隔水土层破坏规律研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 219-224.
- ZHANG Jie, YANG Tao, TIAN Yunpeng, et al. Experimental test for destruction law of aquiclude under action of mining and seepage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 219-224.
- [14] 张杰, 余学义, 成连华. 浅煤层长壁间隔工作面隔水土层破坏机理[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(6): 801-804.
- ZHANG Jie, YU Xueyi, CHENG Lianhua. Failure mechanism of water and soil barrier layer in shallow coal seam longwall interval working face [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, 27(6): 801-804.
- [15] 郭盛彬, 郭英海, 李俊杰, 等. 屯兰矿奥陶系隔水关键层孔隙性分析[J]. 煤矿安全, 2012, 43(4): 127-131.
- GUO Shengbin, GUO Yinghai, LI Junjie, et al. Porosity analysis of ordovician water-resisting key strata in Tunlan Coal Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(4): 127-131.
- [16] 张思蔚. 煤矿顶底板隔水关键层分析与破坏能力评价[J]. 能源与环保, 2020, 42(10): 34-37+42.
- ZHANG Siwei. Analysis of key layers of water-resistance of coal roof and floor and evaluation of its destruction ability [J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42(10): 34-37+42.
- [17] 冯国瑞, 白锦文, 杨文博, 等. 复合采动损伤对层间隔水控制层稳定性的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 777-785.
- FENG Guorui, BAI Jinwen, YANG Wenbo, et al. Influence of multiple mining damage on the stability of water-resisting control strata [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 777-785.
- [18] 周少玺. 水体下采煤隔水关键层的判别与应用[J]. 工程技术研究, 2017, 13(9): 88-89.
- ZHOU Shaoxi. Identification and application of key layer of water barrier in coal mining under water body [J]. Engineering and Technological Research, 2017, 13(9): 88-89.
- [19] 王小江, 荣冠, 周创兵. 粗砂岩变形破坏过程中渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 2940-2947.
- WANG Xiaojiang, RONG Guan, ZHOU Chuangbing. Permeability experimental study of gritstone in deformation and failure processes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2940-2947.
- [20] 唐冲, 惠辉辉. 基于 Matlab 的高斯曲线拟合求解[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(8): 1262-1263+1297.
- TANG Chong, HUI Huihui. Gaussian curve fitting solution based on Matlab [J]. Computer & Digital Engineering, 2013, 41(8): 1262-1263+1297.

**Permeability Evolution Characteristics of Water-Resisting Key Layer Under Water-Force Coupling**

XIE Guoliang<sup>1</sup>, HU Bo<sup>2</sup>, SHAN Chenfang<sup>1</sup>, YANG Xu<sup>2</sup>, LONG Yan<sup>1</sup>, NIU Kun<sup>2</sup>, WANG Haiyang<sup>1</sup>

(1.Kuqa County Yushuling Coal Mine Co., Ltd., Kuqa, Xinjiang 842014, China;

2.State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining,

China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** The water-resisting key layer has a great influence on the safe mining of coal seam under water body and aquifer. In order to study the permeability evolution law of the water-resisting key layer and the water-resisting performance of the water-resisting key layer during mining, taking the coal mining under the reservoir of the 15130 working face of Xin'an Coal Mine as the engineering background, the water-force coupling seepage test of the water-resisting key layer and the numerical simulation test of the water-resisting performance of the water-resisting key layer were carried out. The results show that the permeability coefficient-strain curve of the water-resisting key layer under bearing compression can be divided into four stages, which correspond to the four stages of the stress-strain curve, namely, the stage of rapid decrease of permeability coefficient, the stage of slow decrease of permeability coefficient, the stage of slow recovery of permeability coefficient and the stage of rapid increase of permeability coefficient. The change of confining pressure in the compaction stage is more likely to cause the change of permeability coefficient of the water-resisting key layer, there is no positive correlation between water pressure and permeability coefficient in the range of 1 – 2 MPa. The water-resisting key layer above the 15130 working face is bent and deformed under the influence of mining, but on the whole, the water-resisting key layer still has good water-resisting performance. The research results have certain reference significance for coal mining under water.

**Key words:** Water-resisting key layer, Water-resisting performance, Water-force coupling, Permeability coefficient, Coal mining under water bodies