

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.02.009

# 基于流固耦合的单采与复采工作面覆岩渗透性研究

何定秋, 陈陆望, 欧庆华, 陈逸飞, 宋嘉伟

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**浅埋煤层单采与复采覆岩渗透性变化与工作面突水关系密切,文章针对隆德煤矿地质条件,应用FLAC3D内嵌的FISH语言模块,依据覆岩体积应变与其渗透系数的关系对软件进行二次开发,对煤层单采与复采工作面覆岩应变场、渗透系数场分布规律进行数值模拟研究。结果表明:工作面覆岩渗透性与其体积应变密切相关;单采1-1煤与复采2-2煤引起的岩层拉伸变形发生在工作面顶部和底部,压缩变形发生在工作面周围的支承压力区和弯曲下沉带,在拉伸、压缩变形区的交界区域易形成剪切破坏;单采1-1煤引起上覆中砂岩和细砂岩不协调变形,离层空间发育,此处渗透性最强;复采下层2-2煤后覆岩渗透系数场形似马鞍形,同时上层1-1煤覆岩的变形破坏进一步加剧,最大渗透系数比值由1-1煤终采时的1.46增至1.91,增幅达31%。研究结果可为同类型浅埋煤层单采与复采渗透性研究提供参考,为矿井突水防治提供理论依据。

**关键词:**复采;流固耦合;体积应变;渗透系数;覆岩破坏

**中图分类号:**P641.43

**文献标志码:**A

**文章编号:**1003-5060(2026)02-0202-07

## Study on overburden permeability of single mining and repeated mining face based on fluid-solid coupling

HE Dingqiu, CHEN Luwang, OU Qinghua, CHEN Yifei, SONG Jiawei

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The change of overburden permeability in single mining and repeated mining of shallow coal seam is closely related to the water inrush of the working face. According to the geological conditions of Longde Coal Mine, using the FISH language module embedded in FLAC3D on the basis of the relationship between volume strain and permeability coefficient, the strain field and permeability coefficient field distribution of overburden in single mining and repeated mining face of coal seam was simulated. The results show that the overburden permeability of the working face is closely related to its volume strain. The tensile deformation caused by single mining of 1-1 coal and repeated mining of 2-2 coal occurs at the top and bottom of the working face, while the compression deformation occurs in abutment pressure area and continuous bending zone around the working face. Shear failure is easy to occur at the junction of two deformation zones. The single mining of 1-1 coal causes uncoordinated deformation of the overlying medium sandstone and fine sandstone, and the development of the bed separation space, where the permeability is the strongest. The repeated mining of 2-2 coal will intensify the overburden deformation and failure of 1-1 coal, and the overburden permeability coefficient field presents a saddle shape, with the maximum permeability coefficient ratio increasing by 31% from 1.46 to 1.91. The research results can serve as a reference for the study of the permeability of similar shallow coal seams in single mining and repeated mining, and provide a theoretical basis for the prevention

**收稿日期:**2023-10-18; **修回日期:**2023-11-02

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(41972256)

**作者简介:**何定秋(2001—),男,四川宜宾人,合肥工业大学硕士生;

陈陆望(1973—),男,湖北黄冈人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: luwangchen8888@163.com.

and control of mine water inrush.

**Key words:** repeated mining; fluid-solid coupling; volume strain; permeability coefficient; overburden failure

隆德煤矿位于陕西省神木县西南部,煤炭资源丰富,该区域煤层具有埋藏浅、上覆基岩薄的特征,地表浅层萨拉乌苏组潜水富水性较好<sup>[1]</sup>,补给较为充沛。

煤层单采与复采将使覆岩发生不同程度的变形、断裂及垮落,上下采空区岩体出现大规模的应变,形成贯通上下采空区的导水通道,渗透系数场随之发生变化,地下水向采空区汇集易造成突水事故<sup>[2-4]</sup>。

因此,开展隆德煤矿单采与复采下覆岩变形、渗透性分布规律研究,是矿井突水防治及地下水资源保护急需解决的难题。

关于煤炭开采中覆岩渗透性的发展变化,国内外的理论和试验研究成果较丰富。文献<sup>[5]</sup>研究了开挖地下硐室后围岩应力与渗透性的变化规律和两者的耦合机制;文献<sup>[6]</sup>运用孔隙弹性力学理论,推导出采动裂隙岩体和多孔介质岩体应力与渗透系数的关系式;文献<sup>[7]</sup>从流固耦合的角度构建承压水上采煤的裂隙岩体水力学模型,分析采动岩体渗透性的变化;文献<sup>[8]</sup>通过理论与数值模拟分析采空区岩体应力与渗透性的耦合作用,得到岩体应力-应变和渗透性分布规律。

上述研究大多根据应力与渗流的耦合关系来分析,然而,大量岩石应力-应变-渗透性试验表明<sup>[9-11]</sup>:岩石在弹性阶段随应力的增加,原生微裂隙受挤压,渗透性降低;当岩石达到屈服强度,同时应力增幅较小,内部将形成新的裂隙,渗透性将明显增强。此时应力不发生明显变化,但应变仍不断增加,应力变化不能正确反映渗透系数的变化,因此应以岩石应变作为渗透系数的控制因素,但是与岩石应变有关的采后覆岩渗透性研究还很有限。文献<sup>[12]</sup>根据岩体应变与渗透系数的关系,通过有限元分析开采前后工作面覆岩渗透系数的变化;文献<sup>[13]</sup>采用变渗透系数法,从应变场与渗流场相互作用的角度,对采动影响下工作面底板岩体进行耦合分析;文献<sup>[14]</sup>通过理论与数值模拟,探究采动过程中工作面围岩应变场、渗透系数场的分布规律与影响因素。

目前,大部分已有研究集中于单采过程中的渗透现象,对于复采工作面覆岩渗透性的研究相对较少,对于复采渗透的机理和规律研究不足。由于通过煤矿的现场试验较难获取岩体变形破坏

的渗透性参数,而数值模拟是解决煤炭开采过程中与覆岩渗透性相关的岩石力学问题的有效方法,本文以隆德煤矿为研究实例,通过理论分析和数值模拟方法,运用FLAC3D内嵌的FISH语言模块对软件进行二次开发,实现采动覆岩渗透系数随体积应变的动态变化,以此研究煤炭单采与复采过程中工作面覆岩应变场和渗透系数场的变化,以期为矿井单采与复采安全问题及危险性评价提供理论依据。

## 1 岩石应变与渗透性耦合关系

### 1.1 岩石全应力-应变-渗透规律

岩石全应力-应变-渗透过程曲线如图1所示<sup>[8]</sup>。图1中: $K$ 为渗透系数; $\sigma$ 为轴向应力; $\varepsilon_v$ 为体积应变。

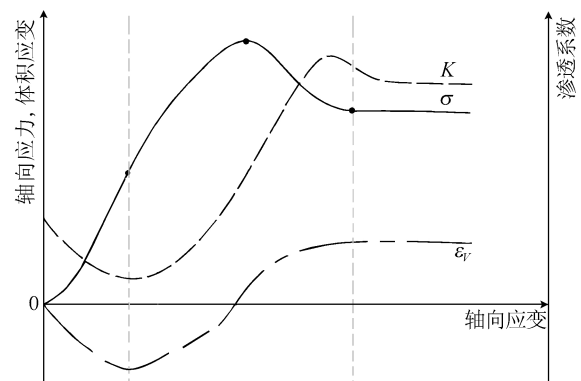


图1 岩石全应力-应变-渗透过程曲线变化

从图1可以看出:岩石应力-应变曲线的变化趋势不同于渗透系数-应变曲线,而渗透系数与体积应变表现出强烈的相关性,两者变化趋势基本相同。渗透系数在岩石体积应变转折前后发生显著变化。渗透系数转折前,岩石原生微裂隙与孔隙闭合,导致体积压缩,渗透系数随之降低;转折后岩石微裂隙与孔隙不断增加、扩展,导致体积扩容,渗透系数随之显著增加。岩石在达到残余强度后,其内部贯通性的破裂面随着摩擦而产生压缩闭合,导致体积再次压缩,渗透系数有降低的趋势,并在一定程度后基本保持不变,此时渗透系数逐渐趋于稳定。

### 1.2 岩体应变与渗透系数的关系

岩体的渗透性与岩体所处的应变状态密切相关。文献<sup>[9]</sup>进行了煤岩样应力应变过程中体积

应变与渗透性的试验研究,通过广泛应用的 Kozeny-Carman 方程以及体积应变与孔隙度的数学表达式和定义,推导了岩体孔隙度与体积应变的变化关系式,即

$$n = \frac{1}{1 + \epsilon_v} (n_0 + \epsilon_v).$$

其中: $n$  为孔隙度; $n_0$  为初始孔隙度; $\epsilon_v$  为体积应变。

文献[9]中近似认为在岩体的应力应变过程中,单位体积岩体颗粒的总表面积不变,由此推导出岩体体积应变与渗透系数的关系式,即

$$K = \frac{K_0}{1 + \epsilon_v} \left( 1 + \frac{\epsilon_v}{n_0} \right).$$

其中: $K$  为渗透系数; $K_0$  为初始渗透系数。

## 2 研究区工程背景

隆德煤矿地表浅层萨拉乌苏组潜水富水性较好,水文地质类型为中等型;地质构造简单,可采煤层顶板多为半坚硬的岩层,稳定性好,未见落差大于 30 m 的断层。

煤岩柱状图如图 2 所示<sup>[15]</sup>。

柱状	厚度/m	埋深/m	岩性
	80.2	80.2	土层
	8.0	88.2	细砂岩
	7.5	95.7	中砂岩
	14.0	109.7	粉砂岩
	26.0	135.7	细砂岩
	18.2	153.9	中砂岩
	1.8	155.7	1-1煤
	1.7	157.4	细砂岩
	8.2	165.6	粉砂岩
	15.7	181.3	细砂岩
	6.8	188.1	粉砂岩
	3.0	191.1	细砂岩
	9.2	200.3	粉砂岩
	3.5	203.8	细砂岩
	2.0	205.8	粉砂岩
	4.8	210.6	2-2煤
	1.4	212.0	泥岩
	30.0	242.0	细砂岩

图 2 煤岩柱状图

该矿计划先开采局部可采的 1-1 煤,后开采下部的 2-2 煤。101 工作面位于隆德煤矿西翼采区,为 1-1 煤首采工作面,煤厚 1.4~1.8 m,含夹

矸 1 层,工作面推进长度 2 529 m,斜长 288.9 m,煤层平均埋深 154.0 m。

209 工作面处于隆德煤矿 2-2 煤辅运大巷西侧,为 2-2 煤接续工作面,工作面推进长度 3 477 m,斜长 300.0 m,煤层近水平,平均埋深 210.0 m。

101、209 工作面均布置辅运巷、主运巷和回风巷 3 条回采巷道,工作面采用综采工艺一次采全高。

1-1 煤上方 44.0 m 处是第四系底部含水层,含水层下部为厚 14.0 m 的粉砂岩隔水层,2-2 煤距粉砂岩隔水层下边界 96.0 m。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 数值计算模型

以隆德煤矿 1-1 煤和 2-2 煤的地质资料为基础,采用 FLAC3D 构建模型,数值模型示意图如图 3 所示。

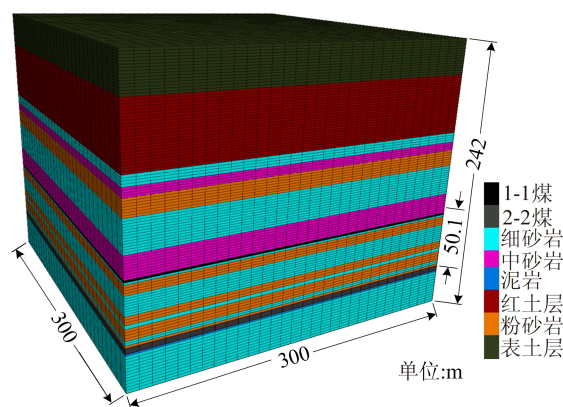


图 3 数值模型示意图

模型三维尺寸为 300 m × 300 m × 242 m,共划分 103 500 个单元和 111 476 个节点。模型顶部设置为自由边界条件,侧面施加法向方向的位移约束,底部为固定边界。

回采模拟布置如下:1-1 煤厚 1.8 m,2-2 煤厚 4.8 m,两者间距 50.1 m,在粉砂岩隔水层以上 10 m 内设定孔隙水压力 1 MPa 以模拟第四系含水层的影响。以自重应力模拟岩体初始应力场。

模型渗流边界均为隔水边界,当煤层开采后,工作面为定水压边界,孔隙水压力为 0 MPa。1-1 煤和 2-2 煤沿工作面走向与倾向均推进 200 m,1-1 煤与 2-2 煤倾向错距为 50 m。

根据榆神矿区水文地质勘探资料统计数据取平均值<sup>[16-18]</sup>,不同岩性岩体渗透系数、孔隙度及岩层物理力学参数见表 1 所列。

表 1 数值模拟模型岩体渗透系数、孔隙度及岩层物理力学参数

岩层	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	内摩擦角/ (°)	内聚力/ MPa	泊松比	体积模量/ GPa	剪切模量/GPa	抗拉强 度/MPa	渗透系数/ [m <sup>2</sup> /(Pa/s)]	孔隙度/ %
泥岩	2 710	34.06	6.3	0.21	4.90	3.31	0.224	1.0E-11	3
细砂岩	2 695	36.24	7.0	0.20	7.22	5.42	0.259	5.0E-10	6
粉砂岩	2 788	35.46	5.7	0.17	5.06	5.13	0.416	4.0E-10	4
煤层	1 420	30.00	2.6	0.25	4.00	2.40	0.160	3.0E-10	5
中砂岩	1 950	25.00	4.0	0.35	3.33	1.54	0.140	5.0E-9	9

### 3.2 采后覆岩应变场分析

单采 1-1 煤与复采 2-2 煤推进 200 m 后,沿煤层走向工作面中部剖面的体积应变场分布如图 4 所示。

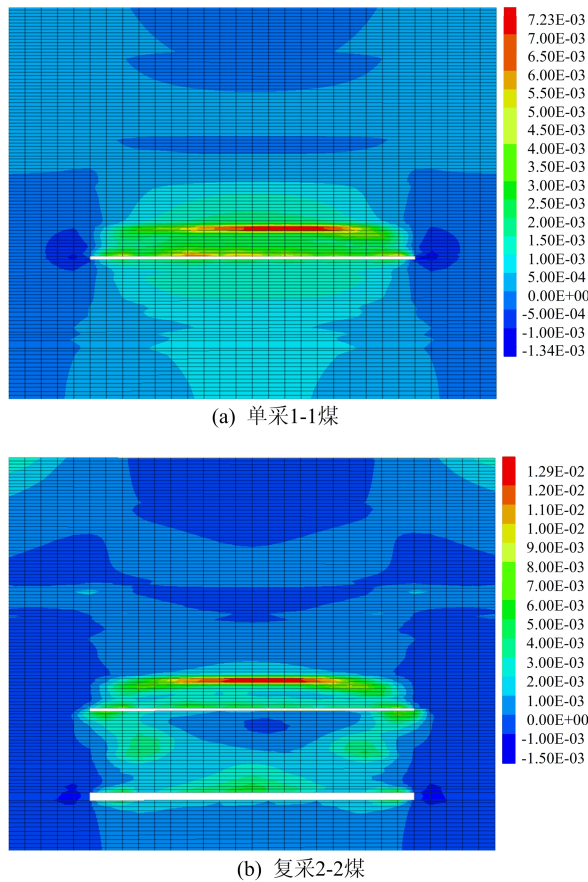


图 4 单采 1-1 煤与复采 2-2 煤体积应变云图

从图 4a 可以看出:单采 1-1 煤引起的岩层拉伸变形出现在工作面顶底板,而工作面周围支承压力和弯曲下沉带则表现为压缩变形;上覆中砂岩与细砂岩因开采产生不协调变形,离层空间发育,此处体积应变值最大,粉砂岩隔水层基本未发生破坏,其体积应变值变化不大。从图 4b 可以看出:复采造成 1-1 煤变形破坏进一步加剧,体积应变值增大;2-2 煤上覆岩层拉伸变形区和压缩变形区与单采 1-1 煤基本一致,覆岩压缩变形区与拉伸变形区

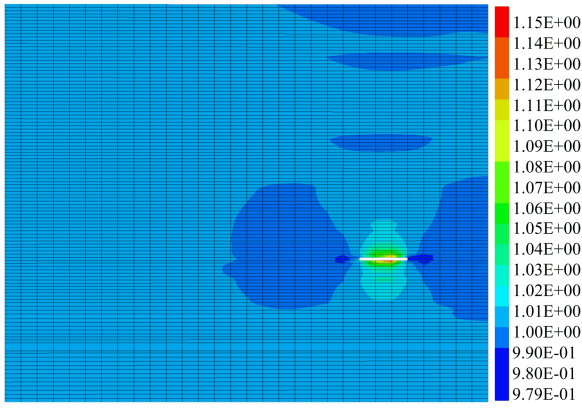
的交界区域容易发生剪切变形而形成剪切破坏,垮落带与剪切破坏区的体积应变值变化最明显;1-1 煤底板中部因复采 2-2 煤受到两边岩层的挤压而发生压缩变形,体积应变值表现为负。

### 3.3 采后覆岩渗透系数场分析

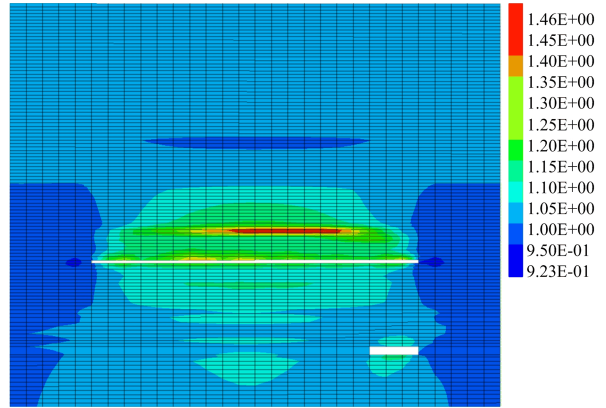
1) 单采 1-1 煤渗透系数场分析。以煤炭开采中覆岩渗透系数与初始渗透系数的比值作为额外变量输出,单采 1-1 煤分别推进 30、90、150、200 m 时的结果如图 5 所示(沿煤层走向工作面中部剖面)。从图 5a 可以看出,开采初始推进至 30 m 时,采空区拉伸变形区岩层渗透性增强,采空区上下方渗透系数增大区域较小,在顶底板 15 m 范围内轻微增大,云图大致呈“8”字形,而压缩变形区岩层处于压缩状态,渗透系数小于初始值。由图 5b、图 5c 可知,随着开采距离推进至 90、150 m 时,渗透系数变化区域不断扩大,垂向上距 1-1 煤越远,渗透系数比值越小,表明覆岩距煤层越远,受采动影响作用越弱。从图 5d 可以看出,开采推进至 200 m 时,云图中垮落带内渗透系数比值变化高于导水裂隙带,离层区渗透性增幅最大,比值达 1.46。粉砂岩隔水层渗透性受采动影响较小,其隔水性基本保持不变,说明 1-1 煤开采裂隙未发育至含水层,不会发生突水。采空区两端渗透性明显减弱区约 30 m,底板渗透系数变化较小,趋于稳定。

2) 复采 2-2 煤渗透系数场分析。单采 1-1 煤后复采 2-2 煤的模拟结果如图 6 所示(沿煤层走向工作面中部剖面)。

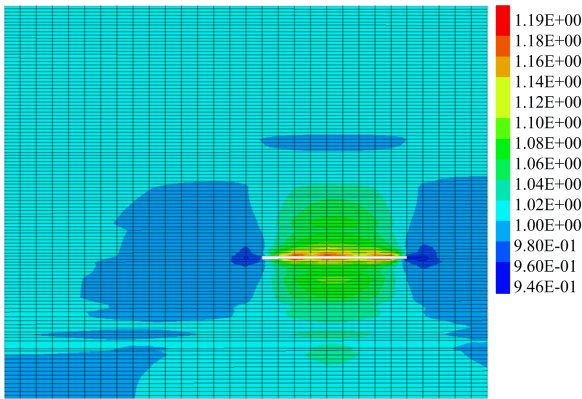
从图 6 可以看出:2-2 煤推进至 30 m 时,除 2-2 煤顶底板 7 m 范围内渗透性增强外,其余岩层与 1-1 煤终采相比渗透性无明显变化,2-2 煤工作面前方出现岩层压缩,渗透性降低;推进至 90 m 时,2-2 煤顶底板破坏加剧,渗透性明显增强;推进至 150、200 m 时,1-1 煤与 2-2 煤间隔层的破断下沉导致 1-1 煤顶板导水裂隙带的二次下沉破坏,渗透系数变化巨大,终采时覆岩最大渗透系数比值由 1-1 煤终采时的 1.46 增至 1.91,增幅达 31%。



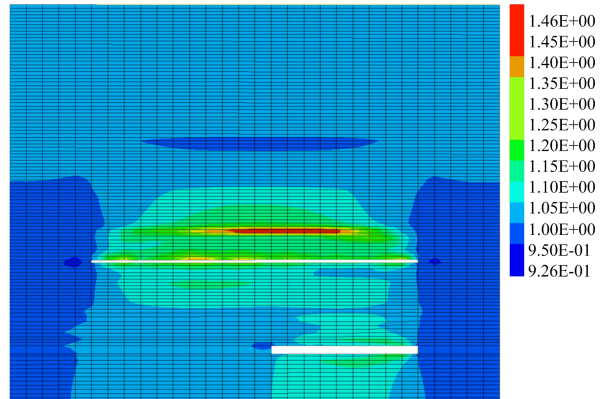
(a) 推进30 m



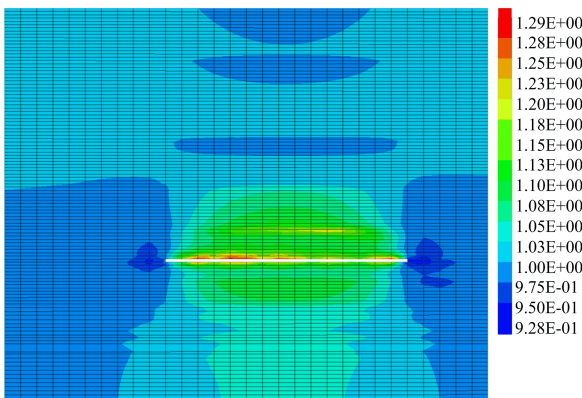
(a) 推进30 m



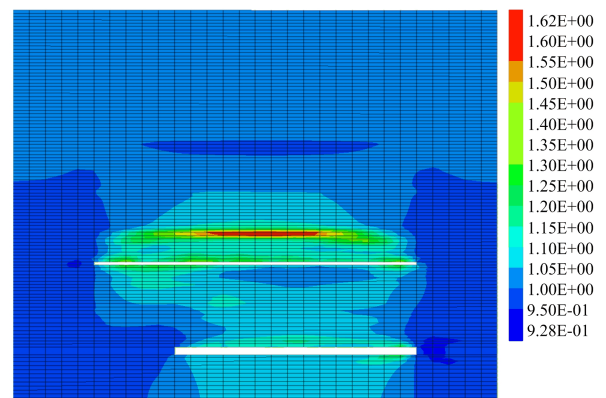
(b) 推进90 m



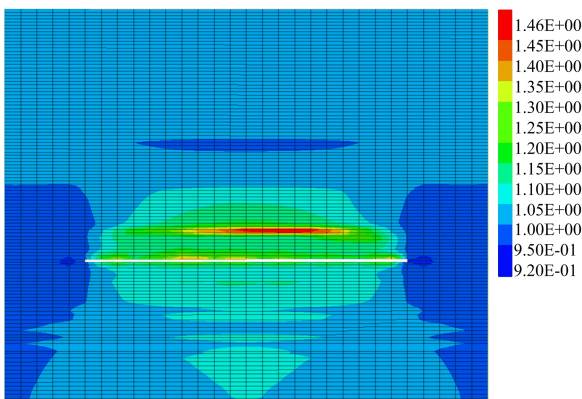
(b) 推进90 m



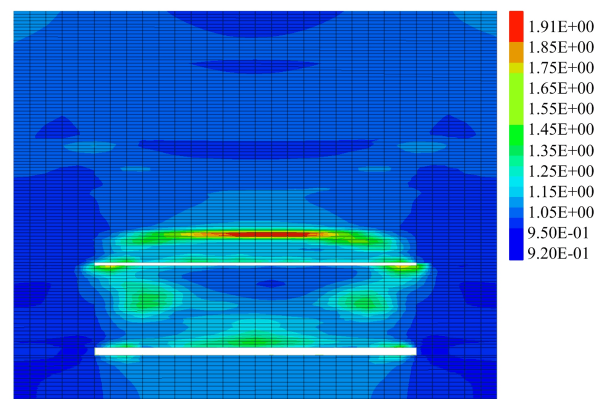
(c) 推进150 m



(c) 推进150 m



(d) 推进200 m



(d) 推进200 m

图 5 单采 1-1 煤渗透系数比值云图

图 6 复采 2-2 煤渗透系数比值云图

上覆粉砂岩隔水层渗透性无明显变化,因而复采 2-2 煤不会造成含水层突水;间隔层渗透系数场形似马鞍形,垮落带与剪切破坏区的渗透性增大幅度最明显;1-1 煤底板中部因复采 2-2 煤而发生压缩变形,渗透性明显减弱。

对比隆德煤矿 1-1 煤与 2-2 煤的上覆岩层及其因开采导致的渗透性变化情况可知:受到煤层采高及岩层结构的影响,2 个煤层上覆岩层的体积应变场与渗透系数场呈现不同的变化趋势;随煤层采高的增加,岩层破坏加重,渗透系数场变化幅度更大。1-1 煤由于采高仅 1.8 m,上覆岩层为厚而硬的岩层且有稳定隔水性,开采将产生明显的离层空间。然而,2-2 煤采高达 4.8 m,上覆厚硬岩层与 2-2 煤间距小于 10 倍采高,易发生同步破断<sup>[19]</sup>,此时易形成马鞍形的渗透系数场。

在 1-1 煤采空区上方中砂岩与细砂岩交界处沿走向布置监测线,监测线位于采空区正上方,两端超出采空区 10 m 且相距 220 m,从开切眼侧每隔 20 m 对监测点进行编号,共计 12 个监测点。单采 1-1 煤与复采 2-2 煤渗透系数比值监测曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,监测线中部离层空间发育使得渗透性明显增强,渗透系数比值较大,远高于采空区两侧,复采 2-2 煤造成 1-1 煤顶板的重复采动,进一步产生破坏,其渗透性远远大于单采 1-1 煤。

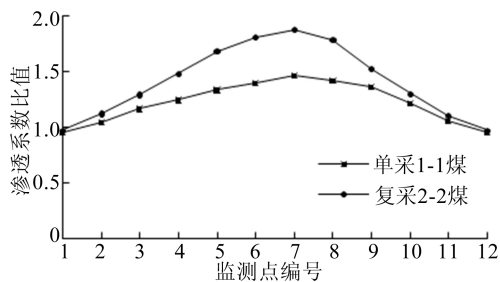


图 7 单采 1-1 煤与复采 2-2 煤渗透系数比值监测曲线

#### 4 现场验证

在隆德煤矿 101 工作面已采、209 工作面未采区域布置观测钻孔 ZK01,在 2 个工作面复采区布置观测钻孔 ZK03。ZK01、ZK03 钻孔冲洗液消耗量实测曲线如图 8 所示<sup>[15]</sup>,相同孔深对应的数值模拟渗透系数比值曲线如图 9 所示。

由图 8 可知:ZK01 钻孔在孔深 113.65 m 处钻孔冲洗液消耗量大幅增加,表明此处岩层渗透性发生改变,即进入导水裂隙带;ZK03 钻孔在孔

深 118.79 m 处钻孔冲洗液消耗量大幅增加且增幅逐渐加大,表明 ZK03 钻孔在 118.79 m 处岩层受到明显的采动影响,渗透性发生改变,即进入导水裂隙带。

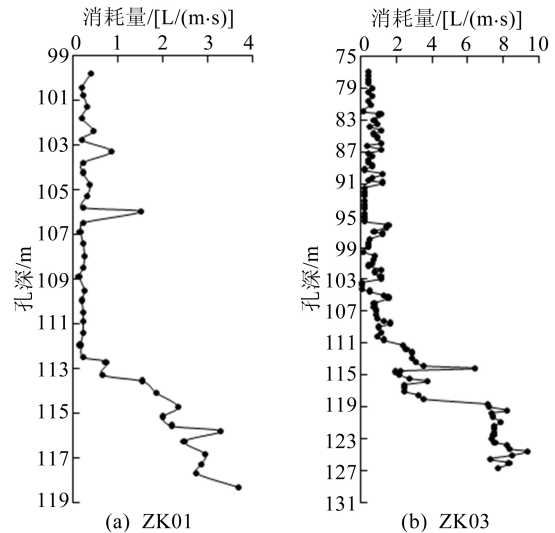


图 8 ZK01、ZK03 钻孔冲洗液消耗量实测曲线

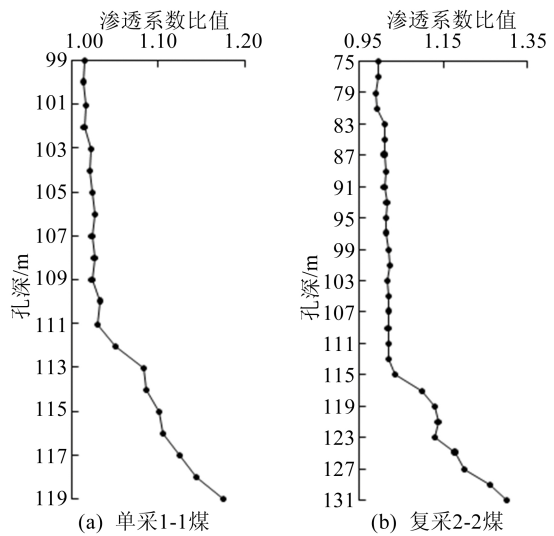


图 9 单采 1-1 煤与复采 2-2 煤渗透系数比值曲线

从图 9 可以看出:单采 1-1 煤后覆岩在孔深 112.00 m 处渗透性明显增强,与图 8a 实测冲洗液消耗量增幅加大处孔深对比可知,两者孔深差为 1.65 m;复采 2-2 煤后覆岩在孔深 115.00 m 处渗透性增幅较大,与图 8b 实测冲洗液消耗量增幅加大处孔深对比可知,两者孔深差为 3.79 m;数值模拟结果与 2 个钻孔实测冲洗液漏失量增幅加大处孔深的差距较小。由此可见,单采与复采下采动岩体的变形破坏将导致工作面覆岩渗透性发生变化,渗透系数场随之发生改变,进而导致钻孔冲洗液消耗量的变化。

## 5 结 论

1) 在单采与复采过程中,工作面覆岩渗透性的变化与其采动应变密切相关。本文利用 FLAC3D 内嵌的 FISH 语言,实现了流固耦合作用下隆德煤矿单采与复采过程中工作面覆岩应变场与渗透系数场的数值模拟。

2) 单采 1-1 煤与复采 2-2 煤引起的岩层拉伸变形发生在工作面顶底板,支承压区与弯曲下沉带表现为压缩变形。1-1 煤上覆中砂岩和细砂岩因开采作用产生不协调变形,离层空间发育,渗透系数比值达 1.46。粉砂岩隔水层基本未发生破坏,隔水性保持不变。复采 2-2 煤后渗透系数场形似马鞍形,上覆岩层压缩变形区与拉伸变形区交界处易产生剪切变形,进而产生剪切破坏,垮落带与剪切破坏区的体积应变值和渗透性增幅最明显,最大渗透系数比值增至 1.91,与单采相比增幅为 31%。

3) 对比钻孔实测冲洗液消耗量与相同孔深的数值模拟渗透系数比值,两者明显增大时的孔深差距较小,因而单采与复采下采动覆岩的变形破坏将导致其渗透性发生变化,进而导致钻孔冲洗液消耗量的变化。

## [参 考 文 献]

- [1] 冉星仕. 隆德煤矿浅埋上下煤层协调同采技术研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(8): 1-5.
- [2] 黄庆享, 曹健, 贺雁鹏, 等. 浅埋近距离煤层群分类及其采场支护阻力确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1177-1184.
- [3] 张杰, 何义峰, 罗南洪, 等. 浅埋煤层群重复采动覆岩运移及裂隙演化规律研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(3): 58-65.
- [4] 付兴, 王鑫, 苏志刚, 等. 浅埋极近距离采空区下工作面矿压显现规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 149-155.
- [5] KELSALL P C, CASE J B, CHABANNES C R. Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1984, 21(3): 123-135.
- [6] 张金才, 王建学. 岩体应力与渗流的耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1981-1989.
- [7] 郑少河, 朱维申, 王书法. 承压水上采煤的固流耦合问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 421-424.
- [8] 孟召平, 张娟, 师修昌, 等. 煤矿采空区岩体渗透性计算模型及其数值模拟分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1997-2005.
- [9] 卢平, 沈兆武, 朱贵旺, 等. 岩样应力应变全过程中的渗透性表征与试验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(6): 678-684.
- [10] 姜振泉, 季梁军. 岩石全应力-应变过程渗透性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 153-156.
- [11] 李世平, 李玉寿, 吴振业. 岩石全应力应变过程对应的渗透率-应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 13-19.
- [12] ELSWORTH D, BAI M. Flow-deformation response of dual-porosity media[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(1): 107-124.
- [13] 姚多喜, 鲁海峰. 煤层底板岩体采动渗流场-应变场耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2738-2744.
- [14] 师修昌, 孟召平. 回采工作面围岩采动应变场-渗透系数场耦合[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(2): 143-150.
- [15] 李磊. 浅埋厚砂层近距离煤层开采覆岩结构演化规律研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2021.
- [16] DU B J, LIU C Y, YANG J X, et al. Abutment pressure distribution pattern and size optimization of coal pillar under repeated mining: a case study[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(23): 1261.
- [17] 张蓓, 张桂民, 张凯, 等. 钻孔导致突水溃沙事故机理及防治对策研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 219-226.
- [18] 赵春虎, 靳德武, 李智学, 等. 陕北榆神矿区煤层开采顶板涌水规律分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 523-533.
- [19] 王晓振, 许家林, 朱卫兵, 等. 覆岩结构对松散承压含水层下采煤压架突水的影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 838-844.

(责任编辑 张淑艳)