

## 应用研究·煤矿·

## 煤矿采空区破损煤岩层的渗透性研究

## Permeability Performance of Fractured Coal and Rock Formations in Goaf

宋喜东<sup>1</sup>, 王恩志<sup>2</sup>, 刘晓丽<sup>2</sup>, 虎晓龙<sup>1</sup>, 金慧<sup>2</sup>, 高峻<sup>1</sup>, 姚文理<sup>2</sup>, 郭万平<sup>1</sup>, 孙一奇<sup>3</sup>

(1. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司灵新煤矿, 宁夏 灵武 751410; 2. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084; 3. 国网山西省电力公司, 山西 太原 030000)

**摘要:**利用矿井资源修建地下储库有助于实现“碳达峰, 碳中和”战略目标, 保障国家能源安全。掌握矿井储存空间内煤岩层渗透特性, 是确定地下储库储存容量, 保障储能系统稳定性和安全性的前提。本文以灵新煤矿矿井浓盐水地下储库工程为背景, 开展现场原位压水试验, 对采掘完成的矿区煤岩层渗透特性进行研究, 探明了矿区遗留煤柱、采区顶、低板的渗透特性和透水能力。试验结果表明各煤层遗留煤柱的稳定流量值为 1.0 ~ 6.12 L/min, 15 和 16 煤顶板稳定流量为 1.76 ~ 8.82 L/min, 16 煤的底板稳定渗流量为 1.971 ~ 8.82 L/min。在此基础上, 计算了各层煤柱透水率为 0.046 ~ 0.261 Lu, 顶板透水率为 0.07 ~ 0.162 Lu, 底板透水率为 0.042, 其中 16 煤煤柱透水率最大, 为 0.261 Lu。煤岩层透水性较差, 有利于修建地下储库工程。

**关键词:**煤矿采空区; 破损岩体; 地下储库; 压水试验

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2024)04-0032-06

**Abstract:** Ensuring national energy security and achieving the strategic objective of “carbon peaking and carbon neutrality” can be facilitated by utilizing mining resources to construct underground storage. Determining the storage capacity of the subterranean reservoir and guaranteeing the stability and safety of the energy storage system need an understanding of the permeability properties of coal and rock layers in the mine’s storage area. Based on the concentrated brine underground storage project of Lingxin Coal Mine, this paper carried out an in-situ water injection test to study the permeability characteristics of coal and rock in the mining area, and investigate the permeability characteristics and water permeability of the remaining coal pillars, the top and the low plates of coal seams. The test findings indicate that the top plate of coals 15 and 16 has a stable flow rate of 1.76 ~ 8.82 L/min, the bottom plate of coals 16 has a steady infiltration volume of 1.971. 76 ~ 8.82 L/min, and the stable flow value of the heritage coal pillar of each seam is 1.0 ~ 6.12 L/min. On this basis, the permeability of the coal pillar in each seam is calculated to be 0.046 ~ 0.261 Lu, that of the top plate to be 0.07 ~ 0.162 Lu, and that of the bottom plate to be 0.042 Lu. The permeability of the coal pillar in the 16 coal seams is the biggest, measuring 0.261 Lu. Overall, coal and rock formations have poor water permeability, which is conducive to the construction of underground storage projects. Relevant research provides a foundation for the design and operation of underground storage.

**Key words:** coal mine goaf; fractured coal and rock mass; underground storage; water injection test

## 1 前言

为实现“碳达峰, 碳中和”战略目标, 保障国家能源安全, 亟待加强矿井资源开发利用的相关研究。利用废弃矿井建造地下储库已经成为一种重要的地下储能形式, 近年来受到了广泛的关注<sup>[1-3]</sup>。这种储能方式通过利用盐水在地下的储存能力, 实现对

能源的高效储存与释放, 为电力系统的稳定运行和新能源的大规模利用提供了可行的解决方案。建设矿井浓盐水地下储库的关键问题之一为选址, 位址的选择应达到相应的地质和水文地质条件要求。尤其是利用矿井作为地下储存空间, 其中煤层、顶板、底板渗透特性, 对于确定地下储库的储存容量及其演化规律尤为关键。如果不能了解煤岩层的渗透特

[作者简介] 宋喜东(1988—), 男, 汉族, 甘肃静宁人, 工程师, 从事煤矿地质防治水等业务。

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(52079068); 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室(2022-KY-02)

[引用格式] 宋喜东, 王恩志, 刘晓丽, 等. 煤矿采空区破损煤岩层的渗透性研究[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(4): 32-37.

性,将难以保障储能系统的稳定性和安全性,增加储库服役风险。

地下水面以下岩土体的渗透特性一般采用抽水或压水试验研究,地下水面以上岩土体的渗透性常采用渗水、注水或压水等试验来完成<sup>[4]</sup>。对于采掘完成后的矿区来说,往往其环境水文地质条件发生剧烈的变化,尤其是在高压水头作用下,不论位于地下水面以上或在其下的裂隙煤岩体,其渗透性能必然受到较大的影响<sup>[5-6]</sup>。那么,通过钻孔压水试验揭示煤岩层顶底板岩层透水性能便是一种可靠方法。压水试验已应用到诸多领域,如抽水蓄能工程、矿山边坡稳定性、水工隧道工程<sup>[7-13]</sup>。近几年来,压水试验逐渐应用到矿井中,如在兖州矿区开展了断层岩体和完整底板岩体渗透性测试,效果良好,成功指导了煤底板水害防治工作<sup>[14-18]</sup>。但由于该测试方法环节繁多、工艺复杂,且技术要求极为严格,因此现场实测数据相对较少。尤其是对于利用采掘完成的矿井修建地下储库来说,扰动后的矿区煤岩层渗透性能的研究更是鲜为报道。因此有必要开展矿区煤岩层渗透特性研究。本文针对灵新煤矿拟建浓盐水地下储库库址范围内的煤岩层,开展现场原位压水试验,研究遗留煤柱、采区顶底板的渗透性能,为地下储库设计与安全运行提供依据。

## 2 矿区及地下储库概况

灵新煤矿位于宁夏回族自治区灵武市宁东镇(原磁窑堡镇)境内。矿井范围内地形沙丘广布,地形起伏不大,地形总的趋势南高北低,属低缓剥蚀残丘地貌,四周高,中间低,受水面积大。该地区属于旱半干旱大陆性气候,区内降雨量稀少。西天河是区内唯一常年地表水流,发源于五疙瘩之东麓,全长30余公里,河流自南而北纵贯井田至旧磁窑折向西流。河水大部分为沙漠凝结水(潜水)以下降泉的形式呈片状渗透补给,唯有雨季洪流时才有地表水汇集补给。

灵新煤矿于1985年12月开工建设,全矿井划分为7个采区,其中一、二、三、四、五为上山采区,六采区为下山采区,七采区为原磁窑堡镇下压覆资源。为了切实保护矿井水资源,提高矿区废水利用效率,通过对地下水库地层特征、地质构造、水文地质条件及储库密闭性分析,利用灵新煤矿下组煤14<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>、16<sup>#</sup>的保护煤柱和区段保护煤柱,以及采空区构成的天然封闭区间,在灵新煤矿一采区北翼(包括

L1614、L1615、L1616、L1814、L1815和L1816六个工作面采空区)建立浓盐水地下储库。一采区北翼煤层及上覆各个岩层的基本信息见表1。

表1 岩层块体力学参数表

岩层	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	密度/ kg/m <sup>3</sup>	摩擦角/ (°)	黏结力/ MPa	抗拉强度/ MPa
中砂	23	16	2 400	36	1	2
泥岩	5.5	1.8	2 200	20	1	2
中砂	23	16	2 400	36	1	2
粉砂	20	12	2 300	30	1	2
泥岩	5.5	1.8	2 200	20	1	2
砂质泥岩、粗砂	17	10	1 800	42	1	2
泥岩	5.5	1.8	2 200	20	1	2
粉砂	20	12	2 300	30	1	2
细砂	25	12	2 300	30	1	2
14煤	17	7.7	1 300	31	1	2
中砂	23	16	2 400	36	1	2
15煤	17	7.7	1 300	31	1	2
中砂	23	16	2 400	36	1	2
泥岩	5.5	1.8	2 200	20	1	2
16煤	17	7.7	1 300	31	1	2
底板	21	9.6	2 200	37	1	2

## 3 煤岩层压水试验

### 3.1 试验设备

钻孔压水试验是测定裂隙岩体的单位吸水量,并以其换算求出渗透系数,用以说明裂隙岩体的透水性和裂隙性及其随深度的变化情况,为论证坝基和库区岩体的完整性和透水程度,以及制定防渗措施和基础处理方案等提供重要依据。压水试验借助于专门的止水栓塞与孔壁密贴,把一定长度的试验段隔离开来,然后通过水泵用一定水头压力的水压入试验段内,使之从孔壁的裂隙向周围的岩体内渗透,经过一段时间后,其渗透水量最终趋向于一个稳定值,即可计算相应的透水率。

具体如图1所示,岩层渗透性测试系统由注浆泵、压力表、流量计、手动泵、注浆塞构成,注浆泵的作用是注水,加压;流量计的作用是测量实验室的累积流量和瞬时流量,为现场显示型流量计;手动泵的作用是给注浆塞的外腔注水加压,手动泵与注浆塞之间通过高压软管相连,手动泵加压至3 MPa时,注浆塞外腔膨胀并与钻孔周围岩壁紧密接触,密封钻

孔;注浆塞的作用是外腔膨胀与钻孔密封,注浆泵与注浆塞之间通过高压软管相连,然后向注浆塞内腔注水,进行实验。

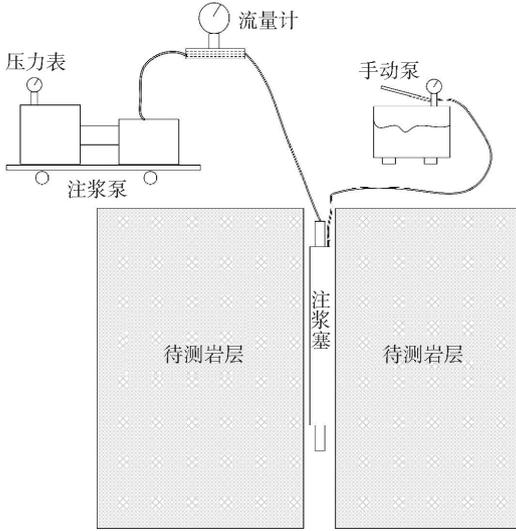


图1 注水实验设备示意图

### 3.2 试验设计

在根据井下坝体所处位置及巷道布置情况,确定在+1100 m 石门揭露的15#煤和16#煤作两个煤层及其顶底板的注水试验,在L1814机巷绕道处揭露的14#煤为14#煤层的注水试验,钻孔注水试验现场以及完成后的孔洞如图2所示,注水试验的平面布置如图3所示。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 煤层渗透性

图3所示为14#煤的渗透性曲线。分析图中的数值可知,在0~20 min,进行第一次注水试验,水压维持在4 MPa,注水流量经历先增大,后减小的发展模式,最大值为2.1 L/min,后期稳定在1.0 L/min。随后进行第二次注水试验,增加水压至5 MPa,此时注水流量随之快速增大,最大达到9.1 L/min。

图4所示为15#煤顶板1号和2号孔的渗透性曲线。分析图4(a)中的数据可知,在0~17 min,进行第一次注水试验,注水水压维持在4 MPa,在该区间,注水流量迅速增大,后逐渐稳定在2.1 L/min。随后进行第二次注水试验,增加注水压力至5 MPa,注水流量随之增大,并稳定在3.1 L/min。第三次注水试验时,增加注水压力至6 MPa,注水流量仍维持在3.1 L/min。在4~6 MPa 注浆压力下,15#煤顶板并没有发生贯通裂隙。图4(b)所示为15#煤顶板2号孔的渗透试验结果。结果显示,在0~37 min,进



(a) 煤层注水泵



(b) 封孔器及加气压设备



(c) 钻孔内部

图2 现场注水试验照片

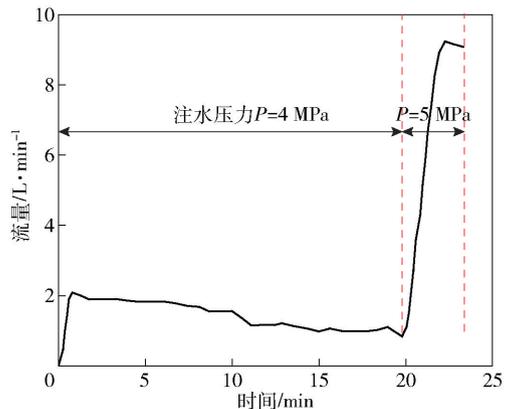
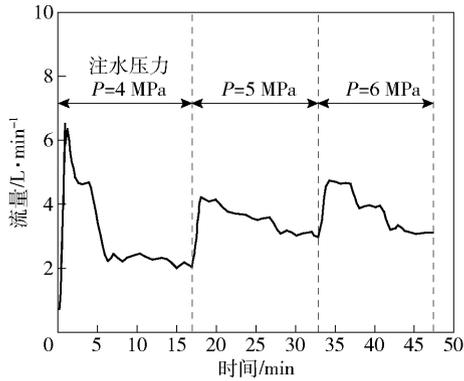


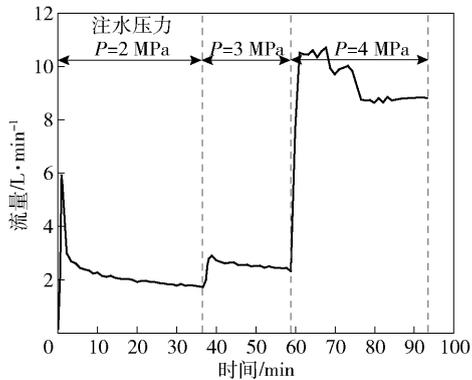
图3 14#煤柱渗透性曲线

行第一次注水试验,注水压力为2 MPa,注水开始时,注水流量迅速增大,最大值为6 L/min,随后逐渐

稳定在 1.76 L/min; 在 37 ~ 60 min 内, 进行第二次注水试验, 稳定时刻的注水流量在 2.4 L/min; 在 60 ~ 95 min 内, 进行第三次注水试验, 注水压力 4 MPa, 注水流量大幅度增加, 最大流量达 10.7 L/min, 稳定流量为 8.82 L/min。



(a) 15#煤顶板1号孔渗透性曲线

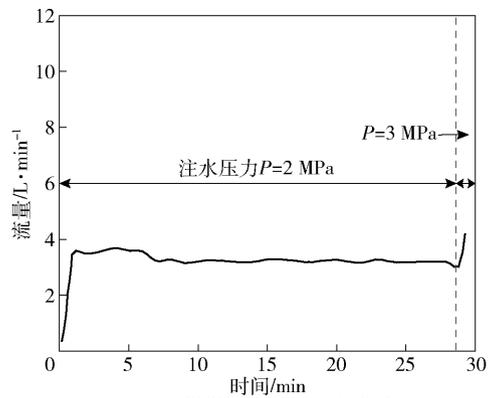


(b) 15#煤顶板2号孔渗透性曲线

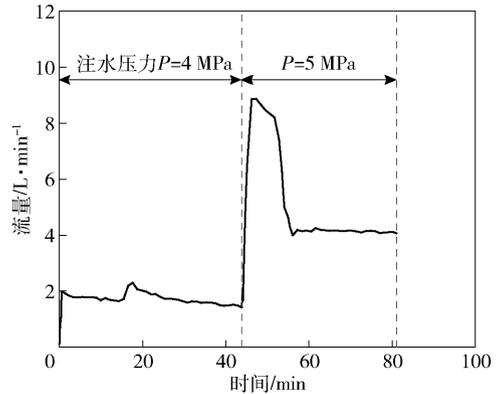
图4 15#煤顶板渗透性曲线

图5所示为15#煤煤柱1号和2号孔的渗透性曲线。如图5(a)所示, 在0~28 min, 进行第一次注水试验, 水压维持在2 MPa, 在水压下, 注水流量逐渐稳定在3.12 L/min。随后进行第二次注水试验, 注水压力为3 MPa, 试验结果显示注水流量首先有所减小, 随之快速增大, 注水流量达到了8.1 L/min。图5(b)所示为15煤煤柱2号孔的渗透试验结果。结果显示, 第一次注水试验0~43 min时, 注水压力为4 MPa, 注水流量逐渐稳定在1.51 L/min; 在43~80 min内, 进行第二次注水试验, 注水压力为5 MPa, 可以发现注水流量迅速增大, 最大值达到9.0 L/min, 后注水流量在56 min时达到稳定, 稳定时刻的注水流量为4.11 L/min。

图6所示为16#煤底板的渗透性曲线。分析图中的数据可知, 注水压力维持在6 MPa, 在0~2 min内, 注水流量迅速增大至10.1 L/min, 该流量维持



(a) 15#煤煤柱1号孔渗透性曲线



(b) 15#煤煤柱2号孔渗透性曲线

图5 15#煤煤柱渗透性曲线

3 min后, 注水流量开始下降, 并最终稳定的注水流量为2 L/min。

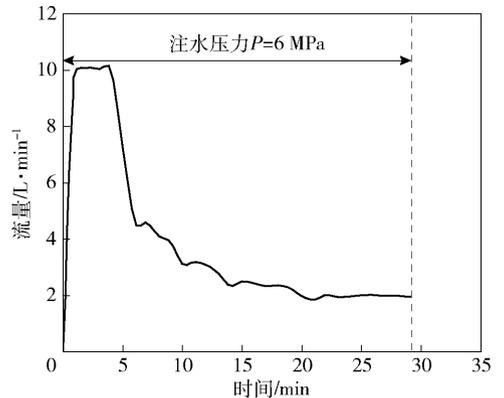


图6 16#煤底板渗透性曲线

图7所示为16#煤煤柱的渗透性曲线。分析图中的数据可知, 在0~19 min进行第一次注水试验, 注水压力为2 MPa, 在0~5 min内, 注水流量迅速增大至8.62 L/min, 该流量维持5 min后, 注水流量开始下降, 并最终稳定的注水流量为4.2 L/min。在19~44 min开始进行第二次注水试验, 注水压力为3 MPa。试验结果显示, 注水流量注浆增大, 最大值

达到了 10 L/min,并维持了 10 min 的时间,随后,注水流量开始下降,并最终稳定在 6.12 L/min。

大,注水流量在 7 L/min 以上。

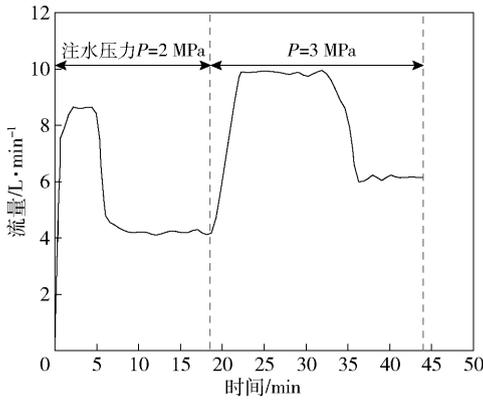


图 7 16#煤煤柱渗透性曲线

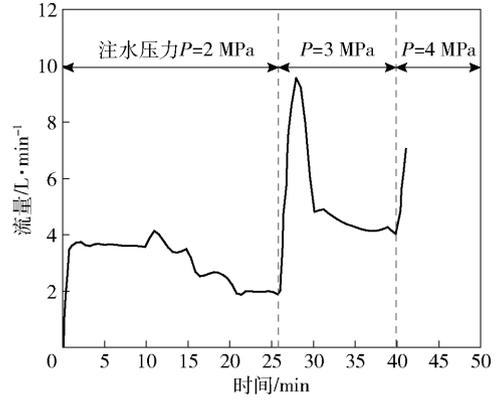


图 8 16#煤顶板渗透性曲线

图 8 所示为 16#煤顶板的渗透性曲线。分析图中的数据可知,在 0~26 min 进行第一次注水试验,注水压力为 2 MPa,注水流量迅速增大至 3.8 L/min,随后逐渐减小,稳定注水流量为 2.01 L/min。在 26~40 min,进行第二次注水试验,注水压力为 3 MPa。结果显示,注水流量迅速增大,在达到峰值后逐渐减小,后稳定为 4.2 L/min。在 40 min 后,开始第三次注水试验,注水流量迅速增

综合上述试验结果,煤岩层在不同注水压力下的稳定流量值见表 2。如表 2 所示,各煤层遗留煤柱的稳定流量值为 1.0~6.12 L/min,处于最上层的 14#煤稳定流量值最小,其值为 1.0 L/min 处于最下层的 16#煤稳定流量值最大,其值为 6.12 L/min。15#和 16#煤顶板稳定流量为 1.76~8.82 L/min,其中最大和最小稳定流量均发生在 15#煤 2 号孔处。此外,16#煤的底板稳定渗流量为 1.971.76~8.82 L/min。

表 2 各煤岩层稳定流量值

位置	14 煤煤柱	15 煤顶板 1 号	15 煤顶板 2 号	15 煤煤柱 1 号	15 煤煤柱 2 号	16 煤底板	16 煤煤柱	16 煤顶板
稳定流量值/L·min <sup>-1</sup>	1.0	2.1	1.76	3.12	1.51	1.97	4.2	2.01
		3.1	2.4		4.11		6.12	4.2
		3.1	8.82					

### 4.2 煤岩层透水性

根据表 2 试验结果,可以计算相应的煤岩层的透水性,分析其渗透性能。煤岩层透水率的计算按照下式进行:

$$q = \frac{Q}{LP} \quad (1)$$

式中:q 为试验段透水性(Lu);L 为试验段的长度

(m);Q 为试验段的计算流量(L/min);P 为试验段的试段压力(MPa)。

需要注意的是,计算流量 Q 的取值为流量稳定后对应的值,试验段的长度 L 应为钻孔深度减去封孔器深入孔内的深度及封孔器本身的长度。

根据上述公式,对各煤岩层的透水性进行计算,计算结果见表 3。

表 3 各煤岩层透水性

位置	14 煤煤柱	15 煤顶板 1 号	15 煤顶板 2 号	15 煤煤柱 1 号	15 煤煤柱 2 号	16 煤底板	16 煤煤柱	16 煤顶板
透水性(Lu)	0.046	0.07	0.13	0.23	0.076	0.042	0.261	0.162

岩石地基工程防渗标准一般在 1~5 Lu,特殊情况高标准可达 0.5 Lu,低标准为 10 Lu。跟据表 3 计算结果,灵新矿一采区 14#、15#、16#煤煤柱透水性为 0.046~0.261 Lu,顶板透水性为 0.07~0.162 Lu,

底板透水性为 0.042,其中底板透水性最低,为 0.042 Lu,16#煤煤柱透水性最大,为 0.261 Lu,远小于防渗标准。综上,灵新煤矿拟建地下储库矿区内煤岩层渗透性较差,隔水效果较好,满足工程防渗标

准,有利于修建地下储库。

## 5 结论

以灵新煤矿矿井浓盐水地下储库工程为背景,开展现场原位压水试验,对采掘完成的矿区煤岩层渗透特性进行研究,探明了矿区遗留煤柱、采区顶、低板的渗透特性和透水能力,研究结果为煤矿采空区地下空间的利用提供了一种新的思路与方法。本文的研究结果如下。

(1)各煤层遗留煤柱的稳定流量值为 1.0 ~ 6.12 L/min,14<sup>#</sup>煤稳定流量值最小,16<sup>#</sup>煤稳定流量值最大;15<sup>#</sup>和16<sup>#</sup>煤顶板稳定流量为 1.76 ~ 8.82 L/min,其中最大和最小稳定流量均发生在15<sup>#</sup>煤2号孔处;16<sup>#</sup>煤的底板稳定渗流量为 1.971.76 ~ 8.82 L/min。

(2)灵新煤矿14<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>和16<sup>#</sup>煤层煤柱透水率为 0.046 ~ 0.261 Lu,顶板透水率为 0.07 ~ 0.162 Lu,底板透水率为 0.042,其中底板的透水率最低,为 0.042 Lu,16<sup>#</sup>煤煤柱透水率最大,为 0.261 Lu。灵新煤矿拟建地下储库矿区内煤岩层渗透性较差,隔水效果较好,满足工程防渗标准,有利于修建煤矿采空区地下储库。

### [参考文献]

- [1] 王双明,刘浪,朱梦博,等. “双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路[J]. 煤炭学报, 2024: 1-21.
- [2] 谢和平,侯正猛,高峰,等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术:原理、现状及展望[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 965-972.
- [3] 于欣平. 废弃矿井压缩空气储能硐室变形渗漏机制研究[D]. 山东大学, 2024.
- [4] 王锦国,韩智颖,程伟等. 基于双重介质渗流-应力耦合模型的高压压水试验渗透参数反演[J]. 长江科学院院报, 2024: 1-8.
- [5] 蔡行行. 特厚煤层分层开采采空区下伏煤层渗透率分

- 布规律研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2023.
- [6] 陈天赐. 基于水文地质参数演化的矿井涌水量动态计算方法与应用[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.
- [7] 弓昊,李铮,胡昊宇. 基于赵固二矿煤岩损伤程度范围确定及渗透率演化规律研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(1): 013023.
- [8] 李耀谦,王晓东. 不同应变率下煤的动力学特征研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(4): 93-97.
- [9] 汪旭涛,刘杰,郑德斌,等. 等效连续介质模型在某裂隙岩质边坡渗流稳定性分析中的应用[J]. 工程勘察, 2012, 40(6): 27-30+36.
- [10] 彭佩. 基于压水试验的岸坡岩体渗透性分区初探[J]. 山西水利, 2023(10): 27-31.
- [11] 胡代钊. 东津水库坝肩岩体压水试验渗透系数分析[J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(4): 100-103.
- [12] 于占福. 汕头高铁站深基坑多层承压水抽水试验及数值模拟研究[J]. 工程勘察, 2023, 51(5): 40-47.
- [13] 蒋中明,冯树荣,傅胜,等. 某水工隧洞裂隙岩体高水头作用下的渗透性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 673-676.
- [14] 杨志斌. 煤层底板突水灾害动水快速截流机理及预注浆效果定量评价[D]. 北京:煤炭科学研究总院, 2022.
- [15] 董书宁,柳昭星,王皓,等. 导水断层破碎带注浆浆液扩散机制试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 174-183.
- [16] 丁亚恒,李少华,陈卫. 地面定向顺层钻孔注浆改造技术在新桥煤矿水害治理中的应用[J]. 能源与环保, 2023, 45(12): 108-114+120.
- [17] 杨磊. 基于多物理场耦合的采空区底板应力渗流场变化分析[D]. 南宁:广西大学, 2023.
- [18] 刘小明. 复杂地质条件下煤矿水害形成机理与防控技术研究[D]. 西安:西安科技大学, 2021.