

DOI:10.11918/202311079

煤矿地下水库破碎岩体压实全过程储水性能与演化机制

张 华^{1,2}, 张 冰^{2,3}, 张 锁^{3,4}, 李 鹏³, 张 勇³, 王路军³

(1. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061;
3. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 102209; 4. 神华新街能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200)

摘要: 为研究冒落带破碎岩体在上覆岩层压力作用下的动态储水性能及演化机制, 采用自主研发的可视化装置, 对粗砂岩、砂质泥岩和泥岩的破碎岩样进行了侧限压实试验, 获取了压实全过程的孔隙率、碎胀系数和空间演化图像。试验结果表明: 破碎岩体压实过程可分为大空隙压实、小空隙压实、破碎后压实和压实强化 4 个阶段, 其中岩体储水空间变化主要出现在第 1、3 阶段。由于岩体强度及遇水软化特性差异, 3 类破碎岩体包含了不同的压实过程及分段特征, 进而导致砂质泥岩的储水空隙分别是粗砂岩和泥岩的 3.75 和 7.5 倍。随着粒径的增大, 破碎岩体稳定性提高, 粗砂岩、泥岩、砂质泥岩的空隙率分别增大 0.20、0.09 和 0.04。试验结果可采用颗粒力学进行解释, 岩体的压实过程本质上是松散岩块之间的滑移、挤压和力链形成, 岩性、覆岩压力、颗粒级配的变化导致了 3 个阶段的发生次序与颗粒体系接触刚度的差异, 进而导致岩体储水系数差异。研究成果可为煤矿地下水库储水能力准确评估提供理论支撑。

关键词: 地下水库; 破碎岩体; 压实过程; 覆岩压力; 颗粒级配; 储水性能

中图分类号: TD74 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2025)03-0081-09

Water storage performance and evolution mechanism of compacted fractured rock mass in coal mine underground water reservoirs

ZHANG Hua^{1,2}, ZHANG Bing^{2,3}, ZHANG Suo^{3,4}, LI Peng³, ZHANG Yong³, WANG Lujun³

(1. China Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China;

2. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China;

3. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China;

4. Shenhua Group Xinjie Energy Co., Ltd., Ordos 017200, Inner Mongolia, China)

Abstract: To study the dynamic water storage performance and evolution mechanism of fractured rock mass in the caving zone under overburden pressure, lateral compaction tests were performed on fractured rock samples of coarse sandstone, sandy mudstone, and mudstone with a self-developed visualization device. The porosity, bulking coefficient, and spatial evolution images of the entire compaction process were obtained. The experimental results indicated that the compaction process of fractured rock mass can be divided into four stages: large gap compaction, small gap compaction, post failure compaction, and compaction strengthening. Among them, the changes in water storage space of rock mass mainly occur in the first and third stages. Due to differences in rock mass strength and water softening characteristics, the three types of fractured rock contain different compaction processes and segmented characteristics, resulting in water storage spaces in sandy mudstone being 3.75 and 7.5 times larger than those in coarse sandstone and mudstone, respectively. As particle size increases, the stability of the fractured rock mass improves, with porosity increasing by 0.20, 0.09, and 0.04 for coarse sandstone, sandy mudstone, and mudstone, respectively. The experimental results can be well explained by particle mechanics, where the compaction process of rock mass is essentially characterized by the formation of slip, compression, and force chains among loose rock blocks. Variations in lithology, overburden pressure, and particle size distribution result in differences in the order and process of occurrence of the three stages, which in turn leads to differences in the water storage characteristic of the rock mass. The research results can provide theoretical support for the accurate evaluation of water storage capacity of underground reservoirs in coal mines.

Keywords: underground reservoirs; broken rock mass; compaction process; overburden pressure; particle grading; water storage characteristics

收稿日期: 2023-11-27; 录用日期: 2023-12-27; 网络首发日期: 2024-12-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241211.1031.002>

基金项目: 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金(WPUKFJJ2019-07); 国家能源集团科技创新项目(GJNY-21-42, GJNY-21-129); 神华集团科技创新项目(SHGF-16-19)

作者简介: 张 华(1983—), 男, 硕士, 高级工程师

通信作者: 张 冰, zhangbsdu@163.com

煤矿地下水库技术解决了煤炭安全高效开采与地下水资源保护之间的矛盾,是实现煤炭绿色开采的重要技术途径^[1-3]。采空区破碎岩体孔隙裂隙是煤矿地下水库主要储水空间^[4-5]。然而,冒落带岩体在长期上覆岩层压力作用下逐渐压实,其动态变化的储水性能成为准确评价地下水库储水能力的关键因素^[6]。

针对地下水库动态储水性能,文献[7]对弹性模量、上覆岩层应力、泊松比、上覆岩层密度等进行理论分析,建立了考虑有效应力影响的煤矿地下水库储水系数数学模型;文献[8]认为煤矿地下水库的储水空间是由垮落带和裂隙带构成,相应的储水系数等于垮落带孔隙率或裂隙带孔隙率;文献[9]给出了储水系数与采空区破碎岩体碎胀系数二者间的数学关系式;文献[10]认为煤矿地下水库的主要储水空间为垮落带与块体铰接带之间的空隙和离层空间,通过数值模拟研究了地下水库储水系数时空演化规律;文献[11]分别构建了水平地下水库和倾斜地下水库的储水系数计算模型,基于室内试验分析了破碎岩体的最小空隙率。

岩体碎胀特性决定其储水性能。国内外学者基于碎胀系数与储水性能之间的理论关系,对压实作用下破碎岩体的碎胀特性开展了系列研究。文献[12]选取某矿区典型顶板砂岩,考虑垮落区破碎岩石粒径的分布特征和受力状态对碎胀系数的影响规律;文献[13]对软弱破碎围岩进行了二次成岩压实,分析了压实破碎阶段的力学机制;文献[14-15]对矸石开展单轴压缩试验和破碎后压实试验,探讨了压实过程中碎胀系数、压实度与应力的关系;文献[16]研究了采空区垮落岩体强度与碎胀系数的关系,明确了两者之间的数学表达式;文献[17]采用数学方法建立垮落岩体碎胀系数计算模型;文献[18-19]采用室内试验与理论分析相结合的方法,探讨了非饱水状态下煤岩体强度、粒径级配与碎胀系数的定量关系;文献[20]研究发现采空区冒落岩体碎胀特性具有明显分区性;文献[21]对单一工作面开采形成的老采空区覆岩结构形态及空洞分布规律进行了研究;文献[22]探讨了采空区垮落岩体碎胀特性分区特征,并推导出相应碎胀系数公式;文献[23]基于采空区垮落岩体碎胀特性分区特征,推导出相应的碎胀系数公式。

随着研究的不断深入,学者们发现不同性质岩体的碎胀特性差异明显。如文献[24-25]研究了煤、页岩和砂岩 3 种岩样压实过程中应力-应变关系,发现在压实过程中各岩样应力与应变之间呈不同的指数关系;文献[26]对顶板砂岩、砂质泥岩和

泥岩进行破碎并开展压实试验,分析了岩石强度、块径、覆岩压力对碎胀特性的影响,发现碎胀系数随块径增大而增加,可以采用对数关系描述。

上述研究主要聚焦于无水状态下单一岩性岩体的碎胀储水性能。研究表明,采空区破碎岩体在自重和上方岩层运动载荷作用下逐渐压实,碎胀与压实变形主要与覆岩压力、垮落岩体块度等因素密切相关,如果有地下水作用还可能发生崩解和固结^[27]。基于上述关键要素,开展饱水破碎岩体在整个压实过程中的储水性能演化规律与机制研究具有很强的现实意义。因此,本文针对粗砂岩、砂质泥岩和泥岩等典型岩性,开展了以压实荷载、颗粒级配等核心要素为变量的饱水破碎岩体侧限压实试验,研究成果可为煤矿地下水库储水量预测提供理论依据。

1 试验

1.1 试验仪器

自主研发了流固耦合岩体可视化侧限压实装置,可真实模拟冒落带破碎岩体的赋存状态,获取破碎岩体储水性能和储水空间演化图像,如图 1 所示。装置主要包含流固耦合压头、可视化容器、恒速恒压泵、压力机和摄像机。可视化容器腔体尺寸为 $\phi 70 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,采用亚克力玻璃材质,内壁设有高强、高透光柔性固态缓冲膜,可防止岩块尖锐边角产生的集中应力破坏容器,并可配合摄像机获取碎胀体空隙结构演化图像。流固耦合压头采用同心卡套与压力机耦合,设计有注-排水通道与恒速恒压泵连接,可实现破碎岩体轴向应力和水压加载^[28]。加载应力和轴向位移由压力机控制并同步采集。

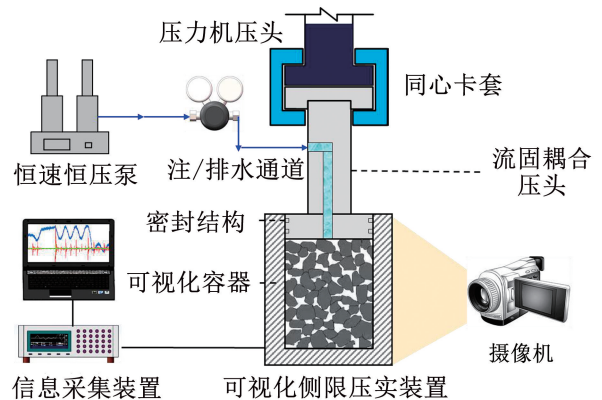


图 1 流固耦合岩体可视化侧限压实装置

Fig. 1 Visualized confined compression device for fluid-solid coupling rock

1.2 试样制备

模型试验发现,采用 1:100 几何比尺时,90% 的垮落带岩体块度为 $0 \sim 3.5 \text{ cm}$ ^[29]。为准确模拟冒落

带岩体所处的松散破碎状态,本试验采用相同的几何比尺,基于空间体系几何相似原理,对岩样进行破碎加工,并在以上粒径附近制作了多种无规则形状破碎岩块,如图2所示。试验时仅需按照设计粒径级配将不同粒径碎胀体充分混合。



图2 不同颗粒级配破碎岩样

Fig.2 Fractured rock mass with different particle sizes

1.3 试验设计

采空区垮落岩体的储水性能主要受岩石岩性、上覆岩层压力和岩体破碎程度的影响,本文对以上因素进行统筹考虑^[27]。基于内蒙古东胜煤田上湾煤矿地质调查资料,选取粗砂岩、砂质泥岩及泥岩3类典型岩性岩石,具体参数如表1所示。选取上湾煤矿某主采煤层的采空区进行研究,其埋深-56.58~-245.29 m,上覆岩层压力为1~4 MPa。依据可视化容器腔体尺寸,试验中压实荷载设置为5、10、15 kN,可分别模拟1.3、2.6、3.9 MPa覆岩压力。采用不同颗粒级配表征不同垮落岩体块度,并根据文献[30]中的方法将碎岩粒径级配分为5个水平,具体参数如表2所示。通过先导试验发现60 min左右破碎岩体能基本达到压实状态,故压实时间确定为60 min。

覆岩压力作用下破碎岩体的储水性能可采用压实度、空隙率、碎胀系数等参数进行表征。由于覆岩应力的作用,破碎岩体储水结构是动态变化的,这些参数也是动态变化的。

表1 上覆岩层物理力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of overburden rock

岩性	密度/ (g·cm ⁻³)	单轴抗压 强度/MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦 角/(°)
粗砂岩	2.61	33.1	18.4	0.23	25.4	28.7
砂质泥岩	2.69	41.8	22.3	0.25	28.3	33.8
泥岩	2.52	35.2	19.1	0.21	21.6	19.1

表2 压实试验具体变量参数方案

Tab.2 Specific variable parameter for compaction test

序号	压实荷载/kN	碎岩粒径级配	压实时间/min
1	5	2~3 cm 为主	60
2	10	2~3 cm 为主	60
3	15	2~3 cm 为主	60
4	15	0~1 cm 为主	60
5	15	1~2 cm 为主	60
6	15	2~3 cm 为主	60
7	15	3~4 cm 为主	60
8	15	>4 cm 为主	60

压实度指采空区跨落岩体在自身重力和外荷载压实作用下体积减小程度,计算公式^[31]为

$$K = \frac{V_0}{V'} \quad (1)$$

空隙率指采空区跨落岩体的堆积体积中空隙体积分占的比例,计算公式为

$$P = \frac{V' - V_0}{V'} = 1 - \frac{V_0}{V'} = 1 - K \quad (2)$$

碎胀系数指岩石破碎后体积与岩石破碎前处于整体状态下的体积之比,计算公式为

$$K_1 = \frac{V'}{V_0} \quad (3)$$

式中: P 为孔隙率, K 为压实度, K_1 为碎胀系数, V_0 为岩石破碎前处于整体状态下的体积, V' 为破碎岩体在压实过程中的堆积体积。

1.4 试验步骤

- 1) 将上述试样采用无规则多次充填方式置入可视化容器,记录碎石堆叠高度;
- 2) 向可视化容器内注入定量蒸馏水,保证液面高度与破碎岩体高度平齐;
- 3) 采用位移控制方式将流固耦合压头推移至液面高度,然后以等速力0.1 kN/s的加载速度施加轴向力;
- 4) 试验过程实时记录恒速恒压泵的进出水量与岩体压实情况图像;
- 5) 到达设计压实时间后停止加载,并完全卸载轴向力;
- 6) 重复以上步骤,依次完成其他试验。

2 试验结果与分析

2.1 岩体岩性对储水性能影响

试验获取了压实全过程中各类破碎岩样的应力、应变随时间的演化曲线和压实图像,如图3和图4所示。可以发现,破碎岩体在压实应力下呈现明显的分段性。依据各阶段的岩体变形特征及原因,可分为以下4个阶段:

大空隙压实阶段(阶段I)。在该阶段,破碎岩体应变率迅速增大,且保持较高的应变增长速率。

其原因主要是,在压实荷载作用下,块体之间发生相对运动,岩间大空隙被迅速压实。所有破碎岩体均包含该阶段。

小空隙压实阶段(阶段 II)。在该阶段,破碎岩体应变持续增大,但应变增长速率大大降低。其原因主要是,大块体之间的相对运动已结束,仅部分小粒径碎岩在覆岩压力作用下发生变形、破碎与重组,岩间小空隙被进一步压实、充填。所有破碎岩体均包含该阶段。

破坏后压实阶段(阶段 III)。在该阶段,破碎岩体应变出现二次骤增,且保持较高的应变增长速

率,与阶段 I 极为相似。其原因是部分岩块在压实荷载长期作用下达到屈服极限,出现大变形、破碎、重组过程,岩块破坏后产生的小颗粒岩屑进一步填充岩间的储水空隙空间。仅有部分遇水软化的岩体会出现该阶段。

压实强化阶段(阶段 IV)。该阶段,破碎岩体应变缓慢增长并逐渐趋于平稳。其原因是,碎岩岩样在覆岩压力荷载长期作用下已达到稳定状态,仅小部分岩样之间还存在微小形变。所有破碎岩体在长期荷载作用下均会进入该阶段。

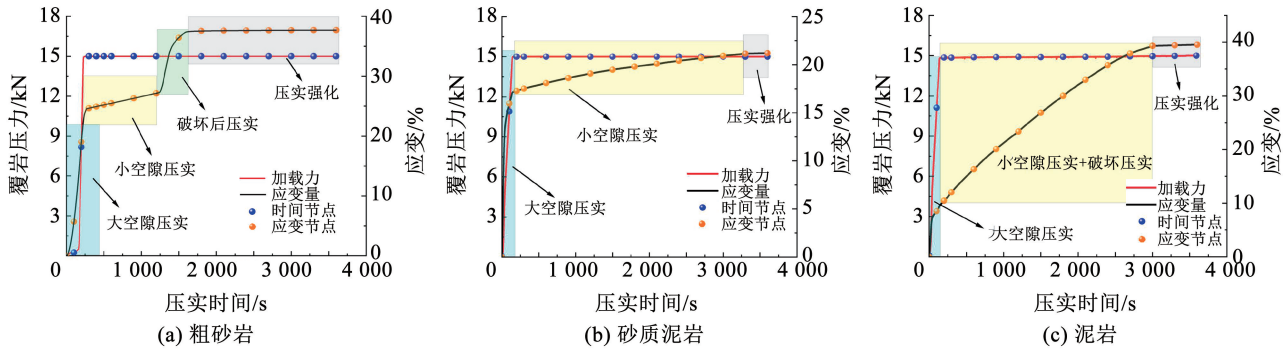


图 3 压实全过程中各类岩样的应力-应变-时间演化曲线

Fig. 3 Evolution curves of stress-strain-time of various fractured rock samples during compact process



图 4 压实全过程中 3 类破碎岩体压实图像

Fig. 4 Compaction images of three types of fractured rock mass samples throughout compact process

在本试验中,3类岩性破碎岩体的压实变形过程呈现出完全不同的分段特征。结合图3~6进行分析,粗砂岩的压实过程可依次划分为I、II、III、IV 4个阶段,是一种非常典型的压实变形过程。砂质泥岩仅包含了I、II、IV 3个阶段,其原因为岩体强

度较高,没有出现岩体的破坏与重组。泥岩的压实过程包含了大空隙压实、小空隙压实、破坏压实和压实强化等过程,但仅呈现为3个阶段,其原因为岩体的小空隙压实过程与破坏压实过程是同步进行的。

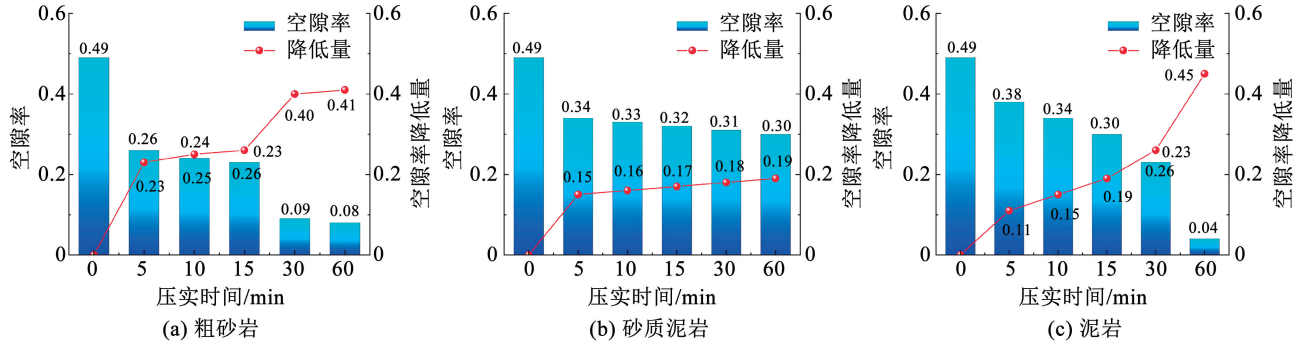


图5 3类破碎岩体孔隙率

Fig. 5 Porosity of three types of fractured rock samples

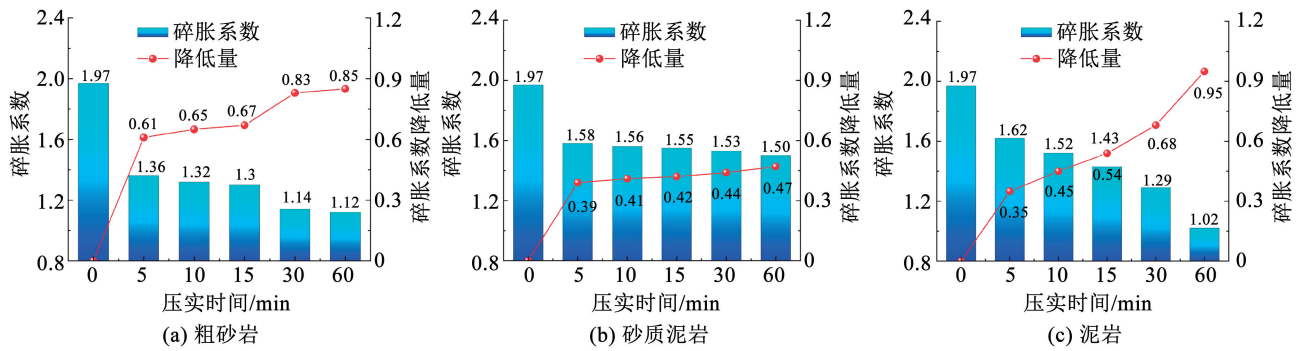


图6 3类破碎岩体碎胀系数

Fig. 6 Bulking coefficient of three types of fractured rock samples

2.2 覆岩压力对储水性能影响

试验中获取了不同覆岩压力条件下3类破碎岩体的空隙率与碎胀系数,如图7、8所示。在任何压实应力下,砂质泥岩的空隙率与碎胀系数明显大于

粗砂岩和泥岩。以覆岩压力15 kN为例,粗砂岩、泥岩压实后的空隙率分别为0.08、0.04,而砂质泥岩的空隙率高达0.30。可见,砂质泥岩相较于其他两者具有更好的储水性能。

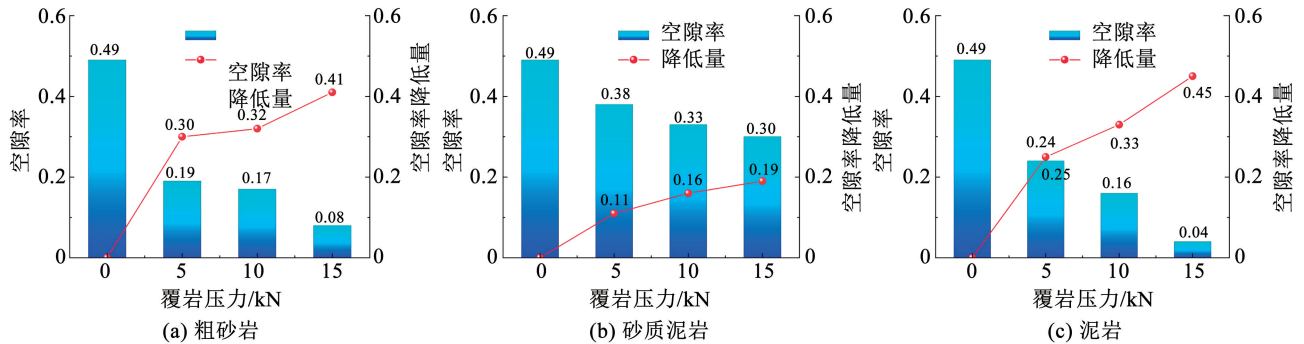


图7 不同覆岩压力作用下各类碎岩空隙率变化

Fig. 7 Variation of porosity in various fractured rock samples under different overburden pressures

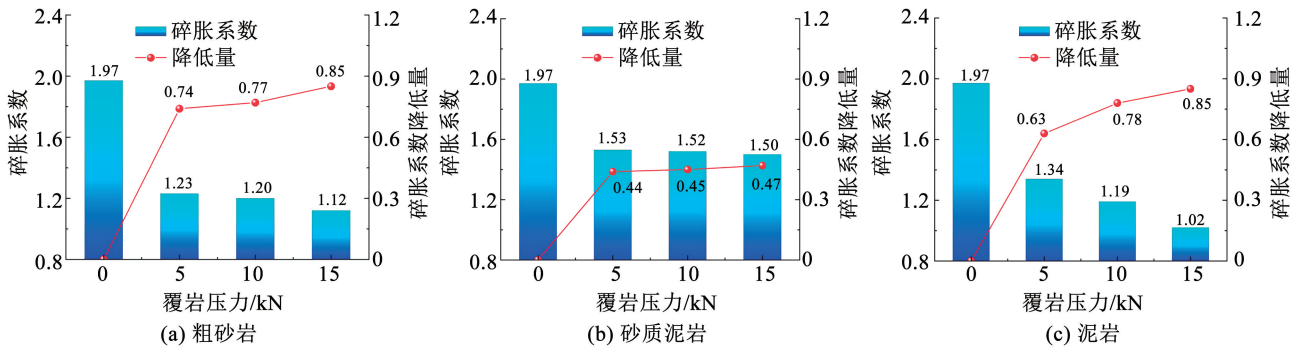


图 8 不同覆岩压力作用下各类碎岩碎胀系数变化

Fig. 8 Variation of bulking coefficient in various fractured rock samples under different overburden pressures

在压实过程中,随着覆岩压力的增大,3类破碎岩体的空隙率、碎胀系数均呈减小趋势。此外,随着覆岩压力的增加,不同岩性破碎岩体的孔隙率与碎胀系数变化率差异性较大。在覆岩压力由 5 kN 增至 15 kN 后,粗砂岩、砂质泥岩和泥岩的空隙率分别下降了 0.11、0.08、0.20。可见,在压实情况下,与砂质泥岩相比,粗砂岩和泥岩受到覆岩压力因素影响较大,岩间储水空隙空间更易被压实充填,综合储水性能较差。其原因为粗砂岩和泥岩的强度较低,部分岩块会在压实应力作用下发生破碎,而砂质泥岩强度较大,岩块结构更加稳定。

值得注意的是,随着覆岩压力的增加,强度较高的泥岩比强度较低的粗砂岩的空隙率变化更大:在 5 kN 覆岩压力下,粗砂岩的空隙率碎和胀系数均小于泥岩的,但是 15 kN 覆岩压力下,粗砂岩的空隙率和碎胀系数均大于泥岩的。其原因为泥岩饱水后软化现象严重,当覆岩压力处在较大的水平时,饱水软化严重的泥岩会被进一步压实^[32-34]。

2.3 颗粒级配对储水性能影响

在压实过程中,随着粒径的增大,3类破碎岩体的空隙率与碎胀系数均呈增大趋势,如图 9、10 所示。其中,粗砂岩受影响程度最大,空隙率与碎胀系数分别增大了 0.20、0.25;砂质泥岩次之,空隙率与碎胀系数分别增大了 0.09、0.11;泥岩受影响程度最小,空隙率与碎胀系数分别增大了 0.04、0.05。原因是由于砂质泥岩强度较高,其大粒径岩块和小粒径岩块都不易被进一步破碎压实;对于强度次之的粗砂岩,其大粒径岩块完整性较好,不易被破碎压实,但小粒径岩块的完整性较差,容易被破碎压实;而泥岩饱水强度最小,无论是大粒径还是小粒径岩块均会被破碎压实,因此受颗粒级配影响不大。

此外,随着粒径的增大,3类破碎岩体的空隙率与碎胀系数的下降量均呈减小趋势。以粗砂岩为例,在覆岩压力作用下,0~1 cm 岩样空隙率降低了 0.42,而 >4 cm 岩样储水空隙率仅降低了 0.22。原因是小粒径破碎岩块不稳定,较易在压实过程中产生滚动与滑动。

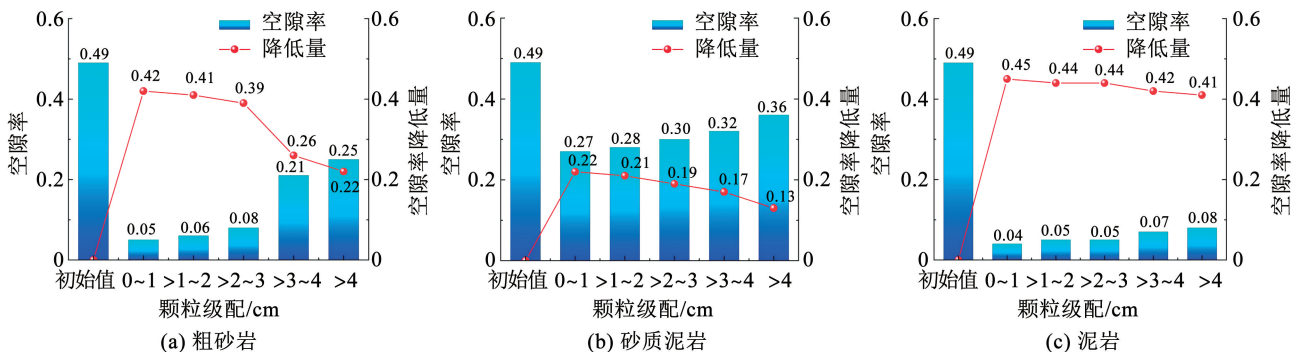


图 9 不同颗粒级配各类碎岩空隙率变化

Fig. 9 Variation of porosity in various fractured rock samples with different particle gradations

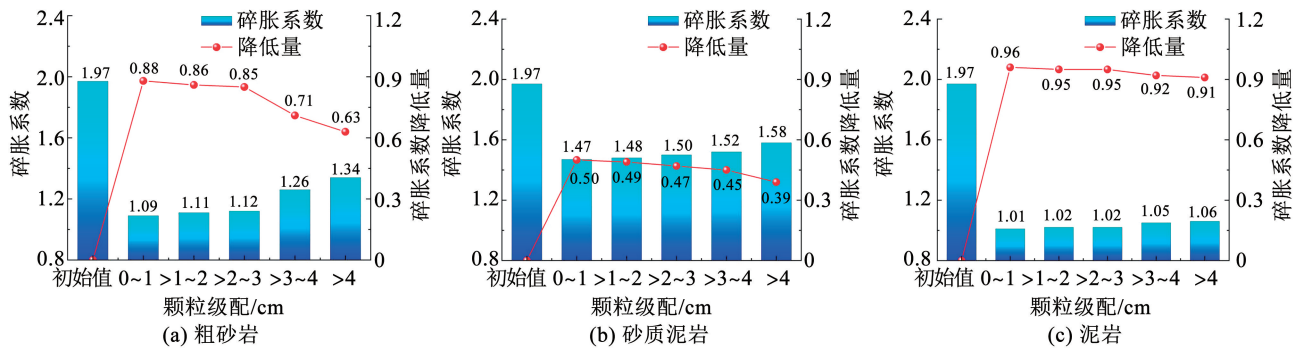


图 10 不同颗粒级配各类碎岩碎胀系数变化

Fig. 10 Variation of bulking coefficient of various fractured rock samples with different particle gradations

2.4 储水性能演化机理分析

松散岩块破碎压实过程可采用颗粒力学理论进行分析。松散岩块之间的运动状态可分为两种类型,第1种是在压实初始阶段,岩块颗粒间的接触较为松散,在覆岩压力作用下块体之间发生滑移。第2种是当块体颗粒在覆岩压力作用下密集排布时,若干块体颗粒间紧密结合、相互挤压会形成较为稳定的承载单元,称之为力链。随着外力的不断增大,颗粒达到自锁状态,力链从“弱力链”向“强力链”过渡,最终形成稳定的力链承载结构,如图 11 所示。整个颗粒体系的变形能力可采用接触刚度 k_n 表征,接触刚度 k_n 越大,在相同荷载作用下颗粒体系的变形越小。依据经典的 Hertz-Mindlin 模型,当把所有颗粒看做球形时, k_n 表达式^[35-36]为

$$k_n = \frac{8}{\mu} \sqrt{\frac{R}{2}} \delta \quad (4)$$

式中: k_n 为颗粒体系接触刚度, R 为颗粒半径, μ 为材料泊松比, δ 为颗粒间的嵌入深度。

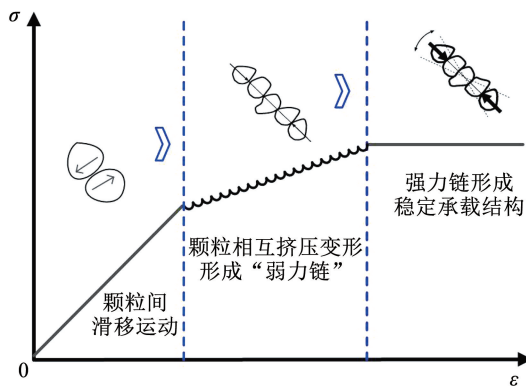


图 11 岩块颗粒力链结构形成示意

Fig. 11 Schematic diagram of the formation of force chain structure in rock blocks

本文中岩体岩性对储水性能影响可采用上述理论进行解释。岩性的变化导致了颗粒间嵌入深度 δ 与摩擦系数的差异,进而导致颗粒间滑移、挤压和力链形成等出现次序差异以及对对应过程中岩体压缩量

的差异。在覆岩压力作用初期,3类岩体的块体之间发生滑移,此时由于还没有形成力链,颗粒间嵌入深度 δ 较小,因而接触刚度 k_n 较小,块体压缩量快速增大。在覆岩压力作用后期,块体之间紧密接触并相互挤压,力链结构逐渐形成,颗粒间嵌入深度 δ 增大,因而接触刚度 k_n 增大,块体压缩量增长速度逐渐减缓。在该阶段,砂质泥岩的岩性稳定,其强力链结构逐步形成并趋于稳定;泥岩的黏聚力较小,在力链形成过程中颗粒不断软化破坏,无法形成稳定的嵌入深度,颗粒间接触刚度 k_n 持续处于低值,在覆岩压力的作用下变形最大,储水效果最差;粗砂岩的饱水强度低于砂质泥岩,在压实荷载作用下部分岩块达到屈服极限,出现二次破碎现象,因此粗砂岩在压实后期出现了第二次的滑移-形成力链的过程。

颗粒级配及覆岩压力对岩体碎胀储水性能的影响规律可采用式(4)进行解释。颗粒级配直接决定了颗粒半径 R ,岩体颗粒半径 R 越大,颗粒间接触刚度 k_n 越大,即在相同压力作用下的变形越小,因而岩块块度越大,空隙率和储水系数越大。而覆岩压力的变化则直接决定了颗粒间的接触力,接触力越大,颗粒间变形越大,因而覆岩压力越大,空隙率和储水系数越小。

3 结论

1) 破碎岩体在压实应力下可分为大空隙压实、小空隙压实、破碎后压实和压实强化 4 个阶段,其中,储水特性变化主要来源于大空隙压实和破碎后压实过程。粗砂岩的压实过程包含上述全部 4 个阶段;砂质泥岩没有在压实作用下发生破坏,压实过程仅包含了 3 个阶段;泥岩的小空隙压实过程与破坏压实过程是同步进行的,仅呈现为 3 个阶段。

2) 随着覆岩压力的增大,3类破碎岩体的空隙率、碎胀系数均呈减小趋势。与砂质泥岩相比,粗砂岩和泥岩受到覆岩压力因素影响更大,岩间储水空隙更易被压实充填。本试验中,砂质泥岩的空隙率

与碎胀系数是粗砂岩和泥岩的 3.75 和 7.5 倍。

3) 随粒径的增大,破碎岩体稳定性提高,3 类破碎岩体的空隙率与碎胀系数均呈增大趋势。其中,粗砂岩、泥岩、砂质泥岩的空隙率分别增大 0.20、0.09 和 0.04,碎胀系数分别增大 0.25、0.11 和 0.05。

4) 基于颗粒力学理论,岩体的压实过程可被简化为松散岩块之间的滑移、挤压和力链形成。岩性、覆岩压力、颗粒级配的变化导致了 3 个阶段的发生次序与颗粒体系接触刚度 k_n 的差异,进而导致岩体储水系数差异。

参考文献

- [1] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2014.1661
- [2] COLAS E, KLOPRIES E M, TIAN D Y, et al. Overview of converting abandoned coal mines to underground pumped storage systems: focus on the underground reservoir[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 109153. DOI:10.1016/j.est.2023.109153
- [3] ANDRÉS C, ORDÓÑEZ A, ALVAREZ R. Hydraulic and thermal modelling of an underground mining reservoir[J]. Mine Water and the Environment, 2014, 36(1): 24. DOI:10.1007/978-3-642-32408-6_93
- [4] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079
GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in china[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.0917
- [5] SONG Hongqing, XU Jianjian, FANG Jie, et al. Potential for mine water disposal in coal seam goaf: investigation of storage coefficients in the shandong mining area[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118646. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118646
- [6] WANG Qiqing, LI Wenping, LI Tao, et al. Goaf water storage and utilization in arid regions of Northwest China: a case study of Shennan coal mine district[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202: 33. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.08.123
- [7] 方杰, 宋洪庆, 徐建建, 等. 考虑有效应力影响的煤矿地下水库储水系数计算模型[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3750
FANG Jie, SONG Hongqing, XU Jianjian, et al. Storage coefficient calculation model of coal mine underground reservoir considering effect of effective stress[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3750. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.SH19.1147
- [8] 陈苏社. 神东矿区井下采空区水库水资源循环利用关键技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2016
CHEN Sushe. Research on the key technology of water resources recycling utilization in the underground goaf reservoir in shandong mining area [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016
- [9] 李全生, 鞠金峰, 曹志国, 等. 基于导水裂隙带高度的地下水库适应性评价[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2116
LI Quansheng, JU Jinfeng, CAO Zhiguo, et al. Suitability evaluation

- of underground reservoir technology based on the discriminant of the height of water conduction fracture zone[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 2116. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1871
- [10] 庞义辉, 李全生, 曹光明, 等. 煤矿地下水库储水空间构成分析及计算方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 557
PANG Yihui, LI Quansheng, CAO Guangming, et al. Analysis and calculation method of underground reservoir water storage space composition[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 557. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0417
- [11] FAN Kaifang, XIE Peng, LIU Zichang. Analytical method of reservoir capacity of underground reservoir in coal mine: a case study[J]. Water Supply, 2023, 23(2): 581. DOI:10.2166/ws.2022.439
- [12] 张俊文, 王海龙, 陈绍杰, 等. 大粒径破碎岩石承压变形特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1000
ZHANG Junwen, WANG Hailong, CHEN Shaojie, et al. Bearing deformation characteristics of large-size broken rock[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1000. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1024
- [13] 王平, 余伟健, 冯涛, 等. 软弱破碎围岩压实-固结二次成岩机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1884
WANG Ping, YU Weijian, FENG Tao, et al. Experimental study on second diagenesis by compaction and consolidation of soft and broken rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(8): 1884. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2018.0185
- [14] 张吉雄, 李猛, 邓雪杰, 等. 含水层下矸石充填提高开采上限方法与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 220
ZHANG Jixiong, LI Meng, DENG Xuejie, et al. Method and application of extending mining upper limit under aquifer by gangue backfill mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(2): 220. DOI:10.13545/j.issn1673-3363.2014.02.009
- [15] ZHANG Jixiong, LI Meng, LIU Zhan, et al. Fractal characteristics of crushed particles of coal gangue under compaction[J]. Powder Technology, 2017, 305: 12. DOI:10.1016/j.powtec.2016.09.049
- [16] DAS S K. Observations and classification of roof strata behaviour over longwall coal mining panels in India[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 585. DOI:10.1016/S1365-1609(99)00123-9
- [17] PALCHIK V. Bulking factors and extents of caved zones in weathered overburden of shallow abandoned underground workings [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 79: 227. DOI:10.1016/j.ijrmms.2015.07.005
- [18] 梁冰, 尉达, 汪北方, 等. 煤矿地下水库岩石承载变形与时效特性实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(6): 479
LIANG Bing, YU Da, WANG Beifang, et al. Experimental study on rock bearing deformation and time-effect characteristics of underground reservoir in coal mine [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2021, 40(6): 479. DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.2021.06.001
- [19] LI Bo, LIANG Yunpei, ZHANG Lei, et al. Experimental investigation on compaction characteristics and permeability evolution of broken coal [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 118: 63. DOI:10.1016/j.ijrmms.2019.04.001

- [20]李树刚,刘李东,赵鹏翔,等.综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析[J].煤炭科学技术,2022,50(1):95
LI Shugang, LIU Lidong, ZHAO Pengxiang, et al. Analysis and application of fracture evolution law of overburden compacted area on fullymechanized mining face under multiple factors [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 95
- [21]张宏贞,邓喀中,顾伟.老采空区残留空洞空隙分布规律研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(5):893
ZHANG Hongzhen, DENG Kazhong, GU Wei. Distribution law of the old goaf residual cavity and void[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(5): 893. DOI:10.13545/j.cnki.jmse.2016.05.020
- [22]王永胜,于晓波.采空区空隙率分布模型[J].煤矿安全,2013,44(8):11
WANG Yongsheng, YU Xiaobo. A model for estimating porosity distribution in gob area[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(8): 11. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2013.08.032
- [23]梁运涛,张腾飞,王树刚,等.采空区孔隙率非均质模型及其流场分布模拟[J].煤炭学报,2009,34(9):1203
LIANG Yuntao, ZHANG Tengfei, WANG Shugang, et al. Heterogeneous model of porosity in gob and its airflow field distribution[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1203. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2009.09.021
- [24]马占国,兰天,潘银光,等.饱和破碎泥岩蠕变过程中孔隙变化规律的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1447
MA Zhanguo, LAN Tian, PAN Yinguang, et al. Experimental study of variation law of saturated broken mudstone porosity during creep process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1447. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2009.07.019
- [25]马占国,缪协兴,陈占清,等.破碎煤体渗透特性的试验研究[J].岩土力学,2009,30(4):985
MA Zhanguo, MIAO Xiexing, CHEN Zhanqing, et al. Experimental study of permeability of broken coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 985. DOI:10.16285/j.rsm.2009.04.005
- [26]苏承东,顾明,唐旭,等.煤层顶板破碎岩石压实特征的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(1):18
SU Chengdong, GU Ming, TANG Xu, et al. Experiment study of compaction characteristics of crushed stones from coal seam roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 18. DOI:10.3969/j.issn.1000-6915.2012.01.003
- [27]WANG Beifang, XING Jingchao, LIANG Bing, et al. Experimental study on deformation characteristics of rock and coal under stress-fluid interactions in coal mine underground water reservoir [J]. Energy Sources Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects, 2020, 46(1): 7845. DOI:10.1080/15567036.2020.1760968
- [28]ZHANG Bing, WANG Hanpeng, WANG Peng, et al. Experimental and theoretical study on the dynamic effective stress of loaded gassy coal during gas release[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(3): 339. DOI:10.1016/j.ijmst.2022.09.025
- [29]汪北方,梁冰,王俊光,等.煤矿地下水库岩体碎胀特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(11):4086
WANG Beifang, LIANG Bing, WANG Junguang, et al. Experiment study on rock bulking of coal mine underground reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4086. DOI:10.16285/j.rsm.2017.0506
- [30]LEE J S, SAGONG M, CHO G C, et al. Experimental estimation of the fallout size and reinforcement design of a tunnel under excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 518. DOI:10.1016/j.tust.2010.02.011
- [31]WANG Yaochuang, CHEN Pengkun, WANG Shen. Study of overlying rock structure and intensive pressure control technology of island longwall panel in extra-thick coal seams [J]. Processes, 2023, 11(11): 3083. DOI:10.3390/pr11113083
- [32]陈晓祥,苏承东,唐旭,等.饱水对煤层顶板碎石压实特征影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):3318
CHEN Xiaoxiang, SU Chengdong, TANG Xu, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on compaction property of crushed stone from coal seam roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup. 1): 3318. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.s1.102
- [33]WANG Fangtian, LIANG Ningning, LI Gang. Damage and failure evolution mechanism for coal pillar dams affected by water immersion in underground reservoirs [J]. Geofluids, 2019, 2019: 1. DOI:10.1155/2019/2985691
- [34]WU Hao, YAO Yanbin, DU Xuejia. Water adsorption characteristics of coal with different particle sizes; experimental and modeling analyses [J]. Natural Resources Research, 2023, 32(2): 717. DOI:10.1007/s11053-023-10171-x
- [35]WALKER D M, TORDESILLAS A, KUHN M R. Spatial connectivity of force chains in a simple shear 3D simulation exhibiting shear bands [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2017, 143(1):1
- [36]IIKAWA N, BANDI M M, KATSURAGI H. Force-chain evolution in a two-dimensional granular packing compacted by vertical tappings [J]. Physical Review E, 2018, 97(3):1. DOI:10.1103/PhysRevE.97.032901