

渗流-采动应力耦合作用下深部砂岩力学及能量演化规律研究

张培森¹, 王洪伟¹, 洪 荒², 许大强³, 陈增宝², 邓云驰¹, 梁 展²,
李金坤¹, 陈文豪¹, 崔 乾⁴

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 安徽省皖北煤电集团有限责任公司, 安徽 宿州 232101;
3. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 4. 青岛第一市政工程有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要: 煤矿地下灾害的主要诱因是受人为采动与煤炭资源被采出影响而导致围岩发生应力集中以及高强度卸荷, 尤其是在围岩受承压水影响时, 易失稳破坏, 进而致使灾害的发生。基于此, 借助 Rock Top 多场耦合试验仪开展了渗流-采动应力耦合作用下砂岩力学特性与能量演化规律试验研究。试验结果表明: (1) 砂岩全应力-应变曲线可划分为 5 个阶段, 砂岩开始卸荷后, 由以轴向变形为主转为以环向变形为主。(2) 砂岩的峰值应力随卸荷水平的升高而增大, 随渗透压差的增大, 砂岩峰值应力因受围岩与水压叠加影响而规律性不明显。(3) 砂岩卸荷水平越高, 其峰值应力处的轴向应变值越大, 高卸荷水平下砂岩的轴向变形更明显; 砂岩剪胀角曲线演化规律大致遵循“增—减—增—减”的规律, 低卸荷水平下砂岩扩容现象更显著。(4) 随初始卸荷水平的升高, 砂岩的弹性应变能密度整体呈增大趋势; 弹性应变能密度能量分配系数随岩样轴向应变的增加而呈现先增大后减小的规律。(5) 砂岩的弹性应变能瞬时能量分配系数随岩样轴向应变增大而呈现“增—减—增”的变化规律; 砂岩弹性应变能储能能力在其进入弹性变形阶段后达到峰值, 其释能能力在进入残余应力阶段前达到峰值。

关 键 词: 水力耦合; 力学特性; 深部围岩; 能量演化; 储能能力

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2025)07-1997-14

Mechanical properties and energy evolution law of deep-buried sandstone under seepage-mining stress coupling

ZHANG Pei-sen¹, WANG Hong-wei¹, HONG Huang², XU Da-qiang³, CHEN Zeng-bao²,
DENG Yun-chi¹, LIANG Zhan², LI Jin-kun¹, CHEN Wen-hao¹, CUI Qian⁴

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. Anhui Wanbei Coal and Power Group Co., Ltd., Suzhou, Anhui 232101, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
4. Qingdao No.1 Municipal Engineering Co., Ltd, Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: The main cause of underground disasters in coal mines is the stress concentration and high-intensity unloading of surrounding rock caused by man-made mining and the extraction of coal resources. Especially when the surrounding rock is affected by confined water, it is easy to lose stability and damage, which leads to the occurrence of disasters. Accordingly, the experimental study on the mechanical properties and energy evolution law of sandstone under the coupling of seepage and mining stress was carried out by means of Rock Top multi-field coupling tester. The test results show that: (1) The total stress-strain curve of sandstone can be divided into five stages. After the sandstone begins to unload, it changes from axial deformation to circumferential deformation. (2) The peak stress of sandstone increases with the increase of unloading level. With the increase of osmotic pressure difference, the peak stress of sandstone is not obvious due to the superposition of surrounding rock and water pressure. (3) The higher the unloading level of sandstone is, the larger the axial strain value at the peak stress is, and the axial deformation of sandstone is more obvious under high unloading level. The

收稿日期: 2025-01-03

录用日期: 2025-03-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2018YFC0604702); 国家自然科学基金资助项目 (No.51379119); 山东省自然科学基金资助项目 (No.ZR2021ME086)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC0604702), the National Natural Science Foundation of China (51379119) and the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (ZR2021ME086).

第一作者简介: 张培森, 男, 1977年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事采矿工程与岩石力学等方面的教学和科研工作。E-mail: peisen_sky@163.com

通讯作者: 王洪伟, 男, 2001年生, 硕士研究生, 主要从事矿井水害防治研究工作。E-mail: 1292560435@qq.com

evolution law of dilatancy angle curve of sandstone roughly follows the law of 'increase—decrease—increase—decrease', and the expansion behavior of sandstone is more significant under low unloading level. (4) With the increase of initial unloading level, the elastic strain energy density of sandstone increases as a whole. The energy distribution coefficient of elastic strain energy density increases first and then decreases with the increase of axial strain of rock sample. (5) The instantaneous energy distribution coefficient of elastic strain energy of sandstone presents the change rule of 'increase—decrease—increase' with the increase of axial strain of rock sample. The energy storage capacity of sandstone elastic strain energy reaches its peak after entering the elastic deformation stage, and its energy release capacity reaches its peak before entering the residual stress stage.

Keywords: hydro-mechanical coupling; mechanical properties; deep surrounding rock; energy evolution; energy storage capacity

1 引 言

伴随着我国浅部煤炭资源逐渐枯竭,为确保能源供应,保障正常的工业生产,开采深部煤炭资源已经成为各大煤矿企业工作的重中之重。深部围岩长期赋存于“三高一扰动”^[1]的复杂环境中,强烈的开采扰动会导致围岩初始劣化损伤程度较高,受承压水威胁时易发生突水灾害,深部围岩的易致灾性严重制约着我国深部煤炭资源的开采。对于深部围岩的研究,众多学者进行了大量系统性、基础性的工作^[2-6],主要围绕巷道开挖后围岩稳定性问题及原位岩体力学性质开展研究。然而,就采矿工程而言,开采深部围岩的复杂性更甚,多水平划分、多工作面布置的采煤思想决定了深部围岩受力的动态多变性,受开采扰动影响,深部围岩的受力情况在时间与空间维度中不尽相同,复杂的应力路径是导致深部围岩易受损伤的主要原因^[7-11]。并且,深部围岩并非是受单一、简单的单场作用,而是受复杂、多变的多场耦合作用,其中,相较于浅部围岩,渗流场对深部围岩的影响尤为突出^[12-18]。

针对不同应力路径下围岩力学特性问题,荣浩宇等^[19]分别开展了4种应力路径下砂岩真三轴卸荷试验,发现增轴压卸荷路径下,岩石承载能力最低,卸轴压卸荷路径下,岩石承载能力最高;张风达等^[20]进行了不同应力路径下岩石卸荷试验,分析指出岩样的弹性模量与泊松比变化幅度依次为:升轴压>恒轴压>卸轴压;李兆霖等^[21]通过开展系列真三轴卸荷试验,结合CT扫描技术,发现相较于真三轴加载路径,卸载条件下岩体内部破裂形式更加复杂,破裂面积更大;范浩等^[22]利用MTS816岩石力学试验系统对不同层理倾角煤样开展不同应力路径下的力学试验,分析了应力路径与层理倾角对煤体力学性质的影响;苗胜军等^[23]开展了不同应力路径下辉绿岩三轴循环加卸载与卸荷试验,基于能量角度分析试验过程中辉绿岩的力学特性,得到不同应力路径下辉绿岩能量演化规律;Momeni等^[24]研究了循环载荷下花岗岩的力学行为,通过分析循环载荷的振

幅、频率及应力水平对花岗岩强度的影响程度,发现应力水平的改变对花岗岩内部损伤影响更甚;An等^[25]以冻固弱胶结砂岩为研究对象,在不同初始主应力下进行了三轴卸载试验,结果表明升轴压卸围压路径下岩样体积膨胀特性最明显,降轴压卸围压路径下岩样的内聚力与内摩擦角变化更明显。

深部围岩长期赋存于多场耦合应力环境下,针对多场耦合影响下围岩力学性质问题,国内外学者已取得较为丰富的成果,张超等^[26]通过开展花岗岩应力-渗流耦合作用下三轴试验,阐明了多场耦合作用下花岗岩力学特性与能量演化规律,并构建了应力-渗流耦合本构模型;宋勇军等^[27]研究了含软弱夹层砂岩在多场耦合下的力学特性与渗流特性,发现随渗透压等级提高,砂岩峰值强度呈线性下降;李洪亚等^[28]基于周期性孔隙水压力损伤砂岩的不排水三轴压缩试验,发现砂岩峰值强度与孔隙水压作用周次呈反比关系;申林方等^[29]建立了岩石裂隙在多场耦合作用下的数值模型,并针对渗流流速、溶蚀反应速率及法向应力等影响因素,开展数值模拟研究,得到了岩石裂隙在多场耦合下的渗流特性规律。Pan等^[30]通过将微裂纹扩展规律与Logistic方程相结合,提出了一种新的水力耦合模型,研究结果表明,水压与岩石裂纹扩展的应力阈值之间存在负相关关系;Li等^[31]开展了不同围压和渗透压力下储层砂岩的三轴压缩试验,并结合COMSOL软件模拟再现了岩石的破坏过程,讨论了不同水力耦合作用下岩石特征点的破坏机理和渗流压力分布。

上述研究成果分别从应力路径和多场耦合的角度,阐释了岩石的力学特性、渗流特性,为本文撰写提供了重要参考,然而,深部围岩受损的主要诱因是围岩受多场耦合及开采扰动的叠加影响,单考虑其中一种影响因素对实际工程背景还原度不够,而同时考虑多场耦合与开采扰动对围岩影响的室内试验目前相对较少。在进行深部煤炭作业时,常见工作面或巷道靠近断层情况(见图1),一方面,工作面或巷道受开采扰动影响,两帮围岩会同时出现卸荷与应力集中现象,极易受损破坏,另一方面,

受损围岩易与断层及含水层沟通, 形成新的渗流通道, 从而诱发突水事故, 严重威胁工人生命安全及正常煤炭作业进程。基于此, 本文拟采取增轴压(模拟应力集中)、降围压(模拟开挖卸荷)的应力路径, 并引入渗流场作用, 同时考虑开采扰动及水力耦合的影响, 尽可能还原井下真实巷道或工作面开挖环境, 研究深部围岩在此条件下具有不同受损程度及承受不同水压情况下的力学及能量演化规律。图中, K 为应力集中系数, γ 为岩层重度, H 为巷道埋深。

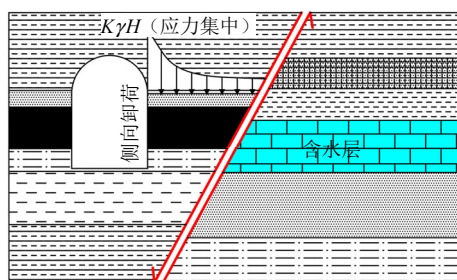


图1 近断层巷道围岩受力示意图

Fig.1 Schematic diagram of the stress distribution of the surrounding rock of the near-fault roadway

2 试验

2.1 试验试样

本试验岩样选取井下常见岩石, 砂岩, 依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—99) [32], 将其制备成尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准岩石试样, 试验正式开始前, 需将所有岩样进行饱水处理[33]。标准砂岩试样如图2所示。



图2 标准砂岩试样

Fig.2 Standard sandstone sample

2.2 试验仪器

本次试验仪器选用 Rock Top 多场耦合试验仪, 引进自法国里尔科技大学, 可以进行应力场、渗流场、温度场、化学场等多场耦合应力环境下的岩石力学试验[34-35], 该仪器由轴压控制系统、围压控制系统、渗流控制系统、温度控制系统、主控制系统及三轴试验腔室组成, 具有精度高、适应性强等特点。试验仪器与岩样封装如图3所示。

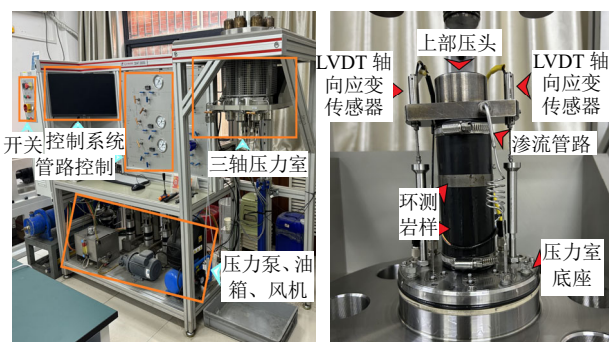


图3 试验仪器及岩样封装示意图

Fig.3 Schematic diagram of test equipment and rock sample packaging

2.3 试验方案

为模拟深部地应力环境, 静水压力选择 30 MPa (模拟煤(岩)层埋深为 1 200 m), 选取升轴压 σ_1 、降围压 σ_3 的应力路径(采动应力路径), σ_2 为中间主应力, 在假三轴试验条件下, 数值与 σ_3 相等。该试验装置有两个渗流管道, 分别可在岩样上下端施加独立的水压, 渗流上游(岩样下端)压力 P_3 选取 10 MPa, 下游(岩样上端)压力 P_4 选取 9、6、3、0 MPa (渗透压差 $\Delta P = P_3 - P_4$, ΔP 分别为 1、4、7、10 MPa), 卸荷水平分别选取 70% σ_c 、80% σ_c 、90% σ_c (σ_c 为 30 MPa 围压下砂岩峰值应力, 为 227 MPa), 试验过程中, 轴向载荷施加速率为 0.02 mm/min, 围压卸荷速率为 0.5 MPa/min, 三轴压力腔室内设定为恒温状态。具体试验流程见图4, 应力路径见图5。

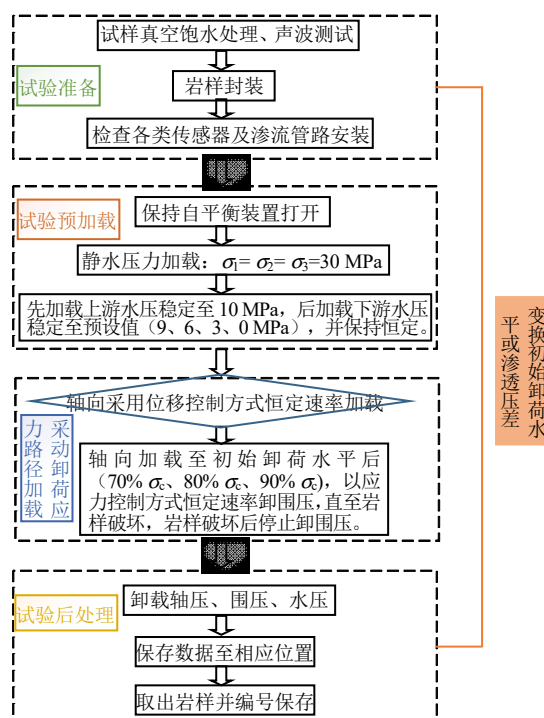


图4 试验流程图

Fig.4 Test flow chart

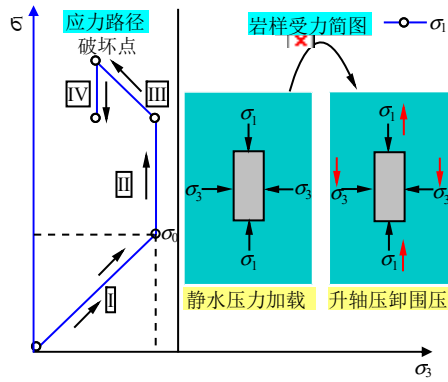


图 5 试验路径示意图

Fig.5 Schematic diagram of the test path

图 5 中 I~IV 阶段分别为: I 阶段, 静水压力加载; II 阶段, 围压不变, 轴压加载; III 阶段, 围压卸荷, 轴压持续加载; IV 阶段, 围压停止卸荷, 轴压持续加载。

3 试验结果分析

3.1 砂岩全应力-应变曲线

针对岩石变形特性问题, 目前多采用体积应变 ε_v ^[36] 来描述, 体积应变既可由轴向应变 ε_1 与环向应变 ε_3 表示, 又可以由弹性体积应变 ε_{ev} 与裂纹体积应变 ε_{cv} 表示:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_3 \quad (1)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{ev} + \varepsilon_{cv} \quad (2)$$

弹性模量与泊松比计算公式分别为

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (4)$$

式中: E 与 ν 分别为岩样的弹性模量与泊松比; σ 、 ε 为轴向应力、应变, 其计算所用数据均取自砂岩弹性变形阶段。

弹性体积应变与裂纹体积应变计算公式分别为

$$\varepsilon_{ev} = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{cv} = \varepsilon_v - \varepsilon_{ev} \quad (6)$$

图 6 为 10 MPa 渗透压差下不同初始卸荷水平砂岩全应力-应变曲线及体积应变/裂纹体积应变与轴向应变的关系曲线图(由于篇幅限制, 仅对 10 MPa 渗透压差条件下砂岩应力-应变曲线进行分析)。由图 6 可知, 砂岩试验过程中全应力-应变曲线可划分为 5 个阶段: OA 段为裂隙压密阶段 (O 点为坐标原点); AB 段为弹性变形阶段; BC 段为裂纹稳定扩展阶段; CD 阶段为裂纹非稳定扩展阶段; DE 阶段为峰后阶段。当应力加载超过峰值应力时, 裂隙发展为宏观剪切面, 岩样发生宏观破坏, 卸荷破坏表现为拉-剪复合破坏模式^[37], 岩样破坏后, 应力差迅速跌落至岩石的残余应力值。

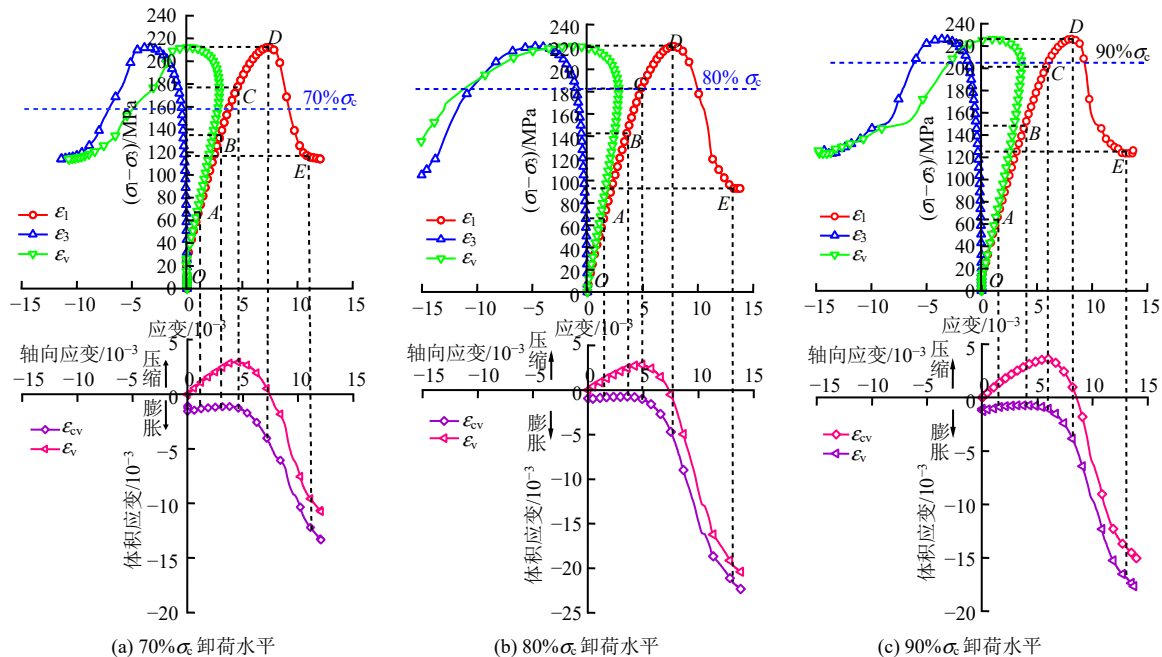


图 6 10 MPa 渗透压差下不同初始卸荷水平试样全应力-应变曲线及体积应变/裂纹体积应变与轴向应变关系曲线

Fig.6 Total stress-strain curves and relationship curves between volumetric strain/crack volumetric strain and axial strain for specimens at different initial unloading levels under a 10 MPa osmotic pressure difference

与常规三轴试验^[38]对比, 渗流-采动应力耦合作用下砂岩应力-应变曲线初期应变增长相对较快, 邓华锋等^[39]在分析水-岩作用下砂岩三轴卸荷应力-应变曲线时也观察到类似现象, 说明在渗流场作用下, 砂岩具有逐步软化的趋势; 另一方面, 曲线在弹性阶段内线性关系更为明显, 在孔隙流体作用下, 岩样弹性模量有所降低。岩样进入塑性变形后, 由于受到渗流-卸荷耦合作用, 岩样破坏速率加快, 卸荷导致内部裂隙进一步增多, 渗流进一步冲击、软化岩样内部结构, 最终导致岩样承载能力下降, 应力-应变曲线较早地达到峰值应力。

由裂纹体积应变曲线可知, *OC* 段岩样处于体积持续压缩阶段, 裂纹新生数量少, 且较为缓慢; 当外部载荷超越应力点 *C* 点 (损伤应力点) 后, 环向应变增速加快, 加之卸荷影响, 岩样体积由压缩向膨胀转变, 岩样开始由以轴向变形为主转变为以环向变形为主。*CE* 段岩样处于体积持续膨胀阶段,

裂纹新生数量最多且最快, 最终岩样发生宏观破坏。

基于此, 在工作面回采期间, 要及时对围岩进行加固支护, 防止围岩因过度卸荷或应力集中而发生剧烈破坏, 从而诱发突水等动力灾害。

3.2 应力特征分析

表 1、2、3 给出了试验过程中各岩样裂隙发育进程中的应力特征点 (σ_{cc} 为原生裂纹闭合应力、 σ_{ci} 为裂纹起裂应力、 σ_{cd} 为裂纹损伤应力、 σ_p 为峰值应力), 由表 1、2、3 可知, 不同初始卸荷水平下岩样峰值强度分别为 206.07 (70% σ_c)、217.16 (80% σ_c)、225.74 MPa (90% σ_c)。随初始卸荷水平的提高, 岩样峰值强度呈上升趋势, 这是由于高卸荷水平条件下, 岩样破坏时, 卸荷量较少, 围压较高, 限制了岩样内部损伤进一步加剧, 对岩样峰值强度具有一定强化作用, 因此, 在实际采煤作业中, 要尽量减少围岩卸荷量, 从而提高围岩的强度。随渗透压差的增大, 岩样峰值强度的规律性并不明显。

表 1 70% σ_c 初始卸荷水平不同渗透压差岩样应力特征点统计表

Table 1 Statistics of stress characteristic points of rock samples with different osmotic pressure differences at the initial unloading level of 70% σ_c

岩样编号	渗透压差/MPa	σ_{cc} /MPa	σ_{ci} /MPa	σ_{cd} /MPa	σ_p /MPa
S1	1	63.27	129.35	161.78	200.33
S2	4	65.09	129.85	159.31	206.12
S3	7	61.07	134.81	161.23	205.91
S4	10	67.32	159.87	174.04	211.92

表 2 80% σ_c 初始卸荷水平不同渗透压差岩样应力特征点统计表

Table 2 Statistics of stress characteristic points of rock samples with different osmotic pressure differences at the initial unloading level of 80% σ_c

岩样编号	渗透压差/MPa	σ_{cc} /MPa	σ_{ci} /MPa	σ_{cd} /MPa	σ_p /MPa
S5	1	63.56	130.12	183.07	214.90
S6	4	62.50	122.10	180.59	214.63
S7	7	67.98	132.41	181.98	218.47
S8	10	66.56	137.78	181.90	220.62

表 3 90% σ_c 初始卸荷水平不同渗透压差岩样应力特征点统计表

Table 3 Statistics of stress characteristic points of rock samples with different osmotic pressure differences at the initial unloading level of 90% σ_c

岩样编号	渗透压差/MPa	σ_{cc} /MPa	σ_{ci} /MPa	σ_{cd} /MPa	σ_p /MPa
S9	1	64.65	146.63	185.92	224.40
S10	4	65.11	148.30	203.85	225.93
S11	7	66.86	154.76	205.10	226.54
S12	10	64.96	151.25	205.73	226.10

为明确岩样峰值强度随渗透压差变化规律不明显的原因, 图 7 给出了不同试验条件下岩样破坏时围压变化曲线。由图 7 可知, 随渗透压差增大, 岩样破坏时围压减小, 因此, 只考虑围压影响时, 渗透压差越大, 破坏时围压越小, 岩样峰值强度应越

小。但岩样又受到内部水压力作用, 邓华锋等^[40]研究指出, 随孔隙水压力的增大, 卸荷岩样破坏时围压逐渐增大, 再结合图 7, 不难反推出本次试验中渗透压差越大, 岩样内部孔隙水压越小: 本次试验中渗流场上游压力保持不变, 仅改变下游压力, 下

游水压越小,岩样内部水压力越小,渗透压差越大,因此,高渗透压差环境下,岩样内部水压较小,对岩样内部造成损伤较少。仅考虑岩样内部水压影响时,岩样峰值强度随渗透压差增大而增大,陈奕安等^[41]试验结果可印证此结论。

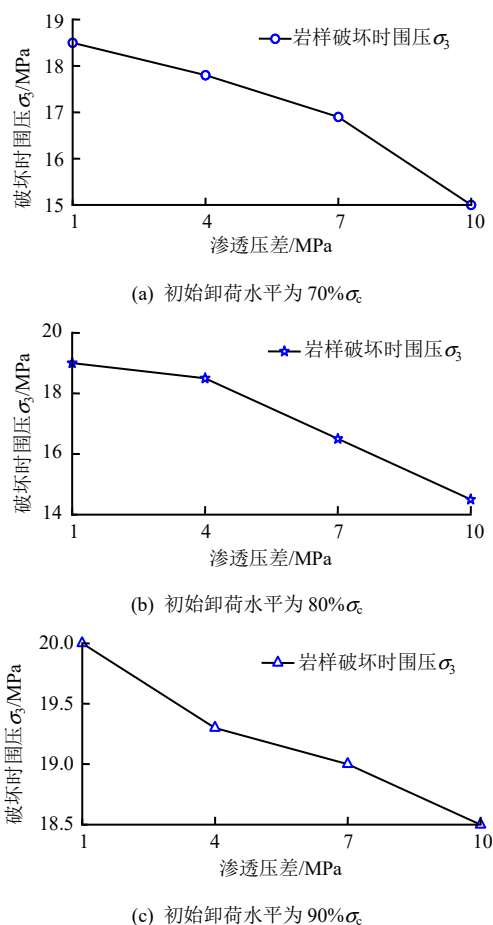


图7 不同试验条件下岩样破坏时围压变化曲线

Fig.7 Variation curves of confining pressure during rock specimen failure under different test conditions

综上所述,随渗透压差增大,岩样峰值强度因受其破坏时围压减小的影响,存在相对弱化趋势,但同时又受内部水压力减小的影响,存在相对强化趋势。在渗透压差变化过程中,围压也是一个变量,因此,在受渗流-采动应力耦合作用影响下,砂岩峰值应力随渗透压差变化而规律性不明显。

由表 1、2、3 可知,岩样的闭合应力 σ_{cc} 随渗透压差改变无明显变化,这是由于在岩样未进行卸荷前,各岩样试验环境仅有渗透压差不同,而岩石作为一种孔隙介质,其内部孔隙有水压存在时会承担部分外部载荷,但由于岩样原有孔隙较少,孔隙面积较小,内部水压所能承受的外部载荷有限,因此,渗透压差变化对内部孔隙抵抗外部载荷的能力影响较小,闭合应力随渗透压差改变无明显变化;裂纹

起裂应力 σ_{ci} 在低渗透压差环境下普遍较小,在高渗透压差环境下普遍较大,这是因为低渗透压差环境下岩样内部水压整体较大,不断冲击内部裂纹,对裂隙结构具有软化作用,导致裂纹起裂应力减小;裂纹损伤应力 σ_{cd} 明显与各自卸荷水平接近(70% σ_c =159 MPa, 80% σ_c =182 MPa, 90% σ_c =205 MPa),随渗透压差改变无明显规律性变化,这是由于其主要受采动应力影响,卸荷起主要决定作用,卸荷后,围压降低,岩样受环向约束减小,迅速由裂纹稳定发展阶段进入裂纹非稳定发展阶段,表明卸荷影响了岩样内部裂纹损伤进程。

3.3 应变特性分析

试验过程中,峰值应力处各应变特征值与渗透压差、初始卸荷水平关系见图 8。

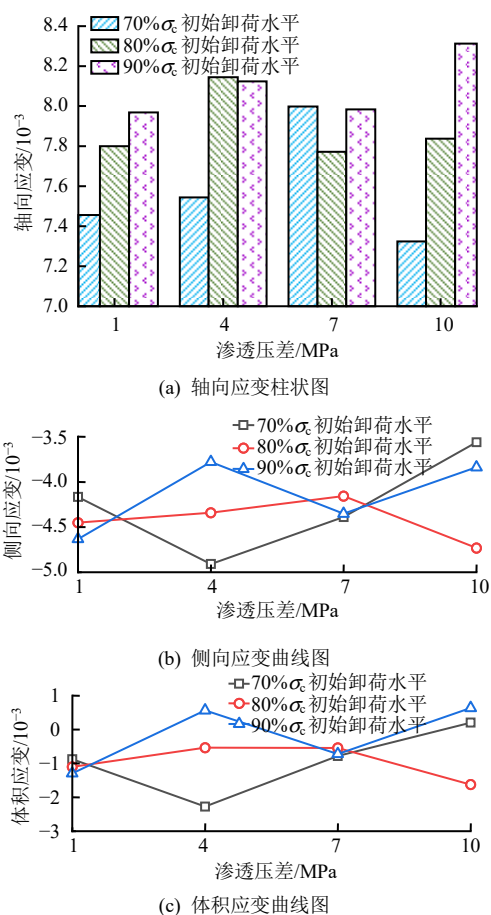


图8 岩样峰值应力处应变与渗透压差、初始卸荷水平关系

Fig.8 Relationships between strain at peak stress and osmotic pressure difference, as well as initial unloading level, for rock specimens

不同卸荷水平下岩样峰值应力处轴向应变值分别为 0.758% (70% σ_c)、0.789% (80% σ_c)、0.810% (90% σ_c)。从整体上看,卸荷水平越高,岩样峰值应力处的轴向应变值越大,高卸荷水平下岩样的轴向变形更明显。不同卸荷水平下的岩样环向应变值

在渗透压差为 1、7 MPa 时比较集中, 最大环向应变值与最小环向应变值分别相差 0.046%、0.023%, 在 4、10 MPa 时比较分散, 其最大环向应变值与最小环向应变值分别相差 0.113%、0.117%。体积应变曲线分布特点与环向应变曲线类似。

在岩石破坏过程中, 受载岩石会出现一种明显的非弹性体积增大现象, 称为岩石的扩容, 是岩石具有的一种普遍性质。在连续介质理论中, 剪胀角常被用来衡量岩石的扩容现象, 其物理意义为变形

岩样轴向和环向塑性变形之间的夹角, 其三相应力状态下计算公式为^[42-44]

$$\sin \psi = \frac{\varepsilon_v^p}{-2\varepsilon_1^p + \varepsilon_3^p} \quad (7)$$

式中: ψ 为剪胀角 ($^\circ$); ε_v^p 为体积塑性应变率; ε_1^p 为轴向塑性应变率。

根据式 (7) 可以绘制出如图 9、10、11 所示的剪胀角演化规律曲线图。

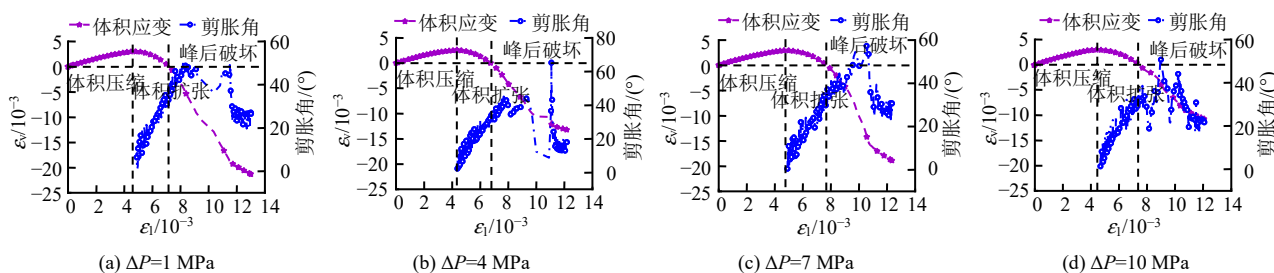


图 9 70% α 初始卸荷水平下岩样剪胀角演化规律曲线

Fig.9 Evolution curves of dilatation angle of rock sample at 70% α initial unloading level

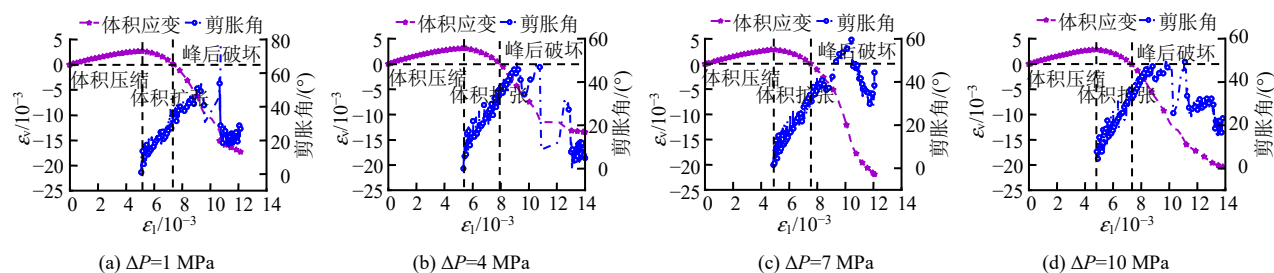


图 10 80% α 初始卸荷水平下岩样剪胀角演化规律曲线

Fig.10 Evolution curves of dilatation angle of rock sample at 80% α initial unloading level

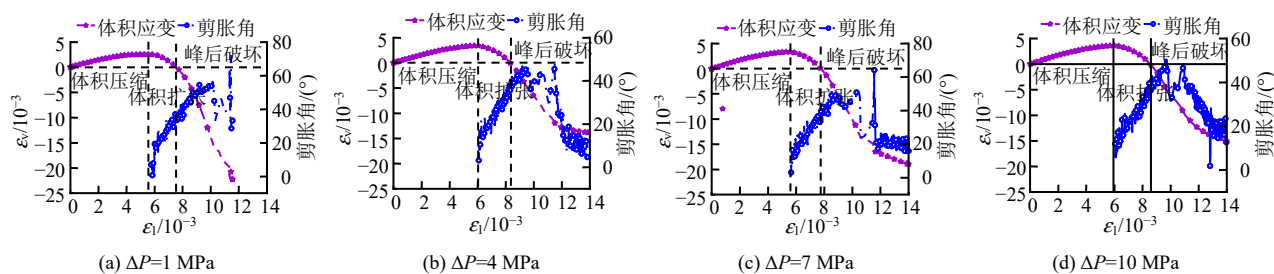


图 11 90% α 初始卸荷水平下岩样剪胀角演化规律曲线

Fig.11 Evolution curves of dilatation angle of rock sample at 90% α initial unloading level

由图 9、10、11 可知, 剪胀角曲线演化规律大致遵循“增—减—增—减”的规律, 在峰前扩容阶段, 受外部载荷的持续作用, 岩样体积膨胀程度加大, 剪胀角呈波动上升趋势。在峰后扩容阶段, 剪胀角波动幅度较大, 达到最大剪胀角后, 发生第 1 次突降, 紧接着出现第 2 次抬升, 到达 2 次峰值后再次降低并逐渐趋于稳定。第 1 次突降主要是由于岩样内部裂隙状态发生质变, 产生宏观破裂面, 剪胀角达到峰值, 岩样发生宏观破坏后继续剪切滑移, 但

此时扩容现象并不显著, 剪胀角发生突降。剪胀角曲线出现 2 次抬升是由于围压停止卸荷, 环向束缚阻止破裂面进一步剪切滑移, 直接影响了环向塑性应变率, 而轴向塑性应变率受影响较小, 砂岩轴向与环向塑性变形之间的角度增大, 砂岩整体表现为扩容现象更加显著, 此时, 剪胀角出现突增现象。出现完全宏观破裂面后, 岩石由孔隙介质转变为离散结构^[45], 岩石承载能力主要取决于破裂面的摩擦力, 体积应变由非线性向线性转变, 增速下降, 剪

胀角减小并逐渐趋于稳定。

不同初始卸荷水平下岩样平均最大剪胀角分别为 54.42° ($70\%\sigma_c$)、 51.91° ($80\%\sigma_c$)、 50.30° ($90\%\sigma_c$)，剪胀角随卸荷水平升高呈降低趋势，表明低卸荷水平下岩样扩容现象更显著，刘新荣等^[46]也得到了此结论。

3.4 渗流-采动应力耦合影响下砂岩能量演化规律

岩石从受载到发生破坏的过程中，其内部裂隙经历了压密→新生→贯通→形成宏观破裂面的规律性演变过程，外部载荷主导了裂隙发育，裂隙发育导致了岩石失稳破坏。换言之，岩石的受损破坏过程就是力与位移（能量）综合作用的结果，就是能量积聚与释放的结果。因此，借助试验过程中砂岩能量演化规律，可更容易理解砂岩的破坏过程。

三轴压力腔室内部为恒温密闭状态，腔室内部与外部不会发生热交换，则在假三轴试验条件下，外力对岩样做功的总输入应变能密度 U 、弹性应变能密度 U_e 的计算公式为^[47-49]

$$U = U_e + U_d = U_1 + U_3 = \int \sigma_1 d\varepsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (8)$$

$$U_e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\nu(2\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (9)$$

式中： U_1 为轴向压力对岩样做功产生的应变能密度 (MJ/m^3)； U_3 为围压对岩样做功释放的应变能密度 (MJ/m^3)； U_d 为耗散能密度 (MJ/m^3)。

依据式 (8)、(9)，得到渗流-采动应力耦合作用下砂岩典型能量变化规律曲线，如图 12 所示（数据取自 $70\%\sigma_c$ 初始卸荷水平、 $\Delta P=1 \text{ MPa}$ 砂岩试样）。

由图 12 可知，根据砂岩典型能量变化曲线变化趋势，可将能量曲线划分 5 个阶段：I 阶段为能量缓慢变化阶段，对应砂岩应力-应变曲线的裂隙压密阶段，该阶段内 U_e 曲线与 U_1 曲线缓慢上升， U_d 曲线与 U_3 曲线并无明显变化。

II 阶段为能量小幅度变化阶段，对应砂岩应力-应变曲线的弹性变形阶段， U_e 曲线发生小幅涨幅， U_d 曲线仍无明显变化， U_1 曲线也发生小幅涨幅，但 U_3 曲线无明显变化；III 阶段为能量大幅度变化阶段，对应砂岩应力-应变曲线的裂纹新生与扩展阶段，同时，此阶段内存在砂岩卸荷过程，因此，此阶段内能量曲线变化幅度较大， U_1 、 U_3 、 U_d 、 U_e 曲线均有明显的涨幅，其中， U_e 曲线斜率逐渐变小，至 III 阶段末时接近为 0， U_d 曲线斜率呈增大趋势，表明砂岩发生的塑性变形占比逐渐增多，尤其在砂

岩应力-应变曲线处于裂纹非稳定扩展阶段， U_d 曲线斜率增速明显提高；IV 阶段为能量失稳阶段，此阶段内砂岩内部裂隙由量变走向质变，发展为宏观破裂面，弹性应变能曲线逐渐降低，耗散能曲线逐渐升高，表明此时砂岩已丧失大部分储能能力；V 阶段为能量再稳定阶段，由于砂岩外部载荷及自身变形趋于稳定，各类能量曲线也趋于稳定。

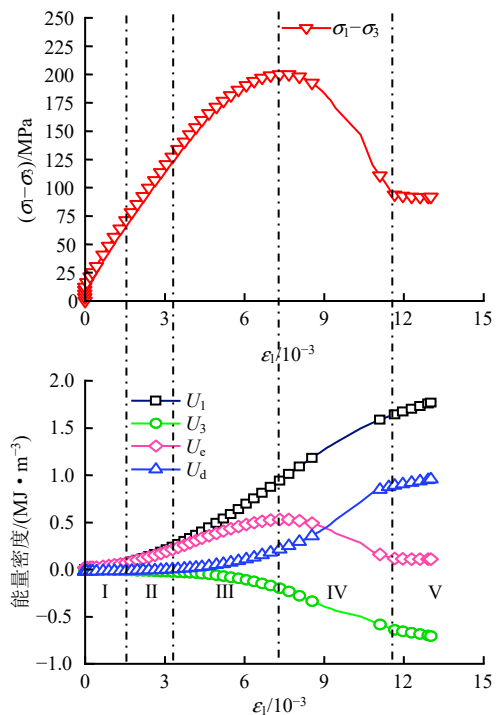


图 12 渗流-采动应力耦合作用下砂岩典型能量变化规律曲线

Fig.12 Typical energy variation curves of sandstone under the coupling effect of seepage and mining-induced stress

由于渗流-采动应力的耦合影响，本次试验所得能量曲线具有以下特点：

(1) U_3 曲线能量积累速率加快。在加载初期，受渗流场影响，岩样内部结构承载能力降低，但此时岩样侧限并未改变，持续加载的轴向载荷压密了渗流通道，挤压了渗流的存储空间，并且此时岩样内部裂隙相对较少，渗流场对内部结构的软化作用有限，岩样侧向裂隙发展并未有显著变化， U_3 曲线积累能量速率虽因渗流场存在而加快，但并不显著。岩样开始卸荷后，侧限逐渐降低，侧向应变增速明显提升，渗流存储空间增多，对内部裂隙软化作用明显，卸荷-渗流耦合作用下，岩样侧向应变增速加快， U_3 能量积累速率进一步加快。

(2) 峰值弹性应变能降低。一方面，由于卸荷作用，岩样内部裂隙在卸荷后扩展迅速，裂隙发育进程加快，使得内部结构更容易损伤，因此，卸荷

作用阻碍了弹性应变能积聚；另一方面，稳定的渗流场会使岩样内部有效应力降低，减小颗粒间摩擦^[27]，在外部载荷作用下，岩样更容易发生变形损伤，从而影响弹性应变能积累。因此，受卸荷与渗流影响，峰值弹性应变能存在降低现象。

图 13 给出了不同试验条件下砂岩的峰值弹性应变能密度曲线。由图可知，不同初始卸荷水平下岩样平均弹性应变能密度分别为 0.575 (70% σ_c)、0.643 (80% σ_c)、0.703 MJ/m³ (90% σ_c)。随初始卸荷水平的升高，砂岩的弹性应变能密度整体上呈增大趋势。

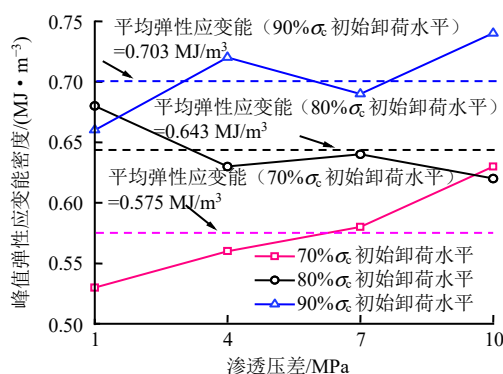


图 13 不同试验条件下砂岩的峰值弹性应变能
Fig.13 Peak elastic strain energy of sandstone under different test conditions

为更好地认知弹性应变能与耗散能的能量竞争关系，引入能量分配系数^[50]来表征弹性应变能与耗散能的竞争关系：

$$K_a = \frac{U_e}{U} \quad (10)$$

$$K_b = \frac{U_d}{U} \quad (11)$$

式中： K_a 、 K_b 分别为弹性应变能密度能量分配系数、耗散能密度能量分配系数。

图 14 给出了 70% σ_c 初始卸荷水平下不同渗透压差岩样的能量分配系数散点分布情况。由图可知，弹性应变能的能量分配系数随轴向应变的增加而呈现先增后减的规律，在岩样破坏前，弹性应变能密度虽在持续增加（见图 12），但其能量分配系数经历了先增大后减小的变化过程，这是由于砂岩在不同阶段的储能能力不同所导致，在加载初期，随外部载荷持续加载，岩样发生的弹性变形增多，岩样储能能力增强，至岩样进入塑性变形阶段之前，其储能能力达到峰值，进入塑性变形后，岩样内部发生的塑性变形逐渐增多，耗散能消耗量增大，能量

分配逐渐向耗散能倾斜，用于加剧岩样的内部损伤，弹性应变能的能量分配系数曲线稳定下降，发生塑性变形的岩石骨架颗粒仍是以小范围、小规模形式存在，此时弹性应变能仍处于稳定主导地位。岩样发生宏观破坏后，弹性应变能与耗散能的能量分配系数曲线发生陡降或陡升，表明岩样内部裂隙状态发生质变，同时，发生塑性变形的岩石骨架颗粒占据了大多数，岩样的储能能力进一步降低，弹性应变能丧失了稳定主导地位。耗散能的能量分配系数高于弹性应变能的能量分配系数，表征外部输入的能量主要用于岩样继续发生损伤破坏。处于残余应力阶段的岩样，其弹性应变能的能量分配系数近似为 0，耗散能的能量分配系数近似为 1，表明破坏后的岩样已丧失了绝大部分储能能力。

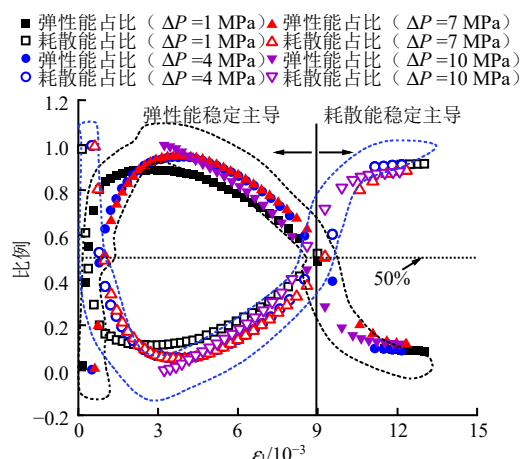


图 14 70% σ_c 初始卸荷水平下不同渗透压差砂岩能量分配系数散点图

Fig.14 Scatter plots of energy distribution coefficients for sandstone at a 70% σ_c initial unloading level with different osmotic pressure differences

由于只有轴向压力在对岩样做正功，因此，弹性应变能密度增量只会来源于轴向应变能，为进一步明晰砂岩内部能量实时分配情况，定义弹性应变能瞬时能量分配系数 ΔK ：

$$\Delta K = \frac{\Delta U_e}{\Delta U_1} \quad (12)$$

式中： ΔU_e 为两个计数点间（间隔 5 s）的弹性应变能密度之差； ΔU_1 为两个计数点间的轴向应变能密度之差。

根据 ΔK 值定义可知，当 $\Delta K > 0$ 时，表明弹性应变能处于储存能量阶段， $\Delta K < 0$ 时，表明弹性应变能处于释放能量阶段。图 15 给出了瞬时能量分配系数散点分布情况与弹性应变能密度曲线（数据取

自 S8 岩样), 由图可知, 随岩样的轴向应变增加, 弹性应变能的瞬时能量分配系数呈现出“增—减—增”的变化规律; 在加载初期, ΔK 值由 0 开始逐渐升高, 至砂岩弹性变形阶段, ΔK 值逐渐稳定并达到峰值, 轴压做功绝大部分转换为弹性应变能, 表明此阶段内砂岩储能能力最强且最稳定; 当砂岩进入塑性变形阶段后, ΔK 值逐渐降低, 砂岩储能能力因其内部损伤增多而逐渐减弱, 在峰值应力处 ΔK 值接近于 0, 弹性应变能处于储能与释能的临界点, 其储能能力已近乎丧失, 弹性应变能密度不再增加; 岩样发生宏观破坏时, 弹性应变能密度急剧降低, ΔK 值变为负数并逐渐降低, 表明此时砂岩弹性应变能正式进入释能阶段, 并且其释能能力随轴向应变增大而增强, 至残余应力阶段释能能力达到峰值, ΔK 达到最小值; 岩样残余应力阶段后, ΔK 值逐渐增大, 表征岩样弹性应变能释能能力逐渐降低。

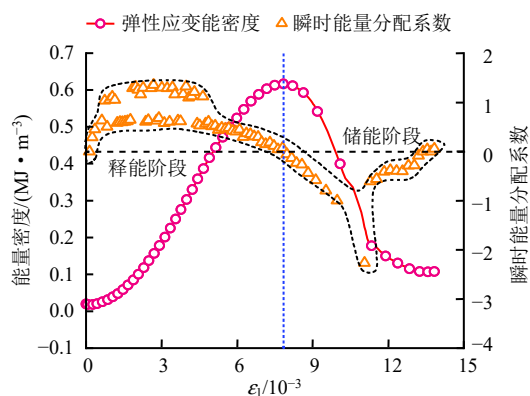


图 15 瞬时能量分配系数散点图与弹性应变能密度曲线图
Fig.15 Scatter plot of instantaneous energy distribution coefficient and elastic strain energy density curves

4 讨 论

(1) 在本论文的 3.4 节, 分析了渗流-采动应力耦合影响下砂岩的能量演化规律, 所借用的能量计算公式 (式 (8)、(9)) 适用于非渗流条件下的三轴应力环境, 虽然本试验同样为三轴应力环境, 但基于采煤作业受承压水威胁的工程实际, 本次试验引入了渗流场作用, 渗流场势必会影响原有能量场。

在图 15 中, ΔK 值出现了大于 1 的情况, 依据能量守恒理论, 弹性应变能密度增量不会大于轴向应变能密度增量, 但弹性应变能密度并非实际测量值, 而是二次计算的产物, 在对其进行计算时, 岩样的弹性模量与泊松比均取一定值。然而, 在计算弹性应变能密度增量时, 计时点间隔内的弹性模量与泊松比肯定不会与前期选取的弹性模量与泊松比

完全相同, 尤其是在非弹性变形阶段。因此, 在此种情况下计算出的砂岩弹性应变能密度增量较实际值有所上下浮动, 故出现了 ΔK 值大于 1 的情况。

试验引入渗流场后, 水流在岩样内部流通的过程中, 不断影响内部裂隙, 参与裂隙演变进程, 李建林、邓华锋教授团队^[39-40,51]在研究水-岩作用时发现, 渗流场的存在会导致岩石的各类力学参数发生劣化, 渗流场是否是通过影响岩样的弹性模量与泊松比来进一步影响岩样的弹性应变能, 目前并没有直接证据可以证明此设想, 而现有公式又暂时无法量化渗流场的能量变化, 渗流场的动、势能等究竟与原能量场有何转换关系, 仍未有明确结论, 因此, 有关渗流场下三轴应力环境中的能量转换问题有待进一步探究。

(2) 本次试验对象为砂岩, 笔者根据能量计算公式定义了砂岩的瞬时能量分配系数, 并对其展现出的规律性进行总结归纳。从理论方面分析, 凡是可以适用能量计算公式的岩石, 均可应用瞬时能量分配系数对各类岩石的储能能力及释能能力进行具体量化分析, 比如目前岩石力学类试验中常用的花岗岩、石英岩、煤及煤岩组合体等岩石, 但是, 具有低强度、高变形性的软岩^[52]可能对此并不适用, 或者说, 其工程意义不强。因此, 瞬时能量分配系数在硬岩内具有一定的普适性, 但后续仍需具体试验进行验证。

5 结 论

借助 Rock Top 多场耦合试验仪, 开展了渗流-采动应力耦合作用下深部砂岩三轴压缩试验, 分析了砂岩在试验过程中的力学特性与能量演化规律, 得出了以下结论:

(1) 砂岩全应力-应变曲线可划分为 5 个阶段, 起始卸荷点为砂岩由以轴向变形为主转为环向变形为主的分界点。

(2) 砂岩的峰值应力随卸荷水平的升高而增大, 随渗透压差增大, 岩样的峰值强度因受围岩与水压叠加影响而规律性不明显。

(3) 砂岩卸荷水平越高, 其峰值应力处的轴向应变值越大, 高卸荷水平下岩样的轴向变形更大; 砂岩剪胀角曲线演化规律大致遵循“增—减—增—减”的规律, 低卸荷水平下砂岩扩容现象更显著。

(4) 随初始卸荷水平的升高, 砂岩的弹性应变能密度整体呈增大趋势; 弹性应变能密度能量分配系数 K_a 随轴向应变的增加而呈现先增后减的规律。

(5) 砂岩的弹性应变能瞬时能量分配系数 ΔK

随轴向应变增大而呈现“增—减—增”的变化规律;砂岩弹性应变能储能能力在其进入弹性变形阶段后达到峰值,其释能能力在进入残余应力阶段前达到峰值。

参考文献

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 常聚才, 谢广祥. 深部巷道围岩力学特征及其稳定性控制[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 881-886.
CHANG Ju-cai, XIE Guang-xiang. Mechanical characteristics and stability control of rock roadway surrounding rock in deep mine[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(7): 881-886.
- [3] 周延军, 耿应春, 王贵宾, 等. 深部地层岩石力学性质测试与分析研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1625-1630.
ZHOU Yan-jun, GENG Ying-chun, WANG Gui-bin, et al. Testing and analyzing rock mechanical characteristics for deep formation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1625-1630.
- [4] 高明忠, 王明耀, 谢晶, 等. 深部煤岩原位扰动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2691-2703.
GAO Ming-zhong, WANG Ming-yao, XIE Jing, et al. In-situ disturbed mechanical behavior of deep coal rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(8): 2691-2703.
- [5] 李伟涛, 郭志飏, 何满潮, 等. 深部高应力软岩巷道失稳机理及补偿支护技术研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-18[2025-05-30]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20240806.0947.002>.
LI Wei-tao, GUO Zhi-biao, HE Man-chao, et al. Study on failure mechanisms and compensation support technology of deep high-stress soft rock roadways[J/OL]. **Coal Science and Technology**, 1-18. [2025-05-30]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20240806.0947.002>.
- [6] 谢广祥, 李传明, 王磊. 巷道围岩应力壳力学特征与工程实践[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2986-2992.
XIE Guang-xiang, LI Chuan-ming, WANG Lei. Mechanical characteristics and practical application on stress shell of roadway surrounding rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(12): 2986-2992.
- [7] XIE S R, LI E P, LI S J, et al. Surrounding rock control mechanism of deep coal roadways and its application[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2015, 25(3): 429-434.
- [8] 吴祥业, 庞政, 赵善坤, 等. 重复采动巷道围岩裂纹跨尺度演化规律及其力学机理[J]. 煤炭学报, 2024, 49(增刊 2): 579-592.
WU Xiang-ye, PANG Zheng, ZHAO Shan-kun, et al. Scale-span evolution law and mechanical mechanism of surrounding rock cracks in repeated mining roadway[J]. **Journal of China Coal Society**, 2024, 49(Suppl.2): 579-592.
- [9] 刘国磊, 王泽东, 崔翥, 等. 深部煤巷围岩三向应力差异梯度致冲机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2106-2122.
LIU Guo-lei, WANG Ze-dong, CUI Yu, et al. Mechanism of rock burst in deep coal tunnel surroundings due to three-way stress difference gradient[J]. **Journal of China Coal Society**, 2023, 48(5): 2106-2122.
- [10] 解盘石, 黄宝发, 伍永平, 等. 大倾角大采高采场覆岩应力路径时空效应[J]. 煤炭学报, 2023, 48(增刊 2): 424-436.
XIE Pan-shi, HUANG Bao-fa, WU Yong-ping, et al. Time-space effect of overburden stress path in steeply dipping and large mining height stope[J]. **Journal of China Coal Society**, 2023, 48(Suppl.2): 424-436.
- [11] 魏明星, 朱永建, 任恒, 等. 三轴卸荷损伤砂岩单轴再承载力学特性及其破坏机制[J]. 岩土力学, 2024, 45(10): 3047-3057.
WEI Ming-xing, ZHU Yong-jian, REN Heng, et al. Uniaxial re-bearing mechanical characteristics and failure mechanism of triaxial unloading-damaged sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(10): 3047-3057.
- [12] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 911-926.
HUANG Bing-xiang, ZHANG Nong, JING Hong-wen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(3): 911-926.
- [13] 马丹, 侯文涛, 张吉雄, 等. 空心岩样径向渗流-轴向应力特征与巷道围岩渗透突变机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1180-1195.
MA Dan, HOU Wen-tao, ZHANG Ji-xiong, et al. Radial seepage-axial stress characteristics of hollow rock sample and seepage mutation mechanism of roadway surrounding rock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2022, 47(3): 1180-1195.
- [14] 刘力源, 纪洪广, 王涛, 等. 高渗透压和不对称围压作

- 用下深竖井围岩损伤破裂机理[J]. 工程科学学报, 2020, 42(6): 715-722.
- LIU Li-yuan, JI Hong-guang, WANG Tao, et al. Mechanism of country rock damage and failure in deep shaft excavation under high pore pressure and asymmetric geostress[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2020, 42(6): 715-722.
- [15] 沈荣喜, 邱黎明, 李保林, 等. 采场底板高承压水突水“三场”演化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 213-218.
- SHEN Rong-xi, QIU Li-ming, LI Bao-lin, et al. “Three fields” evolution of water inrush process under high confined water in stope floor[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2015, 32(2): 213-218.
- [16] 杨天鸿, 师文豪, 于庆磊, 等. 巷道围岩渗流场和应力场各向异性特征分析及应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1815-1822.
- YANG Tian-hong, SHI Wen-hao, YU Qing-lei, et al. The anisotropic properties analysis of the rock mass surrounding the roadway's in seepage and stress field[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(11): 1815-1822.
- [17] CHEN Y A, ZHAO G M, XU W S, et al. Development and application of rock rheological constitutive model considering dynamic stress field and seepage field[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2025, 35(3): 467-482.
- [18] 刘新荣, 张吉禄, 周小涵, 等. 考虑轴向应力作用的贯通裂隙岩体变形及渗流特性研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3596-3612.
- LIU Xin-rong, ZHANG Ji-lu, ZHOU Xiao-han, et al. Deformation and seepage characteristics of precast fractured rock mass considering the influence of axial stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(12): 3596-3612.
- [19] 荣浩宇, 李桂臣, 赵光明, 等. 不同应力路径下深部岩石真三轴卸荷特性试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3140-3149.
- RONG Hao-yu, LI Gui-chen, ZHAO Guang-ming, et al. True triaxial test study on mechanical properties of deep rock mass in different stress paths[J]. **Journal of China Coal Society**, 2020, 45(9): 3140-3149.
- [20] 张凤达, 张玉军, 于秋鸽. 不同加卸载路径下岩石卸荷劣化特征及机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 117-127.
- ZHANG Feng-da, ZHANG Yu-jun, YU Qiu-ge. Unloading deterioration and mechanism of rock under different loading and unloading stress paths[J]. **Coal Science and Technology**, 2022, 50(12): 117-127.
- [21] 李兆霖, 周伟, 王连国, 等. 不同真三轴路径下岩石卸荷特性与破裂特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 480-488, 498.
- LI Zhao-lin, ZHOU Wei, WANG Lian-guo, et al. Unloading properties and fracture characteristics of rock under different true triaxial unloading paths[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2022, 39(3): 480-488, 498.
- [22] 范浩, 王磊, 王连国. 不同应力路径下层理煤体力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 385-395.
- FAN Hao, WANG Lei, WANG Lian-guo. Experimental study on mechanical properties of bedding coal under different stress paths[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(2): 385-395.
- [23] 苗胜军, 段懿轩, 尹紫微, 等. 不同应力路径下辉绿岩能量演化与破坏机制研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(14): 154-161.
- MIAO Sheng-jun, DUAN Yi-xuan, YIN Zi-wei, et al. Energy evolution and failure mechanism of diabase under different stress paths[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2023, 42(14): 154-161.
- [24] MOMENI A, KARAKUS M, KHANLARI G R, et al. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 77: 89-96.
- [25] AN X B, LV X Z, SUN J C, et al. Mechanical behaviour and macro-micro failure mechanisms of frozen weakly cemented sandstone under different stress paths[J]. **Construction and Building Materials**, 2024, 449: 138264.
- [26] 张超, 杜翠凤, 宋卫东, 等. 应力-渗流耦合下深部花岗岩力学行为及破坏特征[J]. 工程科学学报, 2024, 46(4): 600-613.
- ZHANG Chao, DU Cui-feng, SONG Wei-dong, et al. Degradation effect and failure characteristics of granite under stress-seepage coupling[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2024, 46(4): 600-613.
- [27] 宋勇军, 王双龙, 李蕾蕾, 等. 应力-渗流耦合作用下含软弱夹层砂岩渗透特性与力学行为研究[J/OL]. 工程科学与技术, 1-16[2025-05-30]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20240919.1631.001>.
- SONG Yong-jun, WANG Shuang-long, LI Lei-lei, et al. Study on permeability and mechanical behavior of sandstones with weak interlayers under stress-seepage coupling[J/OL]. **Advanced Engineering Sciences**, 1-16 [2025-05-30]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.2024>

- 0919.1631.001.
- [28] 李洪亚, 马林建, 刘杰, 等. 周期性孔隙水压作用下砂岩损伤劣化特性研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(7): 2000-2010.
- LI Hong-ya, MA Lin-jian, LIU Jie, et al. Damage and deterioration characteristics of sandstone under cyclical pore water pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(7): 2000-2010.
- [29] 申林方, 吕倩文, 刘文连, 等. 应力-渗流-溶蚀耦合作用下三维岩石裂隙渗透特性数值计算研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(2): 428-437.
- SHEN Lin-fang, LÜ Qian-wen, LIU Wen-lian. et al. Numerical study of three-dimensional rock fracture permeability properties under coupled stress-seepage-dissolution process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2025, 47(2): 428-437.
- [30] PAN Y L, SU L J, JIAN W X, et al. Crack propagation characteristics and constitutive model of soft rock considering hydro-mechanical coupling effect[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2025, 29(5): 100128.
- [31] LI M, LIU X S. Experimental and numerical investigation of the failure mechanism and permeability evolution of sandstone based on hydro-mechanical coupling[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2021, 95: 104240.
- [32] 中华人民共和国电力工业部. GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- Ministry of Electric Power Industry of the People's Republic of China. GB/T50266—99 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [33] 长江水利委员会长江科学院. SL 264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- Changjiang Water Resources Commission Changjiang Academy of Sciences. SL 264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydropower engineering[S]. Beijing: China Water and Power Press, 2001.
- [34] 张培森, 许大强, 颜伟, 等. 不同围压下峰后循环载荷对砂岩力学及渗流特性的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 94-105.
- ZHANG Pei-sen, XU Da-qiang, YAN Wei, et al. Effect of post-peak cyclic load on mechanics and seepage characteristics of sandstone under different confining pressures[J]. **Coal Science and Technology**, 2023, 51(7): 94-105.
- [35] 张培森, 许大强, 颜伟, 等. 应力-渗流耦合作用下不同卸荷路径对砂岩损伤特性及能量演化规律的影响研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 325-339.
- ZHANG Pei-sen, XU Da-qiang, YAN Wei, et al. Influence of unloading paths on sandstone damage characteristics and energy evolution law under stress-seepage coupling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(2): 325-339.
- [36] MARTIN, C. D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, 34(5): 698-725.
- [37] 郭昌华, 温树杰, 朱杰. 卸荷条件下红砂岩力学特性及破坏能量特征研究[J/OL]. 有色金属科学与工程, 1-12 [2025-05-30]. <https://link.cnki.net/urlid/36.1311.TF.20241219.1254.002>.
- GUO Chang-hua, WEN Shu-jie, ZHU Jie. Energy evolution and failure mechanism analysis of red sandstone under unloading conditions[J/OL]. **Nonferrous Metals Science and Engineering**, 1-12[2025-05-30]. <https://link.cnki.net/urlid/36.1311.TF.20241219.1254.002>.
- [38] 张培森, 许大强, 颜伟, 等. 不同初始损伤程度下循环加卸围压对岩石劣化及渗流特性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2109-2124.
- ZHANG Pei-sen, XU Da-qiang, YAN Wei, et al. Study on the influence of cyclic confining pressure on rock deterioration and seepage characteristics under different initial damage degrees[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2023, 42(9): 2109-2124.
- [39] 邓华锋, 张恒宾, 李建林, 等. 水-岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2344-2352.
- DENG Hua-feng, ZHANG Heng-bin, LI Jian-lin, et al. Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(7): 2344-2352.
- [40] 邓华锋, 王哲, 李建林, 等. 低孔隙水压力对砂岩卸荷力学特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊 1): 3266-3275.
- DENG Hua-feng, WANG Zhe, LI Jian-lin, et al. Experimental research about influence of low pore water pressure on unloading mechanical properties of sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(Suppl.1): 3266-3275.
- [41] 陈奕安, 许江, 彭守建, 等. 可视化三轴渗流-应力耦合伺服控制试验系统的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊 1): 3281-3292.
- CHEN Yi-an, XU Jiang, PENG Shou-jian, et al.

- Development and application of transparent triaxial seepage-stress coupling servo-control test system[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2023, 42(Suppl.1): 3281-3292.
- [42] 杨以荣, 谢红强, 肖明砾, 等. 卸荷条件下横观各向同性岩体扩容与能量特性分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1589-1599.
- YANG Yi-rong, XIE Hong-qiang, XIAO Ming-li, et al. Dilatancy and energy characteristics analysis of transverse-isotropic rock mass under triaxial unloading condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1589-1599.
- [43] 李建朋, 高岭, 母焕胜. 高应力卸荷条件下砂岩扩容特征及其剪胀角函数[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2119-2126.
- LI Jian-peng, GAO Ling, MU Huan-sheng. Dilatancy characteristics of sandstone and its function of dilatancy angle under high confining pressure and unloading conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(6): 2119-2126.
- [44] 李胤达, 尚涛, 韩流, 等. 砂岩三轴卸荷路径下的力学特征及能量演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3): 621-632.
- LI Yin-da, SHANG Tao, HAN Liu, et al. Mechanical characteristics and energy evolution of sandstone under triaxial unloading path[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2023, 40(3): 621-632.
- [45] 程建超, 贾震, 侯孟冬, 等. 砂岩三轴循环加卸载变形特性分析及扩容逾渗模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2687-2699.
- CHENG Jian-chao, JIA Zhen, HOU Meng-dong, et al. Percolation modelling of dilation deformation evolution of sandstone under tri-axial cyclic loading-unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(11): 2687-2699.
- [46] 刘新荣, 刘俊, 李栋梁, 等. 不同初始卸荷水平对深埋砂岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3081-3088.
- LIU Xin-rong, LIU Jun, LI Dong-liang, et al. Experimental research on the effect of different initial unloading levels on mechanical properties of deep-buried sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(11): 3081-3088.
- [47] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729-1740.
- XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(9): 1729-1740.
- [48] 宋义敏, 姜耀东, 马少鹏, 等. 岩石变形破坏全过程的变形场和能量演化研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1352-1356.
- SONG Yi-min, JIANG Yao-dong, MA Shao-peng, et al. Evolution of deformation fields and energy in whole process of rock failure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 1352-1356.
- [49] 丛宇, 王在泉, 郑颖人, 等. 不同卸荷路径下大理岩破坏过程能量演化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3140-3147.
- CONG Yu, WANG Zai-quan, ZHENG Ying-ren, et al. Energy evolution principle of fracture propagation of marble with different unloading stress paths[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2016, 47(9): 3140-3147.
- [50] 王磊, 邹鹏, 范浩, 等. 循环荷载下深部卸荷煤体力学特性及能量演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(10): 2341-2355.
- WANG Lei, ZOU Peng, FAN Hao, et al. Study on mechanical properties and energy evolution of deep unloading coal under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(10): 2341-2355.
- [51] 邓华锋, 支永艳, 段玲玲, 等. 水-岩作用下砂岩力学特性及微观结构损伤演化[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3447-3456.
- DENG Hua-feng, ZHI Yong-yan, DUAN Ling-ling, et al. Mechanical properties of sandstone and damage evolution of microstructure under water-rock interaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3447-3456.
- [52] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1409-1417.
- HE Man-chao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(8): 1409-1417.