



多元扰动行为下深部高应力煤体扩容与压实特性

刘超 田加宝 戚靖骅 王亮 段敏克 余北辰 刘众众

引用本文：

刘超, 田加宝, 戚靖骅, 等. 多元扰动行为下深部高应力煤体扩容与压实特性[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 125–137.
LIU Chao, TIAN Jiabao, QI Jinghua. Dilatancy and compaction characteristics of deep high-stressed coal under multiple disturbance behaviors[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 125–137.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-1191>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应力对含瓦斯煤解吸特征影响的试验研究

Study on influence of stress on desorption characteristics of coal containing gas
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 35–43 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d841ce1c-82e2-4d88-9ec3-117b4f4e31a9>

循环荷载下含瓦斯煤力学特性及应变场演化规律研究

Study on the mechanical properties and strain field evolution of gas-bearing coal under cyclic loading
煤炭科学技术. 2024, 52(6): 90–101 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0328>

小构造与开采扰动下深井煤巷应力演化规律与能量分源控制

Stress evolution law and energy source control of deep coal roadway under small geological structure and mining disturbance
煤炭科学技术. 2025, 53(9): 275–291 <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0792>

不同温度和吸附压力下含瓦斯煤自燃微观分形特征

Fractal characteristics of spontaneous combustion of gas-bearing coal under different temperature and adsorption pressure conditions
煤炭科学技术. 2025, 53(5): 213–232 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0354>

爆破扰动高应力巷道围岩力学响应特征研究

Study on the dynamic response characteristics of surrounding rock in high stress tunnel under blasting disturbance
煤炭科学技术. 2024, 52(6): 1–13 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1177>

循环载荷条件下含瓦斯煤渗透率演化规律分析

Analysis of permeability evolution law of gas-bearing coal under cyclic loading condition
煤炭科学技术. 2025, 53(S1): 151–164 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1893>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘超,田加宝,戚靖骅,等.多元扰动行为下深部高应力煤体扩容与压实特性[J].煤炭科学技术,2025,53(10):125-137.
LIU Chao, TIAN Jiabao, QI Jinghua, et al. Dilatancy and compaction characteristics of deep high-stressed coal under multiple disturbance behaviors[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 125-137.

多元扰动行为下深部高应力煤体扩容与压实特性

刘超^{1,2},田加宝³,戚靖骅²,王亮⁴,段敏克¹,余北辰⁴,刘众众²

(1.安徽理工大学 安徽省关闭废弃矿井资源开发利用工程研究中心,安徽 淮南 232001;2.中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116;
3.兖矿能源集团股份有限责任公司济宁三号煤矿,山东 济宁 272000;4.中国矿业大学 煤矿灾害防控国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:深部煤体处于高地应力环境中,其在外界扰动作用下的力学与变形行为不同于浅部煤层。由此进行了多种扰动模式(高压注水、卸压钻孔和循环加卸载)下高应力含瓦斯煤体加载破坏试验。研究表明:高应力煤体趋向延性状态转化,未出现明显的峰后应力降。以剪切和拉伸型破裂为主的深部高应力煤体表现出峰后线性扩容行为。相比纯力学破坏,含水平孔和高压注水煤体的强度分别降低了29.1%和4.1%,它们对煤体力学性能和强度的劣化机制不同,前者是由垂向变形持续增加引起钻孔塌陷和压实区形成所致;后者是由于高压注水抵消了裂隙面法向应力,促使水平向煤体快速膨胀,导致其扩容失稳,诱发剪切破断所致。含水平孔煤体在峰值应力处的剪胀系数 $\beta=-1.524<0$,也表明其处于压实状态,利用单屈服面模型证明了其在峰后出现体积压实行为的合理性。等幅加卸载扰动对弹性高应力煤体力学性能起着循环强化作用,其强度提升了18.0%~27.0%,出现了显著的峰后扩容行为。由于卸荷作用对煤体变形影响更大,其各向不可恢复压实应变($\Delta\varepsilon_h$ 、 $\Delta\varepsilon_v$ 和 $\Delta\varepsilon_{hv}$)随加载次数增加而增大,表现为各向呈压缩趋势的应变硬化现象,这与循环加卸载对岩石产生疲劳损伤现象相反。研究成果可为深部高能煤层解危、立体缝网改造和渗流评估等工程问题提供借鉴。

关键词:含瓦斯煤;深部高应力;扰动;扩容;压实

中图分类号:TD821 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2025)10-0125-13

Dilatancy and compaction characteristics of deep high-stressed coal under multiple disturbance behaviors

LIU Chao^{1,2}, TIAN Jiabao³, QI Jinghua², WANG Liang⁴, DUAN Minke¹, YU Beichen⁴, LIU Zhongzhong²

(1. Anhui Engineering Research Center of Exploitation and Utilization of Closed/Abandoned Mine Resources, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Jining No.3 Coal Mine, Yankuang Energy Group Co., Ltd., Jining 272000, China; 4. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The mechanical and deformation behavior of deep high-stressed coal seams under ambient disturbance is different from that of shallow coal seams. Based on this, the effects of various disturbance schemes i.e., high-pressurized water injection, depressurized borehole and cyclic loading-unloading, on failure mechanical behavior of gas-bearing coal under high confining pressure constraint are investigated experimentally. The results show that high-stressed coal tends to ductile state transformation without significant post-peak stress drop. Deep high-stressed coal dominated by shear and tensile fracture exhibited post-peak linear dilatancy behavior. Compared with the pure mechanical failure, the strength of coal with horizontal borehole and pressurized water is decreased by 29.1% and 4.1%, respectively, and their degradation mechanisms for coal strength and mechanical properties were different. The former is induced by the continuous increase of vertical deformation, resulting in borehole collapse and compaction zone formation. The latter is induced by pressurized water

收稿日期:2024-08-19 策划编辑:朱恩光 责任编辑:刘雅清 DOI: 10.12438/cst.2024-1191

基金项目:深地国家科技重大专项资助项目(2024ZD1004501);国家自然科学基金资助项目(52304265);安徽省关闭/废弃矿井资源开发利用工程研究中心开放基金资助项目(EUCMR202304)

作者简介:刘超(1990—),男,山东泰安人,副教授,博士。E-mail: liuc_rm@cumt.edu.cn

通讯作者:王亮(1982—),男,江苏连云港人,教授,博士。E-mail: wangliang@cumt.edu.cn

counteracting the normal stress of fracture surface, which promotes the rapid expansion of coal in horizontal direction, resulting in its dilatancy instability and subsequent shear failure. The dilatancy coefficient $\beta=-1.524<0$ at peak stress of coal within horizontal borehole also indicates that it is in a compacted state. The single yield surface model is used to prove the rationality of the post-peak compaction behavior of high-stressed coal within horizontal borehole. The loading-unloading disturbance at constant amplitude plays a cyclic reinforcement effect on the mechanical properties of elastic high-stressed coal, and its strength is increased by 18.0%–27.0% with significant post-peak dilatancy. Due to the greater influence of unloading on coal deformation, the irreversible compaction strain ($\Delta\epsilon_h$, $\Delta\epsilon_v$ and $\Delta\epsilon_b$) increases with the increasing loading times, and manifests as strain hardening with the compression trend in all directions, which is contrary to the fatigue damage induced by cyclic loading-unloading on rock. The research results can provide reference for major engineering issues such as deep high-energy coal seam risk solving, three-dimensional fracture network reconstruction and seepage assessment.

Key words: gas-bearing coal; deep high stress; disturbance; dilatancy; compaction

0 引言

在相当长一段时间内我国以煤炭为主的能源格局不会改变^[1]。当前,深部煤炭资源开发已成为常态。深部煤层处于高应力和循环加卸载扰动作用下,强动力灾害、瓦斯难抽采、围岩大变形等棘手问题频发^[2-5]。为此,应对深部煤层进行力学性能改造,常见手段有煤层注水^[6]和卸压钻孔^[7]等。学者们对循环荷载作用下煤岩体的变形、强度、损伤演化和能量耗散进行了广泛研究。段敏克等^[3]开展了低最小主应力 σ_3 ($\sigma_3=6, 8, 10$ MPa)下的分级循环扰动试验,得出煤岩耗散能呈指数增大。FENG 等^[8]对硬岩(花岗岩、大理石和砂岩)进行了真三轴循环加卸载试验,研究了岩石力学特性随累积损伤的变化规律。魏明尧等^[9]研究了微扰动(轴压变化 3 MPa→1 MPa→3 MPa)对围岩损伤的影响,认为循环扰动随着埋深增加,加剧了围岩损伤程度和范围,也有可能破坏后进入塑性损伤状态。上述循环荷载对岩石的损伤劣化作用主要集中在屈服变形阶段。CHEN 等^[10]开展了砂岩、混凝土等试件在弹性变形阶段的循环荷载试验,得出前 100 次循环扰动对试件起到了力学性能强化作用。以上述为代表的岩石循环扰动力学特性研究较少涉及深部高应力煤体,需要对其进行深入研究。对于深部含孔煤体:一方面,钻孔卸压是防冲重要手段^[7];另一方面,深部煤层抽采钻孔塌孔失稳问题严重阻碍了瓦斯高效开发^[11]。张学博等^[11]研究了深煤层抽采钻孔变形失稳机制,得出地应力是其失稳变形的主控因素。包凯等^[12]采用 Monte Carlo 方法生成煤层钻孔周围随机裂隙,认为随机裂隙的存在加大了破碎煤层段井筒周围塑性范围,孔壁呈剪切破坏模式。姚向荣等^[13]利用 FLAC^{3D} 对抽采钻孔进行数值模拟,得出钻孔径向位移和围岩塑性区半径随着侧压系数增大而增大,而钻孔稳定性随之降低。此外,煤层注水作为防冲防尘的另一常

见手段,蒋长宝等^[6]对不同含水率原煤进行了渗流力学试验,得出煤样强度和变形模量均随含水率增大呈减小趋势,而径向应变、体积应变及侧向膨胀率呈增大趋势。毛彦军等^[14]采用 CT 扫描技术,通过重构三维煤岩孔隙结构,得出煤样孔隙率、损伤单元数等随着注水压力增大而递增。刘超等^[15]通过对高压注水作用下完整原煤呈的破坏模式与中间主应力相关。同样,以上述为代表的含孔煤体/高压注水煤体变形特性的研究也较少涉及试验角度下的深部高应力煤体,需要对其进行深入研究。

综上所述,深部高应力作用下煤层对外界环境刺激的力学响应由弹脆性向黏弹塑性转变^[16]。不同刺激作用下,煤体强度变化规律、高应力扩容行为和塑性大变形发生机制等需要深入研究。进一步,由于地质构造活动和采动应力效应使得煤层的主应力呈真三轴应力状态($\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$)^[17],不同主应力对煤体的变形作用不同,常规三轴加卸载路径不能区分水平向真实应变。由此基于真三轴流固耦合试验平台开展多种扰动模式(高压注水、泄压孔和循环加卸载)下高应力含瓦斯煤体加载破坏试验,以期为深部煤炭资源安全高效开发提供参考。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置

试验平台为重庆大学自主研发的多功能真三轴流固耦合试验系统^[17],如图 1 所示。该装置压力室内 6 个加载板可独立控制。以 100 mm 立方体受力煤岩试样为例,最大水平主应力方向(H 向)和垂向应力方向(v 向)能够提供最大 600 MPa 的应力,最小水平主应力方向(h 向)可提供最大 400 MPa 的应力,还可提供最大 60 MPa 的流体压力。加载模式有“力控制”“位移控制”等多种模式,可以实现复杂应力路径下煤岩流固耦合特性的多物理场真三轴试验研究。图 2 为该装置流体注入示意。



图 1 多功能真三轴流固耦合试验系统^[2]
Fig.1 Multi-functional true triaxial fluid-solid coupling experiment system^[2]

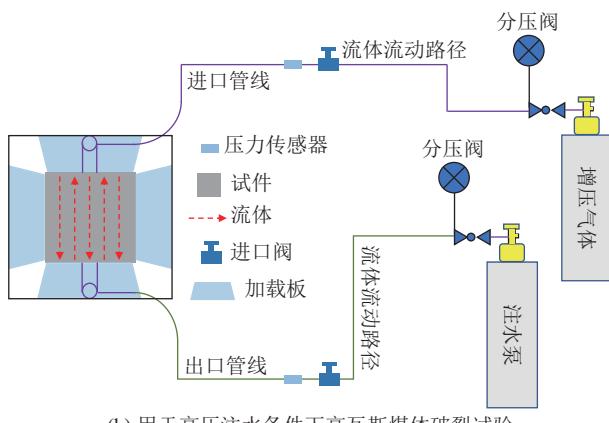
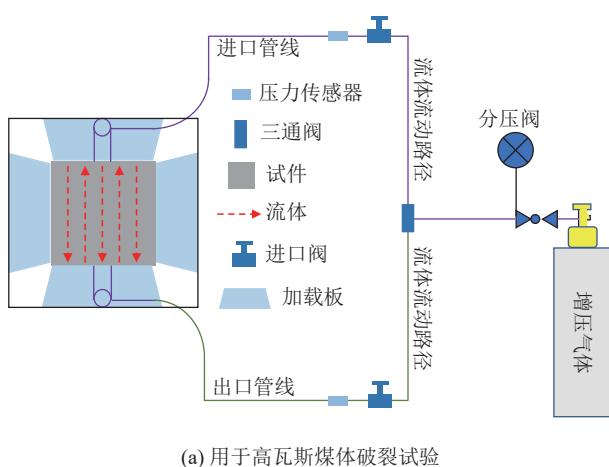


图 2 流体注入示意
Fig.2 Fluid injection diagram

1.2 煤样

试验用煤样取自川煤集团白皎煤矿 2461 工作面。现场采取原煤大块, 并用保鲜膜包裹防止风化。然后运至实验室, 经过钻取、切割、打磨、烘干等工序, 形成 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的立方体试件。试件误差标准满足相对端面间不平行度误差小于 0.02 mm 。加工成型的原煤试件及扫描电镜(SEM)下微观结构如图 3 所示。原煤试件的基本力学参数

见表 1。

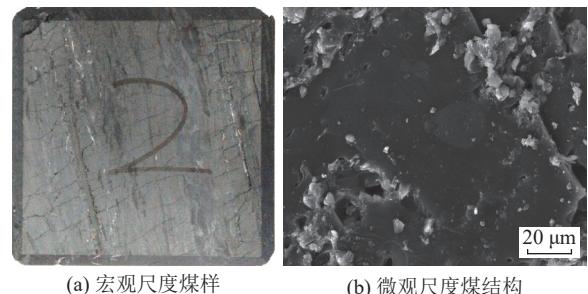


图 3 立方体煤样及其微观结构
Fig.3 Cubic coal specimen and its microstructure

表 1 煤样单轴抗压强度(UCS)、弹性模量(E)、抗拉强度(σ_t)和抗剪强度(τ)
Table 1 Uniaxial compressive strength (UCS), elastic modulus (E), tensile strength (σ_t), and shear strength (τ) of coal

方向	UCS/MPa	E/GPa	σ_t/MPa	τ/MPa
垂直层理面	26.79	2.85	2.55	6.29
平行面割理	23.82	3.19	2.27	5.69
平行端割理	18.19	3.20	1.92	5.01

1.3 试验方案

深部煤层趋于静水应力环境。首先以力控制模式, 将各向主应力以 0.05 MPa/s 的速率加载至 60 MPa 静水压力。待各向位移传感器示数稳定后, 通过流体(甲烷 CH_4 和水)进口端和出口端, 向完整或含孔(孔径 10 mm 、孔深 50 mm)煤样内注入 $4 \text{ MPa} \text{ CH}_4$, 待示数稳定后, 对原煤进行不同扰动刺激作用下的力学行为研究。

方案 1: 保持水平应力(σ_h 和 σ_h)不变, 垂向(σ_v)(图 1)切换至位移控制模式, 加载垂向应力(σ_v)至完整立方体煤样破坏。目的是研究气体压力对原煤变形特性的影响(图 2a)。

方案 2: 保持水平应力不变, 打开出口端阀门, 待

瓦斯压力降至大气压(0.1 MPa)后,在出口端进行增压注水8 MPa,待示数稳定后,垂向以位移控制方式将完整原煤加载至破坏。目的是研究深部原位注水对原煤变形特性的影响(图2b)。

方案3:保持水平应力不变,将装置加载室内钻孔轴线与垂向应力平行或垂直的高瓦斯原煤试样加载至破坏。目的是研究钻孔位置对原煤变形特性的影响(图2a)。

方案4:保持最小水平应力(σ_h)和垂向应力(σ_v)不变,对最大水平应力(σ_H)进行低幅和高幅的循环加载卸载,幅度分别为60 MPa→45 MPa→60 MPa和60 MPa→20 MPa→60 MPa,次数为40次。循环扰动结束后,保持60 MPa水平应力不变,将完整煤样加载至破坏。目的是研究扰动幅度对深部高应力原煤

变形特性的影响(图2a)。

对照组:直接将完整原煤加载至60 MPa静水压力,然后垂向应力加载至煤体破坏。此过程不通气、不注水、无循环加载扰动及未钻孔。

2 高应力煤体力学行为

煤体在不同扰动刺激模式下的破裂形貌、变形行为和强度特性见表2、图4和图5。一方面,静水压力加载至10 MPa的过程中,煤体内大部分孔隙裂隙快速闭合,表现为图4中加载初始段的上凹型曲线;静水压力由10 MPa加载至60 MPa的过程中,煤体基本上处于线弹性应力状态。另一方面,煤样在高围压下的加载段并没有明显的弹塑性区分。煤样在高应力状态下的加载破坏具有以下特点。

表2 高应力原煤破裂形貌

Table 2 Fracture morphology of coal subjected to high stress

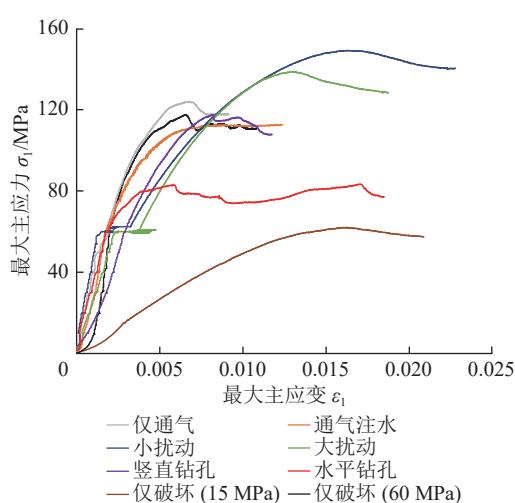
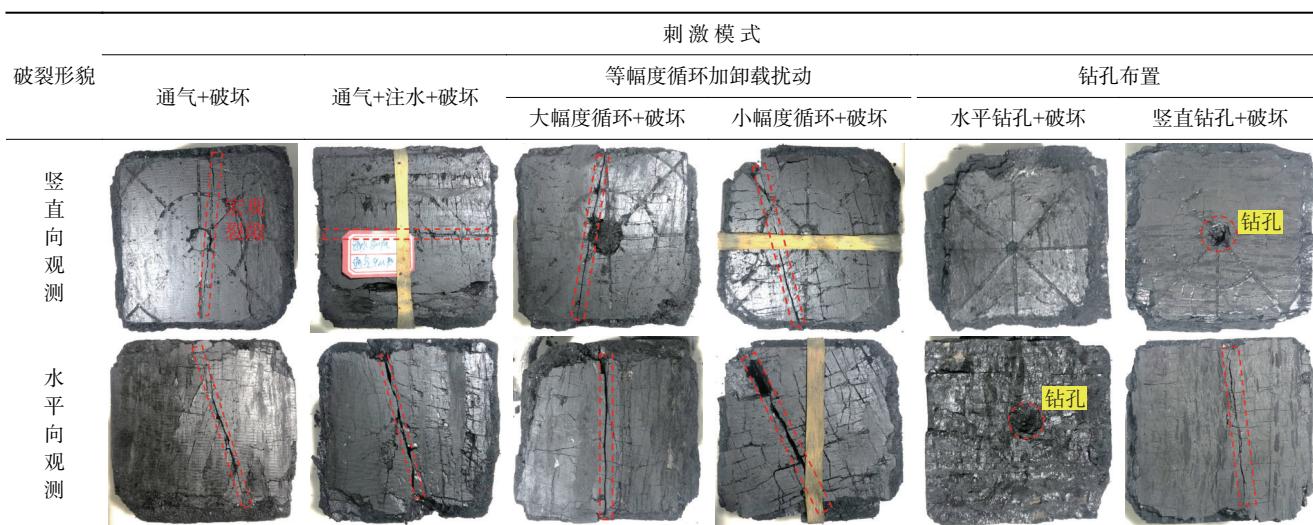


图4 最大主应力 $\sigma_1(=\sigma_v)$ 与最大主应变 $\varepsilon_1(=\varepsilon_v)$ 关系

Fig.4 Major stress versus major strain

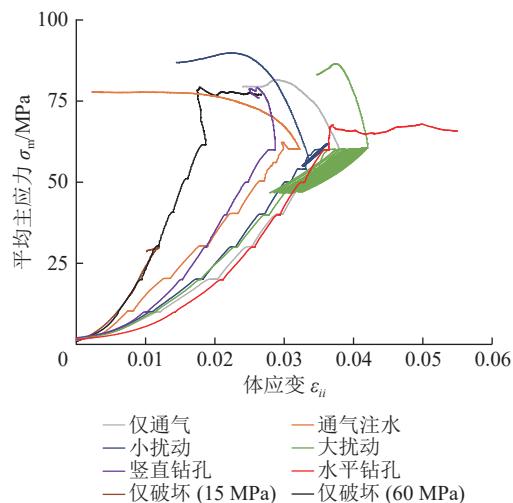


图5 平均主应力 $(\sigma_m=(\sigma_H+\sigma_v+\sigma_h)/3)$ 与体应变关系

Fig.5 Mean stress $(\sigma_m=(\sigma_H+\sigma_v+\sigma_h)/3)$ versus volumetric strain

1) 大幅度循环扰动作用下,煤体以拉伸破坏为主(表2)。基于单屈服面和双屈服面模型的分岔理论可知^[18], $\sigma_1=\sigma_2>\sigma_3$ 且 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 较大是岩土体最容易形成膨胀变形带和拉伸破坏的轴向拉伸环境,因此煤体在60 MPa→20 MPa→60 MPa的循环扰动下可能会以拉伸型破坏为主。含水平孔煤体在峰值应力前抵抗变形能力最弱,随着应力加载,整个煤体呈不断被压实的变形特性,最后在峰后出现了钻孔塌陷和闭合,未出现明显的宏观裂隙。含水平孔煤体的这种变形破坏模式与“峰前剪胀扩容、峰后应变软化”的脆性断裂模式明显不同^[19],研究其扩容与压实行为成为关键。其他刺激模式下,煤体宏观裂隙与最大主应力呈一定角度,以剪切破坏模式为主。

2) 不同环境作用下,高应力煤体表现出明显的强度和变形差异,出现了峰后扩容(峰前也未出现明显扩容)和压实这2种力学机制完全不同的变形行为,同时也没有出现类似于脆性砂岩^[20]、浅部低围压受力煤体破坏时的显著应力跌落现象(包括煤样在围压15 MPa下的破坏,如图4和表3所示)^[21]。多孔岩石在峰值应力后出现明显的应力降特性为典型的脆性断裂特征^[19],高地应力状态使深部岩体由弹脆性趋于黏弹塑性转变^[16],试验所用煤样在高应力作用下表现出较大的延性潜力。不同作用方式下,煤体脆性指数B见表3。其中, $B=(\sigma_p-\sigma_r)/\sigma_p$; σ_p 为峰值强度; σ_r 为残余强度。由于没有显著的脆性跌落, B 很小。

表3 高应力原煤在不同刺激模式下的力学行为

Table 3 Mechanical behavior of coal subjected to high stress under different stimulation modes

		刺激方式($\sigma_2=\sigma_3=60$ MPa)				力学行为				
通气 (4 MPa)	注水 (8 MPa)	扰动		泄压孔		峰值应力 σ_v /MPa	应力 跌落	脆性 指数 ^[22]	变形特性	
		小幅度	大幅度	竖直孔 (// σ_v)	水平孔 ($\perp \sigma_v$)				峰值应力前	峰值应力后
×	×	×	×	×	×	117.5	轻微	0.064	轻微扩容	压实
√	×	×	×	×	×	123.9	无	≈0	扩容	扩容
√	√	×	×	×	×	112.7	轻微	0.049	扩容	扩容
√	×	√	×	×	×	149.2	轻微	0.059	扩容	扩容
√	×	×	√	×	×	138.7	轻微	0.075	扩容	扩容
√	×	×	×	√	×	117.5	轻微	0.027	扩容	轻微扩容转压实
√	×	×	×	×	√	83.3	轻微	0.073	体积几乎不变	压实

3) 深部煤体处于高地应力、高孔隙压力及强开采扰动环境中,发生强动力灾害、瓦斯难抽采和围岩大变形等工程难题的可能性明显增大^[4-5]。在不同刺激作用下,含水平孔高应力煤体强度最小,其次是含气注水煤体。相比煤体在60 MPa围压下的纯力学破坏,其强度分别下降了29.1%和4.1%,起到了有效的释能解危效果。这由图4中应力-应变所围面积可知,与煤层防冲、防突进行卸压钻孔和高压注水作业,从而降低煤层强度、释放较高弹性势能的目的致。然而,在高应力作用下,深部煤层可能会出现塑性大变形^[23],图5中含水平孔煤体出现了峰后体应变一直增大、体积不断压实的试验现象,其背后的力学机制和形成的可能性将在后文分析。

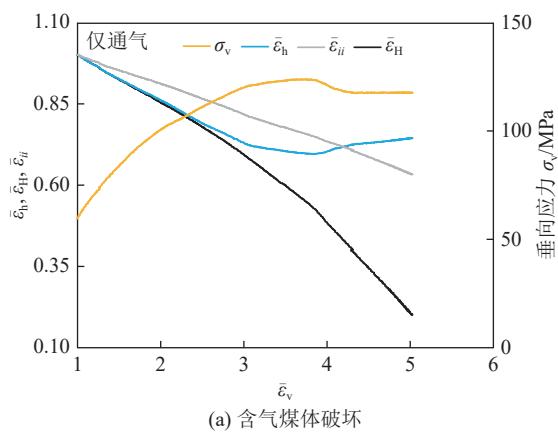
4) 不同于应力循环加卸载导致煤岩体损伤劣化,实验采取的峰前等幅度循环加卸载扰动对高应力煤体起到了显著的力学性能提升作用,强度提高了18.0%~27.0%。在进行循环加卸载扰动破煤时,尤

其是对于频繁微扰动^[9],存在强度大幅增大的可能性,对此应重点关注。深部高应力-高孔隙压力环境下,煤岩强度增大有利于结构稳定性,但增大过程中,需要考虑煤体变形及裂隙扩展对渗流的影响,以及强度-变形-渗流行为对煤与瓦斯安全共采的平衡关系。

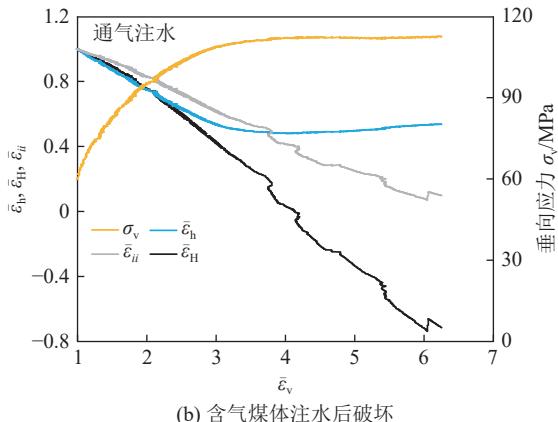
3 注水条件下高应力含气煤体变形

对各向异性主应变采取归一化处理,即:以 $\sigma_H=\sigma_v=\sigma_h=60$ MPa下的各向主应变为基点,对 $\sigma_v \geq 60$ MPa范围内的应变进行归一化处理。其中,各向异性归一化主应变分别表示为 $\bar{\varepsilon}_v$ 、 $\bar{\varepsilon}_H$ 和 $\bar{\varepsilon}_h$,归一化体应变为 $\bar{\varepsilon}_{ii}$ 。图6为含气煤体在增压水作用前后 $\bar{\varepsilon}_h$ 、 $\bar{\varepsilon}_H$ 、 $\bar{\varepsilon}_{ii}$ 和垂向应力 σ_v 随 $\bar{\varepsilon}_v$ 的变化情况。整体上,含气煤样和含气注水煤样的应变变化趋势一致,即随着垂向应力的加载,煤样在H向上始终膨胀;在h向上,煤体在峰值应力前处于膨胀状态,在峰值应力后

转为压缩,这是由边界条件为力控制所致。也就是,煤样在破坏瞬间,由于H向上煤体膨胀量大,而h向在力控制边界条件下,为了保持应力不变,不断在h向上压缩煤样。此外,两者均呈剪切破坏模式(表2),水压愈高,越利于抵消裂隙面的法向应力^[24],相比含高压瓦斯煤体,高水压进一步减小了煤体发生剪切破坏所需的应力,含气注水煤样侧向膨胀量更大,导致其强度降低。试验所用高瓦斯煤样的破坏强度相比纯力学破坏条件下的煤样出现了小幅增大,但在正常误差范围内,可以认为这是由煤样之间的结构离散性造成的。煤层注水作为一种常见的防突手段,应重点研究其对煤层能量的分配机制及耗散规律^[6]。



(a) 含气煤体破坏



(b) 含气煤体注水后破坏

图6 含气煤体增压注水前后 $\bar{\varepsilon}_h$ 、 $\bar{\varepsilon}_H$ 、 $\bar{\varepsilon}_{ii}$ 和 σ_v 随 $\bar{\varepsilon}_v$ 的变化
Fig.6 $\bar{\varepsilon}_h$, $\bar{\varepsilon}_H$, $\bar{\varepsilon}_{ii}$, and σ_v are plotted versus $\bar{\varepsilon}_v$ of gas-bearing coal before and after water injection

4 高应力煤体等幅扰动变形

4.1 煤体破裂及各向主变形特性

弹性区等幅循环加卸载作用下,高应力煤体的破裂形貌见表2。可知,煤体在小幅度和大幅度循环作用下,分别形成了以剪切为主和以拉伸为主的破裂,均属于准脆性破裂。在循环荷载作用期间,煤体呈现出压实特性,可用不可恢复变形程度($\Delta\varepsilon_{H,j}$ 、 $\Delta\varepsilon_{v,j}$ 、

$\Delta\varepsilon_{h,j}$ 和 $\Delta\varepsilon_{ii,j}$)表征其压实过程,如第j次循环加卸载至 $\sigma_H=60$ MPa时, $\Delta\varepsilon_{H,j}=\varepsilon_{H,j}-\varepsilon_{H1}$, $\Delta\varepsilon_{v,j}=\varepsilon_{v,j}-\varepsilon_{v1}$, $\Delta\varepsilon_{h,j}=\varepsilon_{h,j}-\varepsilon_{h1}$, $\Delta\varepsilon_{ii,j}=\varepsilon_{ii,j}-\varepsilon_{ii1}$ (图7)。图8为不可恢复各向异性主应变和体应变随加载次数N的变化情况。由图可知, $\Delta\varepsilon_H$ 、 $\Delta\varepsilon_v$ 、 $\Delta\varepsilon_h$ 和 $\Delta\varepsilon_{ii}$ 随N增加呈增大趋势,表现为煤体处于压实状态,并未出现煤体随着循环加卸载次数增加而力学参数劣化的现象。最终在不同幅度循环加卸载下,煤体强度均出现明显增加(表2),CHEN等^[10]在单轴压缩条件下,对砂岩进行循环加卸载时也得出了类似的结论。因煤岩自身结构的各向异性特性, $\Delta\varepsilon_H$ 并未因 σ_H (垂直于层理面)的循环加卸载而造成最大不可恢复量。此外,从破坏形貌上看(表2中小幅度水平向视图),煤体在小幅度扰动

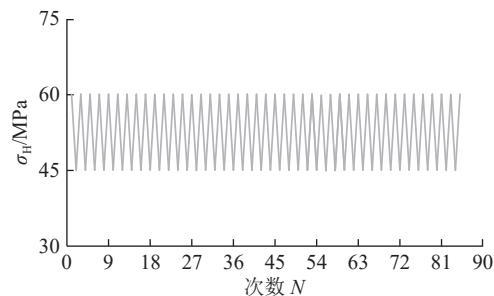
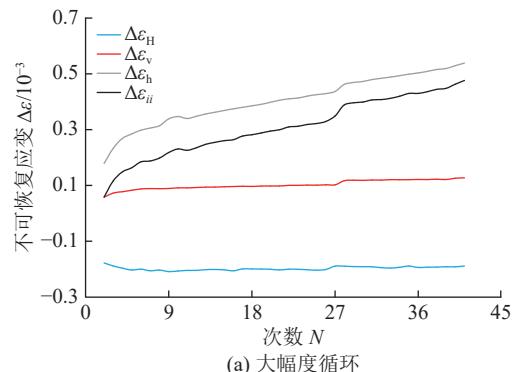
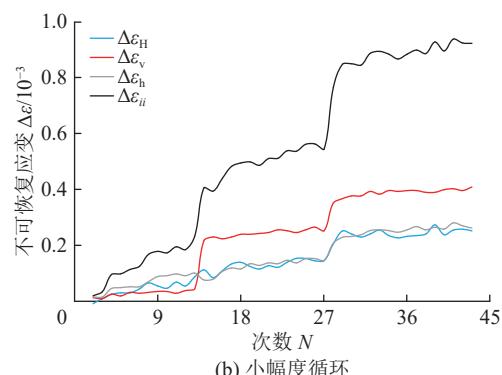


图7 等幅循环加卸载应力路径

Fig.7 Constant amplitude cyclic loading-unloading stress path



(a) 大幅度循环



(b) 小幅度循环

图8 煤体在循环扰动下不可恢复应变与加载次数的关系

Fig.8 Relationship between irreversible strain and loading times of coal subjected to cyclic disturbance

下激活了以割理为代表的天然闭合裂隙(在高应力下被掩盖),它们“均匀”地分布于煤体,而不是聚集在宏观剪切破断面附近,且煤体脆性指数也在小幅度循环加卸载后增大,这些特性有利于体积压裂,使煤层形成复杂缝网。然而,煤体在循环加卸载弹性压实后,渗流通道部分闭合,渗流路径的迂曲状况也更加复杂。多孔介质平均迂曲度计算式^[25]为

$$\delta = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{1-\varphi}}{4} + \sqrt{1-\varphi} \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{1-\varphi}} - 1 \right)^2 + \frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中: δ 和 φ 分别为煤体的迂曲度和孔隙率, $d\varphi = dV/V \approx dV/V_0 = d\epsilon_{ii}$ ^[26]; V_0 为煤体初始体积, m^3 ; V 为煤体当前应力状态下体积, m^3 。

图 9 为煤体迂曲度随加载次数的变化情况。可知:①循环加卸载次数的增加同样导致了煤体渗流路径迂曲度 δ 增大,不利于瓦斯抽采;②大幅度和小幅度循环扰动期间 δ 分别增大了 6.9% 和 1.4%,其增量有限。因此,需要注意弹性循环加卸载阶段的力学强化、压实变形效应和迂曲度增大对深部难抽软煤层的立体缝网改造压裂、渗透性能提升与煤层稳定性之间的平衡关系。

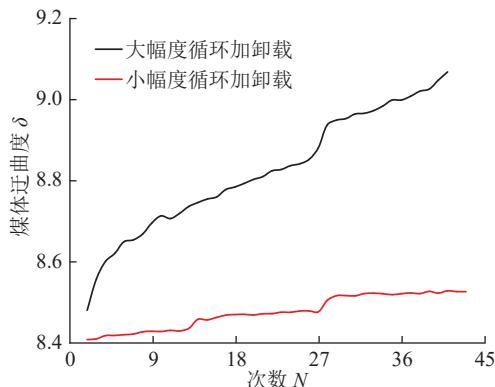


图 9 迂曲度与加载次数的关系

Fig.9 Relationship between tortuosity and loading times

4.2 应变硬化行为

以小幅度循环加卸载模式为例,选取图 7 中第 26 和 28 次加卸载进行应变行为分析,得到如图 10 所示的煤体真三轴各向应变变化情况,具有如下特性:① σ_h 在每一循环加卸载过程中, ϵ_h 和 ϵ_{ii} 增大,煤体在 H 向(垂直层理方向)上处于压缩状态;在泊松作用下, ϵ_h 和 ϵ_v 减小,煤体在 v 向和 h 向上膨胀。每一次循环加卸载均形成封闭的滞回环,表明煤体已经产生了不可恢复的侧向变形,造成了损伤^[10](图 11a),但弱于煤体力学性能的循环压实强化。② 随着循环

加载次数增加, ϵ_h 、 ϵ_v 、 ϵ_{ii} 和 $\bar{\epsilon}_h$ 均增大,滞回环右移,煤样在各向上均处于压缩状态(图 8)。 ϵ_h 和 ϵ_v 增大的原因为 σ_h 由 45 MPa 加载至 60 MPa 过程中煤体侧向(v 向和 h 向)因泊松效应引起的膨胀程度弱于 σ_h 由 60 MPa 卸载至 45 MPa 过程中煤体侧向的收缩效应,即煤体变形表现出卸荷强化效应,引起滞回环右移,图 11 中出现的“脚趾”形证明了上述观点。

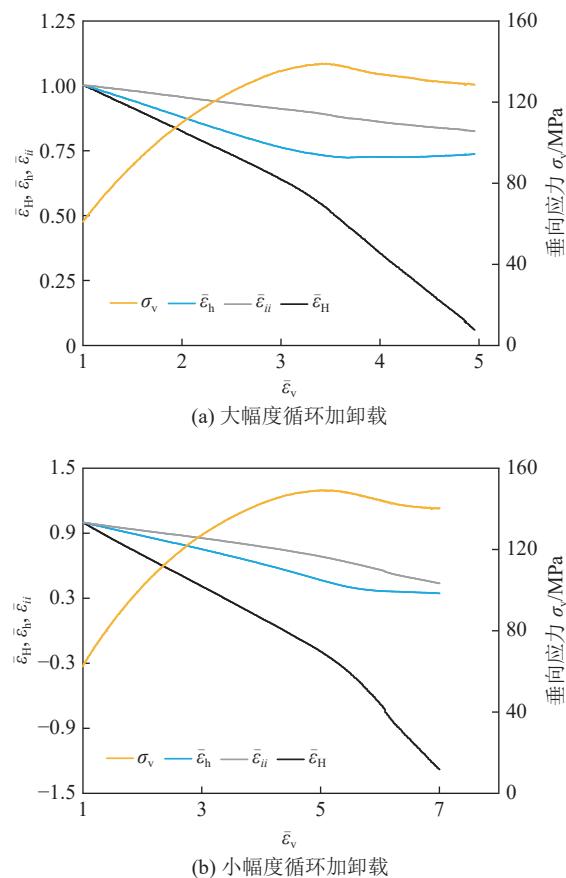


图 10 循环扰动作用下煤体 $\bar{\epsilon}_h$ 、 $\bar{\epsilon}_H$ 、 $\bar{\epsilon}_{ii}$ 和 σ_v 随 $\bar{\epsilon}_v$ 的变化

Fig.10 $\bar{\epsilon}_h$, $\bar{\epsilon}_H$, $\bar{\epsilon}_{ii}$ and σ_v are plotted versus $\bar{\epsilon}_v$ of coal subjected to cyclic disturbance

进一步,以第 26 次循环加卸载为例,弹性煤体 ϵ_h 随 σ_h 加载呈良好的线性关系。由于强卸荷效应产生了“脚趾”形,使得 ϵ_h 在 σ_h 卸载末端与其具有较弱的线性关系。在对煤岩进行扰动刺激中,扰动应力方向垂直于层理面, HOL 等^[27]认为大多数微裂隙沿着层理结构发育,可认为扰动应力相当于煤岩内大部分受力裂隙的法向应力,可利用 Bandis-Barton(B-B)模型对深部高应力煤体在趋于压实过程中所伴的应变硬化行为进行合理的应力-应变关系量化^[28]。

4.3 深部扩容型高应力煤体变形行为

对于深部扩容型高应力煤体,可知 $\bar{\epsilon}_{ii}$ 与 $\bar{\epsilon}_v$ 在整个

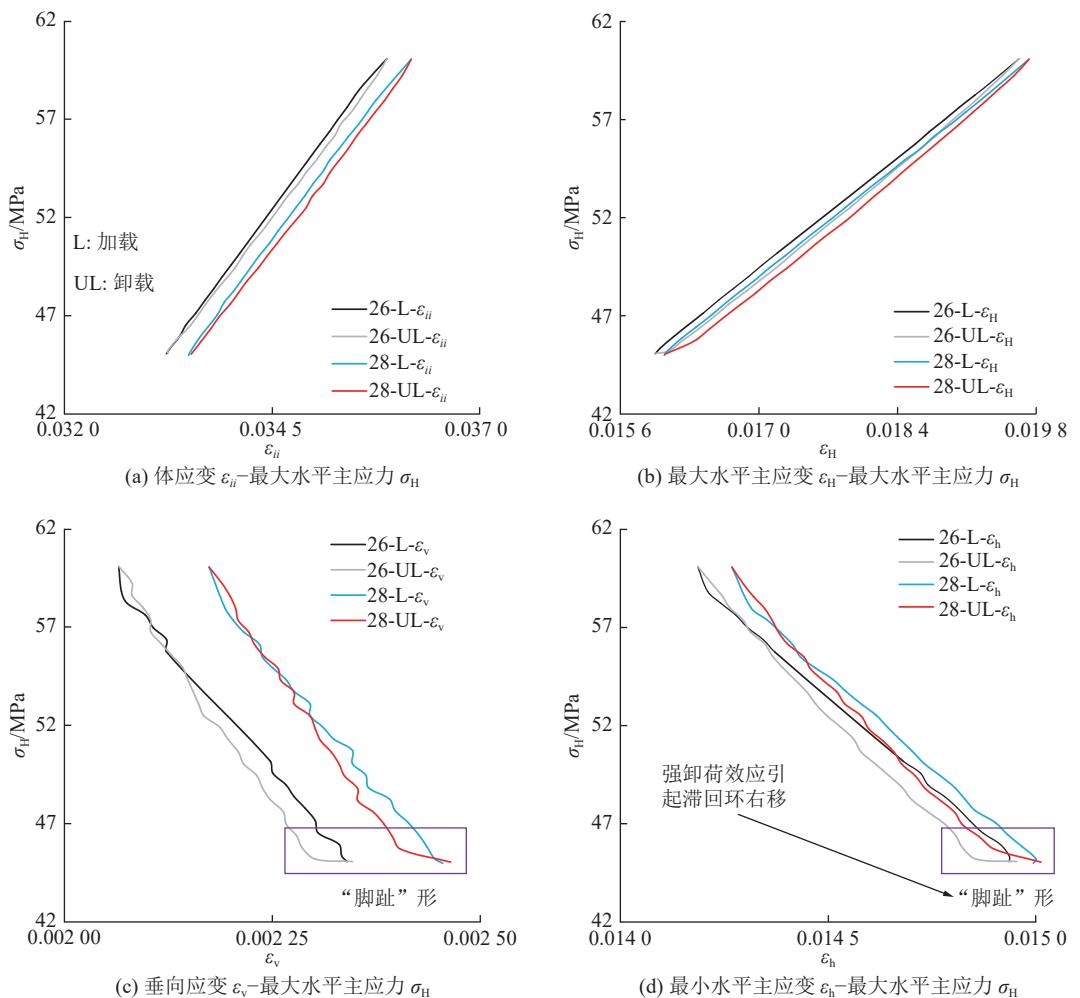


图 11 第 26 和 28 次循环扰动下各向变形及滞回环移动

Fig.11 Anisotropic deformation and hysteresis loop movement under the disturbance of the 26 th and 28 th cycles

加载阶段(峰值应力前后用星号区分)大致呈线性关系(图 12),这表明其在峰值应力后并未出现非线性体积快速膨胀现象,这与浅部低围压作用下破裂煤体的变形行为不同,整体上呈深部“弱脆性、强延性”的力学特性;此外,这种峰后归一化体应变的线性变化行为可能只受高应力状态控制,而与高压注水和等幅循环扰动等刺激作用无关。

5 含孔高应力煤体变形

5.1 含孔高应力煤体破裂及各向异性变形

WONG 等^[19]认为岩石脆性与延性之间的重要区别是宏观尺度上是否能够承受大量的永久应变而不发生宏观破裂。由表 2 可知,含水平孔煤样(简称 H-煤体)钻孔坍塌,未见明显的宏观破坏裂隙;含竖直孔煤样(简称 v-煤体)钻孔形状保持较好,呈剪切破坏。图 13 为含孔高应力煤体的归一化各向主应变和体应变随垂向应力(σ_v)加载的变化情况。一方面,结合图 6 可知,高压注水和含水平孔模式下煤体

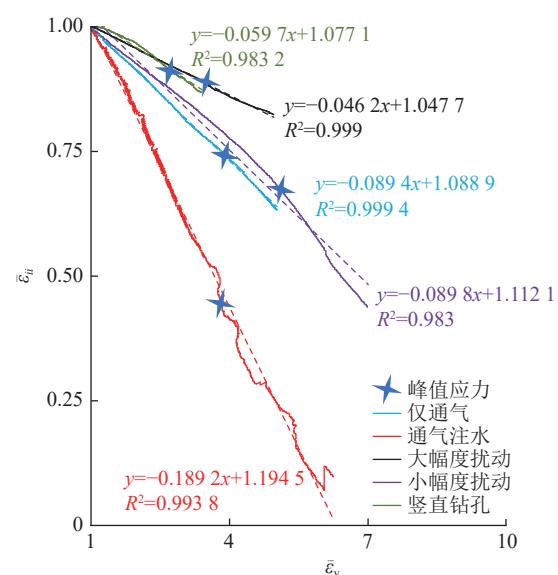


图 12 深部高应力煤体线性扩容行为

Fig.12 Linear dilatancy behavior of deep high-stressed coal

强度下降的力学和变形本质不相同。由于通气注水煤体内部随着加载产生了裂隙,引起侧向膨胀^[29],进

而诱发扩容失稳导致强度降低;由于含水平孔煤体钻孔塌陷引起垂向始终呈压缩状态,导致其不断压实变形,最终使煤体失去承载能力。由于压缩行为未出现突变,类似于软煤流变特性,煤体在达到峰值强度前应力起伏,缓慢增大。另一方面,2种布孔形式下,其各向变形均表现出明显的各向异性特性;相比v-煤体,H-煤体在达到峰值应力时的归一化 ε_v 更大(横坐标数值),表现为垂向上产生了更大的变形量,即压实潜力更大。在水平主应变上,H-煤体 $\bar{\varepsilon}_H$ 整体上缓慢增大,试样在H向呈压缩状态; $\bar{\varepsilon}_h$ 呈先减小后增大趋势,试样在h向上先膨胀后压实。v-煤体 $\bar{\varepsilon}_H$ 和 $\bar{\varepsilon}_h$ 整体减小,即在泊松效应下,试样水平向呈膨胀变形。上述变形特性受煤体自身各向异性结构特性、布孔位置和泊松效应的叠加控制所致。

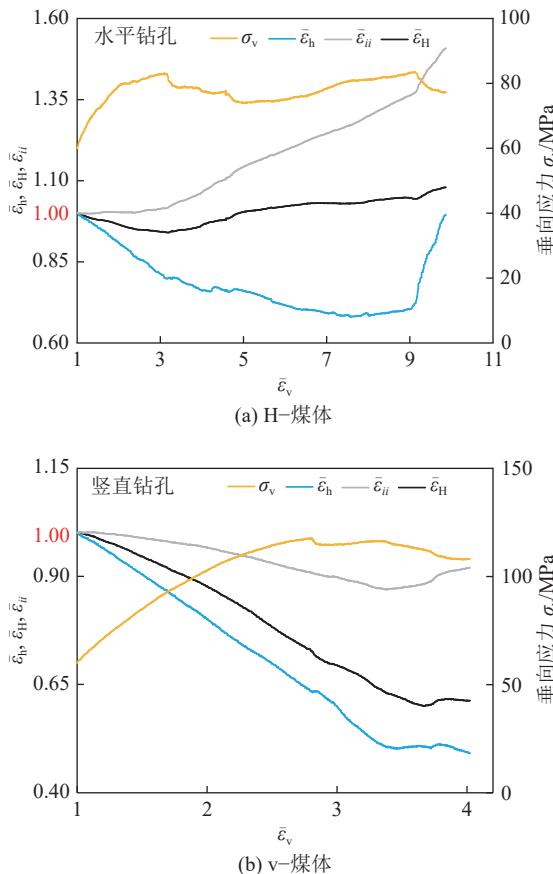


图 13 含孔煤体 $\bar{\varepsilon}_h$ 、 $\bar{\varepsilon}_H$ 、 $\bar{\varepsilon}_{ii}$ 和 σ_v 随 $\bar{\varepsilon}_v$ 的变化

Fig. 13 $\bar{\varepsilon}_h$, $\bar{\varepsilon}_H$, $\bar{\varepsilon}_{ii}$ and σ_v are plotted versus $\bar{\varepsilon}_v$ of coal containing boreholes

5.2 H-煤体变形

在致密和多孔岩石中,剪胀通常被视为脆性断裂的前兆,而碎裂压实流动的破坏可能伴随着正或负的体积变化^[19]。ISSEN等^[18]认为在合适的非弹性材料参数(包括剪胀系数和摩擦因数)下,轴对称

压缩路径($\sigma_2=\sigma_3$ 保持不变, σ_1 增大)更有利于形成岩石压实带。剪胀系数为塑性体积应变增量与塑性剪切应变增量之比^[30],计算式为

$$\beta = -\frac{d\varepsilon_{ii}^p}{d\bar{\gamma}^p} \quad (2)$$

其中, β 为剪胀系数; $d\varepsilon_{ii}^p$ 为塑性体应变增量; $d\bar{\gamma}^p$ 为塑性剪应变增量。 $d\varepsilon_{ii}^p$ 和 $d\bar{\gamma}^p$ 的计算式为

$$d\varepsilon_{ii}^p = d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_2^p + d\varepsilon_3^p \quad (3)$$

$$d\bar{\gamma}^p = \sqrt{\frac{2}{3}d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p} \quad (4)$$

塑性偏应变 $d\varepsilon_{ij}^p$ 的计算式为

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\varepsilon_{ij}^p - \frac{1}{3}\delta_{ij}d\varepsilon_v^p \quad (5)$$

式中: $d\varepsilon_1^p$ 、 $d\varepsilon_2^p$ 和 $d\varepsilon_3^p$ 分别为最大、中间和最小塑性主应变; δ_{ij} 为克罗内克符号。

摩擦因数可由破断角(或破坏角)给出^[31]:

$$\mu = \frac{2\sqrt{3}\sin\left(\frac{1}{4}\pi - \theta\right)}{3 - \sin\left(\frac{1}{4}\pi - \theta\right)} \quad (6)$$

式中: μ 为摩擦因数; θ 为煤岩破坏面与最大主应力间的夹角,(°)。

煤体在塑性区的各向主应变由弹性应变分量和塑性应变分量组成。为求解煤体在峰值应力处的弹性应变,认为图 14a 中阴影部分近似为煤体的弹性受力阶段。基于此,在弹性区对各向异性主应变等距取点得到图 14b 所示的线性拟合关系,其拟合效果良好,相关系数 $R^2>0.97$ 。在此基础上,预测煤体在峰值应力处的各向弹性主应变和各向塑性主应变。最后通过式(2)得到含水平孔煤体在峰值应力处的剪胀系数 $\beta=-1.524<0$,表明其随着垂向应力加载产生了压实变形响应。将 $\theta=90^\circ$ 代入式(6),得到煤体摩擦参数 $\mu=-0.661$ 。

局部化分岔理论可用于深部煤岩变形带演化趋势预测,利用单屈服面模型解释含水平孔原煤出现压实行为的合理性^[18],其压缩带、剪切带和膨胀带的控制范围分别为

$$\beta + \mu \leq -\frac{3(N_1 + \nu N_2)}{1 + \nu} \quad (7)$$

$$-\frac{3(N_1 + \nu N_2)}{1 + \nu} \leq \beta + \mu \leq -\frac{3(N_3 + \nu N_2)}{1 + \nu} \quad (8)$$

$$\beta + \mu \geq -\frac{3(N_3 + \nu N_2)}{1 + \nu} \quad (9)$$

由此得到 $\beta-\mu$ 平面上,受载煤岩材料出现压缩

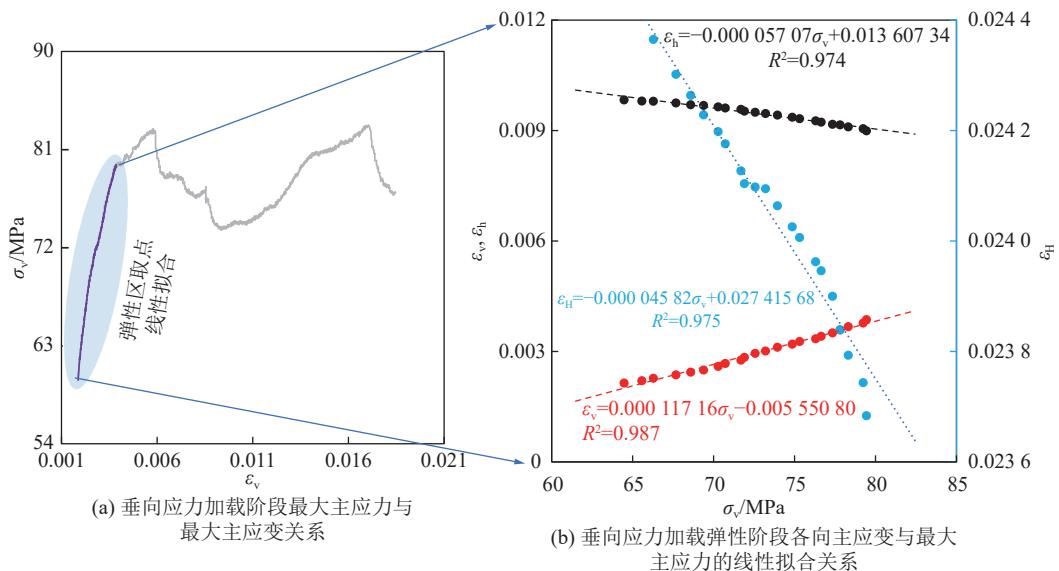


图 14 含水平孔煤体各向主应变与最大主应力之间的关系及拟合

Fig.14 Relationship and fitting between anisotropic strain and major stress of coal containing parallel borehole

带、剪切带与膨胀带的边界方程分别为

$$\beta_1 = -\mu - \frac{3(N_1 + \nu N_2)}{1 + \nu} \quad (10)$$

$$\beta_2 = -\mu - \frac{3(N_3 + \nu N_2)}{1 + \nu} \quad (11)$$

$$\beta_3 = \frac{\frac{1}{3}\mu\left(\frac{1}{\sqrt{1-\nu}} - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{\sqrt{2}}N_2}{\frac{1}{3}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\nu}} + \frac{1}{\sqrt{2}}\right)} \quad (12)$$

$$\beta_4 = \frac{\frac{1}{3}\mu\left(\frac{1}{\sqrt{1-\nu}} + \frac{1}{\sqrt{2}}\right) + \frac{1}{\sqrt{2}}N_2}{\frac{1}{3}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\nu}} - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)} \quad (13)$$

$$\beta_5 = \frac{-\frac{1}{3}\mu N_3 + \frac{1-\nu}{1+\nu}\left(1 - \frac{3}{4}N_3^2\right) + \frac{1}{4}N_3^2}{\frac{1}{3}N_3 - \frac{4}{9}\mu} \quad (14)$$

$$N_{1,3} = -\frac{1}{2}N_2 \pm \frac{1}{2}\sqrt{4 - 3N_2^2} \quad (15)$$

$$\tau_m = \sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad (16)$$

其中, $\beta_1 \sim \beta_5$ 为煤岩材料局部变形带的剪胀边界线; $N_k = S_k / \tau_m$; $k=1, 2, 3$ 为应力状态; $S_k = \sigma_k - \sigma_m$, 为主偏应力, MPa; σ_k 为各向异性主应力, MPa; σ_m 为平均主应力, MPa; τ_m 为 Mises 等效剪应力, MPa; ν 为泊松比, 取 0.3。含水平钻孔高应力煤体在峰值应力处的应力参数见表 4。

将表 4 中的数据代入式(10)—式(14)得到如图 15 所示的剪胀系数 β 与摩擦因数 μ 空间关系(μ - β)。图中, AOG 和 BOH 为可能出现的压实区域; $AOJD$ 和 $BOIC$ 为可能出现的剪胀区域; DJE 和 CIF 为可能出现的膨胀变形带。对于某一固定变形带, 可能因应力路径不同产生不同的 μ 和 β , 如直线 LK 上的点 M 和 N 。由试验计算得到的 μ 与 β , 结合单屈服面模型可知, 含水平孔高应力煤体出现局部压实带是合理的, 即图 15 中“ \star ”标记所在的位置, 处于压实带预测区域内。 ν —煤体变形与强度特性类似于其他刺激模式的力学行为, 不再分析。

表 4 应力参数

Table 4 Stress parameters

主应力/MPa			主偏应力/MPa			剪应力	应力状态参数		
σ_1	σ_2	σ_3	S_1	S_2	S_3	τ_m /MPa	N_1	N_2	N_3
83.3	60	60	15.53	-7.77	-7.77	13.45	0.577	0.577	-1.155

6 讨 论

1) 在高应力煤体处于弹性状态下进行循环加载

载试验, 当煤体接近或处于亚临界稳定状态时, 由于岩石抗压不抗拉特性, 小幅度扰动(或微扰动)可能会使煤体内天然裂缝(或其他孔洞缺陷, 图 3)边缘形

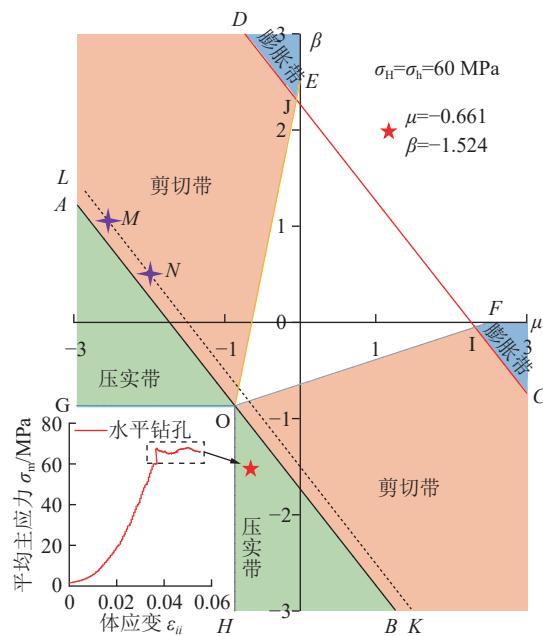


图 15 利用单屈服面模型预测含水平孔煤体局部压实变形带
 Fig.15 Prediction of local compaction zone of coal containing parallel borehole by using single-yield surface model

成更多拉伸裂纹, 以及激活更多天然闭合裂隙^[32], 并不断相互左右形成剪切破坏带, 最终造成其失稳破坏。因此, 煤体弹塑性在各阶段的扰动响应需进一步厘清, 尤其是扰动引起的不可恢复变形或流变效应造成的煤体压实与扩容。此外, 真三轴应力路径下, 煤岩在弹性阶段的非等幅循环加载卸载(如逐级形式)及在塑性区的应力循环作用也需要研究。

2) 弹脆性煤体在进入塑性阶段后,由于裂纹萌生、扩展和相互作用,渗透率因剪胀扩容而随着应力进一步加载出现止跌回升,这一现象已得到广泛的试验验证^[21]。塑延性煤体由弹性受力状态进入塑性阶段和峰后大变形阶段时,体应变始终增大,煤体体积不断被压实。压实带形成过程中伴随着孔隙率不断减小,渗透率也会出现不同程度降低。由于试验方案和装置的限制,研究无法在应力加载破坏煤样过程中采集渗透率数据。然而,刘玉冰等^[33]、WANG 等^[34]对取自同一地区不同煤层的试样进行低水平应力条件下渗流试验时,发现煤样体积也出现了塑性区和峰后再压现实象,由此导致了渗透率(由达西定律确定)降低(图 16),认为这是由剪切颗粒堵塞渗流通道所致。在深部高应力赋存环境下,颗粒粉碎或剥落、孔隙坍塌的宏观现象很有可能意味着原煤压实变形带的形成,而压实变形区的形成意味着孔隙率减小,同样也会造成渗透率减小,不利于瓦斯抽采。因此,如何有效识别煤层在外界刺激下的压实变形带成为关键,尤其是煤体渗透率演化

过程与低角度剪切破坏密切相关时更应注意(图 15 中直线 LK)。此外,压实变形区内的煤体渗流特性改造也很重要。

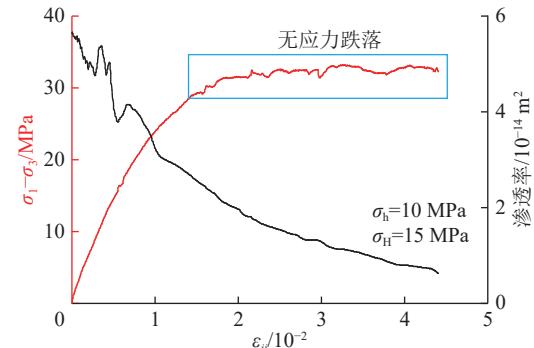


图 16 塑性区内煤体渗透率随体积压实而降低
 Fig.16 Coal permeability decreases with volumetric compaction in plastic zone

7 结 论

- 1) 在不同扰动刺激模式下,高应力煤体的脆性指数较小,未出现典型的峰后脆性跌落现象,表现出深部软煤力学特性。不同作用模式下,煤体破裂形貌呈现剪切型、拉伸型和压实型,这与其所处应力环境(如轴对称拉伸和轴对称压缩)和各向异性变形特性有关。
 - 2) 水平钻孔和高压注水可降低高应力含瓦斯煤体的强度,有利于高能煤体释能解危。两者对煤体强度的劣化机制不同,前者是由垂向位移连续增加和钻孔塌陷闭合所致,最终以压实变形方式减小了承载力;后者则是由于水平向扩容膨胀导致煤体突然破坏失稳所致。
 - 3) 通过含水平孔煤体在峰值应力处的弹性应变和塑性应变,解出剪胀系数 $\beta < 0$ ($= -1.524$)和摩擦因数 μ ($= -0.661$),并基于单屈服面模型,得到含水平孔深部煤体的 β 、 μ 有可能出现在压实区,验证了卸压钻孔作用下高应力煤体出现峰后压实行为的合理性。
 - 4) 等幅度循环扰动对深部高应力煤体承载能力起着强化作用,循环扰动期间煤体各向变形因泊松效应产生的膨胀滞回环对其力学劣化作用甚微,但增大了煤体内裂隙的平均迂曲度。由于煤体变形对卸荷响应更敏感,随着循环加卸载次数增加,各向变形均呈压缩特性、各向不可恢复变形量增大,表现为应变硬化行为。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J].

- 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11–22.
- YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11–22.
- [2] LIU C, YU B C, ZHAO H G, et al. Effective stress effect and slip-page effect of gas migration in deep coal reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 155: 105142.
- [3] 段敏克, 蒋长宝, 郭现伟, 等. 真三轴循环载荷作用下煤岩力学及损伤特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1110–1118.
- DUAN Minke, JIANG Changbao, GUO Xianwei, et al. Experimental study on mechanical and damage characteristics of coal under cyclic true triaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1110–1118.
- [4] 康红普, 伊康. 深部软岩巷道围岩扩容与流变特性模拟研究及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 15–33.
- KANG Hongpu, YI Kang. Simulation study on dilatant and rheologic properties of soft rocks surrounding deep roadway and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 15–33.
- [5] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1067–1074.
- XIE Heping, ZHOU Hongwei, LIU Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067–1074.
- [6] 蒋长宝, 段敏克, 尹光志, 等. 不同含水状态下含瓦斯原煤加卸载试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2230–2237.
- JIANG Changbao, DUAN Minke, YIN Guangzhi, et al. Loading-unloading experiments of coal containing gas under the condition of different moisture contents[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2230–2237.
- [7] 盖德成, 李东, 姜福兴, 等. 基于不同强度煤体的合理卸压钻孔间距研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 578–585, 593.
- GE Decheng, LI Dong, JIANG Fuxing, et al. Reasonable pressure-relief borehole spacing in coal of different strength[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(3): 578–585, 593.
- [8] FENG X T, GAO Y H, ZHANG X W, et al. Evolution of the mechanical and strength parameters of hard rocks in the true triaxial cyclic loading and unloading tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 131: 104349.
- [9] 魏明尧, 刘春, 刘应科, 等. 深部矿井频繁微扰动下煤巷损伤累积演化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2689–2701.
- WEI Mingyao, LIU Chun, LIU Yingke, et al. Evolution of accumulated damage in deep coal roadway with repeated dynamic disturbance[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2689–2701.
- [10] CHEN W C, LI S D, LI L, et al. Strengthening effects of cyclic load on rock and concrete based on experimental study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 135: 104479.
- [11] 张学博, 王元元, 蔡行行. 深部煤层抽采钻孔变形失稳影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 159–166.
- ZHANG Xuebo, WANG Wenyuan, CAI Hanghang. Study on influencing factors of deformation and instability of deep coal seam drainage borehole[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 159–166.
- [12] 包凯, 刘清友, 任文希. 基于离散元煤层钻孔井壁稳定性分析[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(6): 137–140.
- BAO Kai, LIU Qingyou, REN Wenxi. Wellbore stability analysis based on discrete element[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(6): 137–140.
- [13] 姚向荣, 程功林, 石必明. 深部围岩遇弱结构瓦斯抽采钻孔失稳分析与成孔方法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2073–2081.
- YAO Xiangrong, CHENG Gonglin, SHI Biming. Analysis on gas extraction drilling instability and control method of pore-forming in deep surrounding-rock with weak structure[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2073–2081.
- [14] 毛彦军, 陈曦, 范超男, 等. 基于 CT 三维重建的注水煤岩体裂隙扩展规律研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(6): 1717–1726.
- MAO Yanjun, CHEN Xi, FAN Chaonan, et al. Crack network evolution of water injection coal and rock mass by means of 3D reconstruction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(6): 1717–1726.
- [15] 刘超, 靖洪文, 蔚立元, 等. 高压流体注入对煤岩变形和破裂特性的影响[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 2027–2040.
- LIU Chao, JING Hongwen, YU Liyuan, et al. Effect of high-pressure fluid injection on deformation and fracture characteristics of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 2027–2040.
- [16] 谢和平, 高明忠, 付成行, 等. 深部不同深度岩石脆延转化力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 701–715.
- XIE Heping, GAO Mingzhong, FU Chenghang, et al. Mechanical behavior of brittle-ductile transition in rocks at different depths[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 701–715.
- [17] 尹光志, 李铭辉, 许江, 等. 多功能真三轴流固耦合试验系统的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2436–2445.
- YIN Guangzhi, LI Minghui, XU Jiang, et al. A new multi-functional true triaxial fluid-solid coupling experiment system and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2436–2445.
- [18] ISSEN K A, CHALLA V. Influence of the intermediate principal stress on the strain localization mode in porous sandstone[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2008, 113(B2): 2005JB004008.
- [19] WONG T F, BAUD P. The brittle-ductile transition in porous rock: A review[J]. Journal of Structural Geology, 2012, 44: 25–53.
- [20] 刘超, 尹思禹, 张锦, 等. 深部采动应力条件下砂岩破裂的声发射和能量演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 470–479.
- LIU Chao, YIN Siyu, ZHANG Jin, et al. Acoustic emission and energy evolution of sandstone failure subjected to deep mining stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(3): 470–479.

- [21] 刘玉冰, 王恩元, 赵栋, 等. 不同真三轴应力路径下钻孔煤体的力学特性及气体流动规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1878–1889.
LIU Yubing, WANG Enyuan, ZHAO Dong, et al. Mechanical characteristics and gas flow laws of drilled coal under different true triaxial stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 1878–1889.
- [22] JEAN V, SERGE L. Analysis of post-failure slope movements within the framework of hazard and risk analysis[J]. *Natural Hazards*, 2002, 26(1): 81–107.
- [23] 郝晋伟, 齐庆新, 舒龙勇, 等. 煤岩塑性软化及扩容特性对钻孔密封性的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1536–1543.
HAO Jinwei, QI Qingxin, SHU Longyong, et al. Effect of plastic-softening and dilatancy of coal on sealing property of borehole[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1536–1543.
- [24] 陈跃都, 梁卫国, 杨健锋, 等. 含水压粗糙岩石裂隙有效应力规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 3850–3860.
CHEN Yuedu, LIANG Weiguo, YANG Jianfeng, et al. Study on effective stress law of cracks in rough rock with water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 3850–3860.
- [25] YU B M, LI J H. A geometry model for tortuosity of flow path in porous media[J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, 21(8): 1569.
- [26] CHEN M, HOSKING L J, SANDFORD R J, et al. Dual porosity modelling of the coupled mechanical response of coal to gas flow and adsorption[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 205: 115–125.
- [27] HOL S, SPIERS C J, PEACH C J. Microfracturing of coal due to interaction with CO₂ under unconfined conditions[J]. *Fuel*, 2012, 97: 569–584.
- [28] HUANG X L, QI S W, XIA K W, et al. Particle crushing of a filled fracture during compression and its effect on stress wave propagation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(7): 5559–5587.
- [29] MOSS W C, GUPTA Y M. A constitutive model describing dilatancy and cracking in brittle rocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1982, 87(B4): 2985–2998.
- [30] MA X D, HAIMSON B C. Failure characteristics of two porous sandstones subjected to true triaxial stresses[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(9): 6477–6498.
- [31] OUGIER-SIMONIN A, ZHU W. Effect of pore pressure buildup on slowness of rupture propagation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(12): 7966–7985.
- [32] DIEDERICHS M S. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(9): 1082–1116.
- [33] 刘玉冰, 王恩元, 张东明, 等. 真三轴应力条件下破断煤体力学响应及渗流特性试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 105–113.
LIU Yubing, WANG Enyuan, ZHANG Dongming, et al. Experimental study on mechanical response and seepage characteristics of broken coal under true triaxial stress conditions[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 105–113.
- [34] WANG C Y, ZHANG D M, YU B C, et al. Deformation and seepage characteristics of coal under true triaxial loading–unloading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(4): 2673–2695.