

中文引用格式:徐世强,张自政,余伟健,等. 采掘扰动下煤岩体真三轴力学特性及本构模型[J]. 中国安全科学学报,2025,35(6): 111-119.

英文引用格式:XU Shiqiang, ZHANG Zizheng, YU Weijian, et al. True triaxial experimental and constitutive model research of coal-rock combinations under mining disturbance[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6):111-119.

采掘扰动下煤岩体真三轴力学特性 及本构模型*

徐世强¹, 张自政^{**1}副教授, 余伟健¹教授,
柏建彪^{2,3}教授, 邓敏², 刘帅刚¹

(1 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3 新疆工程学院 矿业与地质工程学院,
新疆 乌鲁木齐 830023)

中图分类号:X935

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1589

基金项目:湖南省自然科学基金优秀青年科学基金资助(2024JJ4021);新疆自治区重点研发任务专项—厅厅联动项目
(2022B01051);国家自然科学基金联合基金重点项目资助(U21A20107)。

【摘要】 为深入掌握采掘扰动下煤岩组合体真三轴力学特性,采用八面体剪应力理论,系统研究采掘扰动下受交界面倾角影响的煤岩组合体真三轴力学特性及能量演化机制,并最后基于德鲁克-普拉格准则,建立考虑交界面倾角影响的煤岩组合体真三轴损伤本构模型。结果表明:开挖扰动阶段,煤岩组合体轴向应变随时间线性增长,能量主要转化为弹性能,随着应变增大耗散能逐渐增加;当交界面倾角超过 60° 时,剪应力明显增大且增大节点延后至开挖末期。回采阶段,试样能量主要用于变形破坏;交界面倾角小于 60° 时,试样在剪应力达到强度极限前会发生2次变形,回采扰动末期应变有2个骤增节点,随后剪应力骤降,耗散能比例趋于1;交界面倾角大于 60° 时,轴向应变峰值降低,应变骤增节点后延并与剪应力骤降节点同步,组合体变形破坏主要取决于岩体部分;模型验证后拟合优度均高于90%。

【关键词】 真三轴; 煤岩组合体; 采掘扰动; 力学特性; 本构模型

True triaxial experimental and constitutive model research of coal-rock combinations under mining disturbance

XU Shiqiang¹, ZHANG Zizheng¹, YU Weijian¹, BAI Jianbiao^{2,3}, DENG Min², LIU Shuaigang¹

(1 Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2 School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 3 School of Mining and Geology, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi Xinjiang 830023, China)

Abstract: To deeply understand the true triaxial mechanical characteristics of coal-rock combinations under mining disturbance, the octahedral shear stress theory was adopted to systematically study the true

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0111-09; 收稿日期:2025-02-10; 修稿日期:2025-04-13

** 通信作者:张自政(1988—),男,河南信阳人,博士,副教授,主要从事无煤柱开采、巷道围岩控制、采矿岩石力学、矿山无机功能材料等方面的研究。E-mail: 1010096@hnust.edu.cn。

triaxial mechanical characteristics and energy evolution mechanism of coal-rock combinations affected by the interface inclination angle during mining disturbance. Finally, based on Drucker-Prager criterion, a true triaxial damage constitutive model for coal-rock combinations considering the influence of the interface inclination angle was established. The results show that during the excavation disturbance stage, the axial strain of the coal-rock combination increases linearly with time. The energy is mainly converted into elastic energy, and the dissipative energy gradually increases as the strain increases. When the interface inclination angle exceeds 60° , the shear stress increases significantly, and the node of shear stress increase is postponed to the end of the excavation stage. During the mining stage, the energy of the specimen is mainly used for deformation and failure. When the interface inclination angle is less than 60° , the specimen undergoes two deformations before the shear stress reaches the strength limit. At the end of the mining disturbance, there are two sudden increase nodes in strain, and then the shear stress drops sharply, with the proportion of dissipative energy approaching 1. When the interface inclination angle is greater than 60° , the peak value of axial strain decreases, the sudden increase node of strain is postponed and is synchronized with the sudden drop node of shear stress, and the deformation and failure of the combination mainly depend on the rock mass part. After model verification, the goodness of fit is higher than 90%.

Keywords: true triaxial; coal-rock combination specimen; mining disturbance; mechanical characteristic; constitutive model

0 引言

深部开采高应力扰动致使巷道强矿压显现,甚至出现大变形失稳,严重制约煤矿安全生产^[1-2]。受制于煤层倾角及厚度等因素,回采巷道需沿煤岩交界区域掘进,易形成半煤岩巷^[3]。由于半煤岩巷围岩物理力学性质差异化显著,协同承载性能差,往往出现巷帮支护效果差、巷道断面维护与返修工程量增大等问题^[4]。半煤岩巷道的非协同承载及非同步破坏一直是深部半煤岩巷道围岩控制的技术难题,深部煤岩组合体的非线性力学响应与三维应力环境密切相关^[5]。另外,受煤层倾角影响,半煤岩巷道围岩的应力分布形态具有典型的非对称特征,其整体结构失稳破坏风险较高^[6]。因此,深入研究半煤岩巷围岩力学特性与破坏机制,对于保障安全生产、降低巷道维护成本、提升煤炭资源开采效率 and 经济效益具有重要意义。

针对半煤岩巷的变形破坏机制研究,众多学者开展了相关力学试验,并将煤岩组合试样从试验角度分为单轴、常规三轴、真三轴等^[7-9];同时还研究了常规倾角煤岩组合试样、煤岩组合试样预制裂隙及多元组合试样等。例如:王猛等^[10]阐明了半煤岩巷道中煤岩结构面层间剪切破坏与结构面层间失稳诱导机制。柴彦江等^[11]利用复合试样进行了单轴静循环加载试验,研究了循环扰动作用下煤岩组合

体的力学响应和损伤破坏特性。刘杰等^[12]系统研究了复合试样的力学参数,分析了声发射信号的多重分形特征和复合试样的变形破坏机制。茹文凯等^[13]针对煤岩组合体开展了相关的卸荷和卸围压试验,并建立了考虑初始损伤的耗散能本构模型,描述了卸围压条件下煤岩组合体试样损伤演化全过程。

鉴于现有研究多聚焦煤岩组合体单一应力响应,且对交界面倾角影响关注不足,难以完整模拟巷道开挖回采过程的复杂受力,因此,笔者将基于损伤力学、岩体力学等理论,研究巷道开挖及工作面回采过程中煤岩组合体真三轴的力学特性,构建考虑交界面倾角的损伤本构模型,并验证其合理性,以期半煤岩巷围岩稳定控制优化设计提供理论参考。

1 煤岩组合试样试验准备

1.1 采掘扰动应力来源

我国深部采掘的临界深度被设定为 787 m ^[14],文中背景为原岩应力状态 25 MPa 的某处薄煤层巷道工作面,转换后深度为 $1\ 000\text{ m}$,故可视为深部采掘。采掘扰动作用下煤岩组合体应力状态变化过程如图 1 所示,其中, σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为第 1、第 2 和第 3 主应力,MPa; γ 为容重, kN/m^3 ; H 为煤层埋深,m。

深部煤岩体在未开挖条件下处于原岩应力平衡状态(图 1a),此时煤岩体三向受力一致, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0 = \gamma H$;巷道开挖导致侧向压力降低,煤岩组合体由等围压状态转变为竖向应力集中(图 1b),根据向天兵等^[15]的研究结果可知:此时 $\sigma_1 = 1.5\sigma_0$ 、 $\sigma_2 = 0.8\sigma_0$ 、 $\sigma_3 = 0.6\sigma_0$,其中, σ_0 为原岩应力,MPa;随着巷道回采,围岩竖向应力集中状态继续改变,此时应力集中现象更加明显^[16](图 1c),此时 $\sigma_1 = 2.5\sigma_0$ 、 $\sigma_2 = 0.4\sigma_0$ 、 $\sigma_3 = 0.2\sigma_0$ 。

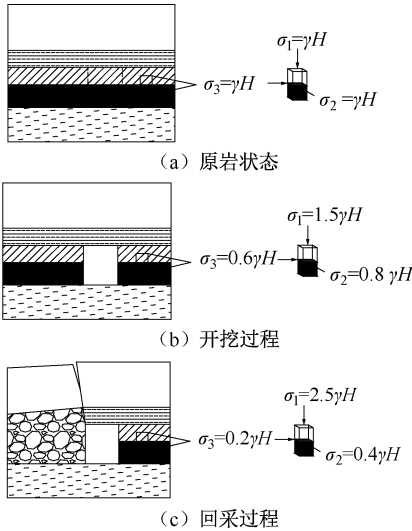


图 1 采掘扰动下煤岩组合体应力变化过程
Fig. 1 Stress change process of coal rock assemblage under mining disturbance

1.2 不同界面倾角煤岩组合试样制备

由于未能在现场实际取样,首先根据煤、岩单体的单轴压缩试验结果,考虑选出强度最接近现场矿井生产地质条件的材料配比,最终选定煤岩组合试样中煤体部分制作配比为煤粉:425 水泥:水=2:2:1,岩体部分制作配比为河砂:425 水泥:水=3:3:1。

煤岩组合试样为材料浇筑切割自制而成(50 mm×50 mm×100 mm),试样初凝后进行 28 天的养护,经过切割打磨加工,针对半煤岩巷复杂地质条件,结合前人对界面倾角的研究^[12],最终制成不同界面倾角($\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_2 = 20^\circ$ 、 $\theta_3 = 40^\circ$ 、 $\theta_4 = 60^\circ$ 、 $\theta_5 = 80^\circ$)的煤岩组合试样,如图 2 所示。

2 真三轴等围压力学特性

为解原岩应力状态下煤岩组合体的强度及变形破坏情况,进一步探究采掘扰动下煤岩组合体的力学特性,首先对煤岩组合体试样进行深部等围压三

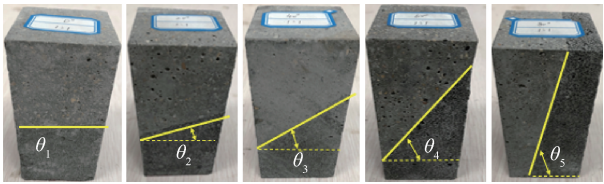


图 2 考虑界面倾角因素煤岩组合体
Fig. 2 Coal-rock assemblages with different interface angles

轴压缩试验。

2.1 真三轴等围压试验设计

使用真三轴电液伺服加卸载试验机进行煤岩组合体真三轴等围压试验,如图 3a 所示。该装置主要包括压头、加卸载室、立柱等部分组成,能够对试样进行三向加载,并通过传感器收集试验数据。图 3b 给出了煤岩组合试样的真三轴等围压压缩试验应力加载路径设置。具体操作如下:

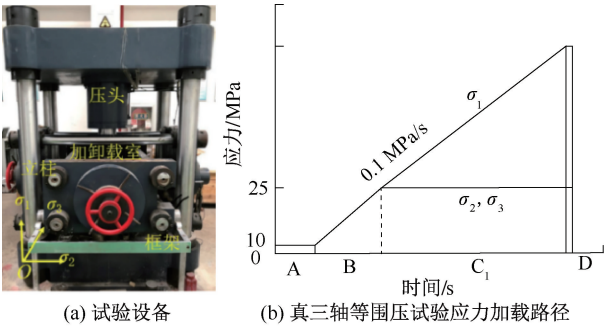


图 3 煤岩组合体真三轴等围压试验应力加载
Fig. 3 True triaxial constant confining pressure test stress loading path for coal and rock assemblage

1) 阶段 A:对试样周围进行预加载,保持三向应力(σ_1 、 σ_2 和 σ_3)稳定在 10 MPa。

2) 阶段 B:以 0.1 MPa/s 的加载速率同时增大三向应力,最终达到预设背景的初始地应力状态,即 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 均为 25 MPa(γH)。

3) 阶段 C₁:不改变 σ_2 、 σ_3 方向应力状态,同时以 0.1 MPa/s 的应力加载速率继续增大 σ_1 。

4) 阶段 D:保持恒定增长速率增大 σ_1 直至试样破坏,随后卸去应力。

2.2 真三轴等围压试验应力应变关系

使用八面体剪应力(τ_{oct})-应变关系可以表征真三轴试验过程中的力学特征^[17],其真三轴破坏准则为:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \tag{1}$$

因此,在真三轴等围压力学试验与开挖及回采应力路径下真三轴力学试验中,采用八面体剪应力理论表征试验过程中的煤岩组合体应力-应变关系。

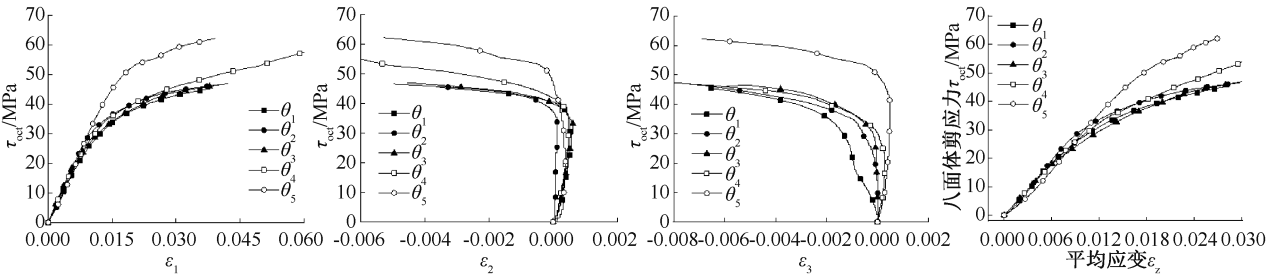


图4 煤岩组合体真三轴等围压压缩试验应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of true triaxial constant confining pressure test for coal and rock assemblage

从图4可知:

1) 煤岩组合体交界面倾角小于60°时,试样的应变随倾角增大逐渐增高,此时试样煤、岩2部分共同承担 σ_1 方向应力。随着 σ_1 方向应力增大,煤体结构率先破坏,导致整体结构失稳,此时煤岩组合体的稳定主要取决于煤体强度。

2) 交界面倾角大于60°时,试样岩体部分开始在 σ_1 方向主导承载作用,支撑煤岩组合体的结构稳定。试样应变逐渐由岩体应变主导,此时煤岩组合体破坏主要取决于岩体强度。

3) 煤岩组合体各方相应应变均随着交界面倾角的增大而增高,且交界面倾角超过60°后,增高速率显著增长。其中 σ_2 方向仅应变变化幅度增大,而 σ_3 方向应变变化幅度变化速率均大幅度增大。说明交界面倾角增大后, σ_3 方向应力会导致两侧煤体和岩体逐渐分别受力,致使强度较低的煤体部分先出现破坏,导致应变显著增大。

4) 通过真三轴等围压试验应力应变曲线数据,整理分析峰值点应力应变变化,如图5所示,其中, σ_f 为 σ_1 方向的峰值应力,MPa; ε_f 为 σ_1 方向的峰值应变; τ_f 为 σ_1 方向的峰值剪应力,MPa; ε_v 为 σ_1 方向的峰值平均应变。在交界面倾角不超过60°时,试样峰值应力应变保持稳定,此时验证了煤岩2部分共同承担 σ_1 方向压力,而在交界面倾角超过60°后,试样峰值应力应变明显增大,验证了此时岩体部分逐渐承担最大主应力方向的受力。从图5中可以看出, ε_f 同 σ_f 变化同步, ε_f 相较于 ε_v 变化更加明显,说明在煤岩组合体真三轴等围压压缩试验过程中, σ_1 方向应变主导试样应力变化,同时三轴应变共同承担整体应变。

处理试验结果,得到考虑交界面倾角影响的煤岩组合体真三轴等围压压缩试验应力-应变关系如图4所示,其中, ε_1 、 ε_2 和 ε_3 分别为 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 对应方向的应变, ε_z 为平均应变。

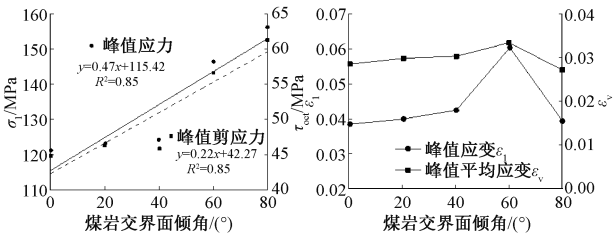


图5 煤岩组合体真三轴等围压压缩试验峰值应力(应变)特性

Fig. 5 Peak stress (strain) characteristics of true triaxial constant confining pressure test for coal and rock assemblage

3 采掘扰动下真三轴试验特性

3.1 采掘扰动下真三轴力学试验设计

结合煤、岩单体单轴压缩力学试验及真三轴等围压压缩试验结果,依据采掘扰动应力背景,设计巷道开挖及工作面回采应力路径下煤岩组合体真三轴力学试验。真三轴力学试验开挖及回采应力加载路径设置如图6所示。

具体操作如下:

1) 阶段A:对试样周围进行预加载,保持三向应力(σ_1 、 σ_2 和 σ_3)稳定在10 MPa。

2) 阶段B:以0.1 MPa/s的加载速率同时增大三向应力,最终达到预设背景的初始地应力状态,即三向应力均为25 MPa(γH)。

3) 阶段C₂:以0.1 MPa/s的应力加载速率继续增大 σ_1 ,同时以0.04 MPa/s的应力卸载速率降低 σ_2 ,以0.08 MPa/s的应力卸载速率降低 σ_3 ,最终 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别达到为37.5 (1.5 γH)、20(0.8 γH)、15(0.6 γH)。

4) 阶段 C_3 : σ_1 和 σ_2 继续保持上一阶段状态, 并以 0.04 MPa/s 的应力卸载速率降低 σ_3 , 模拟工作面回采扰动, 最终 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别达到 62.5 ($2.5\gamma H$)、 10 ($0.4\gamma H$)、 5 ($0.2\gamma H$);

5) 阶段 D: 维持 σ_1 恒定在 62.5 MPa , 同时 σ_2 和 σ_3 继续保持上一阶段状态直至试样破坏, 随后停止加载。

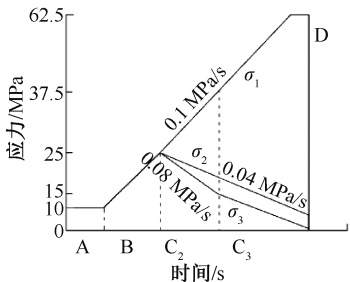


图6 真三轴力学试验开挖及回采应力加载路径

Fig.6 True triaxial mechanics test excavation and recovery stress loading path

3.2 采掘扰动下真三轴应力应变关系

开挖及回采应力路径下考虑交界面倾角影响的煤岩组合体真三轴应力/应变-时间关系曲线如图7所示。

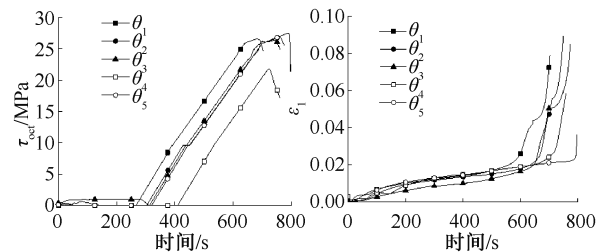


图7 煤岩组合体开挖及回采应力路径下应力/应变-时间曲线

Fig.7 Stress/strain-time curve of coal-rock assemblages under excavation and recovery stress loading path

从图7中可知:

1) 开挖扰动阶段,煤岩组合体轴向应变增长速率缓慢,变化较小。交界面倾角小于 60° 试样剪应力呈线性增长,交界面倾角超过 60° 试样剪应力变化时间延后至开挖扰动末期,且剪应力增长速率降低。此时组合体剪应力变化主要取决于强度较大的岩体部分。

2) 回采扰动末期,试样应变迅速增长;且随着交界面倾角增大,应变骤增的发生时间节点逐渐后延。当试样的交界面倾角小于 60° 且剪应力接近其强度极限前,观察到轴向应变呈现出阶梯式变化的

特征(图中方框位置),此时试样先后发生2次变形,表明试样2组合部分分别发生破坏。在交界面倾角超过 60° 后,应变骤增节点转入破坏阶段,试样破坏瞬间,轴向应变骤增,剪应力急剧下降,试样表现出脆性特征。

3) 试样交界面倾角超过 60° 时,相较于倾角小于 60° 试样轴向应变有所减小,且应变失稳破坏试件延后。同样验证了交界面倾角大于 60° 的试样岩体部分逐渐在 σ_1 方向占据主导承载地位。此时煤岩组合体变形破坏主要取决于岩体物理力学特性。

4) 通过开挖及回采应力路径下真三轴试验应力应变曲线数据,整理分析峰值点应力应变变化,如图8所示,其中, σ_v 为平均有效正应力,MPa。从图8可以看出,煤岩组合体试样破坏时八面体剪应力及体积应变均与平均有效正应力呈3次多项式关系。试样破坏时最大八面体剪应力随平均有效正应力的增大呈波动式变化,峰值剪应力先增大后减小随后再次增大;体积应变随平均有效正应力的增大先减小后增大。

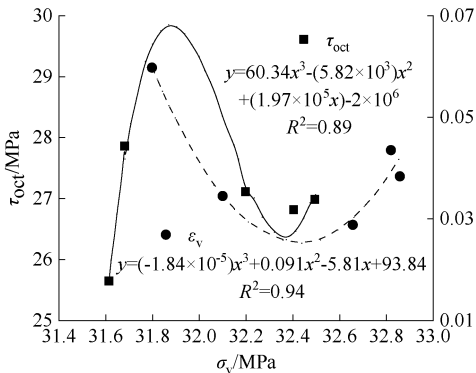


图8 开挖及回采应力路径下真三轴试验峰值特性

Fig.8 Peak stress (strain) characteristics of true triaxial tests under excavation and recovery stress loading path

3.3 采掘扰动下真三轴能量演化特征

采用能量守恒理论分析煤岩组合体破坏过程中能量耗散-积聚特征,排除热量损耗,则外力对试样做功总能量为 U 。转化为试样内部弹性能 U_e 和裂隙耗散能 U_d [18], MJ/m^3 。

基于前人研究成果 [19],图9展示了开挖及回采应力路径下煤岩组合体总能量、弹性能和耗散能变化特征。从图9中可知:

1) 开挖阶段煤岩组合体耗散能和弹性能均有所增加,但耗散能增加趋势更为显著。此阶段,试样内部初始裂隙逐渐闭合,弹性能变化较小,大多数变形可以恢复,试样能量主要转化为弹性能形式,仅有

很少部分能量耗散。

2) 回采阶段,直至试样破坏,随应变增大,弹性能基本保持不变,耗散能与轴向应变呈线性正相关,此阶段试样内部微破裂不断发展,消耗的能量主要用于试样变形破坏。

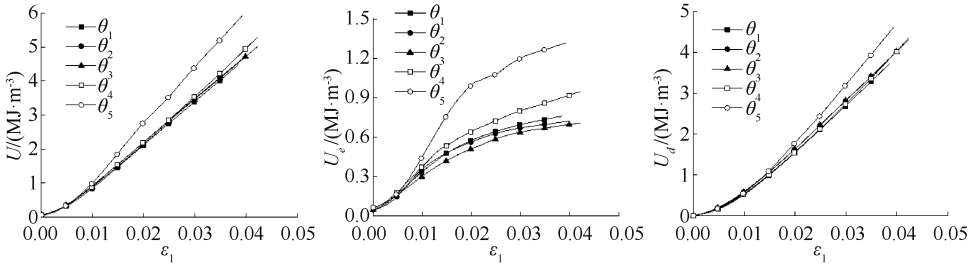


图9 开挖及回采应力路径下煤岩组合体能量变化

Fig. 9 Energy change in true triaxial compression process under excavation and recovery stress loading path

通过开挖及回采应力路径下真三轴试验能量变化数据,整理分析开挖与回采应力路径下煤岩组合体试样变形破坏过程中的耗散比例变化特征如图10所示。

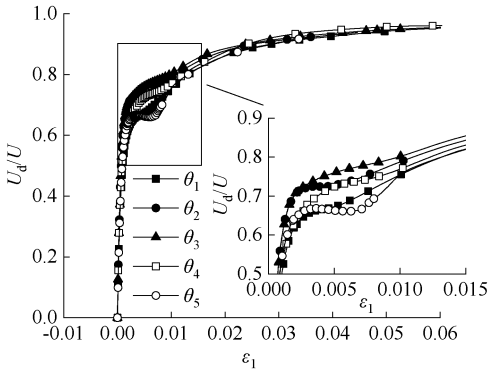


图10 开挖及回采应力路径真三轴试验耗散比例变化

Fig. 10 Change of dissipation ratio of true triaxial tests under excavation and recovery stress loading path

从图10中可知:

1) 开挖回采应力路径真三轴试验过程中,煤岩组合体的能量耗散比例随 σ_1 方向应变 ε_1 的增大首先迅速增大,此阶段为线弹性阶段,试样受外力作用伴随挤压迅速产生能量变化,首先出现裂纹和损伤,耗散比例随 σ_1 方向应变呈线性增长。

2) 在 σ_1 方向应变 ε_1 为0~0.02范围内,试样处于第1次卸围压阶段,此阶段耗散比例趋于水平,试样受力过程中的耗散能趋于平稳,受开挖阶段影响,侧向受力状态发生改变,此阶段试样短暂适应外力变化,出现短暂阶梯变化,调整结束后耗散能继续增大。

3) 煤岩组合体受外部荷载作用,轴向应变不断增加,交界面倾角小于 60° 时,组合体总能量基本保持不变,受交界面倾角影响较小,交界面倾角超过 60° 后,试样弹性能明显增大,此时试样主要表现出岩体部分的力学特性,试样总体能量变化明显提高。

3) 在第2次卸围压直至破坏阶段,煤岩组合体已经历能量释放及侧向受力适应,回采阶段试样所受外力会持续转化为试样裂纹扩展破坏的耗散能,直至试样完全破坏,最终耗散能比例趋于1。

4 交界面煤岩真三轴损伤本构模型

4.1 煤岩组合体真三轴损伤本构模型

煤系地层一般为层状结构,煤岩交界面部分可视为1种节理面。在煤岩组合体制备时,煤、岩相似材料2部分同时浇筑,最后交界面自然凝结,以还原煤系地层的生成过程。文中讨论了交界面对煤岩组合体初始损伤的影响,特别是在加载时,不同程度的降低了其弹性模量。

基于宏观损伤力学理论,选择使用弹性模量来量化煤岩组合体的初始损伤程度^[20]。采用威布尔分布描述组合体材料的非均质性,受荷损伤变量 D_s :

$$D_s = \int_0^{F^*} P(F^*) dF = 1 - \exp\left(-\left(\frac{F^*}{F_0}\right)^m\right) \quad (2)$$

式中: F^* 为微元强度统计分布变量; m 、 F_0 为统计分布参数, m 决定了曲线的陡峭程度和失效模式, F_0 决定了数据在数轴上的分布范围。

在组合岩体受到扰动荷载影响时,存在初始交界面损伤,也存在试样加载损伤,将总损伤效应视为这2种损伤状态的耦合^[21],最终得到最终的考虑交界面倾角的煤岩组合体真三轴损伤本构模型:

$$\sigma_1 = \frac{E_\alpha E_\beta}{E_0} \exp\left(-\left(\frac{F^*}{F_0}\right)^m\right) \varepsilon_1 + (k_2 + k_3) \mu_\beta \sigma_0 \quad (3)$$

式中: E_{α} 为岩体的弹性模量, E_{β} 为煤体弹性模量, E_0 为完整试样岩体的弹性模量,MPa; μ_{β} 为受界面面倾角影响岩体的泊松比; k_2 和 k_3 分别为 σ_2 和 σ_3 的应力折减系数。基于试验应力加载路径,选取 $\sigma_0=25\text{ MPa}$, $k_2=0.4$, $k_3=0.2$ 。

为准确确定模型参数的理论表达式,参数表征选用极值点法^[22]求解可得:

$$\begin{cases} m = \frac{1}{\ln \frac{E_{\alpha} E_{\beta} \varepsilon_c}{E_0 [\sigma_1 - (k_2 + k_3) \mu_{\beta} \sigma_0]}} \\ F_0 = \left(\varphi \frac{\sigma_c + (k_2 + k_3) \sigma_0}{\sigma_c - (k_2 + k_3) \mu_{\beta} \sigma_0} + \frac{\sigma_c - k_3 \sigma_0}{\sqrt{3} [\sigma_1 - (k_2 + k_3) \mu_{\beta} \sigma_0]} \right) \\ \cdot \frac{E_0^2}{E_{\alpha} E_{\beta}} \varepsilon_c (m)^{\frac{1}{m}} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可以得到开挖及回采应力路径下,考虑界面倾角的煤岩组合体真三轴损伤本构模型。

真三轴等围压条件下, σ_2 和 σ_3 相同,则考虑界面面倾角特性的煤岩组合体等围压损伤模型表述为:

$$\sigma_1 = \frac{E_{\alpha} E_{\beta}}{E_0} \exp \left(- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^m \right) \varepsilon_1 + 2 \mu_{\beta} \sigma_0 \quad (5)$$

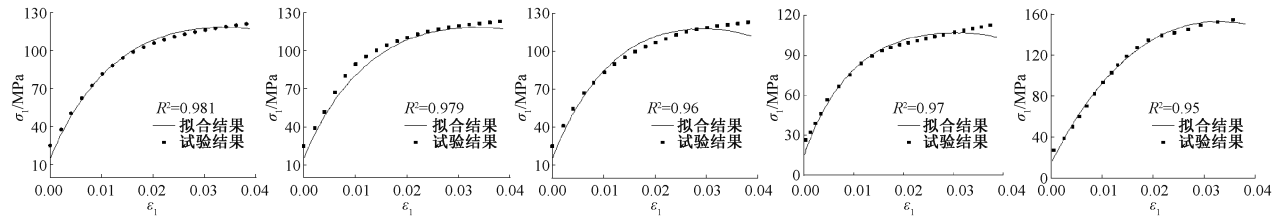


图 11 真三轴等围压试验与理论对比

Fig. 11 True triaxial constant confining pressure test and theoretical comparison

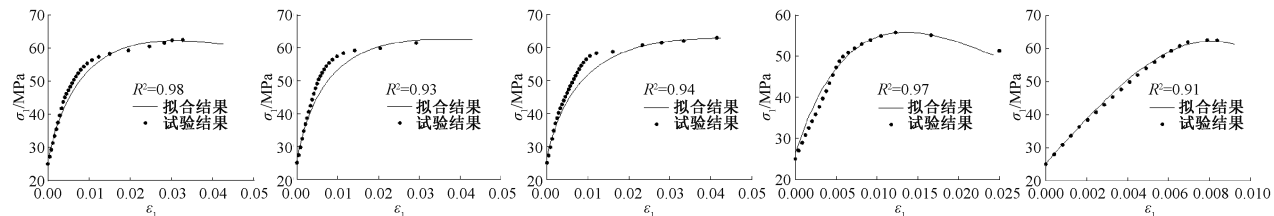


图 12 开挖及回采应力路径下真三轴试验与理论对比

Fig. 12 True triaxial test and theoretical comparison under excavation and recovery stress loading path

由图 11 和图 12 可知:在试样完整结构破坏之前,该本构模型理论计算结果与真三轴等围压试验结果及采掘扰动下真三轴试验结果均具有较好的一致性,整体拟合优度高于 90%,且界面倾角

$$\begin{cases} m = \frac{1}{\ln \frac{E_{\alpha} E_{\beta} \varepsilon_c}{E_0 (\sigma_1 - 2 \mu_{\beta} \sigma_0)}} \\ F_0 = \left(\varphi \frac{\sigma_c + 2 \sigma_0}{\sigma_c - 2 \mu_{\beta} \sigma_0} + \frac{\sigma_c - \sigma_0}{\sqrt{3} (\sigma_1 - 2 \mu_{\beta} \sigma_0)} \right) \\ \cdot \frac{E_0^2}{E_{\alpha} E_{\beta}} \varepsilon_c (m)^{\frac{1}{m}} \end{cases} \quad (6)$$

4.2 煤岩组合体真三轴损伤本构模型验证

根据建立的考虑界面倾角的煤岩组合体真三轴损伤本构模型和试验结果得到的应力应变曲线。首先该构模型部分数据根据试验过程及试件制备事先确定;随后确定每次拟合每组数据的极值点对应的 σ_c 和 ε_c ,见表 1;最后基于 Matlab 平台调用最小二乘优化算法 (lsqnonlin) 动态反演损伤演化参数,完成理论模型与试验数据的耦合匹配过程^[23]。基于试验应力加载路径及模型假设前提条件,选定试样破坏前真三轴等围压应力应变数据进行拟合分析,结果如图 11 所示。同理,根据建立的开挖及回采应力路径下考虑界面倾角的煤岩组合体真三轴损伤本构模型和试验结果,选定试样破坏前开挖及回采应力路径下应力应变数据进行拟合分析,结果如图 12 所示。

越小,拟合结果越精确。表明:该模型能较准确的预测试样破坏前真三轴条件下考虑界面倾角影响的煤岩组合体损伤变化过程,具备较强的合理有效性。

表 1 真三轴损伤本构模型极值点参数

Table 1 Extreme point parameter of true triaxial damage constitutive model

交界面 倾角	真三轴等围压试验		采掘扰动下真三轴试验	
	ε_e	σ_e	ε_e	σ_e
0	0.033	118.27	0.033	62.50
20	0.030	119.27	0.038	62.79
40	0.029	117.77	0.045	62.85
60	0.027	118.85	0.016	56.05
80	0.033	152.79	0.011	62.51

5 结 论

1) 交界面倾角在煤岩组合体力学响应中起关键作用,60°是承载特性与力学行为转变的重要阈

值;小于该角度时,煤岩协同承载特征显著;超过该角度后,岩体在承载与变形破坏过程中占据主导地位。

2) 采掘扰动过程中,煤岩组合体能量演化呈现阶段性特征。开挖阶段,能量演化以裂隙闭合机制为主导,耗散能占比随应力加载快速上升;回采阶段,耗散能与应变呈线性正相关,弹性能渐趋稳定,最终全部转化为耗散能。

3) 建立考虑交界面倾角的真三轴损伤本构模型,经试验验证,其拟合优度高于 90%。该模型为精准预测组合体破坏前损伤演化过程提供了有力工具,对深部半煤岩巷支护设计具有重要的理论指导与量化支撑价值。

参 考 文 献

[1] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报,2005, 24(16): 2 854-2 858.
HE Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 854-2 858.

[2] 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): 2 803-2 813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 803-2 813.

[3] 张勇,张江利,张西斌,等. 半煤岩巷道围岩变形破坏分析及支护技术研究[J]. 中国煤炭,2012,38(5): 54-57.
ZHANG Yong, ZHANG Jiangli, ZHANG Xibin, et al. Research on supporting technology in coal-rock roadway based on the loose circle theory [J]. China Coal, 2012,38(5): 54-57.

[4] 张栋,柏建彪,闫帅,等. 非均质复合岩巷围岩破坏机理及底鼓控制技术[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1 699-1 709.
ZHANG Dong, BAI Jianbiao, YAN Shuai, et al. Failure mechanism of surrounding rock and control of floor heave in heterogeneous composite rock roadway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(9): 1 699-1 709.

[5] 蔡美峰. 深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020,3(3): 5-13.
CAI Meifeng. Key theories and technologies for surrounding rock stability and ground control in deep mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 3(3): 5-13.

[6] 孔祥松,单仁亮,剧通达. 煤巷围岩变形破坏机制模型试验研究及工程应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 464-471.
KONG Xiangsong, SHAN Renliang, JU Tongda. Model experiment of deformation and failure mechanism of coal roadway surrounding rock and its engineering application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 464-471.

[7] 杜锋,王凯,孙加智,等. 单轴压缩下不同倾角煤岩组合体力学特性及破坏特征[J]. 中国安全科学学报,2024, 34(6): 136-145.
DU Feng, WANG Kai, SUN Jiazhi, et al. Mechanical properties and failure characteristics of coal rock combinations with different inclination angles under uniaxial compression[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 136-145.

[8] 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. Mechanical properties and failure characteristics of coal rock combinations with different inclination angles under uniaxial compression [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 105-113.

[9] 肖晓春,金晨,潘一山,等. 组合煤岩破裂声发射特性和冲击倾向性试验研究[J]. 中国安全科学学报,2016,26(4): 102-107.
XIAO Xiaochun, JIN Chen, PAN Yishan, et al. Experimental study on acoustic emission characteristic and outburst-proneness of coal-rock combinations during failure process[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(4): 102-107.

[10] 王猛,肖同强,高杰,等. 基于煤岩结构面剪切作用下半煤岩巷变形机制及控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 527-534.
WANG Meng, XIAO Tongqiang, GAO Jie, et al. Deformation mechanism and control technology for semi coal and rock roadway with structural plane under shearing force [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 527-534.

[11] CHAI Yanjiang, DOU Linming, CAI Wu, et al. Experimental investigation into damage and failure process of coal-rock

- composite structures with different roof lithologies under mining-induced stress loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 170: DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105479.
- [12] LIU Jie, LI Qiuping, WANG Xiaoran, et al. Dynamic multifractal characteristics of acoustic emission about composite coal-rock samples with different strength rock[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2022, 164: DOI:10.1016/j.chaos.2022.112725.
- [13] 茹文凯, 胡善超, 李地元, 等. 煤岩组合体卸围压能量演化规律及耗散能损伤本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(12): 3 448–3 458.
- RU Wenkai, HU Shanchao, LI Diyu, et al. Study on energy evolution of unloading confining pressure and dissipative energy damage constitutive model of coal-rock combination [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(12): 3 448–3 458.
- [14] 李成杰, 徐颖, 冯明明, 等. 单轴荷载下类煤岩组合体变形规律及破坏机理[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1 773–1 782.
- LI Chengjie, XU Ying, FENG Mingming, et al. Deformation law and failure mechanism of coal-rock-like combined body under uniaxial loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1 773–1 782.
- [15] 向天兵, 冯夏庭, 陈炳瑞. 开挖与支护应力路径下硬岩破坏过程的真三轴与声发射试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(增1): 504–510.
- XIANG Tianbing, FENG Xiating, CHEN Bingrui. True triaxial and acoustic emission experimental study of failure process of hard rock under excavating and supporting stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(S1): 504–510.
- [16] 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): 1 067–1 074.
- 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): 1 067–1 074.
- [17] 刘冬桥, 张树东, 何鹏飞, 等. 真三轴应力作用下立方体节理煤岩力学响应试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(1): 115–122.
- LIU Dongqiao, ZHANG Shudong, HE Pengfei, et al. Experimental research on mechanical behaviors of the cubic jointed coal mass subjected to the true triaxial stress[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(1): 115–122.
- [18] 杨磊, 高富强, 王晓卿. 不同强度比组合煤岩的力学响应与能量分区演化规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(增2): 3 297–3 305.
- YANG Lei, GAO Fuqiang, WANG Xiaoqing. Mechanical response and energy partition evolution of coal-rock combinations with different strength ratios[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S2): 3 297–3 305.
- [19] 彭述权, 王培宇, 樊玲, 等. 节理岩体弹塑黏性疲劳本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 379–389.
- PENG Shuquan, WANG Peiyu, FAN Ling, et al. Research on elasto-plastic viscous fatigue constitutive model of jointed rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 379–389.
- [20] ZHAO D, SWOBODA G A, LAABMAYR F, et al. Damage mechanics and its application for the design of an underground theater[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(6): 1 729–1 740.
- [21] 张慧梅, 陈敏, 孟祥振, 等. 不同倾角节理岩体损伤模型及力学特性[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(6): 801–808.
- ZHANG Huimei, CHEN Min, MENG Xiangzhen, et al. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(6): 801–808.
- [22] 刘红岩, 邢闯锋, 张力民. 双轴应力下非贯通节理岩体压缩损伤本构模型[J]. *岩土力学*, 2016, 37(9): 2 610–2 616, 2 623.
- LIU Hongyan, XING Chuangfeng, ZHANG Limin. A biaxial compression damage constitutive model for rock mass with non-persistent joints[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(9): 2 610–2 616, 2 623.
- [23] 张蒙, 李亚娟, 邓重阳. NURBS 曲线拟合的最小二乘渐进迭代逼近优化算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2020, 32(4): 568–574.
- ZHANG Meng, LI Yajuan, DENG Chongyang. Optimizing NURBS curves fitting by least squares progressive and iterative approximation[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2020, 32(4): 568–574.

作者简介: 徐世强 (1999—), 男, 河南驻马店人, 博士研究生, 研究方向为矿山灾害预防与控制。E-mail: 1603153688@qq.com。

