

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1173

基于深部含水煤样失稳特征的荷载梁式 主控裂隙模型的试验研究

陈笑予^{1,2}, 姚强岭^{1,2}, 陈胜焱^{1,2}, 山长昊^{1,2}, 李英虎^{1,2}, 徐 强^{1,2},
于利强^{1,2}, 夏 泽^{1,2}, 朱 柳^{1,2}, 落弘业^{1,2}

(1. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 深部巷道周边的煤体在承受高地应力基础荷载的同时, 往往还受到由远及近的采掘活动扰动, 使其内部的裂隙损伤在近似于高应力逐级加卸载的应力路径下不断发育, 若还处于水岩作用的影响下, 承载性能将进一步恶化。通过对某矿深部煤样进行吸水特性描述、波速信息对比、力学试验分析及声发射监测, 总结了该矿深部含水煤样具有以下特征: 吸水迅速、极易饱和、饱水后整体结构完整性增强, 且主要以张开型主控裂隙的张拉破坏造成试件整体失稳。基于上述特征, 结合吸水率、裂隙参数、系统尺寸等因素, 优化建立了荷载梁式主控裂隙模型, 阐述了深部含水煤样产生上述失稳特征的机制, 并进行了敏感性分析、强度验证, 验算结果较为贴合试验数据, 可为深部高应力扰动富水巷道中的裂隙煤岩体进行类似的试验研究、理论建模及采掘设计提供一定的参考。

关 键 词: 深部含水煤样; 高应力逐级加卸载; 张拉破坏; 主控裂隙; 荷载梁

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 增刊-0375-12

Experimental study on a loading beam main control crack model based on the instability characteristics of deep coal samples containing water

CHEN Xiao-yu^{1,2}, YAO Qiang-ling^{1,2}, CHEN Sheng-yan^{1,2}, SHAN Chang-hao^{1,2}, LI Ying-hu^{1,2},
XU Qiang^{1,2}, YU Li-qiang^{1,2}, XIA Ze^{1,2}, ZHU Liu^{1,2}, LUO Hong-ye^{1,2}

(1. Key Laboratory of Deep Coal Resources Mining, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The coal mass around deep roadways are often disturbed by mining activities from far to near, while bearing high ground stress loads. As a result, the internal crack damage continues to develop in a stress path similar to the gradual loading and unloading of high stress. If they are still under the influence of water and rock interaction, their bearing capacity will further deteriorate. The water absorption characteristics, wave velocity comparisons, mechanical experimental analyses, and acoustic emission monitoring of deep coal samples from a mine indicate that the deep coal samples containing water exhibit characteristics including rapid water absorption, easy saturation, and overall integrity enhancement after water saturation, and they are mainly characterized by the tensile failure of the open main control crack, which causes the overall failure of the specimen. According to the above characteristics, a loading beam main control crack model is optimized and established herein by combining some factors such as the water content, crack parameters, and system size. The mechanism of the instability characteristics mentioned above deep water-bearing coal samples was elaborated, and the sensitivity analysis and strength verification were conducted. The obtained results were in good agreement with the experimental data, which can serve as a reference for similar experimental research, theoretical modeling, and mining design of fractured coal-rock mass located in deep high stress disturbed water-rich roadways.

Keywords: deep coal samples containing water; high stress with gradual loading and unloading path; tension failure; main control crack; loading beam

收稿日期: 2022-06-14

录用日期: 2022-11-24

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51874283)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51874283).

第一作者简介: 陈笑予, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石力学和绿色开采方面的研究。E-mail: ts21020094p21@cumt.edu.cn

通讯作者: 姚强岭, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石力学、绿色开采和微生物原位采矿等方面的科研工作。E-mail: yaoqiangling@cumt.edu.cn

1 引言

我国的煤炭资源开发已逐步走向深部^[1]。深部巷道周边的煤体在承受深部高地应力的同时,往往还受到煤层群组开采及周边采掘活动的扰动影响^[2-3],使其内部的裂隙损伤在反复加卸载的应力路径下不断发育,导致煤岩体内部的结构稳定性不断劣化^[4-5];而在煤层注水、喷雾降尘、保水开采等条件下^[6],深部煤体周边的裂隙水含量将会增加,水-岩弱化作用继续增强^[7]。因此,处于巷道松动圈一定范围内,近似于一维受载状态下的深部煤体^[8],在受到水-岩弱化和高应力扰动荷载的复合作用后^[9],承载性能将会进一步地劣化,巷道围岩变形加剧,甚至影响到正常的采掘活动,从而有必要开展深部含水煤体在单轴高应力逐级加卸载路径下的研究工作。

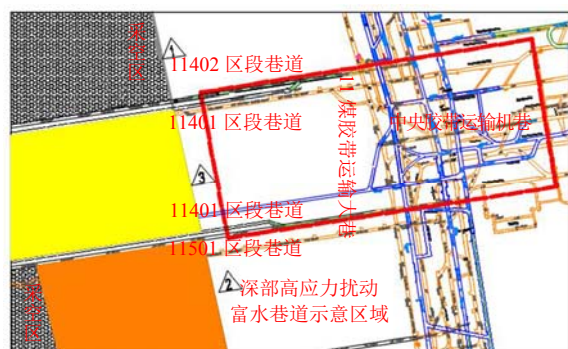


图1 某煤矿深部高应力扰动富水巷道区域示意图
Fig.1 Schematic diagram of a deep high stress disturbed water-rich roadway area in a coal mine

图1中所示的某煤矿11煤胶带运输大巷、中央胶带运输机巷及区段巷为淮南矿区千米深巷,区域范围内的煤岩体除了受到上赋岩层给予的高应力基础荷载之外,还处于3个采煤工作面依次开采、逐面递进的逐级加卸载的反复扰动作用之下。且该区域范围内的巷道至少服务于若干个采煤工作面,属于需要长期喷雾降尘、维护留存的机电运输类转载巷道^[10],因此有必要通过实验室试验研究该区域的深部煤岩体在饱水-单轴高应力逐级加卸载条件下的承载特性,进而更好地指导生产、服务生产。

之前的研究中,研究人员^[11-16]已对10余种相对埋深较浅的沉积类煤岩体的相关物理性质特征进行了较为仔细的研究,划分了上述煤岩体的吸水阶段并全面地描述了沉积类煤岩体的水岩相互作用原

理;其中,汤传金^[12]、陈宁^[13]、赵彬^[14]、姚强岭^[15]、陈田^[16]、Chen^[17]等还分别对相对埋深较浅的含水煤岩体试样在单轴压缩试验时的承载破坏特征、裂隙损伤发育、声发射监测特点等规律作了较为详细的总结分析,但关于深部煤体试样在引言案例中提及的饱水-单轴高应力逐级加卸载条件下的研究尚未开展。因此,本文将对某矿深部高应力扰动富水巷道中的煤样进行吸水试验、波速检测、单轴高应力逐级加卸载试验及相关声发射监测工作,以获得该矿深部高应力扰动富水巷道中煤样的相关物性、承载性能及裂隙发育特征,并建立力学模型,解释该种深部含水煤样的破坏机制,为类似深部含水煤体的试验研究、采掘设计提供一定的参考。

2 试验方案

2.1 试件的制备与分组

试验煤样取自安徽省淮南市某煤矿11-2号煤层,赋存深度962~1039 m,符合目前国内学术界提出的深部埋深的一般概念^[18]。根据岩石物理力学性质试验规程的要求:将煤样加工成50 mm×50 mm×100 mm的长方体试件,选取质量、尺寸无较大差异的煤样试件12块,分成A、B、C、D4组,每组3块试件。其中,A组为单轴压缩干燥试件组,B组为单轴高应力逐级加卸载干燥试件组,C组为单轴压缩饱和试件组,D组为单轴高应力逐级加卸载饱和试件组^[19]。

2.2 试验加卸载方案

本次力学试验采用中国矿业大学煤炭国家重点实验室的MTS-C64.106型电液伺服万能试验机对干燥及饱和的深部煤样试件进行单轴压缩及单轴高应力逐级加卸载力学试验^[19],加卸载速率为0.2 mm/min。

为了给B组和D组煤样的基础荷载设置提供一定的参考,应先进行A组和C组煤样的单轴压缩试验。A组干燥煤样的单轴压缩峰值荷载的试验平均值为21.07 kN,C组饱和煤样的单轴压缩峰值荷载的试验平均值为19.32 kN,数值上差异较小,于是取A、C两组单轴压缩试验条件下峰值荷载的试验平均值作为参考(约为20 kN)。随后结合引言中的现场实例,参考并改进文献[9]中的加卸载方案,即采用单轴高应力逐级加卸载的方式,模拟深部高应力扰动富水巷道周边煤体的受载路径,以25%的平均单轴压缩峰值荷载为煤样试件由裂隙压密阶段进入到裂隙发育阶段的阈值门槛模拟深部煤体始终承受到的高应力非扰动基础荷载部分^[7,16],按照

0 kN→5 kN→7 kN→5 kN→8 kN→5 kN→...的荷载路径对 B 组、D 组煤样进行逐级加卸载^[19], 模拟引言中提到的高应力扰动荷载部分, 直至煤样破坏, 如图 2 所示。

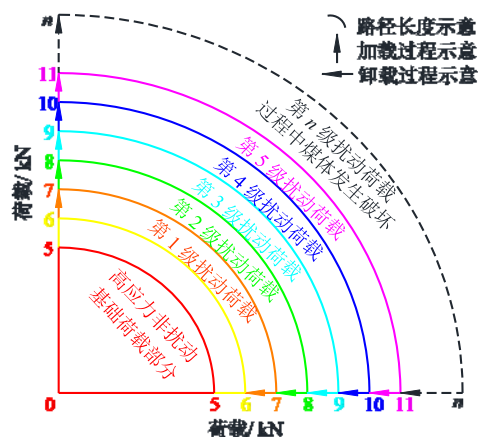


图2 高应力加卸载路径扇形示意图

Fig.2 Schematic fan diagram of high stress with gradual loading and unloading path

3 煤样的相关物理性质特征概述

3.1 深部煤样的吸水特性

由文献[19]中的煤样试件的吸水率相关图表可知, 本次研究的深部煤样的平均试验吸水率为 1.25%, 与之前研究中的相对浅埋煤样相比, 处于较低水平^[11, 19], 但相对吸水速率处于较高水平 (相对吸水速率指阶段吸水率与全过程总吸水率比值的平均上升速率的计算值^[19])。说明该种深部煤样处于较为潮湿的环境时, 可以更快地吸收水分、极易达到饱和状态、从而更易发生水-岩相互作用, 进而改变深部煤样的承载破坏特征, 因此饱和水对该矿深部煤样承载特性的影响将不容忽视。

3.2 深部煤样的波速特征

由参考文献[19]中的煤样试件的波速信息相关图表可知, 本次研究的深部饱和煤样的平均波速为 2.02 km/s, 深部干燥煤样的平均波速为 1.06 km/s。对比之前研究中的相对浅埋煤样的平均波速信息 (干燥状态下约为 1.50 km/s, 饱和状态下约为 1.70 km/s)^[12], 该矿深部干燥煤样的波速平均值偏低, 可认为该矿深部煤样在取样后的初始状态下的损伤程度相对较高。但经过饱和浸水、填充完毕上述的裂隙损伤后, 平均波速增加, 超过一般浅埋煤样, 因此可以认为该矿深部煤样的整体结构完整性会在饱和水的作用下相对有所增强, 相对有利于近似等效地建立连续性的力学结构模型。

4 深部含水煤样的承载特征

4.1 深部含水煤样的承载能力特征

干燥、饱和状态的深部煤样在不同应力路径下的应力-应变关系曲线如图 3 所示, 具有较为明显的分区特征^[19]。

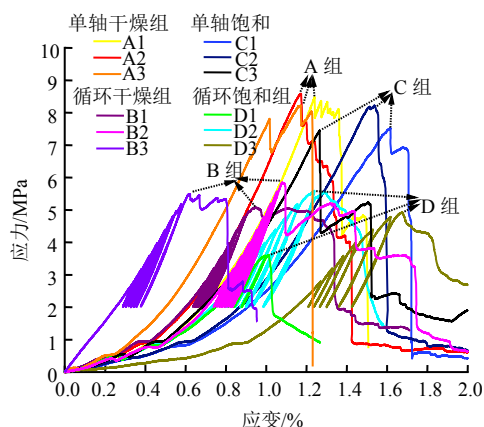


图3 深部煤样的应力-应变关系^[19]

Fig.3 Stress-strain curves of deep coal samples^[19]

由图 3 可以看出, 水体的侵入对深部煤样的承载能力产生了一定的劣化作用, 而在深部含水煤样的裂隙损伤发育阶段施加高应力逐级加卸载路径 (继续模拟深部煤体受到的反复扰动影响), 将对深部含水煤样在承载能力上造成更大的影响。因此, 有必要将水体侵入影响和裂隙发育状况共同纳入到后续的深部含水煤样的失稳特征的研究之中。

4.2 深部含水煤样的承载破坏特征

本节借助实拍照片和声发射定位技术探究深部含水煤样在试验条件下的裂隙扩展的空间分布形态。将能量级别较高且事件分布较密的声发射事件源点按照一定的趋势进行线性连接, 发现这种趋势与深部煤体试件表面的实际主要裂隙的分布形态有着较高的相似程度^[12], 且这种相似程度随着连线周边的事件密度和能量级别的升高而增加, 较好地反映了深部煤样在干燥饱水以及不同应力路径变量条件下的承载破坏特征, 各组试件主要裂隙扩展的空间分布形态如图 4 所示。

由图 4 可知, 在饱和水与反复加卸载的高水平应力路径影响下, 深部煤样的失稳以贯通性的结构破坏为主导的趋势更加明显, 且主要裂隙的扩展形式基本为张开型, 表明在该种环境条件下, 深部煤样的裂纹面之间产生了较多的拉应力作用, 致使裂隙面间发生相对拉离、张裂。

4.3 深部含水煤样的裂隙发育方式

煤样的破坏形式是结构强度和应力分布的综

合作用结果,通过声发射监测技术中的 RA-AF 关系可以更加直观、科学地判别煤样中裂隙发育的主要类型^[12]。其中,RA 值表示声发射上升时间与幅值的比值,AF 值表示平均频率。在煤样内部产生

新裂隙或裂隙扩张时,高 RA、低 AF 值的数据分布表示主要产生剪切裂隙,低 RA、高 AF 值的数据分布表示主要产生张拉裂隙^[20]。本次试验中,各组的深部煤样的声发射 RA-AF 关系云图如图 5 所示。

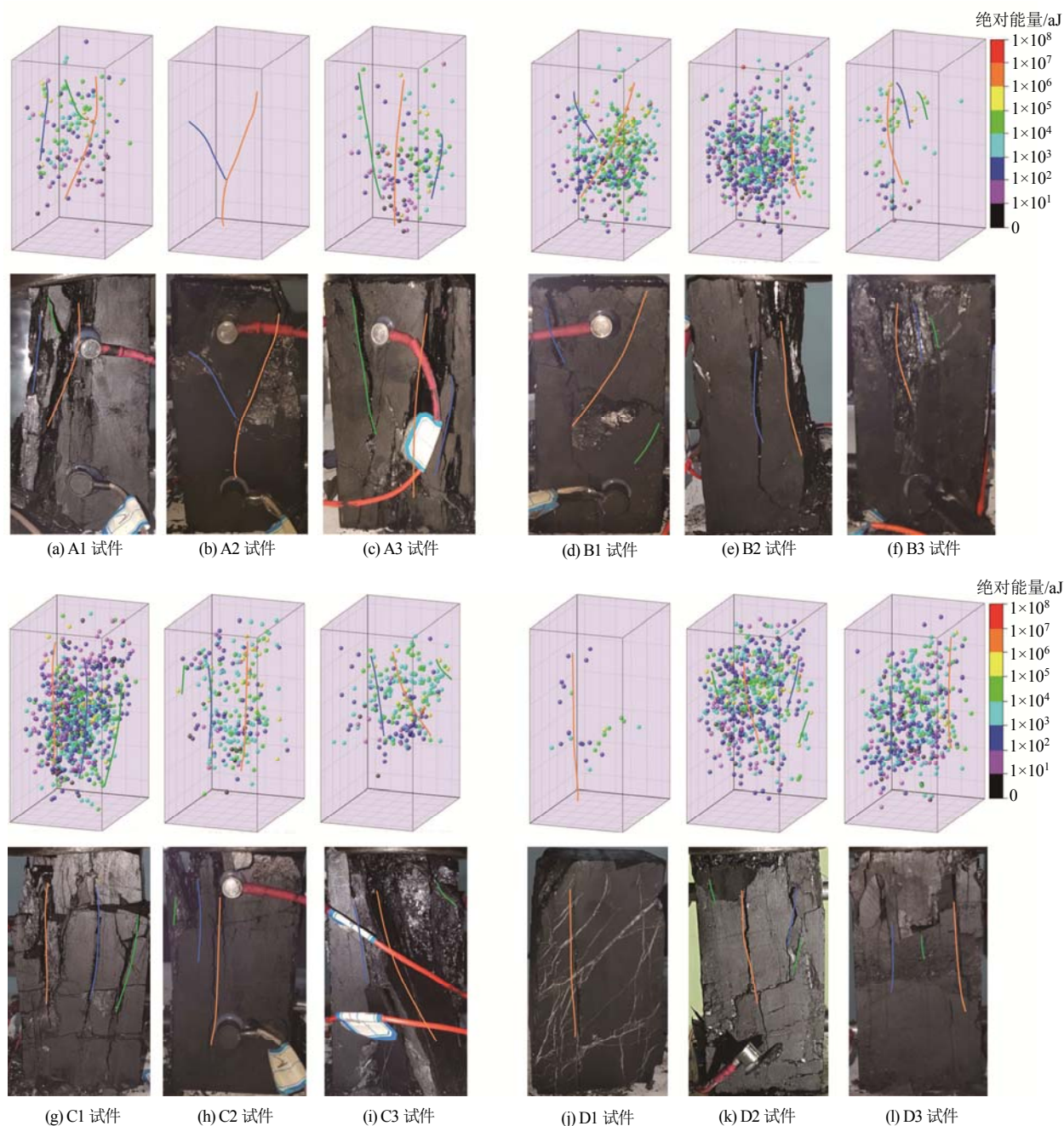


图 4 主要裂隙扩展的空间分布形态

Fig.4 Spatial distribution of main cracks propagation

图 5 中红色区域表示最大数据密度,蓝色区域表示最小数据密度。图中的数据集中分布在靠近纵轴的位置,具有低 RA、高 AF 的特征,代表生成发育了大量的张拉裂隙。

从整体上来看,随着水体的迅速侵入,深部煤样的裂隙损伤发育方式在朝着剪切破坏减少、拉伸破裂增加的趋势发展,若将 RA 轴的坐标按 $0.1 \sim 0.6 \text{ ms/V}$

的数值范围进行统一处理,RA-AF 关系云图中的深部煤样的裂隙发育方式在单轴高应力逐级加卸载这种应力路径条件下,将具有更加明显的张拉破坏特征。

5 力学模型建立

5.1 建模过程与公式推导

为了对深部含水煤样的承载能力进行定量分

析,参考李文洲等^[21]在文献中建立的煤岩体裂隙模型,并考虑到本次深部煤样的失稳破坏特征、水-

岩弱化作用和裂隙系统尺寸等因素,按下述分析优化建立了如图6所示的荷载梁式主控裂隙模型。

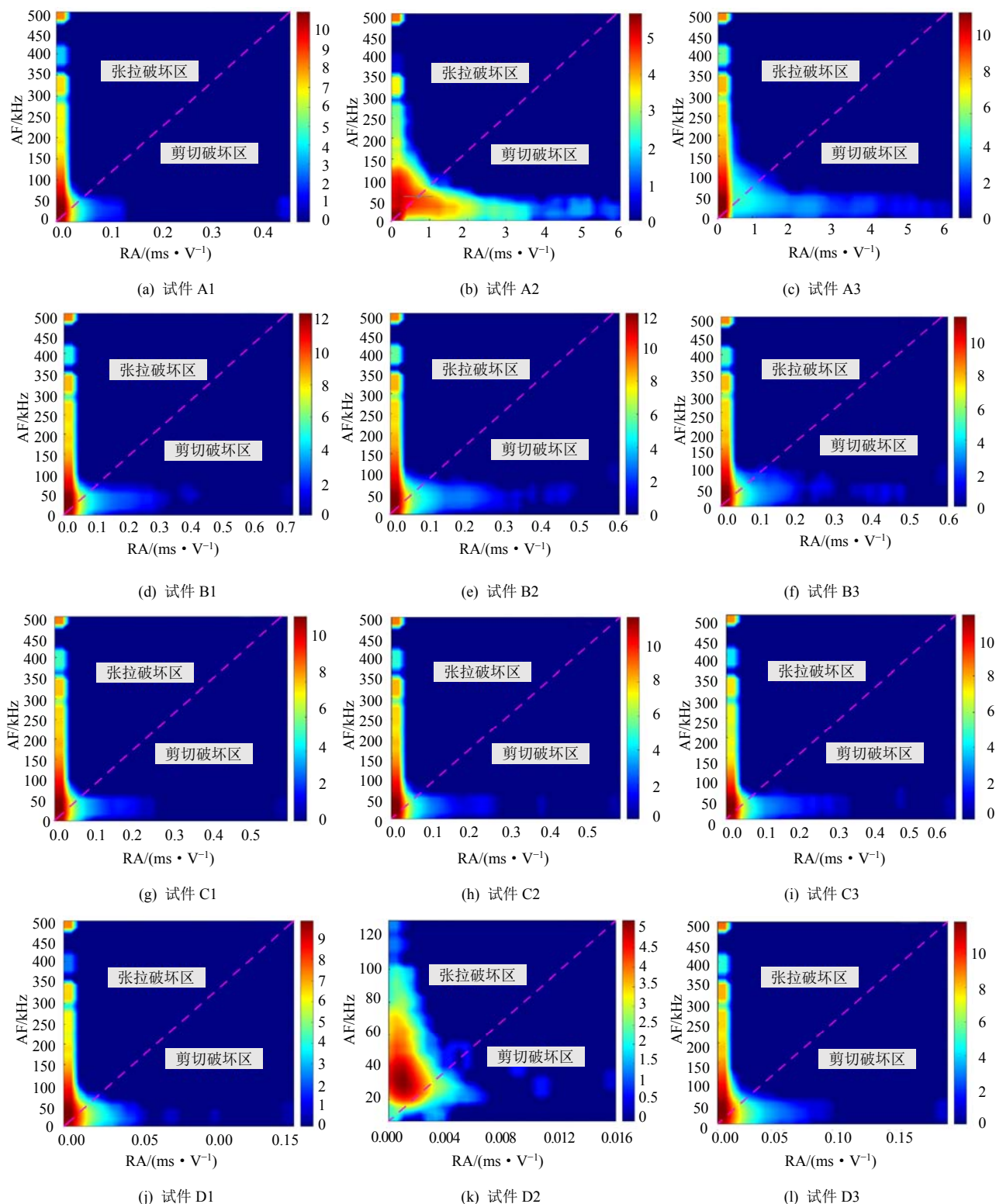


图5 煤样的声发射 RA-AF 关系云图

Fig.5 Relationship cloud chart of acoustic emission RA-AF of coal samples

由前文的各项试验及相关的对比分析可知,该矿深部煤样在经历较高水平的逐级加卸载应力路径和水体侵蚀后,主要通过张拉破坏的形式形成张开

型裂隙造成煤样的整体失稳。而煤中的裂隙自由水、巷道中的喷雾降尘水等水体将会迅速地通过这些裂隙通道进入煤体,对煤体内部的承载结构产生一定

程度上的劣化作用,加剧煤体在承载过程中的张拉破坏进程,因此本结构模型的建立需用到 Griffith 理论及其相关判定准则。

在深部煤体周边未形成自由空间之前,由于周围边界的高围压约束作用,煤体之中基本无明显的宏观裂隙或者仅存在少量的微观裂隙。而在煤体的采掘过程中或巷道的维护过程中,由于周边煤体的移除致使研究煤体的周边形成了大量的自由面,边界约束作用减弱、甚至消失,松动圈范围内的深部煤体由三向约束状态逐步转化为双向或单向受载状态产生损伤。然后通过实验室试验,继续模拟其加卸载过程,形成了如图 6 所示的贯穿煤样的主要控制裂隙(以下简称主控裂隙),最终导致了煤样的整体失稳。

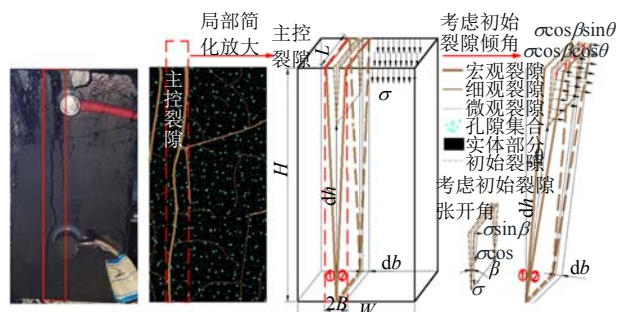


图 6 荷载梁式主控裂隙模型

Fig.6 A loading beam main control crack model

由图 6 可知,煤样主控裂隙的初始尺寸与煤样的宏观整体尺寸相比处于较小量级,可近似看成即将沿初始裂纹端部发生极小变形的几何线性结构;且在本次研究中,近似线性的弹性变形阶段占据了较高水平的应力路径中的较长部分,如图 7 所示。因此煤样内部即将发生初始裂隙端部扩展的模型在材质上较为符合材料力学中的线弹性材料定义;此外,在 3.2 节中的波速检测对比也表明,该种深部煤样吸水后的整体结构完整性相对增强,相对于一般煤样,该种深部含水煤样内部的初始主控裂隙端部处的小结构变形较为符合梁变形的叠加原理条件。故可将该主控裂隙的初始变形扩展区域近似简化,看成一对类似于梁状的结构模块,上述结构模块根据图 6 中的内容,描述为由厚度为 B 、高度为 h 的平面在宽度为 L 的空间区域内累计叠加形成,如图 8 所示。

在试验时,外力均匀地竖直加载在煤样上方,因此试件内部会产生竖直方向的压应力荷载 σ ,若裂隙的初始张开角为 2β ,则垂直于每个梁状模块的压应力分力荷载为 $\sigma \sin \beta$,由测算结果及图片内容可知,初始裂隙张开角 2β 几乎趋近于 0 ,因此本项分力

可以忽略不计。

考虑到图 6、8 中所示的裂隙倾角 θ ,沿着该梁模块主要延展方向加载在该梁上的压应力分力荷载为 $\sigma \cos \beta \cos \theta$,由于该分力荷载为近似于面力的体积力,均匀地沿着模块内部分布,而不是集中在梁模块的长轴端头区域,因此该分力荷载不会引起该梁状结构模块的弯曲变形,其主要作用更多地体现在压实该梁模块、抑制剪切破坏的发生。

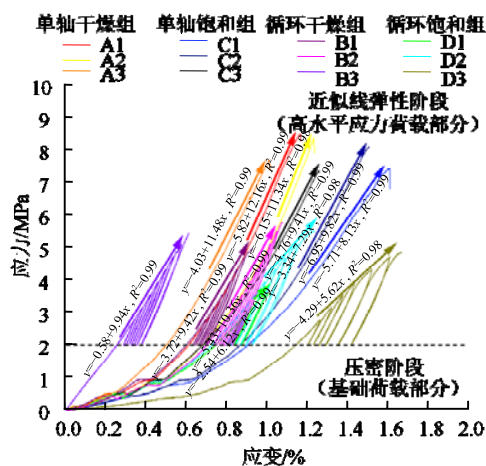


图 7 近似线弹性阶段示意图

Fig.7 Schematic diagram of approximate linear elastic stage

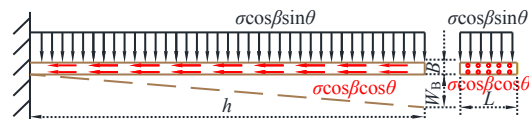


图 8 荷载梁式主控裂隙模型的说明

Fig.8 Description about a loading beam main control crack model

而垂直于该梁状模块加载在该梁上的压应力分力荷载 $\sigma \cos \beta \sin \theta$ 几乎平均分布在 hL 平面的左右两侧,对该梁状结构产生向外的拉裂作用,引起图中对称分布的两个模块在 B 的方向上产生一定量的挠度扩展位移 W_B 。设该梁状变形模块的主惯性矩为 I_B ,根据材料力学中的叠加法原理,在几个荷载同时作用下,梁的任一截面的挠度等于各个荷载单独作用下同一截面挠度的总和。按上述原理可列出初始状态下,该荷载梁式主控裂隙模型在各模块区域的极惯性矩 I_B 和挠度 W_B 的计算公式,分别如下:

$$I_B = \frac{LB^3}{12} \quad (1)$$

$$W_B = \frac{(\sigma \cos \beta \sin \theta \cdot h) \cdot h^4}{8EI_B} \quad (2)$$

式中： θ 为该裂隙模型的长轴与竖直方向的夹角； h 为该主控裂隙在长轴方向上的初始高度； E 为深部煤样在弹性阶段的平均弹性模量。

根据 Griffith 裂隙扩展判定理论可知，裂纹端部继续扩展需要满足能量释放率 G 大于裂隙两端的自由能 γ_s ，即

$$G \geq 2\gamma_s \quad (3)$$

自由能 γ_s 是物体内部材料微粒间作用力的体现，与物体的润湿性能有一定关系，这里我们取干燥状态下的物体自由能为 γ_s ，取湿润状态下的自由能为 $a\gamma_s$ ，其中系数 $a < 1$ 。

而能量释放率 G 指裂隙由某一端点向前扩展一个单位长度时，物体每单位厚度所释放出来的能量，该部分能量主要由系统变形时所释放的弹性应变能提供。在图示模型中，该部分弹性应变能主要由梁式模型的势能改变产生，即在压应力分力荷载 $\sigma \cos \beta \sin \theta$ 的作用下，使荷载梁式模型在裂隙厚度 B 的方向上产生了挠度扩展位移 db ，体现为均布荷载对模型做功积累的能量。因此在本模型中，能量释放率 G 的表达式如下：

$$G = \frac{\sigma \cos \beta \sin \theta \cdot h}{2} \cdot \frac{db}{2} \cdot L \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{dh} \quad (4)$$

对式 (2) 微分，求出 db ：

$$db = \frac{15 \sigma \cos \beta \sin \theta \cdot h^4}{2ELB^3} \cdot dh \quad (5)$$

联立式 (4)、(5) 可得

$$G = \frac{15 \sigma^2 \cos^2 \beta \sin^2 \theta \cdot h^5}{8ELB^3} \quad (6)$$

当能量释放率 G 刚好大于或等于研究煤样的自由能 γ_s 时，初始裂隙可在裂隙的长度 h 方向上继续扩展，即

$$2\gamma_s = \frac{15 \sigma^2 \cos^2 \beta \sin^2 \theta \cdot h^5}{8ELB^3} \quad (7)$$

因此该主控裂隙能够在煤样中持续发育、贯通煤体、造成失稳的应力荷载条件为

$$\sigma \geq \frac{4}{\cos \beta \sin \theta} \sqrt{\frac{ELB^3 \gamma_s}{15h^5}} \quad (8)$$

结合 3.1 节中相关物理性质的研究内容可知，该种深部煤样可以快速吸收水分、达到饱和状态，从而更易发生水-岩相互作用，影响深部煤样的承载能力。选取姚强岭^[11]、赵彬^[14]等在之前的研究中拟合程度最高的单轴抗压强度-含水率公式的通式，进行承载强度公式 (8) 的修正：

$$\sigma' = -mw \times 10^6 + \sigma \quad (9)$$

式中： σ' 为深部煤样在含水率为 w 时，发生结构性失稳或局部结构性失稳的应力数值 (Pa)。 m 为线性相关系数，大于 0，由煤样自身性质决定其数值大小，对本次试验中的数据进行拟合分析，式 (9) 中线性系数 m 的取值为 0.568^[19]。

于是，考虑含水率因素后，主控裂隙发生失稳性扩展时的临界应力荷载修正公式可表达为

$$\sigma' = -mw \times 10^6 + \frac{4E^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}B^{\frac{3}{2}}a^{\frac{1}{2}}\gamma_s^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{15} \cos \beta \sin \theta \cdot h^{\frac{5}{2}}} \quad (10)$$

这里，我们取前文提到的湿润状态下的裂隙扩展自由能为 $a\gamma_s$ ，其中系数 $a < 1$ 。

参考目前土木工程中，梁结构截面参数的确定步骤，确定出不可直接测量值 B 的取值，进而对公式 (10) 继续化简。在确定梁模型的截面尺寸 B 时，宜先根据梁结构的高跨比，即对图 8 中的 B/h 值进行初步选定。于是选取了外部具有主控裂隙特征的、便于测算相关参数的试件，列出荷载梁式裂隙模型的裂隙长度（跨度） h 等主要参数，如表 1 所示。

表 1 部分煤样主要裂隙初始参数表

试件编号	裂隙长度 h/m	裂隙厚度 L/m	裂隙张开角 $\beta/(^\circ)$	裂隙倾角 $\theta/(^\circ)$
A3	0.020	0.055	1	2
B2	0.016	0.020	1	2
C2	0.020	0.070	1	2
D3	0.024	0.060	1	3

根据高层建筑混凝土结构技术规程中所述内容“梁净跨与截面高度之比不宜小于 4”^[22]，并结合深部煤样的内部瑕疵特性和每一次卸载过程中的损伤增加特征，为保证煤体材质的梁式结构在加卸载过程中的整体稳定性，这里我们应尽量放大 B/h 的数值，于是按照技术规程给出的下限范围^[22]，确定深部煤体荷载梁式主控裂隙模型中 B/h 的取值为

$$B/h = 1/4 \quad (11)$$

最后,按照高层建筑混凝土结构技术规程及建筑抗震设计规范中所述的“梁的截面高宽比不宜大于 4”的要求进行验算^[23],即模型图 8 中的梁截面高度 B 不应大于 4 倍的梁截面宽度 L ,即

$$B \leq 4L \quad (12)$$

显然,根据表 1 中的实测结果,式 (11) 中的取值结果满足条件式 (12) 中的所述内容。

联立式 (10)、(11),化简得

$$\sigma' = -mw \times 10^6 + \frac{E^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} a^{\frac{1}{2}} \gamma_s^{\frac{1}{2}}}{2\sqrt{15} \cos \beta \sin \theta \cdot h} \quad (13)$$

根据荷载梁式主控裂隙模型相关公式的定量推导,可以看出深部煤样的承载能力除了与研究煤样的弹性模量、自由能等自身物性因素相关,还主要与周边环境湿度、主控裂隙发育程度、主控裂隙倾角、主控裂隙张开角以及系统选取的梁厚尺寸等方面因素有关。

5.2 公式敏感性因素分析

现以 C2 煤样试件的相关参数为具体算例,做式 (13) 中的单因素敏感性分析,主要关系如图 9~16 所示。

由图 9~12 可知,裂隙系统的梁厚(裂隙高度决定)、初始裂隙高度、初始裂隙宽度、初始裂隙倾角在其各自可能的范围区间内取值时,因变量承载强度的总体变动均呈现出 50% 以上的非线性增减,故应将上述自变量划归为式 (13) 中的高敏感性因素。因此在以后的试验或实践中,上述自变量初始数据的量测与记录应尽可能做到仔细精确。其中,需格外注意的是,当初始裂隙倾角接近 0° 时,即主控裂隙的初始倾向和加载应力方向几乎相同时,该项数据存在奇异性,在裂隙贯通后表现为煤岩体的切冒效应^[21],式 (13) 中建立的模型体系将难以适用,试件的破坏分析和模型的建立应从剪切破坏的理论和滑开型裂隙系统的角度进行考量。当初始裂隙高度接近 0 mm 时,即煤样试件的表面几乎无明显的初始控制裂隙时,该项数据也存在奇异性,这时可以认为煤样的破坏将从煤样内部的主要瑕疵处发生,并逐步扩展到试件表面。

由图 13、14 可知,初始裂隙张开角、试件含水率在其各自可能的范围区间内取值时,因变量承载强度的总体变动呈现出 20% 以内的近似线性增减,故应将初始裂隙张开角、试件含水率划归为式 (13) 中的低敏感性因素。其中,初始裂隙张开角一般较小,其对煤样总体承载强度的影响基本可以

忽略不计。而本文中的深部煤样虽然吸水迅速,但总吸水量低,因此公式中的强度敏感性较低,若换成失稳特征符合荷载梁式主控裂隙模型且吸水率较高的某种煤样,则承载强度关于含水率因素的敏感性特征将数倍增加。

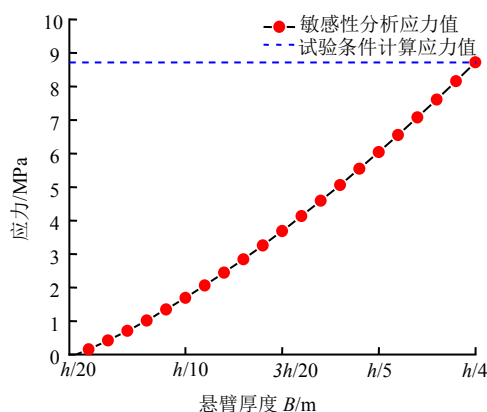


图 9 模型承载强度随系统选取梁厚变化趋势
Fig.9 Variation trend of bearing strength of model with the beam thickness of system selection

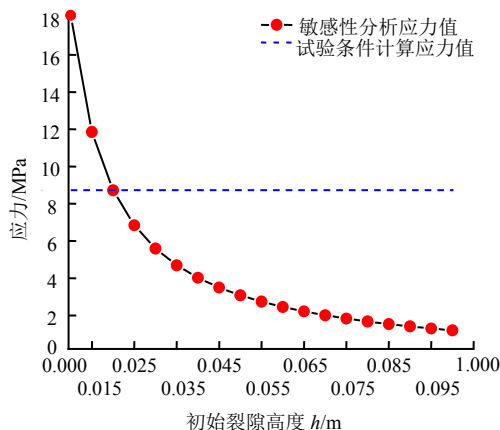


图 10 模型承载强度随初始裂隙高度变化趋势
Fig.10 Variation trend of bearing strength of model with initial crack height

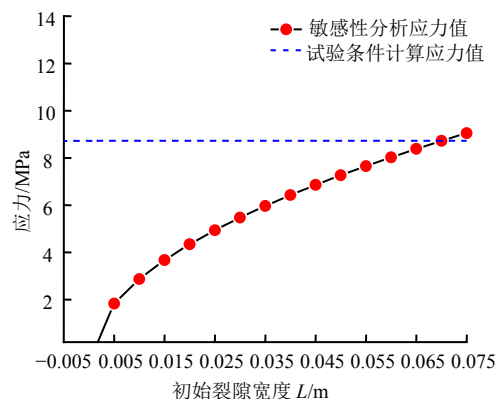


图 11 模型承载强度随初始裂隙宽度变化趋势
Fig.11 Variation trend of bearing strength of model with initial crack width

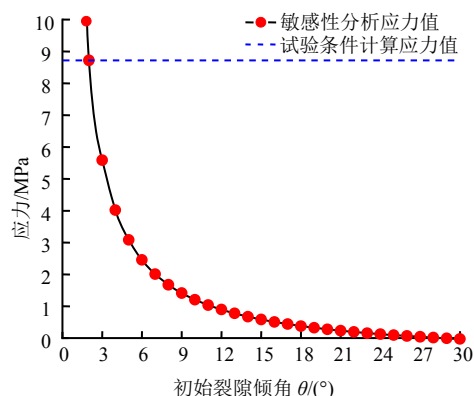


图 12 模型承载强度随初始裂隙倾角变化趋势

Fig.12 Variation trend of bearing strength of model with initial crack dip angle

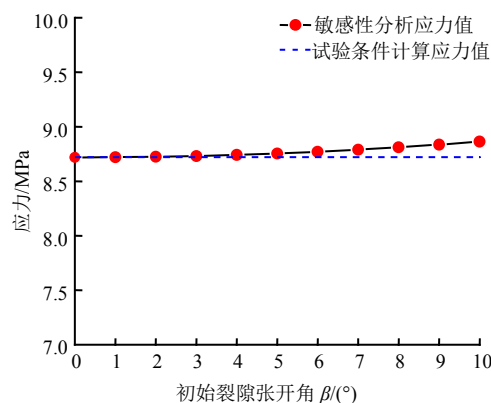


图 13 模型承载强度随初始裂隙张开角变化趋势

Fig.13 Variation trend of bearing strength of model with initial crack opening angle

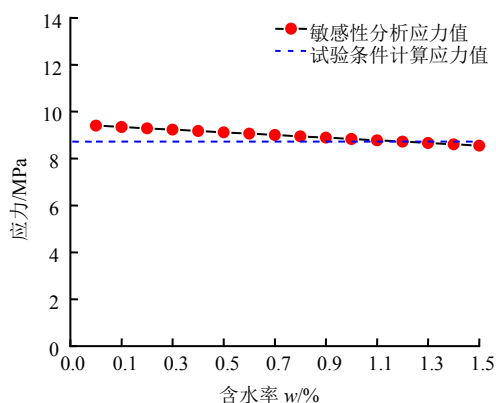


图 14 模型承载强度随试件含水率变化趋势

Fig.14 Variation trend of bearing strength of model with moisture content of specimen

由图 15、16 可知，裂隙扩展自由能、试件平均弹性模量在其各自可能的范围区间内取值时，因变量承载强度的总体变动呈现出 20%~50% 的近似线性增加，故应将裂隙扩展自由能、试件平均弹性模量划归为式 (13) 中的中敏感性因素。在以后

的试验或实践中，涉及到上述自变量初始数据的试验和测算应尽可能地设置一定量的对照组，并参考以往试验和文献中的类似数据，做到合理取值。

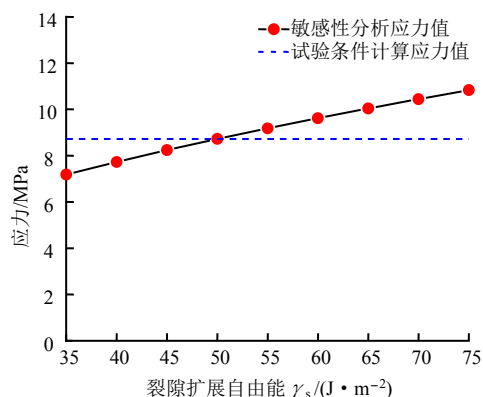


图 15 模型承载强度随裂隙扩展自由能取值变化趋势

Fig.15 Variation trend of bearing strength of model with the free energy value of crack propagation

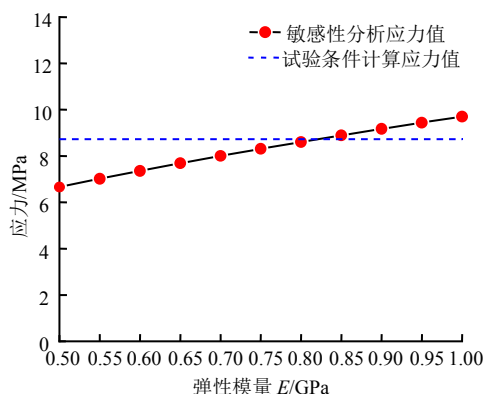


图 16 模型承载强度随平均弹性模量取值变化趋势

Fig.16 Variation trend of bearing strength of model with the value of average elastic modulus

5.3 模型公式验证

物体内部的峰值应力是造成煤样主控裂隙继续发育、发生结构失稳的必要条件。因此，本节将结合深部煤样失稳破坏前后的外观形态，从 A、B、C、D 组中各选取一个具有明显主控裂隙特征的煤样试件进行该模型承载能力公式的验算工作。其中，A3、B2、C2、D3 煤样试件的失稳破坏特征、初始裂隙情况及相关计算参数分别如图 17~20 及表 1 所示。

其中，主控裂隙的初始相关参数根据表 1 中的测算结果取值。

A3、B2、C2、D3 煤样试件在其各自弹性阶段（图 3 中各应力-应变曲线峰前阶段的明显光滑段部分）的平均弹性模量 E 通过力学试验测得，分别为 0.95、0.83、0.82、0.55 GPa。

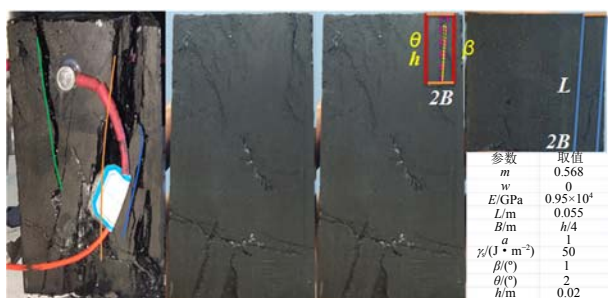


图 17 A3 煤样荷载梁式主控裂隙模型承载强度计算示意图
Fig.17 Calculation schematic of bearing strength of a loading beam main control crack model of A3 coal sample

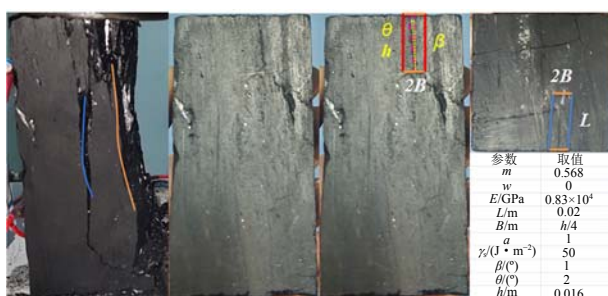


图 18 B2 煤样荷载梁式主控裂隙模型承载强度计算示意图
Fig.18 Calculation schematic of bearing strength of a loading beam main control crack model of B2 coal sample



图 19 C2 煤样荷载梁式主控裂隙模型承载强度计算示意图
Fig.19 Calculation schematic of bearing strength of a loading beam main control crack model of C2 coal sample

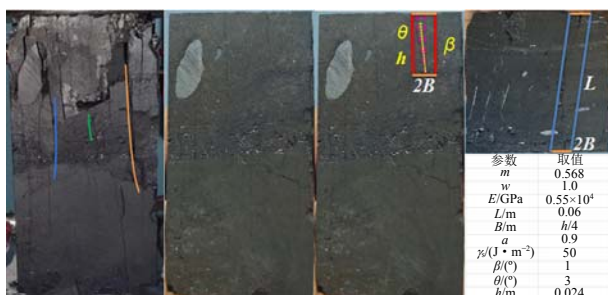


图 20 D3 煤样荷载梁式主控裂隙模型承载强度计算示意图
Fig.20 Calculation schematic of bearing strength of a loading beam main control crack model of D3 coal sample

自由能 γ_s 结合参考文献[24]中的能量释放率 G 的数据进行选取。文献[24]中提及的有机玻璃试件的平均弹性模量为 6.1 GPa, 在预制裂隙条件下, 裂

隙尖端向前扩展单位长度的能量释放率 G 约为 200~600 N/m。因此在本文中, 考虑到一般煤样试件在材料性质上的整体缺陷性和局部完整性(裂隙的初始扩展可看成小范围内的局部现象), 且单轴条件下煤体试件的弹性模量一般为 0.5~5 GPa, 于是煤样试件中初始主控裂隙的尖端能量释放率 G 可对照文献[24]中的数据取下限, 暂按 100 N/m 取整计算, 故本节中的自由能 γ_s 将按 50 J/m² 取整计算, 湿润条件下的系数 a 暂按 0.9 取值。

对本文中的饱和含水率-峰值应力数据进行线性拟合, 当含水率为 w 时, 含水修正系数 m 的取值为 0.568^[19]。

由 4.1 节可知, A3、B2、C2、D3 煤样试件的试验峰值强度依次为 8.22、5.85、8.21、4.91 MPa, 而本节 A3、B2、C2、D3 煤样试件的计算承载强度依次为 9.46、6.66、8.72、3.39 MPa, 与实际值分别偏差 15.08%、13.92%、6.18%、27.49%。因此, 荷载梁式主控裂隙模型在量纲上符合要求, 在数值上贴近试验, 较好地解释了本文中深部含水煤样产生贯通裂隙、造成张拉破坏的失稳特征, 可为类似的试验研究提供参考, 具有进一步的现场演算价值。

6 结 论

(1) 文中深部煤样的饱和吸水率较低, 但相对吸水速率处于较高水平。说明该种深部煤体在潮湿的环境中, 更容易达到饱水状态、发生水岩弱化作用。因此, 在测算深部煤样的承载能力时, 应充分考虑饱和水对深部煤样产生的影响。

(2) 阐述了一种深部富水巷道松动圈范围内煤岩体的受载过程——单轴高应力逐级加卸载应力路径。在饱和水与应力路径的影响下, 文中深部煤样主要以张开型主控裂隙的张拉破坏发生结构失稳。

(3) 基于文中深部煤样的极易饱和特征和失稳破坏特征, 并考虑含水率、裂隙参数以及系统尺寸等因素, 优化建立了荷载梁式主控裂隙模型, 变“点力结构模型”为“荷载结构模型”, 解释了文中煤样主要发生张拉破坏的机制, 明确了梁式裂隙结构系统中梁板厚度的选取依据, 给出了详细的理论公式推导过程、敏感因素分析建议及测量验算具体数据。理论公式在量纲上符合要求, 验算结果在数值上贴近试验, 较好地解释了文中深部含水煤样的失稳破坏特征。

(4) 沿着荷载梁主要长度方向加载在梁式模型上的荷载分力 $\sigma \cos \beta \cos \theta$ 起到压实梁式模型、抑制

剪切破坏的作用, 而垂直于荷量梁主要长度方向加载在梁式模型上的荷载分力 $\sigma \cos \beta \sin \theta$ 起到向前扩展裂隙、拉裂破坏煤样的作用。

参考文献

- [1] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. **Journal of China Coal Society**, 2021, 46(3): 716-725.
- [2] ZHENG C S, KIZIL MEHMET S, CHEN Z E, et al. Role of multi-seam interaction on gas drainage engineering design for mining safety and environmental benefits: linking coal damage to permeability variation[J]. **Process Safety and Environmental Protection**, 2018, 114: 310-322.
- [3] YANG H Q, HAN C L, ZHANG N, et al. Stability control of a goaf-side roadway under the mining disturbance of an adjacent coal working face in an underground mine[J]. **Sustainability**, 2019, 11(22): 1-18.
- [4] 肖福坤, 申志亮, 刘刚, 等. 循环加卸载中滞回环与弹塑性应变能关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1791-1797.
XIAO Fu-kun, SHEN Zhi-Liang, LIU Gang, et al. Relationship between hysteresis loop and elastoplastic strain energy during cycle loading and unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(9): 1791-1797.
- [5] 邓华锋, 方景成, 李建林, 等. 水-岩和循环加卸载次序作用下砂岩动力特性损伤演化规律[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 343-351.
DENG Hua-feng, FANG Jing-cheng, LI Jian-lin, et al. Damage evolution of dynamic characteristics of sandstone under the sequential action of water-rock interaction and cyclic loading and unloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(2): 343-351.
- [6] 汪北方, 梁冰, 王俊光, 等. 煤矿地下水库岩体碎胀特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4086-4092, 4101.
WANG Bei-fang, LIANG Bing, WANG Jun-guang, et al. Experiment study on rock bulking of coal mine underground reservoir[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(11): 4086-4092, 4101.
- [7] YAO Q L, CHEN T, JU M H, et al. Effects of water intrusion on mechanical properties of and crack propagation in coal[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(12): 4699-4709.
- [8] 徐鹏飞, 邓华锋, 张恒宾, 等. 不同应力水平下砂岩时滞性单轴压缩破坏特性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3041-3050, 3078.
XU Peng-fei, DENG Hua-feng, ZHANG Heng-bing, et al. Time-lag uniaxial compression failure characteristics of sandstone under different stress levels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(11): 3041-3050, 3078.
- [9] 张磊, 阚梓豪, 薛俊华, 等. 循环加卸载作用下完整和裂隙煤体渗透性演变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2487-2499.
ZHANG Lei, KAN Zi-hao, XUE Jun-hua, et al. Study on permeability law of intact and fractured coals under cyclic loading and unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(12): 2487-2499.
- [10] 中华人民共和国应急管理部, 国家矿山安全监察局. 煤矿安全规程(2022)[S]. 北京: 应急管理出版社, 2022.
Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, State Mine Safety Supervision Bureau. Coal mine safety regulations (2022) [S]. Beijing: Emergency Management Publisher, 2022.
- [11] 姚强岭, 王伟男, 李学华, 等. 水-岩作用下含煤岩系力学特性和声发射特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 558-569.
YAO Qiang-ling, WANG Wei-nan, LI Xue-hua, et al. Study of mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal measures under water-rock interaction[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2021, 50(3): 558-569.
- [12] 汤传金. 干湿循环及酸性水环境影响下煤样损伤特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
TANG Chuan-jin. Study on damage characteristics of coal under the influence of dryness-saturation cycles and acid water environment [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [13] 陈宁. 动静载作用下地下水库煤柱坝体损伤特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
CHEN Ning. Study on damage characteristics of coal pillar dam body of groundwater reservoir under dynamic and static load [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [14] 赵彬. 水作用下煤体强度弱化特征试验[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
ZHAO Bin. Experimental study on the strength

- weakening characteristics of coal mass subjected to water intrusion [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [15] 姚强岭, 郝琪, 陈翔宇, 等. 煤矿地下水库煤柱坝体宽度设计[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 891-899.
- YAO Qiang-ling, HAO Qi, CHEN Xiang-yu, et al. Design on the width of coal pillar dam in coal mine groundwater reservoir[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(3): 891-899.
- [16] 陈田, 姚强岭, 杜茂, 等. 浸水次数对煤样裂隙发育损伤的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2): 3756-3762.
- CHEN Tian, YAO Qiang-ling, DU Mao, et al. Experimental research of effect of water intrusion times on crack propagation in coal[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.2): 3756-3762.
- [17] CHEN T, YAO Q L, WEI F, et al. Effects of water intrusion and loading rate on mechanical properties of and crack propagation in coal-rock combinations[J]. **Journal of Central South University**, 2017, 24(2): 423-431.
- [18] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
- XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [19] CHEN X Y, YAO Q L, SHAN C H, et al. Study on energy density distribution and mass fractal of deep saturated coal samples under uniaxial stepwise high stressed loading and unloading path [J]. **Geofluids**, 2022, 2022: 7743490.
- [20] 甘一雄, 吴顺川, 任义, 等. 基于声发射上升时间/振幅与平均频率值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2324-2332.
- GAN Yi-xiong, WU Shun-chuan, REN Yi, et al. Evaluation indexes of granite splitting failure based on RA and AF of AE parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(7): 2324-2332.
- [21] 李文洲, 康红普, 姜志云, 等. 深部裂隙煤岩体变形破坏机理及高压注浆改性强化试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 912-923.
- LI Wen-zhou, KANG Hong-pu, JIANG Zhi-yun-, et al. Deformation failure mechanism of fractured deep coal-rock mass and high-pressure grouting modification strengthening testing[J]. **Journal of China Coal Society**, 2021, 46(3): 912-923.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. JGJ 3—2010 Technical specification for concrete structures of tall buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [24] 沈世伟, 李国良, 李冬, 等. 不同角度预制裂隙条件下双孔爆破裂纹扩展规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3049-3057.
- SHEN Shi-wei, LI Guo-liang, LI Dong, et al. Crack propagation law of two hole blasting under different angles of prefabricated fissure[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(10): 3049-3057.