

隔水煤柱采动渗流耦合失效特征及其合理宽度

李 竹^{1,2}, 樊建宇^{1,2}, 冯国瑞^{1,2}, 张 宏^{1,2}, 祁承恩^{1,2}, 张靖宇^{1,2}

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 矿山岩层控制与灾害防控山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘 要:采空区遗留隔水煤柱水浸软化及采动影响下的耦合失效, 是诱发同层回采工作面突水事故的常见原因之一, 探究采空区积水隔水煤柱失效特征及其合理宽度, 对于矿井水害防治具有重要意义。以甘肃华亭砚北煤矿 250209 工作面同层上覆关闭采空区隔水煤柱安全宽度为研究对象, 通过理论分析及 FLAC^{3D} 数值仿真研究, 分析了浸水侧煤体局部失效、坍塌及总宽度不足时隔水煤柱整体失稳灾变过程, 揭示了水浸弱化、采动、渗流复杂影响下隔水煤柱内应力场、塑性区、渗流场耦合特征, 掌握了不同煤柱宽度条件下隔水煤柱阻水能力及稳定性演化规律, 提出了“渗水区+弹性压密阻水区+塑性区”3 区联合型隔水煤柱宽度确定方法。结果表明: ① 隔水煤柱在覆岩载荷及采空区积水水压叠加作用下浸水侧下部煤体率先剪切塑性破坏, 随着积水侵蚀渗透范围的扩张及不同程度浸泡弱化, 诱发该区域煤体承载能力劣化及坍塌, 最终导致隔水煤柱偏心压缩不均承载的倾倒失稳。② 3 个阶段中隔水煤柱上部、中部、下部塑性区发育宽度不同, 均呈现出沿煤柱高度方向自上而下逐步增加的现象, 即隔水煤柱浸水侧下部塑性区扩展范围相对中部及上部更大, 表明隔水煤柱底部区域更易形成导水通道, 与理论分析相一致。③ 隔水煤柱中塑性区体积占据了渗水区总体积 83% 以上, 是隔水煤柱导水的主要区域, 弹性区体积占据了渗水区总体积的 17%, 尽管其占比较小, 但其决定了渗水区范围的最大扩展边界, 且弹性渗水区呈现出“高应力低渗透小范围”和“低应力高渗透大范围”应力渗透耦合特征。④ 隔水煤柱阻水能力取决于浸水侧渗水区与采动侧塑性区范围及其连通特性, 隔水煤柱宽度为 110 和 120 m 时, 渗水区与塑性区完全连通; 隔水煤柱宽度为 130、140 和 150 m 时, 渗水区与塑性区不连通, 两者之间弹性压密阻水区宽度分别为 5.5、11.5 和 23.5 m。基于此, 将渗水区与采动塑性区相连通作为矿井水突破隔水煤柱的临界条件, 提出了弹性压密阻水区宽度不小于 20 m 的“渗水区+弹性压密阻水区+塑性区”3 区联合型隔水煤柱宽度确定方法, 指出了合理宽度不宜仅将弹性核区占比大于 31%、塑性区不连通等常规支撑型煤柱稳定性指标作为隔水煤柱稳定判别方法, 还应考虑隔水煤柱的阻水性能。

关键词: 隔水煤柱; 水浸软化; 流固耦合; 偏心压缩; 弹性压密阻水区

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)11-4011-13

Failure characteristics and reasonable width of water-resisting pillar under the coupling effect of mining and seepage

收稿日期: 2023-01-02 修回日期: 2023-03-26 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0004

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目 (U22A20169); 国家杰出青年科学基金资助项目 (51925402); 山西省科技重大专项资助项目 (20201102004)

作者简介: 李 竹 (1989—), 男, 山西长治人, 副教授, 硕士生导师。E-mail: lizhu01@tyut.edu.cn

通讯作者: 冯国瑞 (1976—), 男, 山西阳城人, 教授, 博士生导师。E-mail: fguorui@163.com

引用格式: 李竹, 樊建宇, 冯国瑞, 等. 隔水煤柱采动渗流耦合失效特征及其合理宽度[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 4011-4023.

LI Zhu, FAN Jianyu, FENG Guorui, et al. Failure characteristics and reasonable width of water-resisting pillar under the coupling effect of mining and seepage[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 4011-4023.



移动阅读

LI Zhu^{1,2}, FAN Jianyu^{1,2}, FENG Guorui^{1,2}, ZHANG Hong^{1,2}, QI Chengen^{1,2}, ZHANG Jingyu^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of Shanxi Province for Mine Rock Strata Control and Disaster Prevention, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The coupling failure induced by the influence of mining practice and the water immersion softening of the water-resisting coal pillars in old goaf is one of the common causes of water inrush accidents in the same seam working face. Exploring the failure characteristics and reasonable width of the water-resisting coal pillars in the old goaf is of great significance for the prevention and control of mine water damage. The safe width of the water-resisting coal pillars in the closed overlying goaf in the same layer of the No.250209 working face of the Yanbei Coal Mine in Huating, Gansu Province is taken as the research object. The theoretical analysis and the FLAC^{3D} numerical simulation are conducted to analyze the whole instability disaster process of water-resisting coal pillars as the occurrence of partial failure of the immersed coal blocks, collapse, and insufficient total width. The coupling characteristics of the stress field, plastic area and seepage field in the water-resisting coal pillars under the complex influence of water immersion weakening, mining and seepage have been revealed and the water blocking capacity and stability evolution law of water-resisting coal pillars with different coal pillar widths are obtained. Accordingly, a method for determining the width of the water-resisting coal pillars of three-zone combined type of “water seepage zone + elastic compaction water resisting zone + plastic zone” is proposed. The results show that ① the plastic failure firstly occurs in the lower coal at the immersed side of the water-resisting coal pillar under the superimposed action of overburden load and water pressure in the goaf. And with the expansion of the seepage scope of water erosion and the gradual immersion-induced weakening, the deterioration and collapse of the bearing capacity of the coal in this area are induced, which ultimately leads to the eccentric axial compression and collapse of the water-resisting coal pillar. ② In the three stages, the development width of the plastic zone at the upper, middle and lower parts of the water-resisting coal pillar is different, showing a gradual increase from top to bottom along the increasing height of the coal pillar. That is, the extension range of the plastic zone at the lower part of the water-resisting coal pillar at the soaking side is larger than that at the middle and upper parts, indicating that the bottom area of the water-resisting coal pillar is more likely to form a water channel. This practical condition is consistent with the theoretical analysis. ③ The volume of plastic zone of water-resisting coal pillar, accounting for more than 83% of the total volume of water seepage zone, is the main area for water transmission of water-resisting coal pillar. Although the volume of elastic zone only accounts for 17%, a relatively small proportion, of the total volume of water seepage zone, it determines the maximum expansion boundary of the range of water seepage zone. Also, the seepage coupling characteristics of “small range, high stress, and low permeability” and “large range, low stress, and high permeability” have been shown in the elastic water seepage zone. ④ The water blocking capacity of the water-resisting coal pillar depends on the range and connectivity between the water seepage area and the plastic area on the mining side. When the width of the water-resisting coal pillar is 110 m and 120 m, the water seepage area and the plastic area are completely connected. And when the width of water-resisting coal pillar become 130, 140 and 150 m, the water seepage area and plastic area are not connected, and the width of elastic compaction water resisting area between them is 5.5, 11.5 and 23.5 m, respectively. Based on this, the connection between the seepage zone and the mining plastic zone is regarded as the critical condition for the mine water to break through the water-resisting pillar. And a method for determining the width of the three zones combined water-resisting coal pillar of “water seepage zone + elastic compaction water resisting zone + plastic zone” with the condition that width of the elastic compaction zone is no less than 20 m is proposed. It is pointed out that not only the conventional stability index of support coal pillar, such as more than 31% proportion of the elastic core zone and the unconnected plastic zone, but also the water resisting performance of the water-resisting coal pillar should be taken as the criteria to determine the stability of the water-resisting coal pillar.

Key words: water resisting coal pillar; water immersion softening; fluid structure coupling; eccentric axial compressive; elastic compaction water blocking area

突水事故是制约矿井安全生产的主要灾害类型之一^[1]。据不完全统计,2000—2017 年我国共发生 1 173 起煤矿水灾事故,死亡 4 760 人。其中,重特大水灾事故 100 起、死亡 1 840 人,分别占水灾事故总起数和总死亡人数的 8.53% 和 38.66%^[2]。根据煤层与充水水源、通道空间位置关系所划分的七大类水害之中,采空水水害最为典型^[3-4],而同层采空区遗留隔水煤柱在水浸软化及采动耦合作用下失效,是诱发同层回采工作面突水事故的常见原因之一。

深入研究采动及水浸软化耦合影响下隔水煤柱渗透特性及渗水区与塑性区连通规律是揭示隔水煤岩柱阻水能力退化及失稳的关键。围绕这一课题,国内外诸多学者取得了丰硕成果。顾大钊等^[5-7]提出了地下水库及其安全系数的概念,对储水性能、库容、人工及煤柱坝体稳定性等内容展开了全方位理论及实践研究;姚强岭等^[8-9]研发了无损浸水实验装置,揭示了反复浸水次数、含水率对煤岩样力学特性及损伤特征的影响;WANG 等^[10]借助于原位核磁共振实验,测定了三轴压缩条件下煤样全应力应变过程中渗透率的动态演变规律;李波波等^[11]通过不同含水率煤岩样渗流实验,揭示了孔隙水压与水分叠加影响下煤岩体渗透率演变特征;ALAM 等^[12]对比分析了 3 种不同岩石在三轴压力下渗透率演化规律,揭示了围压对岩石渗透率的影响机制;何团等^[13]通过数值模拟及理论计算,提出深孔爆破切缝卸压以提高隔水煤柱稳定性的工程方法;ZHANG 等^[14]通过数值模拟与现场实测,揭示了关键层与复合含水层联动影响下应力-裂缝-渗流场的耦合效应;师维刚等^[15]通过理论分析计算了隔水煤柱各结构分区宽度,并结合实测给出了隔水煤柱宽度确定方法;白东尧等^[16]建立了人工坝体塑性区宽度和水压的函数关系,获得了地下水库储水极限水头;王方田等^[17]模拟研究了多工作面开采顶板动载作用下煤柱坝体的动态损伤及破坏规律;张村等^[18]、韩鹏华等^[19]构建了煤矿地下水库的流-固耦合数值模型,研究了采空区储水性能及其对煤柱坝体稳定性的影响规律;刘少伟等^[20]通过理论计算及数值模拟揭示了积水区沿空掘巷煤柱稳定性演变规律。

纵观已有文献,多聚焦于实验测定不同应力路径下煤岩试样渗透率变化规律及含水率对煤岩试样力学参数的弱化效应;部分研究亦将煤岩柱设定为透水或不透水介质,借助塑性区来判定隔水煤柱稳定性。然而,有关隔水煤柱渗水区扩展特征、水浸软化效应下隔水煤柱采动渗流耦合失效特征及其稳定规律的研究相对较少,导致难以衡量内部单元弹塑状态和应力对渗透率及含水率的影响,未能反映水浸作用下煤体弹性模量、内摩擦角及黏聚力减小诱发隔水煤柱浸

水部分失效及煤柱整体承载能力劣化的现象,易对隔水煤柱阻水性能及其稳定性评价造成影响。

鉴于此,笔者建立了覆岩载荷及采空区积水水压作用下隔水煤柱力学模型,揭示了内应力分布特征及失效模式,开发了含水浸软化程序的 FLAC^{3D} 不饱和渗流模型,通过实时捕捉单元应力、应变及弹塑状态,递进式获得渗透率→含水饱和度→力学参量软化系数,实现了采动、水浸软化及渗透耦合全过程参数动态更新,揭示了隔水煤柱“采动+水浸软化+渗透”耦合作用失效模式及不同煤柱宽度中上部渗水区、中部阻水区、下部塑性区的 3 区分布及连通特征,并据此提出了隔水煤柱宽度确定方法,研究可为隔水煤柱合理宽度确定及稳定性研究提供参考。

1 工程概况

甘肃华亭砚北煤矿 250209 工作面北部浅部煤层为已关停矿井的老采空区,距今已达 15 a 之久,由于该矿关闭时间久,且曾沿煤层露头开采。老采空区顶板含水层渗淋水及地面降雨已导致采空区大量积水,且不同区域积水深度差异较大。水文地质资料表明,该区域内地下水分为第四系松散岩类孔隙水、前第四系碎屑岩类孔隙裂隙水、碳酸盐类裂隙岩溶水三大类和若干亚类,地下水位埋藏较浅,水量丰富。采空区总面积约 17.7 万 m²,开采区域煤层平均厚度为 25.2 m,煤层平均倾角为 15°,采空区内最低开采标高为 1 270 m,最高开采标高 1 360 m。现回采 250209 工作面,上方隔水煤柱拟留设宽度约 150 m,250209 工作面隔水煤柱及同层临近矿井老采空区相对位置关系,如图 1 所示,现需对该隔水煤柱留设宽度及其稳定性进行研究,以确保矿井安全生产。

2 水浸-采动叠加作用下煤柱承载力学模型

2.1 力学模型及解析

基于前述分析可构建隔水煤柱承载力学模型,如图 2 所示,由此计算获得隔水煤柱内部各应力分量大小和内应力场分布特征。隔水煤柱宽 b ,高 h ,煤层倾角为 θ ,对隔水煤柱顶界面垂直载荷进行分解,分解获得隔水煤柱顶界面边界应力为正压力 $\gamma H \cos \theta$, γ 为上覆岩层平均容重, H 为隔水煤柱顶界面距离地表的深度,如图 2 所示中紫色箭头所示;以及沿着隔水煤柱顶界面向下的剪切应力 $\gamma H \sin \theta$,如图 2 中绿色箭头所示。煤柱密度为 ρ_1 ,重力加速度 g 。左侧为上覆老采空区积水及其压力分布形态,密度为 ρ_2 ;左边界煤柱顶界面承受侧向水压最小,记为 $\rho_2 g h_1$;左边界煤柱底界面承受侧向水压最大,记为 $\rho_2 g h_2$; h_1 为隔水煤柱顶

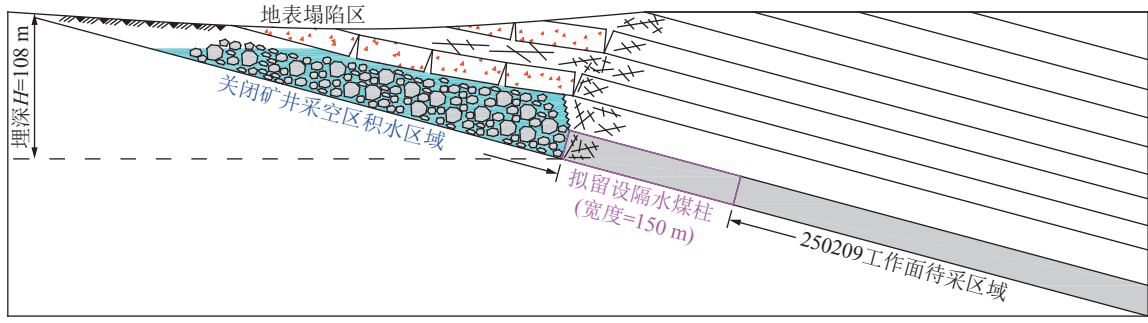


图 1 隔水煤柱与上方采空区相对位置关系示意

Fig.1 Schematic diagram of relative position relationship between water-resisting coal pillar and upper goaf

界面与积水区最高水位距离; h_2 为隔水煤柱底界面与积水区最高水位距离, 煤柱高度即为 $h=h_2-h_1$; A 为煤柱模型内部的任一单元, 其在煤柱内部的位置由 x 和 y 确定。

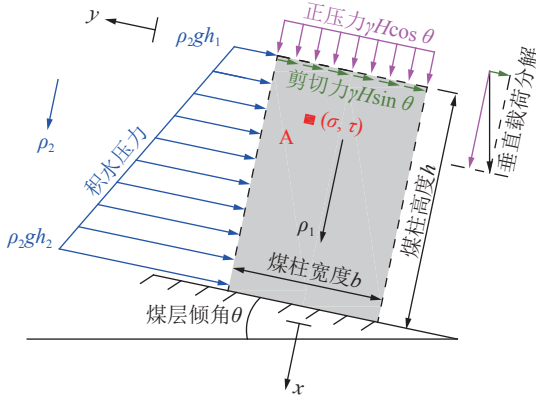


图 2 隔水煤柱内应力计算力学模型示意

Fig.2 Mechanical model for calculation of stress field in water-resisting coal pillar

基于应力边界条件, 可设分量函数如式 (1) 所示, 据此获得 Airy 应力函数如式 (2) 所示:

$$\sigma_y = (x + h_1)f(y) \quad (1)$$

$$\phi = \frac{x^3}{6}f(y) + \frac{x^2}{2}h_1f(y) + xf_1(y) + f_2(y) \quad (2)$$

其中, σ_y 为煤柱内部各单元, 在 y 方向的应力分量; ϕ 为艾里应力函数。在此基础上, 依据应力函数 $\nabla^4\phi = 0$, 可得式 (3), 进而可分别求得 $f(y)$ 、 $f_1(y)$ 、 $f_2(y)$ 的函数表达式, 如式 (4) 所示, 据此可获得各个应力分量计算表达式, 并结合上述边界条件, 最终求得各应力分量中待定系数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 、 H 、 I 的对应结果, 代入式 (4) 获得隔水煤柱内应力场应力分量计算结果, 如式 (5) 所示。

$$2\left[x\frac{\partial^2 f(y)}{\partial y^2} + h_1\frac{\partial^2 f(y)}{\partial y^2}\right] + \frac{x^3}{6}\frac{\partial^4 f(y)}{\partial y^4} + \frac{x}{2}h_1\frac{\partial^4 f(y)}{\partial y^4} + x\frac{\partial^4 f_1(y)}{\partial y^4} + \frac{\partial^4 f_2(y)}{\partial y^4} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} f(y) = Ay^3 + By^2 + Cy + D \\ f_1(y) = -\frac{A}{10}y^5 - \frac{B}{6}y^4 + Gy^3 + Hy^2 + Iy \\ f_2(y) = -h_1\frac{A}{10}y^5 - h_1\frac{B}{6}y^4 + Ey^3 + Fy^2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{2\rho_2 g}{b^3}y(x^3 + 3h_1x^2) - \frac{4\rho_2 g}{b^3}xy^3 + \frac{3\rho_2 g}{5b}xy - \frac{4h_1\rho_2 g}{b^3}y^3 + \frac{3\rho_2 g}{5b}h_1y - \gamma H \cos \theta - \rho_1 gx \\ \sigma_y = \rho_2 g(x + h_1)\left(\frac{2}{b^3}y^3 - \frac{3}{2b}y - \frac{1}{2}\right) \\ \tau_{xy} = -\rho_2 gx^2\left(\frac{3}{b^3}y^2 - \frac{3}{4b}\right) - \rho_2 gh_1x\left(\frac{6}{b^3}y^2 - \frac{3}{2b}\right) + \left(\frac{\rho_2 g}{b^3}y^4 - 3\frac{b^2\rho_2 g + 20r h \sin \theta}{10b^3}y^2 + \frac{b^2\rho_2 g + 120r h \sin \theta}{80}\right) \end{cases} \quad (5)$$

2.2 内应力场分布规律

基于式 (5) 可计算获得隔水煤柱在上覆岩层载荷及侧向水压作用下的内应力场分布规律, 3 个应力分量 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 应力分布云图分别如图 3(a)~(c) 所示。在此基础上, 依据主应力计算公式 (式 (6)、(7)), 获得最大剪切应力及其分布规律, 如图 3(d) 所示。

$$\begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{cases} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \tau_{\max} \\ \tau_{\min} \end{cases} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (7)$$

由图 3(a)~(c) 可知, 图 2 中所示的受载特征下隔水煤柱中垂直应力集中于右侧底部位置。水平应力集中于左侧煤体, 且沿着煤柱高度方向自上而下逐步递增, 与采空区积水压力分布相一致, 在隔水煤柱内部自左向右传递逐步衰减。剪切应力集中于煤柱底界面中部位置, 沿煤柱纵向中轴线近似呈对称分布。

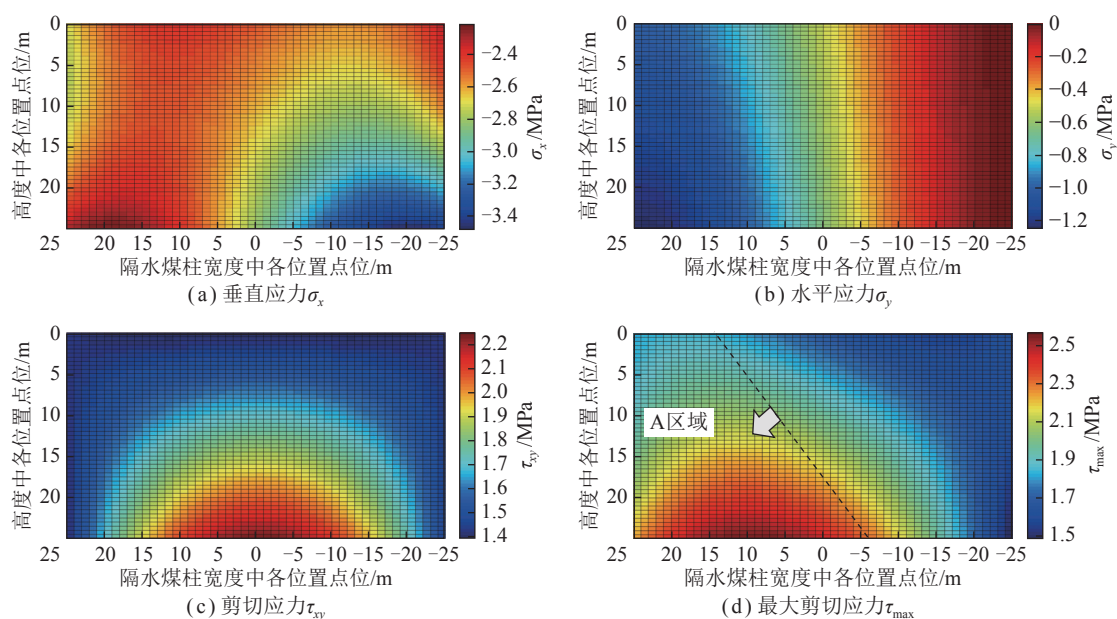


图 3 隔水煤柱中各内应力分量及最大剪切应力云图

Fig.3 Cloud chart of internal stress components and maximum shear stress in water-resisting coal pillar

2.3 隔水煤柱失效特征

隔水煤柱失效模式及特征与其内部最大剪切应力分布密切相关,最大剪切应力集中区分布特征,如图 3(d) 所示。由此可知,在上覆载荷及侧向水压作用下,左下方 A 区域为剪切应力集中区,意味着该区域煤体将率先发生剪切塑性及破坏,而后水体将从下部塑性及破坏区进入煤体,引起隔水煤柱下部渗水范围

显著大于上部,如图 4(a) 所示。水浸长期持续作用引起煤体弹性模量、黏聚力及内摩擦角减小,导致隔水煤柱下部有效承载宽度大幅缩减,如图 4(b) 所示。这种条件下,若煤柱宽度不足,在上覆载荷及积水侵蚀作用下隔水煤柱将出现偏心不均承载,最终导致隔水煤柱整体性倾倒失稳,如图 4(c) 所示。隔水煤柱浸水侧底部失效及整体失稳灾变过程,如图 4 所示。

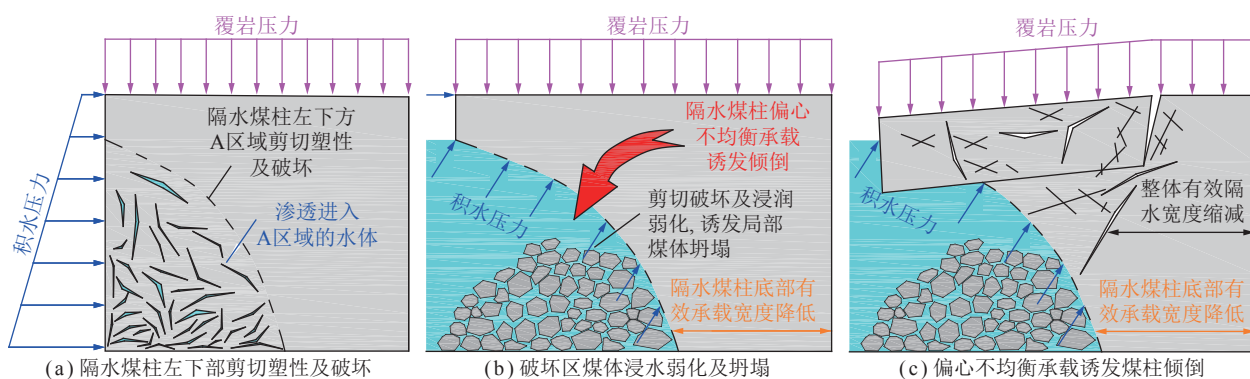


图 4 隔水煤柱浸水侧左下部劣化及整体失稳灾变过程示意

Fig.4 Diagram of the deterioration and overall instability process of the water-resisting coal pillar

需要说明的是,该理论计算存在一定简化,仅从静力分析角度研究了上覆均布载荷和积水压力作用下隔水煤柱潜在失稳模式。事实上,隔水煤柱长期承受积水浸泡,并在水压作用下不断渗入煤柱内部,引起含水区域煤体力学参数及强度降低,且降低程度与水压及含水量紧密相关,在叠加采动影响后最终导致隔水煤柱承载能力劣化及失稳。因此,针对理论研究中难以表征的变量及其对隔水煤柱的影响规律,如水浸软化、采动应力非均匀分布、不同区域渗透率差异

等,笔者进一步开展 FLAC^{3D} 模拟研究,开发了含有水浸软化程序的 FLAC^{3D} 不饱和渗流模型,据此研究水浸软化效应下采动与渗流耦合影响诱发的弹塑性区、渗水区扩展特征及隔水煤柱阻水性能、稳定性变化规律。

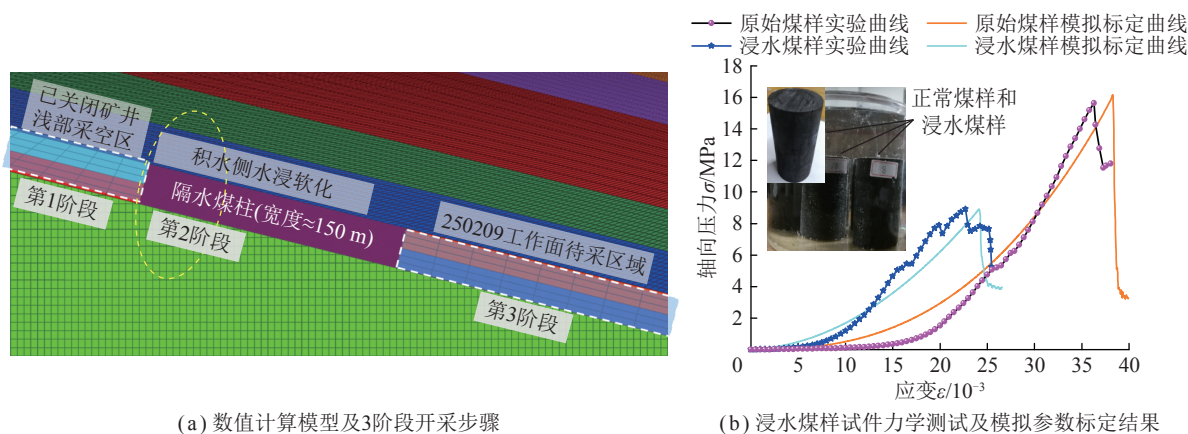
3 水浸-采动叠加作用下煤柱内应力及弹塑性发育规律

3.1 数值模型构建

基于前述工程概况,建立 FLAC^{3D} 流固耦合仿真

计算模型,按照实际开采次序,进行“浅部煤层开采形成采空区(第1阶段)→采空区积水侵蚀及水浸软化隔水煤柱(第2阶段)→水浸软化效应下250209工作面“采动+渗流”耦合作用隔水煤柱变形及破坏(第3阶段)”3阶段递进式研究,如图5(a)所示。模型四周及底部边界采用位移约束,上部为自由边界,考虑到不同采空区区域积水深度差异较大,部分区域积水深度达60 m以上,故为最大限度确保隔水煤柱的稳定性,以为涵盖目前尚未探明的更高积水水位区域对隔水煤柱造成的影响,笔者设置隔水煤柱左侧承受静载水压力为1.0 MPa,即假定上覆采空区处于完全浸水状态,隔水煤柱承受水头即为积水沿开采标高引起的压

力差。此外,为反映水浸软化效应下采动和渗流对隔水煤柱弹塑性区、渗水区及失效特征的耦合影响,煤样采用应变软化模型,并对模拟参数进行标定,结果如图5(b)所示,图中浸水煤样已达饱和含水状态,其含水率约为9.58%。煤样预处理时,首先将煤样放入干燥箱,采用60℃烘干24 h;然后将干燥煤样放入矿井水样品中进行浸泡,每隔2 h取出煤柱试样,并用湿润毛巾轻轻拭去煤样表面悬挂水珠,使其表面没有滴水现象;最后,采用FA系列高精度分析电子天平(精度可达0.001 0~0.000 1 g)对其称重,直至连续几次测量煤样质量变化量小于0.01 g时,认为煤样达到吸水饱和状态。模型中相关材料参数见表1。



(a) 数值计算模型及3阶段开采步骤

(b) 浸水煤样试件力学测试及模拟参数标定结果

图5 FLAC^{3D}数值仿真计算模型及煤柱试件测试结果

Fig.5 FLAC^{3D} numerical simulation calculation model and coal pillar parameter calibration

表1 数值模拟中材料参数取值
Table 1 Values of material parameters in numerical simulation

岩性	密度/ (kg·m ⁻³)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ MPa	抗拉强 度/MPa
黏土岩	2 500	2.45	2.00	23	0.85	0.350
细砂岩	2 675	2.85	2.10	42	3.20	1.290
泥岩	2 641	3.51	2.67	30	1.20	0.605
粉砂岩	2 695	7.82	5.98	38	2.75	1.840
砂质泥岩	2 668	5.50	3.74	30	2.16	0.760
煤层	1 415	2.20	1.64	27	1.50	0.800
粗砂岩	2 410	7.25	5.34	37	2.00	2.200
中粒砂岩	2 673	7.13	5.23	37	4.10	1.800

3.2 分区渗透特性及水浸软化程序开发

隔水煤柱渗透特性及弹塑性状态与煤体内部各单元应力状态相关,决定着渗水区范围分布及扩展特征,且渗水区范围中煤体力学参数的软化程度与含水程度密不可分。开发隔水煤柱分区渗透特性及水浸软化 Fish 程序是揭示隔水煤柱失效特征及稳定性演

变规律的关键。已有研究指出水浸作用下含水程度对内部裂隙发育及扩展有极大的促进作用,导致渗水区煤体强度显著减弱^[21-22],弹性及塑性屈服状态下煤体试样渗透率与应力环境关联方程,可由式(8)表示。

$$\begin{cases} K_E = 375.03 - 124.32\sigma_3 - 16.07\sigma_1 + 10.14\sigma_3^2 + \\ 0.15\sigma_1^2 + 2.15\sigma_1\sigma_3 \\ K_P = 142.2316 \exp\{-2.6349[1 - \exp(-0.3415\sigma_e)]\} \end{cases} \quad (8)$$

式中, K_E 和 K_P 分别为煤样弹性状态及屈服状态渗透率, m^2 ; σ_1 和 σ_3 分别为轴压及围压, MPa; σ_e 为有效应力, MPa。

现有研究认为水在隔水煤柱中呈低速非线性渗流状态,渗透的必要条件是水压梯度大于隔水煤柱的启动压力梯度。文献[23-24]曾通过大量实验数据拟合渗透启动压力梯度与渗透率的拟合关系,并指出煤岩样弹性模量、黏聚力、内摩擦角与含水饱和度呈负指数函数。启动压力梯度与渗透率关系如式(9)所示,水浸软化系数与含水饱和度关联特征如式(10)所示。

$$G = 0.03252k^{-1.4155} \quad (9)$$

式中, k 为渗透率, m^2 ; G 为启动压力梯度, MPa/cm 。

$$\begin{cases} k_E = 0.8947 \exp(-S_w/68.36) + 0.1053 \\ k_C = 0.31496 \exp(-S_w/37.36) + 0.6850 \\ k_\phi = 0.0638 \exp(-S_w/2.08) + 0.9362 \end{cases} \quad (10)$$

式中, k_C 为黏聚力弱化系数; k_ϕ 为内摩擦角弱化系数; k_E 为弹性模量弱化系数; S_w 为含水饱和度, %。

因此, 为准确表征隔水煤柱内部各单元渗透特性, 需量化煤柱内部各单元的启动压力。隔水煤柱内沿主渗流方向上, 后方单元向前方单元进行渗透, 即单元 PNT 应考虑其周围 5 个单元节点应力对其启动压力及渗透率的影响, 如图 6(a) 所示, 获得上述渗流路径上的启动压力, 如式 (11) 所示。

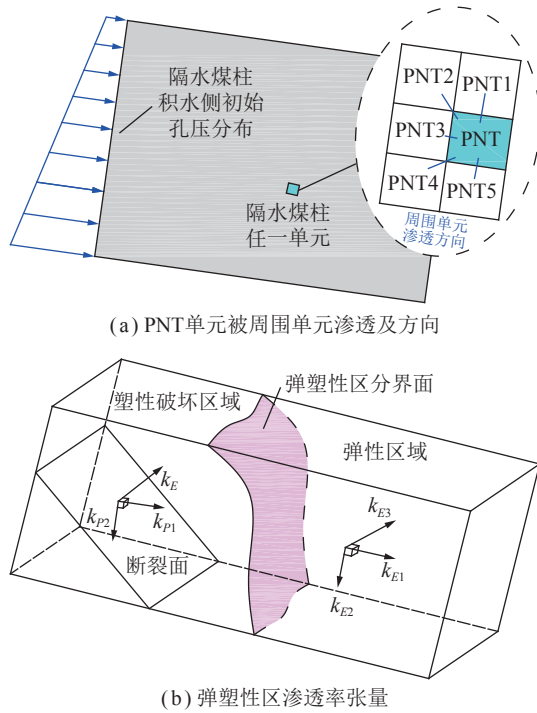


图 6 隔水煤柱内部任一单元浸水渗透方向
弹性区渗透率张量

Fig.6 Permeability tensor of elastoplastic zone in water immersion direction of any unit in water resisting coal pillar

$$Q_i = (\Delta p_i + \sum G_i) / L_{ei} - h_{fi} \quad (i = 1 \sim 5) \quad (11)$$

式中, Q_i 为各渗透主方向的启动压力, MPa/cm ; Δp_i 为各渗透主方向的压差; $\sum G_i$ 为各主渗流方向后方累积应力分量, MPa ; L_{ei} 为目标单元的有效渗流路径长度, cm ; h_{fi} 为沿程水头损失。

基于此, 笔者开发了岩石分区渗透特性及水浸软化程序 Fish 语言程序, 二次开发模型通过循环运算实现隔水煤柱力学与渗流参数的动态调整及耦合互馈影响, 弹塑性区各渗透率张量分量如图 6(b) 所示, k_{E1} 、

k_{E2} 、 k_{E3} 分别为弹性区渗透率张量的分量; k_E 、 k_{P1} 、 k_{P2} 分别为塑性破坏区渗透率张量的分量。其中, k_{P1} 、 k_{P2} 均位于断裂面且相互垂直, k_E 方向与断裂面垂直, 计算流程如图 7 所示。

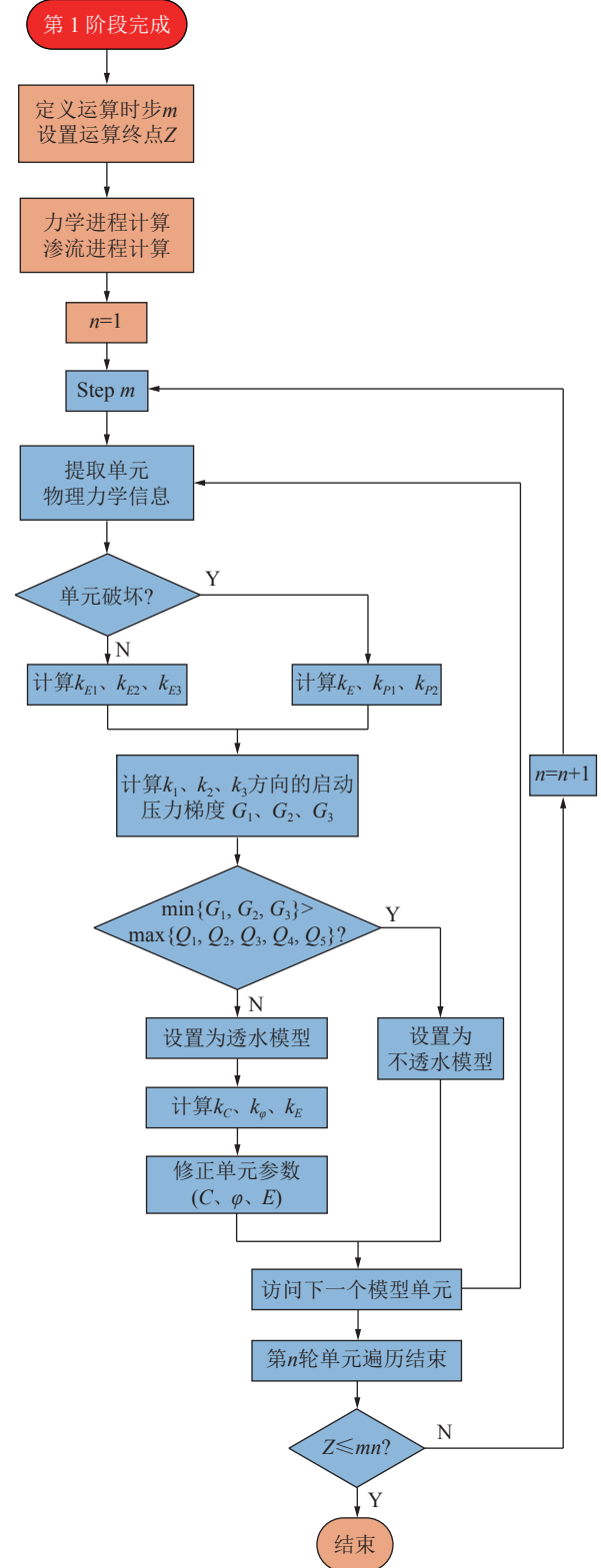


图 7 FLAC^{3D} 单元渗透率及水浸软化参数动态更新计算流程
Fig.7 Dynamic update and calculation process of permeability and water soaking softening parameters of FLAC^{3D}

3.3 水浸-采动叠加作用下煤柱内应力发育规律

隔水煤柱左侧为已关闭矿井老采空区,右侧为250209工作面待采区域。按照前述实际开采情况所划分的3个阶段,各个阶段隔水煤柱垂直应力云图,如图8所示。

3阶段中隔水煤柱顶界面、中部界面垂直应力发育规律,如图9(a)、(b)所示。第1~3阶段,左侧顶界面垂直应力峰值分别为30.46、20.89、18.44 MPa,表明第2阶段水浸软化作用下左侧顶部煤体浸水区域承载能力被大幅弱化,由30.46 MPa降低至20.89 MPa,降幅为31.42%,第3阶段左侧顶界面垂直应力峰值进一步减小,由20.89 MPa降低至18.44 MPa,降幅为11.73%。同理,左侧中部界面垂直应力峰值分别为

14.50、10.95、9.24 MPa,水浸软化作用下左侧中部煤体承载减弱,由14.50 MPa降低至10.95 MPa,降幅为24.48%,第3阶段左侧垂直应力峰值进一步减小,由10.95 MPa降低至9.24 MPa,降幅为15.62%。

3.4 水浸-采动叠加作用下煤柱塑性区扩展规律

按照前述实际开采情况所划分的3个阶段,各个阶段隔水煤柱塑性区发育规律,如图10所示。3阶段中隔水煤柱上部、中部、下部煤体塑性区发育宽度不同,但均呈现出沿煤柱高度方向自上而下依次增加的现象,即浸水侧下部塑性区扩展范围相对中部及上部更大,这与前述理论分析相一致。第1阶段隔水煤柱左侧上部、中部及下部塑性区宽度分别为14.5、21.0和26.0 m,如图10(a)所示。第2阶

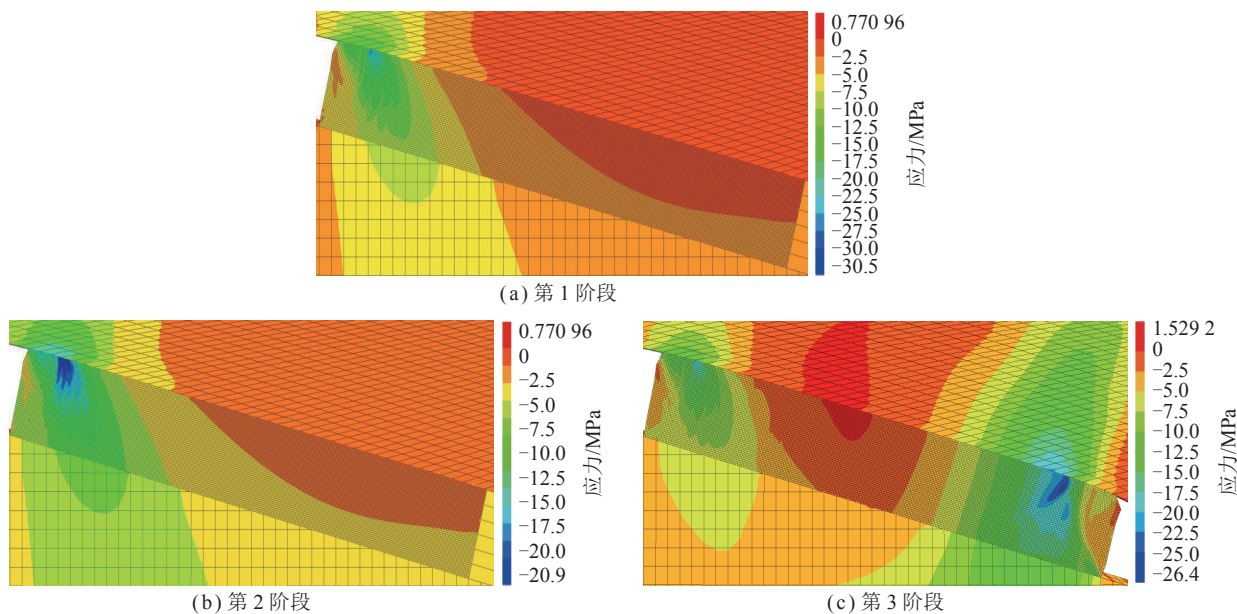


图8 隔水煤柱3阶段垂直应力分布云图

Fig.8 Cloud chart of three stage vertical stress distribution of water resisting coal pillar

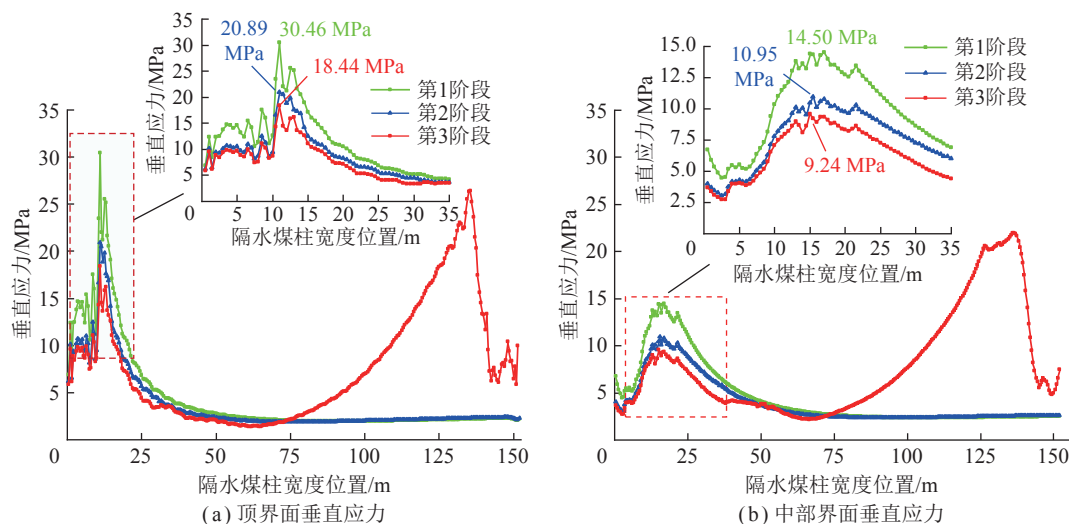


图9 3阶段隔水煤柱顶部及中部垂直应力动态发育规律

Fig.9 Dynamic development law of vertical stress in three stages of water-resisting coal pillar

段中, 水压及水浸软化效应影响下图 10(a) 中塑性区煤体弹性模量、黏聚力、内摩擦角进一步缩减, 诱发范围进一步扩展, 上部、中部及下部塑性区宽度分别增加至 24.5、37.5 和 52.0 m, 如图 10(b) 所示, 增幅比例分别高达 68.96%、78.57% 和 100%, 这意味着采空区积水水压和水浸软化叠加影响下, 隔水煤柱左

侧承载失效区域大幅增加。第 3 阶段中右侧上部、中部及下部塑性区宽度分别为 18.0、29.0 和 57.5 m, 如图 10(c) 所示, 而左侧各高度上塑性区范围基本无变化, 表明隔水煤柱宽度为 150 m 条件下, 250209 工作面开采对隔水煤柱浸水侧塑性区范围扩展已基本无影响。

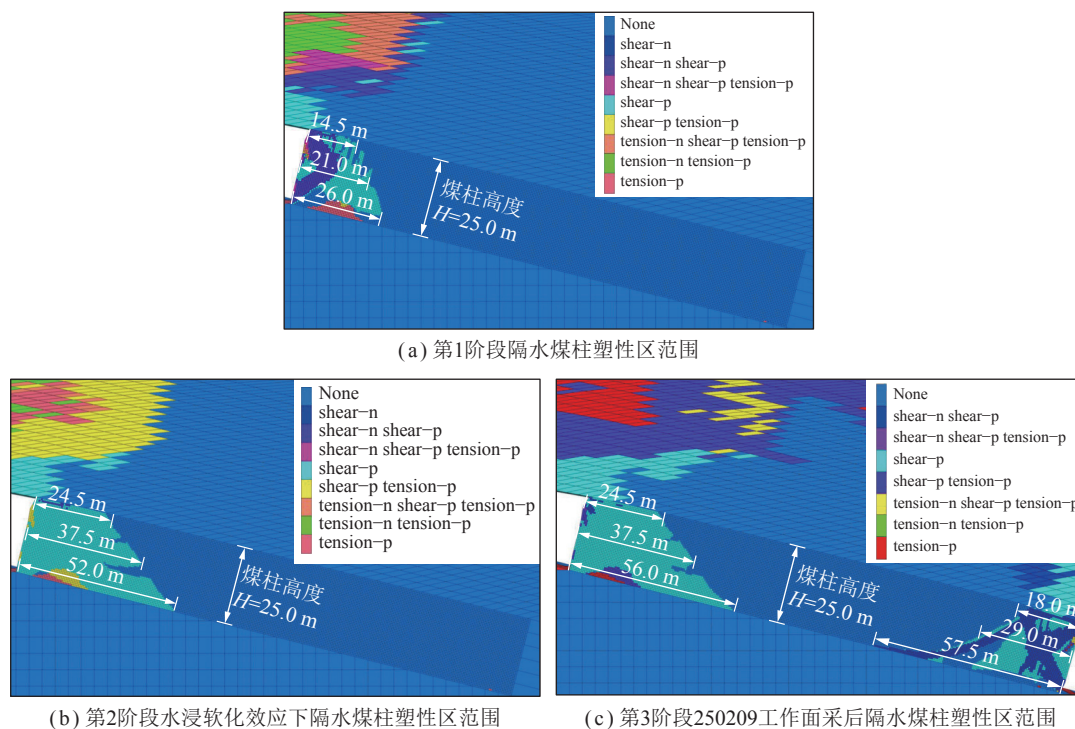


图 10 隔水煤柱 3 阶段塑性区动态发育特征

Fig.10 Dynamic development characteristics of plastic zone in three stages of water-resisting coal pillar

4 隔水煤柱应力渗透耦合特征及其阻水性能

4.1 渗透分区与应力分布的耦合特征

按照图 7 中 FLAC^{3D} 单元分区渗透率及水浸软化参数动态更新计算流程, 第 2 阶段和第 3 阶段垂直应力、渗水区、塑性区及 3 者组合, 如图 11 所示。

由此发现, 渗水区范围中存在塑性区渗水区和弹性渗水区 2 部分。其中, 塑性区因裂隙发育程度高, 渗透率高, 占据了渗水区体积的 83% 以上, 是隔水煤柱导水的主要通道; 而弹性区占据了渗水区总体积的 17%, 其占比较小, 但决定着渗水区范围的最大外扩边界, 如图 11(a)、(b) 所示。

弹性渗水区中应力与渗水范围呈现出显著的负相关耦合特征, 即“高应力低渗透小范围”和“低应力高渗透大范围”。第 2 阶段如图 11(a) 所示, B_1 点和 C_1 点均处于弹性区, B_1 点垂直应力为 7.38 MPa, C_1 点垂直应力为 5.24 MPa, 2 者应力差异达 2.16 MPa, 这意味着 B_1 点区域煤体在垂直应力作用下压缩量更大原生孔隙及裂隙闭合程度高, 渗透率低, 该部位煤体

渗水区扩展范围相对较小; 而 C_1 点区域煤体在垂直应力作用下压缩量较小原生孔隙及裂隙闭合程度低, 渗透率相对 B_1 点区域更大, 该部位煤体渗水区扩展范围相对较大, 如图 11(a) 中白色虚线椭圆框所示。第 3 阶段也呈现出相同规律, 如图 11(b) 中白色虚线椭圆框所示。

4.2 隔水煤柱阻水性能及其稳定规律

隔水煤柱塑性渗水区是导水的主要通道, 而弹性渗水区则增大了渗水范围的外扩边界, 这意味着浸水侧渗水区与 250209 工作面采动侧塑性区是否连通以及 2 者之间的弹性区宽度, 是评价煤柱隔水能力及其稳定性的关键。5 组不同宽度的隔水煤柱 (110、120、130、140、150 m), 其阻水性能如图 12 所示。宽度为 110 m 时两侧塑性区直接连通, 左侧渗水区亦与右侧塑性区连通, 连通区长度约 20 m, 此时采空区积水势必通过左右塑性区连接通道进入 250209 工作面, 且隔水煤柱底部区域完全破坏, 隔水煤柱亦失稳, 其中表征各单元能量的额外参数变量为 zone Extra 2, 如

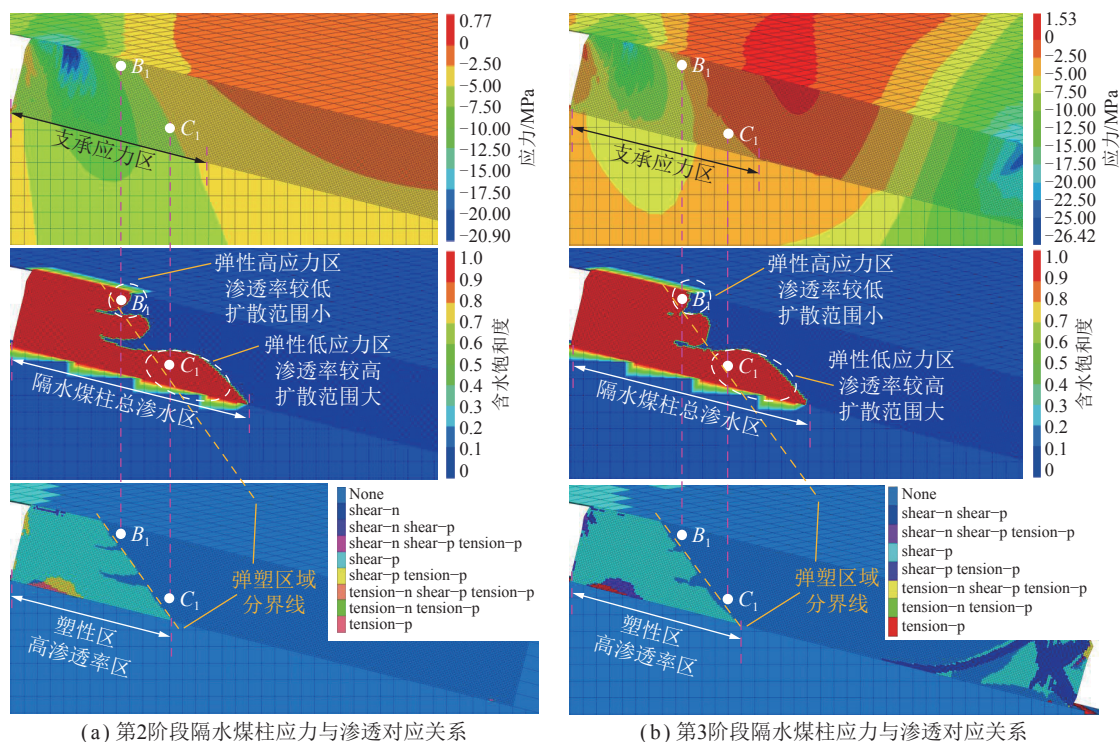
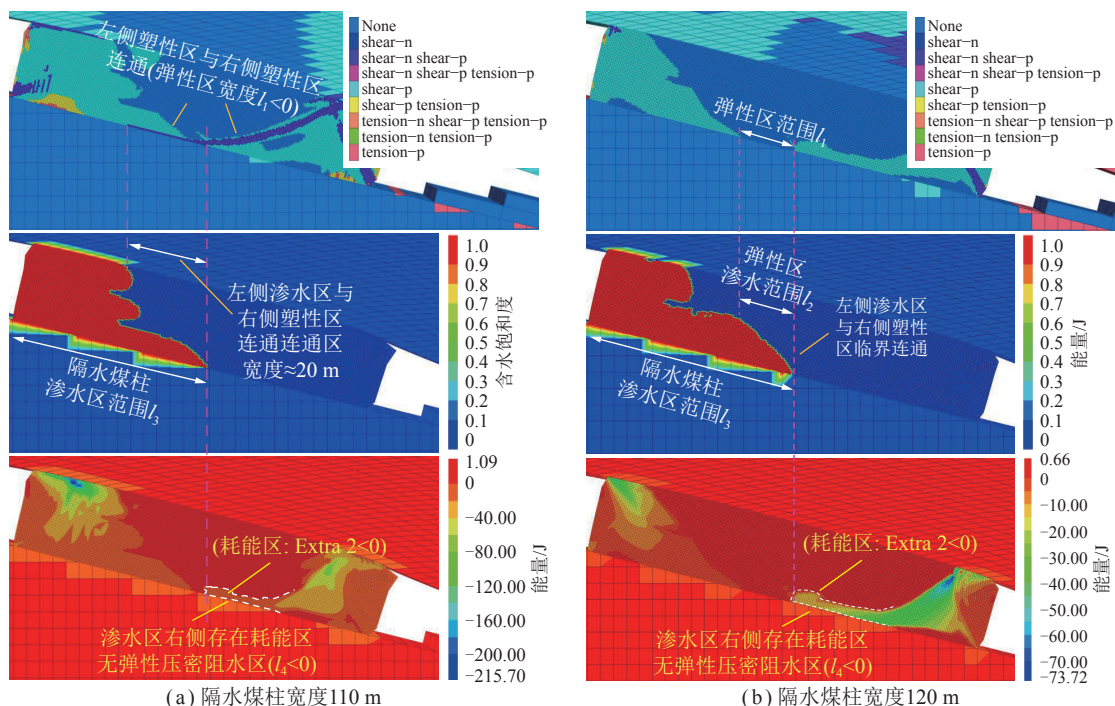


图 11 隔水煤柱渗透分区及应力分布耦合特征

Fig.11 Permeability zoning and stress distribution coupling characteristics of water-resisting coal pillar

图 12(a) 所示。宽度 120 m 时, 左侧渗水区与右侧塑性区处于临界连通状态, 且能量云图表明该区域煤体存在一定程度的能量耗散 (Zone Extra 2 为正值表示能量积聚, 负值表示能量释放), 表明该区域煤体也出现了较弱的损伤。因此, 渗水区水体极易通过下部塑性区进入 250209 工作面, 如图 12(b) 所示; 宽度为 130 m 时, 左侧渗水区与右侧塑性区不连通, 且能量云图

显示 2 者之间存在宽度为 5.5 m 的能量积聚区, 表明该 5.5 m 范围内煤体处于压密储能状态, 如图 12(c) 所示; 宽度为 140 m 时, 左侧渗水区与右侧塑性区不连通, 且 2 者之间存在宽度为 11.5 m 的煤体压密储能区, 如图 12(d) 所示; 宽度为 150 m 时, 左侧渗水区与右侧塑性区不连通, 且 2 者之间存在宽度为 23.5 m 煤体压密储能区, 如图 12(e) 所示。



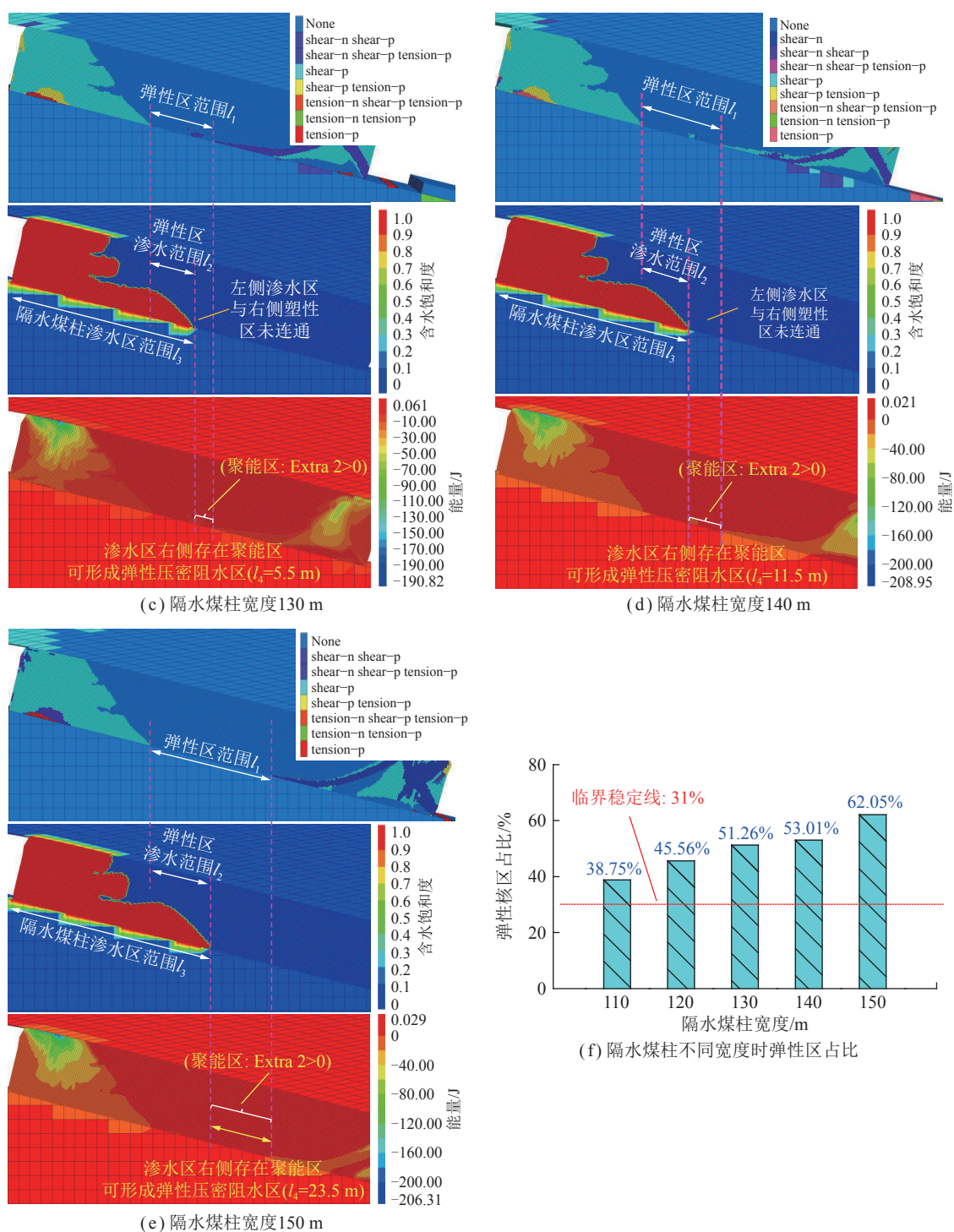


图 12 不同隔水煤柱宽度导水连通特性及弹性区占比

Fig.12 Water connection characteristics and stability of water-resisting coal pillars with different width

上述结果表明,隔水煤柱不同于常规仅发挥支撑作用的煤柱,仍需具备一定的隔水能力,隔水煤柱合理留设宽度不宜简单将弹性核区占比大于 31%^[25-26]、塑性区不连通^[27-28]等常规支撑型煤柱稳定判别方法作为隔水煤柱处于稳定状态的判据,仍需考虑浸水侧隔水煤柱渗水区与采动侧塑性区的连通特性。尽管隔水煤柱宽度为 110~140 m 时弹性区占比均已超过

31%,如图 12(f) 所示,且宽度为 120~140 m 时浸水侧塑性区与采动侧塑性区也并未连通,但宽度为 120 m 时渗水区与采动侧塑性区早已处于临界连通状态,2 者间未能形成有效的阻水宽度,存在水体突破煤柱诱发矿井涌水的巨大风险。

因此,隔水煤柱若保持稳定且具备阻水能力,首要条件为浸水侧渗水区与采动侧塑性区不连通,且两

者之间需具有一定宽度的弹性压密阻水区。宽度为 130、140 和 150 m 时,渗水区与采动侧塑性区之间均能够形成一定宽度的弹性压密阻水区,其宽度分别为 5.5、11.5、23.5 m。然而,对于弹性压密阻水区宽度为多少时可确保隔水煤柱的稳定性,亦是诸多学者正在深入研究的一项内容。值得说明的是,文献[29]曾通过 UDEC 模拟研究导水裂隙带侧向偏移距,并以大量工程实践中侧向扩展范围边界处的水平变形经验值为准,即 5 mm/m,得到了两侧向边界间距为 20 m 时,基本确保两侧向边界不连通,实现阻水目标。因此,借鉴于已有成果,笔者将弹性压密阻水区宽度不小于 20 m 作为隔水煤柱稳定阻水的判别指标,据此提出 250209 工作面“渗水区+弹性压密阻水区+塑性区”3 区联合型隔水煤柱总宽度确定方法,如式 (12) 所示:

$$m_0 = m_1 + m_2 + m_3 \quad (12)$$

式中, m_0 为隔水煤柱总宽度; m_1 为浸水侧渗水区宽度; m_2 为弹性压密阻水区宽度; m_3 为采动侧塑性区宽度。

由此可知,隔水煤柱宽度 150 m 时能够保证隔水煤柱的稳定及有效阻水。250209 工作面开采前,建议矿方留设隔水煤柱宽度为 150 m 的基础上,同时针对上覆采空区积水进行抽排,制定合理的放水方案,尽可能降低采空区积水高度,减小隔水煤体承受的侧向水压及浸水煤体中孔隙水压,避免采动和水压叠加影响下诱发隔水煤柱中隐伏通道活化导致工作面涌水事故,多种措施联合并用以保障 250209 工作面回采过程中隔水煤柱的稳定性。

5 结 论

(1) 覆岩载荷及采空区积水水压叠加作用下,隔水煤柱中最大剪切应力集中于浸水侧下部煤体,致使该区域煤体率先发生剪切塑性变形及破坏,诱发该区域煤体承载能力劣化及坍塌,最终导致隔水煤柱偏心不均衡承载的倾倒失稳。隔水煤柱上部、中部、下部塑性区发育宽度沿煤柱高度方向自上而下逐步增加,隔水煤柱底部区域更易形成导水通道。

(2) 开发了隔水煤柱分区渗透特性及水浸软化 Fish 程序,揭示了隔水煤柱 3 阶段开采过程中塑性区、渗水区及应力互馈耦合特征。隔水煤柱中塑性区体积占据了渗水区总体积 83% 以上,是隔水煤柱导水的主要区域,弹性区体积占据了渗水区总体积的 17%,决定了渗水区范围的最大扩展边界,且弹性渗水区呈现出“高应力低渗透小范围”和“低应力高渗透大范围”关联特征。

(3) 隔水煤柱阻水能力取决于浸水侧渗水区与采动侧塑性区范围及其连通特性。250209 工作面开采条件下,隔水煤柱宽度为 110 m 和 120 m 时,渗水区与塑性区完全连通;隔水煤柱宽度为 130、140 和 150 m 时,渗水区与塑性区不连通,2 者之间弹性压密阻水区宽度分别为 5.5、11.5 和 23.5 m。据此提出了弹性压密阻水区宽度不小于 20 m 的“渗水区+弹性压密阻水区+塑性区”3 区联合型隔水煤柱总宽度确定方法。

参考文献(References):

- [1] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.
- [2] 吴金刚, 毛俊睿, 柴沛. 2000—2017 年我国煤矿重特大水灾事故规律分析[J]. 煤矿安全, 2019, 50(10): 239-247.
WU Jingang, MAO Junrui, CHAI Pei. Law of major & particular major coal mine flooding accidents in China from 2000 to 2017[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(10): 239-247.
- [3] 武强, 崔芳鹏, 赵苏启, 等. 矿井水害类型划分及主要特征分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 561-565.
WU Qiang, CUI Fangpeng, ZHAO Suqi, et al. Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 561-565.
- [4] 陈红影. 我国矿井水害的类型划分与水文结构模式研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
CHEN Hongying. Study on the type classification and hydrological structure model of mine water hazards in China [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [5] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239-246.
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239-246.
- [6] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079-3089.
GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079-3089.
- [7] 顾大钊, 颜永国, 张勇, 等. 煤矿地下水库煤柱动力响应与稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1589-1597.
GU Dazhao, YAN Yongguo, ZHANG Yong, et al. Experimental study and numerical simulation for dynamic response of coal pillars in coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1589-1597.
- [8] 姚强岭, 王伟男, 杨书懿, 等. 含水率影响下砂质泥岩直剪特性及声发射特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2910-2922.
YAO Qiangling, WANG Weinan, YANG Shuyi, et al. Direct shear and acoustic emission characteristics of sandy mudstone under the effect of moisture content[J]. Journal of China Coal Society, 2021,

- 46(9): 2910–2922.
- [9] 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(S2): 3756–3762.
CHEN Tian, YAO Qiangling, 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(S2): 3756–3762.
- [10] WANG Chaolin, ZHAO Yu, NING Lin, et al. Permeability evolution of coal subjected to triaxial compression based on in-situ nuclear magnetic resonance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 159: 105213.
- [11] 李波波, 李建华, 杨康, 等. 孔隙压力与水分综合作用的煤岩渗透率演化规律[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 44–53.
LI Bobo, LI Jianhua, YANG Kang, et al. Evolution law of coal permeability based on comprehensive effect of pore pressure and water[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2020, 49(1): 44–53.
- [12] ALAM A K M, NIIOKA M, FUJII Y, et al. Effects of confining pressure on the permeability of three rock types under compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 65: 49–61.
- [13] 何团, 毛德兵, 黄志增, 等. 特厚煤层区段防水煤柱稳定性评价及保护技术研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1148–1153.
HE Tuan, MAO Debing, HUANG Zhizeng, et al. Stability evaluation and protection technology of waterproof segment pillar with fully-mechanized caving of ultra-thick coal seam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1148–1153.
- [14] ZHANG Tong, GAN Quan, ZHAO Yixin, et al. Investigations into mining-induced stress-fracture-seepage field coupling effect considering the response of key stratum and composite aquifer[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(10): 4017–4031.
- [15] 师维刚, 张嘉凡, 张慧梅, 等. 防水隔离煤柱结构分区及合理宽度确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1227–1237.
SHI Weigang, ZHANG Jiafan, ZHANG Huimei, et al. Structural division and determination of rational width for waterproof partition coal pillar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1227–1237.
- [16] 白东尧, 鞠金峰, 许家林, 等. 李家壕煤矿地下水库人工坝体稳定性研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1839–1845.
BAI Dongyao, JU Jinfeng, XU Jialin, et al. Stability analysis of mine underground reservoir artificial dam in Lijiaohao Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1839–1845.
- [17] 王方田, 梁宁宁, 李岗, 等. 复杂应力环境煤柱坝体损伤破坏规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1145–1152.
WANG Fangtian, LIANG Ningning, LI Gang, et al. Failure evolution mechanism of coal pillar dams in complex stress environment[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(6): 1145–1152.
- [18] 张村, 韩鹏华, 王方田, 等. 采动水浸作用下矿井地下水库残留煤柱稳定性[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 220–227.
ZHANG Cun, HAN Penghua, WANG Fangtian, et al. The stability of residual coal pillar in underground reservoir with the effect of mining and water immersion[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(2): 220–227.
- [19] HAN Penghua, ZHANG Cun, WANG Wei. Failure analysis of coal pillars and gateroads in longwall faces under the mining-water invasion coupling effect[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 131: 105912.
- [20] 刘少伟, 王伟, 王强, 等. 缓倾斜煤层沿含水采空区掘巷煤柱稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 78–87.
LIU Shaowei, WANG Wei, WANG Qiang, et al. Study on stability of coal pillars of roadway excavated along gob with water in gently inclined coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 78–87.
- [21] 姚强岭, 闫鸿远, 李学华, 等. 煤岩体流固耦合参变系统的构建与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 429–440.
YAO Qiangling, YAN Hongyuan, LI Xuehua, et al. The construction and application of a coupled parameter transfer system for fluid-mechanical model[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(3): 429–440.
- [22] ZHANG Cun, LIU Jinbao, ZHAO Yixin, et al. A fluid-solid coupling method for the simulation of gas transport in porous coal and rock media[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(5): 1913–1924.
- [23] 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 Qiangling, WANG Weinan, LI Xuehua, et al. Study of mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal measures under water-rock interaction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 558–569.
- [24] 薛熠. 采动影响下损伤破裂煤岩体渗透性演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
XUE Yi. Study on the permeability evolution of fractured coal under the influence of mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [25] 朱卫兵, 许家林, 陈璐, 等. 浅埋近距离煤层开采房式煤柱群动态失稳致灾机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 358–366.
ZHU Weibing, XU Jialin, CHEN Lu, et al. Mechanism of disaster induced by dynamic instability of coal pillar group in room-and-pillar mining of shallow and close coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 358–366.
- [26] LI Zhu, FENG Guorui, CUI Jiaqing. Research on the influence of slurry filling on the stability of floor coal pillars during mining above the room-and-pillar goaf: A case study[J]. *Geofluids*, 2020: 8861348.
- [27] WU Wenda, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Numerical study of failure mechanisms and control techniques for a gob-side yield pillar in the Sijiazhuang Coal Mine, China[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(4): 1231–1245.
- [28] 于洋, 柏建彪, 王襄禹, 等. 残留煤柱工作面巷道布置及卸压控制研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 49–59.
YU Yang, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Research on layout and pressure relief control of roadway with residual coal pillar mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 49–59.
- [29] 徐光, 许家林, 吕维赞, 等. 采空区顶板导水裂隙侧向边界预测及应用研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 724–730.
XU Guang, XU Jialin, LÜ Weiyun, et al. Lateral boundary prediction of water conducting fracture formed in roof and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 724–730.