

煤层注水对煤矿灾害的防治作用机理研究

王 刚^{1,2}, 黄启铭², 程卫民², 于岩斌², 王振洋², 李木坤²

(1. 山东科技大学 露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:国内外长期工程实践证实,煤层注水作为一种防控技术手段,能够从源头上有效治理煤尘、瓦斯及冲击地压等灾害,为煤矿安全生产提供了重要保障。本研究基于近年来国内外研究成果,从注水引发的煤体润湿改性、孔裂隙结构演化及力学性能调控三个维度,系统梳理了煤层注水防治矿井灾害作用机理的研究成果。煤层钻孔注水在压力驱动下渗流进入煤体孔裂隙网络,通过水膜包裹煤尘颗粒、降低煤体表面能等途径抑制粉化核形成,实现粉尘污染的源头防控;水力润湿作用促使煤体强度弱化并提升煤体塑性,配合水力致裂产生的区域卸压效应,显著改善煤层应力分布状态,从而有效预防煤层冲击地压灾害。同时,注入煤层内部的水分子通过竞争吸附置换煤体孔隙内的瓦斯,结合高压水力增透机制,显著强化煤层瓦斯的流动性,大幅提升煤层瓦斯抽采效率。尽管现有研究已从多角度阐明了注水防灾机理,但在深部复杂地质条件下,注水渗润的各向异性特征、水-煤-气-应力多场耦合动态响应机制,以及地质力学环境变异对注水效果的影响等方面仍需深入探索。这些关键问题的突破将为发展适应深部开采条件的煤层注水新技术提供理论支撑,推动煤矿灾害水力化防治水平迈上新台阶。

关键词:煤层注水;粉尘;冲击地压;煤与瓦斯突出;防治机理

中图分类号:TD712

文献标志码:A

Research on mechanism and engineering application of coal seam water injection to mine disaster prevention

WANG Gang^{1,2}, HUANG Qiming², CHENG Weimin²,

YU Yanbin², WANG Zhenyang², LI Mukun²

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The long-term engineering practices both domestically and internationally have confirmed that coal seam water injection technology, as a preventive and control measure, can effectively control disasters such as coal dust, gas, and rockburst from the source, providing important guarantees for coal mine safety production. Based on recent research results at home and abroad, this paper systematically summarizes the research results on the mechanism of coal seam water injection in preventing and controlling mine disasters from the dimensions of coal wetting modification, evolution of pore and fracture structure, and mechanical property regulation caused by water injection. Coal seam drilling and water injection infiltrate into the coal pore fracture network under pressure, and suppress the formation of pulverization nuclei by encapsulating coal dust particles with a water film and reducing the surface energy of the coal, thus achieving the prevention and control of dust pollution from the source. The hydraulic wetting effect weakens the strength of coal and enhances its plasticity, and combined with the regional

收稿日期:2024-07-17

基金项目:国家自然科学基金项目(52174194)

作者简介:王 刚(1984—),男,山东临沂人,教授,博士生导师,主要从事煤岩微观孔裂隙结构渗流理论及防灾工程应用研究,本文通信作者. E-mail:gang.wang@sdust.edu.cn

pressure relief effect generated by hydraulic fracturing, significantly improves the stress distribution of coal seams, thus effectively preventing coal seam rockburst disasters. At the same time, the water molecules injected into the coal seam compete to adsorb and replace the gas in the pores of the coal body, and, combined with the high-pressure hydraulic anti-permeability mechanism, significantly enhances the fluidity of coal seam gas, thus greatly improving the efficiency of coal seam gas extraction. Although the existing research has elucidated the mechanism of water injection disaster prevention from multiple perspectives, there is still a need for further exploration in the anisotropic characteristics of water injection infiltration, the dynamic response mechanism of water-coal-gas stress multi-field coupling, and the impact of geological and mechanical environmental variations on water injection effectiveness under complex geological conditions in deep areas. The breakthroughs in these key issues will provide theoretical support for the development of new coal seam water injection technologies that are suitable for deep mining conditions, and promote the level of hydraulic prevention and control of coal mine disasters to a new level.

Key words: coal seam water injection; dust; rock outburst; coal and gas outburst; prevention mechanism

近年来,随着我国煤炭开采深度以年均 10~15 m 的速度持续增加,矿山灾害呈现出日益复杂化、多元化的特征^[1]。根据国家矿山安全监察局、《中国煤炭工业年鉴》以及国家煤矿安全网公布的煤矿事故数据及事故调查报告等调查统计,2013—2023 年我国煤矿共发生重大及以上事故 65 起,其中瓦斯事故占比高达 51%,是煤矿安全生产的首要威胁^[2]。值得特别注意的是,随着开采深度超过 800 m 的矿井数量突破 200 座,深部开采环境下的复合灾害风险急剧上升:冲击地压事故年均增长率达 11.3%,其中深部矿井事故占比超过 65%^[3]。在职业健康方面,截至 2023 年底累计报告病例达 96.8 万例,其中煤炭行业占比近 60%,每年新增病例超过 8 000 例^[4]。更严峻的是,许多深部矿井的灾害往往呈现“瓦斯-冲击地压-粉尘”多灾种耦合特征,使得传统钻孔卸压、瓦斯抽采、喷雾降尘等单一防控措施效果更为受限。工程实践证明,煤层注水通过钻孔预先向煤体内部注入压力水,可提前润湿煤体帮助煤岩改性,在防尘降尘、预防冲击地压、驱替瓦斯强化抽采等方面展现出较好的应用效果,对保障煤矿安全高效生产以及矿工群体生命健康具有重要意义^[5]。

为了总结最新的研究成果,助力我国煤矿灾害源头水力化绿色防治技术的发展,提高矿井安全保障能力和职业健康水平,本研究基于近年来相关领域的研究成果,整理分析了煤层注水对矿井粉尘、冲击地压、煤与瓦斯突出的防治作用机理,并对未来煤层注水防治深部煤层开采灾害的基础研究方向进行了展望。

1 煤层注水对矿井粉尘的防治机理

1.1 煤层开采产尘机理

煤尘是指在煤矿生产中产生的各类粉尘,能够长时间悬浮在空气中,几乎遍布矿井的各个角落。煤尘根据产尘方式可分为原生煤尘和次生煤尘^[6]。煤体是具有许多孔隙、裂隙构造的多孔介质,由于地质构造运动或地层压力的作用,煤体受挤压形成原生煤尘,聚集在煤体内部的孔、裂隙中。次生煤尘主要来源于煤矿开采过程中机械破岩、爆破破岩、巷道支护喷浆和煤炭运输转载等过程,其中以机械破岩(如综采割煤机割煤、综掘机炮头切割等)产尘为主。机械破岩包括滚压破岩和切削破岩,其目的是将煤岩从大块破碎至小碎块。如图 1 所示,在破碎过程中,采煤机割煤作业时,采煤机截齿接触并挤压煤体表面,在接触区域形成较高压应力,并向煤体内部传递。煤体随承受压应力的增大发生变形破坏,形成压碎区。采煤机截齿侵入初期,压碎区体积较小,这部分已经破碎的煤体随截齿的移动被持续压缩、积蓄能量,进而形成高密度粉化核,并将能量及应力传递至周围煤体,导致周围煤体的破碎、粉化,粉化核体积扩展。随着煤体破落形成新的与空气接触的自由面,粉化核的应力约束解除,聚集的能量被突然释放,粉化核被抛出,粉化核内的粉尘在气流的扰动下飞扬扩散于空气之中,成为采掘活动中最主要的粉尘来源^[7]。

随着矿井机械化开采技术的进步,井下工作面生产规模逐渐增大,我国煤矿面临的粉尘问题日益加剧,给矿井安全生产造成隐患。一方面,当井下空气中悬浮的煤尘达到一定浓度($30\sim 2\,000\text{ g/m}^3$),如存在点燃煤尘的热源,就会引起煤尘爆炸^[9];另一方面,煤矿井下一线工作的工人在吸入大量呼吸性煤尘后,容易患职业性尘肺病。此外,井下环境中大量悬浮性煤尘,不仅会加快机械设备的磨损,还会影响作业环境的能见度,

进而造成工伤等。

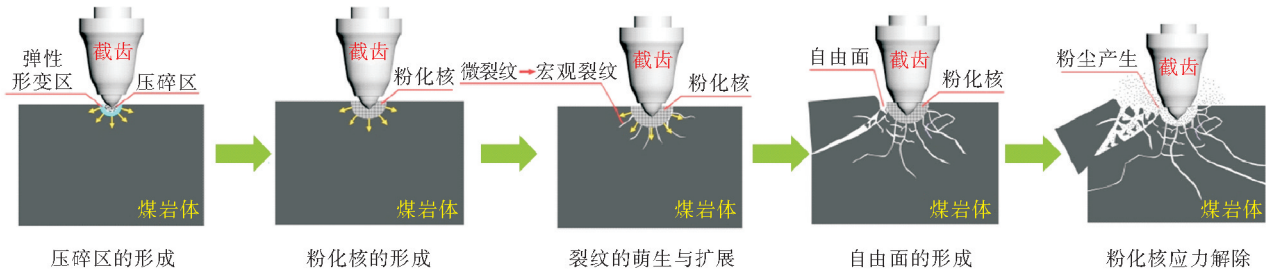


图1 镐型截齿侵入煤体破碎产尘过程^[8]

Fig. 1 Dust production process by the intrusion of pick-type interceptor into the coal body crushing

1.2 煤层注水的源头防尘机理

水通过钻孔注入煤层,经过煤层孔裂隙进入煤体内部,与煤体表面充分接触并润湿煤体。煤层注水防尘机理主要包括水分子对煤尘的润湿包裹、黏结作用和对粉化核的抑制作用,以减少源头产尘,如图2所示。

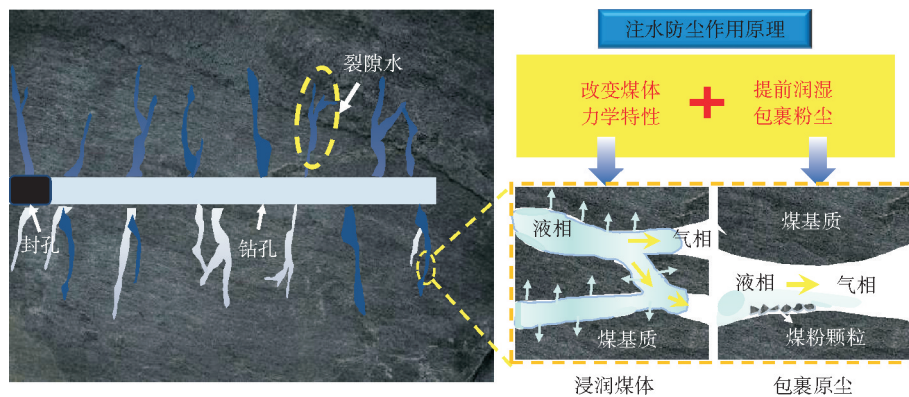


图2 煤层注水防尘机理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coal seam water injection dust control mechanism

1.2.1 注水对煤尘润湿包裹与黏结作用

首先,注入煤层的水通过煤体孔隙和裂隙渗透扩散,覆盖煤体表面及内部孔隙,形成水膜。粉尘颗粒(尤其是粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的呼吸性粉尘)被水分子包裹后,表面能降低,粉尘颗粒之间通过范德华力和毛细管力产生黏结。湿润后的粉尘颗粒因质量增加、黏附性增强,难以在气流作用下扬起^[10]。同时,水分子在煤体表面形成液膜,液体表面张力使粉尘颗粒之间产生液桥力^[11],增强颗粒团聚。注水后煤体内部水分的存在提高了煤的塑性和黏性,在机械破碎过程中,煤体更易黏结形成较大颗粒而非细粉,从而减少粉尘生成量。

煤是一种含有大量氧、氢等亲水成分的天然有机物,通常被认为是亲水性物质,但实际上煤的疏水性也非常强。煤的疏水性与其表面上存在丰富的烷基、芳香基和少量惰性官能团有关。这些疏水性官能团使得煤表面的表观接触角相对较大,表现出了较强的疏水性。煤尘润湿过程中,疏水型煤尘孔隙中易形成“气穴”导致润湿性降低,可浮性提高,而亲水性煤尘孔隙中易形成“水穴”使润湿性增加,可浮性降低,如图3、图4所示。若注水中添加润湿剂(如表面活性剂),可进一步降低水的表面张力,增强水对疏水性煤尘的润湿能力。润湿剂分子吸附在煤尘表面,通过极性基团与水分子结合,非极性基团与煤表面结合,形成稳定的水化膜,强化粉尘黏结效果。阎杰^[12]通过分子模拟研究发现,十二烷基苯磺酸钠中的磺酸基团与煤中含氧官能团形成氢键,破坏煤尘疏水膜,从而有效强化注水对煤体的润湿能力。多种表面活性剂的复配可以进一步改善注水润湿性,刘庆洋^[13]通过多种表面活性剂复配实验发现,阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠和非离

子表面活性剂 X-100 的复配体系中,水分子的扩散系数最大,相比单一表面活性剂,复配体系可以更有效地改善无烟煤润湿效果。但注水用表面活性剂与煤体的吸附性是长期以来被忽视的问题,Huang 等^[14]通过实验和分子模拟研究发现,表面活性剂与煤体官能团存在显著吸附作用,易在注水过程中吸附残留并堵塞孔裂隙,对注水产生阻碍效应,研发新型清洁润湿剂是煤层注水领域未来的重要方向。

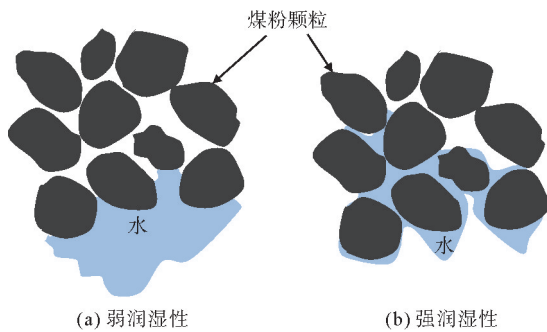


图3 水在强、弱润湿性煤粒中的分布情况

Fig. 3 Distribution of water in strongly and weakly wettable coal grains

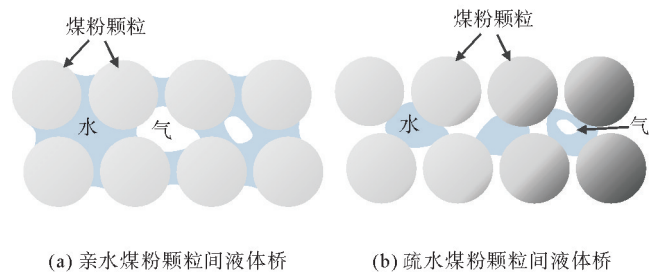


图4 煤粉颗粒间液体存在形式

Fig. 4 Forms of inter-particle liquid presence in pulverized coal

1.2.2 注水对煤体粉化核的抑制作用

煤层注水通过双重协同机制有效抑制煤体粉化核的形成。当水分子渗入煤体内部复杂的孔隙-裂隙系统后,首先通过削弱煤基质间的分子作用力,显著改善煤体的力学性能。单轴压缩力学试验结果表明^[15],如图5所示,煤样抗压强度(σ_2)与含水率(w)呈负线性关系,峰值应变(ϵ_2)与含水率呈正线性关系,弹性模量(E)与含水率呈负指数关系。注水润湿使煤体由脆性向塑性转变,从根本上减少了粉化核的萌生机会。注水压力的水楔效应不仅促使原生裂隙扩展延伸,还能形成新的裂隙网络,有效改善煤体内部的应力分布状态。在微观层面,水分子在煤颗粒间形成具有黏结作用的液桥,同时显著降低煤体表面能^[16],这种双重作用既增强了颗粒间的结合力,又抑制了裂隙扩展趋势。此外,孔隙水通过黏滞阻力和缓冲作用,将机械冲击能转化为热能和流体动能,大幅提高煤体破碎的能耗阈值。这些协同作用使注水后的煤体表现出优异的抗破碎特性,粉化核数量和细微粉尘比例显著降低^[17]。

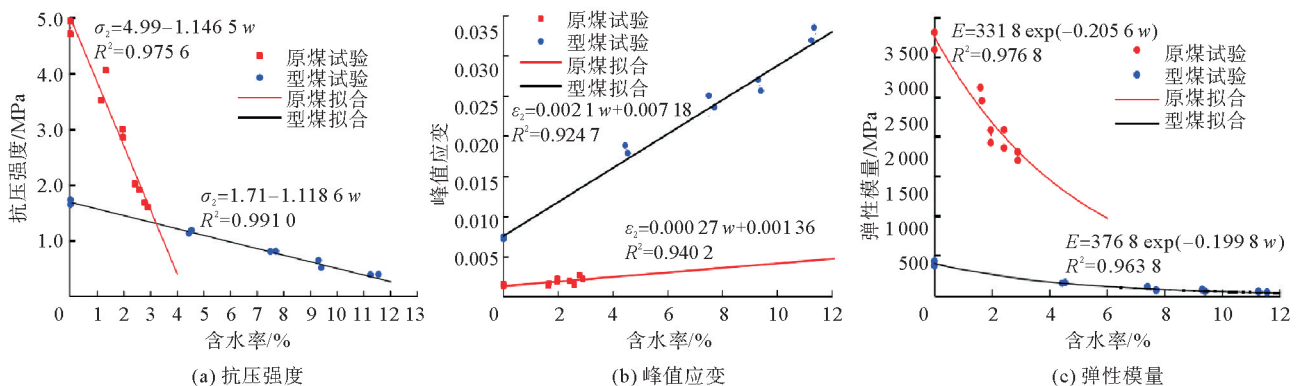


图5 含水率与抗压强度、峰值应变和弹性模量的拟合曲线^[15]

Fig. 5 Fitted curves of water content versus compressive strength, peak strain and modulus of elasticity

然而,注水对煤体粉化核的抑制机理研究有待进一步完善,已有成果多从宏观力学性能层面分析注水对煤体粉化核的抑制作用,而微观层面上的水-煤相互作用(如吸附、化学腐蚀、裂隙润湿)及其对粉化核演化的影响缺乏系统性探索。此外,煤体的非均质性、动态损伤过程以及注水参数的优化均未得到充分研究,导致

理论模型与实际工程效果存在一定偏差。

2 煤层注水对冲击地压的防治机理

2.1 煤层冲击地压发生机理

煤层冲击地压是煤矿深部开采中的一种动力灾害,其发生机理主要涉及应力集中、煤岩体特性、采动扰动及多因素耦合作用。首先,采掘活动打破原始地应力平衡,导致煤岩体内形成高应力集中区,当积聚的弹性应变能超过煤体强度极限时,便会突然释放,引发冲击^[18]。其次,煤岩的物理力学性质决定了其储能和破坏方式,坚硬煤层更易积累弹性能并发生脆性破坏。此外,开采扰动(如顶板垮落、爆破震动)或瓦斯压力(降低煤体强度、增加膨胀能)可进一步触发失稳,形成“应力-结构-瓦斯”耦合的复杂破坏机制^[19]。

近年来,煤层冲击地压机理研究从单一静力学分析向多场耦合动态演化方向发展。传统理论主要基于弹性应变能突然释放(如强度理论、刚度理论),而现代研究更强调“应力-结构-时间-瓦斯”多因素协同作用,揭示冲击地压的渐进破坏与突变特征^[20]。数值模拟(如FLAC3D)和实验室试验(真三轴加载、声发射监测)表明,煤岩的非均质性、裂隙扩展及能量积聚-释放过程对冲击启动具有关键影响。此外,深部开采条件下的高应力梯度、强采动扰动及动力扰动(如矿震)的触发机制成为研究热点^[21]。

2.2 煤层注水防治冲击地压机理

2.2.1 润湿软化煤体降低冲击倾向

煤层注水过程中,水浸润到煤体内部结构中,可以降低煤基质颗粒间的表面能,从而减弱煤体破裂强度。煤体吸水饱和后开始膨胀,变得更加松软,从而实现了煤体的软化效果。受到水分子润湿软化后,煤体的单轴抗压强度和弹性模量降低,动态破坏时间和泊松比升高,冲击性能指数显著降低^[22],煤体发生失稳的可能性降低。图6给出了自然状态和饱水状态7 d煤样三轴压缩试验测得的全应力-应变曲线,可以看出:自然状态煤样峰值强度为76.39~84.41 MPa,变化幅度为10.49%,平均值为81.01 MPa;饱水7 d煤样峰值强度为49.39~77.54 MPa,变化幅度为59.98%,平均值为65.54 MPa,饱水7 d后抗压强度软化系数为0.81。从试样的应力-应变曲线特征看,自然和饱水7 d煤样峰值前变形特征大致相当,表现出压密、弹性和屈服阶段;峰后有明显的差异,自然状态煤样峰值后应力跌落速度较快,表现出明显的脆性破坏特征,而饱水7 d煤样峰值后应力跌落速度较为缓慢,表现出较强的塑性特征^[23]。

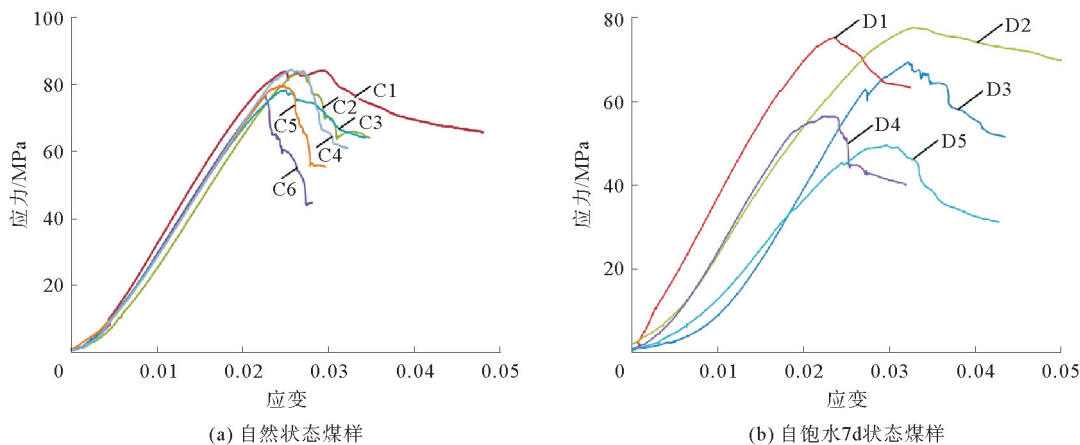


图6 自然状态和饱水煤样三轴压缩全程应力-应变曲线^[23]

Fig. 6 Stress-strain curves throughout triaxial compression of coal samples in the natural and water-saturated states

Liu等^[24]通过霍普金森压杆实验探究了含水量对煤体冲击动力响应的作用,图7显示了不同含水量煤样的冲击破坏模式。可以清楚地看到,当含水量为0、30%和60%时,5种不同组分的型煤煤样均发生纵向压缩破坏。从入射杆的一端开始产生明显的裂纹,直到煤样完全破坏。然而,当煤样的含水量增加时,煤样

受到入射杆的冲击,煤样的中间部分开始膨胀变形,断裂模式从一侧破坏变为两端破坏,说明水力润湿作用下,煤体塑性特征增强。根据微观煤体浸水软化的理论分析,当干煤颗粒中添加的水分量达到合理范围时,煤颗粒和水相互结合,可以促进煤颗粒的团聚,提高煤的整体内聚力。当煤颗粒受到冲击力时,需要更大的力来分离颗粒^[25]。

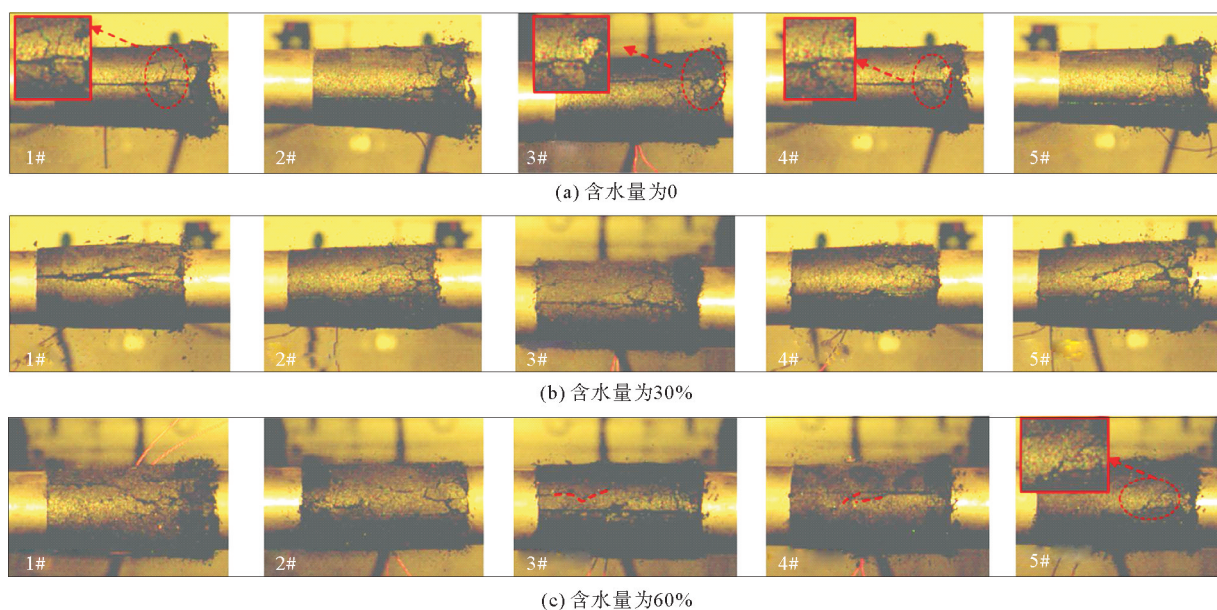


图7 不同含水量煤样霍普金森压杆动力冲击实验照片^[24]

Fig. 7 Photos of Hopkinson pressure bar dynamic impact test of coal samples with different moisture content

2.2.2 高压注水致裂煤体卸压防冲

高压注水致裂卸压技术涵盖水力压裂、割缝和冲孔等方法,其共同原理是在高压水流的作用下使煤体发生破裂,从而破坏煤的整体性与原始结构,同时降低煤层积聚的弹性能。在煤层中开采巷道后,巷道围岩出现应力重新分布,一般将巷道两侧增高的压力称为侧向支承压力,将工作面前方升高的应力称为超前支承压力。由于巷道两侧的煤体几乎不施加侧向压力,当集中应力作用于离巷道较近的位置时,可能导致巷道在集中压力下破裂,这种情况是掘进过程中最常见的巷道后方冲击现象。郭信山^[26]研究发现,如图8所示,通过煤层定点压裂注水,使巷道两侧煤体强度下降,应力集中区与巷道的距离由 L_1 变为 L_2 ,从而将应力峰值区域转移至煤层深处,有效降低巷道侧壁发生煤层冲击灾害的风险。欧阳振华等^[27]通过水压致裂试验得出,煤粉钻屑量下降30%左右,煤体电磁强度和脉冲数均明显下降,表明在高压水的作用下,煤体内原生裂隙二次发育,煤岩体应力得到一定程度的降低。姜福兴等^[28]通过微震监测现场注水试验过程发现,注水压裂试验开始后微震事件明显增多,能量释放呈现“化整为零”的特征,显著降低了冲击地压发生的风险。

总体来看,当前对注水防治冲击地压机理的基础研究取得丰富成果,但随着我国煤矿开采深度不断增加,开采环境呈现

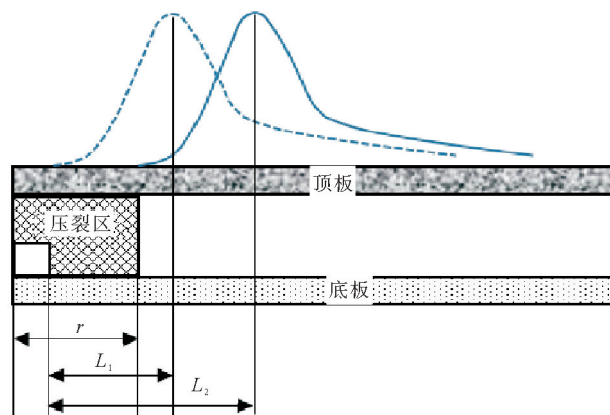


图8 巷道两侧应力转移模型^[26]

Fig. 8 Stress transfer model for both sides of the lane

显著地质力学特征变异:①高地应力与高瓦斯压力耦合作用;②强采动扰动引发应力重分布;③煤体力学性能劣化导致工程响应异常。这些因素导致冲击地压灾变机制更为复杂,深部煤层注水对冲击动力灾害的防治机理需要进一步探索。

3 煤层注水对煤与瓦斯突出的防治机理

3.1 煤与瓦斯突出发生机理

煤与瓦斯突出是一种复杂的矿井瓦斯动力现象,也是一种极其严重而又比较普遍的威胁煤矿安全生产的自然灾害。自 1834 年 3 月 22 日法国鲁阿雷煤田伊萨克矿井发生全球首次煤与瓦斯突出事故以来,至今已有约 18 个国家报道了这一灾害现象^[29]。中国是全球煤与瓦斯突出最为严重的国家,于 1950 年首次记载了煤与瓦斯突出事故^[30]。随着采掘深度的增加,地应力和瓦斯压力持续增大,煤与瓦斯突出矿井的数量不断增加,突出事件也变得日益频繁。国外关于煤与瓦斯突出的发生机理可以概括为四个方面,如表 1 所示。

表 1 国外早期煤与瓦斯突出假说
Table 1 Foreign early hypotheses of coal and gas outbursts

假说分类	主要观点	代表学说
瓦斯作用假说 ^[31]	煤层内部高压瓦斯起主导作用	瓦斯包说、粉煤带说、突出波说、裂缝堵塞说、闭合孔隙说、瓦斯膨胀说、卸压瓦斯说、火山瓦斯说、地质破坏带说、瓦斯解吸说、瓦斯-煤固溶体说
地应力作用假说 ^[32]	煤层内部高地应力起主导作用	岩石变形潜能说、应力集中说、剪切应力说、塑性变形说、震动波动说、应力叠加说、放炮突出说、顶板位移不均匀说、冲击式移近说、拉应力波说
化学本质假说 ^[33]	化学作用生成高压瓦斯并放热	瓦斯水合物说、爆炸说、重煤说、地球化学说、硝基化合物说
综合作用假说 ^[34]	地应力、瓦斯、煤体共同作用	能量假说、振动说、分层分离说、破坏区说、游离瓦斯压力说、地应力不均匀说、CSIRO 模型

自上世纪 70 年代以来,我国学者针对煤与瓦斯突出机理开展深入研究,提出了包括中心扩张学说、二相流体假说、流变假说、球壳失稳理论、固流耦合失稳理论、力学作用等机理假说,进一步丰富了煤与瓦斯突出基础理论体系。近年来,随着微震、电磁辐射、光纤传感等新技术的涌现,煤与瓦斯突出的基础研究手段也变得更加多样化。聂百胜等^[35]建立了煤体失稳条件下的孔隙破坏模型,分析了含瓦斯煤纳米孔隙结构破坏和骨架微破裂的条件,基于突出发生的微观机制,对突出过程中声音预兆、爆破诱导突出、延时突出和低指标突出的现象进行解释,并对煤与瓦斯突出的研究方向提出展望。宋大钊等^[36]提出的煤与瓦斯突出支撑体模型,揭示了支撑体软硬分层非同步变形诱导煤与瓦斯突出机理。张超林等^[37]基于自主研发的多功能煤与瓦斯突出模拟试验系统,从瓦斯压力梯度和瓦斯渗透力的角度系统探讨了煤与瓦斯突出全过程演化特征,认为煤层渗透率在煤与瓦斯突出各个阶段均占据重要作用。总体来看,当前煤与瓦斯突出的机理研究取得较大进展,但在微观孔隙结构演化与宏观灾变响应的跨尺度关联及机制等方面有待进一步突破。

3.2 煤层注水防治煤与瓦斯突出机理

3.2.1 水力增透卸压降低突出风险

高压水注入煤体后,当水压超过煤体的抗拉强度和最小主应力时,会在煤体中产生新的裂隙网络。这一过程包含三个阶段:首先是起裂阶段,水压使煤体原生裂隙尖端应力集中达到临界值;然后是稳定扩展阶段,裂隙沿最大主应力方向延伸,形成主导渗流通道;最后是贯通阶段,主裂隙与分支裂隙相互连接形成立体裂隙网络。原始煤体当中,原始应力与瓦斯应力处于稳定状态,瓦斯处于吸附-解吸平衡状态,当煤层受到注水扰动时,煤体内部的孔隙、裂隙结构受到破坏,进而改变了煤体的应力状态,使得瓦斯运移能力增强,有利于瓦斯抽采。与注水防治冲击地压机理类似,水力致裂通过两种机制实现卸压,可以有效预防煤与瓦斯突出:一是裂隙的形成使局部应力集中得到释放,弹性潜能缓慢耗散;二是水的润湿作用使煤体发生软化,合理的

水力致裂可使钻孔影响范围内的垂直应力降低,有效消除突出危险。

值得注意的是,高压注水在特定条件下反而可能诱发煤与瓦斯突出。高压注水产生的应力波会破坏煤体原有平衡,造成局部应力集中和弹性势能积聚,当超过煤体强度极限时可能引发动力失稳^[38]。同时,注水挤压瓦斯导致局部压力骤升,新生裂隙贯通封闭瓦斯储集区后易造成高压瓦斯突然释放,而水-气两相流作用会加剧瓦斯运移的不稳定性。

此外,高压水的物理化学效应会削弱煤体骨架强度,活化软弱结构面,裂隙网络的非均匀扩展还会导致煤体强度突变^[39],这些因素共同增加了煤与瓦斯突出风险。为规避注水诱突风险,要在注水前精确评估煤体结构和瓦斯赋存特征,确保工艺参数与地质条件匹配,且应采用分级渐进式注水压裂工艺,通过实时监测应力-瓦斯动态响应,及时调整施工参数,为注水压裂技术的安全应用提供保障。从基础研究角度来看,由于瓦斯的的存在,煤层注水实际是“水驱气”的物理过程,尚未系统揭示该过程中水-煤-气-应力多场耦合作用的动态响应规律,尤其是流体渗流与煤体损伤演化的交互机制缺乏定量表征,有待进一步突破。

3.2.2 注水驱替置换瓦斯强化抽采

煤体内的瓦斯存在三种主要赋存状态,即游离态、吸附态和吸收态。游离态瓦斯主要分布在较大的孔隙中,吸附态瓦斯主要附着在煤基质表面,而吸收态瓦斯则存在于煤体内部^[40]。迄今为止,许多学者已对不同含水率煤样的瓦斯吸附放散特性进行了研究。周西华等^[41]试验研究了水分对不同煤种甲烷吸附特性的影响,结果表明:各煤种吸附甲烷量均随含水率的升高而降低,在较低的含水率下,煤吸附甲烷的速度快,而高含水率下,煤吸附甲烷的速度变得缓慢。李树刚等^[42]通过试验分析了水对 Langmuir 式吸附量的影响规律,发现含水煤样吸附甲烷满足 Langmuir 单分子层吸附理论。由于液态水占据吸附位,甲烷单层吸附量降低,煤样吸附甲烷总量降低。

煤层注水强化瓦斯抽采具体机制可分为两方面:一是注水驱赶煤中瓦斯。煤层注水开始时,水首先在注水压力的驱动下沿着大孔径孔裂隙流动,使大孔径孔裂隙中游离气体产生较高的压力梯度,在压力梯度下,游离气体向外渗流。在小孔隙中,由于毛细管自吸作用,水驱替游离气体排出小孔隙,但在毛细管力较小时封堵孔隙中的瓦斯。二是注水置换煤中瓦斯。由于水分子与甲烷分子竞争吸附,煤作为典型多孔隙结构,其对水分子的吸附能力大于对甲烷分子的吸附能力,导致瓦斯压力降低,破坏了瓦斯吸附平衡状态,使得吸附态的瓦斯转化成游离态,因此煤层注水能够使煤体中的游离瓦斯和部分吸附瓦斯排出,如图 9 所示^[43]。聂百胜等^[44]应用分子热力学和表面物理化学理论估算了煤与水之间的作用力,指出煤对水的吸附是多层吸附,其中第一层吸附主要是氢键作用,其余各层为长程作用力作用,因此相较煤对瓦斯的单层吸附能力更强。Yang 等^[45]通过分子动力学模拟发现,煤吸附水释放的能量大于煤吸附甲烷释放的能量,证明水替换甲烷吸附是释放能量的过程,可自然发生。

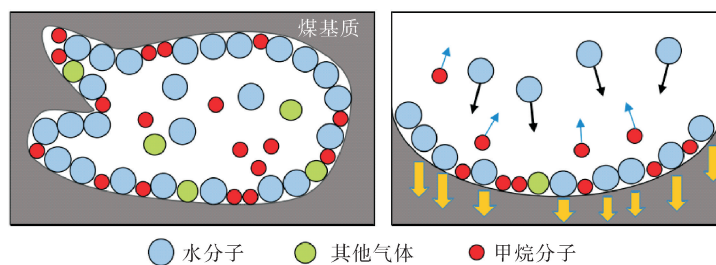


图 9 甲烷和水竞争吸附示意图

Fig. 9 Schematic diagram of methane and water competing for adsorption

然而,当水进入煤层的裂隙和孔隙时,可能封闭瓦斯解吸通道,形成水锁效应,降低了瓦斯的解吸速度和解吸量^[46]。肖国国^[47]通过现场实测发现,注水后掘进期间平均瓦斯涌出量较注水时有不同程度的降低,主要是因为水分在瓦斯解吸通道产生封堵,导致注水后瓦斯释放速度减缓。但是增加注水量可以加剧水锁效

应,而增大注水压力可增强驱替能力并削弱水锁效应,因此可以根据该规律合理利用二者之间的耦合关系设计高效的注水促抽瓦斯工艺。

4 总结与展望

煤层注水技术作为煤矿灾害防治的重要手段,经过七十余年的发展与实践,已在粉尘污染、冲击地压、煤与瓦斯突出等灾害防治方面展现出显著效果。该技术通过水介质对煤体的浸润作用,从本质上改变煤层的物理力学特性,从而实现多灾种协同防治。其核心机理在于水分子进入煤体孔隙与裂隙系统后,通过润湿、软化、置换等作用,重塑煤体的力学行为和流体运移特性,具体研究进展可以总结为如下方面。

1) 水在压力驱动下渗入煤体孔隙与裂隙网络,使煤尘颗粒被水膜包裹,降低其表面活性。同时,煤层注水通过弱化煤体力学强度、降低煤体表面能双重作用,抑制煤体粉化核的形成,不仅抑制既有原生粉尘的飞扬,还减少了采掘过程中新生粉尘的产生,有效预防粉尘问题。当前,煤层注水微观层面上的水-煤相互作用及其对粉化核演化的影响缺乏系统性探索,煤体的非均质性、动态损伤过程导致理论模型与实际工程效果存在偏差。同时,开展清洁型注水润湿剂研发也是未来需要重点突破的方向。

2) 注水浸润可以有效软化煤体,降低煤体单轴抗压强度和弹性模量,增强其塑性变形能力。同时,通过高压注水致裂煤体实现煤层区域卸压,促进应力峰值区域转移,显著降低煤层巷道侧壁发生煤层冲击地压的风险。然而,深部开采环境呈现显著地质力学特征变异,导致冲击地压灾变机制更为复杂,深部煤层注水对动力灾害的防治作用机理需要进一步探索。

3) 水分子与吸附在煤体表面的瓦斯分子发生竞争吸附,驱赶置换吸附态瓦斯,促进瓦斯解吸,并通过水力致裂、造缝、增透作用提升煤层渗透率,强化瓦斯抽采。此外,注水致裂煤层产生的卸压作用使局部应力集中得到释放和降低,有效消除突出危险。但是,应当注意煤层注水“水锁”效应和应力扰动对瓦斯灾害治理的负面影响。此外,在基础机理方面,尚未系统揭示注水过程中“水-煤-气-应力”多场耦合作用的动态响应规律,尤其是注水渗流与煤体损伤演化的交互机制有待实现定量表征。

然而,随着煤矿开采向深部延伸,高地应力、高温环境以及复杂的煤体结构使传统注水技术的适用性面临挑战。深部煤层的低渗透性、非均质性和多场耦合效应导致水分难以有效润湿煤体,制约了注水防灾的效果。因此,未来研究需深入探索深部低渗透煤层水-煤相互作用机制,提出新型注水材料与技术理论,并推动注水技术与智能化监测、水力压裂等技术的协同应用,以提升深部煤层注水的有效性和可靠性,为煤矿安全高效开采提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 谢克昌. 中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [2] 王海军,齐庆杰,梁运涛,等. 我国煤矿重特重大事故统计分析 & 对策建议[J]. 中国安全科学学报,2024,34(9):9-18.
WANG Haijun, QI Qingjie, LIANG Yuntao, et al. Statistical analysis and countermeasures of major accidents in coal mines in China[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 9-18.
- [3] 中国煤炭工业协会. 2023 中国煤炭工业发展报告[M]. 北京:应急管理出版社,2023.
China National Coal Association. Annual report on coal industry in China 2023[M]. Beijing: Emergency Management Press, 2023.
- [4] 国家卫生健康委员会. 2023 年我国卫生健康事业发展统计公报[R]. 北京:国家卫生健康委员会,2023.
- [5] WANG G, FENG J, HUANG Q M, et al. Theoretical and experimental evaluation of water injection difficulty based on coal structure characteristics[J/OL]. Fuel, 2022, 326(SC). DOI:10.1016/j.fuel.2022.124932.
- [6] 金龙哲,李晋平,孙玉福,等. 矿井粉尘防治理论[M]. 北京:科学出版社,2010:18-19.
JIN Longzhe, LI Jinping, SUN Yufu, et al. Theory of mine dust control[M]. Beijing: Science Press, 2010: 18-19.

- [7] 王庆国,王德明,王和堂. 矿尘的产生机理研究[J]. 煤矿安全,2014,45(2):12-14.
WANG Qingguo, WANG Deming, WANG Hetang. Research on generation mechanism of mine dust[J]. Safety in Coal Mines,2014,45(2):12-14.
- [8] 周文东. 掘进机截齿割煤产尘机制及减尘应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
ZHOU Wendong. Mechanisms of dust generation cut by pick used in roadheader and application of reducing dust[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2020.
- [9] 许建刚,苗春林,崔晓虎,等. 矿井粉尘危害及防治理念综述[J]. 山东工业技术,2015(21):89.
XU Jiangang, MIAO Chunlin, CUI Xiaohu, et al. A review of mine dust hazards and prevention concepts[J]. Journal of Shandong Industrial Technology,2015(21):89.
- [10] 杨静. 煤尘的润湿机理研究[D]. 青岛:山东科技大学,2008.
YANG Jing. Study on wettability mechanism of coal dust[D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology,2008.
- [11] 刘浩. 煤矿潮湿环境对矿用干法过滤除尘系统除尘性能的影响研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.
LIU Hao. Study on the influence of moist environment on filtration and dust removal performance of dry-type filtration dust collection system in coal mine[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2021.
- [12] 阎杰. 基于表面特性的煤尘润湿性质研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2019.
YAN Jie. Study on wettability of coal dust based on its surface properties[D]. Beijing:China University of Mining and Technology,Beijing,2019.
- [13] 刘庆洋. 复配表面活性剂对竹林山煤矿无烟煤润湿性影响研究[D]. 辽宁:辽宁工程技术大学,2022.
LIU Qingyang. Effect of compound surfactant on wettability of anthracite in Zhulinshan coal mine[D]. Liaoning:Liaoning Technical University,2022.
- [14] HUANG Q M, YAN Y T, YU B, et al. Multiscale characterization of surfactant-enhanced coal rock pore-fracture imbibition[J]. Process Safety and Environmental Protection,2024,190:1494-1505.
- [15] 王凯,蒋一峰,徐超. 不同含水率煤体单轴压缩力学特性及损伤统计模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(5):1070-1079.
WANG Kai, JIANG Yifeng, XU Chao. Mechanical properties and statistical damage model of coal with different moisture contents under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(5):1070-1079.
- [16] YU L Q, YAO Q L, CHONG Z H, et al. Mechanical and micro-structural damage mechanisms of coal samples treated with dry-wet cycles[J/OL]. Engineering Geology,2022,304. DOI:10.1016/j.enggeo.2022.106637.
- [17] ZHANG C, WANG X L, LI S G, et al. Development and application of a new compound wetting agent for coal seam water infusion[J/OL]. Fuel,2022,314(SC). DOI:10.1016/j.fuel.2021.122767.
- [18] 齐庆新,史元伟,刘天泉. 冲击地压粘滑失稳机理的实验研究[J]. 煤炭学报,1997,22(2):144-148.
QI Qingxin, SHI Yuanwei, LIU Tianquan, et al. Mechanism of instability caused by viscous sliding in rock burst[J]. Journal of China Coal Society,1997,22(2):144-148.
- [19] 李海涛,齐庆新,赵善坤,等. 煤矿动力灾害广义"三因素"机理探讨[J]. 煤炭科学技术,2021,49(6):42-52.
LI Haitao, QI Qingxin, Zhao Shankun, et al. Discussion on generalized "three factors" mechanism of coal mine dynamic disaster[J]. Coal Science and Technology,2021,49(6):42-52.
- [20] 王凯,杜锋. 煤岩瓦斯复合动力灾害机理研究进展与展望[J]. 安全,2022,43(1):1-10.
WANG Kai, DU Feng. Research progress and prospect on coal-rock-gas compound dynamic disaster mechanism[J]. Safety and Security,2022,43(1):1-10.
- [21] 杨科,郭鹏慧,袁亮,等. 深部开采煤矿典型动力灾害孕灾主控因素与机制研究进展[J/OL]. 煤炭学报,DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2024.0929.
YANG Ke, GUO Penghui, YUAN Liang, et al. Research progress on the conditions and mechanisms of typical dynamic

- disasters formation in deep coal mining[J/OL]. Journal of China Coal Society, DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2024.0929.
- [22] 高海宾. 采煤工作面深孔煤层注水技术研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2007.
- GAO Haibin. The study of deep hole coal seam water injection in coal mining faces[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2007.
- [23] 王文. 含水煤样动静组合加载力学响应试验研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2016.
- WANG Wen. Experimental study on the mechanical response of water-saturated coal samples under coupled static-dynamic loading[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2016.
- [24] LIU Z Y, WANG G, LI J Z, et al. Water-immersion softening mechanism of coal rock mass based on split Hopkinson pressure bar experiment[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2022, 9(4): 122-134.
- [25] 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实验研究[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.
- [26] 郭信山. 煤层超高压定点水力压裂防治冲击地压机理与试验研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2015.
- GUO Xinshan. Rockburst prevention mechanism of and experimental research on ultra-high pressure fixed-point hydraulic fracturing in coal seams[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, Beijing, 2015.
- [27] 欧阳振华, 齐庆新, 张寅, 等. 水压致裂预防冲击地压的机理与试验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增2): 321-325.
- OUYANG Zhenhua, QI Qingxin, ZHANG Yin, et al. Mechanism and experiment of hydraulic fracturing in rock burst prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 321-325.
- [28] 姜福兴, 王博, 翟明华, 等. 煤层超高压定点水力压裂防冲试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 526-531.
- JIANG Fuxing, WANG Bo, ZHAI Minghua, et al. Field tests on fixed-point hydraulic fracture with extra-high pressure in coal seam for rock burst prevention[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 526-531.
- [29] 李希建, 林柏泉. 煤与瓦斯突出机理研究现状及分析[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(1): 7-13.
- LI Xijian, LIN Boquan. Status of research and analysis on coal and gas outburst mechanism[J]. Coal Geology and Exploration, 2010, 38(1): 7-13.
- [30] 黄滚, 尹光志. 冲击地压粘滑失稳的混沌特性[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(6): 633-637.
- HUANG Gun, YIN Guangzhi. Chaotic behavior of stick slip in rock bursts[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(6): 633-637.
- [31] SHEPHERD J, RIXON L K, GRIFFITHS L. Outbursts and geological structures in coal mines: A review[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 267-283.
- [32] 四川矿业学院. 国外煤和瓦斯突出机理综述[J]. 川煤科技, 1976(3): 1-19.
- [33] BELOV V I. New explanation of sudden outbursts of methane[J]. Gornyi Zhurnal, 1931, (6): 46-47.
- [34] WOLD M B, CHOI X S K. Outburst mechanisms: Coupled fluid flow-geomechanical modelling of mine development: ACARP Project C6024[R]. CSIRO Petroleum, 1999: 94.
- [35] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤与瓦斯突出预测技术研究现状及发展趋势[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(6): 40-43.
- NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Present situation and progress trend of prediction technology of coal and gas outburst[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(6): 40-43.
- [36] 宋大钊, 郭明功, 杨港, 等. 支撑体软硬煤分层非同步变形诱发煤与瓦斯突出机理[J]. 煤炭科技, 2023, 44(3): 1-8.
- SONG Dazhao, GUO Minggong, YANG Gang, et al. Mechanism of coal and gas outburst induced by asynchronous deformation of soft and hard coal layer in the support body[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2023, 44(3): 1-8.
- [37] 张超林, 刘明亮, 王恩元, 等. 煤层渗透性对煤与瓦斯突出的影响规律及控制机理[J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4842-4854.
- ZHANG Chaolin, LIU Mingliang, WANG Enyuan, et al. Influence law and control mechanism of coal seam permeability on coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4842-4854.
- [38] CAO W Z, YILDIRIM B, DURUCAN S, et al. Fracture behaviour and seismic response of naturally fractured coal subjec-

- ted to true triaxial stresses and hydraulic fracturing[J/OL]. Fuel, 2021, 288. DOI:10.1016/j.fuel.2020.119618.
- [39] WANG G, LIU Y X, XU J. Short-term failure mechanism triggered by hydraulic fracturing[J]. Energy Science and Engineering, 2020, 8(3): 592-601.
- [40] 孟磊. 含瓦斯煤体损伤破坏特征及瓦斯运移规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- MENG Lei. Research on coal damage characteristics and gas migration law of coal containing gas[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, Beijing, 2013.
- [41] 周西华, 常利强, 白刚, 等. 水分对不同煤种吸附甲烷特性影响及机理分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 402-408.
- ZHOU Xihua, CHANG Liqiang, BAI Gang, et al. The influence of moisture on methane adsorption characteristics of different coal types and its mechanism analysis[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2019, 38(5): 402-408.
- [42] 李树刚, 赵鹏翔, 潘宏宇, 等. 不同含水量对煤吸附甲烷的影响[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(4): 379-382.
- LI Shugang, ZHAO Pengxiang, PAN Hongyu, et al. Effect of different moisture content on methane adsorption by coal[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(4): 379-382.
- [43] 施天威. 瓦斯煤层驱替注水防治复合动力灾害机理研究[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2022.
- SHI Tianwei. Study on mechanism of controlling compound dynamic disaster by displacement and water injection in gas coal seam[D]. Liaoning: Liaoning Technical University, 2022.
- [44] 聂百胜, 马延崑, 何学秋, 等. 煤与瓦斯突出微观机理探索研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 207-220.
- NIE Baisheng, MA Yankun, HE Xueqiu, et al. Micro-scale mechanism of coal and gas outburst: A preliminary study[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2022, 51(2): 207-220.
- [45] YANG W, WANG H, ZHUO Q Y, et al. Mechanism of water inhibiting gas outburst and the field experiment of coal seam infusion promoted by blasting[J]. Fuel, 2019, 251: 383-393.
- [46] 马东民. 煤层气吸附解吸机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
- MA Dongmin. Research on the adsorption and desorption mechanism of coalbed methane[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- [47] 肖知国. 煤层注水抑制瓦斯解吸效应实验研究与应用[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- XIAO Zhiguo. Experimental study and application of inhibitory effect on gas desorption of coal seam injected with water[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010.

(责任编辑: 齐敏华)