

深部高突煤层典型特征、诱突机制及防治对策

林柏泉^{1,2}, 杨 威^{1,2}, 刘 统^{1,2,3,4}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室, 江苏 徐州 221008; 4. 中国矿业大学 碳中和研究院, 江苏 徐州 221008)

摘 要:我国煤炭开采已逐渐进入深部, 随着采深的不断增加, 煤层的突出风险显著升高, 突出发生的频率和强度均明显增大, 给深部煤炭资源的安全高效开发带来巨大挑战。首先剖析了深部不同深度下煤层开采面临的复杂应力环境, 并系统研究了深部高突煤层的典型特性, 阐明了深部开采诱突机制, 最后提出了深部开采突出灾害防治的对策建议。研究表明: 对突出煤层开采而言, 深部没有一个固定深度值, 而是应力、瓦斯压力和煤体强度等因素综合影响下煤层所表现出的非线性力学状态。深部煤层应力高, 采动煤体呈强塑性破坏; 突出煤的孔隙率低且连通性差、高应力下煤层渗透率极低; 高压瓦斯高饱和赋存、低压吸附能力强; 煤的基质尺度大且通达性差、瓦斯跨尺度运移难; 深部煤层最大水平主应力增大, 强构造应力作用下构造煤破碎程度高, 在构造应力集中带内形成高压瓦斯包, 导致突出风险激增。当深部开采工作面前方遇到构造软煤时, 工作面附近硬煤内更容易形成强应力集中, 对构造软煤内高压瓦斯的封闭作用显著增强, 造成工作面前方瓦斯压力高、梯度大, 煤体内的瓦斯膨胀能显著高于浅部; 同时高应力下工作面前方煤体更容易发生强塑性流变破坏, 诱发变形能的猛烈释放。构造煤煤体发生大变形损伤, 孔裂隙空间增大; 基质尺度急剧减小, 被封闭的大量瓦斯快速解吸。二者共同造成游离瓦斯存储空间和压力的同步迅速增大, 引发游离瓦斯膨胀能的迅速升高, 当瓦斯膨胀能高于突出阈值时, 大量瓦斯将破碎并抛出煤体, 导致突出事故发生。基于此提出深部突出灾害防治应通过合理化采掘布置, 从整体上降低采掘过程中的局部应力集中; 通过超前探测准确获取煤层隐蔽构造、煤岩力学参数以及瓦斯参数等关键信息, 超前识别突出风险进而施行精准防控; 强调了要通过深度卸压充分释放应力, 降低煤层应力集中, 提高煤层渗透率, 同时诱导大量低压吸附瓦斯脱附解吸, 通过强力造缝增透减小基质尺度并活化基质孔隙, 加速瓦斯运移如有必要采用物理化学联合增透方法, 构建基质孔隙-裂隙跨尺度流动通道, 提高瓦斯抽采效果, 充分降低煤层气含量, 最终达到超前、精准和均匀消突的目的, 实现深部煤层安全高效开采。

关键词: 深部开采; 突出煤层; 高应力; 诱突机制; 突出防控

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0311-15

Typical characteristics of deep coal seams with high outburst risk, outburst inducing mechanism and prevention measures

LIN Baiquan^{1,2}, YANG Wei^{1,2}, LIU Tong^{1,2,3,4}

收稿日期: 2024-03-06 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0228

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52334007, 52204259); 江苏省基础研究计划 (自然科学基金) 资助项目 (BK20221142)。

作者简介: 林柏泉 (1960—), 男, 福建龙岩人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: lbq21405@126.com

通讯作者: 刘 统 (1992—), 男, 江苏徐州人, 副教授, 博士后, 博士。E-mail: t.liu@cumt.edu.cn

引用格式: 林柏泉, 杨威, 刘统. 深部高突煤层典型特征、诱突机制及防治对策[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 311-325.

LIN Baiquan, YANG Wei, LIU Tong. Typical characteristics of deep coal seams with high outburst risk, outburst inducing mechanism and prevention measures[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 311-325.



移动阅读

(1. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Coal-based Greenhouse Gas Control and Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. Carbon Neutrality Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Coal mining in China has gradually entered deep levels. With the continuous increase in mining depth, the outburst risk of coal seam has significantly increased, with both the frequency and intensity of outbursts rising noticeably, posing huge challenges to the safe and efficient development of deep coal resources. This paper first analyzes the complex stress environment faced by coal seams at different depths in deep areas, then systematically studies the typical characteristics of high-risk coal seams in deep regions, elucidates the mechanisms of outburst induction in deep mining, and finally proposes countermeasures for preventing outburst disasters in deep mining. The research indicates that for outburst coal seam mining, there is no fixed depth in deep areas, but rather a nonlinear mechanical state of coal seams influenced by factors such as stress, gas pressure, and coal body strength. In deep coal seams, stress is high, and coal undergoes strong plastic deformation when mined. The porosity of outburst coal is low, with poor connectivity, and under high stress, the permeability of the coal seam is extremely low. High-pressure gas is highly saturated in the coal seam, with strong adsorption capacity at low pressure levels. The matrix of the coal has a large scale and poor permeability, making gas migration across scales difficult. The maximum horizontal principal stress in the deep coal seams is increasing, and under strong tectonic stress, the degree of coal fragmentation is high. This leads to the formation of high-pressure gas pockets within the areas of concentrated tectonic stress, resulting in a significant increase in outburst risk. When encountering structural soft coal ahead of the mining face in deep areas, strong stress concentration is more likely to form within the nearby hard coal, which significantly enhances the sealing effect of high-pressure gas within the structural soft coal, resulting in a high gas pressure and large gradient in front of the workings. This makes the gas expansion energy within the coal significantly higher than that in the shallow part. Additionally, under high stress conditions, the coal body ahead of the working face is more likely to undergo strong plastic rheological damage, which induces the violent release of deformation energy. Due to the large deformation damage of the tectonic coal body, the pore and fracture space increases; at the same time, the matrix scale decreases sharply, and a large amount of enclosed gas is rapidly desorbed. The two together cause the synchronized rapid increase of free gas storage space and gas pressure, which triggers the rapid increase of free gas expansion energy. When the gas expansion energy is higher than the protrusion threshold, a large amount of gas will be broken and thrown out of the coal body, leading to the occurrence of outburst accidents. Based on this, the authors propose that the prevention and control of outburst disasters in deep areas should focus on rationalizing mining layouts to reduce localized stress concentrations during mining. Furthermore, by proactively detecting and accurately obtaining key information such as concealed coal structure, coal-rock mechanics parameters, and gas parameters, the early identification of outburst risks can be achieved and precise preventive measures can be implemented. It is emphasized that stress should be fully relieved through depth unloading to reduce stress concentrations in coal seams, improve coal seam permeability, and induce the desorption of large amounts of low-pressure adsorbed methane. Additionally, it is recommended to reduce the matrix scale and accelerate gas migration by strong seaming and permeability enhancing technology. Furthermore, through a physical-chemical combined enhancement method, activating matrix pores, building cross-scale flow channels between matrix pores and fractures, improving gas extraction efficiency, significantly reducing gas content in coal seams, and ultimately achieving the goal of advanced, precise, efficient, and uniform outburst prevention, and enabling safe and efficient exploitation of deep coal seams with high outburst risks.

Key words: deep mining; outburst coal seam; high stress; outburst inducing mechanism; outburst prevention and control

0 引 言

煤炭是我国的主体能源, 2023 年我国原煤产量 47.1 亿 t, 同比增长 3.4%, 创历史新高。煤与瓦斯突

出(下称“突出”)是我国煤矿开采安全风险最严重、防治难度最大的动力灾害。随着浅部煤炭资源的枯竭以及开采强度的增大, 我国煤矿开采深度正以 8~25 m/a 的速度不断增加, 据不完全统计资料显示, 目

前东部主要矿井平均开采深度已达到 800~1 000 m, 而西部矿区也由 100~300 m 逐步进入 400~700 m^[1-4], 我国开采深度超过 1 000 m 的煤矿已超过 50 余处。

煤矿开采进入深部之后突出灾害发生了很多新的现象和问题, 对突出灾害的防控提出了新的挑战^[5-7]。目前普遍认为采深超过 700 m 即可视为进入了深部开采, 但是不同矿区由于条件不同, 又有明显的差异性, 如韩城矿业公司 140 余次突出事故中 60% 左右发生在埋深 300~400 m 区域; 沈阳焦煤红阳二矿的始突深度在 400 m 左右, 其突出次数和强度均随着采深的增大而递增^[8]; 平煤股份的经验表明, 当煤层开采深度超过 600 m 时, 就进入了深部开采。深部煤层地应力和瓦斯含量显著增大^[9], 研究表明, 埋深每增加 100 m, 瓦斯压力和含量将分别增加 1.0 MPa 和 2~3 m³/t, 我国实测最大瓦斯压力和含量分别可达 13.9 MPa 和 60 m³/t^[10]。在深部高应力和复杂瓦斯赋存条件下^[11], 即便是很小的地质构造也可能导致严重的突出事故, 突出灾害的防治难度剧增。在多年的防突实践过程中, 平煤股份积累了丰富的防突经验, 其中平煤十二矿是平煤股份代表性矿井之一, 形成了以开采保护层和水力冲孔穿层预抽为代表的两项核心瓦斯治理技术。但是 2024-01-12 平煤股份十二矿在 1 000 m 深度处采煤时仍然发生了一起突出事故, 并导致了 16 人遇难。

煤矿开采越深地温越高、三向地应力越大, 煤体渗透性越差、瓦斯含量越高^[12-13], 井下环境温度、巷道可支护性、突出可防性、冲击地压可防性^[14]等都会对煤矿开采的极限深度产生影响。谢和平院士等^[15]根据我国的地温分布规律、《煤矿安全规程》规定、巷道围岩极限变形量、支架极限承载力以及矿井通风降温的能力等, 综合得到了 1 500 m 左右为煤矿开采的极限深度。然而对于突出防治而言, 煤矿开采进入深部之后影响突出的主要因素会有哪些变化? 如何导致突出事故的发生? 深部煤矿开采如何防突? 这一系列的问题, 亟需给予回复。笔者将结合煤与瓦斯突出的主要影响机制, 充分阐述深部高突煤层典型特征, 探究深部高突煤层开采诱突机制, 并提出了防突对策建议, 以期对深部煤矿安全开采有所裨益。

1 深部高突煤层典型特征

突出灾害的发生与应力、瓦斯和煤体结构性质等密切相关, 煤层开采进入深部后, 煤层应力、瓦斯压力、瓦斯含量、孔裂隙发育模式、煤层渗透率、煤层采动力学特性、构造应力水平、构造煤结构以及构造带应力集中特性等一系列与突出发生密切相关因素和特

性均发生了显著变化。笔者从突出灾害防控的角度, 剖析了深部高突煤层的典型特征, 具体总结如下。

1.1 应力高且叠加扰动大、采动塑性破坏强

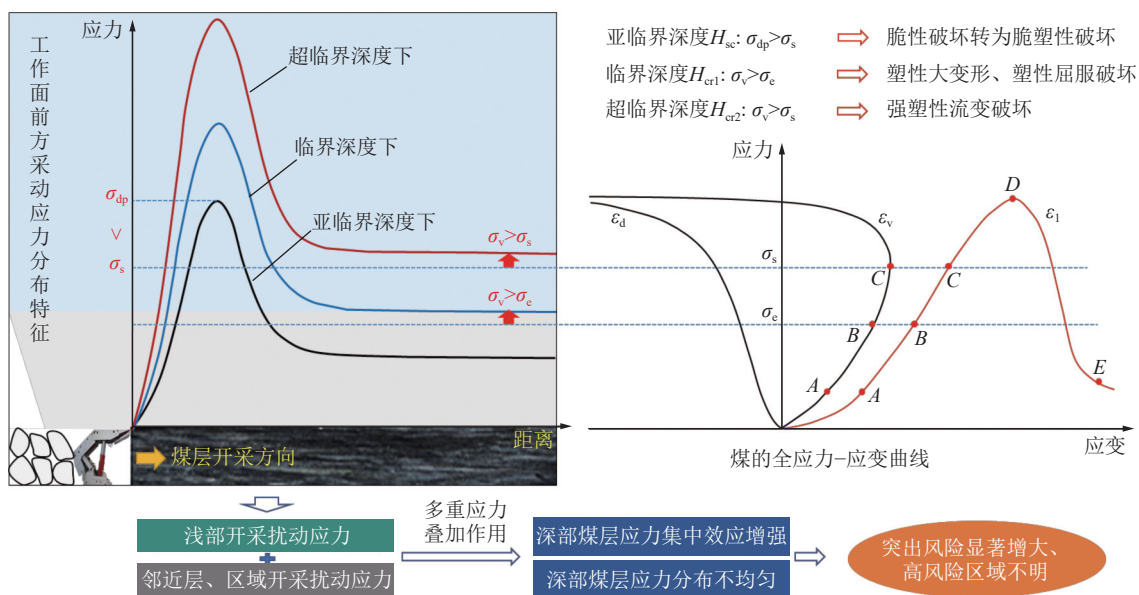
关于深部开采中“深部”的界定, 国内外学者进行了广泛的研究讨论。谢和平院士等^[16]提出了“深部”的力学定义, 并以应力增大导致深部岩体破坏方式的转变为依据, 划分了 3 个临界深度, 即亚临界深度、临界深度和超临界深度。其中, 超临界深度要同时满足 2 个条件, 一是岩体处于三轴等压的静水应力状态; 二是岩体在静水压力下进入全塑性屈服状态。然而对煤层开采而言, 采深很难达到超高应力、三向等压特征的超临界深度。因此, 在煤层可采深度范围 (<1 500 m) 内进行不同开采深度阶段的划分, 可能对深部突出煤层的安全高效开采更有针对性指导意义。深部煤层采动破坏方式由应力水平 (原岩应力 σ_0 、采动应力 σ_d) 与煤的弹性极限强度 σ_e 、屈服强度 σ_s 的相对关系共同决定。随着采深的加大, 煤层所受围压显著增大, 使得煤岩的破坏方式逐渐从脆性劈裂破坏向塑性流动过渡。

如图 1 所示, 当采动应力大于煤体屈服强度 (采动应力峰值 $\sigma_{dp} > \sigma_s$), 煤体将由开始脆性破坏向脆塑性破坏转变, 说明煤层开采进入亚临界深度 H_{sc} 。此深度下突出发生风险仍相对较低, 但在局部采掘扰动形成的高应力集中区域或强构造带内仍存在突出风险。

随着采深的不断增加, 煤层所承受的自重应力开始大于煤体的弹性极限 ($\sigma_v > \sigma_e$), 说明煤层开采进入临界深度 H_{cr1} 。此深度下采动煤岩呈现显著的非线性响应特征, 煤体易发生塑性大变形和强动力破坏, 采掘工作面前方变形能高度积聚, 尤其是当遇到高瓦斯构造带后, 强开采扰动极易诱发煤与瓦斯突出等动力灾害事故。

当采深进一步增加后, 煤层所承受的自重应力开始大于煤体的屈服强度 ($\sigma_v > \sigma_s$), 说明煤层开采进入超临界深度 H_{cr2} 。此深度下煤层在采前就已经进入塑性屈服状态, 采动煤体呈现强烈的塑性流变破坏, 尤其是三向应力均大于屈服强度后, 强开采扰动下煤体极易发生塑性失稳破坏, 采掘过程中非线性力学现象更加显著^[1], 煤与瓦斯突出风险进一步升高。

对突出煤层开采来说, 深部没有一个固定深度值, 而是应力、瓦斯压力和煤体强度等因素综合影响下煤层所表现出的非线性力学状态, 体现为突出危险性的显著增大。判断煤层开采是否进入深部, 可根据煤层原位屈服极限和应力估算值或实测值的对比判断, 由于不同矿区不同煤层的性质差异很大, 导致其临界深



注: ϵ_d 为岩石的径向应变; ϵ_v 为岩石的体积应变; ϵ_1 为岩石的轴向应变; A 点为岩石弹性变形阶段的起点; B 点为裂纹稳定发展阶段的起点; C 点为裂纹非稳定发展阶段的起点, 是岩石由弹性转化为弹塑性或塑性的转折点, 也称为屈服点; D 点为峰值强度点; E 点为残余强度点。

图 1 高突煤层开采面临更加复杂的应力条件

Fig.1 Mining of deep coal seams with high outburst risk faces more complicated stress conditions

度也将出现明显不同。在浅部开采中, 在某个特定高危险区域可能也存在“深部”高突煤层, 如局部构造破碎带、特殊的超高应力集中区等; 在深部开采中, 高应力煤层采动所形成的这种高危险力学状态将是常态。此外, 除了采深增加带来的高应力效应外, 在浅部煤层开采、邻近工作面开采等多重采掘扰动应力叠加效应影响下, 深部煤层开采应力集中将更加显著, 这大大增加了突出风险; 同时, 浅部开采扰动也导致深部煤层应力分布更为复杂和不均匀, 高风险区域不明使得防突难度显著增大。

1.2 孔隙率低且连通性差、煤层渗透率极低

深部高突煤层多以中、高变质程度煤为主, 孔隙率和浅部突出煤层差别不大^[17], 孔隙率普遍较低且孔隙连通性较差。图 2a 为河南平煤八矿和四川白皎矿典型深部高突煤层煤样与非突出煤层煤样孔隙分布特征的核磁测试结果, 可以看出非突煤样多尺度孔隙均较为发育, 整体孔隙分布较为均匀且连通性强, 孔隙率较高, 本研究非突煤样的核磁孔隙率高达 15% 以上 (图 2b)。而深部高突煤样多尺度孔隙结构均发育较差, 中大孔极其不发育且连通性差, 孔隙率普遍偏低, 本研究深部高突试样的核磁孔隙率均小于 5%, 特别是平顶山矿区深部高突煤层, 其核磁孔隙率仅为 1% 左右。图 2c 为“压汞-N₂ 吸附-CO₂ 吸附”联测所获的部分典型深部高突煤与非突煤近全尺度孔隙结构分布特征, 可以看出较非突煤, 深部高突煤层在几纳米至几百纳米范围的孔隙极其不发育; 其微孔、介

孔和宏孔孔容占比分别为 86.82%、1.20% 和 11.98%, 而非突煤层对应分别为 71.09%、7.14% 和 21.76% (图 2d), 整体上深部高突煤层孔隙分布较非突煤层更加不均匀, 这一特征在图 2c 中也可明显看出。因此, 纳米尺度的扩散孔、渗流孔隙发育差和孔隙孔径分布不均均是深部高突煤层的典型特征。需要说明的是, 煤体孔隙的孔容分布占比与煤的变质程度有较强的关系, 部分中-高阶非突出煤层也可能出现孔隙分布不均的情况, 但整体上中-高阶非突出煤中几纳米至百纳米范围孔隙仍较突出煤层更为发育。

同时, 深部高突煤层原生裂缝在高应力下呈闭合状态, 导致整个孔裂隙系统连通性较差, 随着埋深的增大煤层渗透率迅速降低。相关研究表明^[18], 在 20~30 MPa 之间存在一个瓦斯主要流动方式转变的临界应力, 超过这个临界应力瓦斯运移方式将从渗流转变为扩散为主, 800~1 000 m 深部矿井的地应力可以达到这一量级, 如平顶山矿区东部八矿、十矿和十二矿采深均已超高 800 m, 煤层地应力普遍超过 20 MPa, 已经达到临界应力, 高应力下煤层渗透率在 $1.0 \times 10^{-7} \sim 6.1 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$, 呈现出显著的低渗透特性, 煤层气的运移方式以扩散为主, 导致瓦斯抽采困难、煤层残余瓦斯量增大, 同时采掘期间煤体残余瓦斯流动释放困难, 易在工作面前方形形成较高的瓦斯压力梯度, 增大突出风险。

1.3 高压瓦斯高饱和赋存、低压吸附能力强

深部高突煤层瓦斯呈高压高饱和赋存的特征。

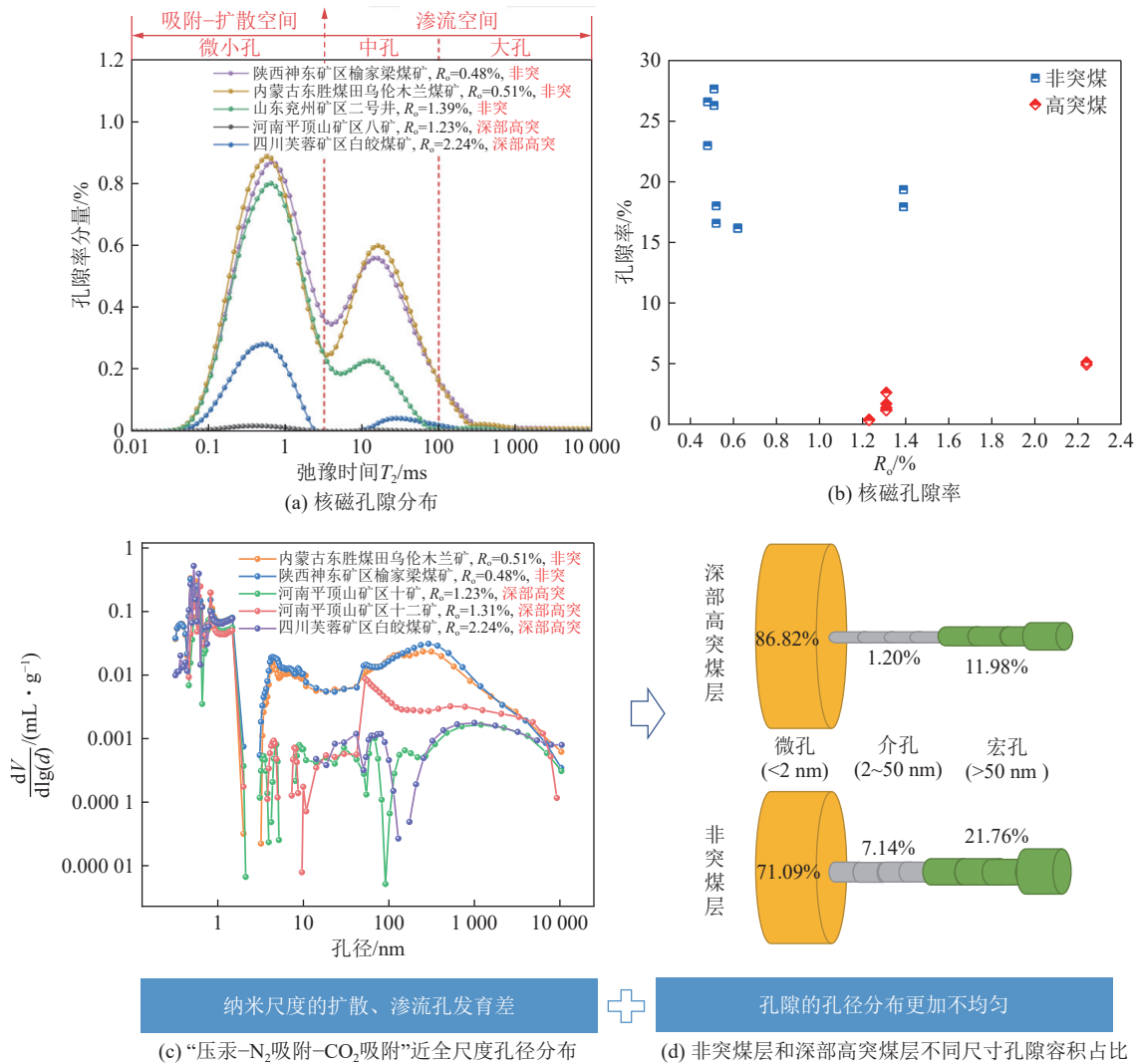


图2 深部高突煤层复杂的孔隙结构

Fig.2 Complex pore structure of deep coal seam with high outburst risk

含气饱和度 S 是评估煤层瓦斯赋存水平的关键指标^[19], 指的是原位储层条件下实际煤层瓦斯含量和该条件下煤层总容气能力的比值。由于煤层总容气能力在煤矿现场很难进行精确测试, 因此本文采用理论含气饱和度 S_{TV} 进行煤层瓦斯赋存水平的参考性评估。需要说明的是, S_{TV} 是实测瓦斯含量和瓦斯极限吸附量 V_L 的比, 可以在一定程度上反映煤层的含气水平, 但不能代表真实的含气饱和度。图 3a 为非突煤层与深部典型高突煤层 S_{TV} 的对比情况, 可以看出深部高突煤层 S_{TV} 远大于非突煤层, 部分如平顶山矿区十矿、十二矿深部高突煤层埋深超过了 1 000 m, 瓦斯赋存呈现出高饱和甚至有可能是过饱和状态, 这意味着相当部分的高压瓦斯可能以游离态赋存于煤层, 高压游离瓦斯增大了初始瓦斯膨胀能, 将使得煤层突出风险显著升高。康永尚等^[20-21]发现鄂尔多斯盆地保德区块在 600~1 000 m 深度段煤层也出现了明显的高饱和乃至过饱和特征。

深部高突煤层多呈现低压强吸附的特征。图 3b 为非突和高突煤层煤样吸附量随压力的变化曲线。由图可知, 高突煤层煤样的瓦斯吸附量在吸附压力较低时就发生了迅速增长, 如山西阳泉保安煤矿和河南焦作九里山煤矿高突煤层煤样在 1 MPa 的瓦斯压力下的瓦斯吸附量分别可达 14.99 cm³/g 和 22.16 cm³/g^[22], 远高于内蒙古鄂尔多斯布尔台煤矿和陕西咸阳大佛寺煤矿的非突煤层煤样, 意味着高突煤层压力降低后仍具备吸附大量瓦斯的能力, 易造成卸压抽采不充分和残余瓦斯异常涌出, 给瓦斯抽采和突出防治带来挑战。

1.4 基质尺度大且通达性差、瓦斯跨尺度运移难

基于前文孔隙分析结果, 笔者进一步总结了深部高突煤层孔隙发育及瓦斯储运模式, 如图 4 所示, 深部高突煤层孔隙以微孔发育为主, 纳米级的扩散渗流孔道极不发育, 高压瓦斯以吸附态赋存于煤基质内纳米孔群, 孔群间由狭窄喉道连接、彼此的通达性极

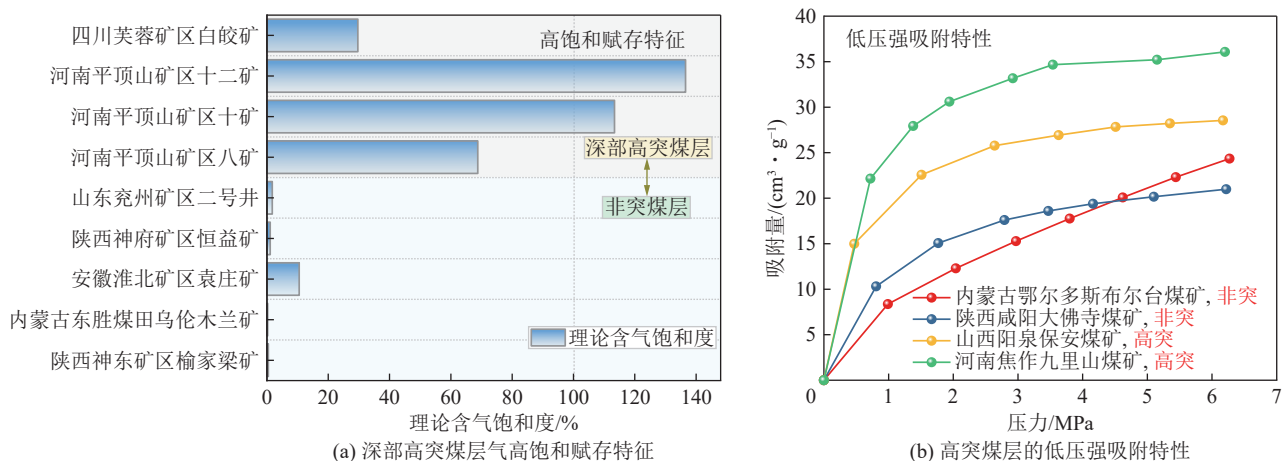


图3 深部高突煤层气赋存及吸附特性

Fig.3 Gas occurrence and adsorption characteristics in deep coal seams with high outburst risk

差,较远处微纳米孔群内的瓦斯需要逐级突破狭窄的喉道才能扩散运移到渗流孔裂隙内,瓦斯解吸扩散“阻力较大”;同时,深部高应力下煤体内部渗流孔裂隙发生闭合,导致煤的基质尺度较浅部显著增大,基

质瓦斯运移至裂隙的“路径变长”,导致瓦斯跨尺度解吸运移效率大大降低,造成钻孔抽采浓度衰减迅速、煤层瓦斯抽采困难,深部高突煤层多属于难抽采煤层。

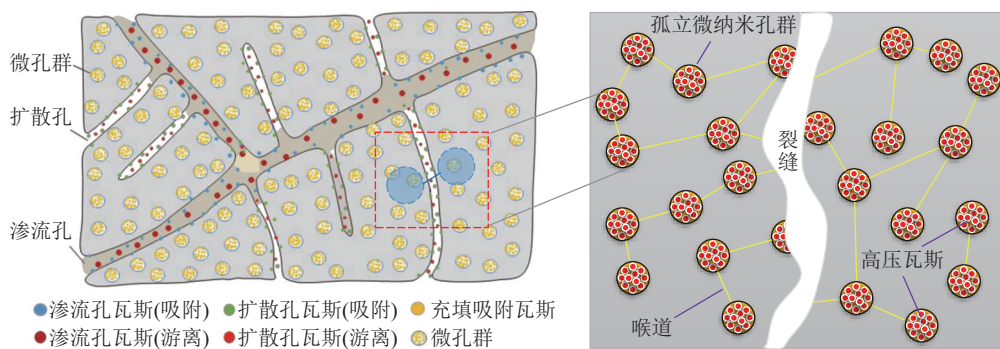


图4 深部高突煤层气储运模式

Fig.4 Gas storage and transportation mode in deep coal seams with high outburst risk

1.5 构造煤破碎程度高、构造带突出风险大

煤与瓦斯突出多发生在构造带,构造应力场作用下,煤体发生变形破坏形成低强度的碎软构造煤,同时构造带易形成显著的应力集中,高应力下糜棱煤等高变形程度构造煤基质已经发生了严重破坏,裂缝渗流通道已完全消失^[23],造成煤体渗透率急剧衰减,有利于瓦斯的储存和富集,在煤层局部区域形成高应力、高瓦斯的高突出危险区。研究表明,在煤层开采的深度范围内构造应力随深度的增加而增大,深部高突煤层在强构造应力作用下呈现出以下3个特征:①构造煤的破碎程度显著增强。对于在浅部经历了脆性断裂而改变形态和位态的煤层,在深部高温高压的复杂动力地质环境下极易发生韧性变形,流变迁移的程度显著增加^[24],特别在挤压或剪切应力场作用下且温度较高时,煤体破碎剧烈,易形成糜棱煤等高变形程度的构造煤^[25],煤体强度显著降低;②最大水平主应力

增加。最大水平主应力与突出强度密切相关,深部构造应力增大导致最大水平主应力增加,易诱发高强度的突出灾害,比如平顶山东部矿区在逆冲推覆运动和局部向斜强构造应力的显著影响下,十矿、十二矿在600~1130 m深度最大水平主应力范围为33.30~65.00 MPa^[26],突出频数和强度显著增大;③形成高压瓦斯异常富集区。随最大水平主应力的增大煤体渗透率呈现负指数降低,强构造应力作用下深部构造带区域渗透率较浅部显著降低,构造应力集中带内裂缝闭合、将更容易形成对瓦斯流动的天然封堵,形成高压瓦斯包^[27-29],显著增大了突出风险。

2 深部煤层开采诱突机制

突出风险主要受到采掘工作面前方煤体性质、地应力和瓦斯压力3因素的综合影响。假设煤体性质、地应力和瓦斯压力沿采掘方向均匀分布,那么如果在

采掘稳定阶段没有发生突出事故,表明在这种均衡的条件下,工作面前方的应力和瓦斯压力的分布状态都处于稳定状态,如果按照同样的采掘循环接替,则在后期采掘过程中也不会发生突出事故。而深部突出煤层普遍具有构造应力作用强、地应力和瓦斯压力大且突变性强、瓦斯易吸附难流动等特点,突出风险在煤层内的分布并非均衡,当煤体性质、地应力或者瓦斯压力等发生变化时,突出事故的风险就急剧增大,并可能诱发突出事故。

2.1 深部典型突出过程

如图5所示,图中绿色虚线表示煤体性质、瓦斯压力、地应力都均衡的稳态条件下浅部煤层采掘工作面前方的应力和瓦斯压力分布特征。此时虽然在掘进工作面前方也呈现了应力集中区域,但是在浅部开采时应力集中峰值不够大,卸压带却足够长,卸压带内的煤层裂缝发育,瓦斯得到了充分释放,卸压带能够阻挡住深部的高压瓦斯,突出事故不会发生。但是当深部煤体力学性质发生变化时,如图中煤层由硬变

软时的采掘工作面超前应力、煤层气、裂缝等都会发生相应的改变。通常软煤承载能力要显著低于硬煤,则工作面超前应力集中更多会被硬煤承担,只有当硬煤发生屈服变形时,才会有更多的应力集中转移到软煤上。但是在硬煤屈服之前,随着工作面的逐步推进,剩余硬煤上的应力集中会越来越显著,卸压带随之会越来越短(图5黑色曲线),强大的应力集中会使得煤层内的裂隙闭合,导致深处软煤内的瓦斯不易流出,形成了应力封锁屏障,这种现象在深部则更为严重。当采掘工作面继续向前推进到某一个临界极限时,残留的硬煤会发生屈服失稳,应力迅速重新分布,大量的应力转移到软煤上,由于之前应力集中封闭了软煤内的瓦斯,此时软煤内大量的残余瓦斯就可能破碎并抛出煤体,发生突出事故。深部的高应力状态更容易破碎采掘工作面前方的煤体,会使得突出之前煤层的瓦斯封闭得更好,这会导致采面前方虽然卸压带较浅部更长而发生突出(图5蓝色曲线),突出风险和浅部有显著的差异性。

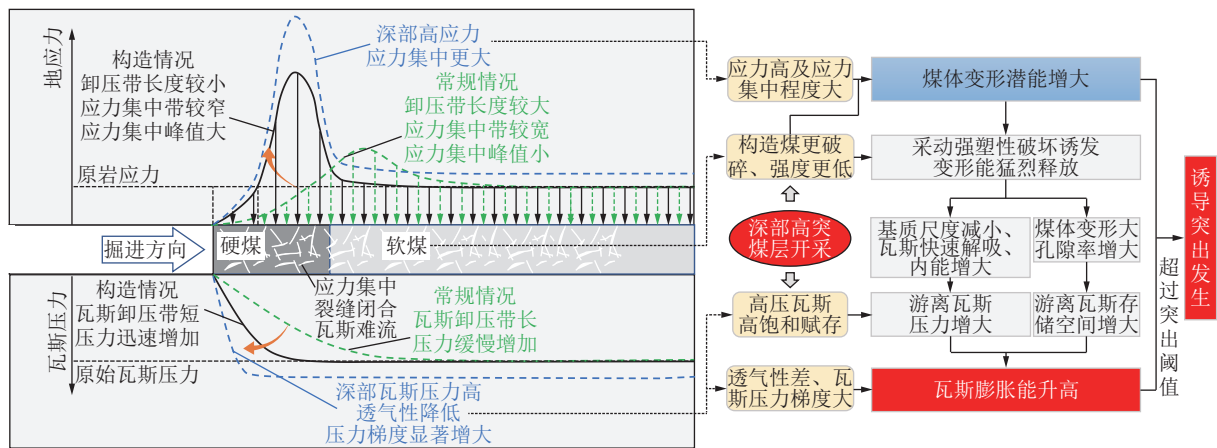


图5 深部开采煤体力学性质变化诱突机理

Fig.5 Mechanism of outburst induced by changes in coal mechanical properties during deep mining

基于深部高突煤层致突三要素的变化特征并结合突出能量理论^[30-34],笔者尝试从突出能量的角度进一步阐释深部开采诱突机制(图5)。由第1节可知高应力和构造煤破碎程度高是深部高突煤层的典型特征,这导致了构造煤中极易储存比浅部更高的变形潜能,强采动应力下低强度构造煤将发生强烈的塑性破坏,诱发变形能的猛烈释放。大量变形能的迅速释放对突出的激发至关重要,一方面变形能以向外做体积功等形式释放^[30],诱发煤体内部发生剧烈损伤破坏而产生大变形,导致孔隙空间的迅速增大,这大大增大了游离瓦斯存储空间;另一方面煤基质尺度在强采动破坏下迅速减小,微孔隙内吸附瓦斯快速解吸,游离瓦斯压力显著增大。存储空间和游离瓦斯压力同

步增大将会导致游离瓦斯膨胀能的迅速升高。当瓦斯膨胀能高于突出阈值时,便会诱导突出发生。此外,深部煤层气通常以高压高饱和赋存,加之高应力下工作面前方透气性低,瓦斯放散难,造成工作面前方瓦斯压力高、梯度大,煤体内的瓦斯膨胀能显著高于浅部,进一步增大了突出发生的风险。

2.2 突出过程数值模拟分析

为了验证上述分析的正确性,笔者采用FLAC3D数值模拟的方法,研究了巷道从软煤进入硬煤、再由硬煤进入软煤的全过程中巷道超前应力的演化特征。如图6a所示,建立了44 m×40 m×44 m的三维地质模型,模型顶部为应力边界,其余为滚支边界,设置三向应力 $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=10$ MPa。假设煤岩为弹塑性体,并服

从摩尔-库仑破坏准则,煤层和岩层的力学参数见表1。在煤层中部布置4 m×4 m方形巷道。图6b展示了煤巷的AA'剖面 and 整体模拟方案,即将巷道掘进分为3阶段:①从软煤进入硬煤阶段,此时巷道掘进工作面在小于21 m范围内;②从硬煤进入软煤阶段,此时巷道掘进头在21~27 m范围内;③在软煤层内掘进,此时巷道掘进工作面在大于27 m范围内。在巷道掘进过程中监测掘进头应力、位移分布演化规律,分析突出风险的变化。

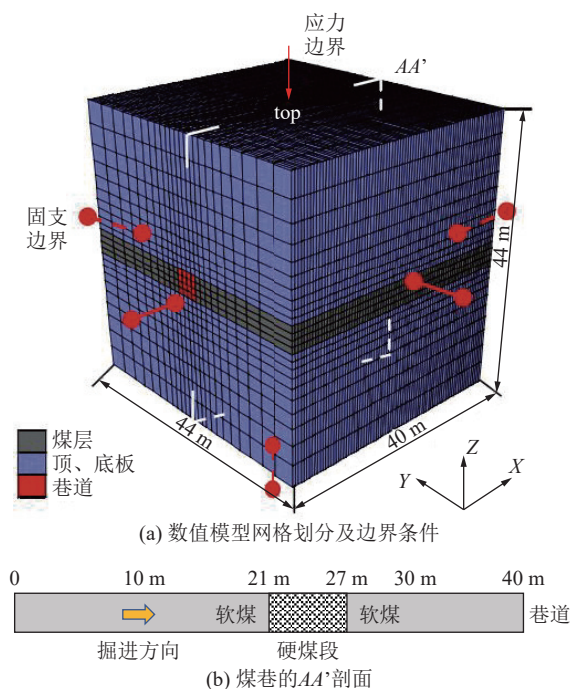


图6 数值模型构建和巷道掘进过程

Fig.6 Numerical modeling and roadway driving process

表1 煤岩力学参数

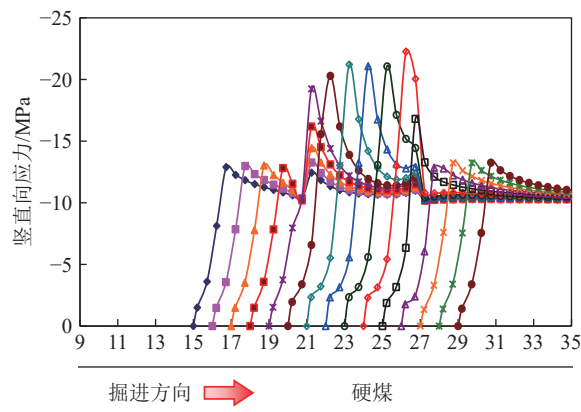
Table 1 Mechanical parameters of coal and rock

类别	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
顶底板	10	3.0	33	1.0	1.0
煤层	1	0.3	28	0.8	0.8
坚硬段煤层	3	0.9	28	0.8	0.8

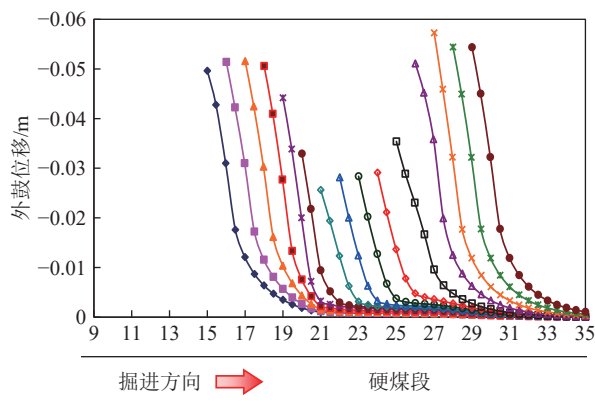
当巷道掘进到不同位置时,巷道前方煤体内的应力分布特征及外鼓位移量如图7所示。第1阶段,当巷道从15 m掘进至18 m时,掘进工作面前方的煤体内出现了2次应力集中,一次在掘进工作面前方软煤内,一次在硬煤内,随着巷道掘进工作面的移近,软煤内的应力集中逐渐降低,而硬煤内的应力集中逐渐增大,此时巷道前方煤体的外鼓位移量变化不大;第2阶段,当巷道掘进至硬煤内时,巷道掘进头前方仅在硬煤内产生应力集中,而在远处的软煤内不产生应力

集中,此时巷道煤体的外鼓位移量较第1阶段变小;第3阶段,当巷道在软煤内掘进时,在巷道前方产生一次应力集中,煤体的位移较第2阶段显著增大。可以发现,当巷道从第1阶段进入第2阶段时,巷道前方的煤体应力集中逐渐增大,地应力没有迅速释放的环节,但是当巷道从第2阶段进入第3阶段时,巷道前方的煤体应力集中逐渐增大到最大值,并在巷道掘进到24 m和25 m位置时(此时巷道前方硬煤还有3 m和2 m的长度),巷道超前应力集中迅速降低,煤体的外鼓位移迅速增大,此时必然在短时间内会释放大量的弹性能量,容易导致煤岩体的失稳。很显然从第2阶段进入第3阶段时,也就是巷道从硬煤进入软煤的过程中突出风险迅速增大。这证明了上述理论分析的正确性。

很显然,在深部煤层采掘过程中,煤层内的地应



(a) 竖直向应力



(b) 外鼓位移

图7 巷道掘进到不同位置处时巷道前方煤体地应力和位移量分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of in-situ stress and displacement of coal body in front of roadway when roadway is driven to different positions

力更大、瓦斯含量更高、煤体渗透性更低,这都会使得煤层突出风险进一步增大,即便是在极其微小的地质构造也可能会激发煤与瓦斯突出事故的发生。

3 深部开采突出防治对策

从深部高突煤层的典型特征和诱突机制可以看出,深部高突煤层开采不仅受自身高应力的影响,还受浅部煤层和邻近工作面开采的影响,多重应力叠加效应会进一步增大突出风险,同时导致煤层应力分布不均;构造带内煤体破碎剧烈、应力集中强、高压瓦斯积聚,深部构造煤带是极易发生突出的高危区域;高应力、强吸附、低孔隙的特性使得瓦斯运移以缓滞扩散为主,瓦斯抽采极其困难,常规增透措施的适用性明显降低,突出防治困难。基于此,笔者提出了深部防突的几点对策,以期深部高突煤层瓦斯动力灾害高效防治提供借鉴,主要包括合理布置、超前探测、深度卸压和强力增透 4 方面,具体阐述如下。

3.1 合理布置

深部地应力通常比浅部更大,这使得深部开采风险较大;此外,矿井地应力随采掘过程而动态转移,浅部开采之后形成了采空区,应力降低,而扰动应力则会向深部逐步转移,导致深部开采风险更大。如图 8

所示,某矿首先在浅部开采,随着浅部资源的枯竭,逐渐向深部开采转移,此时除了受到深部原本高应力影响之外,浅部开采后的扰动应力也向深部传递,导致深部开采的地应力集中程度显著增加,风险相对于浅部也更大,该矿所有的突出事故均发生在深部。此外,由于采掘接替的不合理也导致了局部突出风险过大。如图中虚线标记的工作面,在左右两侧工作面都采掘结束之后,形成了孤岛工作面,在该工作面开采之前已经积聚了显著的应力集中,弹性潜能过大,在该工作面采掘期间先后发生了 12 次压出事故。这是典型的由于采掘接替不合理而诱发突出的情形。

因此,深部高突煤层开采前更应该关注采掘的合理布置,在深部高应力矿井工作面和巷道布置时,应当重点关注矿井原始应力场及其扰动转移规律、扰动应力场动态分布特征等。然而,地应力测试难度大、测试周期长,很难获得全矿井地应力场分布特征,这也是地应力作为致突三大因素之一却无法直接将地应力参数用于突出预测的原因。为此,笔者课题组开发了矿山应力场数字孪生高精度同化仿真技术,通过矿山等比例数字孪生模型构建及参数同化系列方法,实现了全矿井全时空应力场动态演化规律,图 8 即为所获的某矿原岩应力场和实际采掘扰动应力场分布。

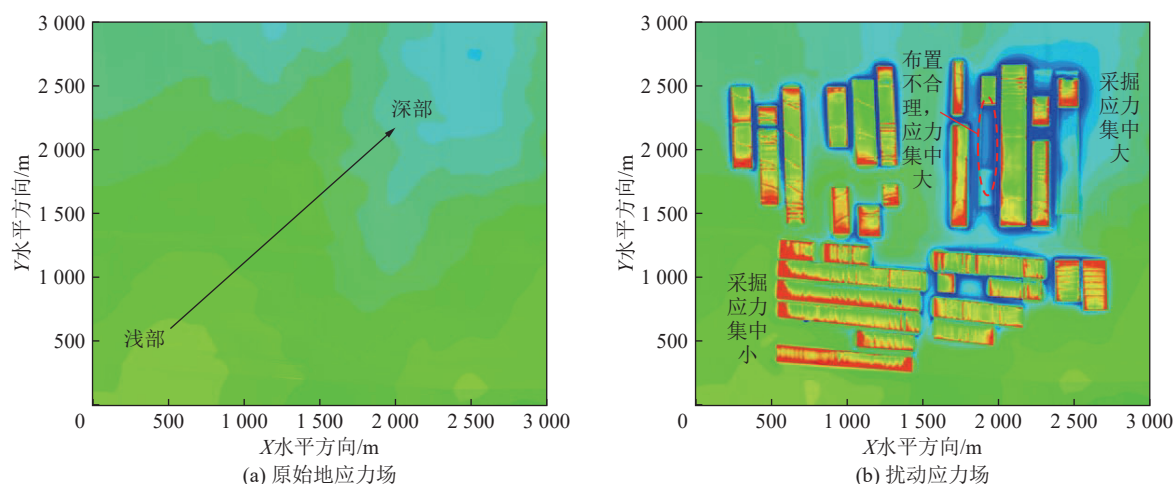


图 8 某矿不同采深原岩应力场和扰动应力场的数字孪生反演结果

Fig.8 Digital twin inversion results of in-situ stress field and disturbed stress field distributions at different mining depths in a mine

此外,笔者课题组经过长期理论和现场试验研究发现^[35],地应力方向对突出风险有显著影响,当巷道掘进方向和最大主应力方向平行时突出风险总体较小,相互垂直时突出风险较大。因此,深部开采工作面和巷道布置时还应关注应力方向的影响。首先应推动矿山应力场数字孪生技术的发展,通过地应力精准测试和数字孪生高精度反演获得矿山三向应力场分布规律的基础上,以优先沿最大主应力方向布置为

基本原则,通过合理的采掘布置规避采掘过程中的局部应力集中,在采掘布置阶段从整体上降低矿井突出风险。

3.2 超前探测

采掘工作面是突出发生的主要地点,研究表面我国约有 80% 以上的突出发生在采掘工作面附近。通常断层、褶皱、煤层厚度变化等都会导致煤层空间赋存几何形态、力学参数等发生突变,这会导致采掘工

作面扰动应力场、瓦斯流动场非一致性变化,这种非连续性变化会导致煤层局部应力集中,是诱发突出的最主要因素,统计表明超过 90% 的突出事故发生在地质异常区。特别对于深部高突煤层,构造应力水平较浅部增大,强构造应力下构造煤破碎剧烈,形成超低强度的碎粒煤或糜棱煤,且构造应力集中带封闭大量高压瓦斯,并最终在煤层内形成多个潜在的高危险区域。工作面前方煤层赋存的地质条件不透明、突出风险不明确给深部高突煤层突出防治带来巨大挑战,特别是小构造隐蔽性强,动态精准探测难度极大,是目前煤矿安全开采的最大危险源^[36-38]。因此,超前探测是深部高突煤层突出防治的关键,通过超前探测准确获取深部煤层异常构造分布、煤岩力学参数、瓦斯压力及瓦斯含量分布等关键信息,实现突出风险超前识别和精准防控成为深部高突煤层突出防治必然的发展方向。

关于异常构造分布探测,目前传统的物探方法(探地雷达法、槽波地震法等)很难实现高效精准的探测,特别是小地质构造的精准探测仍是世界性难题。近年来,声波探测因其具有的探测范围广、成像精度高等优点,利用煤矿井下密集施工的普通钻孔进行孔内声波探测可能是实现小构造精准探测的一个重要方向^[39]。对于突出预测防控来说,应尽快发展隐蔽小构造高精度探测技术,通过研发“物探+钻探”的先进技术实现煤层隐蔽构造的精细化探测。关于煤岩力学参数探测,目前在实验室内已经开展了不同类型岩石力学参数的随钻测试试验,初步建立了钻进参数(转矩、转速、推进力、破碎比功等)与岩石力学参数的经验关系模型。但由于煤层结构复杂、强度变化区间大,煤岩力学参数高精度探测尚未出现成熟可用的先进技术^[40-41],对于深部煤层复杂煤岩体力学参数的精细化测试反演仍需持续开展攻关研究。关于瓦斯参数探测,相关学者^[42-44]提出了通过实时监测定向钻孔瓦斯涌出量动态反演工作面瓦斯压力和瓦斯含量的方法,并初步进行了现场应用,测试结果如图 9 所示。现有方法将煤层渗透率视为常数,没有考虑渗透率非均匀分布特征。而在强开采扰动、浅部开采应力叠加和强构造应力共同作用下,深部高突煤层应力和渗透率均呈现明显的非均匀分布特征,因此在深部复杂煤层开采瓦斯参数的科学精准探测方面仍需开展进一步研究。

总的来说,对深部高突煤层开采而言,超前探测的重点发展方向应包括以下 4 方面:① 聚焦于开发隐蔽小构造精细化探测技术、煤岩力学参数和瓦斯参数等随钻精准探测反演技术,由单一参数精准测试向多

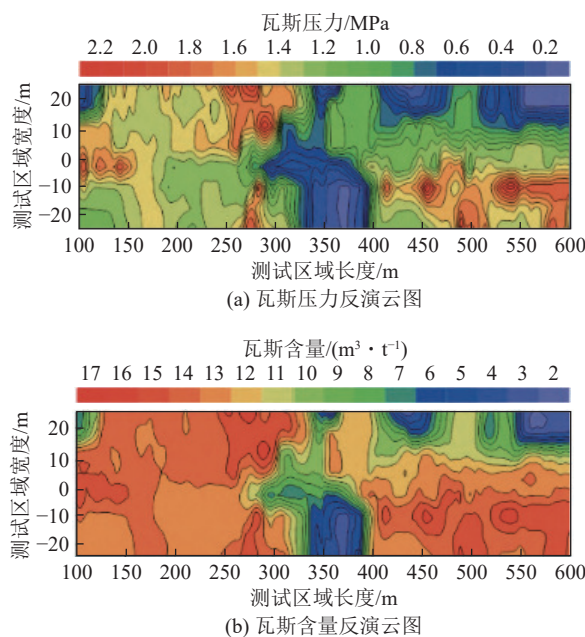


图 9 定向钻进随钻瓦斯参数动态反演结果^[43]

Fig.9 Results of dynamic inversion of gas parameters in directional drilling^[43]

物理场参数同步测试反演发展;② 强调矿井多物理场参数数据库的构建,充分利用矿井日常施工的成千上万的普通瓦斯治理钻孔,通过多元信息随钻动态探测,实现矿井多物理场演化过程的可视化,为瓦斯及突出灾害的科学防控提供指导;③ 重点关注采掘工作面前方隐蔽构造和多物理场参数的超前精细化探测理论研究和装备开发,实现工作面前方突出风险的超前动态识别,使煤矿日常防突工作有的放矢;④ 开展突出风险评价理论模型研究,基于探测的多物理场参数,实现工作面前方突出风险的随掘动态反演评价,最终由多场参数透明化向突出风险透明化迈进,形成基于突出风险探测反演的精准防突技术,实现突出灾害的超前、动态和科学防治,保障采掘工作安全。

3.3 深度卸压

合理化采掘布置可以在一定程度上降低采掘应力集中和规避突出风险,但远达不到消突的要求。深部高突煤层开采扰动强、应力集中显著,采掘工作面前方应力变化梯度大,极易诱导突出发生;同时,高应力造成煤层内部裂缝闭合,渗透率衰减迅速,高压瓦斯被封闭在基质孔隙内,瓦斯流动方式从渗流变为扩散为主,运移极其困难;此外,高突煤层还具有低压段吸附能力强的特点,如图 10 所示,平煤十二矿深部高突煤的吸附等温线呈现出低压陡峭和高压平缓的特点,煤样的朗缪尔压力 P_L 为 2.33 MPa,即煤层内近一半吸附瓦斯在 2.33 MPa 以下的低压段赋存。吸附等温线的斜率随压力的降低逐渐增大,即单位压降下可

解吸的瓦斯量不断增加, 如同样是获得 2.18 mL/g 的解吸, 在储层压力为 15 MPa 时, 需要降低 8 MPa 的压力, 而在储层压力为 4 MPa 时只需降低 1.5 MPa 的压力就可以实现。因此, 由于低压段瓦斯储量占比高, 在深部高储层压力下常规卸压手段常常不能满足瓦斯高效解吸的需要, 这进一步增大了瓦斯抽采的难度, 易造成大量低压吸附瓦斯的残留煤层, 给突出防治带来挑战。

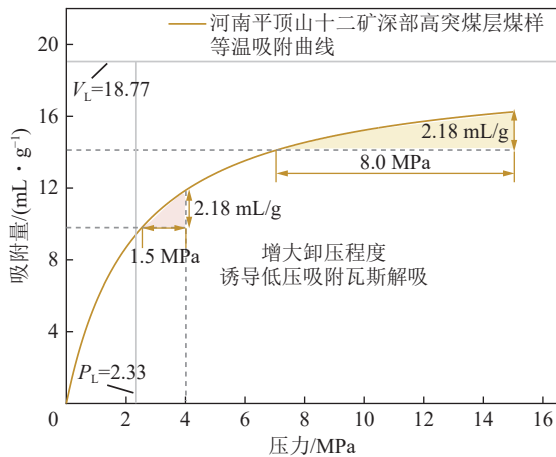


图 10 深度卸压诱导煤层低压吸附瓦斯解吸的示意

Fig.10 Schematic diagram of low pressure adsorption gas desorption induced by deep pressure relief in coal seam

因此, 对于深部高突煤层突灾害防治, 笔者提出需要对煤层进行深度卸压, 强化卸除煤层应力至较低水平 (图 11), 一方面诱导低压段内的吸附瓦斯大量脱附, 促进瓦斯高效解吸抽采; 另一方面, 应力释放后煤层内部闭合裂缝重新张开, 渗透率将呈现高至成百上千倍的增长, 大大增强瓦斯流动能力, 提高瓦斯抽采效率, 充分减少煤层气含量; 此外, 深度卸压将显著降低煤层应力集中程度, 减小采掘工作面前方的应力梯度, 从而最终达到消除深部高突煤层突出风险的目的。

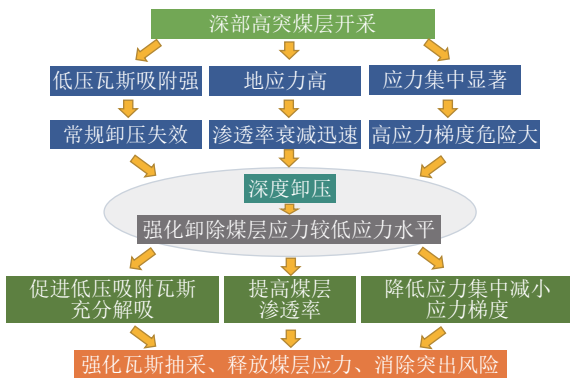


图 11 深部高突煤层深度卸压消突原理

Fig.11 Principle of eliminating outburst in deep coal seams with high outburst risk by deep pressure relief

对于“深度卸压”, 通常保护层开采区域防突技术具有较佳的卸压效果, 在深部高突煤层开采中仍可推广采用。而对于传统水力冲孔等技术, 则大多需密集化施工大量冲孔钻孔才能实现深部高突煤层的整体消突, 消突时间和经济成本显著升高。为此, 笔者提出了“钻-冲-割”耦合深度卸压增透技术^[45](图 12a), 通过在同一钻孔内依次进行“低压钻进-中压冲孔-高压割缝”的联合施工, 在钻孔周围构建较大范围的卸压空间, 充分卸除应力, 诱导煤体产生大范围塑性变形, 实现煤层深度卸压增透, 强化瓦斯高效解吸和抽采。此外, 应以“创造大范围卸压空间、诱导应力充分释放”为目标, 进一步发展大范围深度卸压防突技术, 如水平井或定向长钻孔水力冲孔/割缝^[46](图 12b)、地面井深度卸压辅助消突^[47](图 12c)等。同时, 针对深部复杂高突煤层消突, 单一技术往往难以实现高效均匀消突, 应推动井上下联合卸压增透增抽技术的发展, 通过多种井上下卸压增透技术的有机结合, 实现深部高突煤层立体式深度卸压和高效消突。

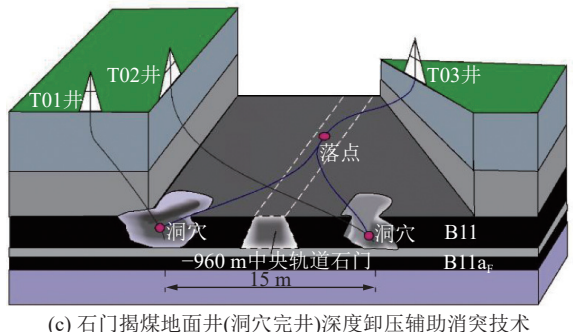
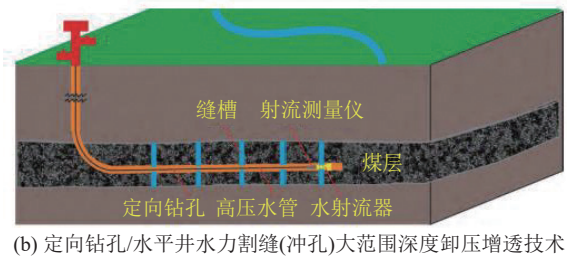
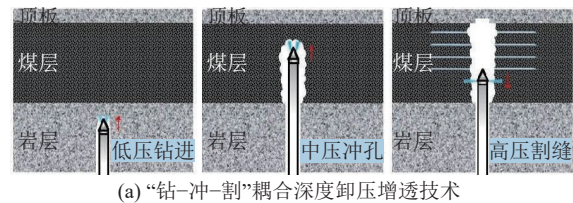


图 12 深部高突煤层深度卸压消突技术^[45-47]

Fig.12 Technologies for eliminating outburst risks by deep pressure relief^[45-47]

3.4 强力增透

深部高突煤层微纳米孔隙孤群式发育, 其间喉道狭窄, 连通性极差, 扩散路径极为曲折, 加之高应力作

用下煤体内部裂缝发生闭合,使得煤的基质尺度大大增加,扩散成为瓦斯运移的主要方式。瓦斯仅依靠浓度梯度从低透基质深处的微孔群扩散到邻近渗流孔裂隙的过程十分缓慢,瓦斯抽采极为困难,钻孔抽采浓度衰减迅速,抽采效率低下,将导致瓦斯抽采消突钻孔的工程量激增,抽采周期拉长,不但会大大增加消突成本,还容易造成采掘接替紧张。此外,深部高应力作用下水力压裂等技术造缝增透的难度增大,造成常规增透措施应用后裂缝扩展程度受限、适用性降低。

因此,本文提出“强力增透”增抽消突的技术理念(图 13)。一方面,针对高突高应力煤层缝网高效构建难、煤基质尺度大、瓦斯扩散缓滞的难题,强调构建大范围网络化裂缝通道、减小煤体基质尺度,缩短瓦斯扩散路径、加速瓦斯运移;另一方面,针对基质孔隙连通性差、瓦斯跨尺度输运难的问题,强调对基质孔隙系统的活化、改善基质孔裂隙连通性,促进基质瓦斯高效解吸运移,实现基质孔隙-裂隙跨尺度流动通道的有效构建,最终实现深部高突煤层气的高效抽采和有效防突。

对于“强力增透”,笔者课题组提出了“可控爆压”均匀致裂强力增透技术^[48]。如图 14 所示,通过在煤巷条带两帮一定范围施工穿层水力冲孔控制孔群,并在孔群中心施工爆压孔,通过卸压控制爆破引导水力压裂裂缝均匀扩展,形成网络化裂缝通道,同时显著降低了煤层起裂压力,实现了深部高突煤层高效均匀增透。此外,应以“构建大范围缝网、大幅减小基质尺度”为目标,进一步推动大范围强力增透技术发展,如定向长钻孔水力压裂技术^[49],包括硬煤层顺层长钻孔

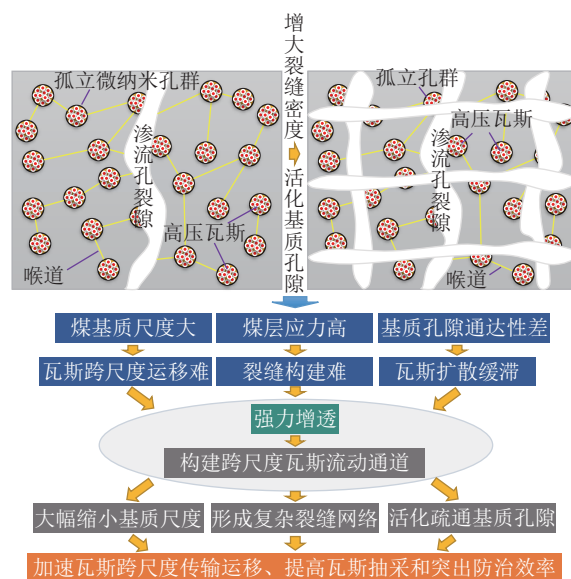


图 13 深部高突煤层强力增透消突原理

Fig. 13 Principle of eliminating outburst in deep coal seams with high outburst risk by enhancing permeability

分段压裂^[50]、碎软煤层顶(底)板分段压裂技术^[51]等。同时,煤层甲烷原位燃爆压裂^[52]、大规模/超大规模体积压裂^[53]等新技术和理念不断涌现,有望解决深部高突煤层复杂缝网构建和高效增透消突难题。基于深部高突煤层基质孔隙连通性差的特征,尝试一些新的物理化学方法对煤体内闭塞的孔隙系统进行活化改性,以达到更好的增透效果,如采用合适的有机溶剂^[54]、清洁氧化剂^[55]等疏通活化基质孔隙,同时和水力割缝、水力压裂等常规物理增透技术相结合,可实现基质孔隙-裂隙跨尺度流动通道的有效构建,促进基质瓦斯高效解吸运移,有望显著提升煤层增透、增抽和消突效果。

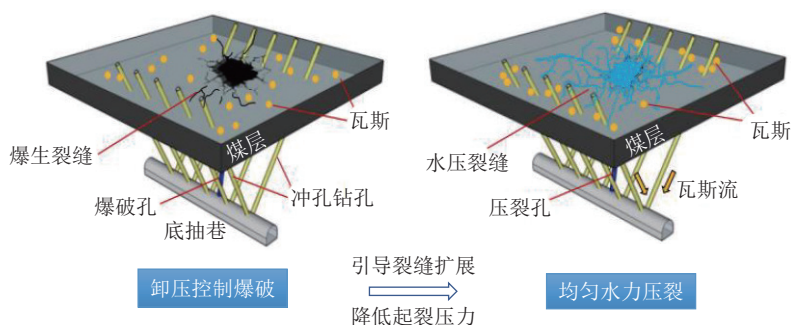


图 14 “可控爆压”均匀致裂强力增透技术^[48]

Fig. 14 "Controlled blasting and fracturing" technique for uniform and powerful permeability enhancement^[48]

4 结 论

1) “深部”高突煤层指的是应力、瓦斯压力和煤体强度等因素综合影响下煤层所表现出的非线性力学状态,这种力学状态仅在浅部局部位置出现,在深部

开采中则频繁显现。在煤炭可采深度范围($< 1500\text{ m}$)内,随着采深的增加煤岩的破坏方式逐渐从脆性劈裂破坏向塑性流动过渡,基于应力水平(原岩应力 σ_0 、采动应力 σ_d)与煤的弹性极限强度 σ_e 、屈服强度 σ_s 的相对关系,可划分出 3 个临界深度。

2) 深部高突煤层开采呈现出一系列典型特征, 如应力水平高, 受浅部开采等叠加扰动下应力分布不均且应力集中显著, 高水平应力导致采动煤层呈强塑性破坏特征; 煤的孔隙率低且孔隙连通性差, 高应力下煤层渗透率衰减迅速; 瓦斯呈现出低压强吸附特性, 高压瓦斯高饱和赋存于封闭的孔裂隙系统内; 煤的基质尺度增大, 基质瓦斯流动方式以缓滞扩散为主、跨尺度运移难, 显著增加了瓦斯抽采难度, 常规增透措施的适用性明显降低; 此外, 深部强构造应力导致构造煤破碎剧烈、强度显著降低, 最大水平应力增大, 构造应力集中区瓦斯高压高量集聚, 风险激增, 多种因素共同作用下深部开采突出风险剧增。

3) 深部煤层开采产生强应力集中效应, 将强化对工作面前方构造软煤带内高压瓦斯的封锁, 且高应力使得采掘工作面附近煤体的产生剧烈塑性失稳破坏, 诱导前方构造软煤带内的高压瓦斯突然释放, 并破碎抛出煤体, 既而引发突出灾害。巷道从硬煤进入软煤的过程中突出风险迅速增大, 深部开采过程中即使微小的地质构造也可能激发突出灾害。

4) 深部开采突出防治应关注煤层原始应力分布和采掘应力转移规律的研究, 通过矿山应力场数字孪生技术获得应力场分布及演化规律, 基于此提出合理的采掘布置方法, 减少采掘局部应力集中, 降低矿井整体突出风险; 应推动发展多参数耦合随钻精准探测技术, 实现煤层内部隐蔽构造、煤岩力学参数和瓦斯参数的高精度测试反演, 实现突出风险的透明化, 既而进行超前精准防控; 应发展大范围深度卸压增透技术, 充分释放应力、降低应力集中水平, 提高煤层渗透率, 诱导低压段吸附的大量瓦斯高效解吸, 达到强化瓦斯抽采的目的; 应推动强力造缝增透技术的发展, 在煤层内构建立体式网络化裂缝通道, 减小基质尺度, 加速瓦斯运移; 同时, 有必要通过物理化学联合的方法, 构建基质孔隙-裂隙跨尺度瓦斯运移通道, 以进一步提升瓦斯抽采效果, 降低煤层瓦斯含量, 达到消除突出风险的目的。

参考文献(References):

- [1] 张建民, 李全生, 张勇, 等. 煤炭深部开采界定及采动响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1314-1325.
ZHANG Jianmin, LI Quansheng, ZHANG Yong, et al. Definition of deep coal mining and response analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1314-1325.
- [2] 谢和平, 彭苏萍, 何满潮. 深部开采基础理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] ZHENG C S, KIZIL M S, CHEN Z W, 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.
- [4] LIU J S, CHEN Z W, ELSWORTH D, et al. Interactions of multiple processes during CBM extraction: A critical review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 87(3-4): 175-189.
- [5] 齐庆新, 潘一山, 舒龙勇, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1801-1810.
QI Qingxin, PAN Yishan, SHU Longyong, et al. Theory and technical framework of prevention and control with different sources in multi-scales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1801-1810.
- [6] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39-46.
LAN Hang, CHEN Dongke, MAO Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39-46.
- [7] RANJITH P G, ZHAO J, JU M H, et al. Opportunities and challenges in deep mining: A brief review[J]. *Engineering*, 2017, 3(4): 546-551.
- [8] 郭怀广. 深部煤层瓦斯动力灾害诱发机制研究与探讨[J]. 中国煤炭, 2023, 49(5): 43-49.
GUO Huaiguang. Research and discussion on the induced mechanism of gas dynamic disaster in deep coal seam[J]. *China Coal*, 2023, 49(5): 43-49.
- [9] 陈大力, 陈洋, 杨福蓉. 深部煤层瓦斯压力与吸附瓦斯能力对瓦斯含量的影响[C]//2013年全国瓦斯地质学术年会论文集. 北京: 中国煤炭学会, 2013: 37-42.
- [10] 程远平, 刘洪永, 赵伟. 我国煤与瓦斯突出事故现状及防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 15-18.
CHENG Yuanping, LIU Hongyong, ZHAO Wei. Status and prevention countermeasures of coal and gas outburst accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 15-18.
- [11] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [12] 李化敏, 付凯. 煤矿深部开采面临的主要技术问题及对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 468-471.
LI Huamin, FU Kai. Some major technical problems and countermeasures for deep mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(4): 468-471.
- [13] 杨军, 闵铁军, 刘斌慧, 等. 深部开采灾害及防治研究进展[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(36): 14767-14776.
YANG Jun, MIN Tiejun, LIU Binhui, et al. Research progress on disasters and prevention in deep mining[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(36): 14767-14776.
- [14] 袁瑞甫. 深部矿井冲击-突出复合动力灾害的特点及防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 6-10.
YUAN Ruifu. Features of dynamic disasters combined rockburst and gas outburst in deep coal mine and its preventive measures[J].

- Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 6–10.
- [15] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535–542.
- XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 535–542.
- [16] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1–10.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1–10.
- [17] 陈刚, 秦勇, 胡宗全, 等. 准噶尔盆地白家海凸起深部含煤层气系统储层组合特征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 80–86.
- CHEN Gang, QIN Yong, HU Zongquan, et al. Characteristics of reservoir assemblage of deep CBM-bearing system in Baijiahai dome of Junggar Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 80–86.
- [18] ZHAO C X, CHENG Y P, LI W, et al. Critical stress related to coalbed methane migration pattern: Model development and experimental validation[J]. *Energy*, 2023, 284: 128681.
- [19] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [20] 康永尚, 闫霞, 皇甫玉慧, 等. 深部超饱和煤层气藏概念及主要特点[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1781–1790.
- KANG Yongshang, YAN Xia, HUANGFU Yuhui, et al. Concept and main characteristics of deep oversaturated coalbed methane reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1781–1790.
- [21] 康永尚, 邓泽, 皇甫玉慧, 等. 中煤阶煤层气高饱和—超饱和带的成藏模式和勘探方向[J]. *石油学报*, 2020, 41(12): 1555–1566.
- KANG Yongshang, DENG Ze, HUANGFU Yuhui, et al. Accumulation model and exploration direction of high-to over-saturation zone of the midium-rank coalbed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1555–1566.
- [22] 高亚斌. 钻孔水射流冲击动力破煤岩增透机制及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- GAO Yabin. Research on the mechanism of permeability enhancement based on breaking coal-rock by dynamic impact of water jet in boreholes and its application on gas extraction[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [23] 舒龙勇, 齐庆新, 王凯, 等. 煤矿深部开采卸荷消能与煤岩介质属性改造协同防突机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3023–3032.
- SHU Longyong, QI Qingxin, WANG Kai, et al. Coordinated prevention mechanism of pressure-relief and coal and rock properties modification for coal and gas outburst in deep mining of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3023–3032.
- [24] 贾建称, 张妙逢, 吴艳. 深部煤炭资源安全高效开发地质保障系统研究[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(6): 1–7.
- JIA Jianchen, ZHANG Miaofeng, WU Yan. The geological guarantee system for exploiting deep coal resources in safety and high efficiency[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(6): 1–7.
- [25] 郭德勇, 揣筱升, 张建国, 等. 构造应力场对煤与瓦斯突出的控制作用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3076–3090.
- GUO Deyong, CHUAI Xiaosheng, ZHANG Jianguo, et al. Controlling effect of tectonic stress field on coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3076–3090.
- [26] 孙猛. 平顶山矿区地应力分布规律及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- SUN Meng. Study on in-situ stress distribution law and its application in pingdingshan mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [27] 程远平, 雷杨. 构造煤和煤与瓦斯突出关系的研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 180–198.
- CHENG Yuanping, LEI Yang. Causality between tectonic coal and coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 180–198.
- [28] AN F H, CHENG Y P. An explanation of large-scale coal and gas outbursts in underground coal mines: The effect of low-permeability zones on abnormally abundant gas[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(8): 2125–2132.
- [29] TU Q Y, CHENG Y P, GUO P K, et al. Experimental study of coal and gas outbursts related to gas-enriched areas[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(9): 3769–3781.
- [30] 程远平, 王成浩. 构造煤变形能及在煤与瓦斯突出中的作用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 645–663.
- CHENG Yuanping, WANG Chenghao. Deformation energy of tectonic coal and its role in coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 645–663.
- [31] B. B. 霍多特著. 煤与瓦斯突出[M]. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [32] 于不凡. 煤和瓦斯突出机理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.
- [33] VALLIAPPAN S, ZHANG W H. Role of gas energy during coal outbursts[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 44(7): 875–895.
- [34] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出过程中能量耗散规律的研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2): 173–178.
- JIANG Chenglin, YU Qixiang. Rules of energy dissipation in coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2): 173–178.
- [35] 杨威. 煤层采场力学行为演化特征及瓦斯治理技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- YANG Wei. Mechanical behavior evolution of mining stope and gas control technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [36] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采透明地质条件的重构与思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2346–2356.
- YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Framework and thinking of transparent geological conditions for precise mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2346–2356.
- [37] 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2277–2284.
- YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2277–2284.
- [38] 许献磊, 马正, 陈令洲. 煤矿地质灾害隐患透明化探测技术进展与思考[J]. 绿色矿山, 2023(1): 56–69.
- XU Xianlei, MA Zheng, CHEN Lingzhou. Progress and thinking of transparent detection technology for hidden geological hazards in

- coal mines[J]. *Journal of Green Mine*, 2023(1): 56–69.
- [39] 徐宏阳, 翟成, 夏济根, 等. 基于穿层钻孔声波远探测有限元方法的煤岩界面成像[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(3): 118–129.
- XU Hongyang, ZHAI Cheng, XIA Jigen, et al. Coal-rock interface imaging based on acoustic remote reflection logging within crossing boreholes using the finite element method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(3): 118–129.
- [40] 高松. 岩石力学参数数字钻探快速预测技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- GAO Song. Rapid forecasting technology for rock mechanics parameters based on digital drilling [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [41] 刘灿灿. 煤巷顶板岩层地质特征随钻探测机理研究与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- LIU Cancan. Research and application of detection while drilling mechanism for geological features of coalmine roadway roof strata[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [42] 汪皓. 突出煤层定向钻进随钻瓦斯参数动态反演及消突效果评价研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- WANG Hao. Research on dynamic inversion of gas parameters while drilling in directional drilling of outburst coal seam and evaluation of outburst reduction effect [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [43] WANG H, WANG E Y, LI Z H, et al. Study and application of a new gas pressure inversion model in coal seam while drilling based on directional drilling technology[J]. *Fuel*, 2021, 306: 121679.
- [44] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(5): 1825–1845.
- YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1825–1845.
- [45] 高亚斌, 林柏泉, 杨威, 等. 高突煤层穿层钻孔“钻-冲-割”耦合卸压技术及应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(1): 177–184.
- GAO Yabin, LIN Baiquan, YANG Wei, et al. “Drilling-flushing-slotting” intercoupling pressure-relief technology of cross-measure boreholes and its application in high gassy outburst coal seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(1): 177–184.
- [46] 卢义玉, 李瑞, 鲜学福, 等. 地面定向井+水力割缝卸压方法高效开发深部煤层气探讨[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 876–884.
- LU Yiyu, LI Rui, XIAN Xuefu, et al. Discussion on the efficient exploitation method of deep coalbed methane with pressure relief by ground directional well+hydraulic slotting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 876–884.
- [47] 张东亮. 井巷揭煤地面预抽辅助消突技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(3): 49–55.
- ZHANG Dongliang. Auxiliary outburst prevention techniques by surface pre-drainage for coalbed exposed in tunnel and mine shaft[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(3): 49–55.
- [48] 路长征. 水驱替煤层瓦斯机理及均匀压裂技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- LU Changzheng. Research on mechanism of coalbed gas displaced by water and uniform fracturing technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [49] 孙四清, 李文博, 张俭, 等. 煤矿井下长钻孔分段水力压裂技术研究进展及发展趋势[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(8): 1–15.
- SUN Siqing, LI Wenbo, ZHANG Jian, et al. Research progress and development trend of staged hydraulic fracturing technology in long-borehole underground coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(8): 1–15.
- [50] 王晨阳, 李树刚, 张永涛, 等. 煤矿井下硬煤层顺层长钻孔分段压裂强化瓦斯抽采技术及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(8): 72–81.
- WANG Chenyang, LI Shugang, ZHANG Yongtao, et al. Enhanced gas drainage technology by staged fracturing in long bedding borehole in hard coal bed of underground coal mine and its application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(8): 72–81.
- [51] 刘乐, 张俭, 方秦月, 等. 碎软低渗煤层顶板定向长钻孔水力加砂分段压裂工程应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(8): 91–100.
- LIU Le, ZHANG Jian, FANG Qinyue, et al. Application of hydraulic sand staged fracturing in directional long drilling of roof in broken soft and low permeability coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 91–100.
- [52] 翟成, 王宇, 刘厅, 等. 不同燃爆载荷作用下页岩破裂特性及孔裂隙结构改性规律[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4269–4283.
- ZHAI Cheng, WANG Yu, LIU Ting, et al. Fracture characteristics and pore structure evolution law of shale under different methane explosive fracturing loads[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(12): 4269–4283.
- [53] 桑树勋, 郑司建, 王建国, 等. 岩石力学地层新方法在深部煤层气勘探开发“甜点”预测中的应用[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1840–1853.
- SANG Shuxun, ZHENG Sijian, WANG Jianguo, et al. Application of new rock mechanical stratigraphy in sweet spot prediction for deep coalbed methane exploration and development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1840–1853.
- [54] 王正. 基于 NMP 溶剂的煤体结构改性及活化增透作用机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- WANG Zheng. Mechanism of coal activation and structure modification under NMP treatment[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [55] 荆振华, 潘松圻, 王小明, 等. 煤储层氧化增渗作用机理及应用[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(11): 3975–3989.
- JING Zhenhua, PAN Songqi, WANG Xiaoming, et al. Oxidant stimulation to enhance coal seam permeability mechanism and application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(11): 3975–3989.