



# 强突煤层地面丛式井造穴卸压辅助石门揭煤技术

刘厅 翟成 童校长 徐鹤翔 邹全乐 林柏泉 徐吉钊

## 引用本文：

刘厅, 翟成, 童校长, 等. 强突煤层地面丛式井造穴卸压辅助石门揭煤技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 144–157.  
LIU Ting, ZHAI Cheng, TONG Xiaozhang. Technology of cavity completion in surface cluster wells for assisting rock cross-cut coal uncovering in high outburst coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 144–157.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0699>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 瓦斯抽采穿层钻孔钻扩造穴卸压增透机理研究

Study on mechanism of permeability improvement for gas drainage by cross-seam cavitation borehole  
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 75–82 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f02c94cb-97bf-4598-91a3-39276e84c72b>

#### 造穴CO<sub>2</sub>气相压裂复合技术缝隙卸压增渗机理研究

Research on mechanism of fracture formation, pressure relief, and permeability enhancement with composite technology of cavitation and CO<sub>2</sub>-frac  
煤炭科学技术. 2024, 52(8): 63–73 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1091>

#### 煤与瓦斯突出过程中渗流与煤岩体破坏耦合作用机制

Coupling mechanism of seepage and coal and rock mass destruction during coal and gas outburst  
煤炭科学技术. 2024, 52(12): 105–115 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1573>

#### 本煤层分段水力造穴钻孔抽采半径考察试验研究

Investigation and experimentation research on extraction radius of segmented hydraulic cavitation borehole in mining-coalbed  
煤炭科学技术. 2020, 48(8): 106–113 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f548755a-deb1-42d9-854b-3c25833e277c>

#### 碎软低渗煤储层强化与煤层气地面开发技术进展

Technology processes of enhancement of broken soft and low permeability coal reservoir and surface development of coalbed methane  
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 196–210 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0997>

#### 近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系研究——以山西吕梁沙曲矿区为例

High efficiency simultaneous extraction technology system of coal and gas in close-distance seam group: taking shaqu mining area in  
luliang, shanxi province as an example  
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 122–137 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.02.016>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 安全科学与工程



刘厅,翟成,童校长,等.强突煤层地面丛式井造穴卸压辅助石门揭煤技术[J].煤炭科学技术,2025,53(5):144-157.

LIU Ting, ZHAI Cheng, TONG Xiaozhang, et al. Technology of cavity completion in surface cluster wells for assisting rock cross-cut coal uncovering in high outburst coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 144-157.

移动扫码阅读

# 强突煤层地面丛式井造穴卸压辅助石门揭煤技术

刘厅<sup>1,2</sup>,翟成<sup>1,2</sup>,童校长<sup>3</sup>,徐鹤翔<sup>1,2</sup>,邹全乐<sup>4</sup>,林柏泉<sup>1,2</sup>,徐吉钊<sup>1,2</sup>

(1.中国矿业大学安全工程学院,江苏徐州 221116;2.煤矿灾害防控全国重点实验室,江苏徐州 221116;3.煤炭开采国家工程技术研究院  
煤矿瓦斯治理国家工程研究中心,安徽淮南 232000;4.重庆大学资源与安全学院,重庆 400044)

**摘要:**针对深部强突煤层石门揭煤危险性高,打钻过程易喷孔、效率低的难题,基于数值模拟和现场试验研究了强突煤层地面丛式井全覆盖造穴辅助石门揭煤降突机理及关键技术参数优化方法。首先开发了地面丛式井多级造穴技术及配套系统;其次揭示了丛式井造穴卸压煤体物理场演化规律,提出了造穴关键技术参数优化方法;最后成功开展了石门揭煤控制区地面丛式井全覆盖造穴辅助消突工程试验,验证了技术的有效性。结果表明:提出了多场协同调控防突方法,揭示了地面丛式井区域全覆盖造穴强化卸压增透,辅助石门揭煤消突机理,开发了“机械扩孔-水力喷射-排水释压”多级造穴技术,并配套研发了“造穴-排渣-水渣分离”一体化系统。煤体塑性区体积与等效直径平方呈线性关系,研究条件下的比值为81.90;洞穴附近低渗透区瓦斯压力随着洞穴直径的增大先降低后升高,对应的最优洞穴直径为2.0 m;揭煤巷道沿着垂直于最大主应力方向布置时,造穴后巷道两侧煤体更容易消突。成功开展了石门揭煤控制区地面丛式井全覆盖造穴辅助消突工程试验,技术实施后,煤层透气性系数提高约10倍,残余瓦斯压力和残余瓦斯含量显著降低,试验地点井下揭煤措施孔数量减少了24%、钻孔工程量降低了21%。开发的技术可进一步拓展形成“地面井煤气共采”方法,有望实现难采-难抽煤层煤与瓦斯的协同高效共采。

**关键词:**强突煤层;石门揭煤;地面井造穴;应力-渗流耦合;煤气共采

中图分类号:TD712 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2025)05-0144-14

## Technology of cavity completion in surface cluster wells for assisting rock cross-cut coal uncovering in high outburst coal seam

LIU Ting<sup>1,2</sup>, ZHAI Cheng<sup>1,2</sup>, TONG Xiaozhang<sup>3</sup>, XU Hexiang<sup>1,2</sup>, ZOU Quanle<sup>4</sup>, LIN Baiquan<sup>1,2</sup>, XU Jizhao<sup>1,2</sup>

(1.School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2.State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Xuzhou 221116, China; 3.National Engineering Research Center for Coal Gas Control, National Engineering and Technology Research Institute for Coal Mining, Huainan 232000, China; 4.School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In view of the problems of high risk in rock cross-cut coal uncovering of deep outburst coal seam, and borehole blowout and low efficiency during underground drilling, based on numerical simulation and field experiments, the mechanism of reducing outburst by cavity completion in surface boreholes for assisting rock cross-cut coal uncovering in high outburst coal seam was studied, and the key process parameters were optimized. Firstly, the multi-stage cavity formation technology and supporting system for surface cluster wells were developed. Then, the evolution of physics of stress-relief coal seam was revealed, and the optimization method of key process parameters for cavity creation was proposed. Finally, the technology of cavity completion in surface boreholes for assisting rock cross-cut coal uncovering was successfully implemented in the field, and it proves that this technique is effective. The research results show that: A multi-field collaborative outburst prevention method of “well network pressure relief-borehole group energy dissipation-curtain solidification” was proposed. The mechanism of outburst prevention by cavity completion in surface cluster well was revealed. A multi-stage caving tech-

收稿日期:2024-05-28 策划编辑:宫在芹 责任编辑:宫在芹 DOI:10.12438/cst.2024-0699

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52274241);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2023KYJD1007)

作者简介:刘厅(1991—),男,江苏连云港人,副教授,博士。E-mail:tingliu@cumt.edu.cn

nology of “borehole mechanical reaming-hydraulic jetting-water drainage pressure relief” was developed, and an integrated system of “cavity creation-slag discharge-water slag separation” was also developed. The range of plastic zone around the cavity is linearly related to the volume of the cavity, with a ratio of 81.90. The gas pressure in the low permeability area near the cavity decreases first and then increases with the increase of cavity diameter, and the corresponding optimal cavity diameter is 2.0 m. When the roadway is arranged along the direction perpendicular to the maximum principal stress, the outburst risk of coal on both sides of the roadway are easier to be eliminated after cavity completion. The technology of cavity completion in surface boreholes for assisting rock cross-cut coal uncovering was successfully implemented in the field, and the results show that the permeability coefficient of the coal seam has increased by about 10 times. The number of boreholes for in the test site has decreased by 24%, and the drilling length has decreased by 21%. The technical method described here can be further expanded to form the “coal-gas co-extraction method with borehole”, which is expected to achieve synergistic and efficient co-extraction of coal and gas in difficult to extract coal seams.

**Key words:** high outburst-prone coal seam; rock cross-cut coal uncovering; cavity completion in surface vertical boreholes; stress-seepage coupling; co-mining of coal and gas through borehole

## 0 引言

我国煤层赋存条件复杂,具有低渗透性、高瓦斯压力、煤质松软以及构造发育等特点,且瓦斯在煤层中以吸附态为主要赋存形式,占比高达80%~90%<sup>[1]</sup>。随着煤炭开采逐渐向深部延伸,地应力和瓦斯压力进一步升高,煤与瓦斯突出灾害发生的风险不断增加,尤其是石门揭煤过程面临极高的突出风险,严重制约着深部煤炭资源的安全高效开采<sup>[2-3]</sup>。传统的井下钻孔预抽技术为中浅部煤层的突出灾害防控做出了重要贡献<sup>[4]</sup>。但是,对于深部煤层,其高应力、高瓦斯压力和强塑性的特点导致井下打钻过程极易发生喷孔现象,危险性极高,且施工效率低,阻碍了矿井的采掘接替<sup>[5]</sup>。针对这一难题,亟需探寻适合于深部煤层的灾害防控模式。近年来,随着地面钻井技术的快速发展,地面井压裂技术被逐渐应用到煤层预抽消突的工程实践中,并在部分地区取得了较好的应用效果<sup>[6-8]</sup>。但是,对于强突出煤层,其通常为结构破碎的构造煤,这类煤层层理结构紊乱、力学强度低、塑性变形能力强,直接进行水力压裂很难在煤层内形成较大范围的有效导流通道,储层改造效果并不理想<sup>[9]</sup>。

从松软低透煤层煤层气开发的视角出发,相关学者提出地面井造穴或割缝的方法实现煤层卸压,提高煤层气采出率<sup>[10-11]</sup>。桑树勋等<sup>[12]</sup>针对构造变形煤层气开发效率低的难题,提出了地面水平井洞穴完井提高煤层气采出率的新方法,阐明了水平井造穴应力释放构造煤原位煤层气开发的工程原理。卢义玉等<sup>[13]</sup>综合井下瓦斯抽采实践及地面开发非常规天然气技术方式,提出了地面定向井+水力割缝卸压高效开发深部煤层气的方法,阐明了该技术的卸压增透机理。YANG等<sup>[14]</sup>结合沁水盆地水平井多

级洞穴完井的工程实践分析了水平井多级洞穴完井技术的储层改造机理。CHEN等<sup>[15]</sup>采用数值模拟的方法研究了水平井多缝槽割缝对强化深部煤层气开发的有效性,得出缝槽周围煤体的渗透率可达原始煤层的5~10倍,煤层气产量可达当前现场实际产量的13倍。

此外,部分学者将地面井造穴技术引入石门揭煤和井筒揭煤辅助消突技术领域,初步开展了少量洞穴的现场工程试验,取得了较好的应用效果<sup>[16-17]</sup>。但是,现有研究并没有对揭煤控制区域的卸压洞穴合理布置开展深入研究,已开展的工程试验洞穴数量少,仅在揭煤控制区局部位置开展了造穴试验,没有实现揭煤控制区域造穴全覆盖。因此,亟需开展石门揭煤区全覆盖地面井造穴技术研究,评价其辅助石门揭煤消突效果,验证该技术的可行性。

现有研究主要从提高煤层气采出率的角度开展研究,重点关注洞穴周围卸压区的范围及其影响因素,而针对应力集中区及其瓦斯运移的讨论较少。事实上,在现场实际施工时,可能会同时存在多个洞穴,不同洞穴之间应力相互叠加,导致洞穴之间应力集中程度非常高,阻碍该位置的瓦斯运移。从瓦斯灾害防治的角度看,这些高应力集中、低渗透率区可能会形成瓦斯抽采盲区,成为高突出风险点,给后期煤层回采埋下隐患。因此,从煤矿瓦斯灾害防治的角度出发,需要探讨造穴技术参数对煤层卸压消突效果的影响。

笔者针对淮南矿区张集矿高瓦斯突出煤层石门揭煤过程中存在的难题,提出通过地面丛式井造穴卸压辅助石门揭煤的技术思路。针对卸压洞穴的布置优化问题,基于扰动煤体多物理场耦合模型研究了多洞穴相互作用下,洞穴周围应力场、塑性变形以及瓦斯流场的分布及演化规律,确定了洞穴最优尺

寸。在现场开展了工程试验,初步验证了该技术在辅助石门揭煤方面的可行性。

## 1 地面丛式井造穴辅助石门揭煤技术原理及工艺

### 1.1 地面丛式井造穴卸压增流辅助石门揭煤技术原理

针对深部煤层石门揭煤过程面临的地应力高、瓦斯压力大、突出危险性强、打钻易喷孔以及施工

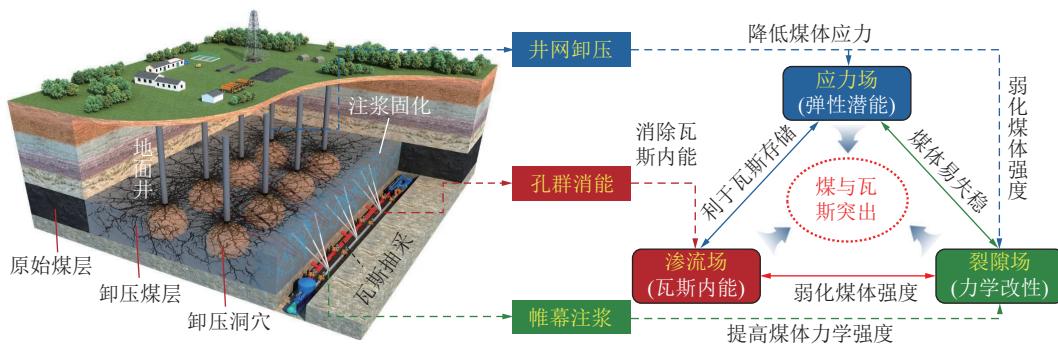
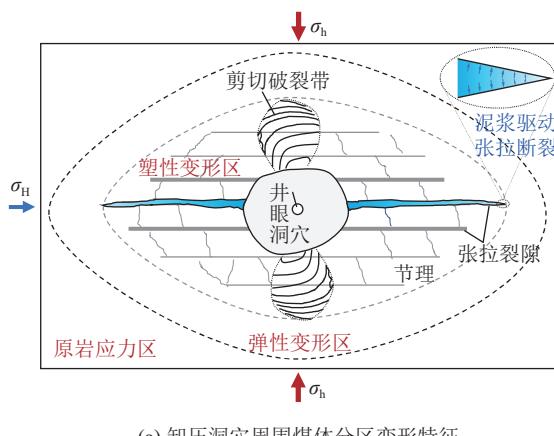


图1 深部强突煤层多场协同调控防突方法

Fig.1 Method of outburst control in deep coal seam by multiphysics collaborative regulation

造穴完成后,洞穴周围煤体在地应力的作用下发生塑性破坏,根据其变形的差异性由近及远可分为塑性变形区、弹性变形区和原岩应力区(图2a),其中 $\sigma_h$ 为最小水平主应力,  $\sigma_H$ 为最大水平主应力。原岩应力区内,煤体未受卸压扰动的影响,煤体几乎不发生变形;弹性变形区内,煤体变形较小,未发生塑性破坏,无新生裂隙产生;但由于地应力的变化,煤体原生裂隙张开/闭合;塑性变形区内,煤体产生了塑性大变形,存在明显的塑性破坏,沿着最大主应力方向,煤体主要发生张拉破坏,而沿着垂直于最大主应力方向,在压剪应力作用下,洞穴两端分别产生了一

个剪切破坏带。以上变形破坏与常规的水力冲孔洞穴或巷道周围的塑性变形机制一致<sup>[18]</sup>。但是,对于地面井造穴而言,造穴过程中,在泥浆压力的作用下,煤体沿着最大主应力方向可能会发生流体压力驱动的张拉劈裂破坏,产生大型宏观裂隙,从而改变洞穴周围的渗流状态<sup>[19-20]</sup>。例如,假设地面造穴煤层埋深为1000 m,钻井泥浆的密度为1.0~2.0 g/cm<sup>3</sup>,则其在洞穴壁面上产生的压力可达10~20 MPa,从而沿着最大主应力方向劈裂煤体,产生张拉裂缝,大幅提升卸压洞穴的有效影响范围。由于该裂缝的高导流能力,其对洞穴周围的瓦斯运移会产生显著影响。



(a) 卸压洞穴周围煤体分区变形特征

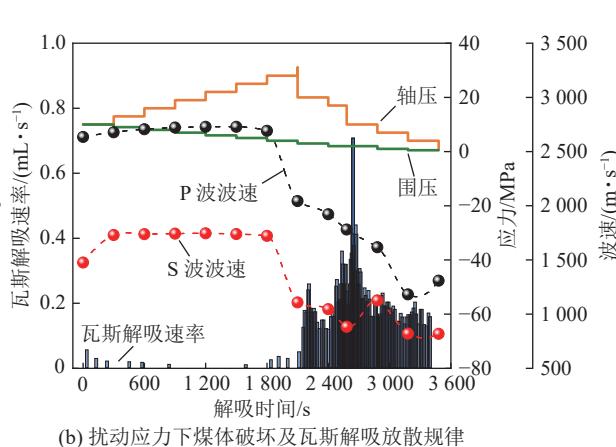


图2 卸压洞穴周围煤体变形分区特征及瓦斯放散规律

Fig.2 Partition characteristics of damaged zone around cavity and gas desorption

为了揭示卸压洞穴周围瓦斯的解吸规律,开展了加轴压、卸围压条件下煤体瓦斯解吸规律的试验研究,结果如图 2b 所示。初期阶段主要发生弹性变形,煤体被逐渐压实,声波波速逐渐升高,其对应图 2a 中的弹性变形区,此时,煤体瓦斯解吸速率逐渐降低。随着加载的持续,煤体发生塑性变形,其内部产生了新裂隙,声波波速大幅降低,其对应图 2a 中的塑性变形区,该区域内,瓦斯解吸速率大幅上升,最高可达初始解吸速率的 12.82 倍<sup>[21]</sup>。以上试验结果表明,造穴可大幅提高洞穴周围煤体瓦斯解吸速率,促进瓦斯抽采。

造穴后,洞穴周围煤体塑性破坏,应力大幅减小,降低煤层的弹性潜能;此外,造穴促进了煤层瓦斯的解吸、流动,能够快速降低煤层的瓦斯压力,消除煤层的瓦斯内能。因此,通过地面井造穴卸压能够达到辅助石门揭煤消突的目的。

## 1.2 地面丛式井多级造穴关键系统及工艺

该技术体系中,地面井造穴卸压是实现强突煤层消突的关键。图 3 为地面丛式井造穴卸压技术及配套系统示意。该技术的主要流程是从地表施工 2 组丛式井,每组钻井包含 6~7 个定向分支井,然后通过机械或水射流破煤在每个分支井内构建卸压洞穴,降低石门揭煤区域的煤体的突出潜能。为了实现地面井造穴,在地面配套构建了“造穴-排渣-水渣分离”一体化系统,该系统主要包括泥浆池、泥浆泵站、钻井平台、振动筛、空气压缩机以及配套的管路系统等。其中,泥浆池供应钻井以及浆返排煤渣所需的泥;泥浆泵站用于泵送泥浆;振动筛的主要作用是分离造穴过程中产生的泥浆以及煤渣组成的多相流体,筛分出的泥浆经过沉淀、过滤(保证泥浆质量稳定)后可循环使用;空气压缩机的主要作用是通过气举的方式排出井筒内的钻井液。

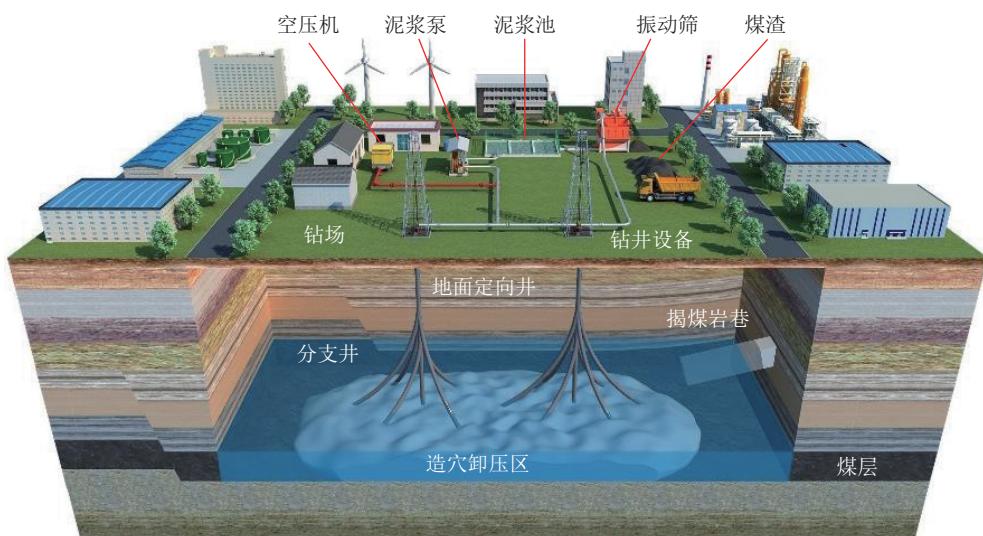


图 3 地面丛式井造穴卸压技术及系统示意

Fig.3 Technique and system of pressure relief by surface cluster well caving

## 2 弹-塑性变形煤体内多场耦合瓦斯运移模型

造穴后,揭煤目标区煤体应力重新分布,洞穴附近的煤体内产生大量的扰动裂隙<sup>[22-24]</sup>。笔者前期在考虑煤体塑性破坏的基础上建立了卸压煤层“应力-裂隙-渗流”多场耦合模型,采用该模型分析地面井造穴后煤体物理场的演化规律,模型的详细推导过程见文献<sup>[25]</sup>。

### 2.1 卸压煤体应力场控制方程

基于广义胡克定律,含瓦斯煤应力-应变关系<sup>[26]</sup>可表示为

$$Gu_{i,kk} + \frac{G}{1-2\nu}u_{k,ki} - \alpha p_f - \beta p_m - K\Delta\varepsilon_m^s + F_i = 0 \quad (1)$$

式中:  $G$ 、 $K$  分别为煤的剪切模量和体积模量, GPa;  $\nu$  为泊松比;  $\alpha$  和  $\beta$  为 Boit 系数;  $p_f$  和  $p_m$  分别为裂隙和基质瓦斯压力, MPa;  $\Delta\varepsilon_m^s$  为基质吸附变形增量;  $F_i$  为体积力, MPa;  $u_{i,kk}$  和  $u_{k,ki}$  为位移, m。

卸压煤体发生塑性破坏的准则可由式(2)表示:

$$F - \left[ \sqrt{J_2} - \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} I_1 - \frac{2\sqrt{3}C\cos\varphi}{3-\sin\varphi} \right] = 0 \quad (2)$$

式中:  $I_1$  为第一应力不变量, MPa;  $J_2$  为第二偏应力不变量, MPa<sup>2</sup>;  $C$  为黏聚力, MPa;  $\varphi$  为煤内摩擦角, (°)。

### 2.2 卸压煤层瓦斯扩散控制方程

结合质量守恒定律和 Fick 扩散定律,基质内瓦

斯运移过程可由式(3)表示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{M_{\text{CH}_4} \rho_c}{V_m} \frac{V_L p_m}{p_L + p_m} + \phi_m \frac{M_{\text{CH}_4} p_m}{RT} \right) + \\ \left( \frac{\phi_{f0} + \varepsilon_b^p}{\phi_{f0}} \right)^2 \frac{1}{\tau_0} \frac{M_{\text{CH}_4}}{RT} (p_m - p_f) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $M_{\text{CH}_4}$  为  $\text{CH}_4$  摩尔质量, g/mol;  $V_L$  为朗缪尔体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $p_L$  为朗缪尔压力, MPa;  $\rho_c$  为煤的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $V_m$  为气体摩尔体积,  $\text{L}/\text{mol}$ ;  $T$  为温度, K;  $\phi_m$  为基质孔隙率;  $\phi_{f0}$  为初始裂隙孔隙率;  $\varepsilon_b^p$  为初始裂隙孔隙率;  $R$  为气体常数,  $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $\tau_0$  为基质初始吸附时间, s。

### 2.3 卸压煤层瓦斯渗流控制方程

结合质量守恒定律和 Darcy 定律, 裂隙内的瓦斯渗流过程可由式(4)表示:

$$\begin{aligned} \phi_f \frac{\partial p_f}{\partial t} + p_f \frac{\partial \phi_f}{\partial t} - \nabla \left( \frac{k}{\mu} p_f \nabla p_f \right) - \\ \left( \frac{\phi_{f0} + \varepsilon_b^p}{\phi_{f0}} \right)^2 \frac{1}{\tau_0} \frac{M_{\text{CH}_4}}{RT} (p_m - p_f) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\phi_f$  为煤的裂隙率;  $k$  为煤体渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\mu$  为  $\text{CH}_4$  动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

### 2.4 物理场耦合关系

式(4)中渗透率的变化可由式(5)表示, 该模型同时考虑了有效应力、瓦斯解吸以及煤体塑性破坏的影响, 可同时表征弹-塑性变形煤体渗透率的演化

规律<sup>[27]</sup>。

$$\begin{aligned} \frac{k}{k_0} = \left( \frac{\phi_f}{\phi_{f0}} \right)^3 = \\ \begin{cases} \left[ \frac{\phi_{f0} + \varepsilon_b^p}{\phi_{f0}} \left( 1 - \frac{3}{\phi_{f0}} \Delta \varepsilon_m^s - \frac{\Delta \sigma^{\text{eff}}}{K_f} \right) \right]^3, & \varepsilon_b^p \leq \varepsilon_{bc}^p \\ \left[ \frac{\phi_{f0} + \varepsilon_{bc}^p}{\phi_{f0}} \left( 1 - \frac{3}{\phi_{f0}} \Delta \varepsilon_m^s - \frac{\Delta \sigma^{\text{eff}}}{K_f} \right) \right]^3, & \varepsilon_b^p > \varepsilon_{bc}^p \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $k_0$  为初始渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $K_f$  为裂隙体积模量, MPa;  $\varepsilon_{bc}^p$  为残余阶段起点塑性体积应变;  $\Delta \sigma^{\text{eff}}$  为有效应力增量, MPa。

基质孔隙率的变化可由式(6)表示:

$$\phi_m = \phi_{m0} \exp \left[ \frac{1 - \phi_{m0}}{\phi_{m0}} \left( \Delta \varepsilon_m^s - \frac{\Delta \sigma^{\text{eff}}}{K_m} \right) \right] \quad (6)$$

式中:  $\phi_{m0}$  为基质初始孔隙率;  $K_m$  为基质体积模量, MPa。

图 4 为应力场、煤体破坏、瓦斯运移的耦合关系。应力变化改变煤体的裂隙率和孔隙率, 进而影响裂隙内瓦斯渗流过程以及基质内的瓦斯扩散过程。此外, 应力场的变化因此洞穴周围煤体塑性破坏, 进而对瓦斯渗流和扩散过程产生显著影响。瓦斯压力的改变会影响煤体的有效应力, 并进一步影响煤体应力场的分布。对于裂隙内的瓦斯渗流和基质孔隙内的瓦斯扩散, 二者通过质量交换相互作用。

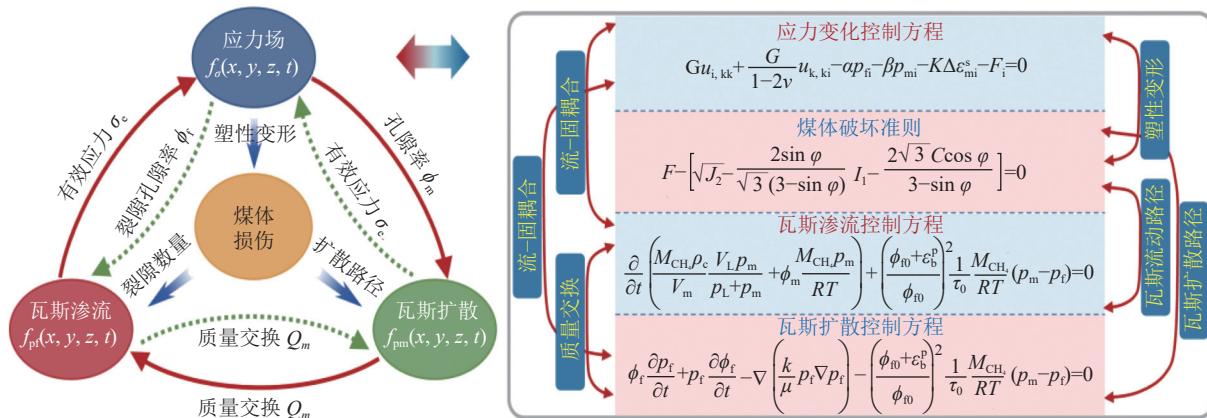


图 4 物理场的耦合关系  
Fig.4 Coupling relation among physics

### 2.5 几何模型及求解条件

基于工程试验中的钻井布置, 选取代表性重复单元构建本文的几何模型, 如图 5 所示。模型长、宽均为 50 m, 在距离模型中心点 10 m 的位置分别布置 4 个造穴钻井。模型左侧和下部边界为辊支承边界, 右侧和上部为应力边界。张集矿-820 m 水平东

翼轨研三联巷地应力测试结果表明其水平最大主应力取值范围为 24.99 ~ 25.58 MPa, 水平最小主应力取值范围为 15.77 ~ 16.36 MPa。据此, 该模型中水平最小主应力  $\sigma_x$  设置为 16 MPa, 水平最大主应力  $\sigma_y$  设置为 25 MPa。模型边界为零流量边界, 洞穴内侧为狄利克雷边界, 煤层初始瓦斯压力 3 MPa。

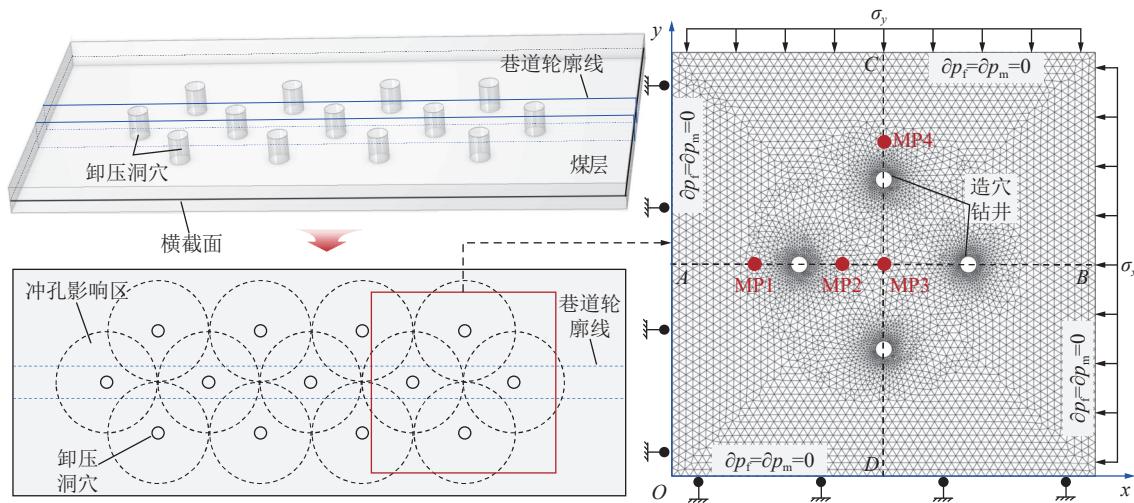


图 5 几何模型及边界条件  
Fig.5 Geometric model and boundary conditions

模型求解过程中需要输入的基础参数取值见表 1(参数来自实验室测试和文献)。沿模型中间水平方向和垂直方向分别设置了 2 条测线 AB 和 CD, 并分别在(9, 25)、(20, 25)、(25, 25)以及(25, 40)4

个位置设置测点 MP1、MP2、MP3 和 MP4。考虑到揭煤控制区域的范围及施工成本, 工程实践中钻井间距是确定的, 因此, 本文仅讨论造穴出煤量(洞穴直径)对卸压及瓦斯抽采的影响。

表 1 模型输入参数  
Table 1 Input parameters of the model

参数	数值	参数	数值
煤的黏聚力 $C_0/\text{MPa}$	1.8	煤的内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	22
煤基质弹性模量 $E_m/\text{GPa}$	8.4	煤层温度 $T/\text{K}$	303
裂隙初始瓦斯压力 $p_{\text{g0}}/\text{MPa}$	3	基质初始瓦斯压力 $p_{\text{m0}}/\text{MPa}$	3
裂隙体积模量 $K_f/\text{MPa}$	12	煤层初始渗透率 $k_0/\text{m}^2$	$2.2 \times 10^{-17}$
煤体密度 $\rho_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 300	原始煤层吸附时间 $\tau_0/\text{d}$	10
甲烷动力黏度 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$1.84 \times 10^{-5}$	裂隙Boit系数 $\alpha$	0.8
孔隙Boit系数 $\beta$	0.2	煤的弹性模量 $E_0/\text{GPa}$	2.5
煤的泊松比 $\nu$	0.32	煤基质初始孔隙率 $\phi_{\text{m0}}$	0.045
煤基质初始孔隙率 $\phi_{\text{f0}}$	0.02	残余阶段起点塑性体积应变 $\varepsilon_{\text{bc}}^p$	0.01
Langmuir吸附常数 $a/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	0.015	Langmuir吸附常数 $b/\text{MPa}^{-1}$	0.343

### 3 丛式井造穴卸压煤层物理场演化

#### 3.1 煤层应力及塑性区分布特征

图 6a 为不同直径洞穴周围煤体应力分布。在最大主应力方向, 洞穴周围煤体呈现卸压状态; 在最小主应力方向, 洞穴附近应力明显低于原始应力, 而在远离壁面的位置应力集中明显。随着洞穴的增大, 卸压区以及应力集中区的范围和程度均逐渐升高。此外, 孔径的增大还导致不同钻孔间的应力交互作用增强。当  $d \geq 2.5 \text{ m}$  时, 在  $y$  方向上形成 2 道高应力屏障。

应力重分布导致洞穴周围煤体发生塑性破坏。

图 6b 中, 当洞穴等效直径  $d=0.6 \text{ m}$  时, 4 个洞穴的塑性区相互孤立, 近似呈蝶形分布, 总体积为  $103.89 \text{ m}^3$ ; 当  $d$  增加到  $2.0 \text{ m}$  时, 不同洞穴塑性区之间相互连通, 此时的塑性区范围达到了  $1 649.07 \text{ m}^3$ 。煤体塑性区的范围与洞穴直径间呈二次函数关系, 即煤体塑性区体积随等效直径平方呈线性增大, 此处二者的比值为 81.90。

#### 3.2 煤层渗透率分布规律

应力及塑性区分布决定了煤体渗透率的演化规律。图 7a 中, 在洞穴附近由于煤体卸压及塑性破坏而形成高渗透圈, 沿着  $x$  方向形成 2 个低渗透区, 而

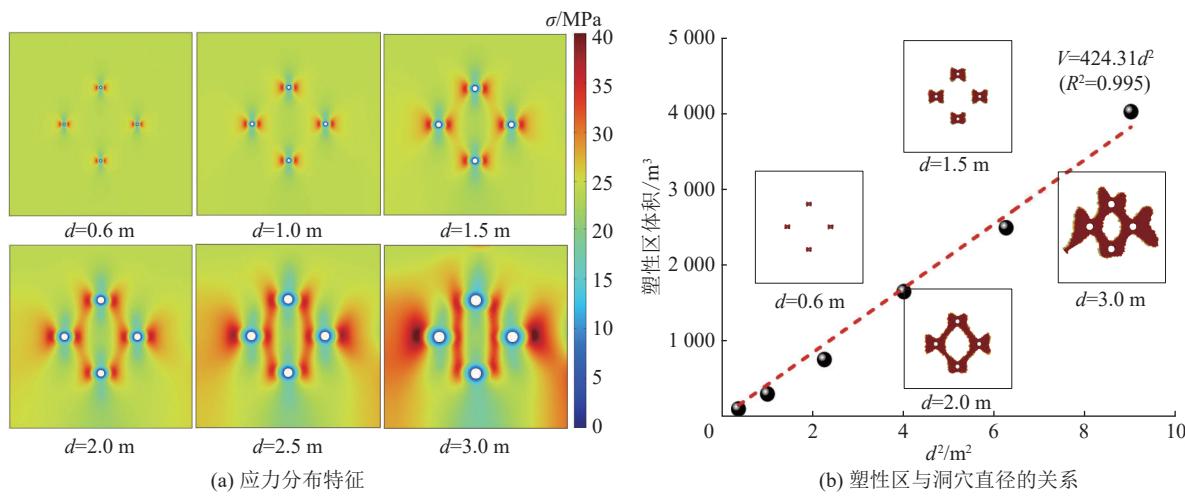


图 6 卸压洞穴周围煤体应力场及塑性区分布

Fig.6 Distribution of stress and plastic deformation zone around the stress relief cavity

沿着 $y$ 方向形成了高渗透带。这是因为造穴后,煤体在最大主应力法向上卸压,而沿着最小主应力方向上受压而产生应力集中。随着洞穴的增大,高渗透圈的范围逐渐增大,且整体沿着垂直于最大主应力方向延伸;  $x$ 方向低渗透区和 $y$ 方向高渗透带的范围均呈增大趋势,且低渗透区的渗透率降低,高渗透带的渗透率升高。当洞穴直径足够大时,沿着 $x$ 方向分布的洞穴两侧存在极低渗区域。图 7b 中,测线

$AB$ 上,随着洞穴直径的增大,其周围高渗区的范围明显增大,洞穴外侧的低渗区的渗透率明显降低。而在 2 个洞穴之间的区域,低渗区渗透率随着洞穴的增大呈现先降低后升高的趋势。测线  $CD$  上,随着与洞穴距离的减小,煤体渗透率逐渐升高,且洞穴直径越大,渗透率越高。只有在 2 个洞穴中心的区域,由于水平方向应力集中的叠加作用导致该位置在大洞穴直径的条件下渗透率有所降低。

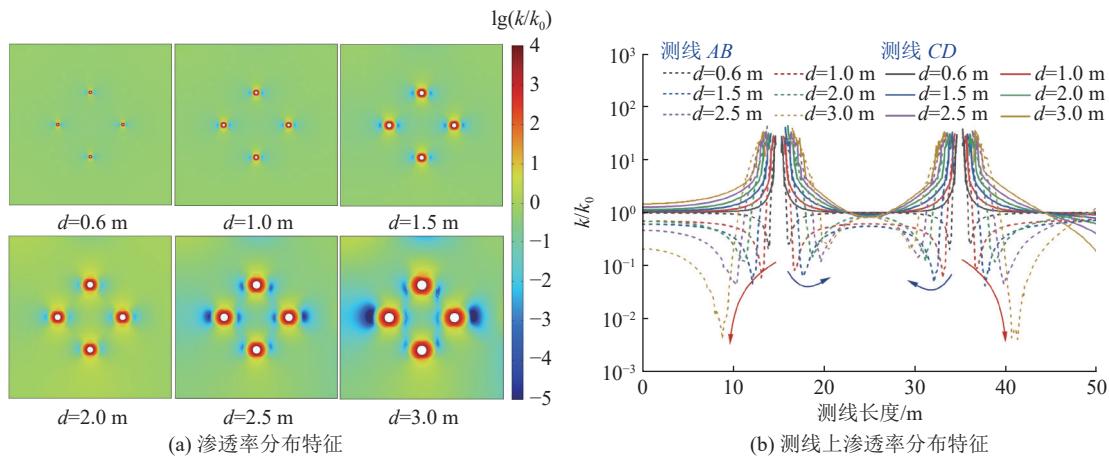


图 7 卸压洞穴周围煤体渗透率分布

Fig.7 Distribution of permeability around the stress relief cavity

### 3.3 煤层瓦斯流场的演化规律

图 8a 和图 8b 为不同抽采时间下测点瓦斯压力随洞穴直径的变化规律。为了获得不同位置处瓦斯压力的变化,研究共设置了 MP1~MP4 共 4 个测点,其与卸压洞穴的空间相对关系如图 5 所示。测点 MP1 处,当抽采时间一定时,该点的瓦斯压力随着洞穴直径的增大先降低后升高,且抽采时间越长,这一趋势愈加明显。初期,随着洞穴直径的增大,卸压效

应越明显,因而瓦斯压力降低越快;后期随着洞穴进一步增大,应力集中效应愈加显著,不利于瓦斯的流动,可能会形成抽采盲区,给后期采掘留下安全隐患。因此,存在一个最优的洞穴尺寸使得该点的瓦斯压力最低,此处对应的最优洞穴直径为  $d=2.0\text{ m}$ 。测点 MP2 和 MP4 处,瓦斯压力随着洞穴直径的增大总体上呈降低趋势。测点 MP3 位于模型中心处,瓦斯压力逐渐降低,但随着洞穴的增大, $x$  方向应力集中效

应在该点不断叠加, 后期瓦斯压力降幅逐渐趋缓。据此预测, 当洞穴直径进一步增大时, 该点瓦斯压力会出现反弹。

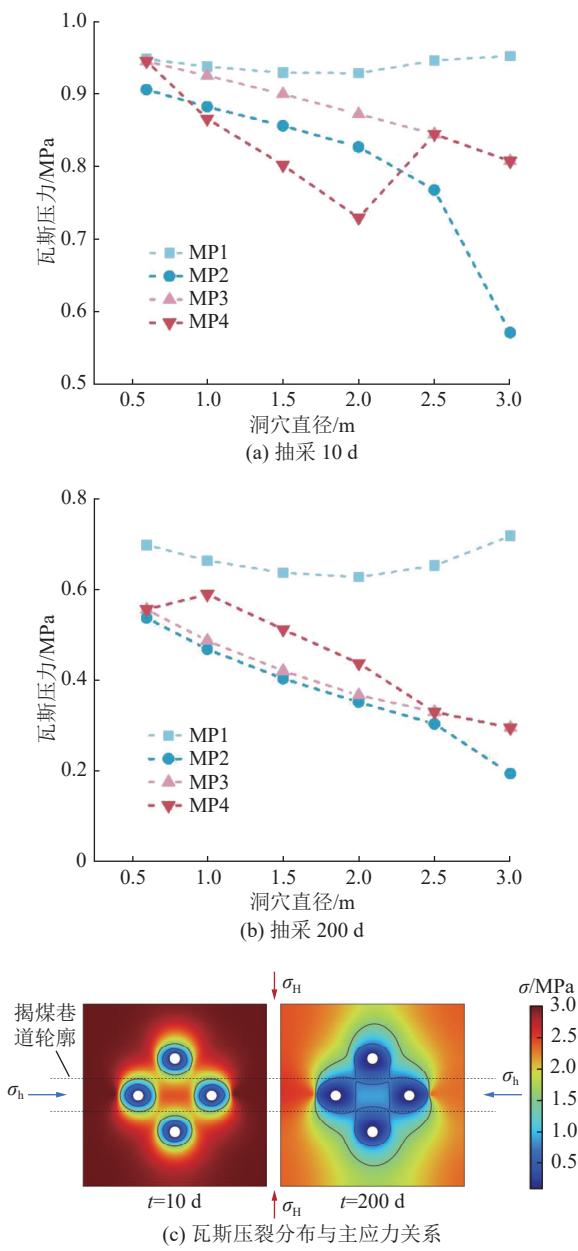


图 8 卸压洞穴周围瓦斯压力的分布规律

Fig.8 Distribution of gas pressure around  
stress relief cavity

图 8c 展示了瓦斯压力分布与煤层主应力及揭煤巷道的空间关系。总体上, 最大主应力方向上的瓦斯压力低于最小主应力方向, 沿着最大主应力方向的瓦斯压力在抽采过程中更容易降低。当洞穴直径较小、抽采时间较短时, 上述差异并不明显, 随着洞穴直径的增大、抽采时间的延长, 这一现象逐渐强化。从这一角度看, 研究建议石门揭煤设计过程中, 应将揭煤巷道沿着垂直于最大主应力的方向布置,

这有利于消除巷道两侧煤体的突出危险性。

## 4 工程试验

### 4.1 试验地点概况

选择张集矿-820 m 水平东翼轨研三联巷揭 1 号煤层为研究对象。该区域煤层埋深大, 最大主应力达 25.58 MPa, 巷道揭 1 煤处预计煤层厚约 8.7 m, 煤层原始瓦斯压力达 2.5 ~ 3.0 MPa。1 号煤层次生节理面发育且不规则, 发育有多层软煤, 破坏类型达到 III ~ V 类, 层理较紊乱无序, 局部软煤暗淡、土状结构, 用手捻之成粉末, 坚固性系数一般为 0.21 ~ 0.38, 具有极强的突出危险性。采用传统的方法在井下施工煤层瓦斯预抽钻孔过程存在明显的动力现象, 钻孔施工极易喷孔, 施工场所瓦斯浓度易超限, 安全风险高, 钻孔施工效率低, 矿井采掘接替紧张。

### 4.2 地面丛式造穴钻井布置

为保证巷道揭煤期间施工安全, 需要将揭煤巷道见煤段和止煤段及其周边一定范围确定为揭煤控制区域, 并在该区域内采取消突措施, 保证揭煤安全。张集矿-820 m 水平揭煤区域采用地面丛式井全覆盖造穴卸压消突, 揭煤控制范围为揭煤巷道轮廓线外 15 m。按照以上原则, 将沿揭煤巷道轴线长 80 m, 垂直巷道轴线宽 40 m 的区域设定为地面井造穴辅助消突区域。考虑地面井施工要求及造穴成本, 2 个钻井的间距设计为 20 m, 即地面钻井消突半径为 10 m。根据钻井控制范围及影响半径, 张集矿-820 m 水平揭煤区域设计 WG1 和 WG2 两组丛式消突钻井。其中, WG1 包含 1 个主井和 5 个定向分支井; WG2 包含 1 个主井和 6 个定向分支井。主井位于正六边形中心位置, 分支井按正六边形均匀分布在揭煤控制区域内, 设计主井或分支井间距不大于 20 m。根据钻井周围瓦斯压力的变化规律判定, 卸压洞穴的最优直径应位于 1.5 ~ 2.0 m 范围内。地面井布置平面图、剖面图以及钻井轨迹如图 9a—图 9c 所示。

主井及定向分支井终孔层位均为 1 号煤层底板以下 1 m。钻井采用三开结构, 设计结构如图 9d 所示。一开段, 0 ~ 基岩面下 30 m(井深 342 m), 孔径  $\varnothing 311$  mm, 下入  $\varnothing 244.5$  mm  $\times$  8.94 mm 的 J55 石油套管, 并固井以隔离松散地层。二开段, 342 m ~ 6 号煤底板, 孔径  $\varnothing 216$  mm, 0 ~ 6 号煤底板(井深 781 m), 全孔段下入  $\varnothing 177.8$  mm  $\times$  8.05 mm N80 石油套管并固井。三开段, 孔径  $\varnothing 152$  mm, 裸孔, 2 个主井及 11 个分支井定向钻进至靶点, 并对煤层段进行造穴作业。

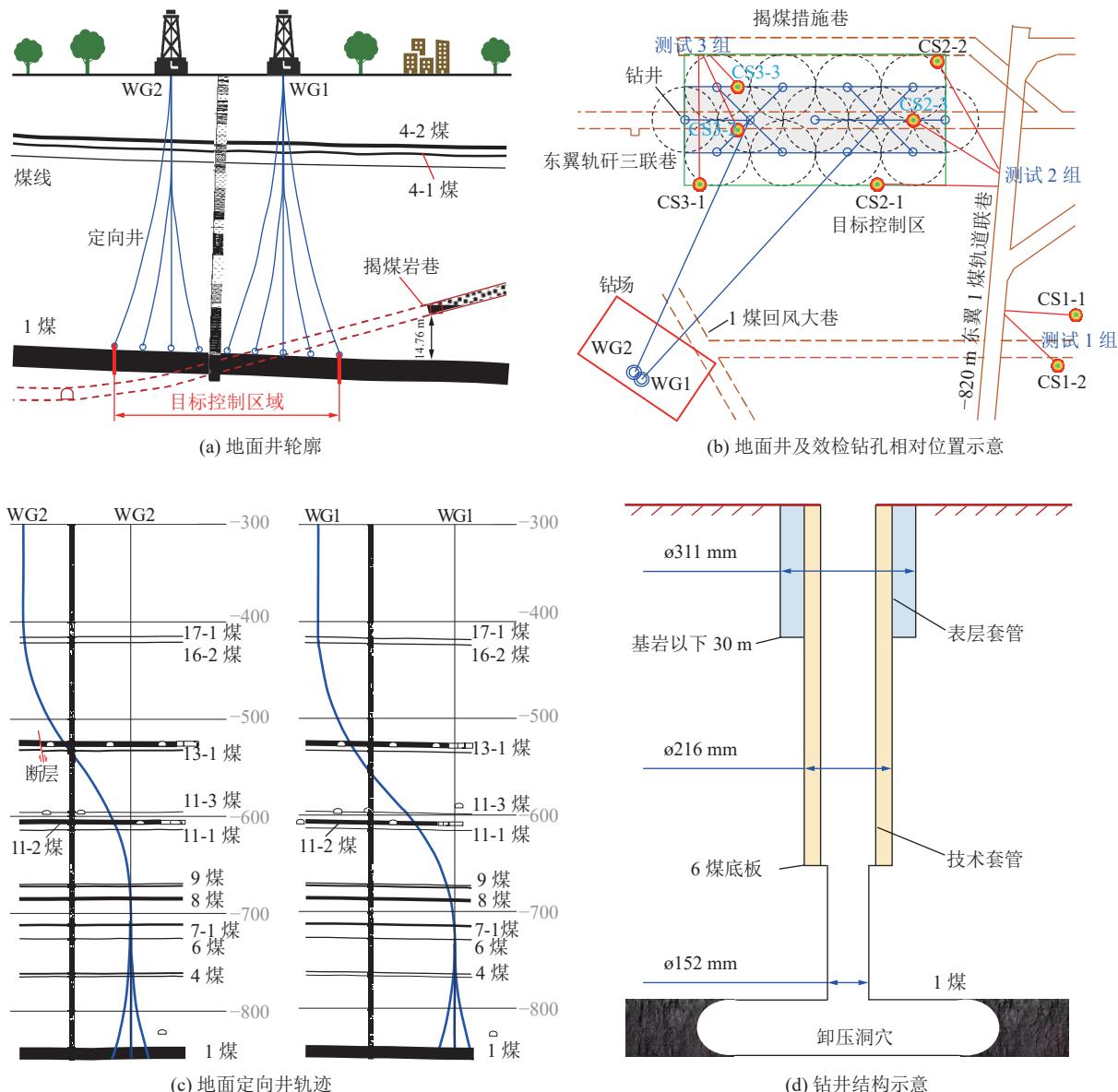


图9 钻井布置及井身结构设计  
Fig.9 Layout and structure of surface well

#### 4.3 地面丛式井造穴工艺流程

煤层段采用“机械扩孔-水力喷射-排水释压”的方法进行多级造穴, 具体流程如图10所示。首先从地表施工主井到达目标层位后, 煤层段裸眼完井, 先采用机械逐级扩孔将1号煤层段扩至 $\varnothing 500\text{ mm}$ ; 后采用高压水射流喷射技术将煤层段扩至 $\varnothing 800\sim 1\,000\text{ mm}$ ; 再采用机械逐级扩孔将煤层段扩至 $\varnothing 1\,500\text{ mm}$ 。最后采用排水释压激荡扩孔技术继续造穴, 即利用气举吹排钻孔水柱, 钻孔底部煤层孔壁失去孔内水柱压力支撑后, 在地应力与煤层自身瓦斯压力双重作用下发生垮塌, 进一步扩大了洞穴的直径。待排水释压完成后, 对该分支井进行密封, 然后重复上述流程对其他分支井进行造穴作业。在造

穴过程中, 井中的煤渣通过钻井泥浆被携带到地表, 然后通过振动筛进行分离。分离出的泥浆通过沉淀、过滤等一系列处理后进入泥浆池, 可以循环利用。

#### 4.4 试验效果分析

##### 4.4.1 分支井造穴出煤量

图11为不同分支井的出煤量以及根据出煤量计算得到的等效孔径。WG1组井的出煤量位于 $19.6\sim 20.2\text{ m}^3$ , 对应的等效洞穴直径为 $1.94\sim 1.97\text{ m}$ 。WG2组井中, WG2-1井由于施工故障原因, 出煤量仅为 $9.6\text{ m}^3$ , 对应的等效孔径为 $1.36\text{ m}$ , 其余各分支井的出煤量较为接近, 主要位于 $17.5\sim 18.1\text{ m}^3$ , 对应的等效洞穴直径为 $1.84\sim 1.87\text{ m}$ 。人工构建的卸压空间有利于煤体膨胀变形、卸压, 促进目标区域煤体

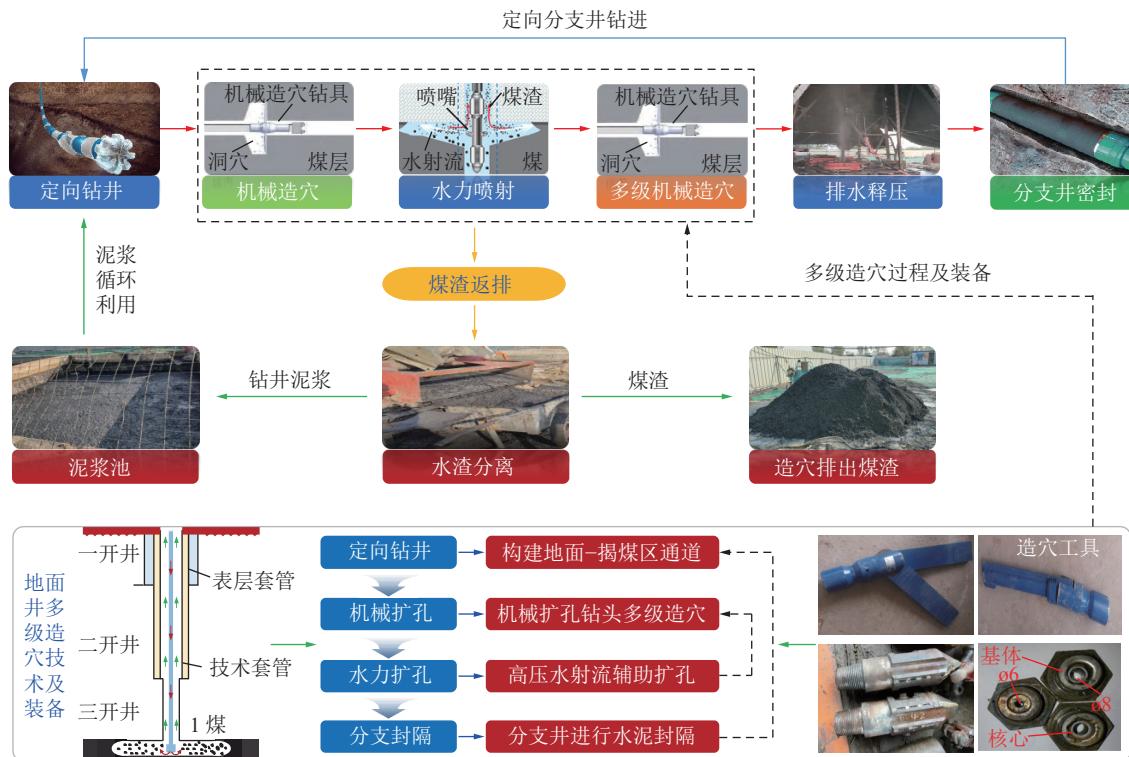


图 10 地面丛式井多级造穴流程  
Fig.10 Multi-stage caving process for surface cluster wells

裂隙网络发育,提高煤层透气性。假设在地应力作用下洞穴周围煤体能够充分变形,经过足够长的时间后洞穴完全闭合,则目标区域煤体变形率可定义为

$$\eta = \frac{\frac{1}{4}\pi h \sum_{j=1}^{13} d_j^2}{LWh} \quad (7)$$

式中:  $d_j$  为第  $j$  个洞穴的直径, m;  $L$  和  $W$  分别为揭煤控制区的长和宽, m;  $h$  为目标区煤层厚度, m。

长期的煤矿开采实践和理论研究表明,开采保护层是最有效的区域消突方法。《防治煤与瓦斯细

则》规定:若经实际考察被保护层的最大膨胀变形量大于 0.3%,则表明开采保护层效果可靠。通过地面井造穴实现煤层卸压的方法与保护层开采具有较好的相似性,因此,借鉴保护层开采的效果评价方法,计算目标区域煤体的变形率达到了 1.12%,远高于规定的 0.3% 的临界值,说明本文中通过地面井造穴辅助石门揭煤区域卸压消突的方法是可行可靠的。

#### 4.4.2 煤层残余瓦斯压力和含量

为了进一步评价地面丛式井造穴卸压降突效果,在张集矿井下-820 m 水平进行了煤层瓦斯参数测定。



图 11 WG1 和 WG2 井组造穴出煤量及理论直径  
Fig.11 Coal discharged and calculated diameter of cavities in groups WG1 and WG2

结合揭煤区域周围井巷工程及地面造穴卸压井布置,设计3组效果考察钻孔,具体布置如图9b所示。第1组测试孔布置在1号煤原始区,设计2个钻孔CS1-1、CS1-2,测定1号煤原始瓦斯压力、含量、煤层透气性系数;第2组布置在1号煤WG1造穴卸压区,布置3个钻孔CS2-1、CS2-2和CS2-3,用于测定WG1造穴卸压区煤层残余瓦斯压力、含量和透气性系数;第3组布置在1号煤WG2造穴卸压区,布置3个钻孔CS3-1、CS3-2和CS3-3,用于测定WG2造穴卸压区煤层残余瓦斯压力和含量。尽管原始参数测试点与卸压后瓦斯参数测试点不在同一个位置,但由于两侧区域的距离相距较近( $<100$  m),且煤层处于同一地质单元内,因此,测试结果总体上能够反映地面井造穴卸压辅助石门揭煤技术的应用效果。

1)瓦斯压力。采用主动测压法测试煤层瓦斯压力,结果如图12所示。 $-820$  m水平东翼轨研三联巷1号煤的原始瓦斯压力为 $2.12\sim2.35$  MPa, $-820$  m水平东翼轨研三联巷1号煤WG1造穴卸压区残余瓦斯压力 $1.32\sim1.46$  MPa,东翼1号煤顶板揭煤措施巷WG2造穴卸压区残余瓦斯压力 $1.61\sim1.70$  MPa。相比于原始瓦斯压力,WG1造穴卸压区瓦斯压力降低了37.87%,WG2造穴卸压区瓦斯压力降低了27.66%。

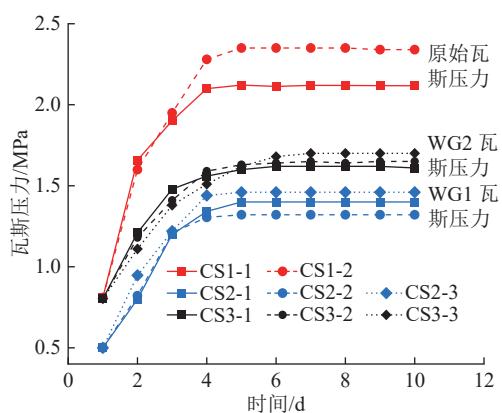


图12 煤层瓦斯压力测试结果

Fig.12 Gas pressure tested in field

2)瓦斯含量。测压钻孔在施工过程中取样根据AQ1066—2008标准测定煤层瓦斯含量。 $-820$  m水平东翼轨研三联巷1号煤原始区瓦斯含量 $7.23\text{ m}^3/\text{t}$ , $820$  m水平东翼轨研三联巷1号煤WG1造穴卸压区瓦斯含量 $5.75\text{ m}^3/\text{t}$ ,东翼1号煤顶板揭煤措施巷WG2造穴卸压区瓦斯含量 $5.61\text{ m}^3/\text{t}$ 。造穴卸压后,煤层瓦斯含量均降低到 $6\text{ m}^3/\text{t}$ 以下,相比于原始瓦斯压力,WG1造穴卸压区瓦斯含量降低了20.47%,WG2造

穴卸压区降低了22.41%。

3)煤层透气性系数。测压钻孔瓦斯压力稳定后,每组选择1个钻孔,采用径向流量法测定煤层透气性系数。CS1-2钻孔测得的1号煤原始透气性系数为 $0.108\text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ ,CS2-3钻孔测得的造穴卸压区煤层的透气性系数为 $1.077\text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ ,可见造穴卸压后,目标控制区域煤层的透气性系数提升了近10倍。

综上,地面井造穴卸压后,煤层透气性系数提高约10倍,残余瓦斯压力降低了27.66%~37.87%,残余瓦斯含量降低了20.47%~22.41%,初步验证了地面丛式井造穴卸压辅助石门揭煤技术的有效性。实施该技术后,试验地点井下揭煤措施孔数量减少了24%、钻孔工程量降低了21%。

## 5 应用前景展望

随着浅部资源的逐渐枯竭,深部煤炭开采逐渐成为新常态<sup>[28]</sup>。深部煤层普遍具有高地应力、高瓦斯压力的特点,同时煤层在高地压作用下呈现大范围塑性流变的状态,煤层突出危险性极强<sup>[29]</sup>。传统方法主要通过井下打钻消除煤层的突出危险性,进而进行石门揭煤等作业。但是,在深部强突煤层中施工预抽钻孔危险性高、效率低,严重影响煤层的采掘接替。针对这一难题,在未来的深部强突煤层石门揭煤过程中,可通过地面丛式井造穴,调控应力场,降低煤体弹性潜能;通过地面井抽采,调控渗流场,消除瓦斯内能,进一步结合地面井注浆,调控裂隙场,改善煤体提高力学强度,从而形成“弱区吸能+强区抵抗”的防突屏障。此外,对于新建突出矿井,尤其是煤层瓦斯压力高于3 MPa的高突煤层,井筒揭煤过程具有极高的突出危险性<sup>[30]</sup>。通过采用地面直井造穴预抽技术,可大幅降低井筒周围的地应力及瓦斯压力,消除煤与瓦斯突出的动力源,保障揭煤过程安全。

我国构造煤较为发育且分布范围广,涉及贵州、四川等构造变形强烈区域、安徽、河南等构造应力集中区域以及河北、山西等煤层埋深大的区域。构造煤层理结构紊乱、煤质松软破碎( $f<0.5$ ),普遍具有微孔隙(孔隙率 $<2\%$ )、低渗透(渗透率 $<0.001\times10^{-15}\text{ m}^2$ )和强吸附(吸附态瓦斯占比超90%)的特点,瓦斯抽采难度大<sup>[1]</sup>。要实现构造区煤层气资源的高效开发必须进行储层改造<sup>[31]</sup>。但是,构造煤弹性模量低、泊松比高,对碎软低渗煤储层直接进行水力压裂的效果并不理想。首先,构造煤体塑性强,直接射孔压裂

时, 形成宽而短的裂缝, 范围小区泄流面积有限; 其次, 构造煤结构破碎、力学强度低, 形成的人工裂缝易坍塌, 产生的煤粉堵塞裂缝, 降低导流能力; 最后, 由于构造煤的强塑性特征, 支撑剂极易嵌入人工裂缝壁面而导致其闭合。针对这类难题, 可通过地面水平井分段造穴卸压, 释放煤层的地应力, 促进洞穴周围煤体裂隙起裂、扩展, 大幅提升煤层的渗透率, 促进瓦斯解吸流动, 提高煤层气产能。该方法可进一步拓展, 形成基于地面井的煤气共采技术, 即通过一系列技术手段将钻孔周围的煤体采出, 形成的卸压空间促进煤层气解吸, 提高煤层气产量。但是该技术目前存在的关键难题是如何大幅提高造穴的范围。针对这一难题, 潜在的解决方案包括: 首先通过“机械+射流”破煤的方法在煤层内逐级扩孔形成2~3 m的小型洞穴; 然后采用“高压空气循环压注-放喷”的方法在煤层内构建直径5~10 m的中型洞穴; 最后, 可采取孔内爆炸破煤的方法<sup>[32]</sup>, 通过多级爆炸-排渣, 在煤系地层内构建数十米尺寸的大型洞穴, 实现难采-难抽煤层煤与瓦斯协同高效共采(图13)。

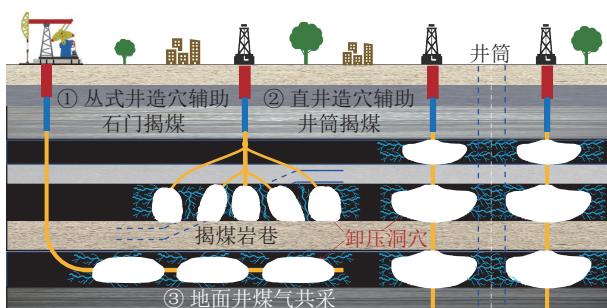


图13 地面井造穴的应用场景

Fig.13 Application scenarios for surface well caving

## 6 结 论

1) 深部强突煤层地面丛式井全覆盖造穴辅助石门揭煤技术。针对深部强突煤层井下打钻易喷孔, 危险性高、效率低的难题, 提出了“井网卸压-孔群消能-帷幕固化”多场协同调控防突方法, 开发了地面丛式井“机械-水力-释压”多级造穴辅助石门揭煤技术, 并配套研发了“造穴-排渣-水渣分离”一体化系统, 揭示了地面丛式井全覆盖造穴强化卸压增透, 辅助煤体消突机理, 为深部煤层石门揭煤消突提供关键理论、技术和装备保障。

2) 地面丛式井造穴卸压煤体物理场演化规律及关键技术参数优化。基于卸压煤体多场耦合模型, 分析了造穴卸压区煤体应力场、裂隙场及瓦斯流场

的时空分布规律, 发现: 随着洞穴的增大, 卸压区以及应力集中区的范围逐渐增加, 卸压以及应力集中程度明显升高。煤体塑性区体积与等效直径平方呈线性关系, 比值为81.90。洞穴附近沿着最小主应力方向形成低渗区, 该位置瓦斯压力随着洞穴直径的增大先降低后升高, 存在最优的洞穴尺寸使得该点的瓦斯压力最低, 此处对应的最优洞穴直径为2.0 m。此外, 揭煤巷道沿着垂直于最大主应力方向布置有利于造穴后巷道两侧煤体的消突。

3) 成功开展了石门揭煤控制区地面井全覆盖造穴辅助消突工程试验。在张集矿-820 m水平1号煤层石门揭煤区开展了地面丛式井造穴辅助消突技术工程试验, 首次实现了揭煤控制区全覆盖造穴, 取得了良好的应用效果。地面井造穴卸压后, 煤层透气性系数提高约10倍, 残余瓦斯压力和残余瓦斯含量显著降低, 初步验证了地面丛式井造穴卸压辅助石门揭煤技术的有效性。实施该技术后, 试验地点井下揭煤措施孔数量减少了24%、钻孔工程量降低了21%。

4) 开发了地面丛式井全覆盖造穴辅助强突煤层石门揭煤技术及配套装备, 提出了造穴关键技术参数优化方法。该方法可进一步应用到新建矿井井筒揭煤辅助消突的工程实践中。此外, 针对赋存条件差的难采煤层以及煤层气开发效率低的难抽煤层, 提出了“地面井煤气共采”的技术思路, 有望实现难采-难抽煤层煤与煤层气协同共采。

## 参考文献(References):

- [1] 卢义玉, 黄杉, 葛兆龙, 等. 我国煤矿水射流卸压增透技术进展与战略思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3189–3211.  
LU Yiyu, HUANG Shan, GE Zhaolong, et al. Research progress and strategic thinking of coal mine water jet technology to enhance coal permeability in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3189–3211.
- [2] 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.
- [3] 薛生, 郑晓亮, 袁亮, 等. 基于机器学习的煤与瓦斯突出预测研究进展及展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 664–694.  
XUE Sheng, ZHENG Xiaoliang, YUAN Liang, et al. A review on coal and gas outburst prediction based on machine learning[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 664–694.
- [4] 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297–322.

- WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297–322.
- [5] 王超杰, 杨胜强, 蒋承林, 等. 煤巷工作面突出预测钻孔动力现象演化机制及关联性探讨[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2327–2336.
- WANG Chaojie, YANG Shengqiang, JIANG Chenglin, et al. Mechanism of dynamic phenomena of borehole for outburst prediction and their relationship during coal roadway driving[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2327–2336.
- [6] 姜在炳, 李浩哲, 方良才, 等. 紧邻碎软煤层顶板水平井分段穿层压裂裂缝延展机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 922–931.
- JIANG Zaibing, LI Haozhe, FANG Liangcai, et al. Fracture propagation mechanism of horizontal wells adjacent to broken soft coal seam roof by staged cross-layer fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 922–931.
- [7] 王志荣, 胡凯, 杨杰, 等. 软煤储层顶板水平井穿层工况下压裂缝扩展模型[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 20–25.
- WANG Zhirong, HU Kai, YANG Jie, et al. Extension model of fracturing cracks of translayer horizontal well in roof of soft coal reservoir[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 20–25.
- [8] 陈本良, 袁亮, 薛生, 等. 淮南矿区煤层顶板分段压裂水平井抽采技术及效果研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 155–163.
- CHEM Benliang, YUAN Liang, XUE Sheng, et al. Study on technology and effect of gas extraction in horizontal well with segmental hydraulic fracture in roof of coal seam in Huainan mining area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 155–163.
- [9] 桑树勋, 皇凡生, 单衍胜, 等. 碎软低渗煤储层强化与煤层气地面开发技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 196–210.
- SANG Shuxun, HUANG Fansheng, SHAN Yansheng, et al. Technology processes of enhancement of broken soft and low permeability coal reservoir and surface development of coalbed methane [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 196–210.
- [10] WANG Z L, SANG S X, ZHOU X Z, et al. Response in coal reservoirs and in situ stress control during horizontal well coal cavern completion and stress release[J]. Gas Science and Engineering, 2023, 113: 204950.
- [11] 李瑞, 卢义玉, 葛兆龙, 等. 地面井卸压的煤层气开发新模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 75–84.
- LI Rui, LU Yiyu, GE Zhaolong, et al. A new CBM development mode: Surface well pressure relief[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(7): 75–84.
- [12] 桑树勋, 周效志, 刘世奇, 等. 应力释放构造煤煤层气开发理论与关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2531–2543.
- SANG Shuxun, ZHOU Xiaozhi, LIU Shiqi, et al. Research advances in theory and technology of the stress release applied extraction of coalbed methane from tectonically deformed coals[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2531–2543.
- [13] 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.
- [14] YANG R Y, CHEN J X, QIN X Z, et al. Stress evolution and permeability enhancement mechanism of multistage cavity completion in coalbed methane horizontal wells[J]. SPE Journal, 2023, 28(6): 2767–2789.
- [15] CHEN Y, ZHOU L, PENG Y, et al. Numerical study on the effectiveness of directional well with multiple hydraulic slots for enhanced gas recovery in deep coal seam[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9(1): 138.
- [16] 程斌, 姜在炳, 赵龙, 等. 空气动力造穴技术原理及单井掏煤量计算方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 850–858.
- CHENG Bin, JIANG Zaibing, ZHAO Long, et al. Principle of aerodynamic cave-making technology and calculation method of single well coal extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 850–858.
- [17] 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.
- [18] 岳鹏威, 王继兵, 魏晓刚. 圆形巷道围岩破坏机制解析及静动耦合响应力学行为[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(22): 9445–9452.
- YUE Pengwei, WANG Jibing, WEI Xiaogang. Analysis of failure mechanism and mechanical behavior of static and dynamic coupling response of surrounding rock of circular roadway[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(22): 9445–9452.
- [19] 范翔宇, 蒙承, 张千贵, 等. 超深地层井壁失稳理论与控制技术研究进展[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 159–176.
- FAN Xiangyu, MENG Cheng, ZHANG Qiangui, et al. Research progress in the evaluation theory and control technology of wellbore instability in ultra-deep strata[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 159–176.
- [20] 索彧, 李芬芬, 何文渊, 等. 钻井液侵入纹层状页岩的模型[J]. 工程科学学报, 2024, 46(3): 547–555.
- SUO Yu, LI Fenfen, HE Wenyan, et al. Invasion of drilling fluid into laminated shale model[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(3): 547–555.
- [21] LIU T, ZHAO Y, KONG X G, et al. Dynamics of coalbed methane emission from coal cores under various stress paths and its application in gas extraction in mining-disturbed coal seam[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 104: 104677.
- [22] CAO W Z, SHI J Q, DURUCAN S, et al. Gas-driven rapid fracture propagation under unloading conditions in coal and gas outbursts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 130: 104325.
- [23] 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.
- [24] SHU L Y, YUAN L, LI Q X, et al. Response characteristics of gas

- pressure under simultaneous static and dynamic load: Implication for coal and gas outburst mechanism[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(2): 155–171.
- [25] LIU T, LIN B Q, FU X H, et al. Modeling coupled gas flow and geomechanics process in stimulated coal seam by hydraulic flushing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142: 104769.
- [26] ZHU W C, WEI C H, LIU J, et al. Impact of gas adsorption induced coal matrix damage on the evolution of coal permeability [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(6): 1353–1366.
- [27] 刘厅, 林柏泉, 赵洋, 等. 瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 217–231.  
LIU Ting, LIN Baiquan, ZHAO Yang, et al. Precise permeability enhancement technique with hydraulic flushing for coal seams with non-uniformly distributed gas[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 217–231.
- [28] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283–1305.  
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283–1305.
- [29] 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.
- [30] 曹佐勇, 何学秋, 王恩元, 等. 新建突出煤矿“先抽后建”模式与实施路径[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 425–433.  
CAO Zuoyong, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. “First pumping and then building” mode and implementation path of newly-built outburst coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 425–433.
- [31] 巫修平, 张群. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展规律及控制机制[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(2): 268–276.  
WU Xiuping, ZHANG Qun. Research on controlling mechanism of fracture propagation of multi-stage hydraulic fracturing horizontal well in roof of broken soft and low permeability coal seam[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(2): 268–276.
- [32] 翟成, 王宇, 刘厅, 等. 不同燃爆载荷作用下页岩破裂特性及孔隙结构改性规律[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.