https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.254

鄂尔多斯盆地东缘深部煤岩气储层水力割缝应力响应规律

卢海兵[1,2],陈艳鹏[1,2],王玫珠[1,2],翟玺坤[3,4],李 瑞[3,4],金丽红[4],张 乐[3,4],阳保科[3,4],韩 兵[5]

1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083
2. 中国石油天然气集团有限公司煤岩气重点实验室,河北廊坊 065007
3. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室,重庆 400044
4. 重庆大学资源与安全学院,重庆 400044
5. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司,辽宁抚顺 113122

摘 要: 为提高深部煤岩气储层改造效果,以鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县矿区为对象,综合运用Flac3D数值模拟与理论分析方法,对深部煤岩气水力割缝下的地应力响应规律进行了研究.结果表明:水力割缝在煤岩气储层创造的卸压空间可以有效改变地应力状态,降低储层有效应力,提高储层导流能力.缝槽长度每增加1 m,卸压范围可增大4.3~4.9 m,卸压程度增大4.7%~21%.缝槽宽度每增加1 m,卸压范围增大0.3~0.7 m,卸压程度增大0.7%~1.4%.与单一缝槽相比,多组缝槽可形成应力释放叠加区,进一步增大卸压范围和增强卸压效果.优化缝槽长度与间距可显著提高煤岩气开采资源量的控制范围.煤岩气储层水力割缝具有显著的地应力改造效果,可为通过水力割缝技术高效开发煤岩气提供指导.

关键词: 水力割缝;煤岩气;地应力;割缝参数;卸压范围.

中图分类号: P618.11 **文章编号:** 1000-2383(2026)07-2567-15 **收稿日期:** 2025-09-24

Stress Response Law Induced by Hydraulic Slotting of Deep Coal Rock Gas Reservoirs in Eastern Margin of Ordos Basin

Lu Haibing[1,2], Chen Yanpeng[1,2], Wang Meizhu[1,2], Zhai Xikun[3,4], Li Rui[3,4], Jin Lihong[4], Zhang Le[3,4], Yang Baoke[3,4], Han Bing[5]

1. *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development*, *Beijing* 100083, *China*
2. *CNPC Key Laboratory of Coal-Rock Gas*, *Langfang* 065007, *China*
3. *State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*
4. *School of Resources and Safety Engineering*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*
5. *China Coal Technology and Engineering Group Shenyang Research Institute Co. Ltd.*, *Fushun* 113122, *China*

基金项目: 新型油气田国家科技重大专项(Nos.2025ZD1404206,2024ZD140604);中国石油天然气集团有限公司科技项目(No.2024DJ23).

作者简介: 卢海兵(1982-),男,硕士,高级工程师,从事非常规天然气增产改造研究.ORCID: 0009-0005-5043-1030. E-mail: luhaibing69@petrochina.com.cn

* **通讯作者:** 李瑞,E-mail:ruilicug@163.com

引用格式: 卢海兵,陈艳鹏,王玫珠,翟玺坤,李瑞,金丽红,张 乐,阳保科,韩兵,2026.鄂尔多斯盆地东缘深部煤岩气储层水力割缝应力响应规律.地球科学,51(7):2567-2581.

Citation: Lu Haibing, Chen Yanpeng, Wang Meizhu, Zhai Xikun, Li Rui, Jin Lihong, Zhang Le, Yang Baoke, Han Bing, 2026. Stress Response Law Induced by Hydraulic Slotting of Deep Coal Rock Gas Reservoirs in Eastern Margin of Ordos Basin. *Earth Science*, 51(7): 2567-2581.

Abstract: To improve the efficiency of deep coal rock gas development, this study takes the Daning-Jixian Block in the eastern margin of the Ordos Basin as the research object. Using Flac3D numerical simulation and theoretical analysis methods, the in-situ stress response under hydraulic slotting in deep coal rock gas reservoirs was investigated. The results show that the stress relief space created by hydraulic slotting in coal rock gas reservoirs can effectively alter the in-situ stress state, reduce reservoir effective stress, and enhance reservoir conductivity. For every 1 m increase in slot length, the stress relief range expands by 4.3−4.9 m, and the degree of stress relief increases by 4.7%−21%. For every 1 m increase in slot width, the stress relief range increases by 0.3−0.7 m, while the degree of stress relief decreases by 0.7%−1.4%. Compared with a single slot, multiple sets of slots can form superimposed stress release zones, further expanding the stress relief range and enhancing the stress relief effect. Optimizing slot length and spacing can significantly increase the controlled range of coal rock gas recovery resources. Hydraulic slotting in coal rock gas reservoirs has a significant effect on in-situ stress modification. This research can provide a basis for the efficient development of coal rock gas through hydraulic slotting technology.

Key words: hydraulic slotting; coal rock gas; in-situ stress; slotting parameter; stress relief range.

0 引言

我国煤层气资源储量丰富且分布广泛，然而其储层地质条件相较于美国等国家更为复杂，普遍具有低渗透率特性，导致开采难度较大，经济性面临挑战（Li *et al.*, 2024；李瑞等，2025）. 我国煤层气资源深部煤层气占比大，埋深大于1 500 m的陆地煤层气资源量约占我国陆地煤层气总资源量的71%，埋深大于2 000 m的煤层气资源量约占57%（张道勇等，2018）. 与传统煤层气相比，深部煤层气在地质特征、赋存机理及开发方式等方面均存在明显差异，近年来部分学者将这类非常规天然气称为煤岩气（李国欣等，2025）. 煤岩气开发过程中需应对高地应力、高地温及高地层压力，以及由此导致的渗透率偏低和渗透率衰减等挑战（Zhang *et al.*, 2025）. 因此，对煤岩气储层进行大范围有效改造是高效开发煤岩气的重要前提.

借鉴美国煤层气开发经验，利用排水降低储层压力的原理，借助石油天然气开采技术，我国逐步形成了地面井排水降压的中浅层煤层气开发模式. 地面井开发技术作为高效开发煤层气、防治瓦斯灾害的重要方法之一，主要开发的是未扰动煤层中的煤层气资源. 水力压裂是地面煤层气开发中应用最广泛和最普遍的增产改造技术，但在煤层气开发过程中仍存在一些问题. 水力压裂裂缝在原位地应力的作用下一般沿着最大主应力的方向扩展，导致人工裂缝周围出现增渗空白带，该区域渗透率无法得到显著改善（Wang *et al.*, 2024）. 此外，水力压裂适用于煤体结构较好的坚硬煤层的改造，在软煤层中水力压裂难以形成有效裂缝网络系统，且易发生挤胀、穿刺，改造效果不够理想（桑树勋等，2023；Huang *et al.*, 2024）. 由于煤层力学强度低，塑性较强，水力压裂改造裂隙延伸范围总体较小，形成的人工导流裂缝长度较短且裂缝形态难以控制，不容易形成体积缝网，难以形成大面积煤层气有效解吸范围（Dang *et al.*, 2024；Zhang *et al.*, 2024）. 深部煤岩气储层地应力高、有效应力大、渗透率低，水力压裂技术形成的人工导流裂缝在有效应力作用下逐渐闭合，储层渗透率将进一步下降，极大地限制储层流体压力的传递，不利于煤岩气解吸范围的扩展和煤岩气的运移和产出，从而制约煤岩气井的高产和稳产（苏现波等，2020；孔祥喜等，2022；桑树勋等，2024）. 因此，降低有效应力对储层导流能力的伤害是提高煤岩气井开发效率的关键所在.

大量实践表明，通过水力割缝、水力冲孔等对煤层进行大范围卸压（释放或转移地应力）是增加煤层渗透性，提高矿井下煤层气抽采效率的有效措施. 水射流的破煤作用可能是冲击、水楔、动压、空化等作用的一种，也可能是几种作用的协同效应（杨慧明，2018）. 张永将等（2021）运用多种模拟软件研究不同间距割缝缝槽应力、瓦斯压力双重卸压效应，最大主应力从20 MPa降低至2.49 MPa，抽采30 d后缝槽间煤体瓦斯压力降至0.1 MPa以下. 刘生龙等（2017）以白皎煤矿为例，应用水力割缝技术后发现整体揭煤时间缩短了4年，揭煤速度提高，瓦斯抽采纯量提高3.3倍. 桑树勋等（2020）基于煤矿采动区卸压增透理论，认为可通过地面井释放构造煤应力来提高煤层气储层孔隙度和渗透率，从而促进煤层气降压解吸，并进一步渗流产出. 杨睿月等（2022）提出水平井水力喷射分段造穴技术，通过水平井扩孔和诱导塌孔，实现应力释放，通过

优化喷嘴类型灵活调控洞穴尺寸和形状，实现提高渗透率进一步提高单井产量的目的．基于切割卸压提高储层渗透率原理，综合矿井下瓦斯抽采实践和地面开发煤层气开发技术方式，卢义玉等提出地面井水力割缝卸压开发煤层气方式，通过地面定向井和水力割缝技术，利用地应力的变化增加裂隙数量和张开度，促进储层压力的高效下降（卢义玉等，2021；李瑞等，2022）．以上研究表明了高压水射流割缝技术在深部煤岩气开发中具有良好的应用前景．然而，目前针对深部煤岩气储层条件下的水力割缝开发方式的研究仍不够深入，割缝卸压强化煤岩气应力响应规律及增产效果方面的研究还不够明确．

以鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县矿区为对象，综合运用Flac3D数值模拟与理论分析方法，本文对煤岩气水力割缝下的地应力响应规律进行了研究，分析缝槽长度、宽度、间距等参数对深部煤岩气储层地应力改造效果的影响．研究旨在揭示深部煤岩气储层水力割缝诱导下的应力响应规律，为提高深部煤岩气开发效率提供依据．

1　大宁-吉县矿区地质条件

鄂尔多斯盆地位于华北地区，是煤岩气开发商业化程度最高的区域．该盆地煤层气资源量达到 9.86×10^{12} m^3，约占我国煤层气总资源量的1/3．此外，该盆地煤层气总资源的72%分布在深度超过1 000 m的煤层中．煤岩气开发有利区块主要分布在鄂尔多斯盆地东缘，包括柳林、临兴、神府、延川南部、大宁-吉县等地区，如图1所示．大宁-吉县区块位于鄂尔多斯盆地东缘晋西挠褶带，南部渭北隆起带、西部天环坳陷和西缘逆冲带、北部伊盟隆起和中部伊陕斜坡带（孙斌等，2004）．矿区整体呈现为一项向西北缓倾的单斜构造，地层倾角一般介于5°～15°之间．地面构造相对复杂，单斜、背斜、挠褶、断裂构造特征比较明显，这些断裂呈南北、北东向分布在区块东部、东南部（李五忠等，2011）．煤岩气勘探区深度在900～2 000 m，主体深度超过1 000 m（聂志宏等，2018）．含煤面积约为3 259 km^2，据预测该区煤岩气资源量为 6.501×10^{11} m^3．

研究区地层由老至新依次为中奥陶统马家沟组、上石炭统本溪组、上石炭-下二叠统太原组、下

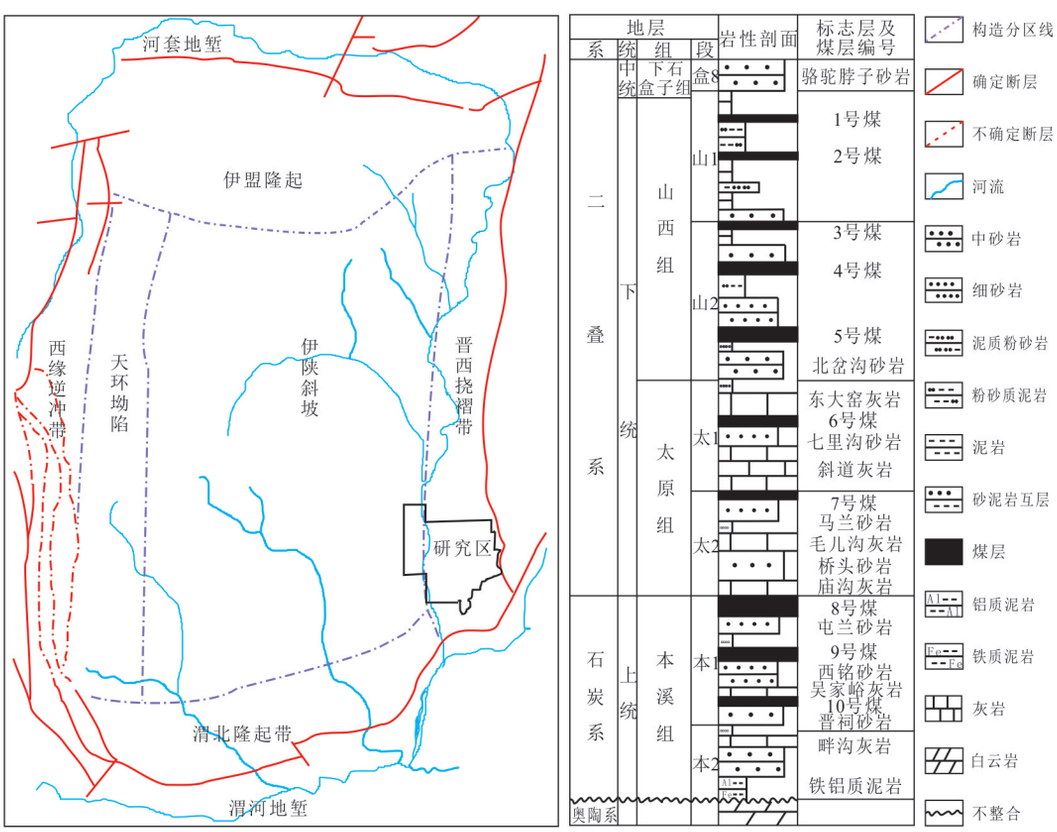

图1　区域构造纲要及区域地层简图(闫霞等，2021)

Fig.1　Regional structural outline and block location (Yan *et al.*, 2021)

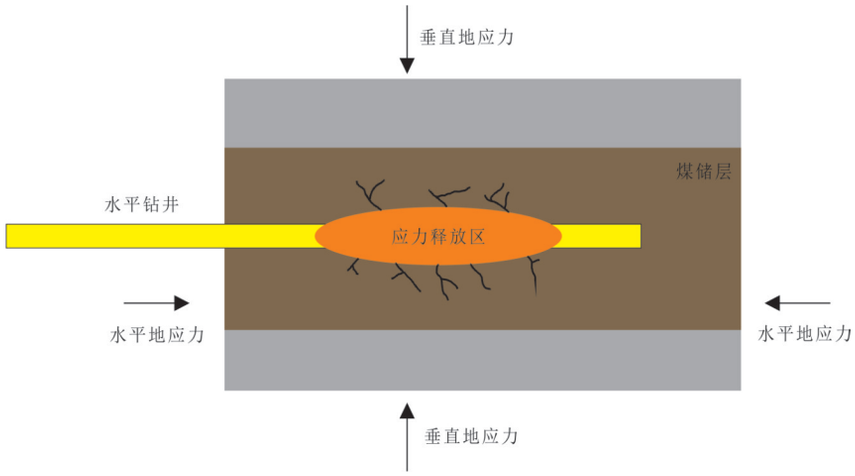

图 2　水力割缝卸压效果图

Fig.2　Pressure relief effect of hydraulic slotting

二叠统山西组(闫霞等，2021)，如图 1 所示．主要煤层为山西组 5 号煤和本溪组 8 号煤．8 号煤层位于本溪组顶部，该组发育于奥陶系灰岩风化壳之上．煤层顶板总体以灰岩为主，部分地区为泥岩和砂岩(周立宏等，2025)．5 号煤层位于山西组中下部，埋深在 800～2 000 m 之间，顶板岩性为泥岩、砂质泥岩，底板岩性为泥岩、砂质泥岩和泥质砂岩．中部煤层相对较厚，主体厚度为 10～12 m，局部厚度大于 12 m．西部煤层厚度为 6～8 m，南部煤层最薄，为 3～5 m．8 号煤层厚度为 4～12 m，孔隙度介于 0.49%～6.11% 之间．8 号煤层的渗透率为(0.001～0.271)×10^{-3} μm^2；裂隙发育情况下，渗透率可增加到(0.318～1.749)×10^{-3} μm^2．8 号煤层测试含气量介于 23.67～37.64 m^3/t 之间，含气量整体较高(王成旺等，2024)．镜质组反射率主要分布在 1.6%～2.4% 之间，处于中高煤阶，整体属于焦煤-瘦煤．与其他煤阶相比，焦煤的基质孔隙及裂缝较为发育，相对最有利于深部煤岩气的富集(牛小兵等，2023；郭晓娇等，2025)．利用测井资料分析表明，本溪组 8 号煤层的最大水平主应力方向主要为北东东-南西西向至近东西向，其值分布在 41.2～55.8 MPa 之间，最小水平主应力分布在 32.0～42.6 MPa 之间．

2　水力割缝卸压的煤岩气增产基本原理

2.1　割缝创造卸压空间，诱导岩层移动，形成裂隙系统

高压水射流割缝作业是通过具有较强穿透和冲蚀能力的高压水流，完成对煤体强烈的冲击，从而形成对煤体的切割，并造成完整煤块的破碎(梁银权等，2019)．切割形成的缝槽，半径可达 2～5 m，在煤体内部形成了扁平缝槽空间，使煤体与空气的接触面积增加，提高了煤岩气在煤层内部的运移能力．缝槽为煤体提供了变形空间，缝槽周围的煤体向缝槽流变、膨胀、变形，在缝槽周围形成了大量裂隙．同时割缝上方的煤体受到重力作用，使其整体产生向下的位移(张其智等，2011)．由于不同水平段的煤体位移程度不同，使煤体内部产生大量新生的孔隙裂隙，原生裂隙的张开度也显著增加(李瑞等，2024)．

2.2　改变地应力状态，降低有效应力对导流能力的伤害

水力割缝卸压开发煤岩气方式针对煤岩气储层进行高压水射流割缝作业，在储层中形成卸压空间后，地应力将得到释放，煤储层的应力状态如图 2 所示．

高压水射流作业通过改变地应力状态，降低了有效应力，进而增加了煤层渗透性，如式(1)所示(刘林，2010；刘永江，2015)．对储层进行卸压能够在储层内形成立体裂隙网格通道，更有利于促进煤储层的整体降压，加速吸附气的解吸和运移．水力割缝卸压的煤岩气增产原理如图 3 所示(李瑞等，2024)．

$$K = K_i e^{-3c\Delta\sigma}, \tag{1}$$

式中，K 为一定状况绝对渗透率，10^{-3} μm^2；K_i 为无应力条件下的绝对渗透率，10^{-3} μm^2；$\Delta\sigma$ 为有效应力的变化值，MPa；c 为孔隙压缩系数，MPa^{-1}．

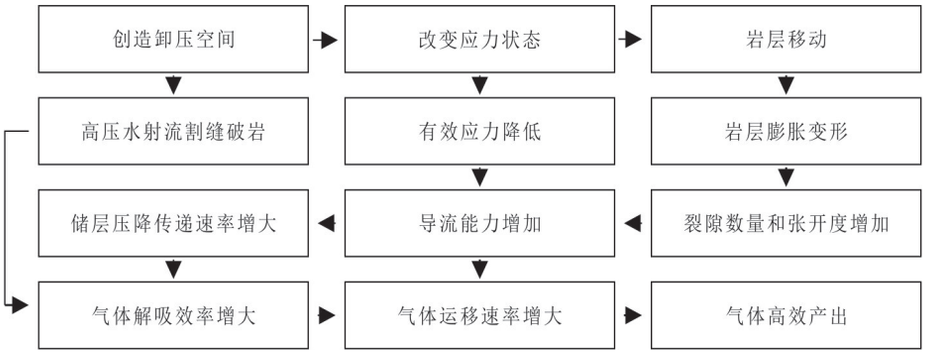

图 3　煤岩气卸压增产原理

Fig.3　Schematic diagram of pressure relief and production enhancement for CBM

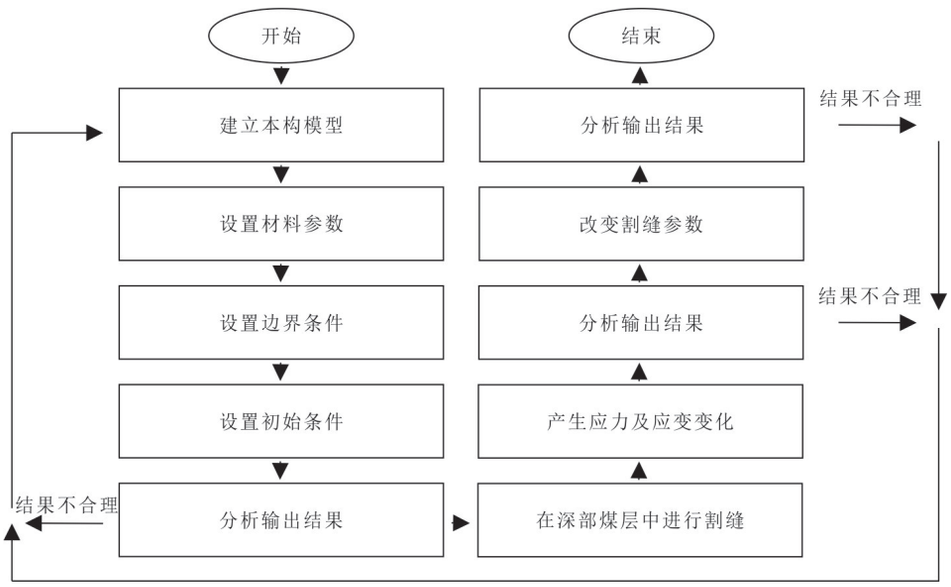

图 4　Flac3D 运行流程图

Fig.4　Flac3D simulation workflow

3　深部煤岩气储层割缝卸压后的应力响应规律

分析深部煤岩气割缝卸压下的应力响应规律对于研究水力割缝卸压下的煤岩气运移规律，揭示水力割缝改造效果具有重要意义．在水力割缝卸压改造煤岩气储层过程中，缝槽的形态、大小及间距对于地应力状态的改变具有重要影响．为此，结合大宁-吉县矿区深部煤岩气储层埋深、地应力条件及储层物理力学性质参数，开展了割缝长度、宽度、间距等不同割缝参数下的应力响应规律数值模拟研究．

3.1　模型建立及参数设置

3.1.1　模型建立　为分析深部煤岩气井水力缝槽条件下的地应力释放效果，以鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县煤岩气储层为例，采用有限差分法 Flac3D 研究不同割缝参数对于卸压效果的影响．Flac3D 分析原理图如图 4 所示．

在现场应用中，考虑到现有割缝仪器装备能达到的割缝长度，以及缝槽宽度的增加导致卸压空间增大，缝槽形态由缝向洞转变（林柏泉等，2015，2017），研究设置最大割缝长度为 8 m，最大割缝宽度为 5 m，最大割缝间距为 10 m．为了模拟深部煤层环境，同时展现完整的割缝后缝槽周围煤体的应力变化情况，建立 50 m×50 m×50 m 的三维六面体模型．该尺度大小的模型可基本消除边界效应对割缝效果产生的影响，同时完整展现缝槽周围应力场变化情况．模型底部和四周采用固定边界对位移和速度进行约束，顶部为自由边界（闫波，2019；郭亚玲，2022）．在模型 X 轴、Y 轴方向施加一定的应力来模拟煤层所受的水平应力，在模型 Z 轴方向

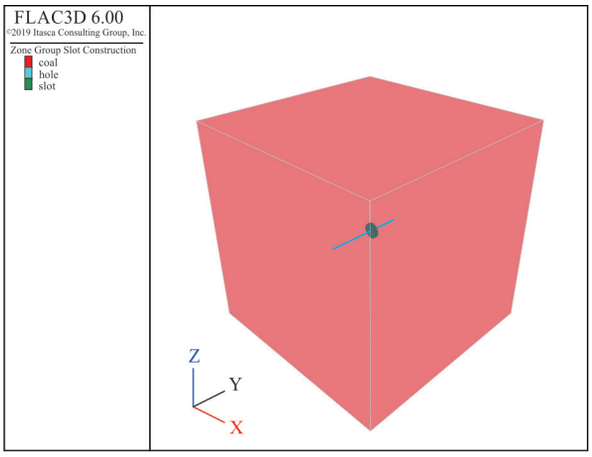

图 5　水力割缝数值模拟模型

Fig. 5　Numerical simulation model of hydraulic slotting

施加一定压力来模拟煤层所受的垂直应力．根据研究区地应力地质资料，深部煤层垂直应力、最大水平主应力、最小水平主应力分别为 51.0 MPa、43.0 MPa、37.0 MPa. 最大水平主应力沿钻孔方向（Y轴），最小水平主应力为垂直钻孔方向（X轴）. 在XZ平面中心处钻孔，垂直于钻孔方向且平行于XZ平面割缝．钻孔方向平行于Y轴，即平行于煤层的走向．割缝方向平行于X轴，即垂直于煤层的走向．最大水平主应力施加在平行于Y轴方向，最小水平主应力施加在平行于X轴方向，垂直应力施加在平行于Z轴方向．钻孔半径为 0.1 m，选定缝槽宽度、长度，形成一定尺寸的圆盘形缝槽，如图 5 所示．

3.1.2　参数设置　选取研究区深部煤岩气井测井、岩样室内测试等数据进行参数设置，建立几何模型，储层相关参数见表 1.

在实际工程应用中，煤体的力学特性及地应力条件的差异，直接影响水力割缝参数的优化选择．缝槽长度不足将限制卸压范围的扩展，导致地应力释放不充分；同时，现有的高压水射流装备和技术也对最大缝槽长度构成限制．因此，综合现场环境以及现有装备技术，设置了 2 m、4 m、6 m、8 m 四组缝槽长度参数进行对比分析．为探究通过调整缝槽宽度以扩大卸压范围的效果，设置了 0.5 m、1 m、3 m、5 m 四组缝槽宽度参数，分析不同宽度条件下煤体应力场的响应特征．缝槽间距是影响整体卸压效果的另一关键参数．缝槽间距过大时，各缝槽形成的卸压区相互独立，两缝槽间的煤体卸压程度低；缝槽间距过小时，缝槽间的应力叠加干扰过大，不仅增加工程成本，且不利于卸压范围的扩大，甚至可能诱发局部煤岩失稳．模拟过程中，设置 4 m、6 m、8 m、10 m 四组缝槽间距参数，探究相邻缝槽之间的相互作用机制及其对整体卸压效果的影响．

该物理模型采用摩尔-库伦本构模型，本构关系如式（2）、（3）所示：

$$\sigma_{ij}=(\sigma_{ij},\ e_{ij},\ Bu,\ She,\ Coh,\ Ten,\ Den,\ Fri),\tag{2}$$

$$e_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}+\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right),\tag{3}$$

式中，σ_{ij}称为应力张量，e_{ij}为应变分量，u_i、u_j为速度分量；Bu为弹性体积模量；She为弹性剪切模量；Coh为黏聚力；Ten为抗拉强度；Den表示密度；Fri为内摩擦角．x_i、x_j为一点的位置矢量分量．

应变增量可由式（4）表示：

$$\Delta e_{ij}=\frac{1}{2}(v_{i,j}+v_{i,i})\Delta t,\tag{4}$$

式中，Δe_{ij}为应变增量．

将应变增量代入本构方程即可得到应力增量，应力叠加即可计算总应力．

3.2　不同割缝参数应力响应规律模拟

选取缝槽长度、缝槽宽度和缝槽间距作为控制参数，研究缝槽周围最大水平主应力、最小水平主应力以及垂直应力的演化规律．鉴于目标煤层厚度普遍介于 8～10 m 之间，水平方向上的卸压范围与程度相比垂直方向上的卸压更具有实际价值．因此，重点分析缝槽在水平主应力方向上的卸压效果．

3.2.1　缝槽长度对卸压效果的影响　如图 6 所示，a、b、c、d 分别是长度为 2 m、4 m、6 m、8 m，宽度为 0.5 m 的过钻孔中心的XY平面上的最大水平主应力分布云图．

数值模拟结果表明，在X、Y、Z三个轴方向上均产生了卸压区．缝槽周围的卸压区关于缝槽呈对称分布．越靠近缝槽壁面，应力释放越充分，卸压程度越高；随着至缝槽距离的增加，卸压效果逐渐

表 1　Flac3D 数值模拟参数

Table 1　Flac3D numerical simulation parameters

岩性	体积模量（GPa）	剪切模量（GPa）	内聚力（MPa）	抗拉强度（MPa）	内摩擦角（°）	煤层密度（t/m^3）	煤层平均含气量（m^3/t）
煤层	6.4	1.7	5	1.9	20	1.33	26.38

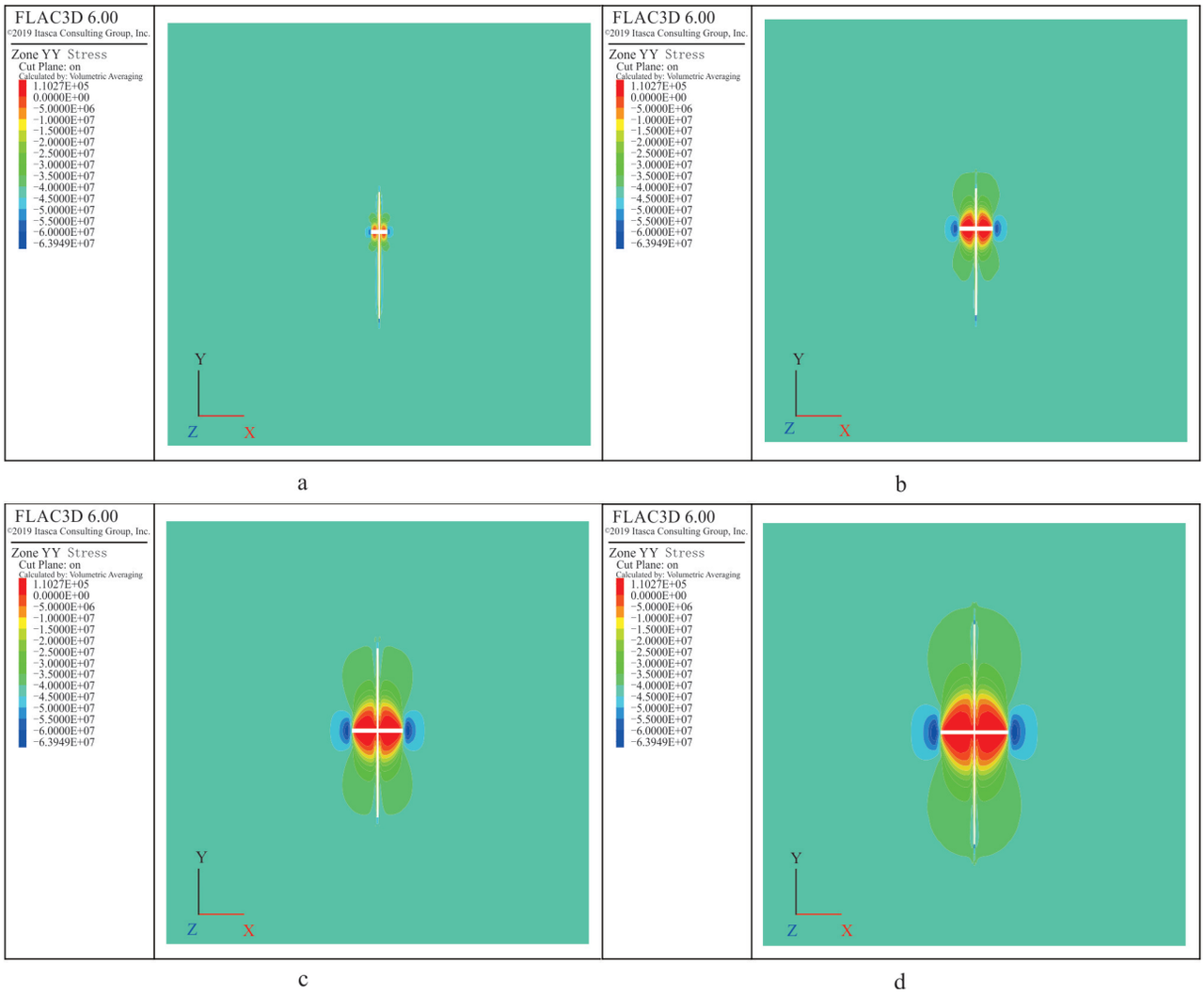

图 6　不同缝槽长度的应力变化云图

Fig.6　Stress variation nephograms under different slot lengths

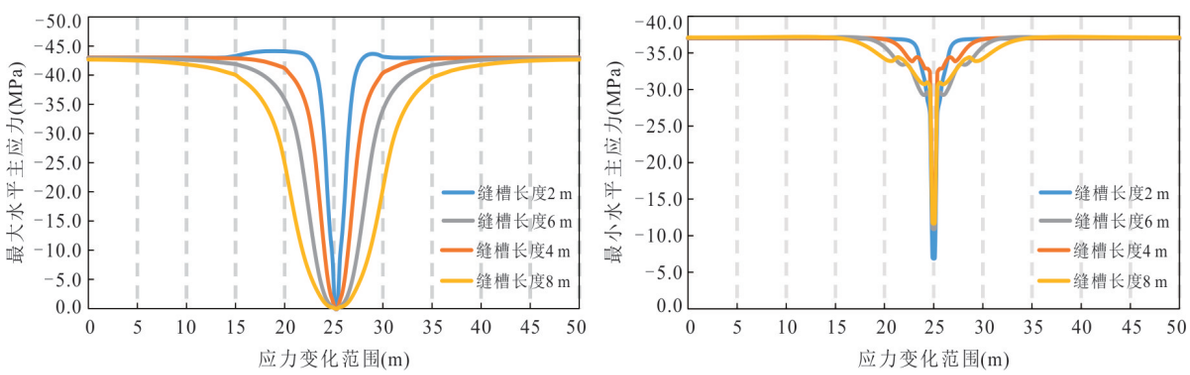

图 7　不同缝槽长度应力变化

Fig.7　Stress variation under different slot lengths

a. 最大水平主应力变化;b. 最小水平主应力变化

衰减. 应力场分布特征如图 6 所示，最大水平主应力卸压范围在 XY 平面上呈“8”字形对称分布. 对于不同长度的缝槽，缝槽在 Y 轴方向产生的卸压范围远大于缝槽自身长度.

图 7a 是长度为 2 m、4 m、6 m、8 m 的缝槽在过缝槽中心且沿 Y 轴方向的最大水平主应力变化曲

线.模拟结果表明,卸压效果随着离缝槽中心距离的增加而减弱,且随着缝槽长度的增加,在Y轴上的卸压范围和卸压程度均增大.缝槽长度每增加1 m,卸压范围可增大4.3~4.9 m,卸压程度可增大4.7%~21%.当缝槽长度为2 m时,卸压范围为4.7 m,距离缝槽边缘2 m处的最大水平主应力卸载了7.9%.当缝槽长度增至8 m时,卸压范围可达31.9 m,距离缝槽边缘2 m处的最大水平主应力卸载了93.3%.随着缝槽长度的增加,最大水平主应力在Y轴方向的卸压程度增速减缓,缝槽长度小于6 m时,缝槽长度每增加1 m,卸压程度增加21%;缝槽长度大于6 m时,缝槽长度每增加1 m,卸压程度增加4.7%.

图7b是长度为2 m、4 m、6 m、8 m的缝槽在过缝槽中心且沿X轴方向的最小水平主应力变化曲线.模拟结果表明,随着缝槽长度的增加,在X轴上的卸压范围增大,但卸压程度变化不大.缝槽长度每增加1 m,卸压范围可增大1.6~2.0 m,卸压程度可增大1%~3%.当缝槽长度为2 m时,卸压范围为3.8 m,距离缝槽边缘2 m处的最小水平主应力卸载了2.4%.当缝槽长度增至8 m时,卸压范围可达14.4 m,距离缝槽边缘2 m处的最小水平主应力卸载了13.5%.随着缝槽长度的增加,最小水平主应力在X轴方向的卸压程度先增加后减小,缝槽长度为6 m时,卸压程度达到最大值15.1%,缝槽长度大于6 m后,卸压程度有所减小.

由于煤岩气储层本质上是裂隙型储层,这些人工缝槽能够增强天然裂隙的连通性,缝槽长度越长,其所连接和激活的天然裂隙数量就越多,从而显著提升煤层的整体渗透性,并最终提高煤岩气产能.该技术通过改变煤体的原始地应力场,诱发缝槽周围煤体发生弹塑性变形与破坏.这一过程不仅使煤体中的原始裂缝开度增加,还会在垂直于缝槽方向诱导产生新的次生裂隙,进一步强化储层的渗透能力.因此,增加缝槽长度可直接扩大卸压范围并提高卸压程度,是显著改善煤层渗透性的关键参数.

3.2.2 缝槽宽度对卸压效果的影响 如图8所示,a、b、c、d分别是宽度为0.5 m、1 m、3 m、5 m,长度为4 m的过钻孔中心的XY平面上的最大水平主应力分布云图.

数值模拟结果表明,高压水射流割缝作业后,缝槽周围应力场重新分布,在X、Y、Z三个轴方向上均形成了卸压区.这源于缝槽形成过程中,其两侧煤体向卸压空间发生塑性位移与变形,致使槽周煤体应力状态改变,有效应力降低,进一步促使煤体内原生孔隙-裂隙系统扩展与贯通,并诱导产生新的次生裂隙.缝槽周围的卸压区关于缝槽呈对称分布.靠近缝槽壁面,应力释放越充分,卸压程度越高;随着至缝槽距离的增加,卸压效应逐渐减弱.如图8所示,在Y轴方向,最大水平主应力的卸压影响范围远大于缝槽自身长度.在X轴方向,缝槽左右两端均有应力集中现象,且应力集中区的范围随着缝槽宽度的增加而扩大.

图9a是宽度为0.5 m、1 m、3 m、5 m的缝槽在过缝槽中心且沿Y轴方向的最大水平主应力变化曲线.卸压效果随距缝槽中心距离的增加而减弱,且随着缝槽宽度的增加,在Y轴上的卸压程度增大,卸压范围基本不变.缝槽宽度每增加1 m,卸压范围可增大0.3~0.7 m,卸压程度增大0.7%~1.4%.当缝槽宽度为0.5 m时,卸压范围为13.6 m,距离缝槽边缘2 m处的最大水平主应力卸载了50.0%.当缝槽宽度增至5 m时,卸压范围为15.4 m,距离缝槽边缘2 m处的最大水平主应力卸载了46.5%.随缝槽宽度的增加,最大水平主应力在Y轴方向的卸压程度呈逐渐减小趋势;而卸压范围虽有所增大,但增长速率趋于减缓,表明缝槽宽度变化对最大水平主应力的卸压范围影响有限.

图9b是宽度为0.5 m、1 m、3 m、5 m的缝槽在过缝槽中心且沿X轴方向的最小水平主应力变化曲线.当缝槽宽度小于1 m时,随着缝槽宽度的增加卸压程度和卸压范围变化均不显著.当缝槽宽度大于1 m时,继续增加宽度可同时提升卸压程度与范围,缝槽宽度每增加1 m,卸压范围可增大1.5~2.0 m,卸压程度增大14.2%.当缝槽宽度为0.5 m时,卸压范围为7.2 m,距离缝槽边缘2 m处的最大水平主应力卸载了8.4%.当缝槽宽度增至5 m时,卸压范围为14.8 m,距离缝槽边缘2 m处的最大水平主应力卸载了48.4%.在缝槽宽度小于1 m时,其对卸压行为的影响较弱.当缝槽宽度大于1 m后,增大缝槽宽度可显著提高卸压程度,但对卸压范围的促进作用仍较为有限,表明缝槽宽度对最小水平主应力影响较小.

不同宽度的缝槽作为人工导流通道,其宽度增加虽可显著扩大卸压空间的体积并提升人工通道的导流能力,但煤层整体渗透性的提升主要依赖于应力释放诱导的原生裂隙与次生裂隙之间的连通性增强,而非单纯依靠缝槽自身物理空间的扩大.

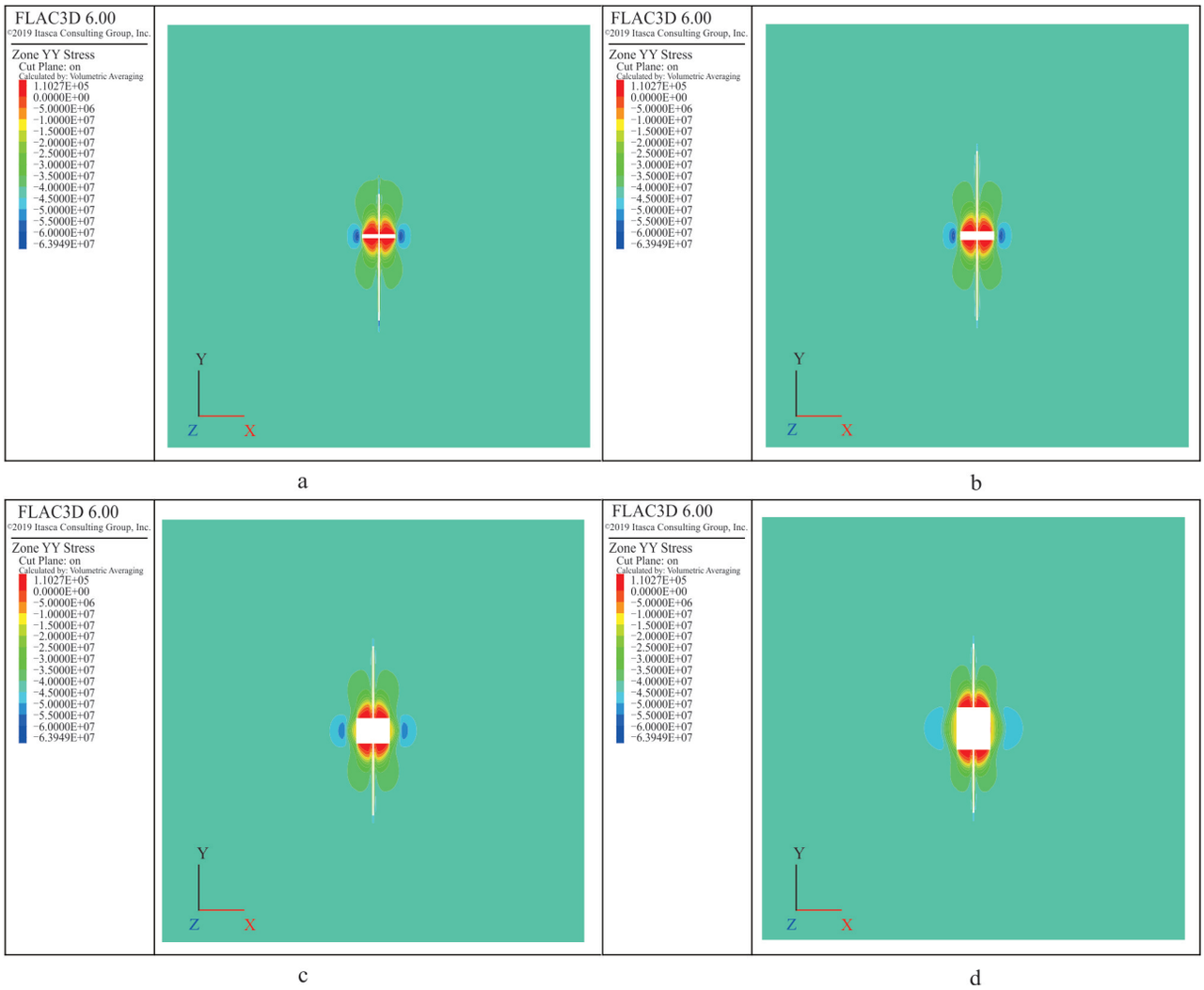

图 8　不同缝槽宽度的应力变化云图

Fig.8　Stress variation nephograms under different slot widths

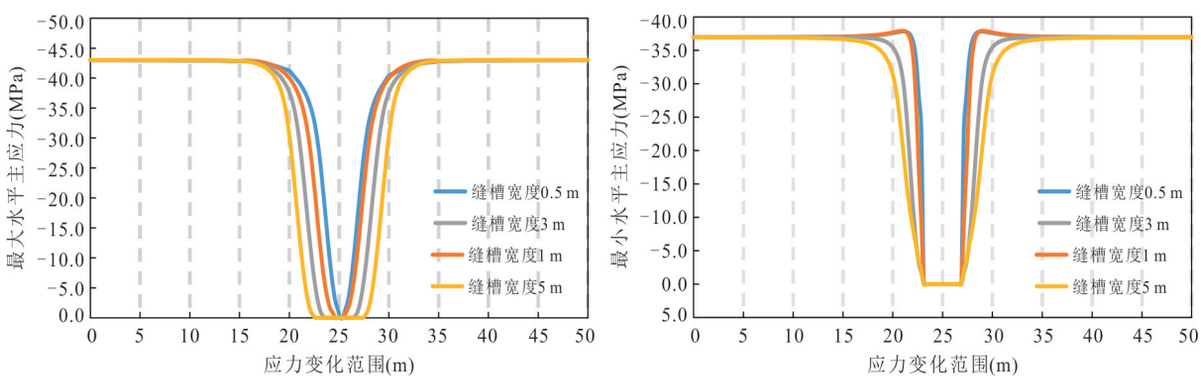

图 9　不同缝槽宽度应力变化

Fig.9　Stress variation under different slot widths

a. 最大水平主应力变化;b. 最小水平主应力变化

改变缝槽宽度对增强垂直于缝槽方向的裂隙连通性贡献较为有限. 缝槽的作用在于提供自由面，诱发周围煤体在地应力作用下发生塑性位移与变形，从而实现储层压力释放和裂隙开度增大. 在缝槽长度固定的条件下，仅增加缝槽宽度并不能有效增大自由面的面积，缝槽周围的裂隙开度并没有显著变

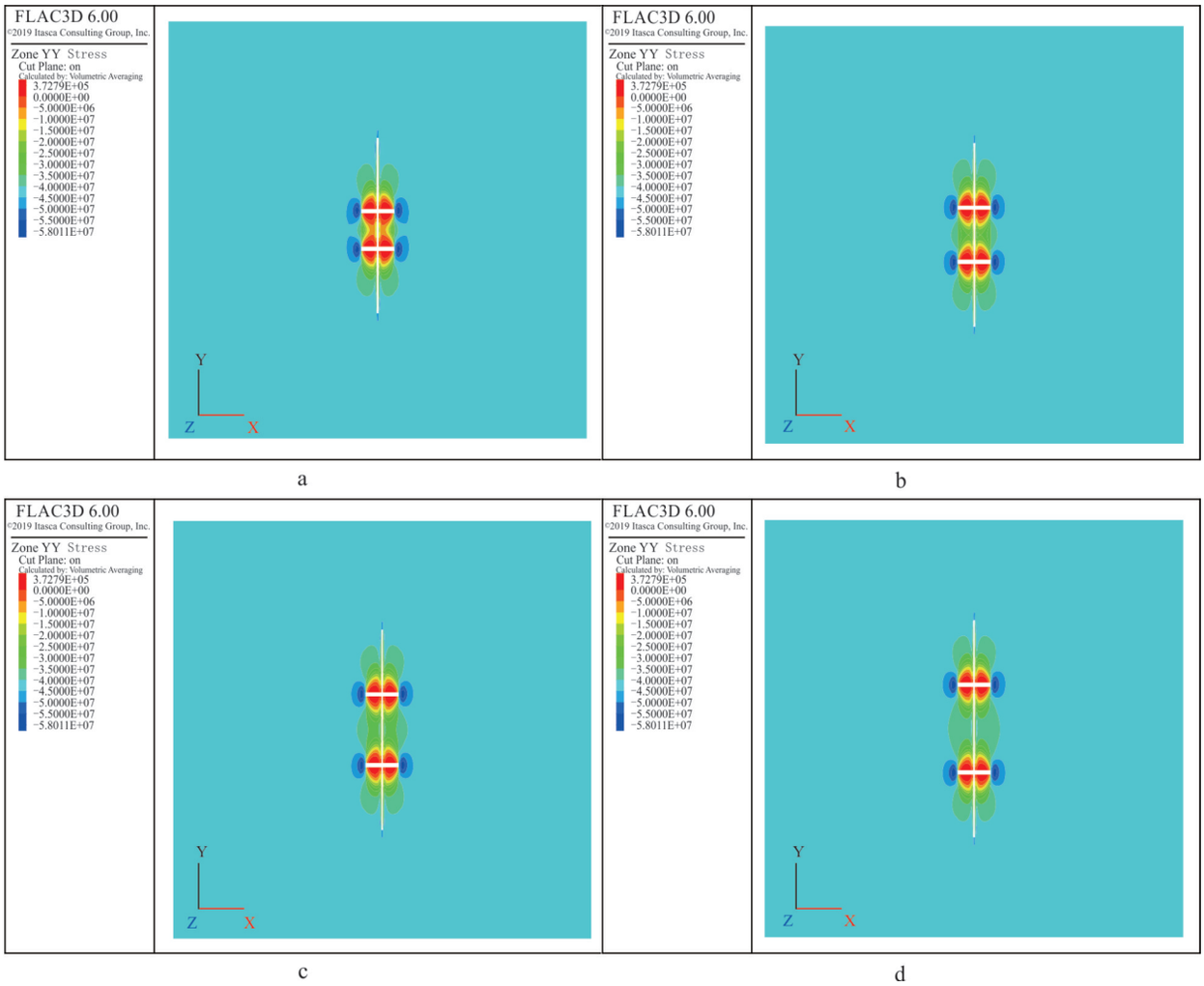

图 10　不同缝槽间距的应力变化云图

Fig.10　Stress variation nephograms under different slot spacings

化，煤层渗透性提升有限.

3.2.3　缝槽间距对卸压效果的影响及应力响应叠加效应　沿钻孔进行分段水力割缝作业时，多组缝槽所形成的卸压区可能产生相互作用，可形成应力释放的叠加效应. 为系统研究分段缝槽间距对卸压效果及应力场响应规律的作用机制，采用数值模拟方法，分析了不同缝槽间距条件下卸压区的分布特征、应力场分布规律及多缝槽间的应力叠加效应.

如图 10 所示，a、b、c、d 分别是长度为 4 m、宽度为 0.5 m 的两条缝槽间距为 4 m、6 m、8 m、10 m 的过钻孔中心的 XY 平面上的最大水平主应力分布云图.

由图 10 可知，与单一缝槽相比，多段缝槽可显著扩大卸压区范围. 随着缝槽间距增大，Y 轴方向的卸压范围长度增加，但两缝槽中部区域的卸压程度相对减弱. 随着缝槽间距减小，Y 轴方向的卸压范围长度减小，但两缝槽中部区域的卸压程度增大. 当缝槽间距为 4 m 时，两条缝槽产生的卸压区高度重叠，形成协同增强的卸压效应，该区域内应力释放最充分，卸压程度达到极大值. 当缝槽间距为 10 m 时，两缝槽卸压区重叠部分显著减少，中间区域可能出现“卸压盲区”，整体卸压效果减弱.

由此可知，通过优化缝槽间距参数，可在相邻缝槽之间形成有效的应力扰动叠加区，诱导煤体产生协同卸压效应，促使该区域内应力得到充分释放，如图 11 所示. 此外，间隔不同距离进行高压水射流割缝，可以减小煤基质单元的大小，减小煤岩气的运移路径，提高煤岩气扩散和渗流速率. 与单一缝槽相比，多组缝槽使周围煤岩裂隙逐渐扩展延伸，相互交织连接形成网格化导流通道系统，大大增加了煤层导流通道数量和连通性，强化了煤岩气的卸压效果.

图 12 展示了缝槽间距为 4 m、6 m、8 m、10 m

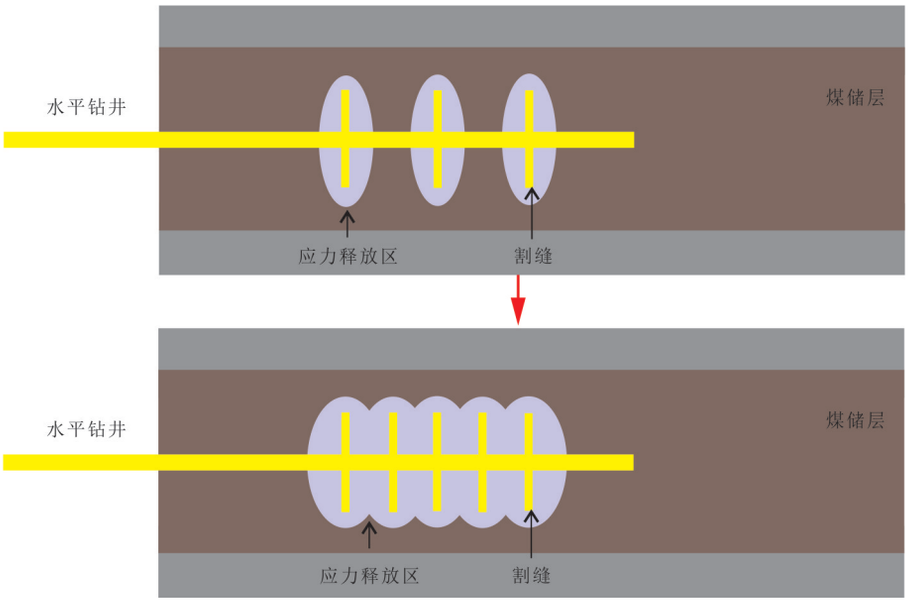

图 11　水力割缝应力叠加图

Fig.11　Stress superposition of hydraulic slotting

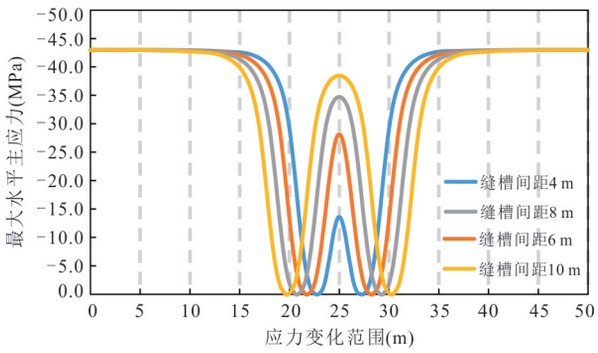

图 12　不同缝槽间距的最大水平主应力变化

Fig.12　Variation of maximum horizontal principal stress under different slot spacings

时，在过缝槽中心且沿 Y 轴方向的最大水平主应力曲线．结果表明，缝槽间距的增加显著增大了 Y 轴方向卸压区的范围．以缝槽长度为 4 m、宽度为 0.5 m、间距为 4 m 的双缝槽为例，与相同割缝参数的单缝槽相比，双缝槽形成的卸压范围比单缝槽扩大 6.8 m，双缝槽中间距缝槽 2 m 处的卸压程度比单缝槽距缝槽 2 m 处的卸压程度提升 39.7%．缝槽间距每增加 1 m，卸压范围可增大 1.0～1.2 m．当缝槽间距为 4 m 时，卸压范围为 17.4 m，当缝槽间距为 10 m 时，卸压范围为 23.8 m．随着缝槽间距的增大，两缝槽中心区域的卸压程度明显减弱．缝槽间距每增加 1 m，卸压程度减小 4.4%～16.9%，随着缝槽间距变大，卸压程度减小的速率在逐渐变小．当缝槽间距为 4 m 时，两缝槽中心最大水平主应力卸载 68.6%，当缝槽间距为 10 m 时，两缝槽中心最大水平主应力卸载 10.5%．上述现象揭示了缝槽间距对卸压效果的双重影响机制：间距增大虽可扩展卸压区的外部边界，但可能导致缝槽间煤体产生“卸压盲区”，削弱其协同增透效应．因此，在实际工程设计中，需依据煤层地质条件、增透目标及经济成本，通过数值模拟与现场试验优化确定最佳缝槽间距，以实现卸压范围与卸压强度的最优平衡．

3.2.4　不同参数缝槽控制的煤岩气资源量　基于前文对不同割缝参数诱导煤储层地应力场演化规律的系统分析，为定量表征缝槽几何参数对卸压范围内煤岩气资源量的影响，引入煤岩气资源量计算公式(5)，旨在通过理论计算，分析不同参数组合下缝槽控制范围内的煤岩气资源量．缝槽在煤层空间中造成的卸压范围近似于椭球截体．椭球体 X 轴半轴长为最小水平主应力在 X 轴方向的卸压范围，椭球体 Y 轴半轴长为最大水平主应力在 Y 轴方向的卸压范围，椭球体 Z 轴半轴长为垂直应力在 Z 轴方向的卸压范围．

$$G=\frac{\pi DCHab}{3c^2}(2c^2-h_1{}^2-h_2{}^2-h_1h_2), \qquad (5)$$

式中，G 为卸压范围内煤岩气资源量，m^3；D 为煤层的平均密度，t/m^3；C 为煤层平均含气量，m^3/t；a 为椭球体 X 轴半轴长，m；b 为椭球体 Y 轴半轴长，m；c 为椭球体 Z 轴半轴长，m；H 为椭球截体的高，m；h_1 为下方截平面的 Z 轴坐

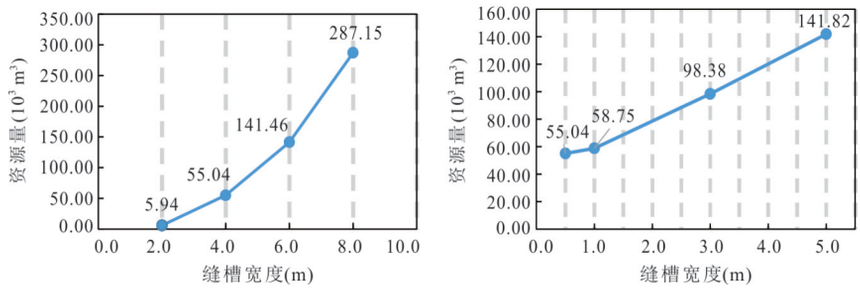

图 13　缝槽参数改变对应煤岩气资源量变化

Fig. 13　Impact of slot parameter variations on coal rock gas resources

a. 不同缝槽长度控制的煤岩气资源量;b. 不同缝槽宽度控制的煤岩气资源量

标，m;h_2为上方截平面的Z轴坐标，m.

对于不同缝槽长度，由上述公式计算可得：长度为 2 m、宽度为 0.5 m 的单条缝槽控制的区域煤岩气资源量为 5.94×10^3 m^3. 长度为 8 m、宽度为 0.5 m 的单条缝槽控制的区域煤岩气资源量为 287×10^3 m^3. 缝槽长度每增加 1 m，单条缝槽控制的区域煤岩气资源量增加(24.6～72.8)×10^3 m^3. 如图 13a 所示，单缝控制的煤岩气资源量随缝槽长度增加呈先慢后快的增长趋势.

由式(5)计算可得，长度为 4 m、宽度为 0.5 m 的单条缝槽控制的区域煤岩气资源量为 55×10^3 m^3. 长度为 4 m、宽度为 5 m 的单条缝槽控制的区域煤岩气资源量为 142×10^3 m^3. 缝槽宽度每增加 1 m，单条缝槽控制的区域煤岩气资源量增加(37.1～43.4)×10^3 m^3，如图 13b 所示. 因此，单缝控制的煤岩气资源量随缝槽宽度增加增提呈线性增长趋势. 通过优化缝槽长度与宽度可以大幅提高卸压范围内的煤岩气资源量，从而提高煤岩气井产能.

4　结论

(1)深部煤岩气井水力割缝卸压增产的基本原理是通过沿井筒进行水力割缝，创造卸压空间，改变地应力状态，提高储层卸压范围与卸压程度，降低有效应力对导流能力的伤害，促进煤岩气的运移和产出.

(2)大宁-吉县深部煤岩气储层地质条件下，缝槽长度每增加 1 m，卸压范围可增大 4.3～4.9 m，卸压程度可增大 4.7%～21%. 缝槽宽度每增加 1 m，卸压范围增大 0.3～0.7 m，卸压程度增大 0.7%～1.4%. 缝槽长度变化对缝槽周围最大水平主应力的影响比缝槽宽度变化对缝槽周围最大水平主应力的影响更大.

(3)相较于同尺寸的单组缝槽，多组缝槽可形成应力释放叠加区，增加卸压的范围和程度. 煤岩气井缝槽长度为 4 m、宽度为 0.5 m 的两条缝槽间距为 4 m 时，卸压范围为 17.4 m，缝槽中心最大水平主应力可释放 68.6%.

(4)单缝控制的煤岩气资源量随缝槽长度增加呈先慢后快的增长趋势，随缝槽宽度增加呈线性增长趋势. 通过优化缝槽长度与宽度可以大幅提高卸压范围内的煤岩气资源量，从而提高煤岩气井产能.

References

Dang, Z., Wang, X. M., Bie, S. Z., et al., 2024. Experimental Study of Water Occurrence in Coal under Different Negative Pressure Conditions: Implication for CBM Productivity during Negative Pressure Drainage. *Energy*, 303: 131989. https://doi. org/10.1016/j. energy.2024.131989

Guo, X. J., Wang, L., Yao, X. Z., et al., 2025. Geological Characteristics of Deep Coal Rock and Main Geological Factors Controlling Coalbed Methane Enrichment: A Case Study of the M Area in the Eastern Ordos Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 47(1): 17－26 (in Chinese with English abstract).

Guo Y. L., 2022. Study on Permeability Improvement Technology of High Pressure Hydraulic Slotting in High Gas and Low Permeability Coal Seam in Guizhou (Dissertation). Guizhou University, Guiyang (in Chinese with English abstract).

Huang, L. S., Li, B., Wu, B., et al., 2024. Study on the Extension Mechanism of Hydraulic Fractures in Bedding Coal. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 131: 104431. https://doi. org/10.1016/j. tafmec.2024.104431

Kong, X. X., Tang, Y. Z., Li, P., et al., 2022. Thingking

and Utilization Technology of Coalbed Methane in Soft and Low Permeability Coal Seams in Huainan Mining Area. *Coal Science and Technology*, 50(12): 26—35 (in Chinese with English abstract).

Li, G. X., Zhang, B., Zhang, J. F., et al., 2025. Major Basic Scientific Issues and Research Directions for Exploration and Development of Deep Coal-Rock Gas in China. *Acta Petrolei Sinica*, 46(6): 1025—1036 (in Chinese with English abstract).

Li, R., Jin, L. H., Xia, B. W., et al., 2024. Exploring the Principle and Method for Commingled Production of Coal-Measure Gas through Layered Pressure Relief in Surface Wells. *Coal Geology & Exploration*, 52(2): 171—179 (in Chinese with English abstract).

Li, R., Lu, Y. Y., Ge, Z. L., et al., 2022. A New CBM Development Mode: Surface Well Pressure Relief. *Natural Gas Industry*, 42(7): 75—84 (in Chinese with English abstract).

Li, R., Xiang, W. T., Xu, F. Y., et al., 2025. Value and Development Direction of Efficient Development of Coal-Measure Natural Gas in Energy Transition. *Coal Science and Technology*, 53(3): 60—72 (in Chinese with English abstract).

Li, W. Z., Chen, G., Sun, B., et al., 2011. Geological Controls of Coalbed Methane Enrichment in Daning-Jixian Area, Southeastern Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 22(2): 352—360 (in Chinese with English abstract).

Li, Y., Tang, S. H., Chen, J., et al., 2024. Geochemical Characteristics and Development Significances of Constant and Trace Elements from Coalbed Methane Co-Produced Water: A Case Study of the Shizhuangnan Block, the Southern Qinshui Basin. *Journal of Earth Science*, 35(1): 51—61. https://doi.org/10.1007/s12583-022-1628-y

Liang, Y. Q., Wang, J. S., Feng, X. Y., 2019. Permeability-Increasing Technology of Deep Drilling Super-High Pressure Hydraulic Cutting in High Gas and Low Permeability Coal Seam. *Coal Engineering*, 51(6): 99—102 (in Chinese with English abstract).

Lin, B. Q., Liu, T., Zou, Q. L., et al., 2015. Crack Propagation Modes and Energy Evolution within Slotting Disturbed Zone. *Journal of China Coal Society*, 40(4): 719—727 (in Chinese with English abstract).

Lin, B. Q., Zhao, Y., Liu, T., et al., 2017. Coupling Response Law of Multi-Field in Coal Seam after Hydraulic Slotting. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 37(5): 662—667 (in Chinese with English abstract).

Liu, L., 2010. Rational Protection Range of Lower Protective Layer and Application in Pressure-Relief Gas Extraction (Dissertation). China University of Mining and Technology, Xuzhou (in Chinese with English abstract).

Liu, S. L., Zhou, Y. Z., Qiu, J. D., et al., 2017. Application of Super-High Pressure Hydraulic Slotting Technology in Exposing Hard Outburst Seam in Crosscut for Outburst Prevention by Gas Pre-Drainage. *Mining Safety & Environmental Protection*, 44(5): 64—67 (in Chinese with English abstract).

Liu, Y. J., 2015. Study on Hydraulic Flushing in A1 Coal Seam of No.2 Mine Xinji (Dissertation). Anhui University of Science & Technology, Huainan (in Chinese with English abstract).

Lu, Y. Y., Li, R., Xian, X. F., et al., 2021. Discussion on the Efficient Exploitation Method of Deep Coalbed Methane with Pressure Relief by Ground Directional Well+Hydraulic Slotting. *Journal of China Coal Society*, 46(3): 876—884 (in Chinese with English abstract).

Nie, Z. H., Chao, H. Y., Liu, Y., et al., 2018. Development Strategy and Production Characteristics of Deep Coalbed Methane in the East Ordos Basin: Taking Daning-Jixian Block for Example. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1738—1746 (in Chinese with English abstract).

Niu, X. B., Zhao, W. B., Shi, Y. H., et al., 2023. Natural Gas Accumulation Conditions and Exploration Potential of Benxi Formation in Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(8): 1240—1257 (in Chinese with English abstract).

Sang, S. X., Han, S. J., Zhou, X. Z., et al., 2023. Deep Coalbed Methane Resource and Its Exploration and Development Prospect in East China. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 13(4): 403—415 (in Chinese with English abstract).

Sang, S. X., Huang, F. S., Shan, Y. S., et al., 2024. Technology Processes of Enhancement of Broken Soft and Low Permeability Coal Reservoir and Surface Development of Coalbed Methane. *Coal Science and Technology*, 52(1): 196—210 (in Chinese with English abstract).

Sang, S. X., Zhou, X. Z., Liu, S. Q., et al., 2020. Research Advances in Theory and Technology of the Stress Release Applied Extraction of Coalbed Methane from Tectonically Deformed Coals. *Journal of China Coal Society*, 45(7): 2531—2543 (in Chinese with English abstract).

Su, X. B., Song, J. X., Guo, H. Y., et al., 2020. Increasing Production Mechanism and Key Technology of Gas Ex-

traction in Coal Mines. *Coal Science and Technology*, 48 (12): 1－30 (in Chinese with English abstract).

Sun, B., Wang, X. H., Chen, C. H., et al., 2004. Distribution Characteristics of the Coalbed Methane at Daning-Jixian Region in E'erduosi Basin. *Natural Gas Industry*, 24(5): 17－20, 144－145 (in Chinese with English abstract).

Wang, C. W., Liu, X. W., Li, S. G., et al., 2024. Analysis of Main Controlling Factors of Deep Coalbed Methane Enrichment and Evaluation of Geological and Engineering Sweet Areas in Daning-Jixian Block. *Journal of Xi'an Shiyou University* (*Natural Science Edition*), 39 (4): 1－9 (in Chinese with English abstract).

Wang, H. Y., Yang, S. G., Zhou, D. S., et al., 2024. Influence of Non-Intersecting Cemented Natural Fractures on Hydraulic Fracture Propagation Behavior. *Journal of Structural Geology*, 181: 105111. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2024.105111

Yan, B., 2019. Study on Permeability Enhancement Technology of Hydraulic Cutting in High Gas and Low Permeability Coal Seam (Dissertation). China University of Mining and Technology, Xuzhou (in Chinese with English abstract).

Yan, X., Xu, F. Y., Nie, Z. H., et al., 2021. Microstructure Characteristics of Daji Area in East Ordos Basin and Its Control over the High Yield Dessert of CBM. *Journal of China Coal Society*, 46(8): 2426－2439 (in Chinese with English abstract).

Yang, H. M., 2018. Research Status and Development Tendency of Hydraulic Cutting Technology for Pressure Relief and Permeability Increasing of Deep Coal Seam. *Safety in Coal Mines*, 49(6): 147－151 (in Chinese with English abstract).

Yang, R. Y., Huang, Z. W., Li, G. S., et al., 2022. Investigation of Hydraulic Jet Multistage Cavity Completion in Coalbed Methane Horizontal Wells. *Journal of China Coal Society*, 47(9): 3284－3297 (in Chinese with English abstract).

Zhang, A. B., Chen, S. D., Tang, D. Z., et al., 2025. Coal Measure Gas System of the Middle Jurassic Xishanyao Formation, Southern Margin of the Junggar Basin, China. *Journal of Earth Science*, 36(5): 2138－2160. https://doi.org/10.1007/s12583-022-1755-5

Zhang, D. Y., Zhu, J., Zhao, X. L., et al., 2018. Dynamic Assessment of Coalbed Methane Resources and Availability in China. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1598－1604 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Q. Z., Lin, B. Q., Meng, F. W., et al., 2011. Research and Application on Disturbance Influence Law of Seam Slot Cutting with High Pressurized Water Jet. *Coal Science and Technology*, 39(10): 49－52, 57 (in Chinese with English abstract).

Zhang, X. Y., Hu, B. B., Li, K., et al., 2024. Investigation of Pressure Propagation in Coal Reservoirs and Formulation of the Drainage System for CBM Vertical Wells. *Geoenergy Science and Engineering*, 235: 212706. https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212706

Zhang, Y. J., Huang, Z. F., Ji, F., 2021. Prevention and Control Technology of Coal-Rock and Gas Dynamic Disaster Based on Water Jet Slotting Pressure Relief. *Coal Science and Technology*, 49(4): 133－141 (in Chinese with English abstract).

Zhou, L. H., Li, Y., Ding, R., et al., 2025. Differential Accumulation Characteristics and Production of Coalbed Methane/Coal-Rock Gas: A Case Study of the No. 8 Coal Seam of the Carboniferous Benxi Formation in the Daji Block, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(4): 772－781 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

郭晓娇，王雷，姚仙洲，等，2025. 深部煤岩地质特征及煤层气富集主控地质因素——以鄂尔多斯盆地东部M区为例. 石油实验地质，47(1): 17－26.

郭亚玲，2022. 贵州高瓦斯低透煤层高压水力割缝增透技术研究(硕士学位论文). 贵阳: 贵州大学.

孔祥喜，唐永志，李平，等，2022. 淮南矿区松软低透煤层煤层气开发利用技术与思考. 煤炭科学技术，50(12): 26－35.

李国欣，张斌，张君峰，等，2025. 中国深层煤岩气勘探开发重大基础科学问题与研究方向. 石油学报，46(6): 1025－1036.

李瑞，金丽红，夏彬伟，等，2024. 地面井分层卸压的煤系气合采原理及方式探讨. 煤田地质与勘探，52(2): 171－179.

李瑞，卢义玉，葛兆龙，等，2022. 地面井卸压的煤层气开发新模式. 天然气工业，42(7): 75－84.

李瑞，向雯婷，徐凤银，等，2025. 煤系天然气高效开发在能源转型中的价值及发展方向. 煤炭科学技术，53(3): 60－72.

李五忠，陈刚，孙斌，等，2011. 大宁-吉县地区煤层气成藏条件及富集规律. 天然气地球科学，22(2): 352－360.

梁银权，王进尚，冯星宇，2019. 高瓦斯低透气性煤层深钻孔高压水力割缝增透技术. 煤炭工程，51(6): 99－102.

林柏泉，刘厅，邹全乐，等，2015. 割缝扰动区裂纹扩展模式及能量演化规律. 煤炭学报，40(4): 719－727.

林柏泉, 赵洋, 刘厅, 等, 2017. 水力割缝煤体多场耦合响应规律研究. 西安科技大学学报, 37(5): 662－667.

刘林, 2010. 下保护层合理保护范围及在卸压瓦斯抽采中的应用(博士学位论文). 徐州: 中国矿业大学.

刘生龙, 周玉竹, 邱居德, 等, 2017. 超高压水力割缝在坚硬突出煤层石门揭煤预抽瓦斯防突措施中的应用. 矿业安全与环保, 44(5): 64－67.

刘永江, 2015. 新集二矿 A1 煤层水力冲孔技术研究(硕士学位论文). 淮南: 安徽理工大学.

卢义玉, 李瑞, 鲜学福, 等, 2021. 地面定向井＋水力割缝卸压方法高效开发深部煤层气探讨. 煤炭学报, 46(3): 876－884.

聂志宏, 巢海燕, 刘莹, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气生产特征及开发对策: 以大宁-吉县区块为例. 煤炭学报, 43(6): 1738－1746.

牛小兵, 赵伟波, 史云鹤, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地本溪组天然气成藏条件及勘探潜力. 石油学报, 44(8): 1240－1257.

桑树勋, 韩思杰, 周效志, 等, 2023. 华东地区深部煤层气资源与勘探开发前景. 油气藏评价与开发, 13(4): 403－415.

桑树勋, 皇凡生, 单衍胜, 等, 2024. 碎软低渗煤储层强化与煤层气地面开发技术进展. 煤炭科学技术, 52(1): 196－210.

桑树勋, 周效志, 刘世奇, 等, 2020. 应力释放构造煤煤层气开发理论与关键技术研究进展. 煤炭学报, 45(7): 2531－2543.

苏现波, 宋金星, 郭红玉, 等, 2020. 煤矿瓦斯抽采增产机制及关键技术. 煤炭科学技术, 48(12): 1－30.

孙斌, 王宪花, 陈彩虹, 等, 2004. 鄂尔多斯盆地大宁-吉县地区煤层气分布特征. 天然气工业, 24(5): 17－20, 144－145.

王成旺, 刘新伟, 李曙光, 等, 2024. 大宁-吉县区块深部煤层气富集主控因素分析及地质工程甜点区评价. 西安石油大学学报(自然科学版), 39(4): 1－9.

闫波, 2019. 高瓦斯低透气性煤层超高压水力割缝强化增透技术研究(博士学位论文). 徐州: 中国矿业大学.

闫霞, 徐凤银, 聂志宏, 等, 2021. 深部微构造特征及其对煤层气高产“甜点区”的控制——以鄂尔多斯盆地东缘大吉地区为例. 煤炭学报, 46(8): 2426－2439.

杨慧明, 2018. 深部低透煤层水力割缝卸压增透技术研究现状及发展趋势. 煤矿安全, 49(6): 147－151.

杨睿月, 黄中伟, 李根生, 等, 2022. 煤层气水平井水力喷射分段造穴技术探索. 煤炭学报, 47(9): 3284－3297.

张道勇, 朱杰, 赵先良, 等, 2018. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析. 煤炭学报, 43(6): 1598－1604.

张其智, 林柏泉, 孟凡伟, 等, 2011. 高压水射流割缝对煤体扰动影响规律研究及应用. 煤炭科学技术, 39(10): 49－52, 57.

张永将, 黄振飞, 季飞, 2021. 基于水力割缝卸压的煤岩与瓦斯动力灾害防控技术. 煤炭科学技术, 49(4): 133－141.

周立宏, 李勇, 丁蓉, 等, 2025. 煤层(岩)气“同生异构”控藏特征及开发实践——以鄂尔多斯盆地大吉区块石炭系本溪组 8 号煤为例. 石油勘探与开发, 52(4): 772－781.