

秦雷,林海飞,马超,等. 松软煤层水力割缝与柔性封堵气墙隅角瓦斯治理关键技术参数及应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(3):11-21. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.002

QIN L, LIN H F, MA C, et al. Key Technical Parameters and Application of Corner Gas Control in Soft Coal Seam with Hydraulic Slitting and Flexible Sealing Gas Wall [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(3):11-21. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.002

松软煤层水力割缝与柔性封堵气墙隅角 瓦斯治理关键技术参数及应用

秦雷^{1*}, 林海飞¹, 马超¹, 李树刚¹, 赵鹏翔¹, 甘路军², 杨二豪¹, 徐金国²

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 山西和顺天池能源有限责任公司, 山西 晋中 032700)

摘要: 为保证松软煤层安全开采, 以天池煤矿为背景, 通过采前预抽和高效封堵上隅角协同治理本煤层瓦斯超限. 瓦斯防治参数细化能有效改善松软煤层水力割缝增透效果差, 隅角封堵效率低等问题. 对此, 通过现场试验及数值模拟, 分析不同割缝时间、水压下瓦斯抽采量及出煤量等参数, 得出适用于松软煤层瓦斯防治技术工艺指标. 结果表明: 不同割缝水压总出煤量增幅呈下降趋势, 随着割缝水压上升, 总出煤量增幅减小趋于稳定. 水力割缝钻孔平均瓦斯抽采浓度为常规钻孔的 5.94~9.40 倍, 预抽孔初始抽采浓度大于 30%. 结合材料性能及现场实际, 设计研发快速封堵气墙并应用于现场, 封堵后上隅角最大瓦斯浓度降幅 32.93%.

关键词: 松软煤层; 水力割缝; 采前预抽; 上隅角; 瓦斯超限

中图分类号: TD712.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)03-0011-11

Key Technical Parameters and Application of Corner Gas Control in Soft Coal Seam with Hydraulic Slitting and Flexible Sealing Gas Wall

QIN Lei¹, LIN Haifei¹, MA Chao¹, LI Shugang¹,
ZHAO Pengxiang¹, GAN Lujun², YANG Erhao¹, XU Jinguo²

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shanxi Heshun Tianchi Energy Co., Ltd., Jinzhong 032700, China)

Abstract: In order to ensure the safe mining of soft coal seam, this paper takes Tianchi Coal Mine as the background, and controls the gas overrun of this coal seam through pre-extraction and high-efficiency sealing of the upper corner. The refinement of gas control parameters can effectively improve the problems of poor permeability enhancement effect and low corner sealing efficiency in soft coal seam. In view of this, through field test and numerical simulation, the parameters such as gas drainage amount and coal output under different

收稿日期: 2022-11-13

基金项目: 中国科协青年人才托举工程项目资助(2022QNRC001); 西安科技大学优秀青年科技基金资助项目(2024YQ2-03); 陕西省青年人才托举计划项目资助(20220437); 国家自然科学基金资助项目(51904237; 52074217)

* 通信作者, E-mail: qinlei@xust.edu.cn

slotting time and water pressure are analyzed, and the technological indexes suitable for gas prevention and control technology in soft coal seam are obtained. Results show that the increase of total coal output at different slotting water pressures shows a downward trend, and with the increase of slotting water pressure, the increase of total coal output decreases and tends to be stable. The average gas extraction concentration of hydraulic slotted holes is 5.94~9.4 times that of conventional holes, and the initial extraction concentration of pre-extraction holes is more than 30%. Combined with the material performance and the field practice, the rapid plugging gas wall is designed and practised in the field. After plugging, the maximum gas concentration in the upper corner is decreased by 32.93%.

Keywords: soft coal seam; hydraulic slitting; pre-extraction before mining; upper corner; gas overrun

开采前对高瓦斯煤层卸压增透,能消除突出危险性,保障采掘安全^[1-3].研究煤与瓦斯突出机理、水力割缝理论与技术,对高效抽采瓦斯有重要意义^[4-8].利用高压水射流进行孔内割缝可卸除煤岩体应力,降低瓦斯内能,扩大孔内裂隙网,提高低透气性煤层采前预抽效果^[9-13].采前预抽可有效降低煤层瓦斯浓度,但随着采煤深度不断增加,巷道破坏变形严重,工作面隅角漏风致使瓦斯超限,制约矿井安全开采^[14].对此,针对现有工作面瓦斯超限,尤其是隅角瓦斯超限,亟需一种低成本且高效的瓦斯治理方法.一方面采用水力割缝技术,提升煤体透气性,减小工作面及采空区遗煤瓦斯残存含量,降低瓦斯释放量;另一方面封堵隅角漏风,减少采空区瓦斯涌出量,避免隅角瓦斯超限^[15-18].

高亚明等^[19-21]通过水力割缝技术在石门快速揭煤中的应用,对比水力割缝钻孔与普通钻孔瓦斯抽采效果,表明水力割缝能有效缩短揭煤时间;刘东等^[22]将水力卸压技术应用于贵州新田煤矿煤巷条带瓦斯治理中,工程试验结果证明水力卸压能大幅提升煤层瓦斯抽采效率;黄勇^[23]考察并分析不同参数组合下水力割缝应用,得到松软煤层最佳水力割缝工艺参数;刘晓等^[24]建立水射流层状卸压条件下瓦斯抽采模型,结果表明,水射流层状卸压出煤率为常规冲孔出煤率的 0.29~0.71 倍;李树刚等^[25]构建瓦斯流动活跃区的空间、力学模型,研究工作面上隅角瓦斯活跃区形成机理,并结合 FLUENT 数值模拟,优化埋管抽采布置参数;邹炜^[26]为消除腾晖煤矿 2-104 工作面上隅角瓦斯安全隐患,采用气动风机解决上隅角瓦斯聚集;LI 等^[27]利用 comsol 模拟软件得出仅采用埋管抽采难以防治上隅角瓦斯超限,采用联合排污法能将上隅角瓦斯浓度控制在 0.6% 以下;DUAN 等^[28]通过关键层控制理论及数值模拟,得出利用高位长钻孔,上隅角最大瓦斯浓度低至 0.46%.诸多前人学者以抽采为主,如何短时间内高效封堵,保证上隅角安全抽采仍需进行深入研究.

综上,为解决天池煤矿瓦斯隐患,提出煤层水力割缝增透,同时为防止增透后采空区瓦斯逸散过快,设计柔性快速封堵气墙,为防治高瓦斯工作面上隅角瓦斯超限、降低封堵成本提供了保障.但天池煤体质地较软,割缝成孔效果较差,因此作者团队通过分析水力割缝主控因素,考察不同割缝参数下的出煤量及瓦斯抽采量,确定最优割缝参数;根据实际工作面推进前后的巷道参数,设计研发隅角封堵气墙应用于现场.

1 试验煤层概况

山西天池煤矿 601 工作面位于六采区,可采 15[#]煤层井下标高:1 518~1 655 m,对应地面标高:1 090~1 150 m,走向长度 1 465 m,倾向长度 206.5 m,平均煤厚 4 m,坚固性系数 0.38,最大瓦斯放散初速度 36.5 mL/s,最大瓦斯压力 0.88 MPa.煤层倾角 1°~17°,平均 7°,工作面相对瓦斯涌出量 7.8 m³/t,煤层透气性系数为 0.87 m²/(MPa²·d).601 工作面综合地质柱状图如图 1.

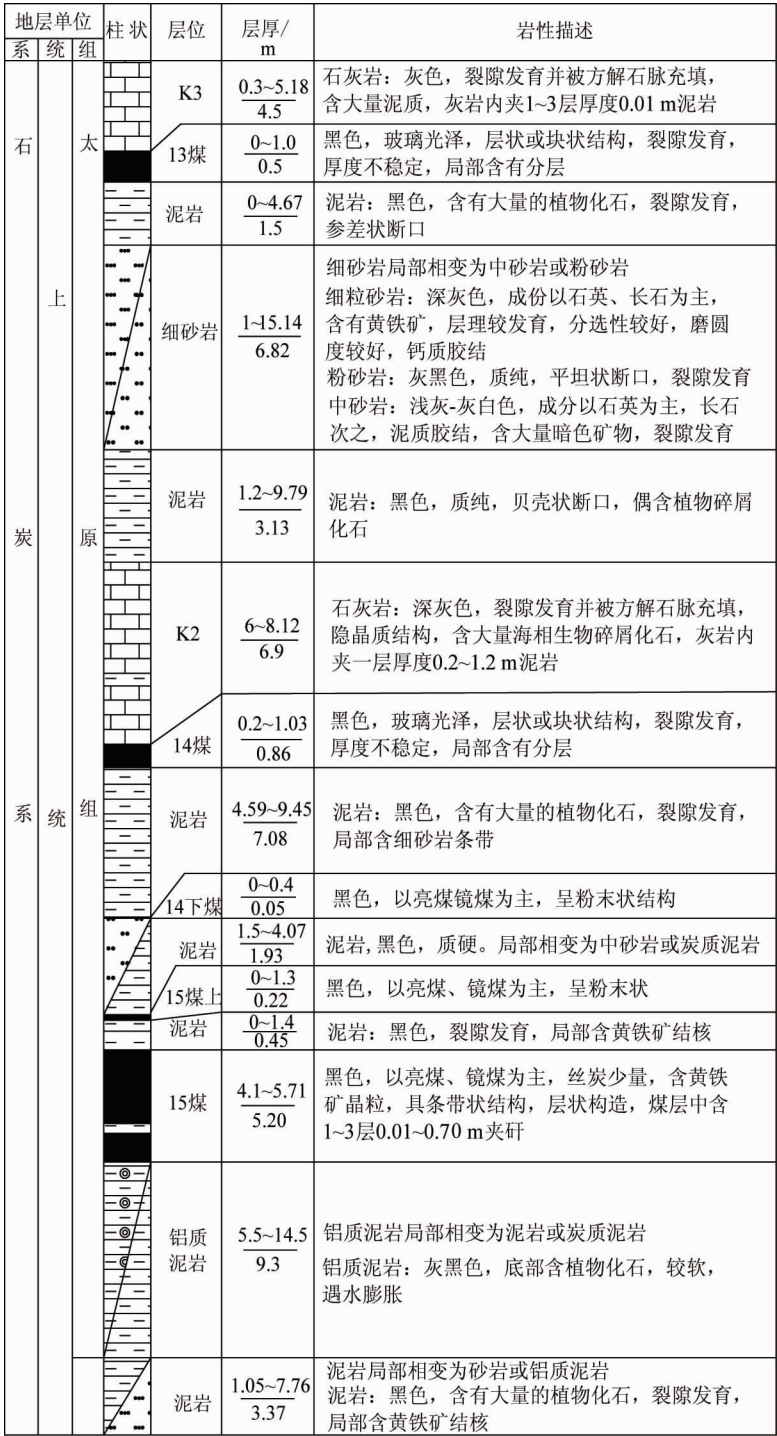


图 1 601 工作面综合地质柱状图

2 煤层水力割缝关键参数研究

选取 601 工作面进风巷距巷道口 885 m(原顺层钻孔 365[#])处向外为水力割缝钻孔试验段.在原有顺层钻孔之间上方 0.4 m 处重新施工钻孔,钻头直径 94 mm,钻杆直径 75 mm;钻孔长度 100 m,倾角 5°左右,设计间距 2 m.试验段共施工钻孔 10 个,如图 2 所示.

根据矿井煤层地质条件,设置 30 m 保护煤柱距离,相邻钻孔间距 3 m,采用平行割缝布置.设定

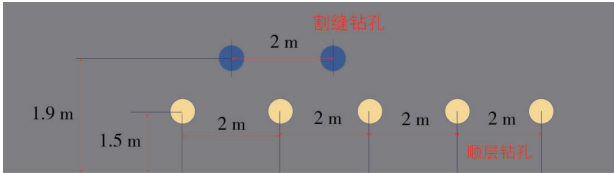


图 2 水力割缝钻孔布置参数

割缝水压 P , 从钻孔深度 30 m 处向孔内每隔一定距离 H 进行往复水力切割钻孔, 割缝时间 T , 从而在钻孔内形成一组圆柱体空洞, 增加煤体卸压范围, 提高煤层渗透率. 水力割缝施工参数设置: 割缝水压 10 MPa; 割缝时间 5 min; 割缝间距 3 m, 见表 1.

表 1 往复式割缝造穴施工参数设计

割缝水压/MPa	割缝时间/min	割缝间距/m	保护煤柱宽度/m	钻孔间距/m	割缝布置方式
10	5	10	30	3	平行式

2.1 最佳射流器孔径

高压水射流器喷嘴孔径越小, 水射流压力越大. 根据煤层坚固性系数对应不同孔径以获得最佳增透效果. 本试验选择孔径分别为 2.0, 2.5, 3.0 mm, 以堵孔频率及出煤量为指标, 获得最佳割缝射流孔径.

固定割缝水压 10 MPa, 每 10 个割缝钻孔更换一次喷嘴孔径, 统计射流孔堵孔次数及出煤量如图 3. 射流孔径 2 mm 时, 堵孔次数达 6 次, 而 3 mm 时仅 1 次. 结果表明, 射流孔径 3 mm 时, 割缝不易发生堵塞, 割缝时间较短, 无需退钻疏通钻孔. 射流孔径为 2.0, 2.5, 3.0 mm 时, 每刀出煤量分别为 1 780, 1 520, 1 380 kg. 随射流孔径增加, 出煤量逐渐减小. 综合出煤量、钻孔堵塞频率及割缝效率等相关参数, 最终确定最佳割缝射流孔径为 3 mm.

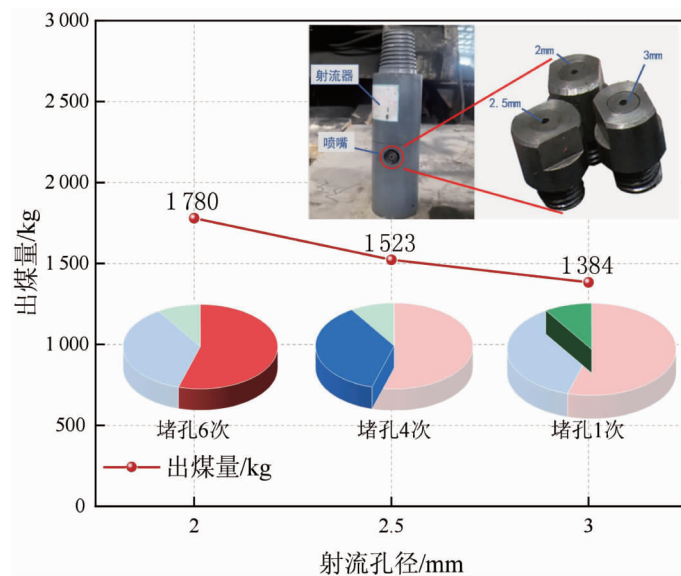


图 3 不同射流孔径的堵孔次数及出煤量

2.2 最佳割缝时间

图 4 分别为不同割缝水压下各时段的出煤量, (a ~ e 分别为 10, 13, 16, 19, 22 MPa). 割缝初期效果最佳, 出煤量在 0~2 min 时段最多, 分别为 300, 305, 378, 339, 270 kg; 随着割缝持续作业, 割缝孔径逐渐增大, 水射流压力不变, 割缝效果逐渐减弱; 2~10 min 呈下降趋势, 这是由于钻孔周围煤体卸压变形, 高压射流水冲击及浸润, 导致煤体强度减小; 6~8 min 阶段小幅增长, 是因为随割缝进行, 煤体瓦斯卸压且裂隙逐渐发育, 吸附态瓦斯迅速转化为游离态, 孔内瓦斯积聚, 压力升高产生喷孔, 出煤量陡然增大; 割煤时间进一步增加, 钻孔内自由空间不断增大, 水射流冲击力随着射流半径增大而减弱, 对煤体破坏能力逐渐衰减, 后续时段出煤量呈减小趋势; 在 18~20 min 时各割缝压力下出煤量分别降低至 7, 14, 37, 31, 80 kg.

水压累计出煤量均随割缝时间增加而增加, 水压越高, 累计出煤量越多. 随着割缝水压增加, 增长率减小时段逐渐后移. 因此, 确定 10 MPa 下的最佳割煤时间为 16~17 min, 13, 16, 19 MPa 下最佳割煤时间为 17~18 min, 22 MPa 下最佳时间为 19~20 min.

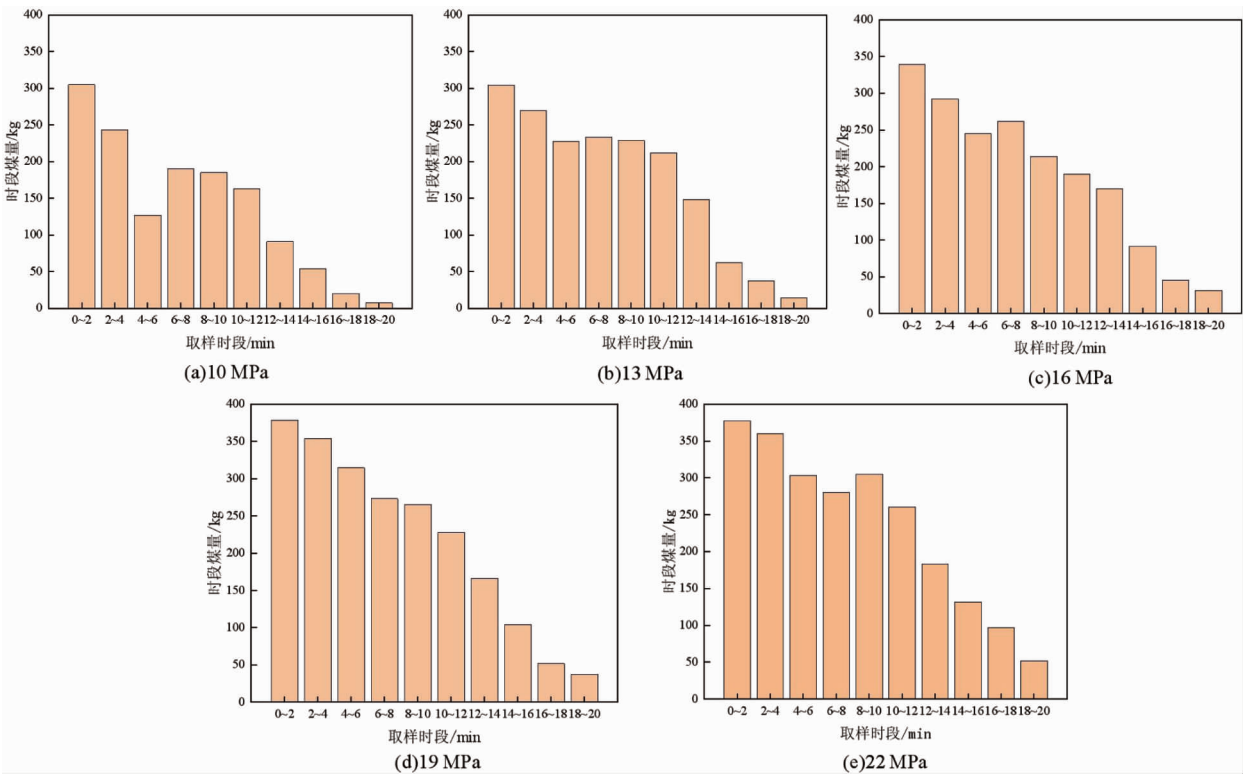


图 4 不同割缝水压下不同时段出煤量

2.3 最佳割缝水压

现场收集割压分别为 10,13,16,19,22 MPa 下割缝孔排出煤体,割缝时间 20 min,图 5 所示为不同割缝水压与出煤关系。

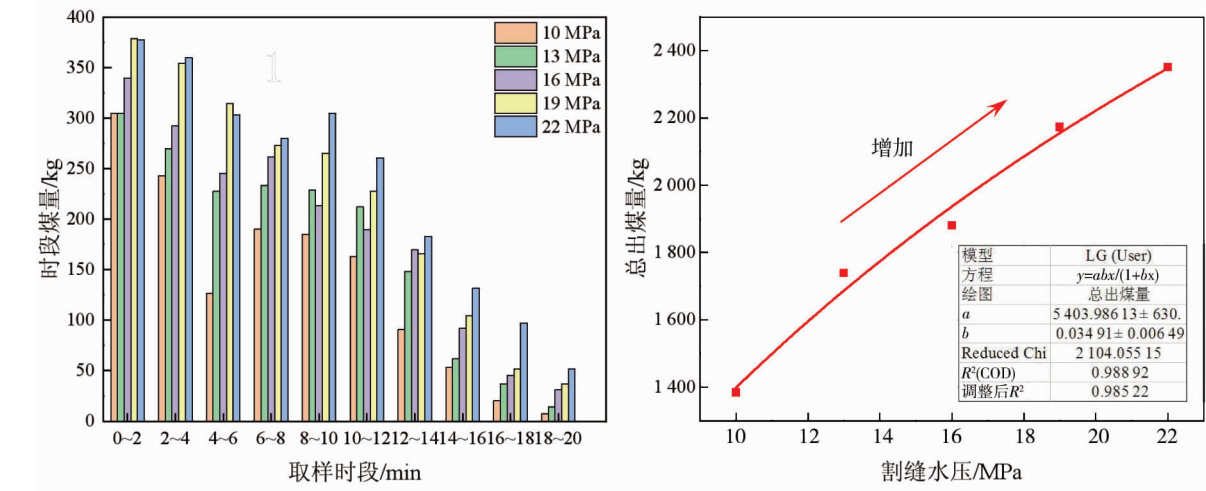


图 5 不同水压下出煤量

由图 5 可知,随着水压增加,不同时段出煤量总体呈增大趋势.10 MPa 下每个时段平均出煤量 138.41 kg,总出煤量为 1 384.11 kg.13 MPa 下每个时段平均出煤量 173.8 kg,总出煤量为 1 738.04 kg,相比 10 MPa 增幅 25.57%.16 MPa 下每个时段平均出煤量 188.02 kg,总出煤量为 1 880.17 kg,相比 13 MPa 增幅 8.17%.19 MPa 分别为 217.21,2 172.11 kg,相比 16 MPa 下增幅 15.53%.22 MPa 下为 235.04,2 350.37 kg,相比 19 MPa 增幅 8.2%.随着割缝水压增加,总出煤量增幅逐渐减小并趋近于稳定.增幅小于 10%时,认为总出煤量到达极限,确定最佳割缝水压为 19~22 MPa.

3 新型柔性快速封堵气墙研发

水力割缝等采前预抽措施能有效预防工作面瓦斯超限,但随着工作面持续推进,隅角封堵不及时,上下隅角漏风导致采空区瓦斯逸散,且隅角处风阻较大易产生涡流,导致瓦斯盘旋积聚.以往大多以煤垛、风帘等方式降低风阻,但投入物力、人力成本较高,且挪移不便.因此,根据本煤层隅角治理问题研发新型柔性快速封堵气墙,结合本煤层水力割缝瓦斯预抽共同保证安全高效开采.

3.1 采空区流场模拟

利用 ANSYS Workbench 中的 FLUENT 模块模拟 601 工作面采空区流场,分析对隅角封堵前后,工作面及采空区瓦斯浓度变化.

3.1.1 模型建立及网格划分

根据 601 工作面的实际情况和模拟的需要,将 601 工作面采空区做简单化处理:

1) 模型仅考虑工作面、进风巷、回风巷对采空区瓦斯运移的影响,不考虑其他因素影响.

2) 根据工作面实际情况,将模型的几何尺寸简化:采空区走向长度 300 m,宽度 200 m,垂直高度 80 m,工作面采高取 4 m,宽度取 8 m,运输顺槽进风巷、轨道顺槽回风巷长度均为 20 m,巷道截面积为 $4 \times 4 = 16 \text{ m}^2$.

采用 ANSYS 软件中自带的 Mesh 模块对上述物理模型进行网格划分,工作面与进、回风巷网格均设定为 0.4 m,采空区网格间距 4 m.图 6 为根据工作面模型示意图.

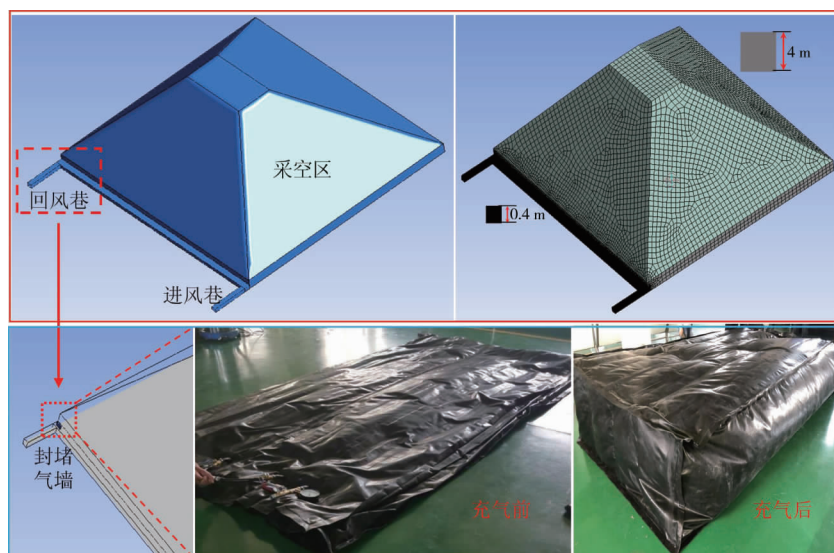


图 6 601 工作面模型

3.1.2 边界条件的设定

- 1) 采空区、巷道流相均设置为流体;
- 2) 工作面被视作自由流动区域;
- 3) 单元格区域条件的设置中只对采空区进行设置,依靠 UDF 程序代码对其惯性阻力系数、空隙率、进行消耗速率进行编译设置;
- 4) 工作面、巷道、采空区均设置为多孔介质区域;
- 5) 采空区瓦斯源相为 $2.685 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$;
- 6) 进口设置为速度入口 (velocity-inlet), 风速大小设为 3 m/s;
- 7) 出口设置为自然出流 (outflow).

3.1.3 瓦斯运移规律模拟结果

由图 7 可知:工作面瓦斯浓度从进风侧到回风侧逐渐增大,即上隅角和回风巷道为高浓度区域.从下隅角直到采空区深部瓦斯浓度也逐渐升高,越靠近回风侧瓦斯浓度就越大.出现这种情况主要原因是工作面漏风,漏风程度越大,采空区瓦斯就易跟随漏风流进入工作面.进风侧主要是煤壁、落煤,产生瓦斯较为

稳定但释放量不大,因此在图上的浓度显示较小;而回风侧除了工作面外,采空区瓦斯经由漏风被带入回风流中,瓦斯浓度较高.图8所示分别为截取距离底板1,2,4 m 高度处瓦斯分布及风流流向.

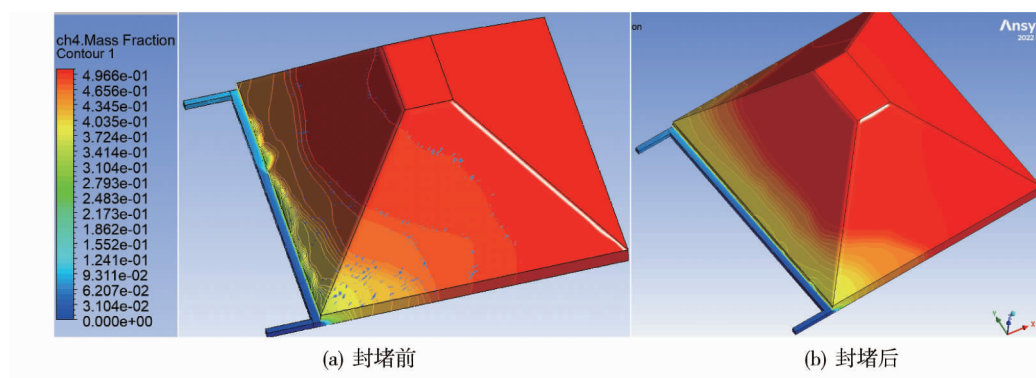


图7 封堵前后工作面及采空区瓦斯分布

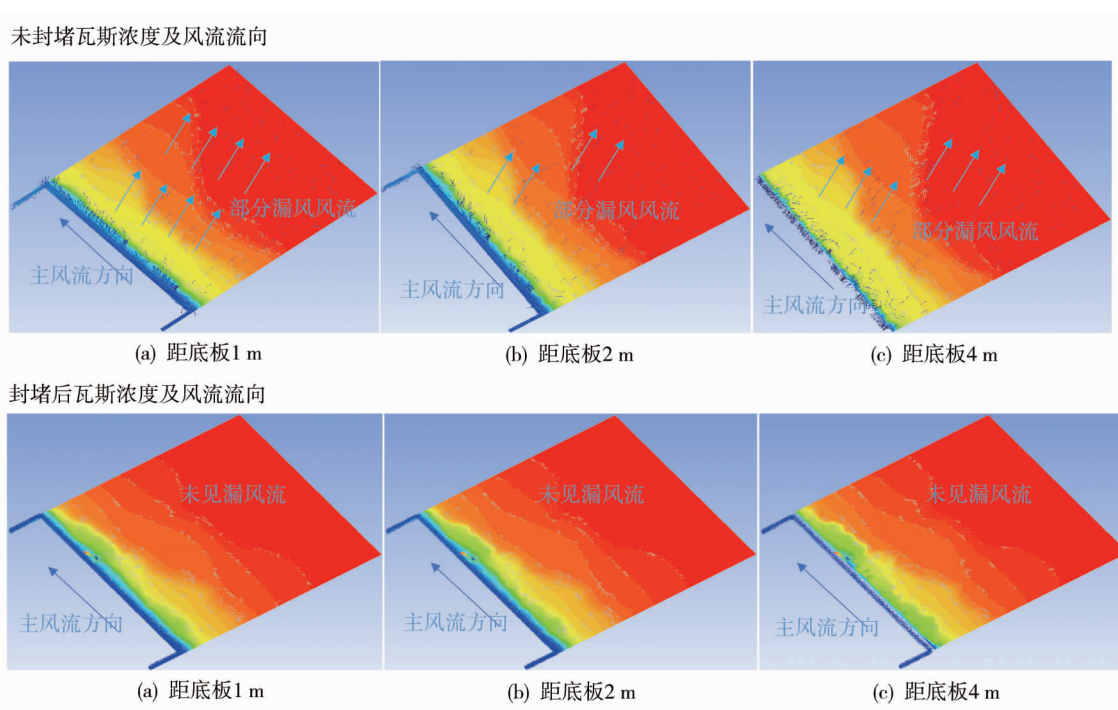


图8 不同高度工作面及采空区瓦斯分布及风流流向

对比不同高度下工作面及采空区瓦斯浓度分布可得,封堵前风流有向采空区逸散的可能,且上隅角处瓦斯浓度偏高,封堵后上隅角瓦斯浓度明显降低,且距底板越高效果越明显.说明高效的封堵措施在减少漏风同时能有效降低隅角处风阻,降低风流在角落形成涡流的可能性,保证工作面安全开采.

3.2 设计方案

结合模拟结果和现场实际,作者团队设计研发新型柔性快速封堵气墙.

3.2.1 隅角形状特征

通过现场观测,可得601工作面上下隅角由煤壁、顶板、底板、液压支架一侧四部分构成,如图9.隅角整体呈现长方体,顶板为泥岩构成,形状相对平整;底板主要由遗煤构成,具有较多形状不规则煤块;液压支架一侧较平整;煤壁一侧形状特征较为复杂,存在煤块凸起、凹陷、及锚杆头及锚网等不规则形状结构.此外,在上隅角煤壁一侧,还铺设设有3~4路 $\varphi 160$ mm的隅角插管抽采管路.综合分析,隅角高度3.6~4.5 m,宽度1.5~2.5 m.

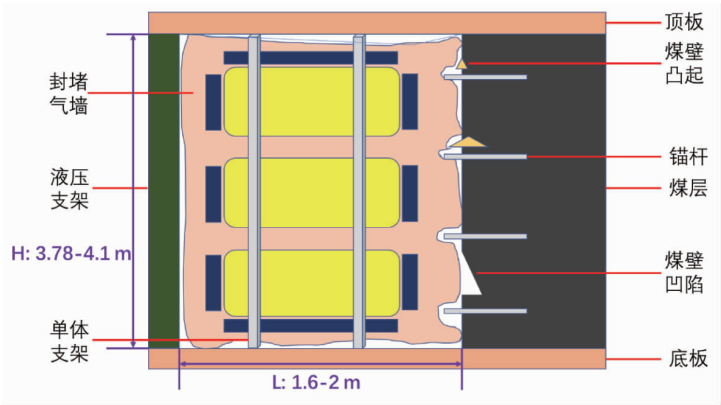


图 9 隅角尺寸

3.2.2 设计性能依靠指标

- 1) 阻燃性:采空区遗煤氧化有自燃风险,隅角封堵气墙的组成材料要求具有阻燃性.
- 2) 抗压、冲击能力:采空区隅角为采动应力集中区,所以移架过程中顶板变形及垮落会愈加严重,所以气墙在受到一定压力或快速冲击力时,要求具有一定抗压和防冲击能力.
- 3) 变形可塑性:为更好实现隅角封堵,气墙外侧应具有变形可塑性,适应不规则结构.
- 4) 防穿刺性:在煤壁一侧及底板,存在岩石颗粒及锚杆等尖锐物体,气墙在使用时防止被刺穿破坏内胆.具体性能指标如表 2 所示.

表 2 设计依据及初步测试结果

项目	指标	结果	试验方法
硬度/(邵尔 A)	65±5	62	GB/T 5.1.1-2008
拉伸强度/MPa	≥7	9	GB/T 528-2009
拉断伸长率/%	≥280	383	GB/T 528-2009
脆性温度/℃	≤-25	-45 无破坏	GB/T 528-2008
阻燃性(有焰燃烧时间/s)	≤6	2	GB/T 529-2008
体积电阻/Ω	≤3.0×10 ⁸	9.0×10 ⁴	GB/T1682-2014
气密性		不漏气	GB/T 13488-1992

3.2.3 内部气囊单元结构组成

气墙内部气囊单元剖面图 10a 所示,由气囊内胆、保护海绵、气囊外壳、缓冲胶板、充气阀以及限压阀几部分组成.气囊外壳选用煤矿用塑料涤纶风筒布缝合制作.内胆选用橡胶气囊内模,外壳与内胆之间增加一层 50 mm 厚发泡硅胶层.外壳外部附加一层防穿刺缓冲橡胶板,材质选用 TPU 热塑性聚氨酯弹性体.充气阀单向流动,气囊达到最大充气压力(30 kPa)自动开启卸压.防穿刺海绵块如图 10b 所示,外壳由高分子量聚乙烯纤维布包裹.中密度海绵可填充不规则区域,提升封堵能力.

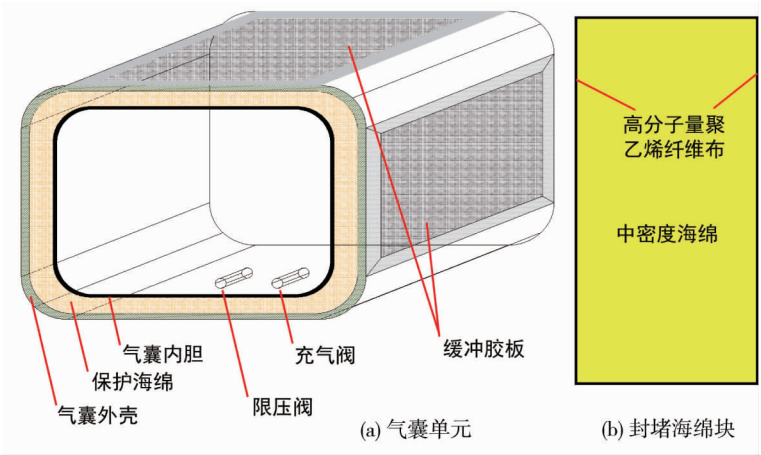


图 10 内部气囊单元组成结构

3.3 隅角封堵气墙整体结构

隅角快速封堵气墙由主体和控制箱两部分组成,如图 11.其中控制箱内置 4 道气路,每道气路上方装有压力表来监测内部气压(图 11a),下方装有安全阀,保证气压过大时安全泄压.4 道气路前部配有气路阀门,共用一个充气接口;后部通过软管与气墙的气囊单元相连(图 11b~图 11c).气墙主体表面安装有胶装手柄,便于气墙挪移(图 11e).四周接缝处设置有吊环便于固定(图 11d).



图 11 隅角封堵气墙整体结构及组成部分

4 不同措施下瓦斯防治效果

4.1 煤层水力割缝钻孔

4.1.1 单孔浓度对比

钻孔施工完成后监测钻孔内瓦斯浓度,割缝钻孔 S1[#]和普通钻孔 S2[#]瓦斯抽采浓度如图 12 所示.

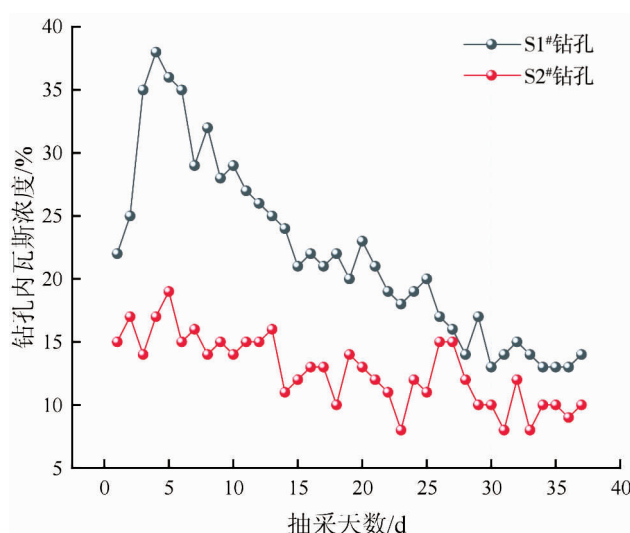


图 12 水力割缝钻孔与普通钻孔瓦斯浓度对比

2 种钻孔长度均 60 m 左右.S1[#]瓦斯浓度在抽采初期线性增加,峰值浓度达 35% 以上;抽采 5~30 d 逐步衰减;30 d 后,浓度趋于稳定,保持在 15%.S2[#]前 30 d 中缓慢降低,最终浓度维持在 10% 左右.割缝后钻孔初始抽采浓度较低,是由于割缝过程中煤体侵入大量水分,导致瓦斯封堵在孔隙中,无法快速释放.在抽采与地应力共同作用下,水分从孔隙中向煤层底部渗流,瓦斯解析后逐步达到最大值.钻孔抽采进入稳定期后,割缝钻孔瓦斯浓度保持在 15% 左右,为未割缝钻孔 1.5 倍.

4.1.2 单孔流量对比

割缝钻孔 S1[#]和未割缝钻孔 S2[#]瓦斯混合流量对比如图 13a 所示.S1[#]与 S2[#]混合流量变化规律基本相同.两孔距离较近,采用相同封孔工艺,钻孔负压基本一致.不考虑钻孔漏气情况下,钻孔流量主要受到抽采负压的影响较大.割缝后钻孔混合流量相较普通钻孔提升 1.2~7.4 倍,平均提升 2.9 倍.

计算割缝钻孔与普通钻孔瓦斯抽采纯量如图 13b 所示.在相同抽采时间 30 d 里,S1[#]钻孔流量范围为 0.015~0.277 m³/min,平均流量 0.104 m³/min;S2[#]钻孔流量范围 0.02~0.088 m³/min,平均流量 0.026 3 m³/min.水力割缝钻孔平均瓦斯抽采纯量则为普通钻孔 3.95 倍.

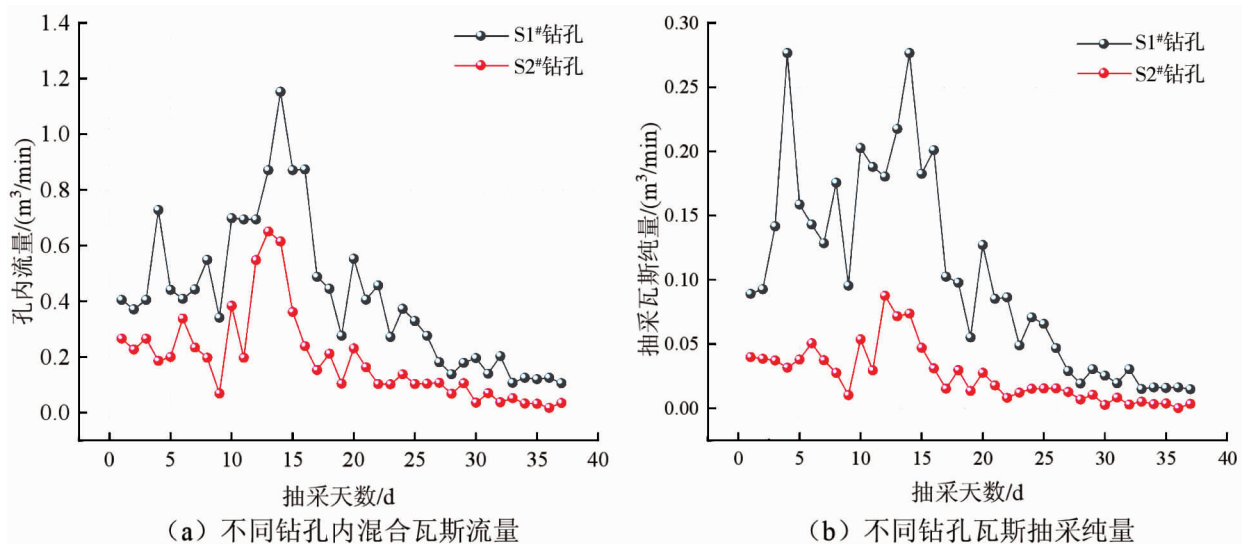


图 13 水力割缝钻孔与普通钻孔混合流量对比

4.2 新型柔性快速封堵气墙

在 601 工作面上隅角开展上隅角柔性气墙封堵试验.采用快速封堵气墙现场应用情况如图 14a 所示.对比分析上隅角采用煤垛封堵与气墙封堵的上隅角瓦斯控制效果,如图 14b 所示.

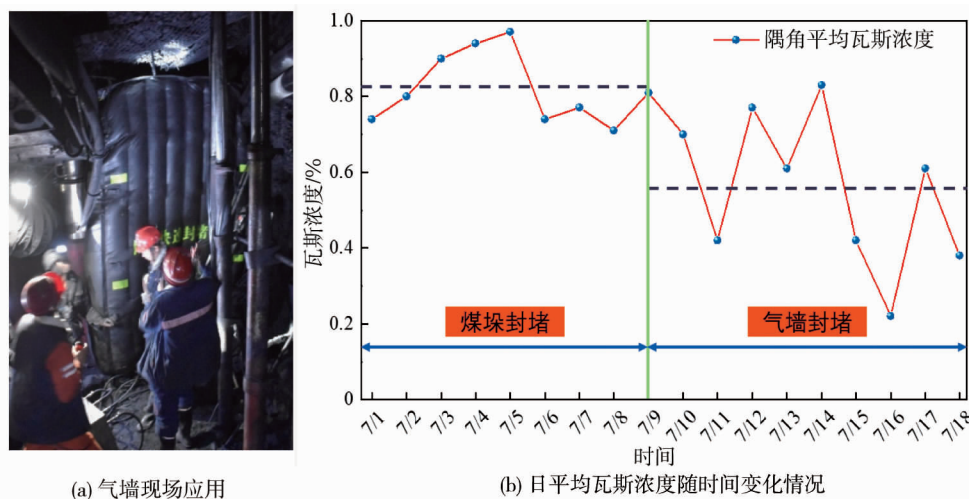


图 14 气墙应用前后平均瓦斯浓度变化

如图 14 所示,1—9 日上隅角采用传统煤垛封堵,每日平均瓦斯浓度为 0.71%~0.97%.10 日后采用柔性气墙,每日平均瓦斯浓度在 0.22%~0.83% 间.上隅角瓦斯浓度显著降低,但瓦斯浓度浮动范围增大,说明封堵效果受到现场工人操作和煤壁平整程度影响.采用传统煤垛 9 日内隅角平均瓦斯浓度为 0.82%,采用快速封堵气墙时平均瓦斯浓度为 0.55%,浓度同比降低 0.27%,降幅达 32.93%,说明采用隅角快速封堵气墙可明显改善隅角瓦斯积聚.

5 结论

1) 通过数值模拟和现场观测结果表明,水力割缝促使煤体卸压,提升钻孔瓦斯抽采效果,隅角封堵气墙封堵漏风,防止瓦斯超限.二者协同作用下,保证安全生产.

2) 分析得出隅角快速封堵气墙设计参数及煤层水力割缝参数.最佳射流器孔径 3 mm,最佳割缝水压为 22 MPa.不同割缝水压下,得到最佳割缝效果时间不同.10 MPa 最佳割煤时间为 16~17 min,13,16,19 MPa最佳割缝时间为 17~18 min,22 MPa 最佳割缝时间为 19~20 min.

3) 该技术应用现场后,隅角平均瓦斯浓度最大降幅 32.93%,水力割缝钻孔平均瓦斯抽采浓度较常规钻孔提高了 5.94~9.4 倍,预抽钻孔初始抽采浓度不低于 30%,保障工作面安全开采.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 袁亮, 林柏泉, 杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 45-49.
- [3] LU W Y, HE C C. Numerical simulation of the fracture propagation of linear collaborative directional hydraulic fracturing controlled by pre-slotted guide and fracturing boreholes[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 235: 107128.
- [4] 苏现波, 宋金星, 郭红玉, 等. 煤矿瓦斯抽采增产机制及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 1-30.
- [5] 王恩元, 汪皓, 刘晓斐, 等. 水力冲孔孔洞周围煤体地应力和瓦斯时空演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 39-45.
- [6] 林柏泉, 赵洋, 刘厅, 等. 水力割缝煤体多场耦合响应规律研究[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(5): 662-667.
- [7] 贾奇锋, 倪小明, 赵永超, 等. 不同煤体结构煤的水力压裂裂缝延伸规律[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2): 51-57.
- [8] HU Q T, LIU L, LI Q G, et al. Experimental investigation on crack competitive extension during hydraulic fracturing in coal measures strata[J]. Fuel, 2020, 265: 117003.
- [9] 曹鑫林. 水力化技术防治煤与瓦斯突出研究现状及展望[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 60-66.
- [10] 雷毅, 武文宾, 陈久福. 松软煤层井下水力压裂增透技术及应用[J]. 煤矿开采, 2015, 20(1): 105-107.
- [11] 马耕, 陶云奇. 煤矿井下水力扰动抽采瓦斯技术体系[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 29-38.
- [12] 谭东升, 张世杰, 燕林. 松软煤层穿层钻孔水力冲孔与水力割缝卸压增透效果研究[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(5): 162-163, 169.
- [13] LI Z H, WANG E Y, OU J C, et al. Hazard evaluation of coal and gas outbursts in a coal-mine roadway based on logistic regression model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 80: 185-195.
- [14] 郝世俊, 段会军, 莫海涛, 等. 大直径高位定向长钻孔瓦斯抽采技术及实践[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(6): 243-248.
- [15] 崔聪. 回采面上隅角瓦斯超限防治方法探讨[J]. 中国煤炭, 2022, 48(4): 48-53.
- [16] 郭建行. 易自燃煤层上隅角瓦斯抽采方法的选取[J]. 煤矿安全, 2018, 49(6): 160-163.
- [17] 赵坤. 1905S 工作面上隅角瓦斯综合治理技术研究及应用[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(2): 106-108.
- [18] 尚磊磊. 长壁工作面 Y 型通风护巷充填墙体合理设计[J]. 煤矿安全, 2021, 52(4): 118-124.
- [19] 喻晓峰. 水力割缝技术在揭穿松软突出煤层中的应用[J]. 煤炭工程, 2013, 45(10): 69-71.
- [20] 吴教银. 水力割缝增透技术在石门揭煤中的应用[J]. 煤矿开采, 2017, 22(2): 93-95.
- [21] 高亚明, 杨文, 张连军. 高压水力割缝在快速石门揭煤中的应用研究[J]. 中州煤炭, 2016(6): 33-35.
- [22] 刘东, 刘文. 水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 136-141.
- [23] 黄勇. 余吾煤矿松软煤层水力割缝参数优化研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(2): 61-65.
- [24] 刘晓, 李勇, 宣德全, 等. 软煤夹层水射流层状卸压增透抽采瓦斯数值模拟及试验[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 54-61.
- [25] 李树刚, 乌日宁, 赵鹏翔, 等. 综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 207-213.
- [26] 邹炜. 腾晖煤矿风机治理上隅角瓦斯技术研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(6): 95-97.
- [27] LI Z, WANG F T, REN S, et al. Gas distribution mechanism in goaf during combined drainage of upper corner buried pipeline and intubation for thick coal seams[J]. Lithosphere, 2021, 2021(Special 4): 1-11.
- [28] DUAN H J, WANG Y, XIAO Q, et al. Gas extraction technology and application of near horizontal high directional drilling[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1326-1333.