

松软低渗突出煤层定向水力压裂增透消突实践^{*}

王晓强¹, 樊世星^{2,3}

(1.山西工程职业学院 资源与安全工程系, 山西 太原 030009;

2.西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

3.教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:针对松软低渗突出煤层瓦斯含量大、难抽采,石门揭煤过程中易发生突出等问题,研究了定向水力压裂增透消突技术。首先,阐明了定向水力压裂增透机理,通过理论计算得出煤层起裂压力、流量、注水量分别为 22.8~30.5 MPa、130~200 L/min 和 216 m³。据此,在揭煤预抽巷道内布设 4 个水力压裂孔和 2 个裂隙导向孔。压裂过程中,泵压、平均注水流量、单孔注水量分别达到 28~31 MPa、140~177 L/min 和 260~330 m³,同理论计算的数据基本吻合。试验结果表明:定向水力压裂影响半径大于 30 m,煤层透气性系数达到 0.840 m²/(MPa²·d),是原始煤层的 60 倍;单孔瓦斯浓度提高 50%~80%,百孔抽采纯量达 1.9 m³/min,瓦斯抽采量提高 90%。采用定向压裂后,揭煤钻孔工程量缩减 64%,抽采达标时间比预计工期提前了 36 d。该技术可为类似瓦斯治理工程提供借鉴。

关键词:松软低透煤层;增透;定向水力压裂;瓦斯抽采

中图分类号:TD713 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)04-0123-07

0 引言

我国煤层存在“高储低渗”的特点,大部分高瓦斯煤层地质构造复杂,渗透性差(透气性系数仅为 10⁻³~10 m²/(MPa²·d)),原始煤层瓦斯抽采困难是非常规天然气开发和矿井瓦斯治理的世界性难题^[1-2]。近年来,煤矿瓦斯防治工作取得了显著成效,全国煤矿瓦斯事故发生起数和死亡人数均大幅下降,但煤与瓦斯突出事故在煤矿事故中所占的比例逐年增高^[3],不具备保护层开采条件的松软低透突出煤层瓦斯预抽消突效果差^[4-5]。突出煤层密集

型钻孔预抽消突技术存在工程量大、抽采达标时间长、准备工期长,抽采效果不均匀、有盲区等问题,且存在穿层预抽后的掘进工作面突出指标仍超限的问题^[6-9]。国内外学者针对松软低透煤层增透抽采瓦斯开展了大量的研究^[10-17]。近年来,水力压裂增透技术在低渗油、气田开采已广泛推广。煤层水力压裂技术起步较晚,到了 20 世纪 60 年代,水力压裂技术开始应用于煤矿井下煤层增透^[18-19]。在煤层水力压裂增透理论方面,国内外学者开展了煤层水压裂隙的起裂、延伸规律的理论研究^[20-23],并通过实验室水力压裂物理试验^[24-27],建立了水力压裂数学模型,进行数值计算等^[28-31];随着压裂工艺技术的发展,出现了设置预制裂缝、导向孔和射孔的方式加强裂缝扩展方向控制的技术手段^[32-33]。平煤、永煤和晋煤以及淮南矿业(集团)相关煤矿的井下水力压裂工业实践表明:水力压裂增透煤层技术可以扩大煤层中的孔隙和裂隙,与原始煤体区域相比,水力压裂后的煤层单孔抽采量增加了 260%,单位面积抽采纯量增加了 45%,钻孔量减少了 40%^[34]。

本研究的试验地点在淮南矿业(集团)潘一矿,以西一 C₁₃₋₁ 盘区顶板回风上山揭 C₁₃₋₁ 煤施工为工程背景,研究了松软低透煤层定向水力压裂增透抽采技术,该技术消除了揭煤区域内水力压裂造成的高应力区,提高了煤层透气性及抽采效果,减少了区域预抽钻孔量及预抽瓦斯时间,取得了较好的瓦斯治理效果。

^{*} 收稿日期:2023-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52104221)。

作者简介:王晓强(1989—),男,山西孝义人,硕士研究生,讲师,主要从事矿山安全方面的教学与研究,E-mail:wxq4143@163.com。

通信作者:樊世星(1989—),男,山西孝义人,副教授,博士(后),主要从事矿山安全方面的教学与研究,E-mail:fanxust@yeah.net。

1 煤层定向水力压裂增透机理

煤层定向水力压裂增透以水为基本介质,通过改变水的运动状态,在短时间内挤压入煤层原生裂缝,定向引导裂隙起裂位置及扩展方向,进而产生次生缝与裂隙,最终使煤层在这一方向形成致密的裂隙网,增加煤层透气性。

1.1 外力作用下煤层裂缝的产生与延伸

煤体表面原生裂隙受高压水挤压发生扩展,扩展后的原生裂隙作为高压水运移通道使其进入煤体内部裂隙和层理中;当煤体内部裂隙和层理中的高压水达到饱和后,在水压持续作用下产生新生裂隙;而当新生裂隙中的水再次达到饱和后,高压水继续寻找煤体原生裂隙和层理弱面并进行填充、扩展,如此往复实现煤层持续压裂。高压水的注入,打破了煤层原有的应力平衡,形成新的应力场,弱面与弱面的开裂顺序也发生变化。煤层开裂一般从一级弱面到二级弱面,再到三级弱面,以此规律裂缝继续扩展实现煤体的分割,裂缝延展次序如图1所示。

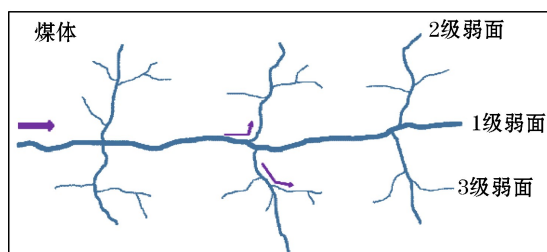


图1 高压水流动次序示意

Fig.1 Sequence of high-pressure water flow

1.2 定向水力压裂裂隙扩展分析

煤为非均匀介质,且裂隙结构复杂,所以水力压裂过程中煤层起裂及裂缝扩展比较复杂,延伸方向无法准确获得。松软低透煤层压裂过程中,压裂裂隙周围存在高应力场,致使这一区域煤层渗透率降低,此外裂隙在应力影响下又会重新闭合,严重影响常规水力压裂增透促抽瓦斯效果^[35]。

为了实现裂缝起裂方向的定向引导,本研究提出利用导向槽或控制孔诱导裂隙朝人为控制方向延伸,人为改造煤层应力场,形成人造弱面,控制裂隙扩展和延伸方向,如图2所示。控制孔的实施为煤体压裂变形及移动提供了可靠空间。控制孔或导向槽会使煤体呈现定向流变,有利于煤层应力的充分释放,从而迫使钻孔间的应力峰值降低。

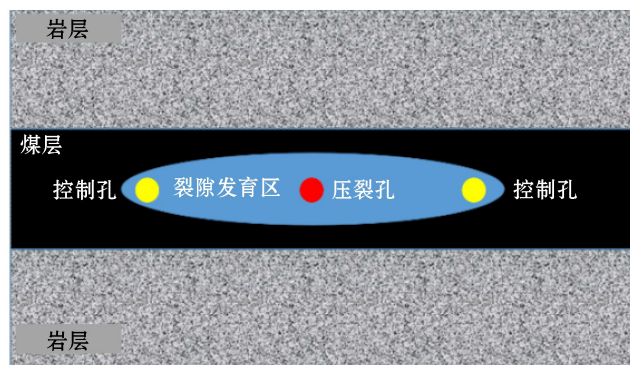


图2 增加控制孔定向水力压裂裂隙扩展示意

Fig.2 Fracture extending of directional hydraulic fracturing with control hole added

2 水力压裂参数设置及压裂设备

2.1 水力压裂参数设置

2.1.1 起裂压力

煤层起裂主要受原岩应力和注水压力两方面影响,而压裂孔受剪切破坏所需应力远小于径向破坏所需应力。因此,随水压增大,压力孔壁在切向应力作用下产生拉伸破坏,压裂孔孔壁起裂临界值可通过式(1)和式(2)进行计算。

$$p = \min\{(3-\lambda) \cdot \sigma + T, (3\lambda-1) \cdot \sigma + T\} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{k \cdot \gamma \cdot H}{1000} \quad (2)$$

式中, p 为压裂孔孔壁起裂压力临界值,MPa; σ 为煤层铅垂方向应力,MPa; λ 为煤层侧向的应力系数; T 为煤体的抗拉强度,MPa; k 为地层的应力系数; γ 为压裂孔上覆煤岩层的平均容重, kN/m^3 ; H 为煤层埋深,m。

井下试验地点距离地表700 m,煤层上方岩层平均容重为 18 kN/m^3 ,地层应力系数为 $0.8 \sim 1.0$;侧向应力系数为 $1.1 \sim 0.8$;煤的抗拉强度为 $0.6 \sim 1.5 \text{ MPa}$ 。按矿井最大埋深计算,最大起裂压力为 37.5 MPa ,考虑管路摩阻损失,压裂泵组压力应不小于 40 MPa 。计算本次试验地点最大起裂压力为 $22.8 \sim 30.5 \text{ MPa}$ 。

2.1.2 压裂流量

由于煤层地质结构复杂,水力压裂过程中存在滤失效应,其中很大一部分水沿地层构造在煤层滤失,很少部分水在煤层中实现起裂及扩展。煤矿井下压裂过程中,煤层漏失率随压裂影响范围的变化而变化,不同压裂时段的漏失量不同,试验过程中注

水流量应大于压裂过程中单位时间内煤层漏失量。根据淮南矿区主采煤层的渗透率等物性特征,其单位流量为 130~200 L/min。

2.1.3 注水量

注水量按式(3)计算:

$$Q=\pi\cdot(R-r)^2\cdot h\cdot\delta\tag{3}$$

式中, Q 为注水量, m^3 ; R 为压裂半径, m ; r 为孔眼半径, m ; h 为煤层厚度, m ; δ 为煤层含水率,%。

按照淮南矿区煤层特性及国内相似矿区的工程经验,试验地点按压裂半径 30 m 设计,预计煤层含水率提高不低于 1.5%,煤层注水量应不小于 216 m^3 。

2.2 压裂设备选型

2.2.1 管路选型

水力压裂过程中压力高,流量大,而管路直径与阻力损失及承压能力成反比例关系。为确保压裂过程的安全及设备便携安装,管路应选择适宜的压裂参数。当介质流速为定值时,管路管径可通过式(4)计算获得。

$$d=4.6\cdot V_0^{0.5}\cdot u^{-0.5}\tag{4}$$

式中, d 为管道的内径, mm ; V_0 为管内介质的体积流量, L/min ; u 为介质在管内的平均流速, m/s 。

设计最小流量为 200 L/min,压裂过程中压裂液介质为清水,黏度较小,经济流速为 3~4 m/s,经计算,管道内径为 26~37 mm。

2.2.2 设备选型

基于起裂压力、压裂流量及注水量等参数的理论计算值,此次水力压裂设备采用 BZW-200/56 型乳化泵。该装置额定压力为 56 MPa,额定流量为 200 L/min。依据管路理论获得值,注水管路以

$\Phi 31.5\text{ mm}$ 高压胶管为主,压裂孔封孔采用壁厚 6 mm、 $\Phi 42\text{ mm}$ 高压无缝钢管。

水力压裂系统包括注水泵、水箱、高压胶管、压力表、压力传感器、摄像头等几部分(如图 3 所示)。为确保打钻及试验过程安全可靠,项目组在压裂孔口安装 KBA12T 矿用本安摄像仪,实现现场情况与地面监控室的实时传输。监控主要包括两部分,一方面实现钻孔施工过程中开孔、见煤岩、封孔等一系列工序的可视化监控,既可监测违规情况又可保证钻孔施工质量;另一方面对压裂过程进行实时监控,掌握压裂情况,为分析压裂的动态过程提供视频资料。此外,对于现场出现的不安全状况,地面可实时发出安全指令,确保试验安全进行。

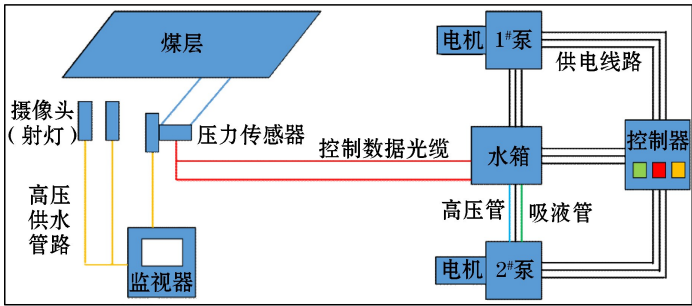


图 3 压裂系统
Fig.3 Fracturing system

3 工程试验及压裂效果

3.1 试验地点概况

试验地点为潘一矿西一 C_{13-1} 盘区顶板回风上山揭煤段,该巷道从 C_{13-1} 煤层底板法向距离 24.5 m 处起坡,以 16° 上山施工揭穿 C_{13-1} 煤层至煤层顶板法向距离 25 m。揭煤段 C_{13-1} 煤的具体参数见表 1。

表 1 C_{13-1} 煤层赋存及消突施工参数

Table 1 Occurrence and outburst elimination parameters of C_{13-1} coal seam

煤厚/m	产状/(°)	煤层坚固性系数	瓦斯压力/MPa	瓦斯含量/(m^3/t)	透气性系数/($\text{m}^2/(\text{MPa}^2\cdot\text{d})$)	突出危险性	与巷道夹角/(°)	揭煤区域消突长度/m
5.1	150~170; $\angle 4\sim 8$	0.5	4.6	11.8	0.013 93	较大	11	129.6

压裂钻孔计划从 1252(3)底板巷施工,该巷道位于揭煤巷道正下方,距 C_{13-1} 煤法向距离 44 m。为保证试验地点巷道的稳定性,项目实施前,提前对压裂钻孔所在位置附近 30 m 范围的巷道进行全断面喷浆和深浅孔交替注浆加固。

3.2 压裂钻孔设计

此次试验方案以压裂半径 30 m 为依据,布设 4

个压裂孔,在巷道揭煤点附近位置布设 2 个控制孔(K1,K2),诱导裂隙向巷道揭煤位置扩展,同时也可用作压裂过程中煤粉和瓦斯运移释放通道,见图 4。钻孔施工先后顺序为 1#、K1、K2、2#、3#、4#。压裂顺序为 1#、2#、3#、4#。压裂孔全程下 $\Phi 42\text{ mm}$ 高压无缝钢管注浆封孔,控制孔封孔 20 m。

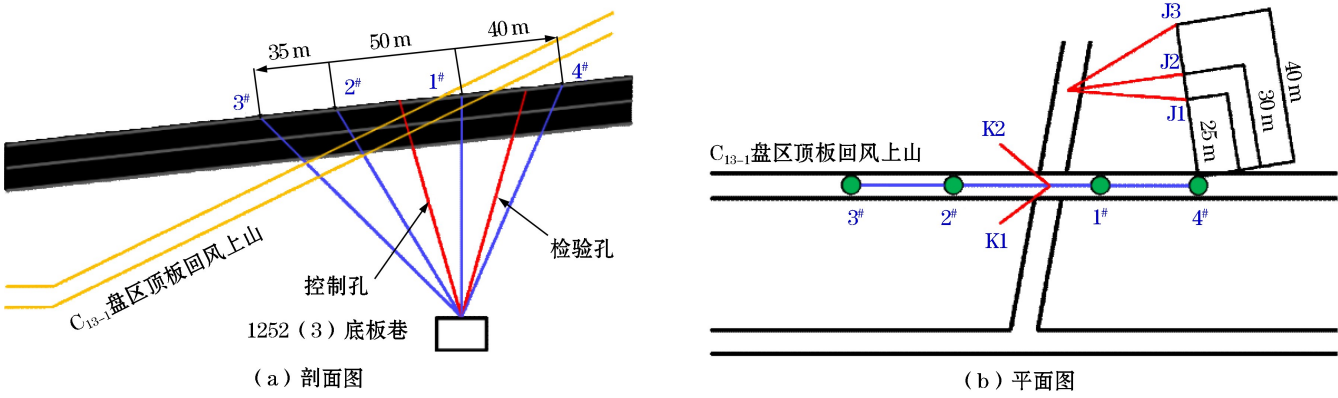


图 4 压裂钻孔设计
Fig.4 Design of fracturing drilling

3.3 压裂情况

9月4日中班对1#孔进行了预压裂,初始压力约为20 MPa,最大压力达30 MPa,注水达16 m³时

停止试验。9月5日继续压裂,至9月7日1#压裂钻孔累计注水量达330 m³时停止作业。压裂期间孔口压力变化如图5所示。

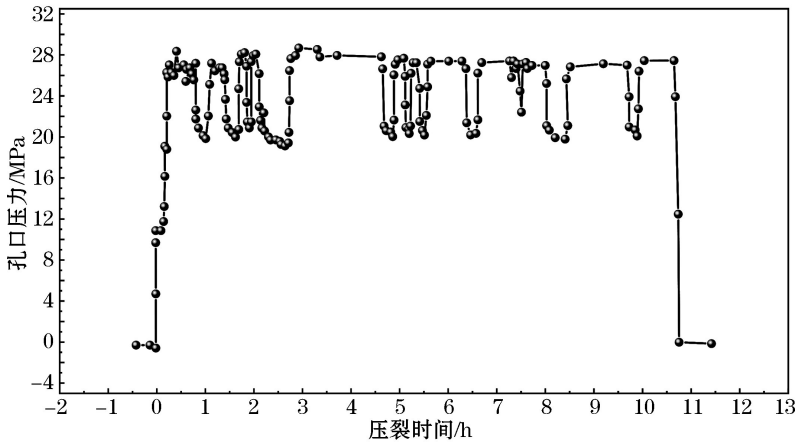


图 5 压裂期间孔口压力传感器数据曲线
Fig.5 Data curve of porthole pressure sensor during fracturing

监测发现:从乳液泵至压裂孔孔口的压力损失了3 MPa,煤层起裂泵压为29~31 MPa,孔口压力为26~28 MPa。压裂过程中,当压入50 m³水量后,两个控制孔开始出水并携带煤粉,初始煤粉颗粒粒径在3~5 mm之间,后期煤粉颗粒均在1 mm左右;当注水量达130 m³时,K2平均5~10 min喷孔一次,每次喷孔持续时间15~30 s,喷射距离6~8 m,并伴随明显响声;当注水量达180 m³时,喷孔强度显著减小,喷出煤量减少。K1出煤粉,未喷孔。K2喷孔前,巷道瓦斯浓度无变化,喷孔期间K2孔口瓦斯浓度最高达10%,回风流最大浓度为0.29%,巷道风量为1500 m³/min。1#孔压入330 m³水后,达到预期的注水量,停止了压裂。

此后,依次对其他3个压裂钻孔进行压裂,钻孔压裂情况见表2。钻孔压裂期间,两个控制孔继续出水并携带煤粉,累计压出煤粉38 m³。

表 2 水力压裂注水统计			
Table 2 Water injection statistics of hydraulic fracturing			
孔号	注水泵压/MPa	累计注水时间/min	注水量/m ³
1#	29~31	1860	330
2#	28~30	1620	226
3#	28~30	1440	234
4#	29~31	1560	283

3.4 压裂增透效果

控制孔距离1#压裂钻孔25~40 m,压裂过程中控制孔的实时状态表明,压裂形成的煤层裂缝沿空孔径向延伸且影响半径大于30 m;压裂施工结束10 d后在4#孔周围一定范围内施工3个检验孔(J1、J2、J3),其布置方式如图4所示,在钻孔施工过程中对压裂后煤层的瓦斯含量与水分进行化验,其结果见表3。对J2检验钻孔采用钻孔径向不稳定流量法测定煤层透气性系数约为0.840 m²/(MPa²·d)。

表 3 检验孔压裂前后参数对比

Table 3 Comparison of parameters before and after fracturing of inspection holes

检验孔 编号	与压裂 孔径向 距离/m	煤体 原始 水分/ %	压裂后 煤体 最大 水分/%	水分 增长 倍数	原煤 瓦斯 含量/ (m ³ /t)	压裂后 瓦斯 含量/ (m ³ /t)
J1	25.00	2.04	5.60	2.75	11.80	8.62
J2	30.00	2.04	4.20	2.06	11.80	11.09
J3	40.00	2.04	3.20	1.57	11.80	11.67

压裂施工后,距压裂空孔径向 30 m 范围内的煤层瓦斯含量平均值降低至原始含量的 88.64%,定向水力压裂增透效果良好。

3.5 压裂区域抽采情况

揭煤抽采钻孔设计间距由(轴向×倾向)3 m×3 m 扩大至 5 m×5 m。压裂后,共施工 270 个抽采钻孔,钻孔工程量13 203 m,较未进行定向水力压裂的设计钻孔工程量缩减 64%,共计少施工钻孔工程量23 472 m。压裂区域瓦斯抽采效果如图 6 所示。

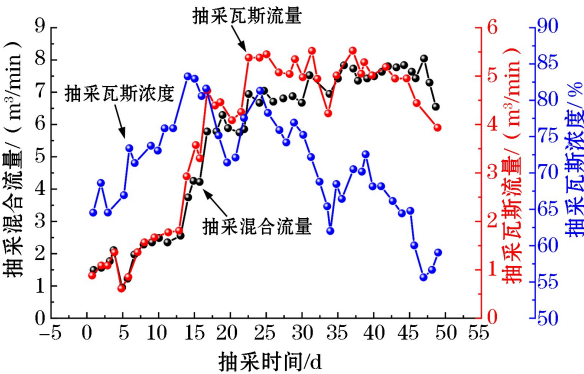


图 6 压裂区域瓦斯抽采效果

Fig.6 Gas extraction effect in fracturing area

由图 6 可知,抽采瓦斯流量随抽采钻孔数量的增多逐渐增大,至抽采 24 d 后 270 个钻孔全部合茬抽采,抽采瓦斯流量趋于稳定,抽采至 43 d 后,计算揭煤区域瓦斯抽采率达 50%。揭煤区域抽采钻孔瓦斯浓度为 60%~80%,钻孔百孔瓦斯抽采瓦斯量为 1.9 m³/min,较原始煤层区域的单孔瓦斯浓度提高 50%~80%,瓦斯抽采量提高 90%。采用定向水力压裂增透煤层强化瓦斯抽采后,钻孔施工总进尺明显降低的同时瓦斯抽采量大幅提高,抽采等效达标时间比预计工期缩短了 36 d。

4 结论

(1) 在松软低透煤层实施了定向水力压裂技术,距压裂孔 25~30 m 处施工 2 个控制孔,诱导裂隙向巷道揭煤位置扩展,同时可用作压裂期间煤粉

及瓦斯运移释放通道,累计从 2 个控制孔压出煤粉 38 m³,从控制孔内最大排放瓦斯量为 4.35 m³/min,压裂区域煤层透气性系数为 0.840 m²/(MPa·d),是原始煤层的 60 倍,压裂影响半径大于 30 m。

(2) 煤层压裂期间,压裂泵压为 28~31 MPa,平均注水流量为 140~177 L/min,单孔注水量为 226~330 m³,同理论计算的数据基本吻合。

(3) 潘一矿在石门揭煤工作面应用定向水力压裂增透抽采技术后,钻孔工程量缩减了 64%,减少 23 472 m,单孔瓦斯浓度提高了 50%~80%,瓦斯抽采量提高了 90%,抽采达标时间比预计工期提前了 36 d。

参考文献(References):

[1] 俞启香,程远平,蒋承林,等.高瓦斯特厚煤层煤与卸压瓦斯共采原理及实践[J].中国矿业大学学报,2004(2):3-7.
YU Qixiang, CHENG Yuanping, JIANG Chenglin, et al. Principles and applications of exploitation of coal and pressure relief gas in thick and high-gas seams[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2004(2):3-7.

[2] 程远平,付建华,俞启香.中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J].采矿与安全工程学报,2009,26(2):127-139.
CHENG Yuanping, FU Jianhua, YU Qixiang. Development of gas extraction technology in coal mines of China [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2009,26(2):127-139.

[3] 胡千庭,赵旭生.中国煤与瓦斯突出事故现状及其预防的对策建议[J].矿业安全与环保,2012,39(5):1-6.
HU Qianting, ZHAO Xusheng. Present situation of coal and gas outburst accidents in China's coal mines and countermeasures and suggestions for their prevention [J]. Mining Safety and Environmental Protection,2012,39(5):1-6.

[4] 袁亮.低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1370-1379.
YUAN Liang. Key technique of safe mining in low permeability and methane-rich seam groups [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(7):1370-1379.

[5] 袁亮.卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J].煤炭学报,2009,34(1):1-8.
YUAN Liang. Theory of pressure relief gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction [J]. Journal of China Coal Society,2009,34(1):1-8.

[6] 唐永志.淮南矿区煤炭深部开采技术问题与对策[J].煤炭科学技术,2017,45(8):19-24.
TANG Yongzhi. Technical problem and countermeasures to deep coal mining in Huainan mining area [J]. Coal Science and Technology,2017,45(8):19-24.

- [7] 方良才.淮南矿区瓦斯卸压抽采理论与应用技术[J].煤炭科学技术,2010,38(8):56-62.
FANG Liangcai. Gas pressure releasing and drainage theory and application technology in Huainan mining area [J]. Coal Science and Technology,2010,38(8):56-62.
- [8] 方良才,夏抗生.淮南矿区区域性瓦斯治理成套技术实践[J].煤炭科学技术,2009,37(2):56-58+93.
FANG Liangcai, XIA Kangsheng. Practices on complete set technology of local gas control in Huainan mining area [J]. Coal Science and Technology,2009,37(2):56-58+93.
- [9] 余陶.低透气性煤层穿层钻孔区域预抽瓦斯消突技术研究[D].合肥:安徽建筑工业学院,2010.
YU Tao. Study on outburst elimination technique in low permeability coalbed using zonal gas pre-drainage by cross-measure boreholes [D]. Hefei: Anhui Institute of Architecture and Industry,2010.
- [10] 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.
YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine [J].Coal Science and Technology,2015,43(1):45-49.
- [11] 刘明举,孔留安,郝富昌,等.水力冲孔技术在严重突出煤层中的应用[J].煤炭学报,2005(4):451-454.
LIU Mingju, KONG Liuan, HAO Fuchang, et al. Application of hydraulic flushing technology in severe outburst coal [J]. Journal of China Coal Society,2005(4):451-454.
- [12] 余陶,卢平,朱贵旺,等.穿层钻孔水力压裂强化抽采瓦斯消突技术应用研究[J].安全与环境学报,2010,10(6):172-175.
YU Tao, LU Ping, ZHU Guiwang, et al. Study on enhanced gas drainage by hydraulic fracture in cross-measure boreholes [J]. Journal of Safety and Environment,2010,10(6):172-175.
- [13] 李平.水力挤出技术在突出煤层中的应用[J].煤炭科学技术,2007(8):45-47.
LI Ping. Application of hydraulic squeezing technology in coal seam with outburst [J].Coal Science and Technology,2007(8):45-47.
- [14] 徐涛,冯文军,苏现波,煤矿井下水力压冲增透强化抽采技术试验研究[J].西安科技大学学报,2015,35(3):303-306.
XU Tao, FENG Wenjun, SU Xianbo. Experimental research on enhanced gas extraction application with hydraulic fracturing flushing [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2015,35(3):303-306.
- [15] 文虎,李珍宝,王振平,等.煤层注液态 CO₂ 压裂增透过程及裂隙扩展特征试验[J].煤炭学报,2016,41(11):2793-2799.
WEN Hu, LI Zhenbao, WANG Zhenping, et al. Experiment on the liquid CO₂ fracturing process for increasing permeability and characteristics of crack propagation in coal seam [J].Journal of China Coal Society,2016,41(11):2793-2799.
- [16] 蔡峰,刘泽功,张朝举,等.高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增透数值模拟[J].煤炭学报,2007(5):499-503.
CAI Feng, LIU Zegong, ZHANG Chaoju, et al. Numerical simulation of improving permeability by deep-hole presplitting explosion in loose-soft and low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society,2007(5):499-503.
- [17] 蔡如法,童校长.穿层钻孔掏穴增透强化抽采瓦斯技术研究[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2011,19(4):47-50.
CAI Rufa, TONG Xiaozhang. Research on gas drainage of crossing-measure by expanding borehole diameter[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture and Industry,2011,19(4):47-50.
- [18] 杜春志.煤层水压致裂理论及应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.
DU Chunzhi. Study on theoretics of hydraulic fracturing in coal bed and its applications[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2008.
- [19] 邓广哲,王世斌,黄炳香.煤岩水压裂缝扩展行为特性研究[J].岩石力学与工程学报,2004(20):3489-3493.
DENG Guangzhe, WANG Shibing, HUANG Bingxiang. Research on behavior character of crack development induced by hydraulic fracturing in coal-rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004(20):3489-3493.
- [20] HUBBERT M K, WILLIS D G. Mechanics of hydraulic fracturing[J].Trans AIMS,1957,1210:153-168.
- [21] CROSBY D G, RAHMAN M M, RAHMAN M K, et al. Single and multiple transverse fracture initiation from horizontal wells [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2002(35):191-204.
- [22] 许江,袁梅,李波波,等.煤的变质程度、孔隙特征与渗透率关系的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):681-687.
XU Jiang, YUAN Mei, LI Bobo, et al. Experimental study of relationships between metamorphic grade, pore characteristics and permeability of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(4):681-687.
- [23] 张国华.本煤层水力压裂致裂机理及裂隙发展过程研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2004.
ZHANG Guohua. The study of induce-crack mechanicals and cranny's development process about hydraulic fracture in mining-coal ben [D]. Fuxin: Liaoning Technical University,2004.
- [24] BJERRUM L, NASHJ K T I, KENNARD R M, et al. Hydraulic fracturing in field permeability testing [J]. Geotechnical,1972,22(2):319-332.
- [25] KIM C M, ABASS H. Hydraulic fracture initiation from horizontal well bores: laboratory experiments [J]. Semiotica,2008(168):45-65.

- [26] AAMODT R L, POTTER R M. Anomalous fracture-extension pressure in granitic rocks[R]. Los Alamos: Los Alamos Scientific Lab., N. Mex. (USA), 1978.
- [27] 周健.水力压裂诱导钻孔孔壁应变行为演化特征试验研究[D].淮南:安徽理工大学,2015.
ZHOU Jian. The research on characteristics of evolution of borehole strain behavior induced by hydraulic fracturing[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015.
- [28] BOUTECA M J. 3D analytical model for hydraulic fracturing: theory and field test[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE, 1984:13276.
- [29] 连志龙.水力压裂扩展的流固耦合数值模拟研究[D].合肥:中国科学技术大学,2007.
LIAN Zhilong. A simulation study of hydraulic fracturing propagation with a solid-fluid coupling model[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [30] 袁志刚,王宏图,胡国忠,等.穿层钻孔水力压裂数值模拟及工程应用[J].煤炭学报,2012(增刊1):109-114.
YUAN Zhigang, WANG Hongtu, HU Guozhong, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing of crossing borehole and its engineering application [J]. Journal of China Coal Society, 2012(S1):109-114.
- [31] DETOURNAY E, CARHONELL R. Fracture-mechanics analysis of the breakdown process in minifracture of leakoff test[J].SPE Production & Facilities, 1997,12(3):195-199.
- [32] 李全贵,翟成,林柏泉,等.定向水力压裂技术研究与应用[J].西安科技大学学报,2011,31(6):735-739.
LI Quanguai, ZHAI Cheng, LIN Baiquan, et al. Research and application of directional hydraulic fracturing technology [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011,31(6):735-739.
- [33] 王耀锋,李艳增.预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用[J].煤炭学报,2012,37(8):1326-1331.
WANG Yaofeng, LI Yanzeng. Technology and application of directional hydraulic penetration permeability improvement by guided groove[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(8):1326-1331.
- [34] 甘林堂,刘吉祥.松软突出煤层采煤工作面水力压裂增透技术应用[J].煤矿安全,2017,48(7):70-73+77.
GAN Lintang, LIU Jixiang. Application of hydraulic fracturing and permeability improvement technology in mining face of soft outburst coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2017,48(7):70-73+77.
- [35] 赵阳升,杨栋,胡耀青,等.低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J].煤炭学报,2001(5):455-458.
ZHAO Yangsheng, YANG Dong, HU Yaoqing, et al. Study on effective technology way for mining methane in low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2001(5):455-458.

Practice of Directional Hydraulic Fracturing in Soft and Low-Permeability Coal Seam for Permeability Enhancement and Outburst Elimination

WANG Xiaoqiang¹, FAN Shixing^{2,3}

(1.Department of Resources and Safety Engineering, Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan, Shanxi 030009, China;

2.School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3.Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention of Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Aiming at the problems of high gas content and difficult extraction in soft and low-permeability outburst coal seams, as well as the risk of outburst during the coal mining process, directional hydraulic fracturing technology for permeability enhancement and outburst elimination was studied. Firstly, the mechanism of directional hydraulic fracturing for permeability enhancement and outburst elimination was elucidated. Through theoretical calculations, it was found that the initial fracturing pressure, flow rate, and injection volume of the coal seam were 22.8–30.5 MPa, 130–200 L/min, and 216 m³, respectively. On this basis, 4 hydraulic fracturing holes and 2 fracture guide holes were arranged in the pre-extraction roadway. During the fracturing process, the pump pressure, average water injection flow rate, and single hole water injection volume reached 28–31 MPa, 140–177 L/min, and 260–330 m³, respectively, which were basically consistent with the theoretical calculation data. The experimental results show that the influence radius of directional hydraulic fracturing is greater than 30 meters, and the permeability coefficient of the coal seam reaches 0.840 m²/(MPa² · d), which is 60 times that of the original coal seam. The concentration of gas in a single hole has increased by 50% to 80%, and the pure amount of gas extracted from a hundred holes has reached 1.9 m³/min, resulting in a 90% increase in gas extraction capacity. After adopting directional fracturing, the amount of coal drilling work has been reduced by 64%, and the time for reaching the standard of extraction was 36 days ahead of the expected construction period. This technology can provide a reference for similar gas control projects.

Key words: Soft and low-permeability coal seam, Permeability enhancement, Directional hydraulic fracturing, Gas extraction