

CO₂ 相变致裂技术在顺煤层钻孔增透中的应用

罗朝义^{1,2}, 江泽标^{1,2}, 郑昌盛³, 田世祥^{1,2}, 李波波^{1,2}, 张海清^{1,2}

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 复杂地质矿山开采安全技术工程中心, 贵州 贵阳 550025;

3. 贵州致裂科技有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为了提高喀斯特地质条件下松软低透高瓦斯煤层的瓦斯抽采效果,以贵州绿塘煤矿为研究对象,提出了煤层 CO₂相变致裂顺层钻孔卸压增透技术,分析了 CO₂致裂瞬间气体尖劈作用下煤体的破坏特点、裂隙的失稳扩散特点及高压波劈裂机理。CO₂致裂顺层钻孔增透试验结果表明:CO₂致裂顺层钻孔技术增透效果明显,该区域致裂后煤层透气性提高 5 倍,衰减性系数降低了 53.6%;瓦斯抽采浓度增大 3 倍,平均抽采瓦斯体积分数约为 70%,在抽采时间相同的情况下煤层残余瓦斯含量显著降低,抽采率约为 55%,该煤矿 6_中煤层原来抽采达标周期为 6~12 个月,致裂后抽采达标周期为 1~2 个月;整体抽采效率提高了 6 倍,抽采达标周期大幅缩短。

关键词:喀斯特;低透气;顺层钻孔;复杂地质;CO₂相变致裂

中图分类号:TD712.6 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)11-0138-06

Application on permeability improvement technology with CO₂ phase change to borehole drilling along coal seam

LUO Chaoyi^{1,2}, JIANG Zebiao^{1,2}, ZHENG Changsheng³, TIAN Shixiang^{1,2}, LI Bobo^{1,2}, ZHANG Haiqing^{1,2}

(1. School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Mining and Safety Technology Center of Complicated Geological Mine, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Fracturing Science and Technology Company Limited, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to improve the gas drainage effect in the soft, low permeability and high gassy seam under the karst geology condition, based on Guizhou Lyutang Mine as the study object, the seam pressure released and permeability improved technology with a CO₂ phase change fractured borehole drilling along the seam was provided. The paper had an analysis on the seam failure characteristics under the splitting effect of the CO₂ fracturing transient gas, including the crack instability and diffusion characteristics and the high pressure wave splitting mechanism. The results of the permeability improved test with the CO₂ fractured borehole drilling along the seam showed that the permeability effect of the CO₂ fracturing borehole drilling technology along the seam was obvious, after the fracturing in the area, the seam permeability was increased by five times and the attenuation coefficient was reduced by 53.6%. The gas drainage concentration was increased by three times and the average drained gas volume fraction was about 70%. Under the condition of the same gas drainage time, the residual gas content in the seam was obviously reduced and the gas drainage rate was about 55%. In No. 6 medium seam of the Mine, the period of the previous gas drainage target was about 6~12 months and after the fracturing, the period of the gas drainage target was 1~2 months. The overall gas drainage efficiency was increased by six times and the period of the gas drainage target was highly reduced.

Key words: karst; low permeability; borehole drilling along seam; complicated geology; CO₂ phase change fracturing

收稿日期:2017-07-05; **责任编辑:**王晓珍 **DOI:**10.13199/j.cnki.est.2017.11.023

基金项目:贵州省重大应用基础研究资助项目(黔科合 JZ 字[2014]2005);贵州省科学技术基金资助项目(黔科合 J 字[2015]2049 号);贵州大学研究生创新基金资助项目(研理工 2017087)

作者简介:罗朝义(1992—),男,贵州兴义人,硕士研究生。Tel:18285112261, E-mail:1215265397@qq.com。通讯作者:江泽标,副教授, Tel:13007840058, E-mail:327552007@qq.com

引用格式:罗朝义,江泽标,郑昌盛,等. CO₂相变致裂技术在顺煤层钻孔增透中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11):138-143.

LUO Chaoyi, JIANG Zebiao, ZHENG Changsheng, et al. Application on permeability improvement technology with CO₂ phase change to borehole drilling along coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11):138-143.

0 引言

贵州矿区是我国煤与瓦斯突出较为严重的区域之一,大多数矿井属于低透气性、高瓦斯矿井,瓦斯抽采难度较大。针对低透高瓦斯煤层赋存条件,强化增透是瓦斯治理与安全生产的关键^[1-3]。为了提高煤层增透效果和瓦斯抽采效率,许多科技工作者已在煤层增透方面探索研究并形成一大批科技成果,主要包括保护层开采、沿空留巷、水力压裂、水力冲孔、水力割缝、深孔预裂爆破、高压脉冲水射流等多种卸压增透方法^[4-8]。而很多技术压裂效果并不理想,近些年来,许多学者对CO₂致裂工艺应用于煤层增透进行了研究^[9-14]。王兆丰等^[15]进行了液态二氧化碳对煤层致裂机理及现场应用的研究,孙建中^[16]基于不同爆破致裂方式开展了液态二氧化碳相变增透应用研究,赵龙等^[17]开展了液态CO₂相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用研究,孙小明^[18]开展了液态二氧化碳相变致裂穿层钻孔强化预抽瓦斯效果研究,王海东^[19]进行了突出煤层掘进工作面CO₂可控相变致裂防突技术研究,周西华等^[20]探究了液态CO₂爆破煤层增透最优钻孔参数。尽管前人在CO₂致裂理论与技术上进行了很多研究,但是关于CO₂相变致裂顺层钻孔技术的现场应用上,仍旧没有成熟的技术工艺以及现场试验研究,再加上煤层赋存条件的千差万别,贵州矿区溶岩与溶蚀现象较发育的喀斯特地质与多组构造复合叠加的构造特点,使得煤储层条件和瓦斯赋存环境条件与其他矿区相比更复杂,常规增透技术的抽采瓦斯效率低、周期长、浓度低、流量小,所以对CO₂相变致裂顺层钻孔技术的现场应用探索具有重要意义。

基于此,笔者选择近距离高强度开采的绿塘煤矿,针对低透气、高瓦斯多溶岩等难题,开展了CO₂相变致裂顺层钻孔技术增透的现场试验,通过CO₂相变顺层致裂后监测不同致裂半径的残余瓦斯含量变化,分析了CO₂相变顺层致裂的影响范围,通过CO₂相变致裂前后的煤层透气性系数、衰减系数、瓦斯浓度和瓦斯抽采混量,深入分析了CO₂相变致裂增透效果,以期绿塘煤矿其他工作面以及贵州地区其他煤矿提供参考。

1 CO₂相变致裂机理及工艺

1.1 CO₂相变致裂机理

CO₂相变致裂技术是利用CO₂汽化产生高压波

致裂煤层增透,在应力波作用下,介质质点产生径向位移,由此在煤体中产生径向压缩和切向拉伸,当切向拉伸应力超过煤的抗拉强度时会产生径向裂隙,可认为这种作用是高压波的劈裂作用,在应力波向煤体深部传播的同时,爆生气体紧随其后迅速膨胀,进入由应力波产生的径向裂隙中,由于气体的尖劈作用,使裂隙继续扩展,随着裂隙的不断扩展,爆生气体压力迅速降低,当压力降到一定程度时,煤体开裂的应力因子小于煤体的断裂韧性,裂隙停止扩展,最后使煤岩体破裂,在钻孔周围形成一片透气性高、裂隙发育的区域,从而达到致裂爆破的目的。煤体属于一种准脆性材料,所以遵循裂隙失稳扩散准则^[21]:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{2E\gamma_t}{\pi\alpha}} \quad (1)$$

式中: σ_t 为裂纹失稳扩散尖端应力临界值; γ_t 为裂纹尖端失稳所需的表面能,即裂纹失稳扩散所需克服的阻力; E 为煤体的弹性模量; α 为裂纹尺寸。

1.2 CO₂相变致裂工艺

致裂系统采用第三代大功率CO₂致裂器,结合深孔及群孔按先后顺序可控引发系统、热反应材料的生产包装等工艺,致裂充装设备布置在回风巷内,液态二氧化碳通过增压泵加压装入专用储液管,将CO₂致裂器按次序连接在一起,并逐节检查联结情况,确认完好后用钻机将CO₂致裂器安全推入钻孔内的预定位置。储液管内液态CO₂压力为8~10 MPa,再通过电子导通器导通,用矿用低压(9 V)起爆器启动致裂装置,保压时间约15 min。由于加热管瞬间产生大量热量使液态CO₂转化为气态,体积膨胀,高压气体冲破定压泄能片冲出释放管,随着应力波的扩展与贯通,使得微观裂隙增多,煤层透气性提高^[22],结合裂隙扩散准则,将裂隙分为2段:起裂段与裂隙扩展段,致裂钻孔施工工艺如图1所示。

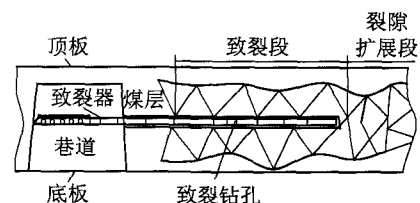
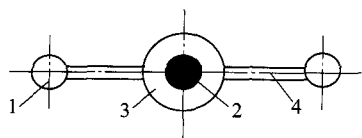


图1 CO₂致裂钻孔施工工艺示意

Fig. 1 Schematic diagram of CO₂ induced fracturing drilling

经过顺层钻孔液态CO₂相变致裂后,为避免钻孔塌孔,全程下筛管,起钻缓慢旋转退出导通杆、储

液管和释放管,并采用“两堵一注”封孔注浆封孔,再用永久抽采管路联接抽采。为考察致裂孔高压波的影响范围和裂隙的发育程度,在致裂孔周围布置考察孔,并通过考察孔测量分析 CO₂相变致裂后的煤层透气性系数、衰减系数、残余瓦斯含量,钻孔布置剖面如图2所示。



1—考察孔;2—致裂孔;3—压缩粉碎圈;4—径向裂隙

图2 CO₂致裂孔示意

Fig. 2 Schematic diagram of CO₂ fracture hole

当致裂孔周围的观测孔附近瓦斯浓度明显升高时,说明致裂孔已经完成致裂,此时致裂程序结束。由于 CO₂相变致裂顺层钻孔技术工艺简单、可靠易行、安全、综合成本较低,可大幅度提高瓦斯抽采率和抽采速度,降低煤层瓦斯含量和瓦斯压力,有效消除煤与瓦斯突出危险性,在具有突出危险的煤层中使用,可安全有效地卸压煤层中“瓦斯突出源”。结合工作面巷道布置方式,设计本煤层顺层致裂钻孔和考察孔对致裂效果进行考察分析,致裂钻孔布置在回风巷内,CO₂相变致裂顺层钻孔布置平面如图3所示。

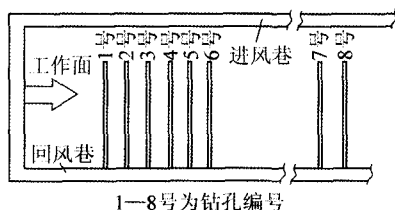


图3 CO₂相变致裂顺层钻孔布置平面示意

Fig. 3 Schematic diagram of CO₂ fracture borehole drilled along seam

2 井下 CO₂致裂增透解吸技术应用

2.1 试验现场概况

绿塘煤矿可采煤层共7层,分别为6_中、6_下、7、10、16、26、33。层间距2.0~43.5 m,平均间距14.65 m, S204回风巷位于首采层南二采区6_中煤层,煤均厚为2.8 m,煤层透气性系数为0.065 3 m²/(MPa²·d),瓦斯含量为16.57 m³/t,瓦斯压力为0.79 MPa,煤层倾角4°~18°,煤层走向NW—SE,倾向SW,正断距40~60 m,工作面标高+1 730—+1 830 m,煤的破坏

类型为Ⅲ类,煤层顶底板均为粉砂岩,地质构造复杂程度属于中等偏复杂程度,区内构造为断层、褶曲和滑坡,为近距离低透气煤层群复杂地质开采条件的突出危险区,普通顺层钻孔抽采瓦斯流量小、浓度低、周期长,抽采效率低,无法解决瓦斯问题。

2.2 致裂钻孔布置

在S204工作面回风巷实施 CO₂相变致裂顺层钻孔增透技术,共设计3个致裂孔,分组布置钻孔,每个致裂孔两侧施工考察孔,每组施工6个钻孔,包括1个致裂孔与5个考察孔,考察孔的列间距为3 m;组间距5 m,在距离3号预裂孔18.2 m处设计2个测试孔,用作增透前的数据测试,孔间距3 m,钻孔直径94 mm,钻孔距底板1.5 m,致裂孔设置在中间位置,如图4所示。

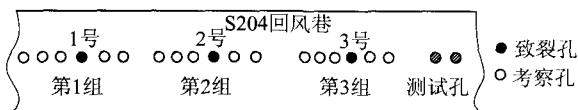


图4 钻孔设计示意

Fig. 4 Schematic diagram of drilling design

2.3 致裂技术的实施

根据现场实际情况,将顺层 CO₂相变致裂地点选在S204回风巷上帮,H3导线点往前12 m处开始布置。据绿塘煤矿的实际条件,各钻孔采用750钻机、 $\phi 75$ mm的钻杆配 $\phi 94$ mm钻头进行施工,施工过程中要固定好钻机位置,严格按设计参数施工,考察孔、致裂孔、测试孔的孔深均为80 m,倾角为2°、方位角为198°、孔径为94 mm。采用慢速推进,保证孔身直、内壁光滑、孔内干净。

顺层 CO₂预裂钻孔施工顺序:①首先施工测试孔1、测试孔2;②再施工1、2、3号致裂孔,现场致裂顺序为:2号→1号→3号,1号致裂孔下致裂器14根(每根2 m),封孔深度15 m;2号致裂孔下致裂器14根,封孔深度10 m;3号致裂孔下致裂器13根,封孔深度15 m。致裂过程中,1号孔和3号孔致裂正常,2号孔由于附近废孔注浆封堵时间较短,致裂过程中存在穿孔现象。③最后施工考察孔并进行连抽,施工考察孔过程中,各组考察孔均从距离致裂孔最远位置开始。为考察致裂前后瓦斯预抽效果,在整个过程中,记录各抽采钻孔瓦斯浓度、流量、负压。

3 致裂效果考察及分析

采用 CO₂相变致裂顺层钻孔技术后,喀斯特地

质条件下的低透气性高瓦斯煤层的矿井瓦斯抽采效果明显,致裂后孔裂隙增加,煤层透气性得到大幅度提升。本次方案通过试验区煤层透气性系数、衰减系数、抽采浓度、流量及残余瓦斯含量来考察致裂效果。

3.1 透气性系数考察及钻孔瓦斯流量自然衰减系数考察

本次测定是采用井下直接测定煤层透气性系数的中国矿院法,其计算基础为径向不稳定流动理论。在测压钻孔压力稳定后,卸掉压力表,利用煤气表测定煤层钻孔在不同时间间隔的流量,根据钻孔瓦斯不稳定径向流动理论测定致裂地点致裂前后的透气性系数,透气性系数考察结果如图5所示。

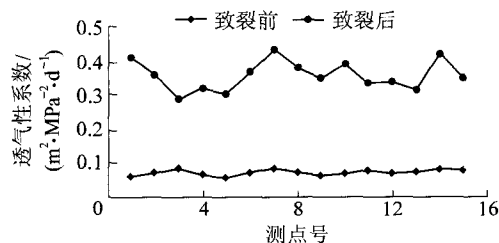


图5 透气性系数考察

Fig. 5 Effects of permeability coefficient

由于CO₂气化体积膨胀而产生的高压波使得煤体松动并产生大量裂隙,气体的尖劈作用使得裂隙继续扩展和延伸,煤层透气性得到提升。由图5可知,煤层的透气性系数在致裂后普遍高于致裂前,致裂稳定后煤层透气性系数为原始的4~5倍。

在测压结束后卸下压力表,利用流量计测定钻孔的自然瓦斯流量,并测其随时间的变化值,直到稳定在某一数值为止;根据测定结果,计算钻孔瓦斯流量衰减系数。具体方法是利用流量计先测定初始流量 q_0 ,经时间 t 后,再测其瓦斯流量 q_t ,然后采用 $q_t = q_0 e^{-\beta t}$ 回归计算衰减系数 β ,衰减系数考察结果如图6所示。

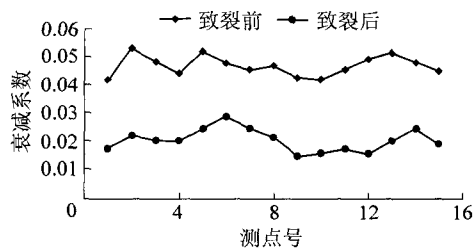


图6 衰减系数考察

Fig. 6 Effects of attenuation coefficient

致裂后CO₂相变在较大的高压波作用下沿孔周

围多种张开型裂隙流动、渗透,由于CO₂的亲煤特性及其膨胀过程对煤层吸附瓦斯的驱赶,使得大量煤层瓦斯持续由吸附状态解吸为游离状态。由图6可知,CO₂相变致裂增透后的钻孔瓦斯流量衰减系数明显低于致裂增透前,致裂后衰减系数降低了53.6%,致裂效果明显。

3.2 顺层CO₂相变致裂残余瓦斯含量考察

测定残余瓦斯含量是检测煤层抽采效果的有效手段,S204回风巷上帮CO₂致裂增透后,抽采一段时间取样测定其残余瓦斯含量。取样测定装备为DGC型瓦斯含量直接测定装置。首先向煤层施工取样钻孔,及时采取预定深度处新鲜煤样到实验室做工业分析、孔隙率等参数,计算煤层瓦斯含量。S204回风巷上帮CO₂致裂区域原始瓦斯含量为16.5654 m³/t,实施增透技术抽采1个月后,对CO₂致裂区域取样检测残余瓦斯含量,取样孔布置在两孔中间,取样深度为30.4~32.0 m,测得残余瓦斯含量见表1。

表1 顺层CO₂相变致裂残余瓦斯含量

Table 1 Residual gas content of CO₂ fracturing along seam

测试点编号	取样深度/m	距预裂孔距离/m	瓦斯含量/(m ³ ·t ⁻¹)
1	31.92	1.50	7.046 2
2	31.16	2.25	7.344 5
3	30.40	4.50	7.804 9
4	30.40	6.00	10.239 4
5	32.68	7.50	13.164 3

根据顺层CO₂相变致裂残余瓦斯检测结果可知,在抽采时间相同的情况下,距离致裂孔1.5~4.5 m的考察孔残余瓦斯含量在8 m³/t以下,抽采率约为55%,距离致裂孔6.5、7.5 m考察孔的残余瓦斯含量远高于8 m³/t,抽采效果与距离成正相关,距预裂孔越近,抽采效果越好。

3.3 顺层CO₂相变致裂钻孔瓦斯抽采浓度及抽采流量考察

驱赶瓦斯是CO₂致裂的作用之一,CO₂致裂驱替破坏了原始煤层瓦斯吸附解吸平衡状态,大量吸附态瓦斯解吸为游离态,瓦斯浓度上升,同时,致裂后大量CO₂充斥在孔隙及裂缝中,根据竞争吸附理论,CO₂在煤基质中的吸附能力高于CH₄,大量CH₄被驱替出来使得瓦斯抽采的浓度较高,致裂前后钻

孔瓦斯抽采浓度及瓦斯抽采量变化曲线如图7所示。

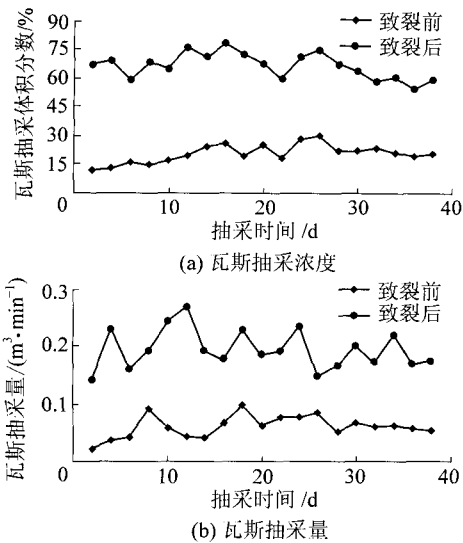


图7 瓦斯抽采浓度及瓦斯抽采量变化
Fig. 7 Variation of gas drainage concentration and gas drainage quantity

通过对致裂前后钻孔瓦斯抽采浓度和抽采混合量的整理分析发现,致裂后的瓦斯抽采浓度和抽采量普遍高于致裂前的平均水平,持续抽采1个月后,浓度有所衰减,但衰减幅度不大,钻孔瓦斯抽采体积分数基本稳定在60%~70%。抽采量保持在 $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右,采用顺层钻孔致裂增透后瓦斯抽采效率提高了约6倍,瓦斯抽采混合流量提高1.71倍,抽采达标周期大幅缩短。

4 结 论

1) 对 CO_2 相变致裂机理及致裂爆破瞬间应力波和裂隙发育的分布发展规律进行了研究。其破煤机理主要是 CO_2 相变从液态转化为气态,体积瞬间膨胀以及气体的尖劈作用使得裂隙继续扩展延伸,同时利用 CO_2 亲煤特性对煤层吸附瓦斯驱替,促进游离,使瓦斯抽采浓度和抽采纯量都保持较高的水平。

2) 通过在贵州绿塘煤矿首采层南二采区6_中煤层S204回风巷上帮采用顺层水平长钻孔 CO_2 致裂技术,煤层透气性系数提高4~5倍,致裂后衰减系数降低了53.6%,瓦斯抽采浓度和抽采量分别提高约3倍和2倍,瓦斯抽采达标周期缩短,证明该技术在贵州煤矿区高瓦斯低透气性煤层中进行增透消突具有一定适应性。

3) 增透后通过测定分析残余瓦斯含量,得出

CO_2 顺层致裂钻孔影响范围约4.5 m,在抽采时间相同的情况下离致裂孔越近,抽采效果越好, CO_2 相变顺层致裂钻孔增透效果明显。

4) 与其他增透技术相比, CO_2 相变致裂顺层钻孔技术工艺简单、设备操作可靠易行、施工周期短、综合成本较低,具有良好的卸压增透效果,同时适用范围更广,具有较好的经济效益。

参考文献 (References):

- [1] 贺超.基于二氧化碳深孔致裂增透技术的低透煤层瓦斯治理[J].煤炭科学技术,2017,45(6):67-72.
HE Chao. Gas control of low gas permeability seam based on deep borehole fracturing and permeability improved technology with carbon dioxide[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (6): 67-72.
- [2] 孙文忠.低渗煤层 CO_2 预裂增透高效瓦斯抽采原理及应用[J].煤炭科学技术,2017,45(1):100-105.
SUN Wenzhong. High efficient gas drainage principle and application of low permeable seam with CO_2 pre-fracturing and permeability improvement [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (1): 100-105.
- [3] 董庆祥,王兆丰,韩亚北,等.液态 CO_2 相变致裂的TNT当量研究[J].中国安全科学学报,2014,24(11):84-88.
DONG Qingxiang, WANG Zhaofeng, HAN Yabei, et al. Research on TNT equivalent of liquid CO_2 phase-transition fracturing [J]. Chinese Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88.
- [4] 刘健,刘泽功,高魁,等.深孔预裂爆破在深井高瓦斯低透气性煤层瓦斯抽采中的应用[J].中国安全生产科学技术,2014,10(5):148-153.
LIU Jian, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Application of deep hole pre-splitting blasting to gas drainage at deep well and low permeability coal seam [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(5): 148-153.
- [5] 张枚润,杨胜强,程健维,等.马依西保护层开采理论分析及数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):123-127.
ZHANG Meirun, YANG Shengqiang, CHENG Jianwei, et al. Theoretical analysis and numerical simulation on protective seam extraction in Mayixi mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 123-127.
- [6] 张小东,张鹏,刘浩,等.高煤级煤储层水力压裂裂缝扩展模型研究[J].中国矿业大学学报,2013,42(4):573-579.
ZHANG Xiaodong, ZHANG Peng, LIU Hao, et al. Fracture extended model under hydraulic fracturing engineering for high rank coal reservoirs [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 573-579.
- [7] 赵娟,刘洪涛,潘霞,等.不同富氧条件下 O_2/CO_2 地下气化试验效果研究[J].煤炭科学技术,2017,45(6):214-220.
ZHAO Juan, LIU Hongtao, PAN Xia, et al. Study on O_2/CO_2 underground coal gasification effect with different oxygen-enriched

- conditions[J].*Coal Science and Technology*, 2017,45(6):214-220.
- [8] 邹全乐,林柏泉,刘 厅,等.割缝预抽后煤瓦斯吸附特性的变化特征[J].*岩石力学与工程学报*,2014,33(10):2117-2124.
ZOU Quanle, LIN Baiquan, LIU Ting, *et al.* Variation of gas adsorption of coal after hydraulic slotting and pre-draining [J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014,33(10):2117-2124.
- [9] 梁卫国,张倍宁,韩俊杰,等.超临界 CO₂ 驱替煤层 CH₄ 装置及试验研究[J].*煤炭学报*,2014,39(8):1511-1520.
LIANG Weiguo, ZHANG Beining, HAN Junjie, *et al.* Experimental study on coal bed methane displacement and recovery by supercritical carbon dioxide injection [J].*Journal of China Coal Society*, 2014,39(8):1511-1520.
- [10] 岳立新,孙可明,郝志勇.超临界 CO₂ 提高煤层渗透性的增透规律研究[J].*中国矿业大学学报*,2014,43(2):319-324.
YUE Lixin, SUN Keming, HAO Zhiyong. Study on increased permeability law of coal seam by supercritical CO₂ [J].*Journal of China University of Mining & Technology*, 2014,43(2):319-324.
- [11] 孙可明,吴 迪,粟爱国,等.超临界 CO₂ 作用下煤体渗透性与孔隙压力-有效体积应力-温度耦合规律试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2013,32(S2):3760-3767.
SUN Keming, WU Di, SU Aiguo, *et al.* Coupling experimental study of coal permeability with pore pressure-effective volume stress-temperature under super critical carbon dioxide action[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013,32(S2):3760-3767.
- [12] 杨宏民,夏会辉,王兆丰.注气驱替煤层瓦斯时效特性影响因素分析[J].*采矿与安全工程学报*,2013,30(2):273-277,284.
YANG Hongmin, XIA Huihui, WANG Zhaofeng. Influencing factors on time-varying characteristics of displacement coalbed methane by gas injection [J].*Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013,30(2):273-277,284.
- [13] 张 悦,张民波,朱天玲,等.低透气性煤层 CO₂ 增透预裂技术应用[J].*科技导报*,2013,31(23):36-39.
ZHANG Yue, ZHANG Minbo, ZHU Tianling, *et al.* Application of CO₂ anti-reflection pre-split technology in low permeability coal seam [J].*Science & Technology Review*, 2013,31(23):36-39.
- [14] 赵立朋.煤层液态 CO₂ 深孔爆破增透技术[J].*煤矿安全*,2013,44(12):76-78,81.
ZHAO Lipeng. Technology of liquid CO₂ deep hole blasting enhancing permeability in coal seam [J].*Safety in Coal Mines*, 2013,44(12):76-78,81.
- [15] 王兆丰,李豪君,陈喜恩,等.液态 CO₂ 相变致裂煤层增透技术布孔方式研究[J].*中国安全生产科学技术*,2015,11(9):11-16.
WANG Zhaofeng, LI Haojun, CHEN Xien, *et al.* Study on hole layout of liquid CO₂ phase-transforming fracture technology for permeability improvement of coal seam [J].*Journal of Safety Science and Technology*, 2015,11(9):11-16.
- [16] 孙建中.基于不同爆破致裂方式的液态二氧化碳相变增透应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [17] 赵 龙,王兆丰,孙矩正,等.液态 CO₂ 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用[J].*煤炭科学技术*,2016,44(3):75-79.
ZHAO Long, WANG Zhaofeng, SUN Juzheng, *et al.* Application of permeability improvement technology with liquid CO₂ phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam [J].*Coal Science and Technology*, 2016,44(3):75-79.
- [18] 孙小明.液态二氧化碳相变致裂穿层钻孔强化预抽瓦斯效果研究[D].焦作:河南理工大学,2014.
- [19] 王海东.突出煤层掘进工作面 CO₂ 可控相变致裂防突技术[J].*煤炭科学技术*,2016,44(3):70-74.
WANG Haidong. CO₂ controllable phase transition fracturing and outburst prevention technology of gateway driving face in outburst seam [J].*Coal Science and Technology*, 2016,44(3):70-74.
- [20] 周西华,门金龙,宋东平,等.液态 CO₂ 爆破煤层增透最优钻孔参数研究[J].*岩石力学与工程学报*,2016,35(3):524-529.
ZHOU Xihua, MEN Jinlong, SONG Dongping, *et al.* Research on optimal borehole parameters of antireflection in coal seam by liquid CO₂ blasting [J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016,35(3):524-529.
- [21] 翟 成,李贤忠,李全贵.煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J].*煤炭学报*,2011,36(12):1996-2001.
ZHAI Cheng, LI Xianzhong, LI Quanguai. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology [J].*Journal of China Coal Society*, 2011,36(12):1996-2001.
- [22] 霍中刚.二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J].*煤炭科学技术*,2015,43(2):80-83.
HUO Zhonggang. New technology of carbon dioxide fracturer applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement [J].*Coal Science and Technology*, 2015,43(2):80-83.