

张东明,白鑫,尹光志,等.低渗煤层液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术及应用[J].煤炭学报,2018,43(7):1938-1950. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0281

ZHANG Dongming,BAI Xin,YIN Guangzhi,et al. Research and application on technology of increased permeability by liquid CO₂ phase change directional jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(7):1938-1950. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0281

低渗煤层液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术及应用

张东明^{1,2},白鑫^{1,2},尹光志^{1,2},饶孜³,何庆兵⁴

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400030; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院,重庆 400030; 3. 四川芙蓉集团实业有限公司 杉木树煤矿,四川 珙县 644500; 4. 四川省安全生产监督管理局(四川煤矿安全监察局)安全技术中心,四川 成都 610000)

摘要:如何实现深部煤层瓦斯的高效抽采是保障我国煤炭企业安全生产的重要问题,而低透气性煤层瓦斯储层增产改造则是其中的核心技术和热点问题。为解决低透气性煤层瓦斯高效抽采技术难题,研究提出了地应力条件下优势射孔致裂方向的确定方法及低渗煤层液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术,现场试验及应用研究形成了液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透网格格式瓦斯抽采方法。研究表明:孔壁破裂压力受钻孔方位角、倾角影响具有明显的方向性,并确定了试验区液态 CO₂ 相变定向射孔优势致裂方向;该技术可有效增加煤样孔隙度、孔径、比表面积、可见孔比例等,改善煤岩体内孔隙结构及渗流能力,提高瓦斯抽采纯流量 9~12 倍,降低煤层瓦斯抽采流量衰减系数 92%;现场试验及 PFC^{2D} 数值模拟研究确定了该技术的影响半径为 9~13 m;应用表明液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透网格格式瓦斯抽采方法,可有效预防低透气高突煤层巷道掘进期间的瓦斯超限问题,提高巷道掘进速度 4~5 倍。

关键词:低渗煤层;液态 CO₂;致裂增透;瓦斯抽采

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2018)07-1938-13

Research and application on technology of increased permeability by liquid CO₂ phase change directional jet fracturing in low-permeability coal seam

ZHANG Dongming^{1,2},BAI Xin^{1,2},YIN Guangzhi^{1,2},RAO Zi³,HE Qingbing⁴

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. Shanmushu Coal Mine, Sichuan Furong Group Industrial Co., Ltd., Gongxian 644500, China; 4. Sichuan Work Safety Technology Center, Sichuan Administration of Work Safety, Chengdu 610000, China)

Abstract: How to achieve an efficient extraction of deep coal seam gas has been a main challenge facing China's energy security while the technology to increase the permeability of coal bed gas has been the focus of recent studies. In order to solve the technical problem of high efficiency gas drainage in deep low permeability coal seam, in this study, the method of advantageous direction of jet fracturing under the condition of in-suit stress are put forward based on theoretical analysis. A novel technology for cracking and increasing permeability in low permeability coal seam namely LCO₂ phase change directional jet fracturing has been proposed and experimented. And a mesh drilling coal seam gas drainage method is proposed based on LCO₂ phase change directional jet fracturing technology. The results show that the fracture pressure of the borehole wall is affected by the azimuth, inclination of borehole and has obvious direction-

收稿日期:2018-03-02 修回日期:2018-05-28 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045-004);重庆市研究生科研创新资助项目(CYB16031);国家自然科学基金重点资助项目(51434003)

作者简介:张东明(1973—),男,内蒙古呼伦贝尔人,教授,博士生导师。E-mail:zhangdm@cqu.edu.cn

ality. The advantageous direction interval of the LCO₂ phase change directional jet fracturing is determined in the test area. LCO₂ phase change directional jet fracturing technology can effectively increase the total porosity, pore size, surface area, the ratio of visible pores of coal sample, improve the pore structure and seepage capacity within the coal matrix to effectively increase the pure flow rate of gas drainage in coal seams by 9 to 12 times, which reduces the flow attenuation coefficient of gas drainage in coal seam by 92%. The variation law of on-site gas drainage parameters and the results of PFC2D particle flow program show that the technology's influence radius is 9–13 m. The mesh drilling coal seam gas drainage method of deep and low-permeability coal seam is based on LCO₂ phase change directional jet fracturing technology, which can effectively prevent gas over alarm value during the roadway drivage with low permeability and high outburst coal seam, and improve drivage speed by 4–5 times.

Key words: low-permeability coal seam; liquid carbon dioxide (LCO₂); fracturing to increased permeability; coal seam gas drainage

矿井瓦斯是成煤过程中生产的伴生气体,是影响我国煤矿安全生产的主要因素,也是一种储量以及热值与天然气相当的不可再生资源^[1]。因此,瓦斯抽采不仅是预防矿井瓦斯灾害的根本保证,同时也是煤层瓦斯综合利用的前提工作。由于我国大多数瓦斯矿井地质条件差,煤层透气性低,裂隙不发育,吸附瓦斯的游离解析速度慢,造成瓦斯抽采困难,矿井瓦斯灾害多发^[2]。自20世纪60年代以来,低渗煤层致裂增透瓦斯强化抽采技术已成为该领域学者长期研究的课题之一。经过长达半个世纪的研究与实践,我国学者已提出:保护层卸压瓦斯抽采技术^[3-4],水力化卸压瓦斯抽采技术^[5-8],常规密集钻孔瓦斯抽采技术^[9],深孔预裂卸压瓦斯抽采^[10]等。上述技术有力的促进了我国低渗煤层瓦斯强化抽采技术的进步,但是受应用条件、煤层赋存环境等因素制约,在应用过程中还存在一定的局限性^[8,11]。目前随着资源开采深度不断增长,深部矿井瓦斯动力灾害危险性不容忽视^[12],因此深部低渗煤层增透技术的研究工作仍具有十分重要的意义。

CO₂ 气体注入煤层能够促进吸附瓦斯的游离解析^[13],可实现 CO₂ 温室气体的有效利用与地质储存。1928年,P. WEIR 研究发明了 Cardox CO₂ 爆破系统用于水泥厂料仓疏通,之后 R. R. KIRKPATRICK 将其应用于采石场安全爆破。20世纪90年代,煤炭科学研究总院在平顶山进行了 Cardox CO₂ 爆破系统地下开采试验。2014年王兆丰等^[14-15]将 Cardox CO₂ 爆破系统进行改进,确定了液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量,研究了液态 CO₂ 相变致裂增透效果及影响半径。之后,周西华^[16]、孙可明^[17]、曹运兴^[18]等分别采用数值模拟、实验研究、现场研究等方法对液态 CO₂ 相变致裂增透技术开展研究,表明:液态 CO₂ 相变致裂增透技术能够有效实现低渗煤层瓦斯增渗。但现阶段的研究大多没有考虑地应力作用下煤层致裂裂

隙演化的方向性,不能实现定向致裂,且对于液态 CO₂ 致裂效果的研究单纯采用瓦斯抽采流量浓度进行研究,没有对煤层孔隙结构变化规律、瓦斯抽采衰减规律、影响半径等进行系统的研究。

笔者在现有研究基础^[14-18]上,理论研究获得了地应力条件下穿层钻孔优势射孔致裂方向确定方法,结合现场实践对 Cardox CO₂ 系统技术装备进行改造,提出了液态 CO₂ 相变定向射孔致裂技术;进行现场试验,分析了致裂前后致裂孔煤样孔隙度变化规律及射孔致裂技术增透效果,提出了低渗煤层液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透网格式瓦斯抽采方法,并分析了该方法在巷道掘进瓦斯超限防治过程中的应用效果。

1 技术原理及装置简介

1.1 地应力作用下液态 CO₂ 相变定向射孔优势方向理论分析

受地应力影响水力压裂^[19]、深孔爆破^[20]等致裂增透技术在应用过程均存在裂隙不均匀分布特征,因此,理论研究获得地应力作用下定向射孔优势方向,对于指导现场钻孔施工、提高致裂增透效果具有重要意义。

在研究过程中,假设孔壁为均质各向同性的线弹性煤岩体,采用弹性力学理论建立地应力作用下射孔致裂孔壁破裂压力计算模型。首先对大地坐标系(X, Y, Z)内的主应力($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)进行坐标转换至钻孔孔眼坐标系(x, y, z),如图1所示。具体步骤如下:先将(X, Y, Z)以 OZ 轴按照右手定则旋转角 α , 转换为坐标系(x', y', z');再将(x', y', z')坐标系以 oy' 轴,按右手定则旋转角 β , 转换为坐标系(x, y, z), 其中 α 为钻孔相对 σ_1 方向的相对方位角,即钻孔相对方位角。 β 为钻孔孔眼方向线与铅垂线的夹角,即孔斜角。

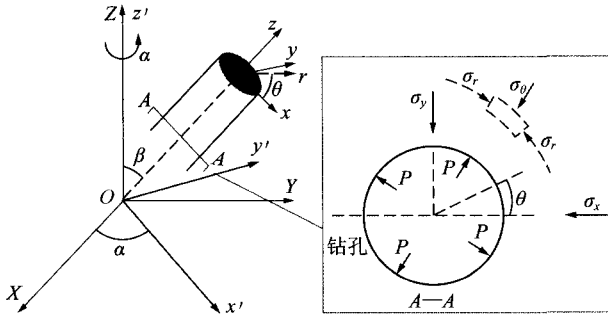


图 1 钻孔孔轴的坐标变换示意

Fig. 1 Schematic diagram of coordinate transformation of drilling hole axis

采用式(1),将测试得到的三维地应力换算到钻孔笛卡尔坐标系^[21]。

$$\begin{cases} \sigma_x = (\sigma_2 - \sigma_1) \cos^2 \alpha \sin^2 \beta + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos^2 \alpha + \sigma_3 \\ \sigma_y = (\sigma_1 - \sigma_2) \sin^2 \beta + \sigma_2 \\ \sigma_z = (\sigma_2 - \sigma_1) \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + (\sigma_3 - \sigma_1) \cos^2 \alpha + \sigma_1 \\ \tau_{xy} = (\sigma_2 - \sigma_1) \cos \alpha \sin \beta \cos \beta \\ \tau_{xz} = [\sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 - \sigma_2) \sin^2 \beta] \sin \alpha \cos \alpha \\ \tau_{yz} = (\sigma_2 - \sigma_1) \sin \alpha \sin \beta \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为坐标系 X, Y, Z 方向的应力分量, MPa; $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ 为剪应力分量, MPa; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为最大、中间、最小主应力, MPa; α, β 分别为钻孔相对方位角及孔斜角, ($^\circ$)。

考虑地应力及射孔应力的叠加作用,可以获得钻孔孔壁围岩 r 处应力分布为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{3R^2}{r^2} - \frac{4R^2}{r^2}\right) \times \\ \quad \cos 2\theta + \tau_{xy} \left(1 + \frac{3R^2}{r^2} - \frac{4R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + p_{wf} \frac{R^2}{r^2} \\ \sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta\right) \times \\ \quad \left(1 + \frac{3R^2}{r^2}\right) - p_{wf} \frac{R^2}{r^2} \\ \sigma_{zz} = \sigma_z - \nu \left[2(\sigma_x + \sigma_y) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \frac{R^2}{r^2} \sin 2\theta\right] \\ \sigma_{r\theta} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta\right) \left(1 - \frac{3R^4}{r^4} + \frac{2R^2}{r^2}\right) \\ \sigma_{\theta z} = (\tau_{yz} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \\ \sigma_{zr} = (\tau_{xz} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, R, r 分别为钻孔直径和极坐标半径, m; p_{wf} 为孔内射孔压力, MPa; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{zz}, \sigma_{r\theta}, \sigma_{\theta z}, \sigma_{zr}$ 分别为距离钻孔轴心 r 且与 σ_x 呈 θ 角处的径向、切向、轴向正应力及剪应力分量, MPa。

由式(2)可以得到钻孔孔壁 ($R=r$) 处应力分布为

$$\begin{cases} \sigma_r = p_{wf} \\ \sigma_\theta = (\sigma_x + \sigma_y) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - \\ \quad 4\tau_{xy} \sin 2\theta - p_{wf} \\ \sigma_{zz} = \sigma_{zz} - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy} \sin 2\theta \\ \sigma_{\theta z} = 2\tau_{yz} \cos \theta - 2\tau_{xz} \sin \theta \\ \sigma_{r\theta} = \sigma_{zr} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

钻孔孔壁上任意点的主应力满足,

$$\begin{vmatrix} \sigma_r - \sigma & \sigma_{r\theta} & \sigma_{zr} \\ \sigma_{\theta r} & \sigma_\theta - \sigma & \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{zr} & \sigma_{z\theta} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0, \text{ 由此结合式(3)可}$$

以得到钻孔孔壁上任意点的主应力为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_r \\ \sigma_2 = [(\sigma_\theta + \sigma_{zz}) + \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_{zz})^2 + 4\sigma_{\theta z}^2}] / 2 \\ \sigma_3 = [(\sigma_\theta + \sigma_{zz}) - \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_{zz})^2 + 4\sigma_{\theta z}^2}] / 2 \end{cases} \quad (4)$$

根据弹性力学理论结合式(4),可以得出钻孔孔壁最大拉应力为

$$\sigma_{\max}(\theta) = \sigma_3 = [(\sigma_\theta + \sigma_{zz}) - \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_{zz})^2 + 4\sigma_{\theta z}^2}] / 2 \quad (5)$$

射孔致裂过程中,钻孔孔壁破裂的条件为孔壁最大拉应力 $\sigma_{\max}(\theta)$ 大于孔壁围岩的最大抗拉强度 σ_t , 则射孔致裂孔壁破裂的临界条件为

$$\sigma_3 = [(\sigma_\theta + \sigma_{zz}) - \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_{zz})^2 + 4\sigma_{\theta z}^2}] / 2 = \sigma_t \quad (6)$$

将式(3)代入式(6)可以得到

$$p = (\sigma_x + \sigma_y) - 2(\sigma_x + \sigma_y) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta - \frac{4(\tau_{yz} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta)^2 - \sigma_t^2}{\sigma_z + \sigma_t - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy} \sin 2\theta} - \frac{\sigma_t[\sigma_z - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy} \sin 2\theta]}{\sigma_z + \sigma_t - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy} \sin 2\theta} \quad (7)$$

由式(1)和式(7)可以看出孔壁破裂压力和地应力大小、孔壁抗拉强度、泊松比及钻孔方位角、倾角等密切相关;在确定地点的孔壁破裂压力受方位角、倾角影响具有一定差异,因此在地应力作用下存在射孔致裂优势方向,分析提出地应力作用下液态 CO_2 相

变定向射孔优势方向判断方法的一般步骤如图 2 所示,图中 $\alpha_i, \beta_{ij}, \theta_{ijk}$ 是对式(1), (7)中 α, β, θ 分别在区间 $(0^\circ \sim 360^\circ)$ 、 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ 、 $(0^\circ \sim 360^\circ)$ 内遍历取值。

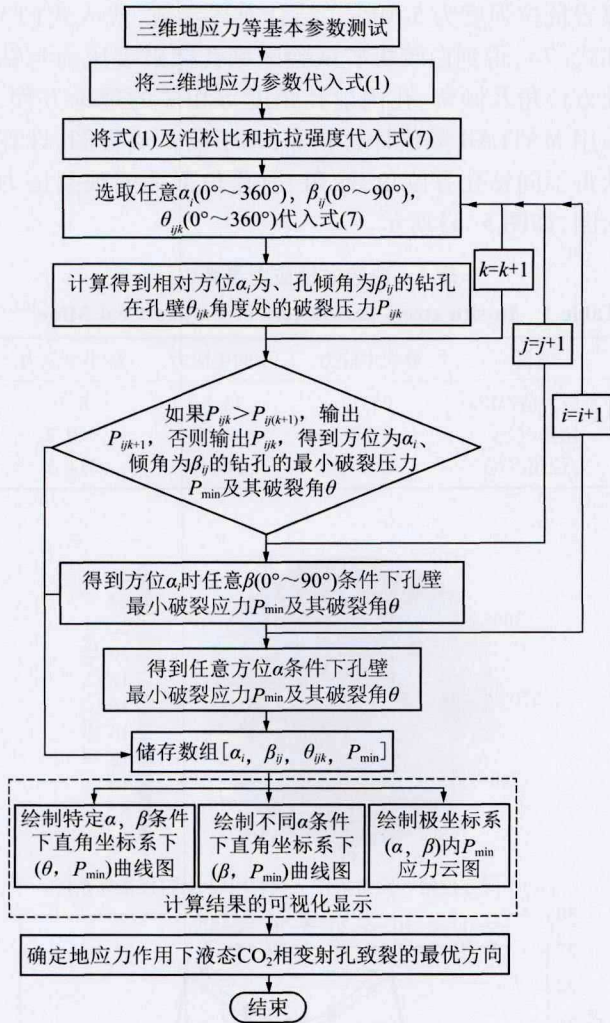


图 2 液态 CO₂ 相变定向射孔优势方向确定流程

Fig. 2 Flow chart for advantageous direction judgment method of liquid CO₂ jet fracturing flow chart

1.2 液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术原理分析

液态 CO₂ 相变射孔致裂技术原理^[14-15] 是利用增压泵将液态 CO₂ 进行增压并灌装输入至内置电加热活化器和定压定向破裂片的储气管中,直至储气管内 CO₂ 气体转变为高压超临界状态。在进行液态 CO₂ 相变射孔致裂过程中,采用发爆器激活储液管内的电加热活化器,瞬间释放大量的热,使得储液管内温度瞬间急速升高,储液管内压力瞬间上升,超过储液管内定向定压破裂片的破坏临界压力。之后,储液管内高压超临界 CO₂ 瞬间卸压,CO₂ 气体快速膨胀,在有限空间内形成高能 CO₂ 气流,由释放管的释放孔内

喷出,形成高压 CO₂ 气流作用于煤岩体孔壁上。在高压 CO₂ 气流作用下在孔口形成射流冲击孔道,在孔道周边产生宏观裂隙及损伤区,产生明显的卸压作用,之后在地应力作用下孔道周边应力再次平衡,孔道周边裂隙不断演化扩展,形成裂隙网络^[20-21],如图 3 所示。在形成孔道、裂隙扩展过程中,一方面,由于裂隙扩展促使煤层卸压,使得煤层内吸附瓦斯自由扩散,向卸压区内裂隙通道流动;另一方面,CO₂ 气体进入卸压后的煤岩体裂隙,在竞争吸附作用下促进甲烷的游离解析,提高卸压裂隙内的瓦斯浓度。

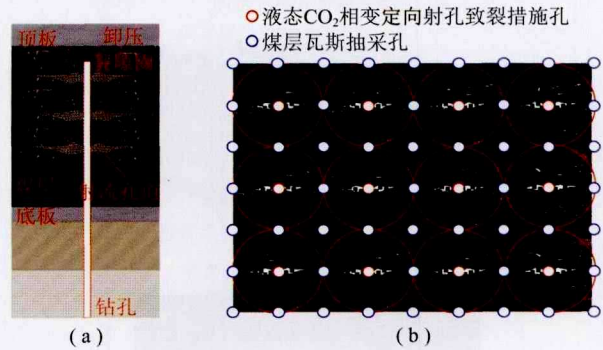


图 3 液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术原理示意

Fig. 3 Schematic diagram of liquid CO₂ phase change directional jet fracturing

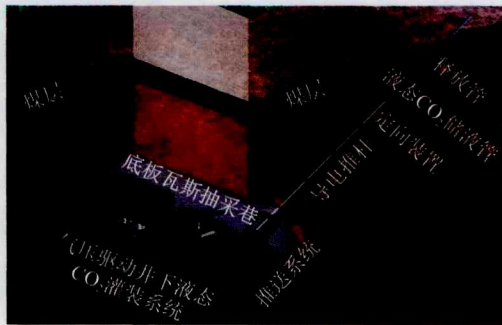
(a) 液态 CO₂ 相变定向射孔致裂钻孔剖面示意;

(b) 液态 CO₂ 相变定向射孔致裂平面示意

1.3 液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透装置组成

笔者提出的液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术,是考虑到三维地应力作用下钻孔孔壁的射孔致裂存在优势方向,为了实现优势致裂方向上的人工可控定向射孔致裂,增加了定向装置,可以显示该装置释放孔在钻孔内的角度,实现高压液态 CO₂ 相变射孔致裂角度的调节控制,实现真正意义上的人工定向致裂。液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透装置由气压驱动井下液态 CO₂ 灌装系统、液态 CO₂ 储液管^[14-15]、定向射孔致裂增透系统、导电推杆等装置组成,如图 4(a) 所示。气压驱动井下液态 CO₂ 灌装系统示意图如图 4(b) 所示,主要由:气动增压系统、储液罐、灌装控制系统、运输系统等组成,主要作用为采用井下压风驱动气动增压泵,实现 CO₂ 气体的井下增压灌装,主要特点为增压过程采用压风驱动,不会产生电火花,安全性高,可满足液态 CO₂ 储液管的井下规模化增压灌装;定向射孔致裂增透系统主要由定向装置(图 4(c))、释放管等组成,主要作用为实现射孔角度的可视化显示,能够满足定向射孔致裂增透的现场应用需求。液态 CO₂ 储液管主要由:电加热活化

器、定压定向破裂片、灌装阀及密封系统、储液管管体组成,是高压高能 CO₂ 气体的发生容器。



(a) 系统总装示意图



(b) 井下液态CO₂灌装系统



(c) 定向装置

图 4 液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透装置组成

Fig. 4 Device composition of liquid CO₂ phase change directional jet fracturing

2 现场试验及试验结果分析

2.1 工程背景

为了验证液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术在低渗煤层致裂增透方面的应用效果,以川煤集团白皎煤矿为试验基地开展相关试验及应用研究。白皎煤矿位于川南长宁—威远国家级页岩气示范区,煤层瓦斯地质储量共计 1 407.17 Mm³,平均资源量丰度 1.04×10⁸ m³/km²,为中等储量丰度类别,矿区主采 B₄、B₂ 煤层, B₃ 煤层局部可采煤层,总厚平均为 8.1 m。2016 年瓦斯等级鉴定绝对涌出量 86.071 m³/min,相对瓦斯涌出量 48.63 m³/t,煤层透气性系数 2.7×10⁻³~3.0×10⁻² m²/(MPa²·d),为低透气性煤层。由于矿区地质条件复杂、煤层透气性低,瓦斯抽采困难,造成矿井瓦斯灾害严重。本次现场试验位于 238 底板道,主要针对 B₄ 煤层,煤层瓦斯压力值在 1.57~3.50 MPa,瓦斯含量为 18.20 m³/t,为严重煤与瓦斯突出煤层。

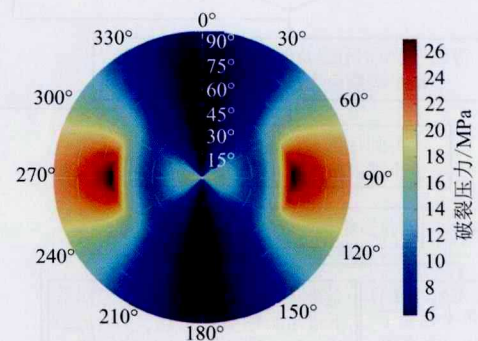
2.2 液态 CO₂ 相变定向射孔优势方向确定

试验地点的三维地应力参数采用张东明等^[22] 研究结果,见表 1;煤岩泊松比、煤岩抗拉强度等参数采用彭世龙等^[23] 研究结果,取煤岩泊松比为 0.25,孔壁煤岩抗拉强度为 5 MPa。结合上述参数,代入式(1)和式(7),得到白皎煤矿试验区域孔壁破裂压力与钻孔方位角及倾角、孔内射孔角度等相关的理论方程,采用 MATLAB 数值计算软件,基于图 2 流程图,计算获得不同钻孔方位角、倾角、射孔角下孔壁破裂压力云图,如图 5(a)所示。

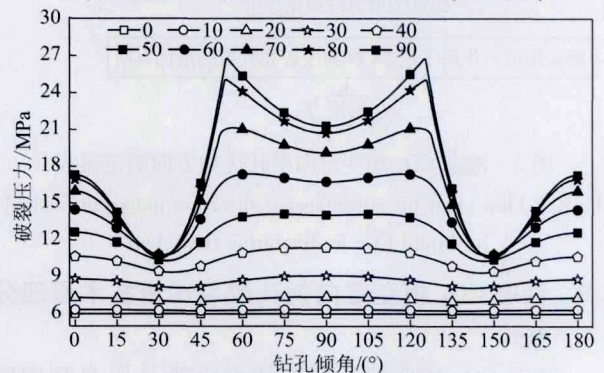
表 1 白皎矿地应力参数^[22]

Table 1 In-situ stress parameters of Baijiao Coal Mine^[22]

项目	最大主应力	中间主应力	最小主应力
主应力值/MPa	25.1	13.8	8.7
倾角/(°)	47.8	-79.2	-69.2
方位角/(°)	151.7	240.5	314.5



(a) 不同方位角、倾角条件下破裂压裂云图(极坐标系)



(b) 方位角定不同钻孔倾角条件下破裂压裂变化规律

图 5 孔壁破裂压力变化规律

Fig. 5 Change rules of wellbore fracturing pressure

由图 5(a) 可以看出:孔壁的最小破裂压力 p_{\min} 随钻孔相对方位角 α 、孔倾角 β 的变化而表现出较大的差异性,在 (α, β) 为 $(271, 56)$ 时 $p_{\min} = 26.7$ MPa,而在 (α, β) 为 $(180, 30)$ 时 $p_{\min} = 6$ MPa,前者为后者的 4.45 倍。且由图 5(a) 可以看出在钻孔相对方位角 α 为 $[0, 30]$, $[150, 210]$, $[330, 360]$ 时, p_{\min} 相对较低。由图 5(b) 可以看出尤其在 α 为 0(或 360) 和 180 时,

任意倾角钻孔的 p_{min} 均取得最小值,在 α 为 [30, 150], [210, 330], 且 β 为 [45, 90], [0, 25] 时, p_{min} 相对较大。在方位角 α 一定的条件下,倾角在 [0, 45] 和 [135, 180] 破裂压力 p_{min} 取值相对较小,在倾角为 30, 150 时 p_{min} 取得最小值,在倾角为 54, 125 时 p_{min} 取得最大值。

综合上述分析可以看出,致裂增透过程中,孔壁起裂应力随钻孔方位角及倾角的改变而改变,因此在上述液态 CO₂ 相变定向射孔优势方向确定过程中,应结合现场巷道与煤层位置关系进行优化布置。且孔壁起裂首先从相对方位角 α 为 [0, 30], [150, 210], [330, 360] 区间段,即最大主应力近似平行的方向,这与以往的研究结果类似^[19];获得白皎煤矿试验区域液态 CO₂ 相变定向射孔最优方向区间为 $\alpha \in [0, 30] \cup [150, 210] \cup [330, 360]$,若受应用现场巷道与煤层位置关系或其他特殊因素影响钻孔相对方位角若布置在 $\alpha \in [30, 150] \cup [210, 330]$ 时,钻孔倾角 β 应设置为 [25, 45]。

2.3 现场试验参数及试验过程

2.3.1 试验及测试钻孔布置方式

为了验证分析液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术在低渗煤层致裂增透瓦斯强化抽采应用效果及其影响半径。在研究过程中设置了液态 CO₂ 相变定向射孔致裂措施孔 (F₁, F₂, F₃), 试验区域瓦斯抽采孔 (G₁ ~ G₁₄), 常规瓦斯抽采孔 (C₁ ~ C₁₂), 钻孔布置如图 6 所示, 钻孔布置参数见表 2。

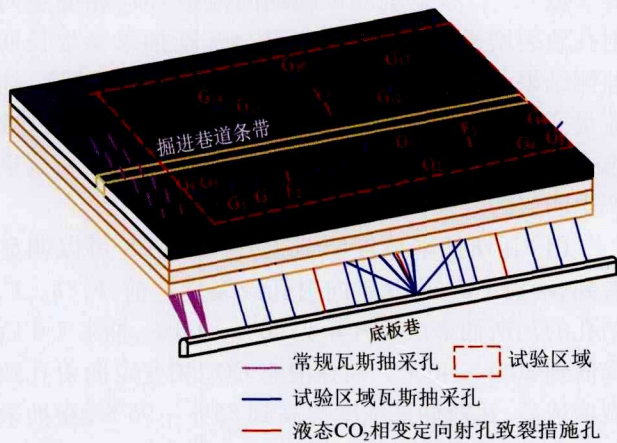


图 6 钻孔布置示意

Fig. 6 Schematic diagram of the layout of a test borehole

2.3.2 试验过程

依次施工 G₁ ~ G₁₄ 瓦斯抽采孔、C₁ ~ C₁₂ 常规瓦斯抽采孔和 F₁, F₂, F₃ 致裂孔, 施工完成后取样、封孔, 进行致裂前煤层瓦斯抽采效果监测。7 d 后, 将液态 CO₂ 相变定向射孔致裂措施孔重新打开, 进行

表 2 钻孔布置参数

Table 2 Parameter of the layout of a test borehole

致裂孔施工参数				
编号	相对方位角/(°)	倾角/(°)	孔长/m	最小破裂压/MPa
F ₁	2.5	42	75.1	6.01
F ₂	2.5	53	55.1	6.02
F ₃	2.5	53	55.1	6.02
瓦斯抽采流量监测孔施工参数				
钻孔编号	方位角/(°)	倾角/(°)	孔长/m	与致裂孔距离/m
G ₁ ~ G ₇	2.5	54	49.7	5, 7, 9, 9, 9, 13, 13
G ₈	317.0	46	61.0	15
G ₉	48.0	46	61.0	15
G ₁₀	2.5	37	89.1	15
G ₁₁	341.5	44	72.6	20
G ₁₂	24.0	44	73.1	20
G ₁₃	28.0	41	77.0	25
G ₁₄	337.0	41	77.1	25

液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透施工, 施工后再次取样、封孔, 进行致裂后煤层瓦斯抽采效果长期监测。为了分析液态 CO₂ 相变定向射孔致裂前后试验区域煤岩体的孔隙度变化特征对采集到的煤样进行压汞测试; 根据试验区域瓦斯抽采长期监测结果, 分析了致裂前后试验区域煤层气抽采的浓度、流量、衰减度等参数的变化规律, 分析获得了液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术在增加煤层瓦斯抽采量方面的应用效果及其影响半径。

2.4 试验结果分析

2.4.1 孔隙结构变化规律分析

煤岩体的孔隙结构是控制煤层对瓦斯吸附能力的主要因素, 对煤岩体瓦斯渗透率有显著的影响^[27]。笔者采用压汞法对液态 CO₂ 相变定向射孔致裂前后试验区域煤岩体的孔隙结构进行测试表征, 分析致裂前后煤岩体孔隙结构变化规律, 得到煤样孔隙参数见表 3。其中 1 ~ 3 号、1-1 ~ 3-1 号分别取自 F₁ ~ F₃ 孔内致裂前后。

表 3 煤样孔隙度参数

Table 3 Parameter of porosity of coal sample

编号	总孔隙度/%	孔径/ μm	总表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
1 号	19.440 3	0.014 301 ~ 176.301 682	0.037
2 号	9.954 3	0.014 352 ~ 160.826 981	0.006
3 号	10.589 0	0.014 278 ~ 203.910 126	0.005
1-1 号	22.610 8	0.014 264 ~ 182.705 811	0.719
2-1 号	13.502 4	0.014 355 ~ 181.029 602	0.009
3-1 号	10.850 7	0.014 279 ~ 209.403 214	0.008

由表3可以看出,液态CO₂相变定向射孔致裂后,试验区域煤岩体的总孔隙度,分别从19.4403%,9.9543%,10.5890%增长到22.610%,13.5024%,10.8507%,分别提高16.31%,35.68%,2.46%。液态CO₂相变定向射孔致裂后,煤岩体最大孔径分别从176.3 μm提高到182.7 μm,160.8 μm提高到181.0 μm,203.9 μm提高到209.4 μm,分别增加了3.63%,12.56%,2.69%。煤样总比表面积分别增加94.32%,50%和60%。

得到致裂前后试验区域煤样孔径分布柱状图,按照B. B. 霍多特^[24]研究结论,将煤岩体内空隙按照孔径大小分为过渡孔(0.01~0.1 μm)、中孔(0.1~1 μm)、大孔(1~100 μm)、可见孔(>100 μm),并分析得到各类孔占总孔的百分比,如图7(限于篇幅仅列出F₁煤样孔径分布直方图)及表4所示。其中1~3号为致裂前煤样,1-1~1-3号为致裂后煤样。

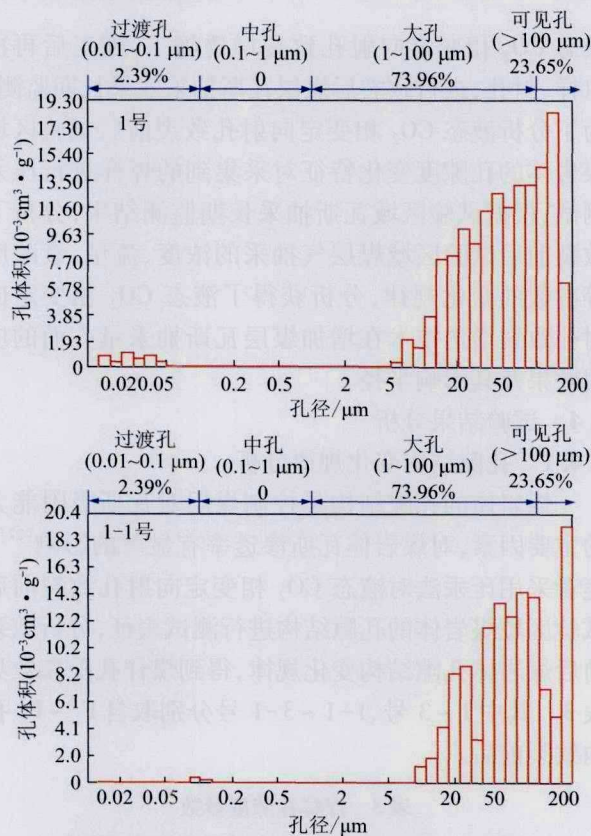


图7 煤样孔径分布直方图

Fig. 7 Histogram of pore size distribution of coal samples

由图7及表4可以看出,试验区域煤样的孔径分布^[25-26]主要是由大孔(51.59%~75.28%),其次是可见孔(23.65%~48.66%)组成。液态CO₂相变定向射孔致裂后可见孔占比分别增加了2.49%,49.16%和0.81%。B. B. 霍多特^[24]的研究表明,大孔主要构成煤岩体的层流渗透区,而可见孔是层流和

紊流流动并存的渗流通道,因此,煤层基质中的可见孔增加可以在一定程度上提高煤层渗透率。以上结果表明,液态CO₂相变定向射孔致裂增透技术可以有效的改善煤岩体基质内孔隙结构,并促进煤岩体基质内孔隙发育,改善煤层瓦斯渗流条件。分析认为主要有两个方面的原因:①在液态CO₂相变定向射孔致裂过程中,产生的瞬间二氧化碳气体应力波作用于孔壁煤岩体上,使煤体宏观裂隙发展广泛,同时,煤基质中孔隙的数量和大小也产生一定程度的增加^[27]。②在液态CO₂作用下煤中有机质及矿物质部分溶解,使得煤岩体内孔隙增加。

表4 煤样孔径大小分布占比^[25-26]

Table 4 Pore size distribution of coal sample^[25-26]

编号	%			
	过渡孔 0.01~0.1 μm	中孔 0.1~1 μm	大孔 1~100 μm	可见孔 >100 μm
1号	2.39	—	73.96	23.65
2号	5.27	0.78	77.05	16.74
3号	—	0.14	51.59	48.27
1-1号	0.48	—	75.28	24.24
2-1号	—	—	75.03	24.97
3-1号	—	0.99	50.35	48.66

注:表中“—”为测试结果接近“0”。

2.4.2 液态CO₂相变定向射孔致裂增透效果分析

浓度、流量及衰减系数是反映瓦斯抽采效率的重要参数^[2,18]。根据现场试验期间液态CO₂相变定向射孔致裂增透措施孔(F₁, F₂, F₃)瓦斯抽采参数长期监测结果,分析得到致裂前后煤层瓦斯抽采浓度、纯流量变化情况如图8所示。从图8可以看到,通过液态CO₂相变定向射孔致裂增透后煤层瓦斯抽采效果产生明显的效果,主要体现在3个方面:

(1) 瓦斯抽采浓度明显上升。由图8可以明显看到,液态CO₂相变定向射孔致裂增透前,F₁, F₂, F₃钻孔的瓦斯抽采浓度开始为40%~60%,抽采7 d后降低到20%~40%。而在液态CO₂相变定向射孔致裂增透后,瓦斯抽采浓度提高到85%~95%,在抽采一个月后,瓦斯浓度仍可达到70%以上。

(2) 瓦斯抽采纯流量明显增长。图8曲线表明,液态CO₂相变定向射孔致裂增透后煤层瓦斯抽采纯流量产生明显的增长趋势。表5给出了致裂前煤层瓦斯抽采平均纯流量值(\bar{F}_b)、致裂后煤层瓦斯抽采纯流量值(F_a)及平均纯流量值(\bar{F}_b)、增透后瓦斯抽采纯流量增长倍数等统计参数。由表5可以看出,液态CO₂相变定向射孔致裂增透当天,瓦斯抽采流量

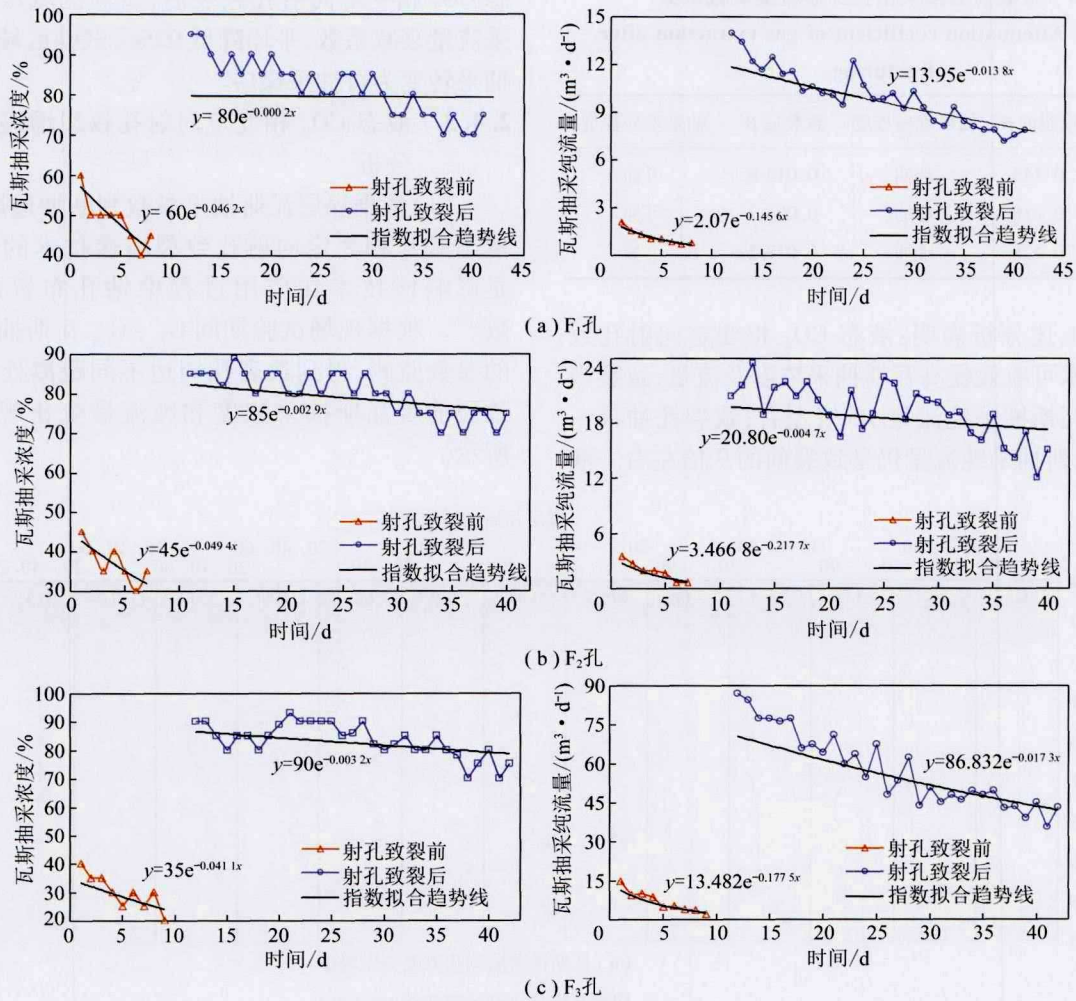


图 8 致裂前后煤层瓦斯抽采浓度及流量变化规律

Fig. 8 Change law of gas extraction concentration and flow in coal seam before and after cracking

表 5 致裂增透后瓦斯抽采纯流量增长倍数

Table 5 Increase of flow rate of gas extraction after fracturing

钻孔编号	\bar{F}_b	F_a	\bar{F}_a	$\frac{F_a}{\bar{F}_b}$	$\frac{\bar{F}_a}{\bar{F}_b}$
F ₁	1.15	13.95	9.98	12.15	8.69
F ₂	1.84	20.81	19.17	11.33	10.44
F ₃	6.93	86.83	57.51	12.53	8.30

分别增加 12.15, 11.33, 12.53 倍, 平均增加 12 倍; 抽采一个月后瓦斯抽采平均纯流量分别增加 8.69, 10.44, 8.30 倍, 平均增加 9.14 倍。

(3) 煤层瓦斯抽采流量衰减系数明显降低。煤层瓦斯流量衰减系数是瓦斯抽采流量随时间变化的特征系数, 可作为评价煤层瓦斯抽采难易程度的指标^[2, 28]。我国煤矿瓦斯抽放规范规定, 瓦斯抽采流量衰减系数小于 0.003 的属于容易抽采煤层, 可直接进行瓦斯抽采; 大于 0.05 的属于难抽采煤层, 需要采取

增透措施后才能进行瓦斯抽采, 介于 0.003 和 0.05 之前的属于可抽采煤层。因此, 降低煤层瓦斯衰减系数具有重要的意义, 其计算公式^[2]为

$$q_t = q_0 e^{-\beta' t} \quad (9)$$

其中, q_t 为抽采钻孔经 t 日抽采时的瓦斯流量, m^3/min ; q_0 为瓦斯抽采钻孔的初始瓦斯流量, m^3/min ; t 为瓦斯抽采时间, d ; β' 为钻孔瓦斯流量衰减系数, d^{-1} 。根据式(9)对相变定向射孔致裂孔瓦斯抽采浓度、纯流量监测数据进行拟合, 得到 F₁, F₂, F₃ 三个钻孔瓦斯流量衰减系数见表 6。由表 6 可以看到, 液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透前试验区域煤层瓦斯抽采流量衰减系数分别为: 0.145, 0.218, 0.178, 平均为 0.181, 均为难抽采煤层。液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透后, 试验钻孔煤层瓦斯抽采流量衰减系数分别为: 0.013 8, 0.004 7, 0.018 2, 分别降低了 90.4%, 97.7%, 89.9%, 经液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术后, 均转变为可抽采煤层。

表 6 致裂前后抽采钻孔瓦斯流量衰减系数
Table 6 Attenuation coefficient of gas extraction after fracturing

钻孔编号	致裂前 β'	抽采难易程度	致裂后 β'	抽采难易程度
F ₁	0.145	难抽	0.013 8	可抽
F ₂	0.218	难抽	0.004 7	可抽
F ₃	0.178	难抽	0.018 2	可抽

综合上述分析表明:液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术可有效提高瓦斯抽采浓度及流量,致裂当天可提高瓦斯抽采纯流量 12 倍左右;致裂孔抽采一个月后,瓦斯抽采纯流量仍是致裂前的 9 倍左右。液

态 CO₂ 相变定向射孔致裂后,试验区域煤层瓦斯抽采流量衰减系数,平均降低 92%,试验区域煤层由难抽采转变为可抽采煤层。

2.4.3 液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透影响半径分析

(1) 依据煤层瓦斯抽采参数判断增透影响半径。液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术的影响半径是影响该技术在应用过程中钻孔布置的重要参数^[3]。根据现场试验期间 G₁ ~ G₁₄ 瓦斯抽采监测孔的参数监测,得到致裂孔周边不同距离处抽采孔在致裂前后瓦斯抽采浓度和纯流量变化规律如图 9 所示。

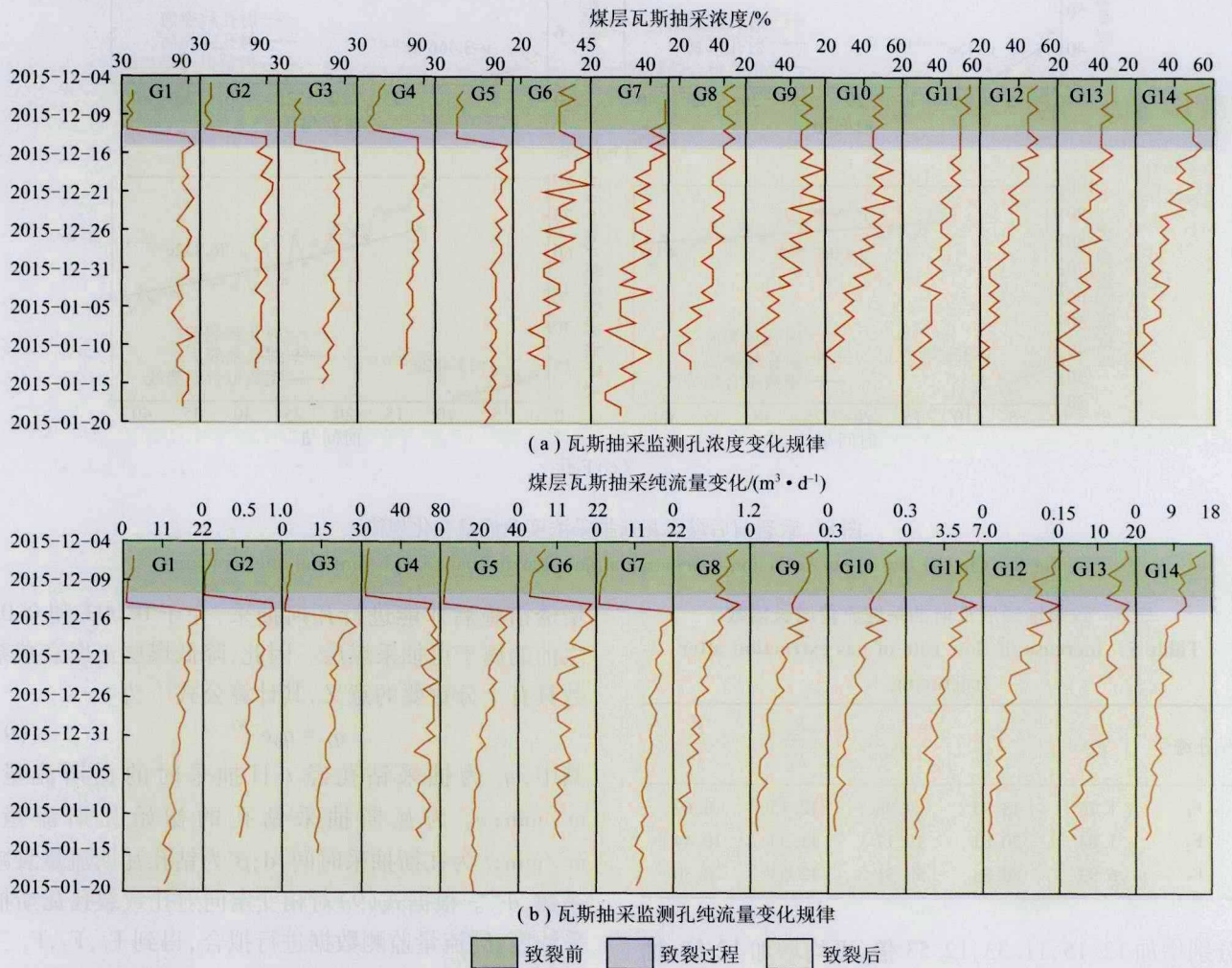


图 9 试验区域瓦斯抽采监测孔浓度及纯流量变化规律

Fig. 9 Change law of concentration and pure flow of gas extraction in test area

根据图 9 可知:液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透前后,致裂孔周围不同距离处抽采孔的瓦斯浓度和纯净流量具有不同的变化规律。从图 9(a) 可以看出,抽采孔 G₁ ~ G₅ 瓦斯浓度在致裂增透后有明显的增加趋势,最大增幅为 2.38 倍,最小增幅为 1.87 倍;

而抽采孔 G₆ ~ G₁₄ 的瓦斯浓度在致裂增透后没有明显的增加趋势。由图 9(b) 可以看出,致裂增透后抽采孔 G₁ ~ G₇ 的瓦斯抽采纯流量明显增加,最大增幅为 13.50 倍,最小增幅为 3.06 倍;抽采孔 G₈ ~ G₁₄ 没有明显增加。以上分析表明试验区域瓦斯抽采浓度

及流量的变化存在明显的距离效应。

由图 9 试验区域瓦斯抽采监测孔浓度及纯流量变化规律分析得到致裂后致裂孔周边不同距离处瓦斯抽采浓度和纯净流量的变化情况,如表 7 和图 10 所示。

表 7 试验区域致裂孔周边抽采孔瓦斯浓度及流量增长规律
Table 7 Growth law of gas concentration and flow rate in the extraction hole of the test area

编号	距离/m	\bar{F}_b	F_a	$\frac{F_a}{\bar{F}_b}$	\bar{C}_b	C_a	$\frac{C_a}{\bar{C}_b}$
G ₁	5	1.96	21.62	11.03	37.86	90	2.38
G ₂	7	0.06	0.88	13.60	37.86	90	2.38
G ₃	9	2.34	24.97	10.67	46.43	85	1.83
G ₄	9	5.38	79.56	14.78	47.14	85	1.80
G ₅	9	3.14	32.80	10.43	51.43	95	1.85
G ₆	13	6.91	28.22	4.08	36.43	40	1.10
G ₇	13	3.91	11.66	2.98	43.57	45	1.03
G ₈	15	0.85	1.03	1.21	42.14	45	1.08
G ₉	15	0.21	0.26	1.29	47.22	50	1.06
G ₁₀	15	0.21	0.26	1.29	47.22	50	1.06
G ₁₁	20	5.41	6.73	1.25	52.14	50	0.96
G ₁₂	20	0.13	0.17	1.24	46.43	50	1.08
G ₁₃	25	18.0	21.77	0.84	42.86	40	0.93
G ₁₄	25	12.4	12.03	0.97	53.57	55	1.03

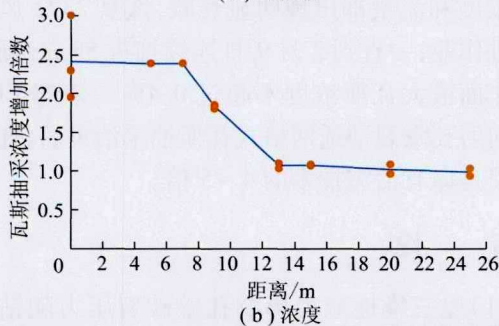
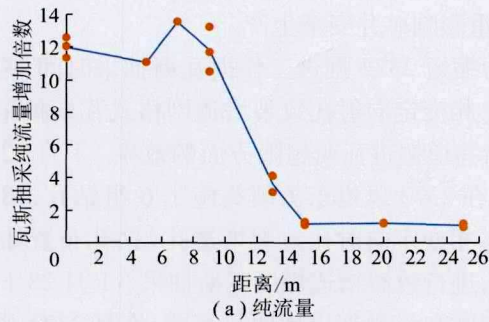
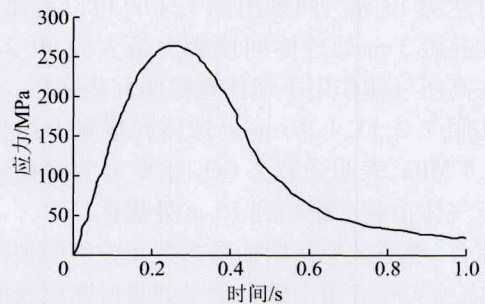


图 10 致裂前后纯流量、浓度增加倍数与距离关系曲线
Fig. 10 Relation curves of the increase times of pure flow rate, concentration between distance

由表 7 及图 10 可以看出,瓦斯抽采纯流量和浓

度的增加倍数随着与致裂孔距离的变化而变化。根据图 10(a)可以明显的看出,当瓦斯抽采孔距离液态 CO₂ 相变定向致裂增透孔 9 m 后,瓦斯抽采纯流量的增长倍数呈急速下降趋势。如图 10(b)所示,当瓦斯抽采孔液态 CO₂ 相变定向致裂增透孔 7 m 时,瓦斯抽采浓度的增长倍数呈明显的下降趋势,但在接近 13 m 处仍增长了 1.5 倍,因此认为液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术的影响半径大于 9 m 小于 13 m。

(2)PFC^{2D} 颗粒流程序数值模拟方法确定。煤岩体液态 CO₂ 相变定向射孔致裂过程具有非连续性、大变形特征,颗粒流程序(PFC)模拟裂纹萌生、扩展过程具有较好的适应性^[17,20,29]。建立模型尺寸为 20 m×20 m。为了简化计算将液态 CO₂ 相变定向射孔致裂装置释放管略去,简化为在模型左侧边界中间位置的单个孔眼的高压气体致裂,模型边界水平应力(x 方向)设置为 14.63 MPa,垂直应力(y 方向)设置为 13.82 MPa(由表 1、式(1)计算得到)。液态 CO₂ 相变定向射孔致裂高压气体压力曲线图 11 所示。得到液态 CO₂ 相变定向射孔致裂后,物理模型中球颗粒的位移及接触力等相关参数云图,如图 12 所示。



微观参数	参数值	微观参数	参数值
最小粒径	0.04	平行结合拉伸强度/Pa	2×10 ⁶
颗粒粒径比	1.10	平行黏合力	13×10 ⁶
体积密度/(g·cm ⁻³)	2.50	平行结合摩擦角/(°)	21.00
颗粒模量/GPa	1.40	平行键半径乘数	0.80
颗粒刚度比	1.30	阻尼系数	0.70
摩擦因数	0.70	正常临界阻尼比	0.50

图 11 高压气体荷载曲线^[14,18]及 PFC 模型微观参数
Fig. 11 High pressure gas load curve and mesoscopic parameters of PFC model

从图 12(a)可以看到计算结果中球颗粒的最大位移为 3.59 m,主要发生在射孔孔眼位置,为距离射孔孔眼水平 1.5~5.5 m 处;在距射孔孔眼水平方向 7 m 处的局部球颗粒存在 0.75~1.00 m 的位移;位移云图中可以看到距离射孔孔眼附近垂直范围内(10 m)及水平方向 13 m 处存在球体颗粒分离的

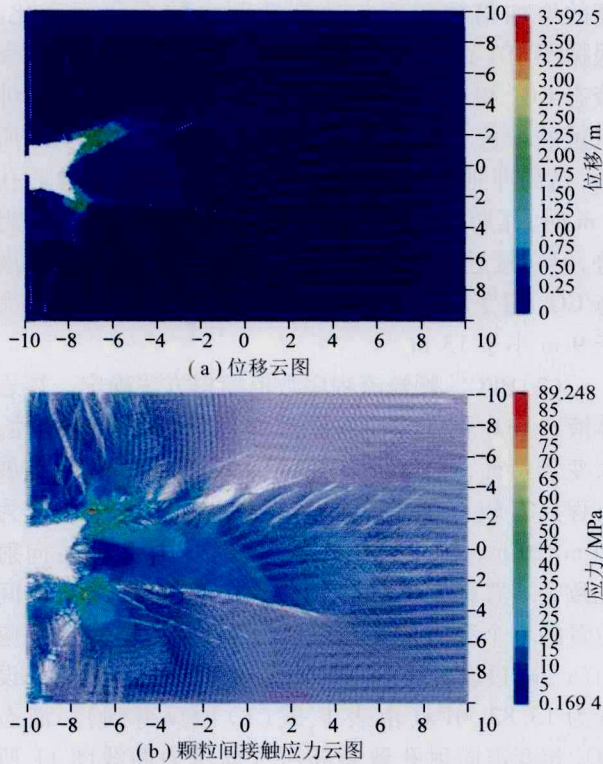


图 12 PFC^{2D} 颗粒流程序数值模拟结果
 Fig. 12 Numerical simulation results of PFC^{2D}

白色区域,表明液态 CO₂ 相变定向射孔致裂的影响范围可达为 13 m。同理由图 12(b)可以看出,在距离射孔孔眼 3 m 处球体间接触力最大为 89.2 MPa,表明在高压气体作用下球体颗粒间互相挤压,在距离射孔孔眼 7.2, 11.1, 16 m 处球体间接触力约分别为 20, 15, 5 MPa,表明受液态 CO₂ 相变定向射孔致裂影响高压气体荷载已影响到 16 m 处煤体。

综合,现场试验瓦斯抽采参数及数值模拟研究结果,考虑到实际应用中效果会受到煤层断层及原生裂隙影响,认为根据现场试验瓦斯抽采浓度及流量参数确定得到的液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术的影响半径大于 9m 小于 13 m 具有一定的可靠性。

3 液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透网格格式瓦斯抽采方法应用及效果评价

上述试验研究表明,本文提出的液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术,能够有效改善煤层孔隙结构,并促进煤岩体基质内孔隙发育,改善煤层瓦斯渗流条件,可有效提高瓦斯抽采浓度及抽采流量,降低煤层瓦斯抽采衰减系数。为了验证该技术在突出煤层巷道掘进期间防治煤与瓦斯超限效果,基于液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透影响半径分析结果,提出了低透气高突煤层液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透网格格式瓦斯抽采方法(图 13),以白皎煤矿复杂地质

条件高突危险性掘进工作面为应用现场进行现场应用研究,分析该方法在掘进工作面瓦斯超限治理方面的应用效果。

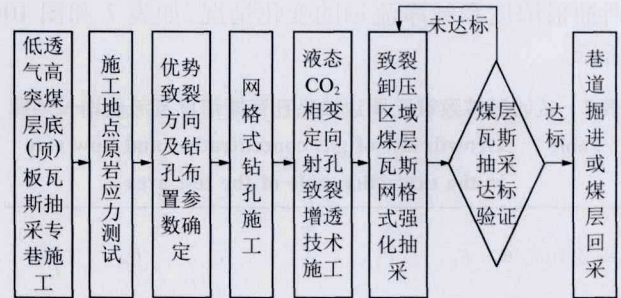


图 13 液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透网格格式瓦斯抽采方法
 Fig. 13 Mesh drilling gas drainage method based on LCO₂ phase change directional jet fracturing technology

应用地点位于白皎煤矿 2372 待掘煤巷,煤层平均厚度 1.5 m,瓦斯含量 12.67 ~ 20.4 m³/t,瓦斯压力 1.7 ~ 3.1 MPa。2008 年起开始底板道穿层钻孔对该待掘煤巷条带实行预抽,2013 年 1 月开始进行掘进施工,至 2017 年 2 月仍未行成工作面巷道,主要原因是掘进期间瓦斯涌出量大,超限频繁,一般掘进 10 ~ 20 m 就需要停头进行瓦斯超限治理。如图 14 所示,为 2017 年 1 月至 2 月 2372 回采巷道掘进工作面瓦斯涌出量实时监测情况。由图 14 可以看出,采用常规瓦斯抽采钻孔进行抽采后,在巷道掘进期间(1 月 18 日—22 日),4 d 时间内发生了 6 起瓦斯超限事故,严重影响矿井安全生产。

为缩短 2372 掘进工作面瓦斯抽采时间,验证液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透网格格式瓦斯抽采方法在防治巷道掘进瓦斯超限方面的效果。1 月 22 日至 24 日,在 2372 风道东头碛头施工 6 组钻孔,18 个液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透孔(钻孔布置如图 15 所示),进行致裂增透煤层瓦斯抽采。1 月 28 日钻孔瓦斯浓度和流量都出现明显衰减,恢复 2372 风道东头掘进作业,一直到 2 月 9 日连续掘进 55 m,掘进期间工作面最大瓦斯浓度不超过 0.4%。液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透网格格式瓦斯抽采治灾后,连续掘进进尺是原有治灾技术的 4 ~ 5 倍。

4 结 论

(1)受三维地应力影响孔壁破裂压力随钻孔方位角、倾角及射孔角度表现出明显的方向性,研究提出了地应力条件下液态 CO₂ 相变定向射孔优势方向确定方法。确定了白皎煤矿试验区域液态 CO₂ 相变定向射孔最优方向区间为 $\alpha \in [0, 30] \cup [150,$

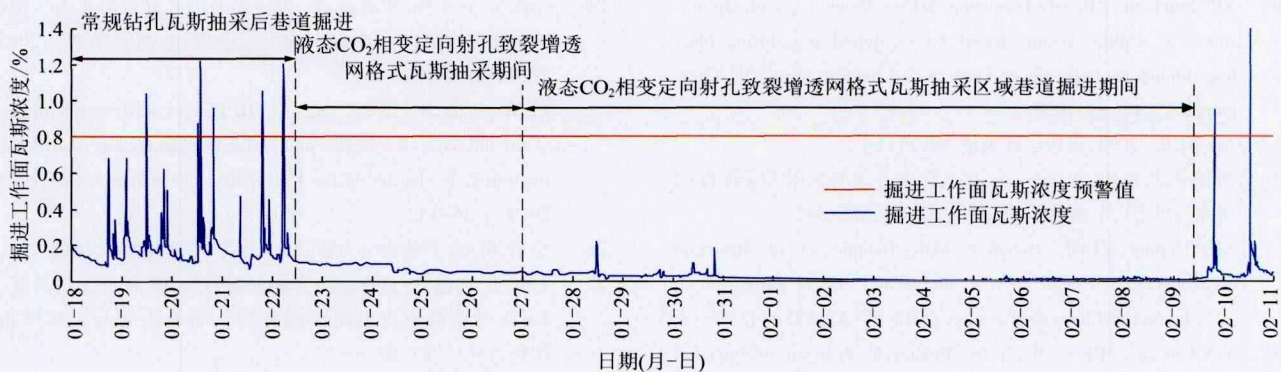


图 14 2372 风道东头掘进期间瓦斯浓度曲线

Fig. 14 Gas concentration curve of 2372 heading face

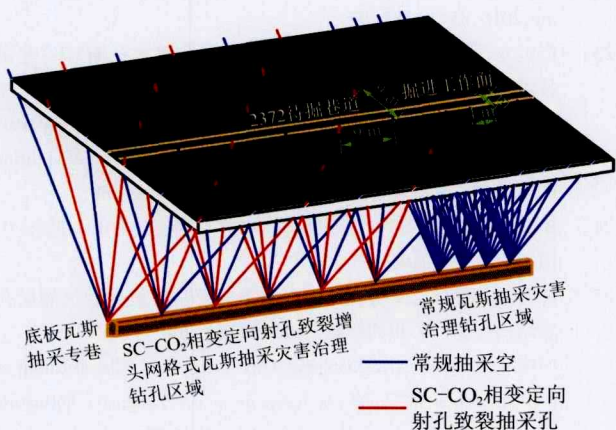


图 15 网格式瓦斯抽采方法钻孔布置

Fig. 15 Schematic diagram of the layout

210] ∪ [330, 360], 其次为 $\alpha \in [30, 150] \cup [210, 330]$, 同时 $\beta \in [25, 45]$ 的区间内。

(2) 改进提出了液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术, 现场试验及实验测试显示, 该技术实施后煤岩体的总孔隙度、孔径、比表面积、可见孔占比等参数均出现明显增长, 表明该技术可以有效地改善煤岩体基质内的孔隙结构, 促进煤岩体基质内孔隙发育。

(3) 试验区域液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透效果分析表明: 该技术可有效提高瓦斯抽采浓度及流量, 致裂当天可提高瓦斯抽采纯流量 12 倍左右; 致裂孔抽采一个月后, 瓦斯抽采纯流量仍是致裂前的 9 倍左右。液态 CO₂ 相变定向射孔致裂后, 试验区域煤层瓦斯抽采流量衰减系数, 平均降低 92%, 试验区域煤层由难抽采转变为可抽采煤层。经现场试验及 PFC^{2D} 数值模拟计算表明, 该技术的影响半径大于 9 m 小于 13 m。

(4) 现场应用表明, 提出的低透气高突煤层液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透网格式瓦斯抽采方法, 可有效预防低透气高突煤层巷道掘进期间的瓦斯超限问题, 提高巷道掘进速度 4 ~ 5 倍。

参考文献 (References):

- [1] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [2] 俞启香, 程远平. 矿井瓦斯防治 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012.
- [3] YUAN Liang. Theory and practice of integrated coal production and gas extraction [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(1): 3-11.
- [4] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 我国煤与瓦斯共采: 理论与技术与工程 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1391-1397. XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1391-1397.
- [5] LIU Yong, WEI Jianping, REN Ting, et al. Experimental study of flow field structure of interrupted pulsed water jet and breakage of hard rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 78: 253-261.
- [6] LI Quanguai, LIN Baiquan, ZHAI Cheng. The effect of pulse frequency on the fracture extension during hydraulic fracturing [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2014, 21: 296-303.
- [7] 魏建平, 刘英振, 王登科, 等. 水力冲孔有效影响半径数值模拟 [J]. 煤矿安全, 2012, 43(11): 9-12. WEI Jianping, LIU Yingzhen, WANG Dengke, et al. Numerical simulation on effective influence radius of hydraulic flushing borehole [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(11): 9-12.
- [8] 王耀锋, 何学秋, 王恩元, 等. 水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1945-1955. WANG Yaofeng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1945-1955.
- [9] 张进军, 李红选, 原德胜, 等. 彬长矿区三区联动立体抽采瓦斯技术 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 181-188. ZHANG Jinjun, LI Hongxuan, YUAN Desheng, et al. Three dimensional gas drainage technology of three areas linkage in Binchang Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8):

- 181-188.
- [10] XIE Zhicheng, ZHANG Dongming, SONG Zhenlong, et al. Optimization of drilling layouts based on controlled presplitting blasting through strata for gas drainage in coal roadway strips[J]. *Energies*, 2017, 10(8): 1228.
- [11] AQ 1050—2008, 保护层开采技术规范[S].
- [12] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(4): 535-542.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(4): 535-542.
- [13] YIN Guangzhi, DENG Bozhi, LI Minghui, et al. Impact of injection pressure on CO₂ enhanced coalbed methane recovery considering mass transfer between coal fracture and matrix[J]. *Fuel*, 2017, 196: 288-297.
- [14] 王兆丰, 孙小明, 陆庭侃, 等. 液态 CO₂ 相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(1): 1-5.
WANG Zhaofeng, SUN Xiaoming, LU Tingkan, et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO₂ phase transition[J]. *Journal of Henan Polytechnic University*, 2015, 34(1): 1-5.
- [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 & Technology*, 2015, 11(9): 11-16.
- [16] 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 & Engineering*, 2016, 35(3): 524-529.
- [17] 孙可明, 辛利伟, 吴迪, 等. 初应力条件下超临界 CO₂ 气爆致裂规律研究[J]. *固体力学学报*, 2017, 38(5): 473-482.
SUN Keming, XIN Liwei, WU Di, et al. Mechanism of fracture caused by supercritical CO₂ explosion under the impact of initial stress[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2017, 38(5): 473-482.
- [18] 曹运兴, 张军胜, 田林, 等. 低渗煤层定向多簇气相压裂瓦斯治理技术研究与实践[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2631-2641.
CAO Yunxing, ZHANG Junsheng, TIAN Lin, et al. Research and application of CO₂ gas fracturing for gas control in low permeability coal seams[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2631-2641.
- [19] 唐书恒, 朱宝存, 颜志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(1): 65-69.
TANG Shuheng, ZHU Baocun, YAN Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(1): 65-69.
- [20] 李根生, 黄中伟, 牛继磊, 等. 地应力及射孔参数对水力压裂影响的研究进展[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(4): 136-142.
LI Gensheng, HUANG Zhongwei, NIU Jilei, et al. Research advance of the influence of geostress and perforation parameters on hydraulic fracturing[J]. *Journal of the University of Petroleum China*, 2005, 29(4): 136-142.
- [21] 金衍, 陈勉. 井壁稳定力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [22] 张东明, 白鑫, 齐消寒, 等. 含层理岩石的 AE 特征分析及基于 Kaiser 效应的地应力测试研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(1): 87-97.
ZHANG Dongming, BAI Xin, QI Xiaohan, et al. Acoustic emission characteristics and in-situ stresses of bedding rock based on Kaiser effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 2016, 35(1): 87-97.
- [23] 彭世龙, 饶夜, 江浩, 等. 高突矿井深孔预裂爆破瓦斯“零”超限技术[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(5): 84-88.
PENG Shilong, RAO Zi, JIANG Hao, et al. Gas “zero” overrun technique in high gas outburst mine by deep-hole pre-splitting blasting[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(5): 84-88.
- [24] B. B. 霍多特著, 宋士钊, 王佑安. 煤与瓦斯突出[M]. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [25] 陈尚斌, 夏筱红, 秦勇, 等. 川南富集区龙马溪组页岩气储层孔隙结构分类[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 760-765.
CHEN Shangbin, XIA Xiaohong, QIN Yong, et al. Classification of pore structures in shale gas reservoir at the Longmaxi Formation in the south of Sichuan Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 760-765.
- [26] BAI Xiangfei, LI Wenhua, WANG Yue, et al. The distribution and occurrence of mercury in Chinese coals[J]. *International Journal of Coal Science & Technology* 2017, 4(2): 172-182.
- [27] 林柏泉, 王瑞, 乔时和. 高压气液两相射流多级脉动破煤岩特性及致裂机理[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 124-130.
LIN Baiquan, WANG Rui, QIAO Shihe. Characteristics and mechanism of multistage fluctuation of coal-breaking caused by high-pressure gas-liquid two-phase jet[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 124-130.
- [28] 孙四清, 张群, 闫志铭, 等. 碎软低渗高突煤层井下长钻孔整体水力压裂增透工程实践[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(9): 2337-2344.
SUN Siqing, ZHANG Qun, YAN Zhiming, et al. Practice of permeability enhancement through overall hydraulic fracturing of long hole in outburst-prone soft crushed coal seam with low permeability[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(9): 2337-2344.
- [29] 陶云奇, 刘晓, 蒯海晓. 煤矿井下钻孔吞吐压裂增透抽采瓦斯技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(7): 45-48.
TAO Yuqi, LIU Xiao, LIAN Haixiao. Study on gas drainage technology of throughput fracturing permeability improvement by borehole in underground mine[J]. *Coal Science & Technology*, 2014, 42(7): 45-48.