

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.01.028

CO₂相变致裂本煤层增透技术研究*

雷云^{①②③} 刘建军^① 张哨楠^①

(①西南石油大学地球科学与技术学院 成都 610500)

(②煤科集团沈阳研究院有限公司 沈阳 110016)

(③煤矿安全技术国家重点实验室 抚顺 113122)

摘要 研究液态CO₂相变特征和煤体对气相CO₂和CH₄的吸附规律,在不同煤质、温度和平衡压力条件下,实验得出在无烟煤和焦煤的煤体中CO₂竞相吸附的能力是CH₄的1.8~2.4倍。研究发现,液态CO₂在0.2 s内完成相变过程,体积瞬间膨胀至794倍。通过理论研究建立了采用不耦合致裂条件下的爆破孔初始冲击压力峰值、裂隙圈有效半径和爆破致裂钻孔孔径3个主要爆破参数变量的数学模型。采用液态CO₂瞬间相变出口压力为200MPa的致裂器,进行致裂爆破本煤层增透现场实验研究,研究得出距离致裂爆破孔2m和3m的控制孔在爆破后单孔瓦斯抽采纯量提高至6倍和4倍,单孔瓦斯抽采浓度提高至5倍和4倍,单孔瓦斯抽采浓度保持在35%~55%,而距离致裂爆破孔4m的控制孔在爆破5d后瓦斯抽采效果衰减至爆破前的水平。现场试验得出初始冲击压力峰值200MPa和钻孔孔径0.094m时,本煤层致裂爆破裂隙圈有效半径为3m。

关键词 CO₂相变致裂 竞争吸附 爆破 CO₂驱煤层气 现场测试

中图分类号:TD712+.62 文献标识码:A

PERMEABILITY IMPROVMENT TECHNOLOGY BY CRACKING COAL SEAM WITH CO₂ PHASE TRANSITION

LEI Yun^{①②③} LIU Jianjun^① ZHANG Shaonan^①

(①School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500)

(②Shenyang Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp, Shenyang 110016)

(③Research Institute of Safety Engineering, Fushun 113122)

Abstract Liquid CO₂ phase transition characteristics and coal to gas phase CO₂ and CH₄ adsorption regularity are researched. Experiment finds out that under different coal quality, temperature and equilibrium pressure, the adsorption ability of CO₂ in coking coal and anthracite coal is as 1.8~2.4 times to that of CH₄. The volume of CO₂ phase transition expands to 794 times instantaneously within 0.2 s. Theoretical studies are carried out to establish a mathematical model for the non-coupling fracturing under the condition of blasting hole initial shock pressure peak, fissured circle effective radius and blasting induced cracking borehole three main blasting parameters. Blasting machine is used and has 200MPa outlet pressure when the liquid CO₂ phase transition instantaneously. According to on-site experiment research of the coal seam, its permeability improvement leads to bursting. The control hole has

* 收稿日期: 2015-12-16; 收到修改稿日期: 2016-04-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174170), 国家科技支撑计划项目(2012BAC26B05), 国家科技重大专项项目(2016ZX05067), 山西省科技重大专项项目(MQ2015-01)资助.

第一作者简介: 雷云(1986-),男,博士生,助理研究员,主要从事煤矿瓦斯灾变机理及防治技术的研究工作. Email: leiyun_123@163.com

2m and 3m distance to the blasting hole. After blasting the one drilling gas extraction from scalar increases up to 6 times and 4 times, the one drilling gas extraction concentration up to 5 times and 4 times. The one drilling gas extraction concentration is in 35%~55%. The control hole has 4m distance from the blasting hole after five days, the gas extraction effect attenuates to the level before blasting. The field test shows that under the initial impact pressure peak value of 200MPa and the borehole diameter of 0.094m, the effective radius of the fracture zone of the coal seam is 3m.

Key words CO₂ phase transition crack, Competitive adsorption, Blasting, CO₂ displace coal gas, Field test

0 引言

瓦斯是成煤过程中的伴生产物,在 20 世纪 50 年代由原煤炭科学研究总院抚顺分院在国内首次提出井工煤矿含瓦斯煤层抽放的概念,并在抚顺煤田的龙凤矿和老虎台矿最先开展瓦斯抽放工艺和成套装备的科学研究(雷云等, 2013)。如今,中国煤矿的瓦斯抽采技术及装备水平已处于世界领先地位。煤与煤层气(瓦斯)高效安全共采已成为国家能源战略目标,中国作为世界上的主要“贫气”国家之一,如何安全高效利用国内储量丰富的煤层气资源是亟待解决的技术难题(丁洋, 2013; 邓绪彪等, 2014)。

目前,国内外已开展对液态 CO₂ 相变致裂煤体和爆生气体 CO₂ 驱替煤层瓦斯(主要成分为 CH₄)等相关课题的理论分析和实验研究。梁卫国等(2014)基于自主研发的超临界 CO₂ 驱替煤层 CH₄ 试验装置,并借助该装置对同一温度不同体积应力条件下的超临界 CO₂ 的渗透性及其驱替 CH₄ 效果进行了试验研究。苏现波等(2008)对 CO₂ 与 CH₄ 的吸附与解吸机理进行了研究,并从吸附势角度探讨了两者的吸附/解吸机理,并将解吸特性曲线归纳为 3 类。王兆丰等(2015)对液态 CO₂ 相变致裂强化瓦斯预抽进行试验研究,实测得出瓦斯抽采流量成倍增大,衰减系数显著降低。赵宝友等(2014)对煤体坚固性系数和瓦斯压力对煤层深孔爆破增透的影响进行模拟试验研究。徐向宇等(2011)对鹤壁八矿煤巷掘进工作面控制预裂爆破有效影响半径进行现场测定研究。

以上研究更多注重于实验室理想条件下 CO₂ 驱替煤层瓦斯实验室测试、数值模拟及现场致裂后的效果考察,但未深入开展在不同煤质、温度和平衡压力多物理场条件下 CO₂ 竞相吸附驱替煤层瓦斯的实验研究和液态 CO₂ 相变爆破致裂圈有效范围理论与现场应用的相关研究。本文研究 CO₂ 相变

爆破伴随的两个过程即:爆生气体 CO₂ 竞相吸附驱替煤层瓦斯和爆破致裂煤体形成的致裂圈有效范围。通过理论分析建立不耦合致裂爆破孔初始冲击压力峰值 p_{MAX} 、裂隙圈有效半径 R_p 和爆破致裂钻孔孔径 γ_b ,这 3 个主要爆破参数变量的数学模型,采用现场试验考察方法验证数学模型的合理性和 CO₂ 相变致裂增透本煤层瓦斯技术的可行性。研究成果对于 CO₂ 相变致裂技术的完善及推广具有重要意义。

1 CO₂ 相变致裂驱替煤层瓦斯机理

1.1 CO₂ 竞相吸附驱替煤体瓦斯机理分析

煤体属于孔隙、裂隙发育的双重介质,煤体内的瓦斯赋存状态分为游离态和吸附态。游离态瓦斯在煤体形成裂隙时易抽出,当压力降低或温度升高时,煤体内部部分吸附态瓦斯转化为游离态。

根据热力学相关理论可得,在相同平衡压力和环境温度条件下,不同气体分子表现的热运动剧烈程度存在差异,气体分子的差异性以平均自由程 λ 表示(马志宏等, 2001; 涂乙等, 2012; 卢守青等, 2014; Yu L, et al., 2015):

$$\lambda = \frac{2Z}{p} \sqrt{\pi \frac{Rt}{8M}} \quad (1)$$

式中, Z 为气体的动力黏度 (Pa·s); p 为气体平衡压力 (Pa); t 为分子分布空间环境温度 (°C); R 为气体的摩尔常数 (8.314J·mol⁻¹·k⁻¹); M 为气体的分子量(无量纲量)。

由式(1)可以看出,气体分子的动力黏度与温度成正比;气体的分子量越小,气体分子在煤体空隙内表现的无规则运动越激烈。研究表明,气体分子之间的相互吸引作用力极小可以忽略,构成气体动力黏度的主要原因是气体分子在空隙内做无规则的热运动时,气体分子在空隙内不同流速层间进行动量交换形成的(卢义刚等, 2009; 刘向锋等,

2012)。在外界条件相同情况下,CH₄(瓦斯的主要成分)比CO₂的黏度大,所以CH₄分子热运动剧烈程度强于CO₂分子,引起煤体对CH₄分子吸附的可能性低于CO₂,发生脱附的可能性增强。通过上述分析,煤体对气体分子的吸附作用主要因素包括气体分子热运动剧烈程度、吸附势阱和各自分子的沸点。气体分子热运动越剧烈,则煤体对气体分子的吸附效应越弱,气体分子的沸点越低,则吸附势阱越浅,宏观表现为气体的热运动越强,煤体对气体分子的吸附性越弱。

1.2 CO₂ 相变爆破煤体的物理特性分析

在常温常压状态下的CO₂是以气态形式存在的,密度比空气略大为1.977g·L⁻¹,液态CO₂密度为1.560g·cm⁻³,则气体状态相变 Clausius-Clapeyron 方程(张常山等,1999):

$$pV = nRT \quad (2)$$

式中, p 为标准大气压(101.3kPa); V 为气体的体积(m³); n 为气体物质的量(mol); R 为气体常量、比例系数(8.31441J/mol·K); T 为气体的热力学温度(K)。

按照式(2)的计算可以得出液态CO₂相变为气态CO₂过程中,1m³液态CO₂可汽化成气态CO₂体积为794m³。在煤层钻孔受限空间内,采取液态CO₂瞬间相变的方式,相变产生的高能、高压气体瞬间作用于煤体,从而实现代替炸药进行爆破的目的。

1.3 CO₂ 相变爆破致裂圈有效范围的理论分析

根据爆破理论,致裂器在爆破钻孔内爆破后,原始煤体会以致裂器为中心向外依次形成破碎区、裂隙区和震动区(徐向宇等,2011),大量实验表明低透气性煤体致裂增透的有效范围为破碎区和裂隙区,建立起相变致裂爆破初始峰值压力、裂隙圈有效半径和致裂爆破钻孔孔径三者耦合关系,从而更有效的指导工程尤为重要。

根据 Mises 准则,若介质中任意一点应力强度为 σ_i 满足式(3)、(4),则煤体破坏(丁洋,2013;郑文红等,2015):

$$\sigma_i \geq \sigma_0 \quad (3)$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} \sigma_{cd}(\text{粉碎区}) \\ \sigma_{td}(\text{裂隙区}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, σ_0 为煤体在单轴压力作用下的破坏强度(MPa); σ_{cd} 为煤体在单轴压力作用下的动态抗压

强度(MPa); σ_{td} 为煤体在单轴压力作用下动态抗拉强度(MPa)。

致裂器与爆破孔中间存在缝隙,为不耦合致裂爆破,爆破孔初始冲击压力峰值 p_{MAX} 可按下式表示:

$$p_{MAX} = \frac{1}{2(1+\gamma)} \rho_0 D_v^2 n \quad (5)$$

式中, p_{MAX} 为爆破孔初始冲击压力峰值(MPa); ρ_0 为液相CO₂常温状态下的密度(kg·cm⁻³); D_v 为致裂器爆生气体的爆速(m·s⁻¹); γ 为CO₂相变爆轰产物的膨胀绝热指数,一般取 $\gamma=3$; n 为爆生气体瞬间膨胀后冲击钻孔煤壁时压力增大常数,取 $n=10$ 。

透射冲击波在煤体传播过程中呈现出逐渐衰减的规律,则传播至压碎区衰减系数为(戴俊,2002):

$$\alpha = 2 + \frac{u_d}{1-u_d} \quad (6)$$

式中, α 为冲击波的衰减系数; u_d 为煤体的动态泊松比, $u_d = 0.8u$, u 为煤体的静态泊松比,常数。

爆破能量在煤体压碎区外围区域以应力波的方式在煤体内传播,则衰减系数为:

$$\beta = 2 - \frac{u_d}{1-u_d} \quad (7)$$

式中, β 为应力波在煤体压碎区外围的衰减系数。

由式(3)和式(4)可知,爆破煤体破碎区和裂隙区的范围界面可由如下公式表示:

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{2}\sigma_{cd}}{B} \quad (8)$$

$$B = [(1+b)^2 + (1-b^2) - 2u_d(1-u_d)(1-b)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$b = \frac{u_d}{1-u_d} \quad (10)$$

式中, σ_R 为爆破煤体破碎区和裂隙区的范围界面的有效径向应力(MPa); B 和 b 为煤体破碎区和裂隙区的范围界面的有效侧向应力系数(常数)。

CO₂相变爆破在不耦合系数较小条件时,则煤体裂隙圈半径可以表示为:

$$R_p = \left[\frac{\sigma_R B}{\sqrt{2}\sigma_{td}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \left[\frac{\rho_0 D_v^2 n B}{2\sqrt{2}(1+\gamma)\sigma_{cd}} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \cdot r_b \quad (11)$$

式中, R_p 为裂隙圈有效半径(m); r_b 为致裂钻孔孔径(m)。

CO₂致裂器爆破采用泄爆阀片控制泄爆初始冲击压力峰值,为建立爆破孔初始冲击压力峰值 p_{MAX} 、裂隙圈有效半径 R_p 和爆破致裂钻孔孔径 r_b 共3个主要爆破参数变量的耦合关系,由式(5)和式(11)

建立起 3 个变量的数学模型:

$$R_p = \left[\frac{\sigma_R B}{\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \left[\frac{P_{MAX} \cdot B}{\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \cdot r_b \quad (12)$$

根据式(12),可以预估致裂范围。

2 多物理场 CO₂ 驱替煤层瓦斯实验研究

已有理论,在任何温度下极限吸附量趋于相同,即极限吸附量不受外部环境温度的影响。但在煤体达到极限吸附量之前,吸附量与温度存在负向的规律,而吸附量与压力存在正向的规律(Murdoch et al., 2002; 傅雪海等, 2003; Li et al., 2010)。常态煤层瓦斯赋存状态下温度恒定,考察研究华北地区不同变质程度煤的吸附能力,选用该地区分布较广的煤种焦煤和无烟煤作为实验研究对象,选择在温度 303K 和 333K 条件下,焦煤和无烟煤在不同平衡压力时对 CO₂ 和 CH₄ 的吸附规律曲线(图 1)。

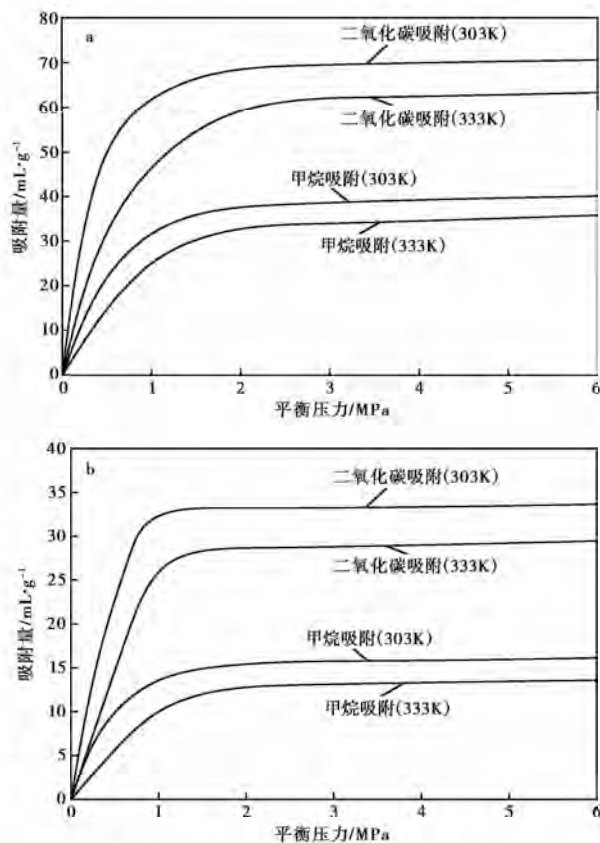


图 1 不同变质程度煤的吸附动力学曲线

Fig. 1 Adsorption kinetics curves on different metamorphic grade of coal

a. 无烟煤; b. 焦煤

对比图 1 中 a 无烟煤和 b 焦煤两种不同煤质对 CO₂ 和 CH₄ 的吸附动力学曲线可以得出,在相同温度条件下,两种煤体对 CO₂ 极限吸附量是 CH₄ 极限吸附量的 1.8~2.4 倍。在不同温度条件下,无烟煤在温度 303K 时对 CO₂ 吸附量是 333K 时对 CO₂ 吸附量的 1.1 倍左右;焦煤在温度 303K 时对 CO₂ 吸附量是 333K 时对 CO₂ 吸附量的 1.2 倍左右;CO₂ 相变过程伴随着从有限空间吸热从而降低空间内温度,说明有限空间内温度的降低有利于煤体对 CO₂ 的吸附。

通过上述煤体吸附规律实验研究表明,在不同煤质、温度和平衡压力条件下,煤体对 CO₂ 的吸附能力远大于 CH₄ 的吸附能力,采用煤层钻孔受限空间内瞬间相变产生大量爆生气体 CO₂,通过 CO₂ 与 CH₄ 在煤体竞争吸附,从而有效的将煤体中吸附态瓦斯置换出来。

3 CO₂ 致裂本煤层爆破增透试验

3.1 试验工作面条件

液态 CO₂ 致裂本煤层爆破选择在山西省沁水煤田东部某矿井,工作面位于矿井 15 号煤层,煤层厚度为 4.8m,最大原始瓦斯含量为 7.62m³·t⁻¹,可解吸瓦斯含量为 4.53m³·t⁻¹,瓦斯含量系数为 14.03m³·(m³·MPa^{0.5})⁻¹,煤层透气性系数为 1.32m²·(MPa²·d)⁻¹,属于可以抽采煤层,矿井现阶段在工作面进风和回风顺槽施工两侧平行钻孔进行预抽,钻孔间距为 2m,钻孔直径为 Φ 0.094m。

基于 CO₂ 相变致裂驱替煤层瓦斯技术原理,研制了液态 CO₂ 相变致裂爆破成套装备。爆破试验研究分为试验钻孔施工设计和爆破工艺。

3.2 试验钻孔施工设计

在工作面顺槽施工致裂爆破钻孔和抽采控制钻孔,钻孔直径均为 Φ 0.094m,钻孔深度均为 60m,开孔高度均为 1.5m,致裂爆破孔封孔深度为 2m,采用注水式高压囊袋封孔器封孔,抽采控制钻孔封孔深度为 8m,施工完钻孔直接封孔,采用水泥砂浆封孔。CO₂ 相变致裂控制爆破钻孔布置(图 2)。

3.3 致裂爆破工艺

在井下爆破地点附近硐室开展液态 CO₂ 加注至致裂器,单根致裂器长度为 1.2m,最大外径为



图2 致裂控制爆破钻孔布置

Fig. 2 Lay out drawing of crack control blasting hole

$\phi 0.084\text{m}$, 单根致裂器的液态 CO₂ 最大容量为 0.8kg, 每根致裂器内放置低压电流能够引起化学反应的加热体, 安全起爆电压等级为 12V, 相变爆破过程为 0.2s。致裂器采用连接泄爆阀进行串联起爆, 使用普通液压钻机旋转进入爆破钻孔。致裂器加注和连接泄爆阀分别见图 3a 和图 3b 所示。

图3 液态 CO₂ 相变致裂爆破设备Fig. 3 Blasting equipment of liquid CO₂ phase transition caused fracture

a. 液态 CO₂ 注入致裂器; b. 开启泄爆阀缓慢相变释放 CO₂

根据建立的爆破孔初始冲击压力峰值 p_{MAX} 、裂隙圈有效半径 R_p 和爆破致裂钻孔孔径 γ_b 3 个主要爆破参数变量的数学模型, 并结合实验室测定取均值可得动态泊松比 u_d 为 0.2254, 在 20℃ 时煤体密度 ρ_0 为 $770.7\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 煤体单轴动态抗压强度 σ_{cd} 为 18.7MPa, 煤体单轴动态抗拉强度 σ_{td} 为 0.401MPa; 在爆破致裂钻孔孔径 γ_b 为 0.094m 条件下, 为了实现爆破裂隙圈有效半径 R_p 为 3.0m, 通过式 (12) 反推计算得出爆破孔最低初始冲击压力峰值 p_{MAX} 为 198MPa, 所以本次试验选择泄爆阀片开启压力值为

200MPa。

3.4 CO₂ 相变致裂爆破效果分析

考察试验致裂爆破的驱替效果, 在施工控制孔 1、控制孔 2 和控制孔 3 后, 即连接顺槽支管并安设单孔孔板流量计, 提前进行爆破前的单孔瓦斯浓度、瓦斯流量和混合量的数据观测。在爆破结束后用水泥砂浆封堵爆破孔并观测控制孔瓦斯抽采数据, 致裂爆破前后控制孔 1 (距爆破孔 2m)、控制孔 2 (距爆破孔 3m) 和控制孔 3 (距爆破孔 4m) 瓦斯抽采效果如图 4a、图 4b 和图 4c 所示。

由图 4a 距离爆破孔 2m 处的控制孔抽采效果可以看出, 致裂爆破后, 通过抽采效果考察得出: 在控制孔与爆破孔之间的煤体形成裂纹, 宏观考察控制孔的单孔瓦斯抽采浓度、瓦斯流量和纯量提高效果非常显著, 爆破后单孔瓦斯抽采纯量提高 6 倍左右, 钻孔瓦斯抽采浓度 (瓦斯体积分数) 提高至 5 倍左右, 在致裂爆破后的 15d 内钻孔瓦斯浓度均保持在 55% 左右。

由图 4b 距离爆破孔 3m 处的控制孔抽采效果可以看出: 致裂爆破后单孔瓦斯抽采效果比较明显, 现场考察的结果表明与控制孔 2m 处的效果有所降低, 本煤层钻孔内瓦斯涌出量、抽采量均有所降低且瓦斯抽采衰减系数增大, 但爆破后总体单孔瓦斯抽采纯量提高至 4 倍左右, 钻孔瓦斯抽采浓度提高至 4 倍左右, 在裂爆爆破后的 15d 内钻孔瓦斯浓度 (瓦斯体积分数) 均保持在 35% 左右。

由图 4c 距离爆破孔 4m 处的控制孔抽采效果可以看出: 致裂爆破后单孔瓦斯抽采不明显, 在爆破后 5d 内, 单孔瓦斯浓度和纯量有短暂的提高, 但持续 5d 后瓦斯浓度和纯量逐渐衰减至爆破前的水平, 原因是在致裂爆破过程中裂纹发育未能达到控制孔 4m 处的位置, 由爆破引起的振动效应引起控制孔 4m 处的瓦斯涌出量暂时性提高。

4 结 论

(1) 研究液态 CO₂ 相变爆破煤体的物理特性, 相变过程体积迅速膨胀至 794 倍并伴随着强烈的液气相变, 汽化的吸热过程。

(2) 通过对爆破致裂圈有效范围的理论分析, 建立了采用不耦合致裂条件下的爆破孔初始冲击压力峰值、裂隙圈有效半径和爆破致裂钻孔孔径 3 个主要爆破参数变量的数学模型。

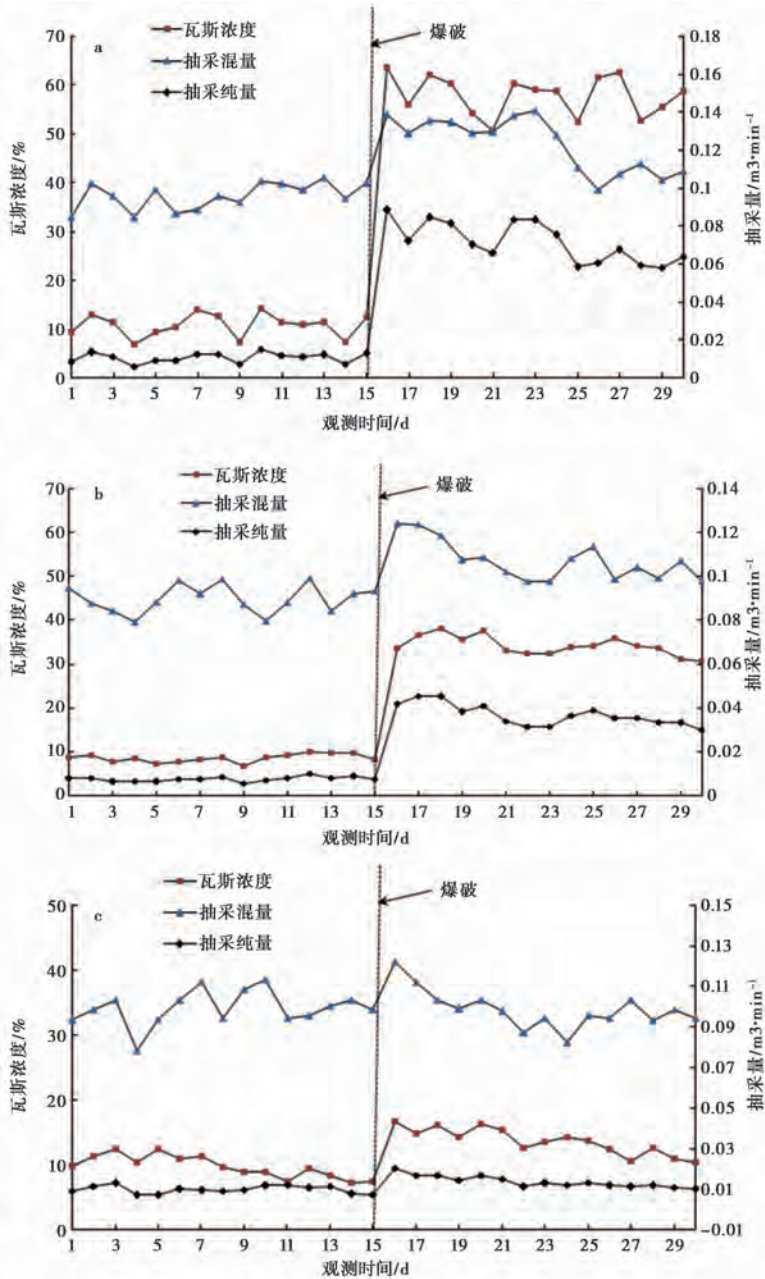


图4 控制孔1、控制孔2和控制孔3在爆破前后瓦斯抽采效果图

Fig. 4 Effect picture of gas extraction before and after blasting of control hole 1, control hole 2 and control hole 3
a. 距爆破孔2m的控制孔1抽采效果图; b. 距爆破孔3m的控制孔2抽采效果图; c. 距爆破孔4m的控制孔3抽采效果图

(3) 实验研究无烟煤和焦煤两种煤质在不同温度和平衡压力条件下煤体对 CO_2 和 CH_4 吸附量, 发现两种煤体对 CO_2 吸附量是 CH_4 吸附量的 1.8 ~ 2.4 倍。

(4) 考察距离爆破孔分别为 2m、3m 和 4m 的控制孔抽采效果, 距离 2m 处的控制孔瓦斯抽采纯量提高至 6 倍, 距离 3m 处控制孔瓦斯抽采纯量提高至 4 倍, 控制孔在 3m 半径的范围内瓦斯抽采浓度 (瓦斯体积分数) 保持在 35%~55%。现场考察结果

得出: 初始冲击压力峰值 200MPa 和钻孔孔径 0.094m 时, 本煤层致裂爆破裂隙圈有效半径为 3m。

参 考 文 献

- Dai J. 2002. Rock dynamic characteristics and blasting theory[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press.
- Deng X B, Hu Q F, Wei S M. 2014. Genesis and property classification of tectonic coal[J]. Journal of Engineering Geology, 22(5): 1008 ~ 1014.

- Ding Y. 2013. Study on the technology of long-hole pre-splitting blast in low-permeability coal seams to increase permeability[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology.
- Fu X H, Qin Y, Zhang W H. 2003. Coupling correlation between high-rank coal matrix mechanic effect and coal reservoir permeability[J]. Geological Journal of China Universities, **9**(3): 373~377.
- Lei Y, Wang K J, Zhang X H, et al. 2013. Gas emission laws of coal wall in fully mechanized roadway of thick seam [J]. Safety in Coal Mines, **44**(3): 170~172.
- Li W, Cheng Y P, Wu D M, et al. 2010. CO₂ isother-mal adsorption models of coal in the haishiwan Coalfield[J]. Mining Science and Technology, **20**(2): 281~285.
- Liang W G, Zhang B N, Han J J, et al. 2014. Experimental study on coal bed methane displacement and recovery by super critical carbon dioxide injection[J]. Journal of China Coal Society, **39**(8): 1511~1520.
- Liu X F, Liu J J, Liu X F, et al. 2012. An experimental research on the law of adsorption (desorption) deformation of coal matrix[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), **37**(1): 173~177.
- Lu S Q, Wang L, Qin L M. 2014. Analysis on adsorption capacity and adsorption thermodynamic characteristics of different metamorphic degree coals[J]. Coal Science and Technology, **42**(6): 130~135.
- Lu Y G, Sun X G. 2009. Nonlinear acoustical properties of liquid and supercritical carbon dioxide[J]. Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China, **60**(2): 287~293.
- Ma Z H, Guo Y Y, Wu S Y. 2001. An experimental study of mechanism of exploiting coal-bed methane by injecting carbon dioxide or nitrogen[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, **32**(4): 335~338.
- Murdoch L C, Slack W W. 2002. Forms of hydraulic fractures in shallow fine-grained formations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, **128**(6): 479~487.
- Su X B, Chen R, Lin X Y, et al. 2008. Desorption characteristic curves of carbon dioxide and methane in coal and their application[J]. Natural Gas Industry, **28**(7): 17~19.
- Tu Y, Xie C L, Li, W G, et al. 2012. Study on CO₂、CH₄ and N₂ adsorption and desorption law of seam[J]. Coal Science and Technology, **40**(2): 70~72.
- Wang Z F, Sun X M, Lu T K, et al. 2015. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO₂ phase transition[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition), **34**(1): 1~5.
- Xu X Y, Wen Z H, Chen Y C, et al. 2011. Determination of effective influence radius in controlled pre-splitting blasting at coal dricing face in hebi No.8 coal mine[J]. Coal Technology, **30**(11): 81~83.
- Yu L, Liu J J. 2015. Stability of interbed for salt cavern gas storage in solution mining considering cusp displacement catastrophe theory[J]. Petroleum, **1**(1): 82~90.
- Zhang C S, Yu B H, Ye J X. 1999. Studies on deduction of Clapeyron's equation[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, **23**(5): 474~476.
- Zhao B Y, Wang H D. 2014. Impact of coal strength coefficient and methane gas pressure on permeability enhancement of coal seam induced by long-hole blasting technology[J]. Blasting, **31**(1): 25~31.
- Zheng W H, Pan Y S, Li Z H, et al. 2015. Experimental study of characteristics about coal charge induction signal under triaxial stress condition[J]. Journal of Engineering Geology, **23**(5): 924~929.
- 戴俊. 2002. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京:冶金工业出版社.
- 邓绪彪,胡青峰,魏思民. 2014. 构造煤的成因-属性分类[J]. 工程地质学报, **22**(5): 1008~1014.
- 丁洋. 2013. 低透气性煤层深孔预裂爆破增透抽采瓦斯技术研究[D]. 西安:西安科技大学.
- 傅雪海,秦勇,张万红. 2003. 高煤级煤基质力学效应与煤储层渗透率耦合关系分析[J]. 高校地质学报, **9**(3): 373~377.
- 雷云,王魁军,张兴华,等. 2013. 厚煤层综掘巷道煤壁瓦斯涌出规律分析[J]. 煤矿安全, **44**(3): 170~172.
- 梁卫国,张倍宁,韩俊杰,等. 2014. 超临界 CO₂ 驱替煤层 CH₄ 装置及试验研究[J]. 煤炭学报, **39**(8): 1511~1520.
- 刘向峰,刘建军,吕祥锋,等. 2012. 煤体基质吸附(解吸)变形规律试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), **37**(1): 173~177.
- 卢守青,王亮,秦立明. 2014. 不同变质程度煤的吸附能力与吸附热力学特征分析[J]. 煤炭科学技术, **42**(6): 130~135.
- 卢义刚,孙小广. 2009. 液态和超临界态二氧化碳的非线性声学性质[J]. 化工学报, **60**(2): 287~293.
- 马志宏,郭勇义,吴世跃. 2001. 注入二氧化碳及氮气驱替煤层气机理的实验研究[J]. 太原理工大学学报, **32**(4): 335~338.
- 苏现波,陈润,林晓英,等. 2008. 煤解吸二氧化碳和甲烷的特性曲线及其应用[J]. 天然气工业, **28**(7): 17~19.
- 涂乙,谢传礼,李武广,等. 2012. 煤层对 CO₂、CH₄ 和 N₂ 吸附/解吸规律研究[J]. 煤炭科学技术, **40**(2): 70~72.
- 王兆丰,孙小明,陆庭侃,等. 2015. 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), **34**(1): 1~5.
- 徐向宇,温志辉,陈永超,等. 2011. 鹤壁八矿煤巷掘进工作面控制预裂爆破有效影响半径测定[J]. 煤炭技术, **30**(11): 81~83.
- 张常山,俞祐恒,叶静娴. 1999. Clapeyron 方程推导的探讨[J]. 南京理工大学学报, **23**(5): 474~476.
- 赵宝友,王海东. 2014. 煤体坚固性系数和瓦斯压力对煤层深孔爆破增透的影响[J]. 爆破, **31**(1): 25~31.
- 郑文红,潘一山,李忠华,等. 2015. 三轴条件下煤体受压破裂电荷感应信号试验研究[J]. 工程地质学报, **23**(5): 924~929.