

DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2019.08.003

考虑煤体层理方向效应的液态 CO₂ 致裂增透规律

翟成¹, 马征¹, 张建国^{2,3}, 徐吉钊¹, 孙勇¹

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 炼焦煤资源开发及综合利用国家重点实验室, 河南 平顶山 467000; 3. 中国平煤神马能源化工集团有限责任公司, 河南 平顶山 467000)

摘要:为研究循环注入液态 CO₂ 过程中煤体层理方位对致裂效果的影响, 利用非金属超声波检测分析仪与低场核磁共振仪研究了不同循环注入液态 CO₂ 煤样的损伤程度及孔隙发育程度。结果表明: 煤层层理对煤体的冻融损伤破坏模式及内部孔隙发育均有一定程度的影响; 层理方位首先影响煤体裂纹的起裂位置, 进而影响其破坏模式及孔隙扩展、延伸、连通; 随着循环注入液态 CO₂ 次数的增加, 煤体表面因冻胀融缩作用引起的裂纹逐渐增多、变宽, 煤体内部原有孔隙增大并产生新孔隙, 不同层理方位效果不同。

关键词: 液态 CO₂; 煤体层理; 循环注入; 损伤程度; 孔隙; 致裂增透

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 1003-496X(2019)08-0005-05

Fractures and Permeability Improvement Law of Liquid CO₂ Considering Direction Effect of Coal Bedding

ZHAI Cheng¹, MA Zheng¹, ZHANG Jianguo^{2,3}, XU Jizhao¹, SUN Yong¹

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Coking Coal Exploitation and Comprehensive Utilization, Pingdingshan 467000, China; 3. China Pingmei Shenma Energy & Chemical Industry Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

Abstract: To study the effect of the coalbed bedding orientation on the fracturing effect during the cyclical infusion of liquid CO₂, the non-metallic ultrasonic detector and low-field NMR spectrometer were used to study the degree of damage and pore development of different liquid CO₂ injection. The results show that coal seam bedding has a certain degree of influence on the freeze-thaw damage mode and internal pore development of coal. The bedding orientation firstly affects the crack initiation position of the coal body, and then affects its failure mode and pore expansion, extension, and connectivity. With the increase of cycle numbers of injecting liquid CO₂, the cracks caused by frost heave expansion and contraction of the coal surface gradually increase. The original pores in the coal increase and produce new ones, and different bedding azimuth effect is different.

Key words: liquid CO₂; coal bedding; cyclic injection; degree of damage; porosity; fractures and permeability improvement

我国煤层大部分为低渗透煤层, 煤层气抽采效率低、效果差, 给煤层气利用带来很大的困难。为了提高煤层的瓦斯抽采效率, 必须对低透气性煤层进行致裂增透。液态 CO₂ 压裂技术是近年来的发展起来的一种新型无水压裂技术, 它不仅大大节省了水资源, 而且实现了 CO₂ 的地质封存从而减少了温室气体排放, 对环境改善有着积极的影响。Jizhao Xu 等^[1-3]通过研究不同煤阶的多循环液态 CO₂ 压裂技术, 证明循环注入液态 CO₂ 可高效致裂煤体, 提高

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774278); 江苏省自然科学基金杰出青年基金资助项目(BK20170001)

孔隙度与渗透率。文虎等^[4]通过现场试验证明液态 CO₂ 可有效实现煤体致裂增透。由于煤体中存在着各种层理, 节理与片理等结构, 具有明显的不均匀性的特点^[5]。而层理是煤体的主要构造之一, 对于一些层理结构比较明显的煤岩, 它的层理结构对其物理力学性质具有明显的影响^[6-8]。虽然前人对于不同方向的层理煤岩进行了一些物理力学性质的研究, 但是所研究的试样多基于原始煤样的层理方向对物理力学性质的影响, 而对于试验介质处理后的煤样层理方向效应研究较少, 通过不同层理方向煤样循环注入液态 CO₂ 试验, 研究介质处理后层理方向效应

对煤体的一些物理性质的影响。试验将采自陕西恒益煤矿的煤样分成平行层理和垂直层理 2 组煤样,进行了循环注入液态 CO₂ 试验,以此模拟现场煤层注入液态 CO₂ 的过程。循环注入前后采用 NM-4B 非金属超声检测分析仪进行超声纵波无损检测以及 NMR 低场核磁共振仪进行煤样孔隙分布的测试。通过分析纵波波速和 T₂ 曲线峰的变化研究煤样在液态 CO₂ 循环注入后物理性质的变化,量化表征不同层理方向注入液态 CO₂ 煤样的致裂增透效果。

1 试验概况

1.1 试验准备

试验煤样采用陕西恒益煤矿烟煤,因为要考虑煤样层理方向对煤体致裂的影响,从同一大型煤块中按照垂直、平行层理方向对原状煤岩进行钻孔取心,制成 50 mm×25 mm 标准煤样 8 个,分别为 4 个平行于层理方位,4 个垂直于层理方位。根据层理方位的不同分别对煤样进行标记,A 为垂直于层理方向,B 为平行于层理方向。

1.2 试验仪器

1) 超声检测分析仪。超声波测试采用北京康科瑞公司生产的 NM-4A 非金属超声检测分析仪,利用超声波脉冲检测技术对煤样进行无损检测,主要测试数据声时、幅度、主频及声速等参数。

2) NMR 低场核磁分析仪。采用苏州纽迈电子科技有限公司生产的 MesoMR23-060H 核磁共振成像分析仪。该分析仪的主磁场为 0.51 T,磁体控温 25~35 °C,磁体均匀度为 12.0×10⁻⁶,H 质子共振频率为 21.7 MHz,射频脉冲频率为 1.0~49.9 MHz,射频功率 300 W。试验基本流程如图 1。

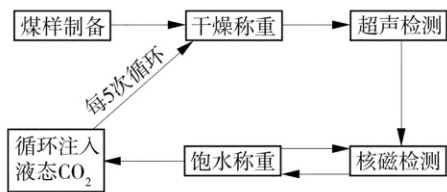


图 1 试验基本流程图

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

选取了比较有代表性的 A4 与 B4 煤样进行结果分析。试验后煤样表面在平行层理方向和垂直层理方向均有不同程度的裂纹发育,而且平行层理煤样侧面无明显裂纹,试验后煤样侧面出现了 3 条近

似水平的裂纹,且中间裂纹沿环向发展。垂直层理煤样裂纹沿竖直方向开裂。裂纹的发展方向基本与原始层理面的方向一致,表明在循环注入液态 CO₂ 过程中,裂纹沿着层理弱面开裂,且比较明显。

2.2 超声纵波测试

超声波在穿过不同介质时,其穿透时间的能量和传播波形反射情况会发生变化,研究表明通常对于同种类型的煤岩,其波速的大小主要受煤岩内部孔隙发育情况的影响^[9-10],超声波测试就是通过声学特性来检验煤岩内部孔隙发育程度的无损检测方法。煤岩内部的孔隙越发育,损伤程度越严重,声波在煤岩中的传播速度越慢。

通过测试得出原始煤样中垂直于层理方向的煤样平均波速为 1.867 km/s,平行于层理方向的煤样平均波速为 2.041 km/s。垂直层理方向的平均波速低于平行层理方向的波速,这主要因为煤体层理的存在会阻碍超声波在煤体内的传播^[11]。不同层理方向纵波波速随冻融循环次数及冻融前后变化如图 2。

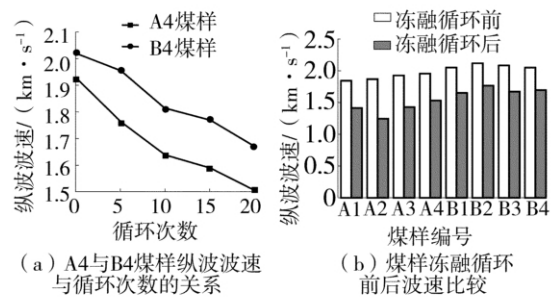


图 2 不同层理方向纵波波速随冻融循环次数及冻融前后变化图

图 2(a)为 A4 与 B4 煤样在每 5 次循环注入后的纵波波速与循环注入前纵波波速的对比。随着循环注入液态 CO₂ 次数的增加,超声波波速呈下降趋势,垂直于层理方向的煤样 A4 在 5 次、10 次、15 次、20 循环注入后与前一次波速相比降幅分别为 8.42%、7.10%、3.41%、4.80%,而平行于层理方向的煤样 B4 降幅分别为 3.13%、7.22%、2.48%、5.66%,垂直层理煤样波速下降初始时最大,然后逐渐减少,之后增加;而平行层理煤样下降速度呈现先增加后减少的趋势。下降趋势不同主要是因为初始裂隙发育主要在原始层理面的基础上,垂直层理煤样初始的下降速度要远大于平行层理煤样。从图 2(a)可以看出,煤样纵波波速总体呈下降趋势,说明在注入液态 CO₂ 的过程中,煤样内部的孔隙在逐步发育,这主要是由于循环注入过程中的冻胀融缩作用

使煤体的孔隙发育,纵波传播波速受阻使波速降低。

由图 2(b)可知,经过 20 次循环注入液态 CO₂ 后,平行于层理方向和垂直于层理方向的超声波纵波波速均降低,垂直于层理方向和平行于层理方向的煤样的平均降幅为 26.03%、18.28%。垂直于层理方向煤样的超声波波速变化幅度大于平行于层理方向的煤样,这与蔡承政等人^[11]结果相符。这是由于循环注入液态 CO₂ 产生的冻胀融缩作用,裂隙沿着煤样的原始层理面发育,而垂直层理方向层理面的与超声波传播方向垂直,由于超声波在裂隙间空气与煤岩的传播速度不同,从而阻碍超声波的沿着垂直于层理方向的传播,使垂直层理煤样的波速降幅大于平行层理煤样。

2.3 孔隙度变化

孔隙度是指煤体内部中所有存在的孔隙空间与该煤样体积的比值,称为该煤样的孔隙度,用百分数表示。煤样的总孔隙度越大,表明煤样中孔隙越发育。与原干燥煤样的质量相比,饱水煤样的质量随着一些水质量增加而增加,这被称为填充在内部孔隙或裂缝中的吸入水。一般孔隙度 φ 计算如下^[3]:

$$\varphi = \frac{V_w}{V} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (1)$$

式中: V 、 V_w 分别为煤样的体积与吸入水体积; M_1 为干燥煤样的质量; M_2 为饱水煤样的质量。

循环注入液态 CO₂ 试验前后煤样孔隙度变化见表 1。可以看出,2 种煤样的孔隙度都有明显的增大,表明循环注入液态 CO₂ 对提高煤体的孔隙度具有明显的作用。经计算,试验前垂直层理方向平均孔隙度为 8.47%,试验后平均孔隙度为 11.28%,增幅 33.17%;试验前平行层理方向平均孔隙度 9.67%,试验后平均孔隙度升高至 13.86%,增幅为 43.33%。平行层理煤样的孔隙度增幅明显大于垂直层理煤样,表明在注入液态 CO₂ 过程中,平行层理方位的煤体比垂直层理方向的煤体更容易致裂。

表 1 试验前后煤样孔隙度变化

实验 前后	孔隙度变化/%							
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
前	9.47	7.42	8.22	8.57	9.21	8.75	10.56	10.19
后	11.69	10.75	12.24	10.46	14.74	14.44	12.75	13.50

2.4 NMR 测试结果分析

核磁共振测试中横向弛豫时间 T_2 分布与孔隙尺寸相关, T_2 值越大,代表的孔隙越大, T_2 值越小,代表的孔隙也越小。前人的研究表明横向弛豫时间

T_2 与煤样内部孔隙的比表面积具有下面的数学关系表达式^[12]:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V} \quad (2)$$

式中: T_2 为横向弛豫时间,ms; ρ 为横向表面弛豫强度; S 为孔隙表面积; V 为孔隙体积。

为了更好地分析致裂效果,这里取 10 次、20 次循环注入液态 CO₂ 开展研究。不同循环注入液态 CO₂ 前后 T_2 谱特征如图 3。

由图 3 可以看出,试验煤样 A4 与 B4 在饱水条件下的 T_2 谱图均呈现出 3 峰结构,而且 3 个谱峰相对独立,表明原始煤样中孔隙之间的连通性较差。经过 10 次循环后,无论是平行于层理方向的煤样 A4,还是垂直于层理方向的煤样 B4, T_2 谱图中的峰在饱水条件下均有不同程度的增幅,其中 A4 的第 1、第 2 峰的增幅比较明显,B4 在 10 次循环之后第 2 峰与第 3 峰融合为 1 个峰,表明在循环注入液态 CO₂ 过程中,低温冻融作用使煤体内部产生新孔隙,原孔隙扩展及孔隙间连通成为更大尺寸的孔隙。在离心条件下,第 1 峰降低,第 2 峰出现左移,表明束缚水含量减少,自由水含量增加,自由水的多少与孔隙的连通程度有关,自由水的体积越大,孔隙的连通程度越大^[3]。

由图 3(c)、图 3(d)可知,随着循环次数的增加,饱水条件下的 T_2 曲线向右移动,第 2、第 3 峰的增幅较 10 次循环的增幅增大,变化较明显,而离心下的峰的降幅增大,束缚水的含量继续减少。表明循环注入液态 CO₂ 次数越多,隙发育越好,孔隙连通程度越高,致裂效果也越好。

可以看出,随着循环次数的增加, T_2 谱图面积增大,表明煤样的孔隙体积随着循环次数的增大而增加。垂直层理煤样在循环注入液态 CO₂ 后使小尺寸孔隙转化为大尺寸孔隙;平行层理煤样循环注入液态 CO₂ 初期主要促使小孔隙转化为大尺寸孔隙,随着循环注入次数增加会产生新的孔隙。

2.5 孔径分布分析

研究表明, T_2 谱图通常在 0.1~10 000 ms 的范围内的孔径分布如下:小于 10 ms 的 T_2 值对应于微孔;从 10~100 ms 的 T_2 值对应于介孔,而大于 100 ms 的 T_2 范围对应于大孔或微裂缝^[13]。将图 3 的 T_2 谱图按照所对应的孔径进行分析,可得到小孔、介孔、大孔及裂缝的峰面积及所占比,不同循环注入液态 CO₂ 的孔径面积累计信号量见表 2。该参数能更好的反应循环注入液态 CO₂ 后煤体内部孔隙的发育

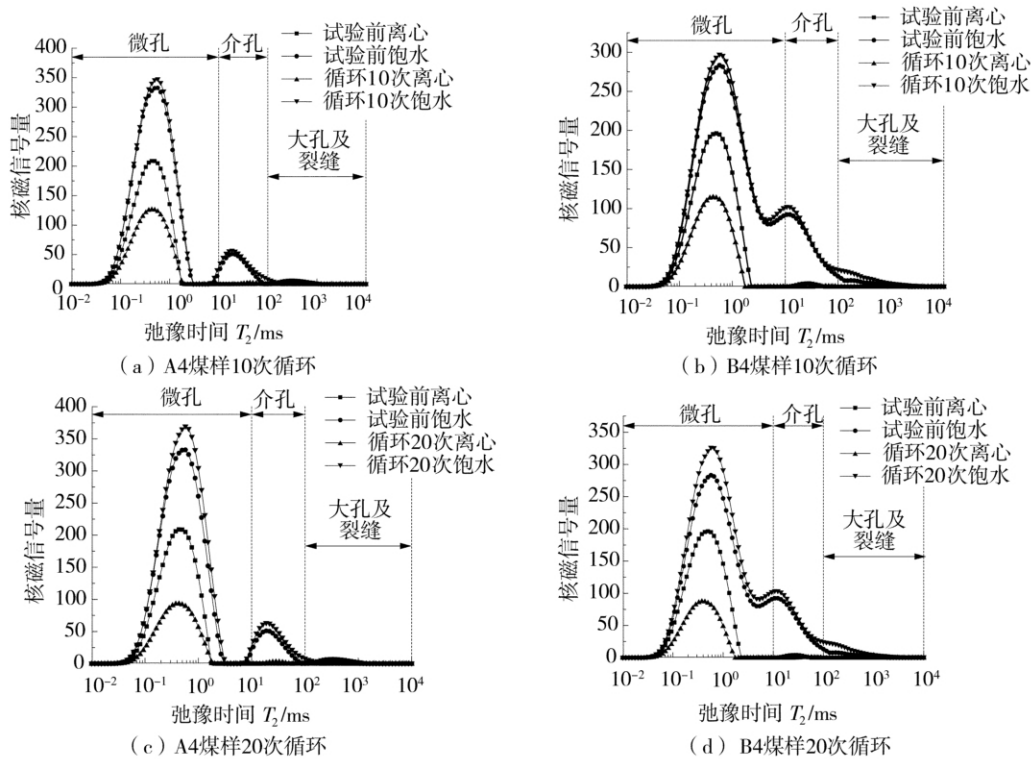


图 3 不同循环注入液态 CO₂ 前后 T₂ 谱特征

程度的差异。

表 2 不同循环注入液态 CO₂ 的孔径面积累计信号量

煤样	循环次数	微孔面积	介孔面积	大孔及微裂隙面积	总面积
A4	0	5 287.99	481.70	37.90	5 807.59
	10	5 552.68	601.20	71.90	6 225.78
	20	5 899.09	652.38	83.80	6 635.27
B4	0	5 747.21	922.41	93.91	6 763.53
	10	6 134.34	920.75	195.47	7 250.56
	20	6 603.06	1057.66	246.57	7 907.29

从表 2 可以看出,垂直层理煤样在循环注入液态 CO₂ 后微孔、介孔、大孔及裂缝分别增幅 11.56%、35.43%、121.08%;平行层理煤样在循环注入液态 CO₂ 后微孔、介孔、大孔及裂缝分别增加了 14.89%、14.66%、162.56%,大孔增幅均为最大,表明循环注入液态 CO₂ 有利于孔隙发展。不同层理方向裂隙发展、主要孔隙发育的形式有所不同:平行层理煤样的大孔与小孔增幅大于垂直层理煤样,表明平行层理方向煤样比垂直层理煤样更容易产生新孔隙,而且孔隙之间更容易发展或贯通成大孔或者微裂隙。

3 结 论

1)在注入液态 CO₂ 过程中,层理方位与煤体表面裂纹产生的形状有关,平行层理方向的煤体在端面产生平行的裂纹,垂直层理方向在侧面产生了环向裂纹。

2)在循环注入液态 CO₂ 后,无论是垂直层理还是平行层理方向的超声波波速均有不同程度的下降,其中垂直层理的超声波波速的下降幅度大于平行层理方向的超声波波速,表明了致裂过程中,冻融作用下煤体沿原层理面孔隙发育。

3)通过核磁共振 T₂ 谱图分析,循环注入液态 CO₂,谱面积均出现明显增幅,平行层理的煤样比垂直层理的煤样在产生新孔隙及转化为大孔或微裂隙上更容易。说明平行层理方向比垂直层理方向煤样在注入液态 CO₂ 过程中更有利于孔隙生成与贯通。

4)通过对煤体孔隙度的分析,垂直层理的煤样平均增幅小于平行层理的煤样,表明层理方位对注入液态 CO₂ 致裂有一定影响。

参考文献:

[1] Xu Jizhao, Zhai Cheng, Liu Shimin, et al. Investigation of

- temperature effects from LCO₂ with different cycle parameters on the coal pore variation based on infrared thermal imagery and low-field nuclear magnetic resonance[J]. Fuel, 2018, 215: 528-540.
- [2] Xu Jizhao, Zhai Cheng, Liu Shimin, et al. Pore variation of three different metamorphic coals by multiple freezing-thawing cycles of liquid CO₂ injection for coalbed methane recovery[J]. Fuel, 2017, 208: 41-51.
- [3] Xu Jizhao, Zhai Cheng, Liu Shimin, et al. Feasibility investigation of cryogenic effect from liquid carbon dioxide multi cycle fracturing technology in coalbed methane recovery[J]. Fuel, 2017, 206: 371-38.
- [4] 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.
- [5] 杨永杰. 煤岩强度、变形及微震特征的基础试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006: 175.
- [6] 张朝鹏, 张茹, 张泽天, 等. 单轴受压煤岩声发射特征的层理效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 770-778.
- [7] 刘晓辉, 戴峰, 刘建锋, 等. 考虑层理方向煤岩的静动巴西劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2098-2105.
- [8] 杨洪兴, 杨天全. 煤岩层理效应对甲烷吸附-解吸影响的试验研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(8): 9-11.
- [9] 何国梁, 张磊, 吴刚. 循环冻融条件下岩石物理特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2004(S2): 52-56.
- [10] 徐晓炼, 张茹, 戴峰, 等. 煤岩特性对超声波速影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 793-800.
- [11] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮对页岩的致裂效应及在压裂中应用分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 79-85.
- [12] 翟成, 孙勇. 低温循环致裂煤体孔隙结构演化规律试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 24-29.
- [13] Cai Yidong, Liu Dameng, Pan Zhejun, et al. Petrophysical characterization of Chinese coal cores with heat treatment by nuclear magnetic resonance[J]. Fuel, 2013, 108: 292-302.
-
- 作者简介: 翟成(1978—), 男, 山东滕州人, 教授, 博士, 2008年毕业于中国矿业大学, 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心副主任, 主要从事煤矿瓦斯治理方面的研究。
-
- (收稿日期: 2018-07-20; 责任编辑: 王福厚)

(上接第 4 页)

- [10] 姚艳斌, 刘大锰, 蔡益栋, 等. 基于 NMR 和 X-CT 的煤的孔裂隙精细定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(11): 1598-1607.
- [11] 郑贵强, 凌标灿, 郑德庆, 等. 核磁共振实验技术在煤孔径分析中的应用[J]. 华北科技学院学报, 2014, 11(4): 1-7.
- [12] 谢凯楠, 姜德义, 孙中光, 等. 基于低场核磁共振的干湿循环对泥质砂岩微观结构劣化特性的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 653-659.
- [13] 李志清, 孙洋, 胡瑞林, 等. 基于核磁共振法的页岩纳米孔隙结构特征研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 758-766.
- [14] 刘勇健, 李彰明, 郭凌峰, 等. 基于核磁共振技术的软土三轴剪切微观孔隙特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1924-1932.
- [15] 李沙沙. 无烟煤瓦斯吸附规律的低场核磁共振研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
-
- 作者简介: 徐佑林(1982—), 男, 贵州贵阳人, 副教授, 博士, 2013年毕业于煤炭科学研究总院, 主要从事矿山压力与岩层控制的研究。
-
- (收稿日期: 2019-07-05; 责任编辑: 王福厚)

