



采矿与安全工程学报
Journal of Mining & Safety Engineering
ISSN 1673-3363, CN 32-1760/TD

《采矿与安全工程学报》网络首发论文

题目： 液态CO₂驱替煤体CH₄的渗流特性及机制分析
作者： 李珍宝，王凤双，梁瑞，赵海章，马吉昊，魏高明
网络首发日期： 2021-12-20
引用格式： 李珍宝，王凤双，梁瑞，赵海章，马吉昊，魏高明. 液态CO₂驱替煤体CH₄的渗流特性及机制分析[J/OL]. 采矿与安全工程学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1760.td.20211217.1411.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

液态 CO₂ 驱替煤体 CH₄ 的渗流特性及机制分析

李珍宝¹, 王凤双¹, 梁瑞¹, 赵海章¹, 马吉昊¹, 魏高明²

(1.兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050; 2.西安科技大学安全学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 煤层瓦斯抽采效率低是造成高瓦斯及突出矿井采掘接续困难和瓦斯事故频发的重要原因。液态 CO₂ 具有低温致裂增透和相变置换驱替促抽瓦斯效应, 可有效提高煤层渗透性, 促进吸附态 CH₄ 解吸。采用研发的三轴多相 CO₂ 促抽煤层 CH₄ 平台, 分析了不同温度下的煤体抽真空-CH₄ 吸附-CO₂ 驱替全过程应变、驱替浓度、流量及渗透率的变化, 揭示了液态 CO₂ 驱替煤层 CH₄ 过程机制。结果表明: ①在吸附 CH₄ 及 CO₂ 驱替阶段, 煤体均表现为膨胀应变, 各阶段应变分为快速膨胀和缓慢膨胀变形阶段。CO₂ 驱替阶段的应变显著大于 CH₄ 饱和吸附阶段的应变, 温度越低, 应变差异性越大。②驱替过程不同驱替阶段的主导控制效应分别为裂隙游离 CH₄ 驱赶、CH₄ 自解吸及 CO₂-CH₄ 竞争吸附。驱替流量先快速增加, 后缓慢降低并趋于稳定。③温度越低, 煤体稳态渗透率越大, 低温下煤基质收缩裂隙扩容和热应力损伤增透效应远大于煤体吸附膨胀作用。④液态 CO₂ 驱替 CH₄ 过程的低温裂隙扩容与孔裂隙损伤发育效应, 大于 CO₂-CH₄ 竞争吸附膨胀作用, 是改善煤层渗透性的关键。为提高注 CO₂ 的经济性, 在技术应用过程的不同驱替阶段应优化设计注入流量参数。

关键词: 置换驱替; 瓦斯抽采; 膨胀变形; 驱替浓度; 渗透率

中图分类号: TD712

文献标志码: A

Seepage characteristic and mechanism during liquid CO₂ displacing CH₄ in coal seam

LI Zhenbao¹, WANG Fengshuang¹, LIANG Rui¹, ZHAO Haizhang¹, MA Jihao¹, WEI Gaoming²

(1.College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2.College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The low efficiency of gas extraction in high-gas and outburst coal mines is the main factor to frequently discontinue the mining and excavating circulation and cause mine methane accidents. Liquid CO₂, injecting coal seam, has the synergistic effect of fracturing and displacement CH₄, which can effectively improve coal seam permeability and rapidly promote the adsorbed CH₄ to desorption state. The self-developed triaxial platform was applied to study the features during multiphase CO₂ displacing CH₄ process. The parameters of the coal strain, CH₄/CO₂ concentration, flow rate, and permeability were analyzed during the coal vacuuming, CH₄ adsorption, and CO₂ displacement process under the different temperatures. The optimization method of liquid CO₂ enhancing coal bed methane was proposed. The results show that: ① The strain of coal samples displayed swelling deformation during the CH₄ adsorption and CO₂ displacement stages, and the strain curves can be divided into rapid expansion and slow swelling phases. The strain in CO₂ displacing stage is significantly larger than that in CH₄ adsorption stage. The lower the temperature, the greater the corresponding strain difference. ② The migration of CO₂ and CH₄ presented opposite directions during the displacement process. The dominant effects at different stages were free CH₄ driving by injected CO₂, CH₄ self-desorption, and CO₂-CH₄ competitive adsorption, respectively. The flow rate increased rapidly at initial stage, and then decreased to a stable state, which is related to the free CH₄ driving and CH₄ self-desorption stages. ③ The permeability change is consistent with the displacement temperature. The contributions of coal matrix shrinkage and thermal stress damage at low temperature were greater than the coal adsorption swelling. ④ The permeability improvement of fracture expansion and pore damage at low temperature during CO₂ displacing CH₄ process is distinctly greater than the permeability inhibi-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51904138); 甘肃省自然科学基金资助项目(20JR10RA194); 兰州理工大学“红柳优青”资助计划(02-062001)

作者简介: 李珍宝(1987—), 男, 陕西凤翔人, 副教授, 硕士生导师。

通讯作者: 王凤双(1987—), 女, 河北威县人, 讲师。Email: 735872503@qq.com

tion of coal swelling during CO₂-CH₄ competitive adsorption. For improving the economic efficiency during CO₂ injection, the flow parameter should be optimized at the different displacing stages of the application process of this technology.

Key words: displacement; gas drainage; swelling deformation; displacing concentration; permeability

我国 50% 以上煤层为高瓦斯或煤与瓦斯突出煤层, 随着煤炭开采深度的不断增加, 瓦斯灾害严重威胁着矿井的安全高效生产^[1]。由于我国煤层地质赋存条件复杂, 瓦斯压力大、气体含量高、煤层透气性低, 造成瓦斯抽采达标困难。有效提高煤层渗透性、促进吸附态瓦斯快速解吸, 是实现煤层瓦斯高效抽采的关键。为有效提高矿井瓦斯的抽采效率、缩短预抽时间, 国内外学者开发了多种煤层增透及驱替瓦斯技术, 包括水力压裂/割缝^[2-3]、爆破预裂^[4-5]等损伤致裂增透技术, 以及注热升温^[6]、超声波辐射^[7]、注气置换^[8]等强化解吸促抽瓦斯技术, 有效提高了抽采效率。

注 CO₂ 提高煤层瓦斯抽采率 (CO₂-ECBM), 具有资源采收和环境保护双重效益, 引起学者广泛关注。目前工业用 CO₂ 主要是从火力发电厂或化工企业烟道气中捕集分离后采用液相进行储运。从能量利用和经济性考虑, 将液化后的 CO₂ 直接注入煤层^[9], 煤体与低温液态 CO₂ (LCO₂) 发生热-质传递, LCO₂ 促抽煤层 CH₄ 过程具有“致裂增透”和“置换驱替”双重效应, CH₄ 抽采效率可提高 2 倍以上^[10-12]。综合考虑 LCO₂ 与煤层热-质传递过程煤基质冷收缩及孔裂隙损伤增渗与吸附膨胀协同效应, 煤层注 LCO₂ 过程渗透率亦不断变化。煤储层渗流特性的动态演化, 直接关系 LCO₂ 促抽瓦斯技术实践成败。

目前 CO₂-ECBM 方向的研究聚焦于超临界 CO₂ 驱替 CH₄ 效果分析^[13], 低温 LCO₂ 注入煤层的研究较少。LCO₂ 注入煤层具有多相流多组分非稳态渗流扩散的复杂特征, 是热-流-力-固多场耦合过程。LCO₂ 注入煤层之后, 首先直接影响的是煤体温度, 该温度又进一步决定了煤体的渗透性和置换驱替效果^[9]。多场耦合下 LCO₂-ECBM 过程注入量的确定, 二元气体运移中煤层驱替效果及工艺参数优化仍是该技术工业应用的难点。

1. 实验装置及方法

1.1 煤样制备

实验采用彬长矿区孟村煤矿 4 煤新鲜原煤试样, 将大块煤取出后用保鲜膜包裹运送至实验室, 从块煤平行层理方向钻取 20 组 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的煤样, 制成多个 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的样品。通

过 He 测试渗透率, 加载轴/围压均为 5 MPa 进行测试, 筛选出其中 5 个渗透率 ((0.21 ± 0.005) mD) 最相近样品, 认为实验煤样初始渗透性基本一致。将选出的煤样置于真空干燥箱中, 在 60℃ 下烘干备用。

1.2 实验装置

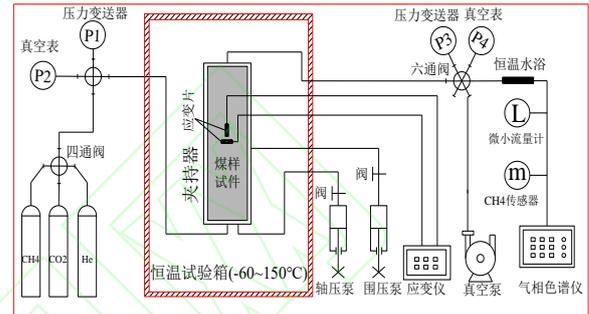


图 1 三轴多相 CO₂ 驱替 CH₄ 装置系统

Fig. 1 Triaxial system of multiphase CO₂ displacing CH₄

采用自主研发的三轴多相 CO₂ 驱替煤层 CH₄ 实验装置, 系统组成如图 1 所示, 由三轴煤芯加持器、轴/围压加载泵、气体供给瓶组、真空泵、高低温试验箱、微小流量计、气相色谱仪、数据记录仪、应变分采集仪及温度-压力检测仪表等组成。其中应变仪为 SG04-III 型应变采集仪, 检测量程 $\pm 20000 \mu\epsilon$, 精度 0.5%; 轴/围压加载泵最大量程为 100 MPa; 高低温试验箱控温范围 -60~150℃, 升温速率 0.5~6℃/min; 数据采集用 T₃ 数据记录仪, 采集频率 1~50 Hz; 采用的 CO₂/CH₄/He 气体纯度均为 99.99%。

1.3 测试步骤

目前我国正在开采的高瓦斯或突出煤层埋深在 300~1500 m, LCO₂-ECBM 工业试验是将低温 LCO₂ 注入煤层, LCO₂ 与煤体不断发生对流换热, 经过较长时间, 在同一位置处 CO₂ (部分区域存在相变) 和煤体均处于温度接近。在沿压注孔半径方向 (从压注孔指向煤体远端), CO₂ 和煤体的温度变化范围为 -30~30℃^[9]。因此选取该温度范围 (步长 15℃) 为驱替实验温度 (煤体与 CO₂ 温度保持一致), 设定煤体内 CH₄ 孔隙压力为 1.6MPa, CO₂ 驱替压力为 2MPa。实验步骤如下:

(1) 分别在试件垂直和平行层理方向粘贴应变片, 在检查好系统气密性后, 将试件放入煤芯加持器内;

(2) 连接好管路和数据采集系统, 缓慢交替

加载轴/围压至 5MPa，同时开启恒温实验箱至预设温度（-30、-15、0、15、30 °C），稳定 12h；

（3）开启真空泵至-0.07 MPa 并保持 3h 后，打开 CH₄ 瓶，向夹持器内注入 1.6MPa 的 CH₄ 气体，持续吸附 6h；

（4）关闭 CH₄ 气瓶，缓慢打开 CO₂ 气瓶，保持夹持器入口压力 2MPa（LCO₂ 储运过程的常见压力），打开发出气端，持续检测驱替流浓度、流量及煤体应变。

1.4 分析方法

LCO₂-ECBM 的煤体积应变用下式计算^[14]：

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 \quad (1)$$

式中， ε_v 、 ε_1 、 ε_2 分别为体应变、纵向应变（垂直于原煤层理方向应变）和环向应变（平行于原煤层理方向应变）， $\mu\varepsilon$ 。

渗透率是固体介质内部流体流动能力的表征。目前有 3 种渗透率测量分析方法：基于 Darcy 定律的稳态测量方法，瞬态测量方法和孔隙压力振荡法^[15]。本实验测试中，一方面煤体渗透率的变化依赖于内部孔隙结构的变化，另一方面煤体吸附态 CH₄ 自解吸及 CO₂-CH₄ 竞争吸附行为会造成渗流能力的不断变化。因此，LCO₂-ECBM 过程不断变化的渗透率实际是一种多因素影响下的“表观瞬态渗透率”。在等温条件测试实验中，随着驱替时间的增加，最终煤体渗透率趋于稳定，符合 Darcy 定律^[16]：

$$K = \frac{2 \cdot 10^5 p_0 \mu_g L}{A(p_2^2 - p_1^2)} q \quad (2)$$

式中， k 为驱替过程的稳态渗透率， 10^{-15} m^2 ； p_0 为大气压，MPa； q 为稳定后的驱替流量， cm^3/s ； μ_g 为混相驱替流黏度，用 Sutherland 公式计算，Pa s； L 为试件长度，cm； A 为试样横截面积， cm^2 ； p_2 和 p_1 为夹持器入、出口压力，MPa。

2. 实验结果与分析

2.1 煤体变形

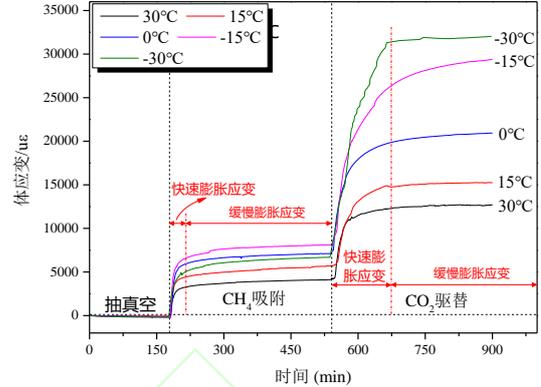


图 2 抽真空-CH₄ 吸附-CO₂ 驱替过程煤体应变

Fig. 2 Coal swelling during vacuum pumping-CH₄ adsorption-CO₂ displacement

煤体在轴/围压加载下，抽真空-CH₄ 吸附-CO₂ 驱替全过程煤体应变如图 2 所示，负值表示收缩变形，正值表示膨胀变形。从分子运动的角度来看，气体分子的吸附-解吸过程瞬间便可完成，但是试过测试过程吸附 CH₄ 及 CO₂ 驱替阶段经历较长过程，主要是由于气体分子通过煤基质微孔内的不同浓度差驱动的扩散过程缓慢。由图 2 可以看出：CH₄ 吸附和 CO₂ 驱替后期，变形量相对稳定，表示煤基质内的渗流-扩散、吸附-解吸过程基本平衡。在抽真空阶段，煤体的收缩变形量在 130~210 $\mu\varepsilon$ ；在吸附 CH₄ 及 CO₂ 驱替阶段，煤体变形呈现如下特征：

（1）在吸附 CH₄ 及 CO₂ 驱替阶段，不同温度下煤样随时间增加的应变曲线有类似的变化规律，煤体的膨胀应变均是先快速增加，后趋于平缓。在 CH₄ 吸附阶段，不同温度煤体快速膨胀变形只占吸附变形总时间的 10%，应变量占吸附总应变的 75% 以上。快速膨胀应变阶段主要受两个因素影响：一是 CH₄/CO₂ 注入煤体中，孔隙压力快速升高，煤体发生膨胀应变；另一方面，煤体对注入的 CH₄/CO₂ 快速吸附，煤体表面发生吸附膨胀变形。

（2）煤对 CO₂ 驱替的应变显著大于 CH₄ 吸附应变量，在不同温度下，CO₂ 驱替稳定阶段的膨胀变形量是 CH₄ 吸附变形量的 2.7~4.8 倍。可以推断：温度越低，煤体分别对 CH₄ 和 CO₂ 的吸附量及其两者差值越大，单一气体吸附及二元气体竞争吸附过程产生的应变差异性亦越大。

2.2 驱替 CH₄/CO₂ 浓度

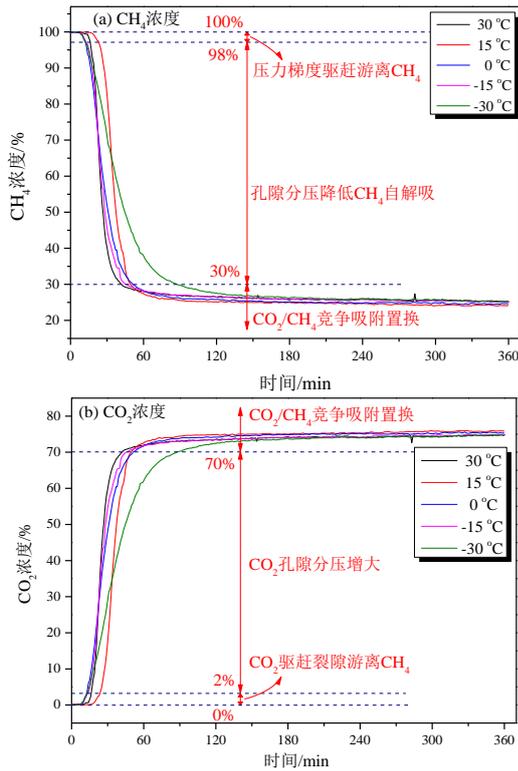


图3 驱替流中 CH₄/CO₂ 浓度

Fig. 3 CH₄/CO₂ concentration in the displacement flow

不同温度下 CO₂ 驱替 CH₄ 过程，驱替流中气体浓度变化规律如图 3 所示。煤体内 CO₂ 及 CH₄ 发生“逆向”运移，注入的 CO₂ 在煤体裂隙及孔隙表面发生渗流-扩散-吸附行为，吸附态 CH₄ 不断解吸-扩散-渗流并被驱替出来。根据其主导效应不同，驱替过程气体浓度变化曲线可以划分为三个阶段：

(1) 第一阶段：裂隙中游离态 CH₄ 驱赶效应主导。随着 CO₂ 的注入，试样入口和出口端的压力梯度增大，裂隙中的承压状态的 CH₄ 被注入的 CO₂ 驱赶向出口。此阶段驱替流中的 CH₄ 浓度很高，只有极少量的 CO₂ 通过裂隙与 CH₄ 混合达到出口端。以 CH₄ 浓度大于 98% 为界限，不同温度下裂隙中游离态 CH₄ 驱赶所需的时间为 13~23 min，占整个驱替时间的 3.6%~6.4%。

(2) 第二阶段：孔隙分压降低 CH₄ 自解吸效应主导。随着裂隙中一定压力的游离态 CH₄ 被驱赶出来，微观孔隙中的 CH₄ 快速向煤基质裂隙中扩散，煤孔隙内 CH₄ 的分压快速降低，而导致表面吸附 CH₄ 的动态平衡状态向解吸方向移动，煤体中过剩吸附态 CH₄ 快速解吸。随着解吸的不断进行，煤表面吸附态 CH₄ 逐渐减少，解吸速度降低，表现为驱替流中 CH₄ 浓度的降低，CO₂ 浓度升高。以 CH₄ 浓度 98%→30% 界限，不同温度下

CH₄ 自解吸所需的时间为 29~65 min，占整个驱替时间的 8.1%~18.1%。

(3) 第三阶段：CO₂-CH₄ 竞争吸附效应主导。该阶段大量的 CO₂ 扩散进入煤体微观孔隙，在孔隙表面与吸附态 CH₄ 不断发生竞争吸附。驱替流中的 CH₄ 浓度最终稳定在 75% 左右，且该阶段占整个驱替时间的 80% 以上。根据图 3 中的 CO₂ 浓度曲线变化可以看出，此过程高浓度的 CO₂ 尚未在煤体内发生竞争吸附而随驱替流排出，说明该阶段注入的 CO₂ 量过剩。

2.3 驱替流量

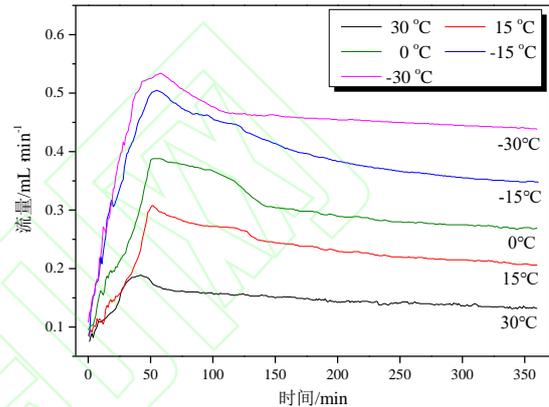


图4 不同温度下的驱替流量

Fig. 4 Displacement flows at different temperatures

不同温度下 CO₂ 驱替 CH₄ 过程的驱替流量变化规律如图 4 所示。流量整体先快速增加，后降低并趋于稳定。温度由低到高驱替流量达到峰值对应的时间分别为 59、55、52、50、43 min。流量快速增加阶段所用的时间与驱替流中第一、二阶段气体浓度（图 3）变化所用时间之和接近，说明该阶段流量的快速增加与裂隙游离 CH₄ 驱赶和 CH₄ 自解吸效应密切相关。随着 CH₄ 自解吸速率达到最大，驱替流量也达到峰值。之后随着 CO₂ 的不断吸附，煤体发生显著的膨胀变形，驱替流量亦降低。以 30°C 为基准，随着温度降低，其稳定流量分别是该基准的 1.56、2.04、2.63、3.32 倍。温度越低，煤基质的“冷缩”应变越显著，对应的驱替流量亦越大。

2.4 渗透率

已有研究表明驱替过程 Klinkenberg 效应的临界压力为 1.3~1.5 MPa^[17-18]，本实验测试的 CO₂ 注入压力为 2 MPa，故不考虑驱替过程滑脱效应对渗透率的影响。煤样吸附 CH₄ 和 CO₂ 均会发生膨胀变形，使煤体渗透性降低^[19]。将驱替流量稳定后的结果代入公式 (1)，可得不同驱替温度下煤体的稳态渗透率，如图 5 所示。

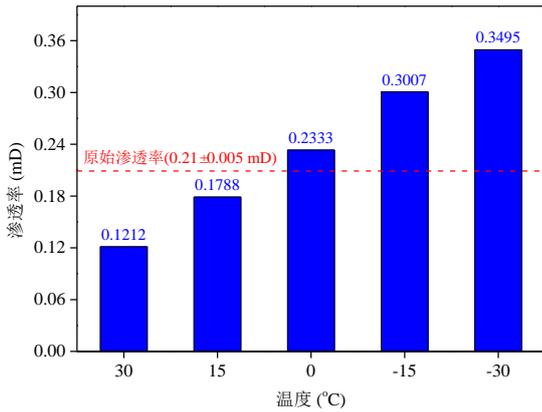


图5 不同驱替温度下煤体的稳态渗透率

Fig. 5 Permeability at different displacing temperatures

从 30°C 降低到 -30°C, 驱替过程稳态渗透率分别是原始煤样的 0.58、0.85、1.11、1.43、1.66 倍。随着驱替温度的降低, 稳态渗透率显著增加。一方面, 温度越低, 煤体对 CO₂ 吸附性越强, 由此造成的膨胀效应越显著 (如图 2 所示), 煤体的渗透性越小; 另一方面, 低温作用造成煤体基质收缩, 煤的裂隙空间扩张, 煤体渗透性增大。根据图 5 可以看出: 在驱替温度为 30°C 和 15°C 时, CO₂ 对煤体的吸附膨胀效应大于温度引起的“热胀冷缩”作用, 煤体渗透性显著降低。

3. 讨论

液态 CO₂ 驱替 CH₄ 的煤体变形与驱替流量 (渗流性能) 变化机制如图 6 所示。液态 CO₂ 驱替煤层 CH₄ 过程中, 驱替流量呈先增加后减少的趋势, 其控制因素包括低温增透^[20-22]和吸附膨胀两个矛盾的方面。一方面, 低温液态 CO₂ 注入煤层后沿着内部裂隙渗流, 与煤体表面发生热量交换, 煤基质降温发生收缩变形, 裂隙空间扩大而增加了煤体的驱替流量; 同时热量交换过程的不均匀性在煤体内部产生温度梯度, 煤基质内部形成剪切-拉伸等热应力, 达到煤体力学强度极限时形成微观孔裂隙损伤扩展^[20], 煤体渗流能力增加。另一方面, 升温相变后的 CO₂ 与孔隙表面吸附态 CH₄ 竞争吸附, 由于煤对 CO₂ 的吸附变形大于 CH₄ 变形量, 因此煤体发生膨胀变形逐渐增大, 内部渗流通道空间逐渐减小, 渗流能力亦逐渐降低。根据实验测试结果来看, 液态 CO₂ 驱替 CH₄ 过程的增透效应明显大于吸附膨胀抑制作用, 低温 CO₂ 注入可以显著提升煤层的驱替流量。

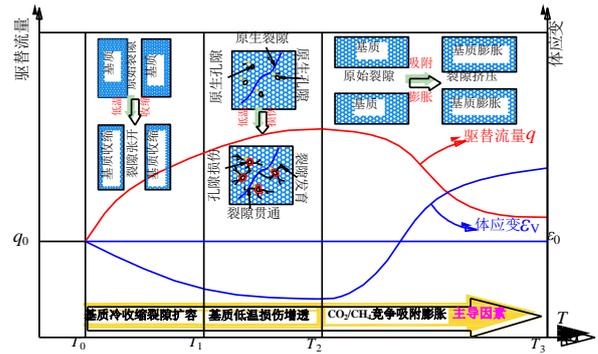


图6 液态 CO₂ 驱替煤体 CH₄ 机制

Fig. 6 Mechanism of liquid CO₂ displacing CH₄ in coal seam

根据驱替过程应变-驱替浓度-流量特性及其机制, 为提高注 CO₂ 驱替经济性, LCO₂-ECBM 技术应用过程中应进行工艺参数的优化, ①注 LCO₂ 前期: 煤体低温收缩裂隙扩容, 应以较大流量注入 LCO₂, 实现游离态 CH₄ 驱赶; ②注 LCO₂ 中期: CH₄ 孔隙分压减小解吸加速, 此过程应逐渐减小向煤层注入 LCO₂ 流量; ③注 LCO₂ 后期: CO₂-CH₄ 竞争吸附, 应保持较小流量注入煤层。

4. 结论

(1) 不同温度下煤体吸附 CH₄ 及 CO₂ 驱替过程中, 煤样应变呈现先快速增加, 后趋于平缓的规律; 快速膨胀变形阶段约占总变形时间的 10%。CO₂ 驱替稳定阶段的膨胀变形量是 CH₄ 吸附变形量 2.7~4.8 倍, 温度越低, 应变差异性越大。

(2) 驱替过程 CO₂ 及 CH₄ 发生“逆向”运移, 其曲线分为三个阶段: 压力梯度作用下裂隙中游离态 CH₄ 驱赶效应, CH₄ 浓度高, 占整个驱替时间的 3.6%~6.4%; 煤体孔隙瓦斯分压降低, 过剩吸附态 CH₄ 快速解吸, CH₄ 浓度快速降低; CO₂ 扩散进入煤体微观孔隙并与吸附态 CH₄ 发生竞争置换, CH₄ 浓度约保持在 75%, 该阶段占驱替时间的 80% 以上。

(3) 驱替流量先快速增加至峰值, 后逐渐降低并趋于稳定。温度越低, 峰值流量及稳定后的流量值亦越大, 流量快速增加所用时间与裂隙游离 CH₄ 驱赶和 CH₄ 自解吸阶段所用时间之和相近。

(4) 低温 CO₂ 驱替煤体 CH₄ 过程中, 温度越低, 煤体渗透率越大, 低温致裂增透效应大于吸附膨胀的抑制作用, 低温 CO₂ 可以显著改善煤层渗透性。

(5) 液态 CO₂ 驱替 CH₄ 过程, 低温作用下的裂隙扩容与孔裂隙损伤发育效应大于 CO₂-CH₄

竞争吸附膨胀作用, 可显著提升煤层的渗透率。

参考文献(References):

- [1] 王德明, 邵振鲁, 朱云飞. 煤矿热动力重大灾害中的几个科学问题[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 57–64.
WANG Deming, SHAO Zhenlu, ZHU Yunfei. Several scientific issues on major thermodynamic disasters in coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 57–64.
- [2] 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.
- [3] 李晓红, 王晓川, 康勇, 等. 煤层水力割缝系统过渡过程能量特性与耗散[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1404–1408.
LI Xiaohong, WANG Xiaochuan, KANG Yong, et al. Energy characteristic scams system in coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1404–1408.
- [4] 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, 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, 1: 1–5.
- [5] 蔡峰, 刘泽功, Luo Yi. 爆轰应力波在高瓦斯煤层中的传播和衰减特性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 110–114.
CAI Feng, LIU Zegong, LUO Yi. Propagation and attenuation characteristics of stress waves generated by explosion in high-gas coal-beds [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 110–114.
- [6] 黎力, 梁卫国, 李治刚, 等. 注热 CO₂ 驱替增产煤层气试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2044–2050.
LI Li, LIANG Weiguo, LI Zhigang, et al. Experimental investigation on enhancing coalbed methane recovery by injecting high temperature CO₂ [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 2044–2050.
- [7] 胡国忠, 朱怡然, 李志强. 可控源微波场促进煤体中甲烷解吸的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 4: 100–106.
HU Guozhong, ZHU Yiran, LI Zhiqiang. Experimental study on desorption enhancing of methane in coal mass using a controlled microwave field [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 4: 100–106.
- [8] SAMPATH KHSM, PERERA MSA, RANJITH PG, et al. CH₄-CO₂ gas exchange and supercritical CO₂ based hydraulic fracturing as CBM production-accelerating techniques: A review [J]. Journal of CO₂ Utilization, 2017, 22: 212–230.
- [9] 李珍宝. 液态 CO₂ 低温致裂及相变驱替促抽煤层 CH₄ 机制研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
LI Zhenbao. Thermal Cracking and Displacement for enhancing methane extraction by phase transition of liquid CO₂ injection in coal seam [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [10] LI Zhenbao, WEI Gaoming, LIANG Rui, et al. LCO₂-ECBM technology for preventing coal and gas outburst: Integrated effect of permeability improvement and gas displacement [J]. Fuel, 2020, 285:119219.
- [11] 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 the characteristic of crack propagation in coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2793–2799.
- [12] LI Zhenbao, WANG Fengshuang, SHU Chi-Min, et al. Damage effects on coal mechanical properties and micro-scale structures during liquid CO₂-ECBM process [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 83: 103579.
- [13] 梁卫国, 张倍, 贺伟, 等. 不同阶煤超临界 CO₂ 驱替开采 CH₄ 试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 197–203.
LIANG Weiguo, ZHANG Beining, HE Wei, et al. Experimental research on supercritical CO₂ enhanced coalbed methane recovery in different rank coals [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 197–203.
- [14] 张遵国. 煤吸附/解吸变形特征及其影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
ZHANG Zunguo. Study on characteristics of adsorption/desorption-induced deformation and its influencing factors [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [15] 陈祖安, 伍向阳, 方华, 等. 岩石气体介质渗透率的瞬态测量方法[J]. 地球物理学报, 1999, 42(S1): 167–171.
CHEN Zu'an, WU Xiangyang, FANG Hua, et al. Gas transit measurement method of permeability on rock [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(S1): 167–171.
- [16] 侯东升, 梁卫国, 张倍宁, 等. CO₂ 驱替煤层 CH₄ 中混合气体渗流规律的研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3463–3471.
HOU Dongsheng, LIANG Weiguo, ZHANG Beining, et al. Seepage law of mixed gases CH₄ [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3463–3471.
- [17] 蒋一峰. 受载煤体-瓦斯-水耦合渗流特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
JIANG Yifeng. Coupling seepage characteristics of loaded coal containing gas and water [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018.
- [18] 陈军斌, 熊鹏辉, 索根喜, 等. 吸附性气体对煤岩基质变形和渗透率的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(1): 146–153.
CHEN Junbin, XIONG Penghui, SUO Genxi, et al. Effects of the adsorbed gas on the deformation and permeability of the coal matrix [J]. Petroleum Geology Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(1): 146–153.
- [19] 周西华, 韩明旭, 白刚, 等. CO₂ 注气压力对瓦斯扩散系数影响规律实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 81–86.
ZHOU Xihua, HAN Mingxu, BAI Gang, et al. Experimental study on the influence of CO₂ injection pressure on gas diffusion coefficient [J]. Coal Geology Exploration, 2021, 49(1): 81–86.
- [20] WEN Hu, LI Zhenbao, DENG Jun, et al. Influence on coal pore structure during liquid CO₂-ECBM process for CO₂ utilization [J]. Journal of CO₂ Utilization, 2017, 21: 543–552.

- [21] 李珍宝, 王凤双, 魏高明, 等. 液态 CO₂ 溶浸无烟煤的氧化动力学特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1):330-335.
LI Zhenbao, WANG Fengshuang, WEI Gaoming, et al. Oxidation reaction and kinetics of anthracite infiltrated by liquid CO₂ [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 330-335.
- [22] 徐吉钊. 液态 CO₂ 循环冲击致裂煤体孔隙结构及损伤力学特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
XU Jizhao. Study of pore evolution and damage mechanical characteristics of coals under the effect of liquid CO₂ cyclic shock fracturing [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

