



液态CO₂相变驱替煤层CH₄钻孔压力脉动形成机制

米万升 文虎 樊世星 程小蛟 李日军 柳博聪 金霏阳

引用本文:

米万升, 文虎, 樊世星, 等. 液态CO₂相变驱替煤层CH₄钻孔压力脉动形成机制[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 281–291.
MI Wansheng, WEN Hu, FAN Shixing. Mechanism of pressure pulsation in borehole during the process of liquid CO₂ phase change displacement for coal seam CH₄[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 281–291.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0856>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同CO₂注入温度置换驱替CH₄特性试验研究

Experimental study on characteristics of replacement and displacement of CH₄ at different CO₂ injection temperatures
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 167–174 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e1594ce5-581d-48a0-9e4e-21b4524edc5b>

煤层含水率对CO₂等压扩散置换CH₄效应的影响研究

Study on influence of coal seam water content on effect of CO₂ isobaric diffusion displacing CH₄
煤炭科学技术. 2025, 53(S1): 87–96 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0061>

基于气水两相流的注热CO₂增产CH₄数值模拟研究

Numerical study of heat injection CO₂ to increase CH₄ production based on gas–water two–phase flow
煤炭科学技术. 2024, 52(3): 115–128 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0690>

低渗煤层CO₂–ECBM过程的CO₂和CH₄的扩散特征

Diffusion characteristics of CO₂ and CH₄ in CO₂–ECBM process of low permeability coal seam
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 112–121 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1296>

液态CO₂煤层增透技术及应用研究

Research and application of anti-reflection technology of liquid CO₂ coal seam
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 107–114 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/382e8724-6e30-4d74-a127-ec810b67ae99>

水分对CH₄和CO₂在煤中竞争吸附特性影响研究

Investigation on the impact of water on the competitive adsorption characteristics of CH₄/CO₂ in coal
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 243–254 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1999>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

米万升,文 虎,樊世星,等. 液态 CO₂ 相变驱替煤层 CH₄ 钻孔压力脉动形成机制[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 281–291.

MI Wansheng, WEN Hu, FAN Shixing, *et al.* Mechanism of pressure pulsation in borehole during the process of liquid CO₂ phase change displacement for coal seam CH₄[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 281–291.

液态 CO₂ 相变驱替煤层 CH₄ 钻孔压力脉动形成机制

米万升,文 虎,樊世星,程小蛟,李日军,柳博聪,金霏阳

(西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 煤层钻孔压注液态 CO₂ 是提高 CH₄ 抽采效果的有效措施, 以井下实际压注过程为原型建立顺层钻孔压注液态 CO₂ 相变驱替煤层 CH₄ 物理模型, 在分析钻孔压力组成, 结合理想气体状态方程、热量计算公式、傅里叶导热定律等传热学基本理论的基础上, 阐述了钻孔压力脉动形成的本质原因和影响因素, 并给出了数学表达式; 由此可知恒压注入时, 钻孔压力变化取决于液态 CO₂ 相变压力, 而液态 CO₂ 相变压力受压注过程有效导热系数和孔内实时温度共同调控, 为此, 基于径向热流法原理开展了等高不等直径煤样液态 CO₂ 压注过程有效导热系数随煤样表面温度变化规律测定试验, 据此得出压注过程中钻孔内液态 CO₂ 相变压力的理论预期值, 最终给出液态 CO₂ 相变驱替煤层 CH₄ 过程中钻孔压力脉动变化的数学表达。研究表明: 试验过程中不同直径煤样压注孔承受的液态 CO₂ 最大注入压力为 2.0 MPa; 红外热成像与温度传感器测得的煤样表面温变规律趋势基本一致, 而有效导热系数随煤样半径、煤样表面温度降低值随煤样半径均表现为开口向下的指数函数变化形式, 由此得出有效导热系数与煤样表面温度降低值之间呈现单调递增的函数变化形式, 最终结合液态 CO₂ 相变压力与有效导热系数的量化表征关系得到钻孔内液态 CO₂ 相变压力以及钻孔压力脉动变化实时值的数学表达式, 揭示了液态 CO₂ 相变驱替煤层 CH₄ 过程中钻孔压力脉动变化的形成机制。

关键词: 液态 CO₂; 液气相变; 驱替; 煤层 CH₄; 钻孔压力; 脉动机制

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)08-0281-11

Mechanism of pressure pulsation in borehole during the process of liquid CO₂ phase change displacement for coal seam CH₄

MI Wansheng, WEN Hu, FAN Shixing, CHENG Xiaojiao, LI Rijun, LIU Bocong, JIN Feiyang

(School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Injecting liquid CO₂ into coal seam boreholes is an effective measure to improve CH₄ extraction efficiency. We established a physical model for CO₂ phase change displacement of coal seam CH₄ based on the actual injection process in boreholes. The model analyzes the composition of borehole pressure, using basic theories of heat transfer such as the ideal gas law, heat calculation formulas, and Fourier's law of heat conduction. It explains the essential causes and influencing factors of pressure fluctuations in boreholes, and provides mathematical expressions for these fluctuations. It is found that during constant pressure injection, borehole pressure variations depend on the phase change pressure of liquid CO₂. This phase change pressure is jointly regulated by the effective thermal conductivity of the injection process and the real-time temperature inside the borehole. Therefore, based on the principle of radial heat flow, an experiment was conducted to determine the variation of effective thermal conductivity with the surface temperature of coal samples of varying diameters. The theoretical expected value of the phase change pressure of liquid CO₂ during injection was derived. Ultimately, a mathematical expression for the pressure fluctuation in boreholes during the CO₂ phase change displacement of coal seam CH₄ was provided. The study results

收稿日期: 2024-06-23

策划编辑: 宫在芹

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2024-0856

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52274227); 中国博士后科学基金资助项目(GZC20232134); 陕西省科技厅三项改革——以演代评资助项目(2024ZC-YYDP-03)

作者简介: 米万升(1991—), 男, 山西平遥人, 博士研究生。E-mail: 21120089021@stu.xust.edu.cn

通讯作者: 文 虎(1972—), 男, 新疆石河子人, 教授, 博士生导师。E-mail: wenhxust@163.com

show that the maximum injection pressure of liquid CO_2 in boreholes with different diameters is 2.0 MPa. The temperature variation trends of the coal sample surface measured by infrared thermography and temperature sensors are consistent, and the effective thermal conductivity varies as an exponential function with respect to the coal sample radius and surface temperature decrease. It was found that the effective thermal conductivity shows a monotonically increasing function with the decrease in surface temperature of the coal sample. By combining the quantitative relationship between CO_2 phase change pressure and effective thermal conductivity, mathematical expressions for the phase change pressure of liquid CO_2 and real-time pressure fluctuations in boreholes were obtained, revealing the formation mechanism of pressure fluctuation changes during CO_2 phase change displacement of coal seam CH_4 .

Key words: liquid CO_2 ; liquid-gas phase transition; displacement; coal seam CH_4 ; borehole pressure; pulsatile mechanism

0 引言

煤层瓦斯是影响煤矿安全生产的重要风险源,但同时其又是一种清洁高效的绿色能源。而液态 CO_2 具有低黏强渗、吸热闪蒸和相变增压的特点,通过压注 CO_2 的方式加大煤层瓦斯的抽采力度,既能有效卸压增透煤层、减少井下瓦斯事故风险,抽采的瓦斯又可直接用于井口发电厂,为生产生活所需能量拓宽补给路径,同时也可为我国按期实现“碳达峰、碳中和”的治理目标作出贡献。围绕这一煤矿安全生产和绿色清洁能源增补的热点问题,ZHANG 等^[1]开展了 CO_2 岩心驱替试验,驱替压力为 6 ~ 10 MPa,煤样中 CH_4 产出效率超过 90%;贾进章等^[2]运用数值模拟和井下试验研究了注入 CO_2 后煤层 CH_4 压力和含量的变化规律,数值模拟结果表明注入 CO_2 使煤层 CH_4 压力和含量分别降低了 6.3% 和 6.81%,而井下试验结果表明注入 CO_2 后煤层瓦斯压力和含量分别降低了 75.42% 和 69.55%;苏现波等^[3]研究了不同 CO_2 占比对煤层瓦斯的驱替效果,结果表明 CO_2 占比越高,对提高瓦斯采收率的效果越好;白刚等^[4]、周西华等^[5]、梁卫国等^[6-7]针对注 CO_2 驱替 CH_4 的不同影响因素展开研究;王立国等^[8-9]开展了 CO_2 与 N_2 等气体的驱替效果对比试验,证实注 CO_2 驱替煤层瓦斯的效果更好;除上述物理试验、数值模拟等手段外,WANG 等^[10]、WEN 等^[11]、MI 等^[12]开展了注 CO_2 驱替煤层瓦斯的井下试验,取得了较好的促抽效果。

众多学者从物理试验、数值模拟和现场试验等多重研究方法着手对注 CO_2 提高煤层瓦斯的抽采效率以及 CO_2 和不同气体对煤层瓦斯的驱替置换效果对比进行了分析,虽然证明 CO_2 更利于煤层瓦斯高效抽采,但多为定性分析,鲜见定量表征;此外,到目前为止,国内外学者在研究中更多选用气态或超临界 CO_2 进行, CO_2 在测试过程中为单一相态,且研究关注点集中在压注孔周 CO_2 在煤层中渗流扩散以及抽采孔内瓦斯抽采效果,这一过程不需考虑 CO_2 相态变化带来的物性改变对驱替效果造成的影响;而

对于 CO_2 液气相变,其理化性质随温压变化趋势和注入后 CO_2 在煤层中的非线性渗流-扩散-吸附规律的研究也有相关报道提出,但对于 CO_2 注入后其在进入煤层远场之前、在钻孔中发生相变对孔内压力造成的影响和规律,尤其是在“注液压力、相变压力和 CO_2 渗出流量”三因素共同调控下钻孔压力出现脉动波动这一有利于发挥井下有限量罐装液态 CO_2 驱替效能的研究更加鲜见报道。

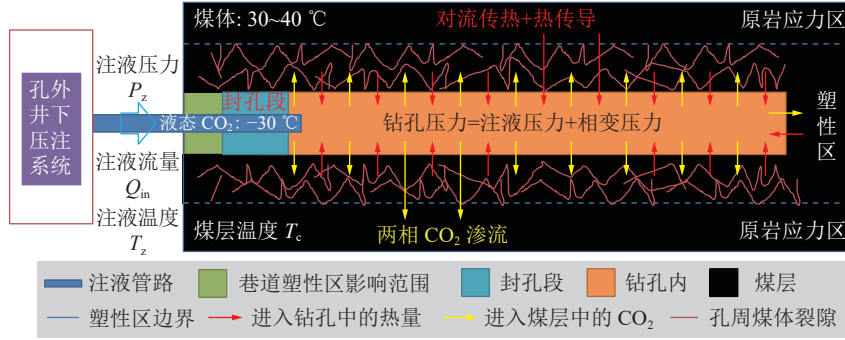
因此,笔者从受限空间 CO_2 液气相变增压着手,建立液态 CO_2 相变驱替煤层 CH_4 物理模型,推导了钻孔压力的数学表达式,分析了影响钻孔压力脉动变化的影响因素,开展了液态 CO_2 相变驱替煤层 CH_4 过程有效导热系数随煤样表面温变规律的测定试验,最终得出了钻孔压力脉动变化实时值的理论表达式,厘清了钻孔压力脉动变化的理论根源,为液态 CO_2 相变脉动驱替促抽煤层 CH_4 技术的参数选取和现场推广提供了理论基础。

1 钻孔压力形成理论分析

1.1 液态 CO_2 相变驱替煤层 CH_4 物理模型

煤矿井下顺层钻孔压注液态 CO_2 相变驱替 CH_4 技术利用液态 CO_2 吸热相变为气态、体积急剧膨胀的特性形成压力梯度,使两相 CO_2 沿着钻孔周壁裂隙快速向煤层远场渗流,此过程中钻孔内液态 CO_2 与孔周煤层发生强烈的复合热交换行为。通过对井下实际压注情况进行合理简化,建立煤层中顺层钻孔注液态 CO_2 驱替 CH_4 的物理模型,如图 1 所示。

如上图所示,井下压注系统以注液压力 P_z 、注液流量 Q_m 和注液温度 T_z 等压注参数将储罐中的液态 CO_2 增压后通过管路注入钻孔中,孔内压注管路出口穿过封孔段,外露适宜长度,该长度相较于钻孔长度可忽略不计。 CO_2 以液态形式进入钻孔,其温度为 $-30\text{ }^\circ\text{C}$,孔周煤体温度在 $30\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$,两者之间温差为 $60\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$,温度差造成热量从煤体传递至钻孔内,钻孔内的液态 CO_2 吸热相变形成气态 CO_2 。根据 CO_2 的物性参数可知,液态 CO_2 相变为气态后,密度

图 1 顺层钻孔注液态 CO₂ 驱替 CH₄ 过程物理模型Fig.1 A physical model of CH₄ displacement process by injecting liquid CO₂ into parallel boreholes

极大地减小, 体积增大为同质量液态 CO₂ 的 562 倍^[13-15]。将钻孔视为受限空间, 可知钻孔压力受注液压力、液态 CO₂ 相变压力和相变后两相 CO₂ 向煤层远场渗流三因素的综合影响, 即注液压力和相变压力使钻孔压力升高, CO₂ 渗出使钻孔压力降低, 三者“此消彼长”, 共同调控钻孔压力的变化^[16-17]。

1.2 钻孔压力数学表达

CO₂ 渗出流量受到注液压力和液态 CO₂ 相变压力的共同影响, 根据流体力学能量守恒定律^[18], 得出钻孔压力如式(1)所示。

$$P_k^i = P_z + \Delta P^i \quad (1)$$

式中: P_k 为钻孔压力, 其值由安设于孔口的数显压力表实时显示, MPa; 上标 i 为 t_i 时刻; P_z 为注液压力, 其值由井下低温液态 CO₂ 柱塞增压泵组自带数显压力表实时显示, MPa; ΔP 为孔内液态 CO₂ 相变形成的压力, MPa。

式(1)中的 ΔP 是由于液态 CO₂ 在钻孔中吸热相变形成的, 该部分液变气的液态 CO₂ 质量为 Δm , 根据质量守恒定律, 认为质量为 Δm 的液态 CO₂ 全部相变为气态 CO₂ 之后质量仍为 Δm 。将相变后的气态 CO₂ 看作理想气体, 其分子与钻孔内壁之间在单位时间内施加于孔壁单位面积冲量的统计平均值宏观上表现为钻孔内壁的压力^[19-20]; 根据热力学温升模型中的理想气体状态方程有式(2)如下所示。

$$\Delta P^i V_k = \frac{\Delta m}{M} RT_k^i \quad (2)$$

式中: V_k 为钻孔体积, m³; M 为 CO₂ 气体的摩尔质量, g/mol; R 为摩尔气体常量, 其值为 8.314, J/(mol · K); T_k^i 为 t_i 时刻孔内温度, °C, 该值由安设于钻孔口的数显温度表实时观测和采集, 且由于钻孔内壁面上时刻处于动态热平衡, 即孔周煤体的温度与钻孔中 CO₂ 的温度一致, 则不同时刻孔周煤体的温度也用该

时刻的钻孔温度 T_k^i 表示。

将式(2)进行变换, 可得出钻孔中液态 CO₂ 相变压力如式(3)所示。

$$\Delta P^i = \frac{\Delta m}{MV_k} RT_k^i \quad (3)$$

根据热量 Δ 计算公式, 质量为 Δm 的液态 CO₂ 从 t_1 时刻持续到 t_i 时刻内温度变化 ΔT 所需的能量为 E , 如式(4)所示; 且 ΔT 指该时间段内由于液态 CO₂ 相变造成的钻孔温度变化值, 如式(5)所示。

$$E = C_1 \Delta m \Delta T \quad (4)$$

$$\Delta T = T_k^i - T_k^1 \quad (5)$$

式中: T_k^1 为 t_1 时刻钻孔内温度, °C; C_1 为液态 CO₂ 比热容, kJ/(kg · K)。

联立式(3)、式(4)和式(5), 可得出钻孔内液态 CO₂ 相变压力与温差的关系, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Delta P = \frac{\Delta m RT_k^i}{MV_k} \\ E = C_1 \Delta m \Delta T \Rightarrow E = C_1 \frac{\Delta P M V_k}{RT_k^i} (T_k^i - T_k^1) \\ \Delta T = T_k^i - T_k^1 \end{cases} \quad (6)$$

除此之外, 不论钻孔内液态 CO₂ 与孔周煤壁之间的传热过程如何复杂, 其本质仍为固液对流换热的形式进行的, 为此, 根据傅里叶导热定律表达式可列出上述耦合传热过程在 t_1 时刻至 t_i 时刻内热量传递如式(7)所示。

$$\Phi = -k_Y S_z (T_k^i - T_k^1) \quad (7)$$

式中: k_Y 为液态 CO₂ 相变驱替煤层 CH₄ 整个热量传递过程中的导热系数, 称为有效导热系数, W/(m · K); S_z 为液态 CO₂ 与钻孔内壁接触面积, m²。

联立式(6)和式(7), 可得出钻孔液态 CO₂ 相变压力与有效导热系数的量化关系, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} E = \Phi \\ E = C_1 \frac{\Delta P^i MV_k}{RT_k^i} (T_k^i - T_k^l) \Rightarrow \Delta P^i = \left| -k_Y \frac{S_z RT_k^i}{C_1 MV_k} \right| \\ \Phi = -k_Y S_z (T_k^i - T_k^l) \end{cases} \quad (8)$$

上式的物理含义为压注过程中的 t_i 时刻, 钻孔内实时温度为 T_k^i , 此时钻孔内形成与之对应的相变压力值为 ΔP^i ; 将式(8)进行变换, 得到式(9)。

$$\begin{cases} \text{令 } \frac{S_z R}{C_1 MV_k} = U \\ \Delta P^i = U k_Y T_k^i \end{cases} \quad (9)$$

式中: U 为常数。

式(9)表示液态 CO_2 相变压力受钻孔内实时温度和导热效果的共同影响, 在某一具体时刻, 钻孔中

温度为定值, 孔内液态 CO_2 相变压力值与有效导热系数呈线性相关, 因此, 在压注时间段内, 为明确钻孔中液态 CO_2 相变压力值随有效导热系数的定量变化, 有必要对有效导热系数随煤样表面温变规律进行试验测定。

2 液态 CO_2 压注过程有效导热系数随煤样表面温变规律的测定试验

2.1 试验原理

液态 CO_2 压注过程有效导热系数随煤样表面温变规律采用径向热流法原理进行测试, 利用微元法对非稳态径向热流进行分析, 将非稳态问题转换成微元体的稳态问题, 如图 2 所示。

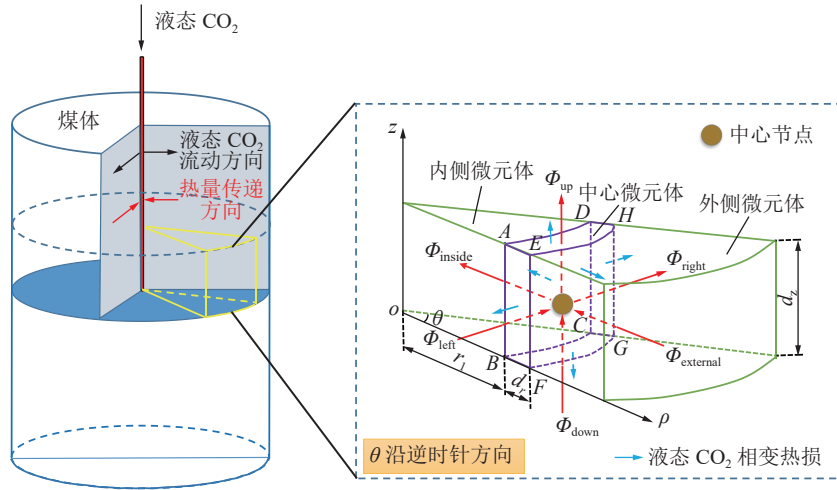


图 2 微元体导热过程分析

Fig.2 Analysis of heat conduction process in microelements

如图 2 所示, 在煤体中划定一个圆柱体, 沿径向取其中一部分并将其划分为内侧微元体、中心微元体和外侧微元体, 通过分析外侧微元体、下侧微元体和左侧微元体对中心微元体的热量输入, 以及中心微元体对内侧微元体、上侧微元体和右侧微元体的热

量输出, 考虑液态 CO_2 的相变吸热, 相对于中心微元体的热量净增量, 图 2 中将液态 CO_2 相变吸热量标为热损, 即其方向与中心微元体热量净增量的方向相反。结合热量平衡原理, 建立热平衡方程, 如式(10)所示, 由此得出有效导热系数的表达式如式(11)所示。

$$\begin{cases} \Phi_{JZL} = k_Y (1 - \varepsilon_c) \left\{ \left\{ \frac{\theta r_1 d_z}{d_r} [2T_{ZX} - (T_W + T_N)] \right\} + \left\{ \frac{\theta (d_r^2 + 2r_1 d_r)}{2d_z} [2T_{ZX} - (T_X + T_S)] \right\} \right\} \\ E_{JZL} = E_c - E_a = \theta (d_r^2 + 2r_1 d_r) d_z \frac{T'_{ZX} - T_{ZX}}{2(t_b - t_a)} [C_p (1 - \varepsilon_c) \rho_c - C_l \varepsilon_c \rho_l m'] \\ \Phi_{JZL} = E_{JZL} \end{cases} \quad (10)$$

$$k_Y = \frac{(d_r^2 + 2r_1 d_r) d_z \frac{T'_{ZX} - T_{ZX}}{2(t_b - t_a)} [C_p (1 - \varepsilon_c) \rho_c - C_l \varepsilon_c \rho_l m']}{(1 - \varepsilon_c) \left\{ \left\{ \frac{r_1 d_z}{d_r} [2T_{ZX} - (T_W + T_N)] \right\} + \left\{ \frac{d_r^2 + 2r_1 d_r}{2d_z} [2T_{ZX} - (T_X + T_S)] \right\} \right\}} \quad (11)$$

式中: Φ_{JZL} 为单位时间内 t_a 时刻中心节点的热量净增

量, J; E_{JZL} 为中心微元体在 t_a 时刻至 t_b 时刻内考虑孔

隙中液态 CO₂ 相变吸热的能量净增量, J; E_c 为中心微元体中煤体固体基质能量变化, J; E_a 为中心微元体煤体孔隙中液态 CO₂ 全部相变所需的能量, 该值为负值, J; θ 为极角, (°); d_r 为中心微元体沿 ρ 坐标轴方向的厚度, m; r_1 为液态 CO₂ 注入孔中心至面 ABCD 的距离, m; d_z 为微元体沿 z 轴方向的高度, m; T_{zx} 为 t_a 时刻中心微元体的温度, °C; T'_{zx} 为 t_b 时刻中心节点温度, °C; C_p 为煤体的定压比热容, KJ/(kg · K); ε_c 为煤体孔隙率, %; ρ_c 为煤体密度, kg/m³; m' 为液态 CO₂ 蒸发率; $T_N/T_W/T_S/T_X$ 分别为 t_a 时刻内侧微元体/外侧微元体/上侧微元体/下侧微元体的温度, °C。

将式(11)中几何计算部分看作定值, 不考虑液态 CO₂ 对煤样骨架的冷冲击作用, 即孔隙率为定值, 且液态 CO₂ 的蒸发率与温度正相关, 其与每一个瞬态煤体温度均具有对应值, 因此, 可将其也看作定值。综上, 将式(11)中看作定值的部分用 K_{DXXS} 代替, 得到式(12)。

$$k_Y = K_{DXXS} \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

(12)

式中: K_{DXXS} 为表征系数; $\Delta T/\Delta t$ 为温度变化率, 其物

表 1 煤样工业性分析

Table 1 Industrial analysis of coal samples

煤质	$V_{ad}/\%$	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$S_t/\%$	$FC_{ad}/\%$
弱黏煤	30.0	3.0	10.0	0.63	83.2

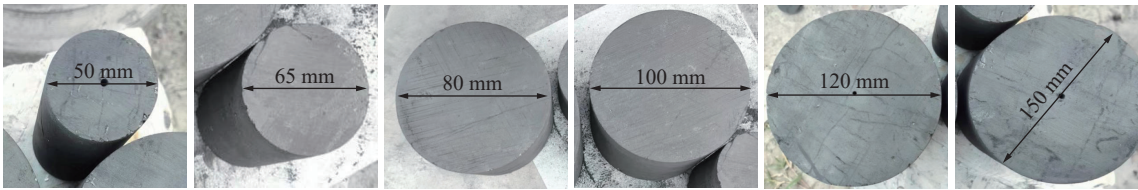


图 3 等高不等直径圆柱形煤样示意

Fig.3 Schematic diagram of cylindrical coal samples with equal height and unequal diameter

表 2 煤样压注孔及表面温度观测点的技术参数

Table 2 Technical parameters of coal sample injection holes and surface temperature observation points

煤样 编号	压注孔(第一组试验/第二组试验)				表面温度观测点(第二组试验)		
	位置	数量	孔径/mm	孔深/mm	位置	数量	与压注孔径向距离/mm
No.1-1/No.2-1	煤样 上端 面的 中心	1	3.0	50	上端面/表面	1/3	12.5/25
No.1-2/No.2-2		1	3.0	50	上端面/表面	1/3	16.3/32.5
No.1-3/No.2-3		1	3.0	50	上端面/表面	1/3	20/40
No.2-4		1	3.0	50	上端面/表面	1/3	25/50
No.2-5		1	3.0	50	上端面/表面	1/3	30/60
No.2-6		1	3.0	50	上端面/表面	1/3	37.5/75

理含义为煤体在给定时间内的温度变化值, °C/s。

2.2 煤样制备

试验选用等高不等直径的圆柱型煤样, 按照《煤样的制备方法》(GB 474—2008)进行钻取, 所用新鲜块煤取自陕西黄陵双龙煤矿 112 工作面回风巷, 对煤样进行工业性分析, 参数见表 1。

本试验分为两组, 第一组包含 3 个煤样, 高度均为 100 mm, 直径分别为 50、100 和 150 mm, 编号为 No.1-1 ~ No.1-3; 该组煤样只设置压注孔, 孔径 3.0 mm, 孔深 50 mm, 编号为 SY₁ ~ SY₃; 目的是测试不同直径煤样压注孔所能承受的最大注液压力值, 为第二组试验选择适宜的注液压力提供依据。第二组包含 6 个煤样, 高度均为 100 mm, 直径分别为 50、65、80、100、120 和 150 mm, 编号 No.2-1 ~ No.2-6; 该组煤样除设置压注孔(孔径和孔深与第一组相同)外, 还需在每个煤样的上端面和侧表面(煤样侧表面后续需统称为“煤样表面”)设置煤样表面温度观测点, 压注孔编号为 K_{YZ-1} ~ K_{YZ-6}, 表面温度观测点编号为 D_{GC-1} ~ D_{GC-24}。此外, 等高不等直径的煤样示意图如图 3 所示, 两组煤样压注孔和煤样观测点的设计参数见表 2。

此外, 为尽可能降低钻孔施作对煤样内部原生结构的影响, 采用精密钻孔设计施作压注孔, 表面温度观测点按照表 2 中的技术参数进行设置, 分别在煤样上端面压注孔与边缘线中线处和圆柱形煤样表面等距倒粘中空短螺栓, 以 50 mm×100 mm 的煤样

设置作为示例,如图 4 所示;其余煤样的压注孔设计参数以及煤样表面温度观测点的布置与其一致。

2.3 试验方案

2.3.1 试验系统

试验采用自主搭建的液态 CO₂ 相变驱替煤层 CH₄ 多相态耦合传热过程有效导热系数温变规律测

试系统进行,该系统包含 CO₂ 供气系统、加热制冷循环器、液态 CO₂ 储罐、FOTRIC348 红外热成像仪、煤样固定装置、64 通道数据实时采集仪、压力传感器、温度传感器、质量流量计以及调压阀、截止阀、连接管线等仪器设备,系统连接示意及主要装置实物如图 5 所示。

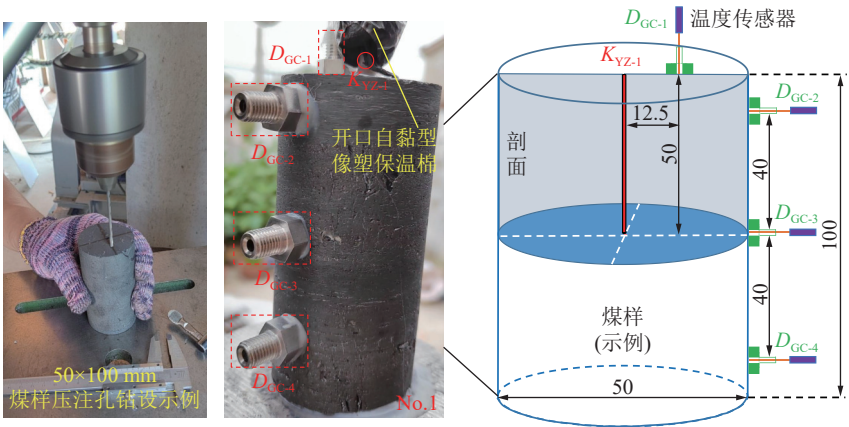
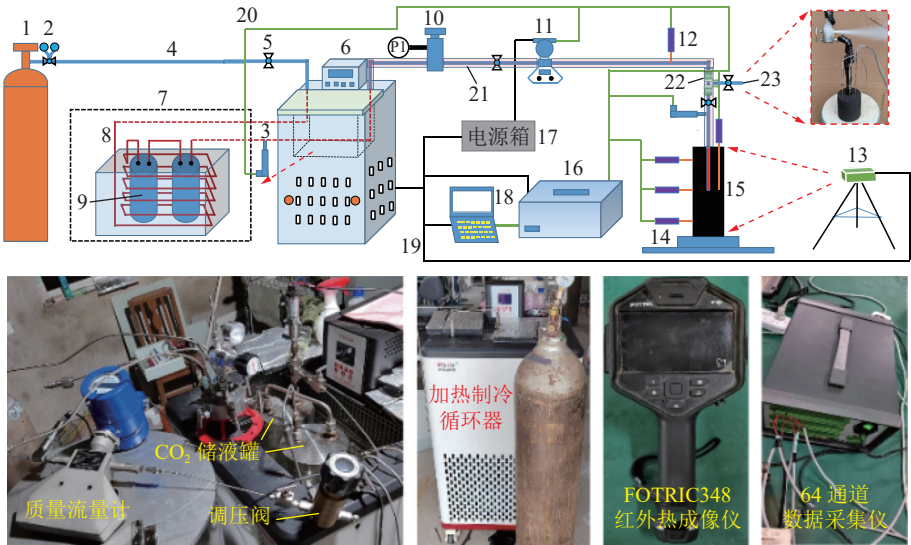


图 4 煤样压注孔施作和表面温度观测点设置示意

Fig.4 Coal sample pressure injection hole and surface temperature observation point setting schematic



1—CO₂ 钢瓶; 2—减压阀; 3—压力传感器; 4—压注管路; 5—截止阀; 6—加热制冷循环器; 7—低温恒温槽; 8—注气盘管; 9—液态 CO₂ 储罐; 10—调压阀; 11—质量流量计; 12—温度传感器; 13—FOTRIC348 红外热成像仪; 14—煤样固定装置; 15—煤样; 16—64 通道数据采集仪; 17—电源; 18—电脑; 19—供电线路; 20—数据采集线路; 21—开口自黏型橡塑保温棉; 22—三通; 23—CO₂ 泄放口; P1—液态 CO₂ 管路压力。

图 5 有效导热系数随煤样表面温变规律测定试验系统

Fig.5 Experimental system for measuring the variation of effective thermal conductivity with surface temperature of coal samples

2.3.2 试验关键参数及流程

试验时主要把握注液压力、注液温度和煤样初始温度等关键参数。为尽可能贴合现场压注实际,将 CO₂ 的注液温度设定为 -30 ℃,煤样初始温度通过可调温恒温微波炉加热至 30 ℃;结合 CO₂ 相态变化规律,为确保注入煤样中的 CO₂ 为液态,注液压力

需满足 >1.43 MPa,在此基础上,试验中实际注液压力值根据第一组试验结果进一步确定。

试验流程主要包括:① 试验系统搭建。按照图 5 所示将各设备仪器进行连接,所有管线、控制阀门和流量计均使用保温棉包裹作保温处理;② 气密性监测。利用 CO₂ 钢瓶以 0.5 MPa 压力向管路中注入气

体,查看管路各连接处的气密性,确认良好后放空管路气体;③ 检测仪器开启及校准。FOTRIC348 红外热成像仪开机预热 15 min,设置时间、湿度、风速、分辨率、辐射率等内置参数,选择区域测温、自动调焦模式,利用相对误差法校准温度传感器;④ 管路黏接。使用高强度速凝 AB 胶粘接压注孔中的注液管路以及图 4 中所示煤样表面的中空短螺栓,其中,深入压注孔中的注液管路前端与孔底之间保留 10 mm 裸孔段,所有管路粘结后及静置 12 h;⑤ 煤样升温。试验前使用可调温恒温微波炉将煤样加热至 30 ℃,温差控制在 ± 1 ℃;⑥ CO₂ 增压降温液化。将加热制冷循环器温度设置为-30 ℃,开启内循环模式将进入位于其低温恒温浴槽中储液罐内的气态 CO₂ 进行液化,此过程中根据储液罐压力增加情况实时调整 CO₂ 钢瓶进气压力,确保 CO₂ 储液罐中充液饱满,直至其压力持续上升至恒定不变后,CO₂ 液化完成;

⑦ 压注液态 CO₂。开启调压阀之后的截止阀门,在煤样进液口处,关闭压注管路的进液阀门同时开启 CO₂ 泄放口阀门,缓慢调整调压阀开度,根据调压阀自带数显压力表调整注液压力为目标值,同步观测质量流量计自带温度实时数据和数据采集仪实时显示数据以及 CO₂ 泄放口的喷出情况,待泄放口处的 CO₂ 喷出干冰且该处阀门结霜时,认为注液管线中的 CO₂ 为低温液态;此时,关闭 CO₂ 泄放口阀门的同时开启该位置处的进液阀门,使低温液态 CO₂ 进入煤样,同步观测煤样状态、数据采集仪实时温度数据和红外热成像仪的煤样表面降温过程,直至煤样表面温度不再变化,从后至前依次关闭阀门,停止压注;⑧ 结果分析。对红外热成像仪和数据采集仪采集的数据进行导出并分析;⑨ 重复试验。调整压注参数,重复上述步骤②~⑦,进行下一组试验。

试验过程中,各关键步骤实际操作如图 6 所示。



图 6 试验关键步骤实际操作

Fig.6 Practical operation of key experimental steps

2.3.3 试验结果与分析

1)不同直径煤样压注孔承受最大注液压力。不同直径煤样压注孔承受的最大注液压力通过第一组试验结果进行判断。该组试验煤样在注入液态 CO₂ 过程中,首先利用煤样进液管路泄放口放出的 CO₂ 状态判断进入压注孔中的 CO₂ 是否为液态,当确定为液态后,持续缓慢提高注液压力,直至煤样因压力过高而破碎为止。此过程中,通过压注孔进液管路上的压力传感器采集到的压注孔压力实时变化曲线如图 7 所示。

从图 7 中可知,压注孔压力随时间的变化整体呈现出持续升高,到最高点后迅速下降的趋势;煤样半径为 25 mm 时,持续压注至 72 min 时压注孔压力达到最大值 4.5 MPa,煤样半径为 50 mm 时,持续压注至 24 min 时压注孔压力达到最大值 2.2 MPa,煤样半径为 75 mm 时,持续压注至 70 min 时压注孔压力达到最大值 5.1 MPa;根据该试验结果,可以判断出本试验所用的其它直径的煤样压注孔最大压力值均位于 2.2 ~ 4.5 MPa 和 2.2 ~ 5.1 MPa 的范围内。在遵循既要确保 CO₂ 为液态又要确保煤样不破裂的原则基础上,将试验中压注液压力统一确定为 2.0 MPa。

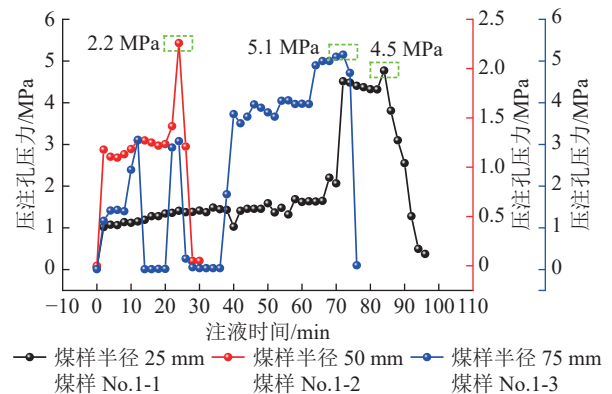


图 7 压注孔压力时变特征

Fig.7 Time-varying characteristics of pressure in injection boreholes

2)煤样表面温度变化规律。该组试验中使用红外热成像仪和温度传感器对煤样表面温度进行实时观测并相互验证,得出的温度时变特征如图 8 所示。

从图 8 可以看出,向煤样中压注低温液态 CO₂ 过程中,各煤样表面温度均表现出现随时间降低的趋势,且利用红外热成像仪监测的数据与温度传感器监测的数据基本一致,说明试验数据准确可靠,后续分析可依据此试验数据结果展开。同时,根据

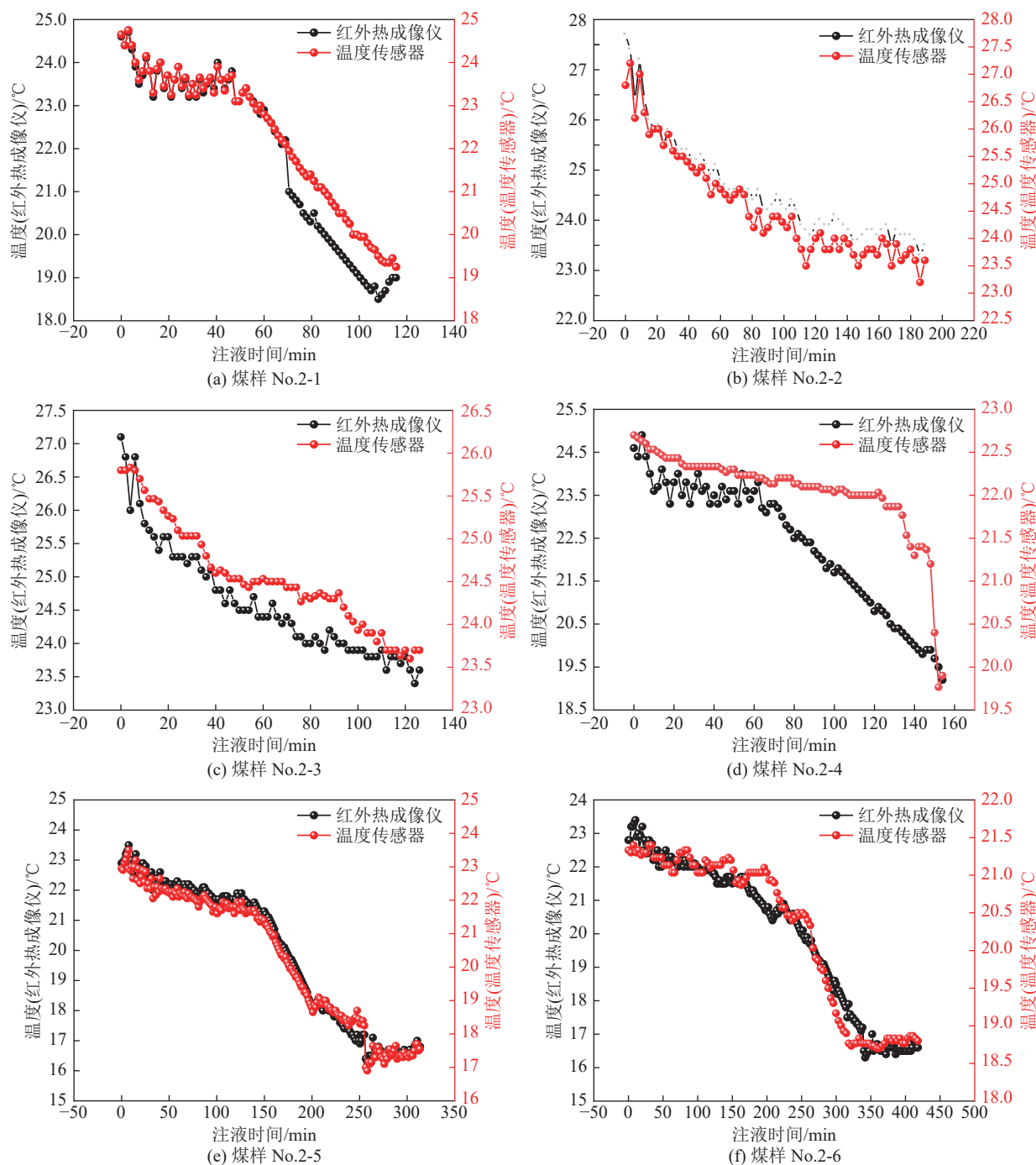


图 8 煤样表面温度时变特征

Fig.8 Time-varying characteristics of surface temperature of coal samples

该试验结果可得出有效导热系数的表达式为 $k_Y = nK_{DXXS}$ (n 为不同直径煤样的温度变化率)。

3)有效导热系数与孔周煤温的量化表征。根据图 8 所示结果,选择温度连续降低无波动或极小范围波动阶段、时间周期为 0 ~ 100 min 内的数据计算温度变化率,结合式(10)得出有效导热系数随煤样半径的变化规律,其拟合曲线如图 9 所示。

由图 9 中拟合曲线对不同煤样半径条件下的有效导热系数进行验证,得出 $mK_{DXXS} = m$ (m 为温度变化

率),由此得出 $K_{DXXS} = 1$ 。结合式(12),可得出有效导热系数与压注孔径向距离的函数表达式,如式(13)所示。

$$\begin{cases} k_Y = -0.000\ 09 + 0.001\ 93e^{-0.028\ 16L_r} & (\text{红外热成像}) \\ k_Y = 0.000\ 10 + 0.005\ 71e^{-0.085\ 08L_r} & (\text{温度传感器}) \end{cases} \quad (13)$$

式中: L_r 为与压注孔的径向距离, mm。

此外,分别计算在 0 ~ 100 min 时间周期内的煤样表面温度降低值,见表 3,同时得出煤样表面温度

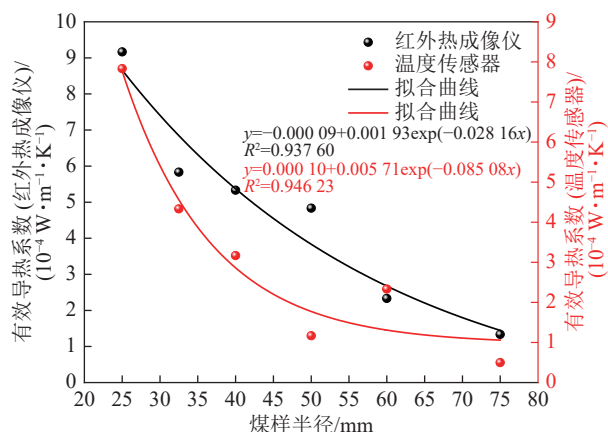


图 9 有效导热系数随煤样半径变化的拟合曲线

Fig.9 Fitting curves of effective thermal conductivity with variation of coal sample radius

表 3 0 ~ 100 min 温度连续下降阶段各煤样表面温度降低值
Table 3 Decrease in surface temperature of each coal sample during the continuous temperature drop stage from 0 to 100 minutes

测温模式	煤样表面温度降低值/℃					
	25 mm	32.5 mm	40 mm	50 mm	60 mm	75 mm
红外热成像仪	5.5	3.5	3.2	2.9	1.4	0.8
温度传感器(表面)	4.7	2.6	1.9	0.7	1.4	0.3
温度传感器(上端面)	1.6	传感器掉落	1.1	0.8	0.6	0.2

降低值随煤样半径的变化趋势曲线,此外,利用煤样上端面温度传感器监测数据对煤样表面温度降低值随半径的变化趋势进行验证,如图 10 所示。

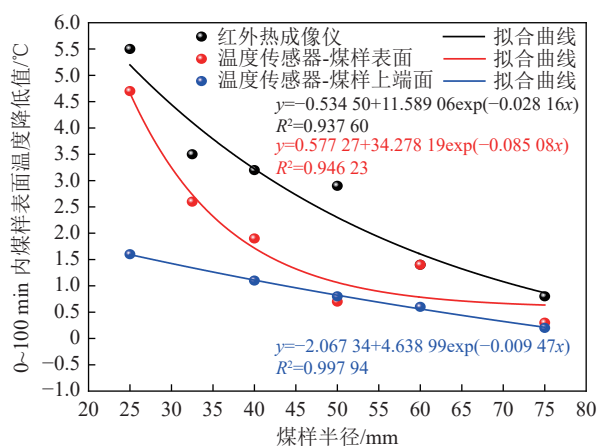


图 10 煤样表面温度降低值随半径的变化

Fig.10 Decrease in surface temperature of coal samples with radius variation

由图 10 可知,煤样上端面温度降低值和煤样表面温度降低值随煤样半径的变化趋势基本一致,可得出煤样表面温度降低值与煤样半径的数学表达式,

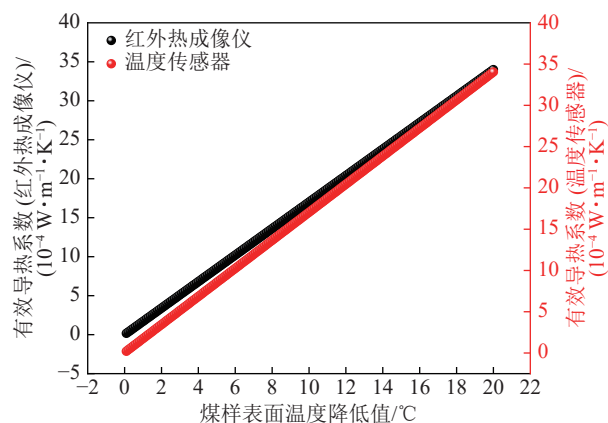


图 11 有效导热系数随煤样表面温度降低值的变化

Fig.11 Variation of effective thermal conductivity with decreasing surface temperature of coal sample

如式(14)所示。

$$\begin{cases} \Delta T_c = -0.534 5 + 11.589 06 e^{-0.028 16 L_r} (\text{红外热成像}) \\ \Delta T_c = 0.577 27 + 34.278 19 e^{-0.085 08 L_r} (\text{温度传感器}) \end{cases} \quad (14)$$

联立式(13)与式(14),得出有效导热系数与煤样表面温度降低值间的数学表达式,如式(15)所示,其具象表现形式如图 11 所示。

$$\begin{cases} k_Y = 0.000 17 \Delta T_c - 0.000 000 86 (\text{红外热成像}) \\ k_Y = 0.000 17 \Delta T_c + 0.000 003 8 (\text{温度传感器}) \end{cases} \quad (15)$$

为此,在式(15)分别得到有效导热系数随煤样表面温度降低值的函数关系之后,对红外热成像和温度传感器监测到的数据结果进行平均计算,目的是得出对红外热成像和温度传感器两种测温方式均符合的拟合曲线,如式(16)所示。

$$k_Y = 0.000 17 \Delta T_c + 0.000 001 47 \quad (16)$$

此外,煤样表面温度降低值在数值上等于原始温度和实时温度的差值,其关系如式(17)所示。

$$\Delta T_c = T_0 - T_c^i \quad (17)$$

式中: ΔT_c 为煤样表面温度降低值,℃; T_0 为煤样表面的原始温度,℃,该值为恒定值; T_c^i 为 t_i 时刻煤样表面实时温度,℃。

将式(17)代入式(16)中,即可得到有效导热系数随煤样表面原始温度和实时温度的数学表达式,如式(18)所示。

$$k_Y = 0.000 17 (T_0 - T_c^i) + 0.000 001 47 \quad (18)$$

4) 钻孔压力脉动数学表达。联立式(9)和式(18),得出钻孔内液态 CO₂ 相变压力与煤体温度和钻孔温度的量化表征,如式(19)所示。

$$\Delta P^i = \frac{S_z R [0.000\ 17 (T_0 - T_c^i) + 0.000\ 001\ 47] T_k^i}{C_1 M V_k} \Rightarrow$$

$$\Delta P^i = \frac{S_z R}{C_1 M V_k} [0.000\ 17 (T_0 - T_c^i) + 0.000\ 001\ 47] T_k^i$$

$$U = \frac{S_z R}{C_1 M V_k}$$

$$W = [0.000\ 17 (T_0 - T_c^i) + 0.000\ 001\ 47] T_k^i \quad (19)$$

从式(19)可以看出钻孔内液态 CO₂ 相变压力本质上受两方面影响,一是 CO₂ 本身的物性,如气体摩尔质量 M 、摩尔气体常量 R 和液态 CO₂ 的比热容 C_1 ,二是钻孔直径 D_p 、煤体原始温度 T_0 和钻孔空间内的实时温度 T_k^i 。

假设煤体温度为 10~40 ℃,而注入液态 CO₂ 的温度恒定为-30 ℃,为此,钻孔内的实时温度是在原有煤体温度的基础上由低温液态 CO₂ 相变吸热降温后“剩余”的温度,其数值范围一定满足 $[-30, T_0]$ 。因此,取煤体原始温度分别为 20、25、30、35 ℃ 和 40 ℃,绘制不同煤体温度条件下钻孔液态 CO₂ 相变压力随钻孔内温度变化的趋势如图 12 所示。

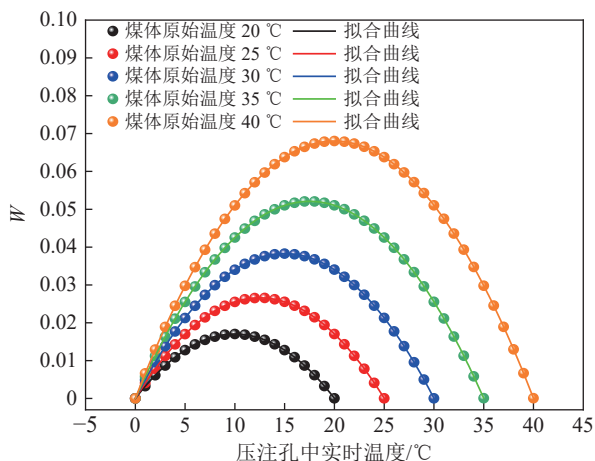


图 12 W 值随钻孔中实时温度的变化趋势

Fig.12 Trend of W value changing with real-time temperature in the borehole

由图 12 可知,虽然煤体温度不同,但 W 值随钻孔中实时温度的变化趋势大体上呈现开口向下的抛物线型函数,说明在压注液态 CO₂ 相变驱替煤层 CH₄ 过程中,不同的原始煤层温度条件下,最佳液态 CO₂ 相变压力对应特定的钻孔温度,并不是钻孔中温度越高,形成的相变压力就越大。

结合式(1),最终得出钻孔实时压力值如式(20)所示,该式也是钻孔压力脉动变化的理论表达式。

$$P_k^i = P_z^i + \frac{4R}{C_1 M D_p} [0.000\ 17 (T_0 - T_k^i) + 0.000\ 001\ 47] T_k^i \quad (20)$$

3 结 论

1)压注液态 CO₂ 相变驱替 CH₄ 过程中,液态 CO₂ 与钻孔周壁接触,热量由孔周固体传递至孔内液体,在流体内部出现气液相变传热传质行为,这是形成相变压力的本质原因。

2)钻孔压力在注液压力、液态 CO₂ 相变压力、CO₂ 渗出流量三者共同调控和影响下出现脉动变化特征;相变压力大小受钻孔内温度和液态 CO₂ 蒸发量的影响,而蒸发量与液态 CO₂ 固-液传热效果息息相关,但传热效果取决于压注过程有效导热系数,为此,推导了钻孔中液态 CO₂ 相变压力与孔内温度和压注过程有效导热系数的量化表征关系。

3)基于径向热流法原理,利用等高不等直径圆柱形煤样开展了液态 CO₂ 相变驱替煤层 CH₄ 过程有效导热系数随煤样表面温变规律测定试验,利用煤样表面温度变化表征有效导热系数,试验确定了不同直径煤样所能承受的最大注液压力为 2.0 MPa;有效导热系数随煤样表面温度降低值呈现单调增加的线性变化规律。

4)钻孔液态 CO₂ 相变压力实时值与孔内实时温度密切相关,且随孔内温度增加,液态 CO₂ 相变压力呈现出先增后减的开口向下的抛物线型变化规律,说明不同压注参数条件下,煤体热量所能“消化”的液态 CO₂ 量存在最大值,由此,最终得出了钻孔压力在注液压力、液态 CO₂ 相变压力和 CO₂ 渗出流量共同作用下的脉动变化表达式,并将其转换为由注液压力和钻孔内实时温度表征的数学表达式。

参考文献(References):

- [1] ZHANG X G, RANJITH P G. Experimental investigation of effects of CO₂ injection on enhanced methane recovery in coal seam reservoirs[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2019, 33: 394-404.
- [2] 贾进章, 张天阔, 王东明, 等. 注二氧化碳促抽煤层瓦斯数值模拟及现场试验[J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(1): 78-86.
JIA Jinzhang, ZHANG Tiankuo, WANG Dongming, et al. Numerical simulation and field test of CO₂ injection to promote coal seam gas extraction[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2023, 30(1): 78-86.
- [3] 苏现波, 黄津, 王乾, 等. CO₂ 强化煤层气产出与其同步封存试验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 176-184.
SU Xianbo, HUANG Jin, WANG Qian, et al. Experimental study on CO₂-enhanced coalbed methane production and its simultaneous storage[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1):

- 176–184.
- [4] 白刚, 姜延航, 周西华, 等. 不同 CO₂ 注入温度置换驱替 CH₄ 特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 167–174.
BAI Gang, JIANG Yanhang, ZHOU Xihua, et al. Experimental study on characteristics of replacement and displacement of CH₄ at different CO₂ injection temperatures[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 167–174.
- [5] 周西华, 姜鹏飞, 白刚, 等. CO₂ 驱替 CH₄ 置换效率测试与分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(2): 8–13.
ZHOU Xihua, JIANG Pengfei, BAI Gang, et al. Test and analysis of displacement efficiency of CO₂ replacing CH₄[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(2): 8–13.
- [6] 梁卫国, 张倍宁, 黎力, 等. 注能(以 CO₂ 为例)改性驱替开采 CH₄ 理论与试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10): 2839–2847.
LIANG Weiguo, ZHANG Beining, LI Li, et al. Theory and experimental study of CBM recovery driven by energy boosting[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2839–2847.
- [7] 梁卫国, 吴迪, 赵阳升. CO₂ 驱替煤层 CH₄ 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 665–673.
LIANG Weiguo, WU Di, ZHAO Yangsheng. Experimental study of coalbeds methane replacement by carbon dioxide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 665–673.
- [8] 王立国. 注气驱替深部煤层 CH₄ 试验及驱替后特征痕迹研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
WANG Ligu. Experiment studies on displacing deep coalbed CH₄ by gas injection and characteristic trace after displacement[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [9] WANG L G, WANG Z F, XU S R, et al. A field investigation of the deformation of protected coal and its application for CBM extraction in the Qinglong coalmine in China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27: 367–373.
- [10] WANG G D, REN T, WANG K, et al. Influence of maximum pressure on the path of CO₂ desorption isotherm on coal[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(11): 7093–7096.
- [11] WEN H, CHENG X J, CHEN J, et al. Micro-pilot test for optimized pre-extraction boreholes and enhanced coalbed methane recovery by injection of liquid carbon dioxide in the Sangshuping coal mine[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 136: 39–48.
- [12] MI W S, WEN H, FAN S X, et al. Correlation analysis of injection parameters for low-medium pressure injection of liquid CO₂ for CH₄ displacement in coal seams[J]. Energy, 2023, 278: 127760.
- [13] 文虎, 樊世星, 马砺, 等. 低渗透性煤层井下低压液态 CO₂ 促抽瓦斯工程实践[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(4): 530–537.
WEN Hu, FAN Shixing, MA Li, et al. A case study of methane drainage promotion by injecting liquid carbon dioxide into low permeability coal seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(4): 530–537.
- [14] 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.
- [15] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [16] MI W S, WEN H, FAN S X, et al. Pilot test of high-pressure water jet slotting with liquid CO₂ injection to displace CH₄ and improve coal seam permeability[J]. Fuel, 2023, 351: 128822.
- [17] WEN H, MI W S, FAN S X, et al. Determining the reasonable volume required to inject liquid CO₂ into a single hole and displace CH₄ within the coal seam in bedding boreholes: Case study of SangShuPing coal mine[J]. Energy, 2023, 266: 126522.
- [18] 张馨, 孙金山, 张湘平, 等. 钻孔爆破炮孔孔壁压力计算模型[J]. 爆破, 2021, 38(3): 1–5.
ZHANG Xin, SUN Jinshan, ZHANG Xiangping, et al. Calculation model of blasthole pressure[J]. Blasting, 2021, 38(3): 1–5.
- [19] 袁永, 陈忠顺, 梁小康, 等. 二氧化碳相变爆破致裂机理与应用研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 63–78.
YUAN Yong, CHEN Zhongshun, LIANG Xiaokang, et al. Mechanism and application of carbon dioxide phase change blasting fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 63–78.
- [20] 韦善阳, 孙威, 苗青, 等. 液态 CO₂ 相变致裂技术在金佳煤矿的应用[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 94–100.
WEI Shanyang, SUN Wei, MIAO Qing, et al. Liquid carbon dioxide phase transition fracturing technology applied to Jinjia Mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 94–100.