

文章编号: 1001-4888(2023)05-0665-10

裂缝形态影响下注热煤体升温及气体产出规律*

李艳, 梁冰, 孙维吉, 赵航, 张军林

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为研究裂缝形态对注热作用下煤样温度变化情况以及对煤中气体产出规律的影响, 基于 PCAS 软件对裂缝形态进行了定性及定量分析, 利用自主研制的裂缝煤样注热解吸渗流试验装置开展了室温条件下及注热条件下的煤样气体产出试验, 并对注热作用过程中煤样的温度进行实时监测。研究表明, 煤样的裂缝形态越复杂, 煤样升温幅度越大且达到的稳定温度越高, 煤样升温越快且温度上升的持续时间越久; 平行于流体流动方向的单一裂缝一定时, 垂直于流体流动方向的裂缝数目越多, 裂缝形态越复杂, 对室温条件下及注热条件下煤样气体产出的促进作用越强; 注热作用下煤样温度与裂缝分形维数之间呈指数型拟合关系, 向裂缝煤样中注热水, 可以提高煤样温度, 进而促进煤样中气体的产出, 使气体产出量增加, 且最大产出量可达未注热时量值的 1.74 倍; 向无缝煤样中注入热水后, 气体的产出总量较未注热时减少, 而含缝煤样注热水后的气体产出总量较无缝时增加, 说明裂缝的存在一定程度上可以削弱水锁效应带来的影响; 气体产出总量与煤样温度及裂缝分形维数之间呈现三维曲面拟合关系, 煤样的气体产出总量随着裂缝分形维数的增大及煤样温度的上升而增加。

关键词: 注热; 裂缝形态; 分形维数; 气体产出

中图分类号: TD845

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-22-308

0 引言

瓦斯的主要成分为甲烷, 常以游离态和吸附态 2 种方式赋存于煤层中^[1]。高效抽采煤层瓦斯有利于提升煤矿瓦斯的治理能力, 推动我国“双碳”目标的实现。我国的多数高瓦斯煤层透气性低, 解吸速率慢, 导致抽采流量低, 衰减速率快, 抽采难度大。因此, 探究不同裂缝形态下的注热煤体升温规律和气体解吸渗流规律, 对实现煤层瓦斯增产具有重要的理论意义和实践价值。

近年来, 众多学者通过向煤层注入蒸汽、热水^[2-6]及微波^[6]等热介质的方法发现, 提高煤层温度可以促进瓦斯解吸^[7]。煤层注入热量后, 不仅会影响内部孔隙和裂缝的结构变形特征^[8], 而且会使得气体分子活性增大, 促进煤层中瓦斯解吸和渗流, 同时还可增加煤层的渗透率^[8-12]。杨新乐等^[13]、李惟慷等^[3]发现注热后的瓦斯运移产量均明显高于未注热时的产量。王芦笛^[14]通过数值模拟发现注热时间越长, 煤储层的渗透率越大。张凤婕等^[12]、张永利等^[15]、Teng 等^[10]基于低渗煤层中注热开采煤层气的热-流-固耦合数学模型, 通过数值模拟方法证明了注热后煤层温度升高可以促进瓦斯解吸、提高煤层渗透率, 从而可增加瓦斯产量。

尽管煤层注热会提高煤层瓦斯的解吸和渗流, 但由于煤层导热能力有限, 热影响范围有限, 导致钻孔注热在工程实践中应用较少。为了更高效地将热量注入到煤层并扩大其热影响区域, 考虑在裂缝形

* 收稿日期: 2022-12-08; 修回日期: 2023-06-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51874166); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-11)

通信作者: 孙维吉(1980-), 男, 博士, 副教授。主要研究方向为瓦斯渗流理论及应用。Email: sunweiji-1231@163.com

态复杂、裂缝发育较好的煤层实施注热技术。煤层裂缝的发育程度对煤层瓦斯的扩散行为有一定影响。陈向军等^[16]分析发现煤样裂缝发育可使得瓦斯解吸时间缩短,煤中吸附气体可以快速解吸,从而进入裂缝渗流产出阶段。冯永昌等^[17]对水力压裂后注入热水的过程进行了模拟,结果表明热水可以沿着裂缝到达水合物的储层深处,且沿着裂缝形成一个高渗区。王镜惠等^[18]通过分析煤样裂缝发育指数与解吸常数的关系发现,解吸时间常数随着裂缝发育指数的增加而降低,解吸体积常数随裂缝指数先降低后增加。王双明等^[19]为解决煤层导热系数低的问题,借助人工辅助造缝进行前期处理,实现了加热收油。

本文搭建了裂缝煤样注热解吸渗流试验装置,利用巴西劈裂造缝的方式组合构造了 5 种含有不同裂缝形态的煤样,并通过 PCAS 软件对裂缝形态进行了定量及定性分析。通过不同裂缝形态煤样在室温条件下及注热条件下的解吸渗流试验,分析了裂缝形态和注热双重作用下煤样温度及气体产出规律,以探究在含有复杂裂缝形态的煤样中注热水对煤体温度变化的影响以及对瓦斯产出效果的影响。

1 试验装置与试验方法

1.1 试样制备与裂缝形态分析

通过岩芯取样机沿煤块平行层理方向钻取 3 组直径为 50mm,高度分别为 25mm、50mm 以及 100mm 的煤样,将煤样在 105℃ 的恒温干燥箱中烘干 24h,煤样的结构参数见表 1。利用巴西劈裂法对 3 组煤样造缝,采用不同的组合方式构造含有不同裂缝形态的煤样,并分别命名,将直径 50mm、高度 100mm 的煤样记为 Y 煤样;直径 50mm、高度 100mm 的煤样经劈裂后含有 1 条单一裂缝,将该煤样记为 F1 煤样;将由 2 个直径 50mm、高度 50mm 的煤样组合而成的含有 1 条单一裂缝及 1 条垂直裂缝的煤样记为 F2 煤样;将由 2 个直径 50mm、高度 25mm 的煤样以及 1 个直径 50mm、高度 50mm 的煤样组合而成的含有 1 条单一裂缝及 2 条垂直裂缝的煤样记为 F3 煤样;将由 4 个直径 50mm、高度 25mm 的煤样组合而成的含有 1 条单一裂缝及 3 条垂直裂缝的煤样记为 F4 煤样。5 种煤样及其制备过程如图 1 所示。

表 1 煤样及裂缝结构参数

Tab. 1 Coal sample and crack structure parameters

煤样名称	直径 R/mm	长度 L/mm	垂直裂缝数目 N/条	裂缝总面积 S/pixel	裂缝率 /%	分形维数 D	体积裂缝密度 V_{fd}/mm^{-1}
Y	49.65	98.86	—	—	—	—	—
F1	49.62	98.82	0	13421	3.11	1.2205	0.026
F2	50.23	99.54	1	14769	5.60	1.4961	0.035
F3	50.17	99.15	2	24141	8.17	1.5772	0.046
F4	48.62	98.80	3	53682	12.79	1.6701	0.057

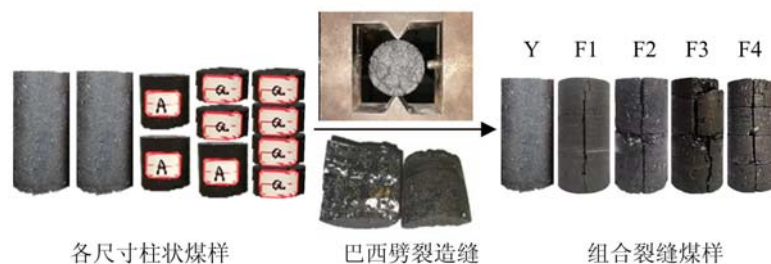


图 1 人工造缝煤样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coal sample of artificial seam making

裂缝是煤中流体的主要渗流通道,煤中气体的渗流特征取决于煤样中裂缝形态的复杂程度^[20]。人工裂缝煤样中存在的裂缝形态共有 2 种,分别为平行于流体流动方向的单一裂缝以及垂直于流体流动

方向的垂直裂缝。分形维数可用于表征煤样内部复杂裂缝的分布,且分形维数越大,裂缝形态越复杂^[20]。利用 Photoshop 软件识别各裂缝煤样图片,通过降噪处理及阈值调整后提取图片中的裂缝,经过二值化处理后的灰度图像如图 2 所示。

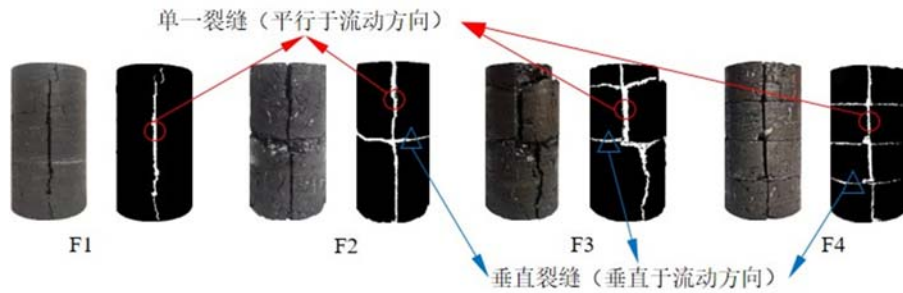


图 2 裂缝煤样及平面二值化图像

Fig. 2 Fracture coal sample and plane binarization image

利用 PCAS 软件对裂缝进行定量分析,得到 4 种煤样的原裂缝总面积、裂缝率、分形维数及体积密度(表 1)。由表 1 可知,F1、F2、F3 及 F4 煤样的平面裂缝形态的总面积、裂缝率、分形维数及体积密度均随着垂直裂缝条数的增加而增大。煤样中所含垂直裂缝数目越多,煤样的裂缝形态越复杂,分形维数的值越接近 2(图 2)。本文采用分形维数来表征不同煤样的裂缝形态复杂程度。

1.2 试验装置

为模拟煤层裂缝注热抽采瓦斯的效果,在自主研发的真三轴渗流试验系统^[21]基础上,增加热水供给装置,搭建了裂缝煤样注热解吸渗流试验系统(图 3)。系统主要包括:岩心夹持器、热水供给装置、轴围压供给装置、孔隙压力供给装置、气水测量装置、温度测量装置及数据采集装置。热水供给装置主要由电加热螺旋管路、TC-100D 双缸恒压恒流泵、水桶及热水组成,其中,电加热螺旋管路由可维持 150℃ 的加热带缠绕在 25cm 长的螺旋式注水管路外构成,以减小热损;轴压、围压由手动试压泵供给;孔隙压力由 99.999% 高纯度氮气瓶供给;分别采用 250ml 的量筒、1000ml 集水瓶进行气水测量;煤样温度通过测温范围在 -60℃~260℃ 的 PT100 高精度表面贴片式铂热电阻测量;煤样温度以及各处压力数据通过数据采集路线传输到 TOPRIE TP710 数据记录仪进行监测、记录。

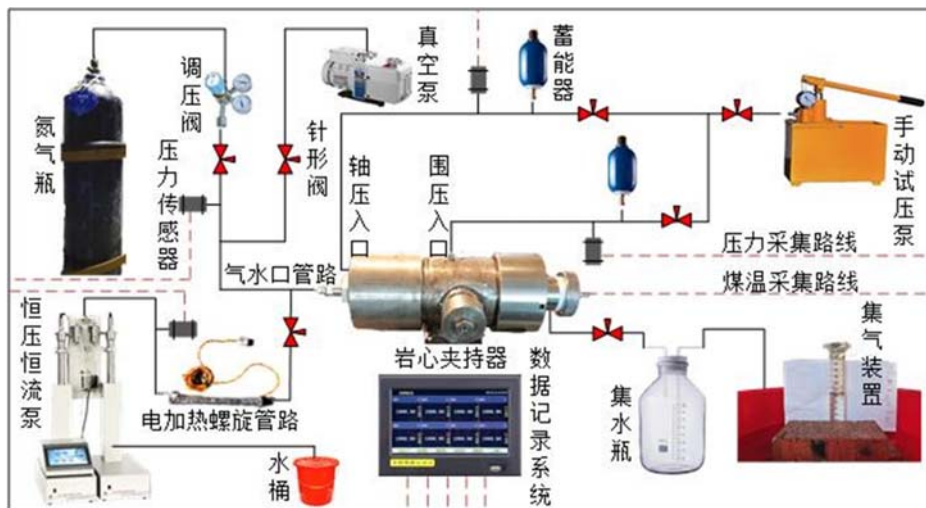


图 3 裂缝煤样注热解吸渗流试验系统

Fig. 3 Seepage test system for thermal desorption of fractured coal

1.3 试验方法

对原煤样 Y 及 4 种含缝煤样 F1、F2、F3 及 F4 先后开展常规解吸渗流试验与注热作用下的解吸渗流试验。在恒温箱恒定温度下,交替加载至目标轴压 6MPa、围压 4MPa,稳压后对装置抽真空;充入预设压力值 0.5MPa 的气体^[3]进行 24h 的充分吸附;吸附平衡后开展常规解吸渗流试验及注热作用下的解吸渗流试验。

为了保证数据的可对比性,裂缝煤样常规解吸渗流试验结束后,不取出煤样,对装置再次抽真空;调整设定相同的轴压、围压及气体压力,再次进行 24h 吸附;然后开始注热作用下的解吸渗流试验;注热解吸渗流的过程中,70℃热水从气水口管路以恒定流量 $6\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 持续注入;整个产气记录过程维持 2.5h,利用集水瓶记录产出的水量,通过量筒观测注热作用下气体产出的情况。试验方案见表 2。

表 2 试验方案

Tab. 2 Experimental scheme

试验	煤样	试验环境温度/℃	热水温度/℃	热水注入流量/($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$)
室温条件下	Y、F1、F2、F3、F4	30℃	—	—
注热条件下			70	6

2 不同裂缝形态煤样解吸渗流产气规律

2.1 室温条件下煤样气体产气规律分析

图 4 为 5 种煤样的气体产出情况随时间变化的曲线,结合煤样裂缝形态可知,在单一裂缝一定的情况下,裂缝形态越复杂,煤样的解吸渗流通道数越多,气体产出越容易,因此产出总量多且速率快^[16]。

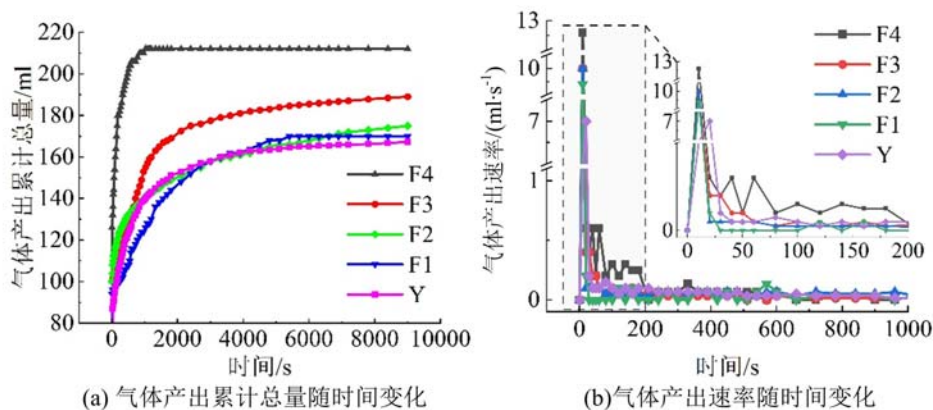


图 4 不同裂缝形态煤样的气体产出情况随时间的变化

Fig. 4 Variation of gas production of coal samples with different crack morphology over time

从图 4(a)中可以看出,煤样中气体的产出总量变化趋势基本相同。前期较快的渗流速度加快了压力的传导速率,使得更多的吸附气体短时间内解吸,并作为气源与煤样裂缝中的游离气体一起从裂缝中同时渗流产出,累计产气量增长快。随着气体解吸的进行,孔隙压力不断降低,累计产气量的增长开始变缓。F1、F2、F3 及 F4 煤样的气体产出总量分别是 Y 煤样的 1.02 倍、1.05 倍、1.13 倍及 1.27 倍,裂缝分形维数越大,煤样的气体产出总量越大,且达到最大产气总量所用的时间越短。从图 4(b)可知,各煤样气体产出速率初期均比较大,F4、F3、F2、F1 及 Y 煤样所能达到的最大产出速率依次减小,裂缝煤样气体产出速率均比无缝煤样提前下降,由此可知,裂缝的存在为气体的产出提供了通道,从而有利于气体的产出。

2.2 不同裂缝形态煤样温度规律

在轴压 6MPa、围压 4MPa 条件下,注热水的过程中各煤样的测点温度随时间的变化规律并不相同,如图 5 所示。从图 5(a)可知,在同一温度及同一流量的热水作用下,Y、F1、F2、F3 及 F4 煤样在

9000s内温度分别上升1.9℃、2.6℃、3.1℃、5.7℃及9.1℃, F1、F2、F3及F4煤样的升温幅度分别是Y煤样的1.37倍、1.63倍、3.0倍及4.79倍, 可见煤样的裂缝形态越复杂, 煤样升温幅度越大且达到的稳定温度越高。

从图5(b)中可以看出, Y煤样在1200s时开始快速升温, 在6000s时则趋于达到稳定温度, 并最先保持稳定; F1煤样在1200s时开始快速升温, 在7200s后开始趋于稳定; F2煤样在1200s时开始快速升温, 在7800s后开始趋于稳定; F3煤样在600s后开始快速升温, 在之后的时间段内一直处于快速升温状态。Y、F1、F2及F3煤样的测点温度初始变化较慢, 上升幅度较小; 随着注热过程的进行, 煤样温度上升速率加大, 上升幅度变大; 随着煤样温度的升高, 测点处与热水的温差变小, 传热变慢, 测点温度趋于稳定。而F4煤样开始注入热水后则快速升温, 在之后的时间段内一直处于快速升温状态, 其升温幅度及速率均比其余煤样大, 由此可知, 裂缝形态越复杂, 煤样升温越快且温度上升的持续时间越久。

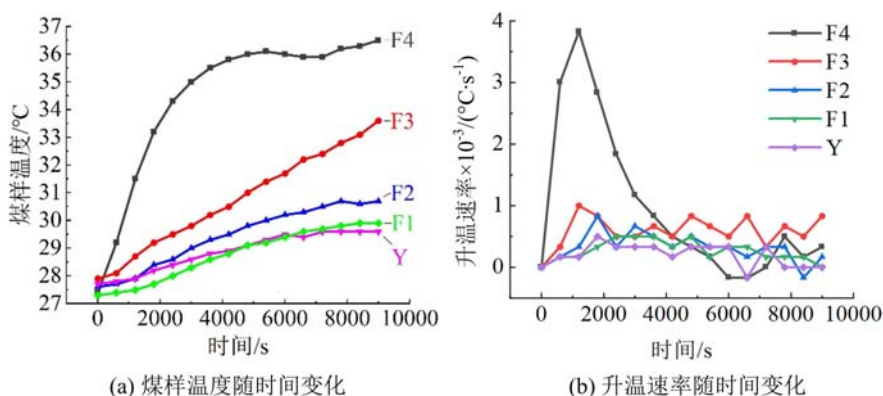


图5 不同裂缝形态煤样的煤样温度随注热时间的变化

Fig. 5 Variation of coal temperature of coal samples with different crack morphology with heat injection time

2.3 注热条件下煤样气体产气规律分析

与常规解吸渗流不同, 注热条件下气体的解吸渗流过程是在应力、水分及温度三者共同作用下完成的, 图6所示为5种煤样同时刻的气、水产出总量及煤样温度图。

气体产出过程可分为3个阶段。第一阶段中没有水流出, 且气体产出较快, 产气速率最大, 气体产出总量增长快; 第二阶段中煤样快速线性升温, 气体产出量减少, 产出速率变慢; 第三阶段中, 煤样温度大幅增加后趋于稳定, 气体产出量持续增加。第一阶段中热水刚流入煤样, 产出的气体为裂隙中的游离气体与降压解吸出的气体。第二阶段中随着热水的不断注入, 热水的热影响范围扩大到煤样整体, 煤样开始快速升温, 煤基质在热应力的作用下发生膨胀, 使得煤样裂缝受压变形^[22]而缩小, 且热水占据一定的裂缝空间体积, 气体渗流通道减小, 加大了流体的流动难度, 不利于压力的传递^[23], 裂缝的渗透率因此减小, 从图6中可以明显观察到各煤样的气体产出量与产出速率均明显比第一阶段小; 且热水流通煤样, 开始有水流出。第三阶段中持续注入的热水具有一定的压力与热量, 其中水的压力使得煤样的原始裂缝扩展, 渗透率增加^[24]; 同时, 热水所携带的热量一方面作用于煤样, 使煤样温度大幅增加并趋于稳定, 产生的热应力使得煤样中的裂缝张开, 煤样的渗透性开始增加, 另一方面作用于气体分子, 促进煤样内的吸附气体吸热解吸, 结果表明, 热量的作用使气体产出量呈现继续增大的效果。

3 讨论

由图7可知, 各裂缝煤样注热作用下的气体产出总量均明显大于常温条件下的气体总量, 注热作用下Y、F1、F2、F3及F4煤样的气体产出总量分别是常温条件下的0.88倍、1.22倍、1.21倍、1.74倍及1.78倍, 说明裂缝煤样中注入热水后, 热水的压力一定时间内可以有效提高煤样的渗透性, 热水的热量可以提高煤样温度, 促进吸附气体解吸, 从而增加气体产出量。注热作用下, F1、F2、F3及F4煤样的气

体产出总量分别是Y煤样的1.41倍、1.44倍、2.25倍及2.60倍,表明煤样的裂缝形态越复杂,注热促解的效果越显著,产气总量增加的幅度越大。

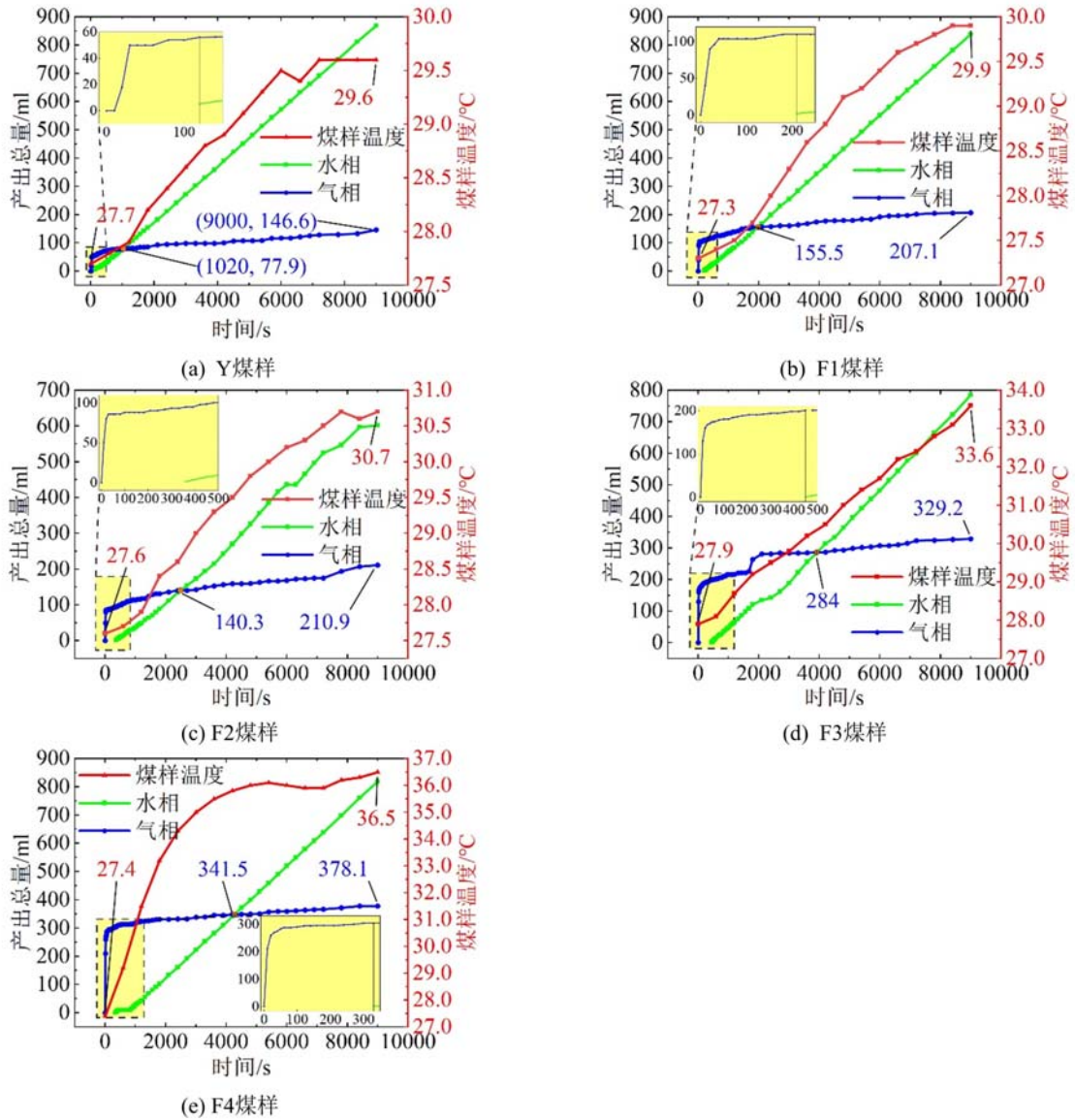


图6 注热作用下5种煤样中的气水产出总量

Fig. 6 Total amount of gas and water produced in five coal samples under heat injection

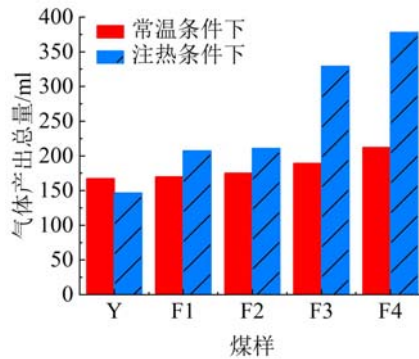


图7 不同煤样在2种试验条件下的气体产出总量对比图

Fig. 7 Comparison of total gas output of different coal samples under two test conditions

在两相渗流过程中,水锁现象^[25]不可避免。图 7 反映出向 Y 煤样注入热水后,煤样的气体产出总量在 9000s 内并未增加,反而为未注热水时气体产出总量的 0.88 倍,由此可知向无缝煤样注入热水后,水锁现象对气体产出的影响较大,气体产出量不会增加。含裂缝煤样 F1、F2、F3 及 F4 注热水后的气体产出量分别为无缝煤样 Y 注热后的 1.41 倍、1.44 倍、2.25 倍及 2.58 倍,表明裂缝的存在会削弱注入热水后水锁对气体产出的影响,因此注热作用后煤样中气体的产出量增加。

如图 8 所示,对注热作用下裂缝分形维数 D 及煤样温度 T 进行拟合,拟合结果表明,煤样温度 T 与裂缝分形维数 D 之间呈指数型关系(式(1)),拟合相关度为 0.90373,表明拟合效果较好。由此可知,煤样裂缝分形维数越大,裂缝形态越复杂,煤样升温越快。

$$T = A_0 e^{(-D/t_0)} + T_0 \quad (1)$$

式中: T_0 为初始煤样温度,℃; A_0 、 t_0 均为拟合参数。

为了得到注热作用下气体产出总量 Q 与裂缝分形维数 D 的关系,对试验数据进行了三维曲线拟合(图 9),得到注热作用下气体产出总量 Q 与煤样温度 T 及裂缝分形维数 D 之间的关系表达式为

$$Q = qT + mD^2 + n \quad (2)$$

式中: q 为单位温升产气量, $\text{ml} \cdot \text{℃}^{-1}$,即注热后煤体升高单位温度所产生的气体总量; m 、 n 均为拟合参数。

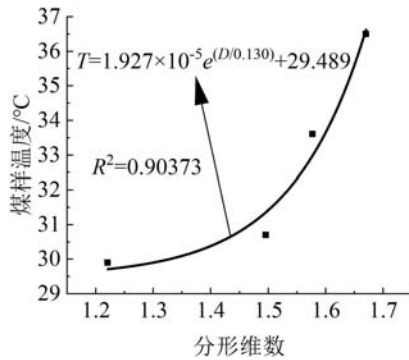


图 8 煤样温度与裂缝分形维数的关系

Fig. 8 The relation between coal temperature and fractal dimension of crack

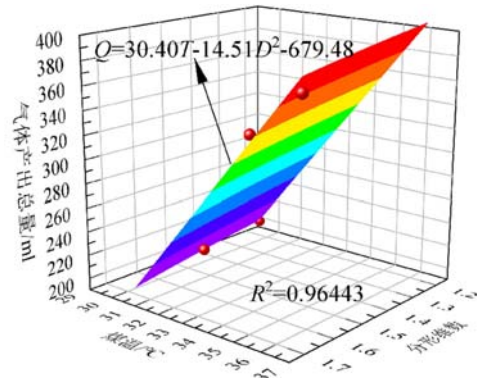


图 9 气体产出总量与煤样温度及分形维数的关系

Fig. 9 The relation between total gas output and coal temperature and fractal dimension

注热作用下气体产出总量 Q 与煤样温度 T 及裂缝分形维数 D 之间的拟合相关度为 0.96443,说明式(2)的拟合效果较好。由式(2)可知,注热作用下气体产出总量 Q 与煤样温度 T 及裂缝分形维数 D 之间呈非线性曲面拟合关系。在注热作用下,裂缝的分形维数越大,煤样裂缝越复杂,则气体产出总量越多。因此,注热促解技术在低渗透性煤层进行现场应用时,需要尽可能地在注热前期增加煤层裂缝的复杂性,使更多的流体热介质通过复杂缝网结构进入到煤层中,大幅提高煤层温度,进而增加煤层瓦斯的产出量。

4 结论

(1) 平行于流体流动方向的单一裂缝一定时,裂缝分形维数越大,对有无注热作用下煤样的气体解吸渗流促进作用越强;且裂缝的存在对水锁效应具有削弱作用。裂缝形态越复杂,煤样中热水注入通道越多,煤样温度的升高速率越快,进而促进气体的解吸;同时气体的解吸渗流通道增加,也方便气体的产出,使气体产出总量大且产出速率快。

(2) 通过向裂缝煤样注热水,可以有效提高煤样温度,煤样温度 T 与裂缝分形维数 D 之间呈指数型关系,故裂缝形态越复杂,煤样升温幅度越大。

(3) 气体产出总量 Q 与煤样温度 T 及裂缝分形维数 D 之间呈非线性曲面拟合关系,注热条件下,煤样温度随裂缝分形维数的增大呈指数型增加,裂缝分形维数和煤样温度的共同作用为煤样中流体的

渗流提供了通道,也促进了煤样中气体的解吸,使得气体产出总量大幅增加。

参考文献:

- [1] 杨兆中,袁健峰,朱静怡,等.煤层气注热增产研究进展[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):617-625,632 (YANG Zhaozhong, YUAN Jianfeng, ZHU Jingyi, et al. Thermal injection stimulation to enhance coalbed methane recovery[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4):617-625, 632 (in Chinese))
- [2] 唐明云,张亮伟,郑春山,等.考虑蒸汽相变煤层气注热开采数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(2):370-379 (TANG Mingyun, ZHANG Liangwei, ZHENG Chunshan, et al. Numerical simulation of coalbed methane production by heat injection considering steam condensation [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(2):370-379 (in Chinese))
- [3] 李惟慷,杨新乐,张永利,等.饱和蒸汽作用下煤体吸附甲烷运移产量规律试验研究[J].煤炭学报,2018,43(5):1343-1349 (LI Weikang, YANG Xinle, ZHANG Yongli, et al. Experimental study on migration yield law of coal-bed methane under the condition of saturated steam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5):1343-1349 (in Chinese))
- [4] 蔡婷婷,赵东.封闭体系中煤体升温解吸的热力学特性研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(3):697-704 (CAI Tingting, ZHAO Dong. Thermodynamic characteristics of coal under temperature variation desorption in closed system[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(3):697-704 (in Chinese))
- [5] Wang H. A numerical study of thermal-hydraulic-mechanical (THM) simulation with the application of thermal recovery in fractured shale gas reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2017, 20(3):513-531.
- [6] 王志军,李先铭,马小童,等.微波间断加载对柱状煤瓦斯解吸特性的影响[J].微波学报,2019,35(1):91-96 (WANG Zhijun, LI Xianming, MA Xiaotong, et al. Effect of microwave intermittent loading on gas desorption characteristics of cylindrical coal[J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(1):91-96 (in Chinese))
- [7] 张森,魏晨慧,刘书源,等.无烟煤颗粒中CO₂吸附-解吸-扩散试验及模型研究[J].实验力学,2021,36(6):753-761 (ZHANG Miao, WEI Chenhui, LIU Shuyuan, et al. Experiment and modeling study on CO₂ adsorption-desorption-diffusion of anthracite[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(6):753-761 (in Chinese))
- [8] Xu Y, Lin B, Li Y. Change laws of pore-fracture structure of coal under high-temperature steam shock[J]. ACS Omega, 2022, 7(48):44298-44309.
- [9] Teng T, Xue Y, Zhang C. Modeling and simulation on heat-injection enhanced coal seam gas recovery with experimentally validated non-darcy gas flow[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 177:734-744.
- [10] Teng T, Zhao Y, Gao F, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for heat and gas transfer in thermal stimulation enhanced coal seam gas recovery[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 125:866-875.
- [11] 李波波,高政,杨康,等.考虑温度、孔隙压力影响的煤岩渗透性演化机制分析[J].煤炭学报,2020,45(2):626-632 (LI Bobo, GAO Zheng, YANG Kang, et al. Analysis of coal permeability evolution mechanism considering the effect of temperature and pore pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2):626-632 (in Chinese))
- [12] 张凤婕,吴宇,茅献彪,等.煤层气注热开采的热-流-固耦合作用分析[J].采矿与安全工程学报,2012,29(4):505-510 (ZHANG Fengjie, WU Yu, MAO Xianbiao, et al. Coupled thermal-hydrological-mechanical analysis of exploiting coal methane by heat injection[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(4):505-510 (in Chinese))
- [13] 杨新乐,任常在,张永利,等.低渗透煤层气注热开采热-流-固耦合数学模型及数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(6):1044-1049 (YANG Xinle, REN Changzai, ZHANG Yongli, et al. Numerical simulation of the coupled thermal-fluid-solid mathematical models during extracting methane in low-permeability coal bed by heat injection [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6):1044-1049 (in Chinese))
- [14] 王芦笛.低渗煤层气注热开采渗透规律研究[J].煤矿安全,2017,48(4):5-8 (WANG Ludi. Study on seepage laws in coal bed methane mining through injecting thermal in low permeability coal seam [J]. Safety in Coal Mines,

- 2017, 48(4):5-8 (in Chinese))
- [15] 张永利, 张乐乐, 马玉林, 等. 温度作用下煤层瓦斯解吸渗流规律数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(6):671-677 (ZHANG Yongli, ZHANG Lele, MA Yulin, et al. Numerical simulation for desorption and seepage rules of coal-bed methane considering temperature conditions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(6):671-677 (in Chinese))
- [16] 陈向军, 安丰华, 王林. 煤体裂隙发育促进瓦斯解吸的分形研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(5):11-13 (CHEN Xiangjun, AN Fenghua, WANG Lin. Fractal study of gas desorption accelerated by coal fracture development[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(5):11-13 (in Chinese))
- [17] 冯永昌, 陈林, 岡島淳之介, 等. 天然气水合物藏裂隙注热的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(3):663-667 (FENG Yongchang, CHEN Lin, OKAJIMA Junnosuke, et al. Numerical investigation on hot water injection process along fractures of methane hydrate reservoirs[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(3):663-667 (in Chinese))
- [18] 王镜惠, 尹宇寒, 梅明华, 等. 高煤阶煤储层解吸曲线定量表征及解吸参数研究[J]. 地质与勘探, 2020, 56(5):1096-1104 (WANG Jinghui, YIN Yuhan, MEI Minghua, et al. Quantitative characterization of the desorption curve and desorption parameters of high-rank coalbed methane (CBM) reservoir[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(5):1096-1104 (in Chinese))
- [19] 王双明, 师庆民, 王生全, 等. 富油煤的油气资源属性与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5):1365-1377 (WANG Shuangming, SHI Qingmin, WANG Shengquan, et al. Resource property and exploitation concepts with green and low-carbon of tar-rich coal as coal-based oil and gas[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5):1365-1377 (in Chinese))
- [20] 王登科, 魏强, 魏建平, 等. 煤的裂隙结构分形特征与分形渗流模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1):103-109, 122 (WANG Dengke, WEI Qiang, WEI Jianping, et al. Fractal characteristics of fracture structure and fractal seepage model of coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1):103-109, 122 (in Chinese))
- [21] 郝建峰, 梁冰, 孙维吉, 等. 考虑吸附/解吸热效应的含瓦斯煤热-流-固耦合模型及数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6):1282-1290 (HAO Jianfeng, LIANG Bing, SUN Weiji, et al. Gassy coal thermal-hydraulic-mechanical coupling model and numerical simulation considering adsorption-desorption thermal effect[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6):1282-1290 (in Chinese))
- [22] 李治豪, 陈世江, 冯宇迪, 等. 不同水压加载下煤体裂隙渗流数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6):2255-2261 (LI Zhihao, CHEN Shijiang, FENG Yudi, et al. Numerical simulation of coal fracture seepage under different pressure loading[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6):2255-2261 (in Chinese))
- [23] 徐达妮. 考虑热-流-固耦合的低渗透煤层气渗流理论及应用[D]. 西安: 西安石油大学, 2017 (XU Dani. Percolation mechanism for exploiting coal bed methane in low permeability reservoir based mechanism of coupled thermal-hydrologic-mechanical and its applications[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017 (in Chinese))
- [24] 毛彦军, 陈曦, 范超男, 等. 基于CT三维重建的注水煤岩体裂隙扩展规律研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(6):1717-1726 (MAO Yanjun, CHEN Xi, FAN Chaonan, et al. Crack network evolution of water injection coal and rock mass by means of 3D reconstruction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(6):1717-1726 (in Chinese))
- [25] 杨小松, 朱忠谦, 张啸枫, 等. 裂缝-孔隙模型中气水两相分形渗流实验和数学模型建立[J]. 地质科技情报, 2014, 33(4):86-90 (YANG Xiaosong, ZHU Zhongqian, ZHANG Xiaofeng, et al. Gas-water flow fractal theory in fracture-porosity medium[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(4):86-90 (in Chinese))

The law of fracture morphology on coal temperature rise and gas production under heat injection

LI Yan, LIANG Bing, SUN Weiji, ZHAO Hang, ZHANG Junlin

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the influence of crack morphology on the temperature change of coal samples under heat injection and the gas production rule in coal, qualitative and quantitative analysis of crack morphology was carried out based on PCAS software. The coal sample gas production test under room temperature and heat injection conditions was carried out by using the self-developed thermal desorption seepage test device of the crack coal sample. The temperature of the coal sample during heat injection is monitored in real time. The results show that the more complex the fracture shape of the coal sample, the larger the temperature rise and the higher the stable temperature, the faster the temperature rise and the longer the duration of temperature rise. When the single crack parallel to the direction of fluid flow is constant, the more cracks perpendicular to the direction of fluid flow, the more complex the fracture morphology, and the stronger the promoting effect on coal sample gas production at room temperature and heat injection conditions. There is an exponential fitting relationship between coal sample temperature and fracture fractal dimension under heat injection. Injecting hot water into a crack coal sample can increase the temperature of the coal sample, and then promote the output of gas in the coal sample, and the maximum output of gas can reach 1.74 times of the value without heat injection. When hot water is injected into the seamless coal sample, the total gas output decreases compared with that without heat injection, while the total gas output of the seam coal sample increases compared with that without heat injection, indicating that the existence of cracks can weaken the influence of water lock to a certain extent. There is a 3D curved surface fitting relationship between the total gas output, coal sample temperature, and fracture fractal dimension, and the total gas output of the coal sample increases with the increase of fracture fractal dimension and coal sample temperature.

Keywords: heat injection; crack morphology; fractal dimension; production of gas