

岩石 CO₂ 水热原位致裂器热功交换机制与应用

陈万胜¹, 邓广哲², 高亮¹, 蔚斐², 王守印¹, 袁超²

(1. 陕煤集团神木柠条塔矿业有限公司, 陕西 榆林 719300; 2. 西安科技大学 能源与矿业工程学院, 西安 710054)

摘要:为了提高低渗高应力煤层增透卸压效果,解决水力压裂产生的水压裂缝与天然缝网贯通效果差的问题。基于 CO₂ 低黏度流动性好的特点,研发一种岩石 CO₂ 致裂器,以 60 °C 水作为载热流体,采用 CFD 模拟方法研究不同 CO₂ 温度条件下致裂器中水热流体对超临界 CO₂ 变温、流量以及热功变化规律,通过试验分析验证 CO₂ 致裂器的可靠性。结果表明:随着 CO₂ 由 5 °C 升至 25 °C 时,CO₂ 温度与水热流体温度呈负相关变化;CO₂ 相变吸热对流量影响较大;随着 CO₂ 初始温度的增加 CO₂ 传热也在增长,水热流体传热系数由 714 W/(m² · K) 减少至 359 W/(m² · K);CO₂ 热做功由 22.74 kJ 增加至 23.61 kJ,CO₂ 所携带的 TNT 能量由 855.23 kJ 增加至 1 114.85 kJ,CO₂ 初始温度与热做功及 TNT 能量呈线性关系。现场试验证明了不同温度、体积 CO₂ 热功交换在致裂煤岩裂隙扩展中具有重要作用。

关键词:超临界 CO₂; 水热流体; 热功交换; 相变致裂; CFD

doi:10.3969/j.issn.2095-7262.2025.05.011

中图分类号:TK123

文章编号:2095-7262(2025)05-0760-07 **文献标志码:**A

Thermal power exchange mechanism and application of rock CO₂ hydrothermal in-situ cracker

Chen Wansheng¹, Deng Guangzhe², Gao Liang¹, Yu Fei², Wang Shouyin¹, Yuan Chao²

(1. Shaanxi Coal Group Shenmu Ningtiaota Mining Co. Ltd., Yulin 719300, China;

2. College of Energy & Mining Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: This paper seeks to improve the permeability and pressure relief effect of the coal seam with low permeability and high stress, and address the poor penetration effect between hydraulic fracture and natural fracture network produced by hydraulic fracturing. Based on the advantages of low viscosity and good fluidity of CO₂, the study involves developing a rock supercritical CO₂ fracturing device; studying the changing law behind hydrothermal fluid in the fracturing device under different CO₂ temperature conditions on the temperature and 60 °C water as the heat-transfer fluid, flow rate and heat work of the supercritical CO₂; and verifying the reliability of CO₂ fracturing device by experimental analysis. The results show that with the increase of CO₂ temperature from 5 °C to 25 °C, the temperature of CO₂ is negatively correlated with the temperature of hydrothermal fluid. The phase change heat absorption of CO₂ has a great influence on the flow rate. As the initial temperature of CO₂ increases, the heat transfer of CO₂ also increases, and the heat transfer coefficient of hydrothermal fluid decreases from 714 W/(m² · K) to 359 W/(m² · K); and the thermal work of CO₂ increases from 22.74 kJ to 23.61 kJ, the TNT energy carried by CO₂ increases from 855.23 kJ to 1 114.85 kJ, indicating that the initial temperature of CO₂ has a linear relationship with thermal work and TNT energy. The field test shows that the thermal power exchange of CO₂ at different temperatures and volumes plays an important role in the crack propagation of fractured coal rock.

Key words: supercritical CO₂; hydrothermal fluid; thermal power exchange; phase transition fracturing; CFD

收稿日期: 2025-02-23

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JLP09); 新疆生产建设兵团重点领域科技攻关计划项目(2019AB001)

第一作者简介: 陈万胜(1983-),男,陕西省扶风人,高级工程师,硕士,研究方向:矿山压力与岩层控制,E-mail:147613416@qq.com。

0 引言

能源清洁开发与利用是全社会关注的焦点和热点问题。采用超临界 CO₂ (SC - CO₂) 对高应力厚硬顶岩层进行压裂改造,既可以实现对煤层瓦斯的驱替^[1],又能够实现深部高应力煤层的卸压安全开采,这种改造方式是对深部煤层 CO₂ 地质封存方式的探索,对我国实现碳中和目标具有极其重要的作用。

国内外有关 CO₂ 对煤岩层的压裂改造研究已经取得了大量实践应用成果。在换热器性能参数研究方面,张波等^[2]采用数值模拟方法分析埋地管道流速和过滤速率对换热器的影响,给出了管道流速与换热器的换热效率关系。马亮^[3-5]等指出在地热量较低的环境下,水作为载热流体是热交换系统的一种可行方案,采用模拟和现场试验手段研究换热器与介质流换热的非稳态过程,并建立了介质流温度与换热量之间的关系。倪少军等^[6]基于流固耦合条件下热交换特性实验,得出井壁与风流换热的影响规律。宋子琛等^[7]利用管式换热器模型,对冷热 CO₂ 开展传热模拟研究,发现换热系数随着温度和流量的上升而逐渐增加。张全等^[8]基于不同换热器的余热回收和换热效果,采用数值模拟方法研究了热管换热器中空气的流速、压力和温度变化特性。岳高伟等^[9]基于不同季节环境下巷道风流温度变化规律,得出了风流在流动过程中与围岩进行热交换的结论,风流温度对换热量具有重要影响。Chen^[10-11]等通过理论分析和模拟手段建立换热器热交换数值模型,研究了换热器中回风与液滴状态变化过程,建立热交换效率与喷水系数的关系。杜春涛等^[12]采用数值模拟的手段,建立矿井风流温度与换热器温度之间的作用关系,发现热管工况有利于传热效果。在余热回收方面,何瑞敏^[13-14]等采用数值模拟和现场试验对换热器换热能力进行分析,得出矿井回风换热器中回风与水流进行热质交换的效率有利于提升矿井换热系统的效能。

在水 - 气热功交换效率方面,崔海蛟等^[15]采用物理模型的表征手段,建立了气 - 水热质传递数值模型,得出了显热与潜热之间的关系与装置高度成正比,装置底部潜热交换越充分换热效率越高的结论。杜春涛^[16-17]等基于制热冷、逆顺喷和液滴平均直径等 3 个因素对矿井回风换热器换热性能的影响,发现流体介质温度变化大于不同液滴温度工况下的温差,此外,随着水温升高剪切速率增加,弹性指数与流体介质温度和速度成反比。张明光^[18-21]等采用模拟方法研究了余热回收对热功交换效率的

影响,建立了以风流作为载热流体对换热器影响及换热效率的关系,并得出了换热器内部温度、速度分布和流体介质出口温度对热功交换效率的影响。在断裂力学研究方面,Yu 等^[22]研究发现高温高压 CO₂ 入渗煤岩会使得岩石周围环境温度发生变化,热扩散效应会对岩石造成损伤及对裂隙扩张产生影响,揭示了岩体基质与裂隙内 CO₂ 的传热机理。蒲文龙等^[23]采用有限元软件模拟了冰体爆破损伤裂隙发展情况与冰凌破碎过程,发现随双孔爆破时间增长冰盖爆破面积逐渐变大。刘传海等^[24]探究了不同驱动力对煤介质中 CO₂ 动力学的影响,并开展了 3 种驱动力条件下煤介质中 CO₂ 水合物生长动力学试验,研究发现随着煤介质粒径的增大,CO₂ 水合物的生长速率逐渐提高。

综上,目前学者们主要采用理论分析和试验手段,研究了矿用风流余热换热装置及换热效率及其性能参数,开展了矿井物理降温和热能回收以及裂隙流变学应用方面的研究。关于 CO₂ 致裂高应力厚硬顶板的应用研究较少,尤其以水/气两相流为循环介质的对流换热做功机制研究方面存在差异。因此,建立一个超临界 CO₂ 致裂器模型,研究气 - 水耦合热做功及其传热规律,通过试验验证换热器系统的可靠性。研究成果可为高应力煤岩层 CO₂ 压裂卸压的安全性评价提供指导。

1 CO₂ - 水热交换数值仿真

1.1 CO₂ 水热原位致裂系统

地下岩层深孔 CO₂ 致裂系统,如图 1 所示。CO₂ 致裂器通过岩层钻孔安装在钻孔预定的致裂位置,通过致裂管中水气间的热交换达到 SC - CO₂ 致裂煤岩层的目的。SC - CO₂ 致裂器由充装系统、温控系统和加压系统组成。其中,SC - CO₂ 致裂器和孔壁之间的间隙填充导热材料用于密闭空隙。

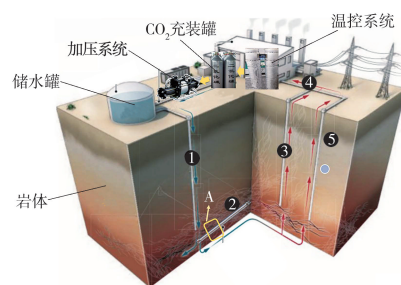


图 1 岩石 CO₂ 致裂系统

Fig. 1 Rock CO₂ fracturing system

1.2 模型的建立

选取图1中A部分的致裂系统致裂器作为分析对象进行数值模拟研究。为了提高换热性能,在模拟中将致裂管材质设置为实际的316L型不锈钢材质,该材质具有较好的传热性能,尺寸规格为 $\phi 50\text{ mm} \sim 1\ 500\text{ mm}$,如图2所示。采用标准 $k-\varepsilon$ 模型进行求解。



图2 CO₂致裂器A模型

Fig. 2 Schematic of CO₂ cracker A model

1.3 模拟方案

基于专利设计的结构参数,通过数值仿真与理论计算相结合的手段,模拟CO₂致裂系统换热器的换热规律及参数变化。由于致裂系统换热器最大温度为100℃,设置初始水温 θ_w 为60℃时,对3种不同CO₂初始温度状态下的换热器传热效率进行研究。具体模拟研究方案,见表1。

表1 模拟致裂系统方案

Table 1 Scheme of simulation fracturing

监测点布置	流体	$\theta_w/^\circ\text{C}$		
		第1种	第2种	第3种
每隔400 mm	水	60	60	60
	CO ₂	5	15	25

1.4 控制方程

基于CO₂致裂系统换热器对称特点,通过设定物体边界上的温度函数,计算CO₂致裂器壁面的温度^[25]为

$$\theta|_{\Gamma} = \theta_1,$$

式中: Γ ——壁面边界条件,是CO₂致裂器的几何壁面边界;

θ_1 ——壁面温度,℃。

建立管壁面接触CO₂流体介质的温度 θ_f 与换热系数 α 之间的关系为

$$-k_r \frac{\partial \theta}{\partial n} |_{\Gamma} = \alpha(\theta - \theta_f) |_{\Gamma},$$

式中: k_r ——热导率, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

∂n ——边界法向方向;

α ——对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

模型初始条件在传热过程开始时CO₂在致裂器

中温度为已知量,CO₂温度公式^[26]为

$$\theta|_{t=0} = \theta_0,$$

$$\theta|_{t=0} = \varphi(x, y),$$

式中: t ——时间,s;

θ_0 ——初始均匀温度,℃;

$\varphi(x, y)$ ——关于空间坐标 (x, y) 的初始非均匀温度函数。

2 换热模拟结果

2.1 变温规律

相同水温条件下不同CO₂温度变化规律,如图3所示。

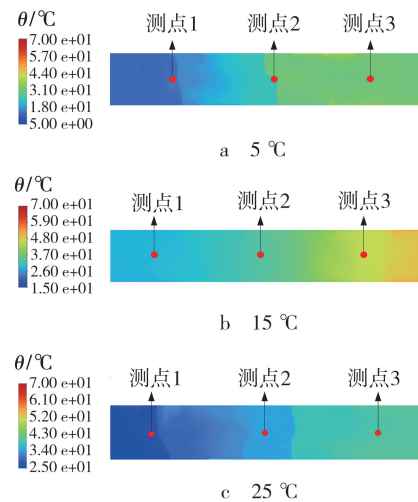


图3 相同水温条件下不同CO₂初始温度变化

Fig. 3 Variation in CO₂ temperature under same water temperature conditions

由图3a可见,从测点1到2,CO₂温度由30℃逐渐上升至31.7℃,CO₂温度呈现迅速上升趋势,测点3温度为31.4℃达到CO₂相变临界温度,SC-CO₂气体释放时保持热平衡状态,至此完成管内对流换热过程。水热流体的温度逐渐增加,相变吸热减小,表现为初始水温耗散较小,水热流体完成与CO₂的传热过程后与SC-CO₂一同保持热平衡状态。由图3b可见,从测点1到2,CO₂温度由30.5℃逐渐上升至32℃,CO₂温度呈现逐渐上升趋势,测点3温度为32.5℃达到CO₂相变临界温度,SC-CO₂气体释放时保持热平衡状态,至此完成管内对流换热过程。由图3c可知,从测点1到2,CO₂温度由31℃逐渐上升至39℃,CO₂温度呈现迅速上升趋势,测点3温度为33℃达到CO₂相变

临界温度,SC - CO₂ 气体释放时保持热平衡状态,至此完成管内对流换热过程。随着 CO₂ 初始温度的升高,所需外部供给热源温度越少,水作为载热流体与 CO₂ 完成热交换后,最终水热流体的耗散温度越低。

2.2 传热规律

水 - CO₂ 耦合管壁面的传热规律,如图 4 所示。由图 4 可见,致裂器内 CO₂ 初始温度为 5 °C 时,CO₂ 传热系数均保持在 356 W/(m² · K);相比之下,水热流体的传热系数 K_w 由 1 070 W/(m² · K) 减少至 720 W/(m² · K)。当致裂器内 CO₂ 初始温度为 15 °C 时,CO₂ 传热系数 K_{CO_2} 保持在 472 W/(m² · K);而当水热流体的传热系数由 1 130 W/(m² · K) 减少至 780 W/(m² · K)。致裂器内 CO₂ 初始温度为 5 °C 时,CO₂ 传热系数均保持在 591 W/(m² · K);水热流体的传热系数由 1 200 W/(m² · K) 减少至 850 W/(m² · K)。

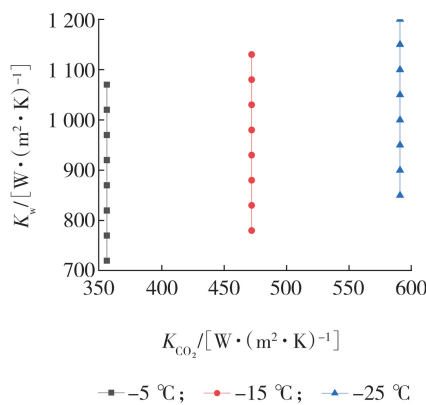


图 4 水 - CO₂ 耦合管壁面传热云图

Fig. 4 Cloud chart of heat transfer on the wall of water-CO₂

2.3 流变规律

相同水温条件下 CO₂ 流量变化,见图 5。由图 5 可见,管内 CO₂ 在 5 °C 条件下,流量 Q 由 2.3×10^4 mm³/s 逐渐增大至 3.4×10^4 mm³/s;管内 CO₂ 在 15 °C 条件下,流量由 2.37×10^4 mm³/s 逐渐增大至 3.78×10^4 mm³/s;管内 CO₂ 在 25 °C 条件下,流量由 2.45×10^4 mm³/s 逐渐增大至 4.12×10^4 mm³/s。原因是随着 CO₂ 温度的增加,CO₂ 相变吸热进入临界态,气体体积随着温度增加逐渐膨胀,在管径和入口压力恒定条件下,体积流量呈现出增大趋势。

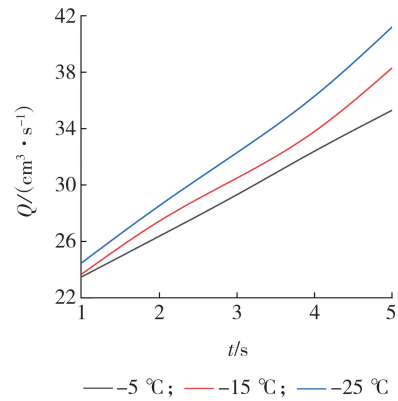


图 5 相同水温条件下 CO₂ 流量变化

Fig. 5 Variation in CO₂ flow rate under the same water temperature conditions

3 热功交换机制

SC - CO₂ 在致裂管中受热相变为高压 CO₂ 气体,当其体积发生变化时会对外做功,压强也会随之发生改变,因此高压 CO₂ 气体做功为变力做功,其表达式^[25]为

$$W = \int dW = \int_{V_0}^{V_1} p dV,$$

式中: W ——CO₂ 气体体积变形力做功, kJ;

V ——CO₂ 气体的体积, cm³;

p ——CO₂ 气体的压力, MPa。

通过对比 SC - CO₂ 相变致裂岩石当量和炸药的爆破当量,采用高压气体与水容器模型的当量计算方式^[25]为

$$E_g = \frac{p_1 V_a}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (1)$$

式中: E_g ——高压 CO₂ 的致裂能量, kJ;

p_1, p_2 ——致裂器内定压剪切片和大气压力, MPa;

V_a ——CO₂ 的体积, L;

k ——高压 CO₂ 气体的绝热指数,即高压 CO₂ 气体的定压比热与定容比热的比值, $k = C_p/C_V$;

C_p ——定压质量比热容, kJ/(kg · K);

C_V ——定容质量比热容, kJ/(kg · K)。

W_{TNT} ——炸药 TNT 当量, $W_{TNT} = E_g/Q_{TNT}$, kg;

Q_{TNT} ——1 kg TNT 爆炸能量,取 4 250 kJ/kg。

对于非理想状态下的气体,其绝热指数受到多种因素的影响。空气、O₂ 和 CO₂ 绝热指数 k 值分别为 1.4、1.3 和 1.2。

通过式(1)计算出 SC - CO₂ 相变致裂能量。SC - CO₂ 的密度和黏度会随着温度的变化而发生改变^[22]。不同温度条件下 CO₂ 对应的密度,见表

2. 由 CO_2 的相态特性可知, CO_2 由液态发生相变的临界温度为 $31\text{ }^\circ\text{C}$ 。SC - CO_2 相变致裂岩石原理是在致裂管内由液态发生相变膨胀为高温高压 SC - CO_2 气体。因此, 对于 CO_2 相变致裂当量的计算是在临界条件下进行的。

表2 不同 CO_2 温度条件下的密度

Table 2 Density of CO_2 at different temperature conditions

编号	$\theta/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
1	0	924.8
2	10	858.0
3	20	770.7
4	30	596.4
5	31	463.9

由表2可见, 临界 CO_2 密度可计算出在 5、15 和 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下 1 kg CO_2 的体积分别为 1.12、1.22 和 1.46 L , p_1 为 270 MPa ; p_2 为 101 kPa ; V 为 SC - CO_2 的体积; k 为 1.295。根据式(1)计算出水温 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, CO_2 温度在 5、15 和 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 状态下的致裂能量 E , 如表3所示。

表3 不同 CO_2 温度条件下的致裂能量

Table 3 Cracking energy of at CO_2 different temperature conditions

编号	$\theta/^\circ\text{C}$	V_{CO_2}/L	m/kg	E/kJ	W_{TNT}/kg
1	5	1.12	1	855.23	0.301
2	15	1.22	1	931.58	0.319
3	25	1.46	1	1114.85	0.367

由表3可见, 致裂能量随着 CO_2 初始温度 θ_c 的增加逐渐增大。由于 CO_2 初始温度的增加, 导致 CO_2 体积膨胀, 从而使得相变增能逐渐增大, 表现出 CO_2 相变产生的致裂能量逐渐升高。根据式(1)计算出水温 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, CO_2 温度在 5、15 和 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 状态下热做功效能, 见表4。

表4 不同 CO_2 温度条件下的物性参数

Table 4 Physical property parameters of at CO_2 different temperature conditions

编号	$\theta_c/^\circ\text{C}$	$\eta/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	m/kg	T/K	W/kJ
1	5	188.9	1	293.65	22.74
2	15	188.9	1	294.65	22.82
3	25	188.9	1	304.90	23.61

由表4可见, CO_2 随着初始温度的增加, CO_2 热做功效率呈现递增趋势。原因是 CO_2 初始温度在 $5\sim 15\text{ }^\circ\text{C}$ 不足以相变。而在 CO_2 初始温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 受其初始温度逐渐升高, 越接近临界温度所需载热流体的温度越少, CO_2 热做功表现为上升趋势。

4 现场应用

4.1 应用背景

实验选择陕北某矿工作面预裂顶板为研究对象。由于工作面推进速度快, 覆岩活动空间大, 工作面回采对沿空留巷扰动强烈。工作面上覆岩层以中粒砂岩等中硬岩为主, 岩石致密渗透性低, 属于典型的中硬岩。为解决大采高厚硬顶板难以垮落问题, 采用 CO_2 定向致裂切顶卸压技术对工作面厚硬顶板进行预裂卸压试验。

4.2 应用条件

采用 CO_2 定向致裂切顶卸压技术对工作面厚硬顶板进行预裂卸压试验, 通过对顶板钻孔在孔内安装致裂器进行钻孔预裂, 使钻孔内形成定向裂缝, 形成孔与孔之间的贯通裂缝, 完成对顶板的切割, 预裂卸压试验在工作面胶运顺槽开展。

试验采用 CO_2 致裂器内初始水温为 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, CO_2 初始温度为 5、15 和 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 分别开展热交换致裂实验。在致裂孔的左右两侧各打 3 个钻孔作为观测孔, 编号为 G1、G2 和 G3, 分别对应 CO_2 温度为 5、15 和 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。钻孔内的 CO_2 致裂器布置。

4.3 应用效果

现场钻孔窥视仪对裂隙扩展的窥探情况, 如图6所示。由图6可见, SC - CO_2 致裂后钻孔内出现明显的裂缝沿孔壁向孔口方向扩展, 可以清晰地看到随着 CO_2 初始温度增加孔壁上的裂隙数目逐渐增加, 裂隙表现出由发育、扩展到贯通的全过程, 裂缝连通率较好, 表明钻孔内 CO_2 与岩体基质产生了热扩散效应有助于裂隙发育, CO_2 温度对于岩体裂隙扩展具有重要影响。经过计算可得, 单孔平均裂缝连通率达到 70.85% , 表明 SC - CO_2 压裂效果显著。

为了描述孔壁裂缝扩展情况, 通过钻孔窥视仪探测后进行素描图绘制, 如图7所示。图中, 钻孔深度为 h , 展开角度为 γ 。由图7可见, 钻孔致裂后, 孔壁两侧产生对称的定向裂缝, 沿平行于巷道轴线由孔底向孔口方向延伸扩展。在 90° 和 $270^\circ\sim 280^\circ$ 之间各有一条裂缝, 左右两侧裂缝均从 3 m 处一直连通到 14.8 m 结束, 使得裂缝形成良好的贯通趋势。

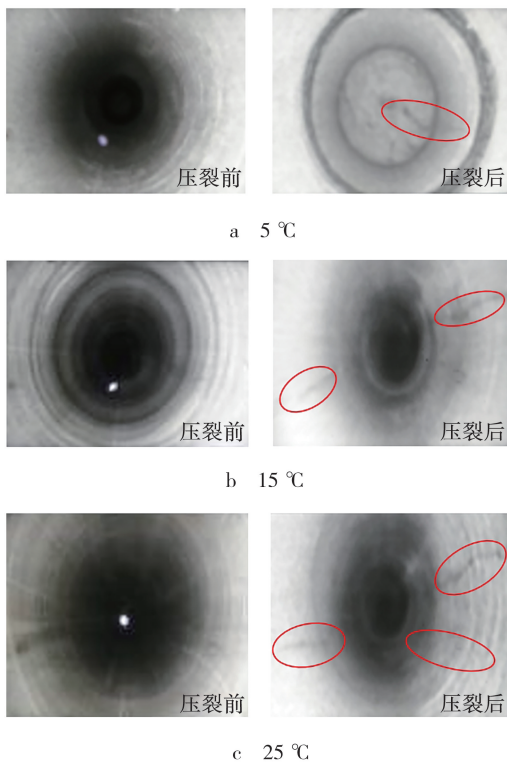


图6 温度作用下 CO₂ 相变压裂前后效果对比
 Fig. 6 Comparison of effects before and after CO₂ phase change fracturing under temperature

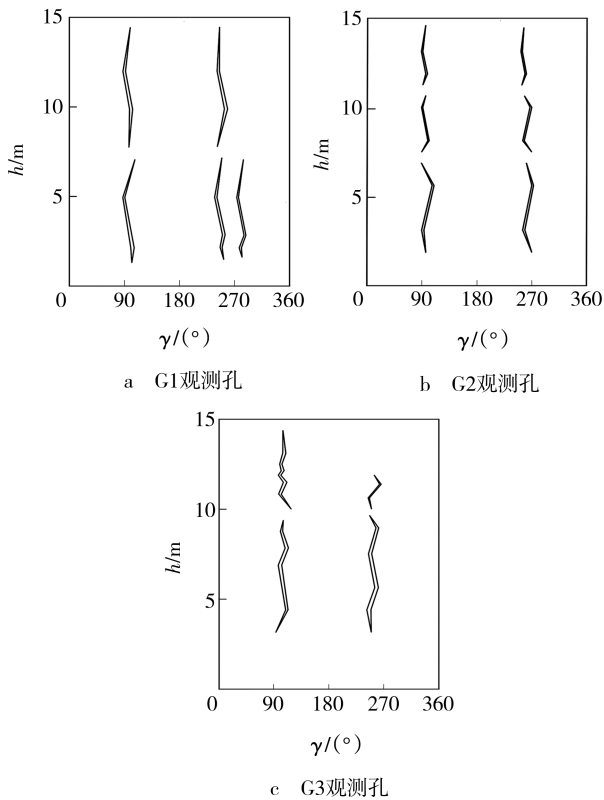


图7 裂缝扩展素描
 Fig. 7 Sketch of crack expansion

孔壁两侧对称定向裂缝的形成是地应力场、钻孔力学效应与致裂能量协同作用的结果:首先,区域最大水平主应力方向与巷道轴线平行,导致钻孔在90°和270°方位角处产生切向拉应力集中,为裂缝提供定向起裂点;其次,致裂能量(如 CO₂ 相变压力波)优先作用于这些应力集中区,触发对称裂缝并沿最小阻力路径向孔口自由面扩展;最终,在持续能量驱动下,裂缝贯通预存弱面,形成从3 m至14.8 m的远程延伸。该过程揭示了“应力控位-能量扩缝-结构调径”的破裂机制,为精准控制压裂方向提供了理论依据。

5 结 论

(1)在水温不变的情况下随着 CO₂ 初始温度的增加,气-水换热器传热系数随 CO₂ 温度增加而增加 CO₂ 致裂器输出端温度每增加 1 °C,水热流体换热后的温度递减。

(2)随着 CO₂ 初始温度增加,CO₂ 体积流量呈近似线性关系。致裂器内 CO₂ 热做功由 22.74 kJ 增加至 23.61 kJ,CO₂ 相变产生的致裂能量由 855.23 kJ 增加至 1 114.85 kJ。

(3)钻孔致裂后,孔壁两侧产生对称的定向裂缝,沿平行于巷道轴线由孔底向孔口方向延伸扩展,裂缝形成良好的贯通趋势。

参考文献:

[1] 黄辉龙,冯俊文,邓广哲,等.基于 CO₂ 水基压裂液的煤体软化及降尘技术应用[J].煤炭技术,2024,43(1):129-132.
 [2] 张波,詹睿,刘浪,等.深部矿井水平方螺旋形埋管充填体换热器及其耦合热泵系统性能研究[J].工程科学学报,2022,44(10):1719-1732.
 [3] 马亮,邓广哲,王守印,等.碳封存超临界 CO₂ 螺旋管换热器传热规律[J].西安科技大学学报,2024,44(3):467-477.
 [4] 刘琪,苏伟,张瑞瑛,等.深部矿井煤炭-地热协同开采系统研究[J].煤炭科学技术,2024,52(3):87-94.
 [5] Yildirim N, Slamet P, Gulden G A. Thermodynamic assessment of downhole heat exchangers for geothermal power generation [J]. Renewable Energy, 2019, 141: 1080-1091.
 [6] 倪少军,陈明辉,苏明强. 间壁式换热器矿井乏风废热利用技术与工程实例研究[J]. 价值工程, 2020, 39(7): 207-209.
 [7] 宋子琛,王青青,黄鑫,等. 超临界压力下二氧化碳在套管换热器内传热特性数值模拟[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 79-86.
 [8] 张全,姚殿宝,龚海文. 基于不同换热器的矿井回风余热回收换热效果研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(10): 35-39.
 [9] 岳高伟,李敏敏,许梦飞. 深部矿井季节性通风风流与围岩换热特性[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 195-199.

- [10] Chen G, Sha K A. Heat transfer in nanostructures for solid-state energy conversion[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2002, 124(2): 242–252.
- [11] 杜春涛, 朱元忠, 孟国营, 等. 矿井回风喷淋换热器换热效率数学模型研究[J]. *煤炭工程*, 2015, 47(10): 104–107.
- [12] 杜春涛, 董志峰, 孟国营, 等. 矿井回风喷淋换热器节水及换热效率影响因素研究[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(12): 80–83.
- [13] 何瑞敏. 矿井回风换热过程中气-水换热效率仿真研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(增刊2): 179–181.
- [14] 秦圣权. 储能同轴深井换热器岩土热响应试验及换热性能分析[J]. *价值工程*, 2024, 43(6): 17–19.
- [15] 崔海蛟, 王海桥, 陈世强. 矿井扩散塔喷淋换热装置热质传递模型及参数优化[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(10): 2047–2052.
- [16] 杜春涛, 张进治, 王若宾. 矿井回风换热器换热性能影响因素的仿真及实验研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(5): 897–902.
- [17] Nouh S A, Lau K K, Shariff A M, et al. Dynamic adsorption of CO₂ from methane: studies on mass and heat transfer[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2013, 36(2): 277–286.
- [18] 张明光, 张培鹏, 陈惠宁, 等. 热管换热器回收煤矿回风余热预热矿井进风研究[J]. *煤矿安全*, 2014, 45(5): 31–34.
- [19] 路膺祚, 鲍玲玲, 赵旭, 等. 矿用热管换热器析湿工况换热分析[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(3): 165–170.
- [20] 姬建虎, 廖强, 胡千庭, 等. 热害矿井掘进工作面换热特性[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(4): 692–698.
- [21] 王景刚, 余军, 王建学, 等. 矿井回风换热器数值模拟[J]. *制冷与空调*, 2013, 13(3): 37–40.
- [22] Yu F, Deng G Z. The thermodynamic change laws of CO₂-coupled fractured rock[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(12): 5122.
- [23] 蒲文龙, 申罗飞, 刘洋. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的防凌减灾微差爆破数值模拟[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2023, 33(3): 325–332.
- [24] 刘传海, 藏岐峰, 张保勇, 等. 驱动力对煤介质中 CO₂ 水合物生长动力学的影响[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2024, 34(1): 1–7.
- [25] Du R Q, Jiang D D, Wang Y, et al. An experimental investigation of CuO/water nanofluid heat transfer in geothermal heat exchanger[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 22(7): 1–13.
- [26] Jiang P X, Zhang Y, Shi R F. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer of CO₂ at supercritical pressures in a vertical mini-tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(11/12): 3052–3056.

(编辑 李德根 校对 宋丽娜)