

基于相场法的液态 CO₂ 相变爆破致裂裂缝扩展研究

刘祖沛, 袁志刚*, 赵锦涛

湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201

DOI:10.61369/ME.2026020026

摘 要 : 液态 CO₂ 相变爆破致裂是一种安全、高效、环保的煤岩增透技术, 但施工现场难以观察到其裂缝扩展。因此, 本文基于相场断裂理论, 通过引入初始应力项建立的能量泛函使用 COMSOL 进行多场耦合求解, 并与现场试验相结合研究液态 CO₂ 相变爆破致裂煤岩裂缝扩展规律, 为复杂地质环境中的施工提供了可靠的技术工具。

关 键 词 : 液态 CO₂ 相变爆破; 相场法; 裂缝扩展

Research on Crack Propagation Induced by Liquid CO₂ Phase Transition Blasting Based on the Phase Field Method

Liu Zupei, Yuan Zhigang*, Zhao Jintao

School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201

Abstract : Liquid CO₂ phase transition blasting fracturing is a safe, efficient, and environmentally friendly technique for enhancing coal and rock permeability, but observing crack propagation on site is challenging. Therefore, based on the phase field fracture theory, this study establishes an energy functional incorporating initial stress, employs COMSOL for multi-field coupling solution, and investigates the crack propagation laws through field experiments, providing a reliable technical tool for construction in complex geological environments.

Keywords : liquid CO₂ phase transition blasting; phase field method; crack propagation

引言

针对低透气性煤层的瓦斯治理问题, 液态 CO₂ 相变爆破通过高压气体产生拉应力^[1]致裂岩体达到增透效果, 目前相关研究在现场或者实验室难以观察到其裂缝扩展。因此有必要对液态 CO₂ 相变爆破致裂煤岩裂缝扩展规律进一步研究。

近年来, 相场法作为一种高效的弥散型裂缝模拟方法, 能够自动演化获取裂缝路径及位置^[2]。这极大的避免了追踪裂缝面的繁琐性并解决了裂缝扩展出现的复杂转向和相交等问题, 因此相场法在模拟裂缝的产生、扩展等方面具有很好的优势^[3]。

本文基于变分断裂理论为框架, 通过建立包含初始应力项的能量泛函, 推导了位移场、渗流场、相场的控制方程, 在 COMSOL 中实现了多物理场耦合求解, 并结合试验研究 CO₂ 相变爆破致裂煤岩的裂缝扩展路径和偏转行为, 为现场施工提供了科学依据。

一、液态 CO₂ 相变爆破相场断裂数学模型

(一) 系统的总能量泛函

考虑初始地应力作用时, 多孔弹性介质域 Ω 的能量泛函 $L(u, p, \Gamma)$ 为^[4]:

$$\begin{aligned} L(u, p, \Gamma) = & L_k + L_p - L_\varepsilon - L_{ins} - L_f + L_{ext} \\ = & \int_{\Omega} \Psi_k(\dot{u}) d\Omega + \int_{\Omega} \Psi_p(p, u) d\Omega - \int_{\Omega/\Gamma} \Psi_\varepsilon(\varepsilon) d\Omega \\ & - \int_{\Omega/\Gamma} \Psi_{ins} d\Omega - \int_{\Gamma} G_c dS + \left(\int_{\Omega} b^* \cdot u d\Omega + \int_{\partial\Omega_t} t^* \cdot u dS \right) \quad (1) \end{aligned}$$

式 (1) 中, L_k 为动能、 L_p 为孔隙压力做功量、 L_ε 为弹性能、 L_{ins} 为初始应变能、 L_f 为断裂能及 L_{ext} 为外力做功量。其中, $\Psi_k(\dot{u})$ 为单位体积动能, $\Psi_p(p, u)$ 为孔隙压力势能密度, $\Psi_\varepsilon(\varepsilon)$ 为弹性能密度, Ψ_{ins} 为初始应变能密度, G_c 为临界能量释放率。

(二) 尖锐裂缝的相场近似

通过引入相场变量 d 描述损伤, 再通过引入裂缝表面密度函数 $\gamma(d, \nabla d)$ 来描述单位体积内的等效裂缝表面积, 所以裂缝表面断裂能数学形式表达为^[5]:

$$\pi = \int_{\Gamma} G_c dS \approx \int_{\Omega} G_c \cdot \gamma(d, \nabla d) d\Omega = \int_{\Omega} G_c \left(\frac{d^2}{2l_0} + \frac{l_0}{2} \nabla d \cdot \nabla d \right) d\Omega \quad (2)$$

根据液态 CO₂ 相变爆破致裂的两阶段特点, 采用不同应变能分解方式, 并引入退化函数 $g(d)$ 以防止奇异性, 则域 Ω 弹性能泛函为^[6]:

$$L_{\varepsilon} = \int_{\Omega/\Gamma} g(d) \Psi_g(\varepsilon) d\Omega \quad (3)$$

基于煤岩体裂缝的形成机制, 应变能分解为两部分, $g(d)$ 只作用与拉伸应变, 所以:

$$L_{\varepsilon} = \int_{\Omega} \{[(1-d)^2(1-k)+k] \Psi_g^+(\varepsilon) + \Psi_g^-(\varepsilon)\} d\Omega \quad (4)$$

同理, 考虑初始应力对裂缝扩展没有贡献。则退化函数在能量泛函 L_{ins} 中的应用为:

$$L_{ins} = \int_{\Omega/\Gamma} \Psi_{ins} d\Omega \approx \int_{\Omega} g(d) \sigma_0 : \varepsilon d\Omega \quad (5)$$

(三) 控制方程

根据变分原理^[7], 令总能量泛函等于0, 推导的位移场的控制方程为:

$$\sigma_{ij,j}^{por} + b_i^* = \rho \ddot{u}_i \quad (6)$$

由于材料的断裂行为是不可逆的, 所以引入历史应变场 $H(x,t)$, 相场控制方程为:

$$\left[\frac{2l_0 H(1-k)}{G_c} + 1 \right] d - l_0^2 \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} = \frac{2l_0(1-k)H}{G_c} \quad (7)$$

将多孔介质域 Ω 划分为三个子域: 未断裂域 Ω_p 、过渡域 Ω_t 和断裂域 Ω_f 。各子域物理力学参数通过线性指示函数和插值获得^[9], 如图1所示:

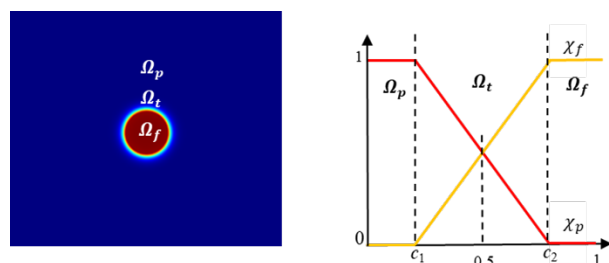


图1 多孔介质域 Ω 子域分布及线性指示函数

采用达西定律描述渗流, 统一的质量守恒方程为^[10]:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\rho k}{\mu} (\nabla p + \rho g) \right) + \rho S \frac{\partial p}{\partial t} = q - \rho a \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (8)$$

二、液态 CO₂ 相变爆破相场断裂模型验证及分析

为验证相场断裂数学模型可靠性, 模拟文献^[11]中实验室混凝土试件, 采用 $400 \times 400 \times 400 \text{ mm}^3$ (如图2) 来模拟液态 CO₂ 相变爆破致裂过程。相关计算参数如表1所示。

表1 液态 CO₂ 相变爆破致裂算例模拟采用相关参数

参数	值	单位	参数	值	单位
E	5.2	GPa	v	0.27	--
Gc	10	N/m	k	1×10^9	--
l0	3×10^{-3}	m	C ₁	0.4	--
C ₂	1	--	Q _p , Q _f	0	kg/(m ³ · s)
ρ_p	1.784	kg/m ³	ρ_f	1.784	kg/m ³
μ_p	1×10^3	Pa · s	μ_f	1×10^3	Pa · s
K _p	1×10^{-14}	m ²	K _f	1×10^{-6}	m ²
C _p	0.97	1/Pa	C _f	0.97	1/Pa

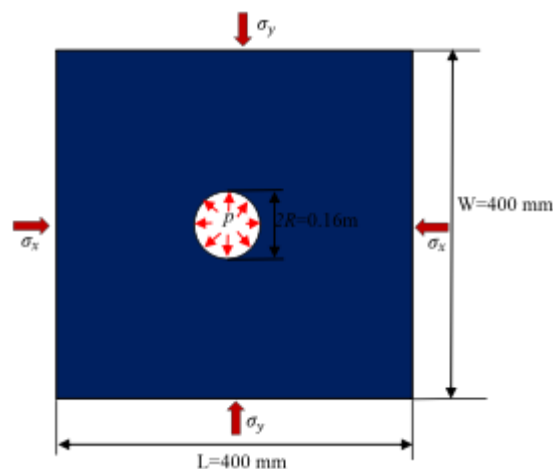
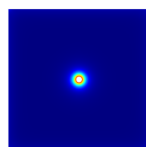
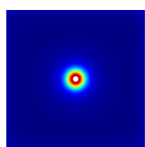


图2 液态 CO₂ 相变爆破致裂算例模拟几何模型

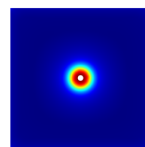
I阶段



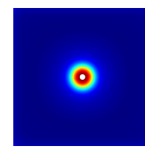
0.05ms



0.1ms

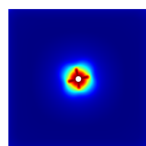


0.2ms

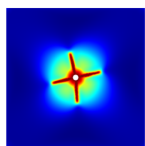


1ms

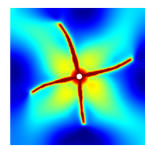
II阶段



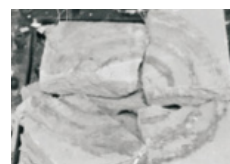
4ms



5ms



10ms



试验最终裂缝形态

(a) $\sigma_x = \sigma_y = 1 \text{ MPa}$

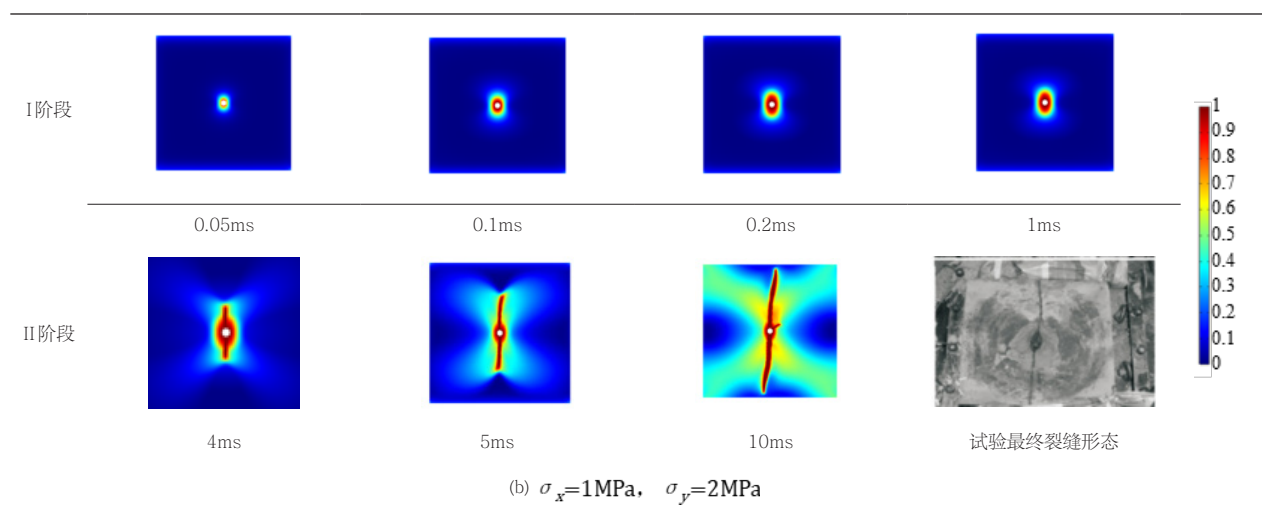


图3 液态 CO₂相变爆破致裂算例试验结果与模拟结果裂缝分布

由图3(a)可知，试验结果为，试件形成以钻孔为中心直径78mm的粉碎区，产生对称分布的4条裂隙，通过钻孔成“十”字交叉分布，并贯穿整个试件；模拟结果为，试件形成以钻孔为中心直径60mm的粉碎区，产生对称分布的4条裂缝，通过钻孔成“十”字交叉分布。图3(b)可知，试验结果为试件钻孔内部形成长65mm、宽30mm的椭圆型粉碎区，产生2条分布沿竖直方向的裂缝，贯通整个试件；模拟结果为试件钻孔内部形成长60mm、宽30mm的椭圆型爆破空腔，产生2条分布沿竖直方向的裂缝和1条较短裂缝，两条较长裂缝贯穿整个试件，是由于在边界加载时裂缝扩展过程中，地应力效应占据主导地位。两种边界加载条件下的裂缝形态模拟结果与实验观测的裂缝形态结果基本一致，

本文提出的相场断裂数学模型及数值实现在模拟地应力作用下液态 CO₂相变爆破致裂裂缝扩展方面是可靠的，能够为复杂的地质工程提供依据。

三、结论

(1) 基于相场断裂理论以及液态 CO₂相变爆破致裂煤岩裂缝特点，构建了考虑初始地应力场的相场断裂数学模型。分别描述 I-II 型混合裂缝扩展与 I 型裂缝扩展行为，克服了传统相场法仅适用于拉伸裂缝的局限性。

(2) 液态 CO₂相变爆破致裂数值模拟与试验结果在粉碎区形态、主裂缝分布及扩展方向上吻合良好，验证了模型模拟地应力作用下裂缝演化过程的有效性与可靠性。

(3) 模型揭示了地应力差异对裂缝走向的控制作用，为液态 CO₂相变爆破技术在复杂地质条件下的工程应用提供了理论依据与数值分析工具。

参考文献

- [1] 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, 0315: 118.
- [2] 梁鑫，侯鹏，薛熠，刘嘉，高峰，基于相场法的岩石预制裂缝定向水力压裂裂缝扩展规律研究，岩土工程学报 [J], 47 (2025) 1865-1873.
- [3] Provatas N, Elder K. Book-phase-field methods in materials science and engineering[M]. Wiley-VCH Press, 2010.
- [4] 温继伟，项天，朱茂，胡萍，毛建设，荆羽慧，基于扩展有限元分析的页岩水力压裂裂缝扩展规律探究 [J], 钻探工程, 49 (2022) 177-188.
- [5] Zhou S W, Zhuang X Y, Timon Rabczuk, Phase field method for quasi-static hydro-fracture in porous media under stress boundary condition considering the effect of initial stress field[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 107: 102523.
- [6] Bourden M.J., Verhoosel C.V., Scott M.A., et al. A phase-field description of dynamic brittle fracture[J]. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 2012, 217220(1): 7795.
- [7] Francfort G, Marigo J.J. Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46(8): 1319 - 1342.
- [8] Miehe C, Hofacker M, Welschinger F, A phase field model for rate-independent crack propagation: Robust algorithmic implementation based on operator splits[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2010, 199: 2765 - 2778.
- [9] Lee S, Wheeler M.F, Wick T. Pressure and fluid driven fracture propagation in porous media using an adaptive finite element phase field model, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 305 (2016) 111 - 132.
- [10] Biot M.A. J Acoust Soc of A me, 1962, 34 (9) : 1254-1264.
- [11] 孙可明，辛利佳，吴迪，等. 初应力条件下超临界 CO₂气爆致裂规律研究 [J]. 固体力学学报, 2017, 38(5): 473482.