

DOI: 10.11779/CJGE202210015

# 基质-裂隙相互作用对煤渗透率的影响：考虑煤的软化

程先振<sup>1</sup>, 陈连军<sup>\*1</sup>, 栾恒杰<sup>1</sup>, 王春光<sup>1</sup>, 蒋宇静<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 长崎大学工学研究科, 长崎 852-8521)

**摘要:** 瞬态渗透率是提高煤层气产量的重要依据。为了得到基质-裂隙压力相互作用出现煤的软化行为对渗透率演化的影响。基于理论分析建立含模量软化系数的双重孔隙介质渗透率模型, 并基于脉冲瞬态试验与 COMSOL 有限元数值模拟软件进行渗透率模型的验证。结果表明: 根据曲线变化特征, 将应变分为初始, 快速增长和平衡阶段。在快速增长阶段, 注气压力从 1 MPa 增大到 3 MPa 应变曲线的斜率分别为 83.77, 270.54, 440.92 m/s。模量软化系数是应变的函数, 其值也增大; 其次, 通过提出张开型和闭合型裂隙几何概念模型, 得到含模量软化系数的双孔渗透率模型; 最后, 试验数据与改进的渗透率模型结果一致, 证明模量软化系数主导了渗透率的动态演化。与试验方法相比, 数值模拟方法能够监测煤基质的压力, 基质与裂隙之间气体压力的变化揭示了煤渗透率演化机理。

**关键词:** 模量软化系数; 渗透率; 煤层气; 基质-裂隙相互作用

中图分类号: TE319

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2022)10 - 1890 - 09

作者简介: 程先振(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事煤层气开采基础理论方面的研究。E-mail: lbs\_cxz@163.com。

## Influences of softening behaviour of coal on evolution of its permeability by considering matrix-fracture interactions

CHENG Xian-zhen<sup>1</sup>, CHEN Lian-jun<sup>1</sup>, LUAN Heng-jie<sup>1</sup>, WHANG Chun-guang<sup>1</sup>, JIANG Yu-jing<sup>1,2</sup>

(1. Department of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan)

**Abstract:** The evolution of dynamic permeability is an important basis for improving the production of coal bed methane. In order to obtain the influences of the softening behavior of coal from matrix-fracture pressure interactions on the evolution of its permeability, a dual-pore permeability model with modulus reduction ratio from differential pressure is obtained through theoretical analysis and is validated based on the permeability transient method tests and the finite element numerical simulation software COMSOL. The experimental results show that the strain is divided into the initial, rapid growth and equilibrium phases based on the characteristics of the curve change. During the rapid growth phase, the slope of the strain curve increases from 1 to 3 MPa with slopes of 83.77, 270.54, 440.92 m/s respectively. The modulus-softening coefficient is a function of the strain and its value increases. Furthermore, a dual-pore permeability model with modulus-softening coefficient is obtained by proposing a conceptual model for open and closed fractures. The experimental data are consistent with the results of the improved permeability model, demonstrating that the modulus-softening coefficient dominates the dynamic evolution of the permeability. Finally, the numerical simulation method can be used to monitor the pressure in the coal matrix compared to the experimental method. Thus, the pressure difference between the matrix and the fracture reveals the mechanism of permeability evolution in coal samples.

**Key words:** modulus-softening coefficient; permeability; coal bed methane; matrix-fracture interaction

## 0 引言

煤层气已经由矿井灾害气体转变为重要的能源。渗透率是衡量煤层气产量的关键指标, 它对储层压力的敏感性较强<sup>[1-3]</sup>。气体压力在基质微孔与裂隙之间的相互作用会引起煤的软化。这一特征可以用模量软化系数进行表征<sup>[4]</sup>。因此, 考虑模量软化系数建立双重孔隙介质渗透率模型对预测煤层气的产量具有重要意义。

裂隙渗透率远大于基质渗透率<sup>[5]</sup>。这造成气体运移时, 基质和裂隙之间会产生压力梯度。然而, 限于基质-裂隙相互作用下气体流动的复杂性, 渗透率测试大都在两者压力平衡后进行。例如, 恒定围压下,

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51934004); 山东省自然科学基金项目(ZR2018ZA0602)

收稿日期: 2021 - 08 - 12

\*通信作者 (E-mail: skdclj@sdust.edu.cn)

Anggara 等<sup>[6]</sup>发现褐煤-次烟煤的应力补偿效应引起基质膨胀, 导致渗透率随孔隙压力的增加而降低。Bottomley 等<sup>[7]</sup>发现随着围压从 1 MPa 增大到 5.2 MPa, 渗透率降低了 4 倍。Brace 等<sup>[8]</sup>提出脉冲瞬态压力衰减法缩短了试验测试时间。基于这种方法, Kumar 等<sup>[9]</sup>建立了指数型渗透率模型, 揭示宾夕法尼亚无烟煤在低于饱和储层压力下开采时渗透率降低。对应力的敏感性使得煤渗透率降低幅度增大。增大煤渗透率成为提高煤层气产量的关键。因此, 为了提高渗透率, Kumar 等<sup>[10]</sup>在研究支撑剂保持裂缝孔径时发现保持围压恒定, 增大孔隙压力, 渗透率曲线呈 U 型特征。Feng 等<sup>[11]</sup>通过原地应力条件的试验结果揭示水平应力降低可以加速煤层气的产出。这说明控制有效应力能有效的提高煤层气的产量。但是上述研究仅测试了平衡渗透率, 忽略了基质-裂隙相互作用的非平衡阶段。

基质-裂隙的相互作用会引起煤的软化。Viète 等<sup>[12]</sup>通过对比饱和 CO<sub>2</sub> 和饱和空气后煤样的应力-应变关系, 发现饱和 CO<sub>2</sub> 煤样的强度和杨氏模量分别降低了约 13% 和 25%。Larsen<sup>[13]</sup>通过类似的试验揭示了煤软化的机理为注气引起煤微观结构的重新排列。因此, 渗透率的演化应该耦合煤软化的影响。Salari 等<sup>[14]</sup>, Hu 等<sup>[15]</sup>和 Wang 等<sup>[16]</sup>基于应变等效假设, 建立了含损伤变量的本构方程与流动方程联立求解。基于回归分析方法, Chen 等<sup>[17]</sup>通过拟合偏应力与损伤变量的修正系数  $L$ , 进而修正了 Cui 等<sup>[18]</sup>的渗透率模型。Zhang 等<sup>[19]</sup>等拟合软化系数与渗透率的关系, 改进了应力型渗透率模型。另外, Zhu 等<sup>[20]</sup>等假设煤的软化系数为指数形式, 进而修正了立方定律。Zheng 等<sup>[21]</sup>同样假设软化系数为指数形式, 提出了含软化项的 C-B 模型。

可以看出, 上述考虑煤软化的研究推进了渗透率模型的发展, 但仍存在两点局限性: ①煤软化系数被用于修正单孔渗透率模型。单孔渗透率模型不能揭示基质-裂隙之间压力相互作用过程; ②只考虑了基质与裂隙压力平衡后的渗透率演化。与平衡渗透率相比, 含非平衡阶段的完整渗透率的演化更符合实际。

综上, 该研究旨在建立考虑煤软化的双孔渗透率模型。首先, 分析了恒围压与恒压差两种边界条件下煤渗透率演化规律; 其次, 通过理论分析提出张开型与闭合型裂隙概念模型, 通过修正 Maxwell 模型的黏性项为模量软化项, 建立含模量软化系数的双孔渗透率模型; 最后, 将软化系数控制的渗透率模型数值解与试验数据对比。与试验结果相比, 双孔渗透率模型中基质与裂隙压力的数值解可以揭示渗透率的演化机理。

## 1 煤渗透率试验

### 1.1 试验设备

试验煤样取自山东省巨野煤田, 煤样尺寸为长 5 cm, 直径 2.5 cm。为了获取煤样的裂隙分布、基质特征, 对煤样进行全尺寸 CT 扫描, 结果见文献[22, 23]。但之前的研究, 假设煤为弹性体, 有一定的局限性。为了进一步凸显基质-裂隙的相互作用, 利用 Avizo 软件对裂隙数量分布进行了统计。如图 1 (a) 中所示不同颜色标识的裂隙平均开度自上而下分别为 121, 81, 137, 125  $\mu\text{m}$ 。根据统计结果将裂隙开度与基质内微孔开度列于图 1 (b) 中。将开度大于 80  $\mu\text{m}$  的孔隙定义为裂隙。则裂隙与基质内微孔的占比分别约为 29.7% 和 70.3%。

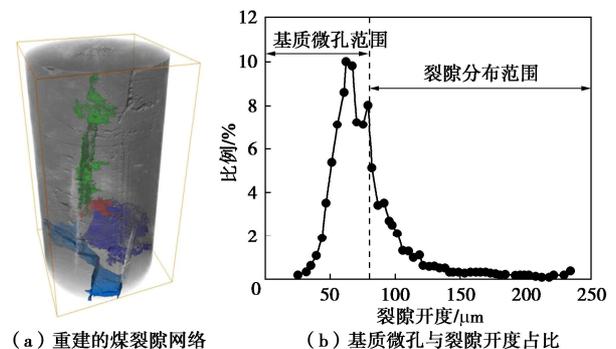


图 1 裂隙分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of fracture

利用如图 2 所示的“煤岩低渗透测试系统”开展煤样渗透率测试试验。试验装置包括夹持器、两个恒速恒压泵、电子天平、He 气源、参考缸、恒温箱、3 个压力传感器、数据采集仪、计算机数据终端以及高压管线等。其中, 两个恒速恒压泵分别提供围压和注气压力, 恒温箱保持试验过程处于恒温条件。试验过程如下: 沿垂直煤样轴线方向粘贴应变片后, 将煤样放置在夹持器中; 打开控制阀 V2, 气体进入围压腔, 对煤样施加恒定的外部应力; 打开控制阀 V4, 气体流入参考缸; 打开 V3, 通过参考缸对煤样施加恒定的注气压力; 当气体压力稳定后打开 V1, 使气体由上游腔室经煤样流入下游腔室。与以往脉冲衰减法不同, 本系统保持上游压力不变, 在下游设置截止阀调整下游压力。由此克服了上游和下游气压之间的压差平衡时间长的问题。

### 1.2 试验方法

渗透率测试采用脉冲衰减法<sup>[24]</sup>。其实质是通过改变上游压力与下游压力之间的压力梯度进行渗透率测试。对煤样施加特定围压后, 开始注入气体, 当下游

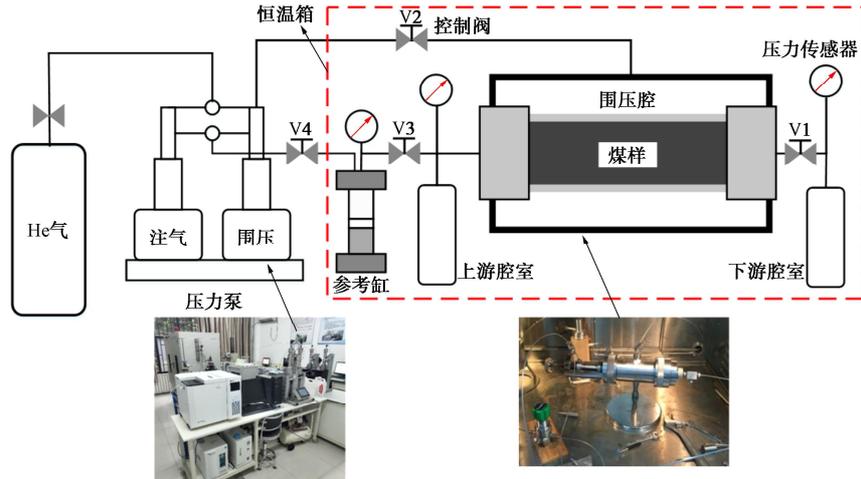


图2 试验系统图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

气体压力与上游气体压力达到平衡后，记录煤样应变，然后降低下游气体压力，待其再次平衡后利用压差计算渗透率。

$$\frac{P_{上} - P_{下}}{P_{上0} - P_{下0}} = e^{-\gamma t} \quad (1)$$

式中， $P_{上} - P_{下}$  为上游与下游气体压力差， $P_{上0} - P_{下0}$  为初始状态下上游与下游压力差， $t$  为平衡时间。

$$\gamma = \frac{kA}{\mu cL} \left( \frac{1}{V_a} + \frac{1}{V_b} \right) \quad (2)$$

式中， $k$  为煤样渗透率， $A$  为煤样的横截面积， $L$  为煤样长度， $\mu$  为黏性系数， $c$  为压缩系数， $V_a$ 、 $V_b$  分别为测得的上游和下游气体体积。通过改进脉冲衰减法，保持上游气体压力不变，由式(1)，(2)得

$$k = \frac{\gamma \mu c L V_b}{A} \quad (3)$$

表1所示为设置恒围压与恒压差两种边界条件下的6组试验方案。恒压差是指保持围压与注气压力的差值为定值，本试验中取2 MPa。这样设置的目的是保持煤的有效应变恒定。因为模量软化系数是应变的函数，当有效应力系数为1时，恒压差条件意味着有效应力不变。恒压差边界条件对应恒定模量软化系数。而恒围压下，不同注气压力会改变煤的应变进而改变模量软化系数。

表1 不同边界条件下的试验方案

Table 1 Experimental schemes of different boundary conditions

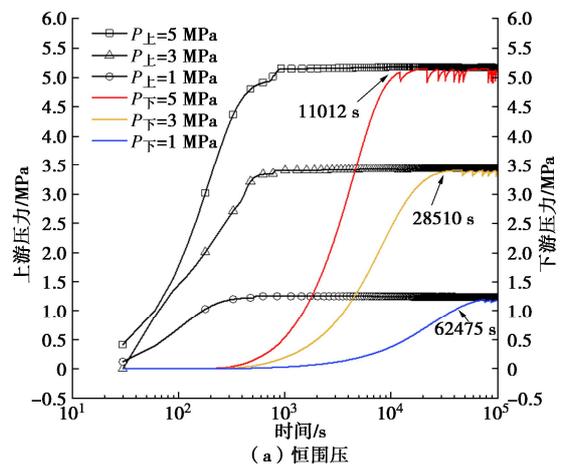
方案	围压/MPa	注气压力/MPa	边界条件
1	7	1	恒围压
2	7	3	恒围压
3	7	5	恒围压
4	5	3	恒压差
5	6	4	恒压差
6	7	5	恒压差

### 1.3 试验结果分析

通过试验得到的结果包括上下游压差，煤样应变与渗透率。其中，上、下游压差用于计算渗透率，而煤样应变是模量软化系数的函数。

#### (1) 上、下游压力特征

由式(1)知上游与下游压力差是煤渗透率的函数。下游压力与上游压力的平衡时间决定了气体的流量。恒围压下，注气压力越大，下游压力与上游压力平衡所需时间越短。如图3(a)中所示，注气压力为5, 3, 1 MPa时所需平衡时间分别为11012, 28510, 62475 s。这是因为增大孔隙压力，割理孔径增大，使得气体流量增大。有效应力减小，模量软化系数变小。恒压差条件下，3组试验的平衡时间相同。因为保持煤样处于恒压差条件，割理孔径不变。当模量软化系数恒定时，气体的流量不变。这说明模量软化系数与煤样有效应变相关，其通过改变煤样内气体流量影响渗透率的演化。



(a) 恒围压

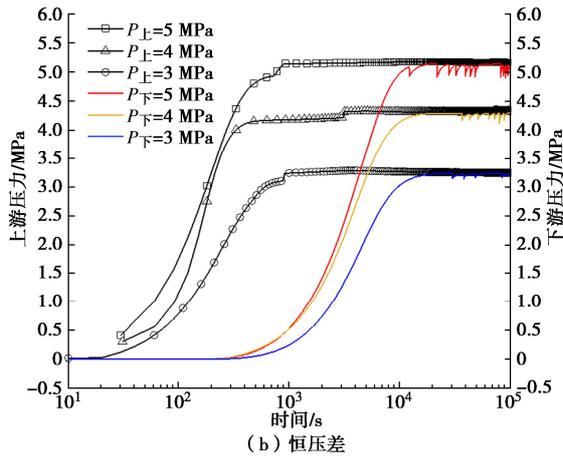


图 3 煤样上、下游压力演化图

Fig. 3 Gas pressures of upstream and downstream

(2) 应变特征

图 4 所示为煤样的应变曲线图。根据应变曲线的变化特征, 可将应变演化分为初始阶段 (阶段 1)、快速增长阶段 (阶段 2) 和平衡阶段 (阶段 3)。

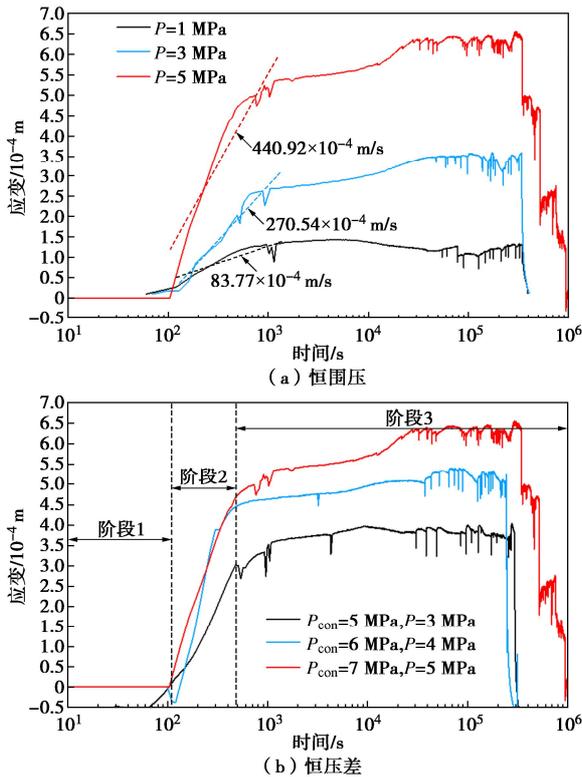


图 4 煤样应变曲线

Fig. 4 Curves of coal strain

出现这 3 个阶段是因为: 注气后气体充满腔室, 气体进入裂隙, 裂隙孔隙压力快速达到最大值, 引起较大的煤样变形。随着裂隙内的气体扩散至基质内, 基质孔隙压力逐渐与裂隙气体压力平衡。阶段 3 的煤样变形时间远大于阶段 2, 说明裂隙与基质气体压力相互作用反应时间更长。图 4 (b) 所示恒压差条件下的 3 组试验应变在约 479 s 时达到平衡阶段, 阶段 2

中应变的斜率近似为定值。然而, 在图 4 (a) 所示恒围压下, 随注气压力从 1 MPa 增大到 5 MPa, 斜率变化较大 (分别为 83.77, 270.54, 440.92 m/s),  $P_{con}$  为围压。孔隙压力的变化改变了有效应力, 主导了裂隙孔径的变化。这意味着恒压差条件下, 煤样应变变化率恒定, 模量弱化系数为定值。

(3) 渗透率演化特征

图 5 所示为恒围压与恒压差条件下煤渗透率的演化规律。可见, 随着注气时间增大, 渗透率单调递减。恒围压条件下, 注气压力越大, 对应煤渗透率越大。如注气时间为 15984 s 时, 注气压力 1, 3, 5 MPa 对应的煤渗透率分别为  $1.18 \times 10^{-18}$ ,  $2.04 \times 10^{-18}$ ,  $2.62 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 。这是因为基于有效应力原理, 注气压力增大, 裂隙孔径变大。而恒压差条件下, 注气压力越大, 煤渗透率越小。这与以往观测到氦气随着孔隙压力增大渗透率出现指数降低的现象一致<sup>[25]</sup>。这是因为较大的围压压缩基质, 进而影响渗透率。另外, 将渗透率与应变进行对比可发现: 在阶段 3, 随着应变增大, 渗透率降低。而在 1, 2 阶段没有得到渗透率结果。这是因为渗透率是上、下游压力差的函数。在这两个阶段气体在夹持器腔和裂隙-基质内流动, 下游压力值为零。

2 考虑煤软化的双孔渗透率模型

根据裂隙的形态提出几何概念模型, 建立考虑煤软化的双孔渗透率模型。通过改进渗透率方程, 固体变形方程和气体流动控制方程的耦合求解可以得到软化系数对渗透率的影响。

2.1 渗透率方程改进

CT 观测图像显示孔隙结构由连通的孔隙和不连通的孔隙组成<sup>[26]</sup>。根据裂隙发育的不连续性, 可以将其分为张开型裂隙和闭合型裂隙, 如图 6 (a) 所示。张开型裂隙的变形是线性的满足胡克定律; 在孔隙压力的作用下, 气体在闭合型裂隙中的渗透和扩散会引起煤的软化。通过将 Maxwell 模型中的黏性项替换为软化项, 建立改进的 Poyting-Thomson 模型, 如图 6 (b) 所示, 可以将模量软化系数引入渗透率模型。闭合型裂隙的变形由胡克定律和软化项表示。

假设气体流过张开型裂隙时, 裂隙变形遵循胡克定律。

$$d\sigma = E_l db_l \quad (4)$$

式中,  $E_l$  为裂隙杨氏模量,  $b_l$  为裂隙的孔径,  $\sigma$  为外部应力。裂隙应变与裂隙孔径之间的关系为<sup>[27]</sup>

$$d\epsilon_l = -\frac{1}{b_{0l}} db_l \quad (5)$$

式中,  $b_{0l}$  为裂隙初始孔径, 对式 (5) 积分可得张开

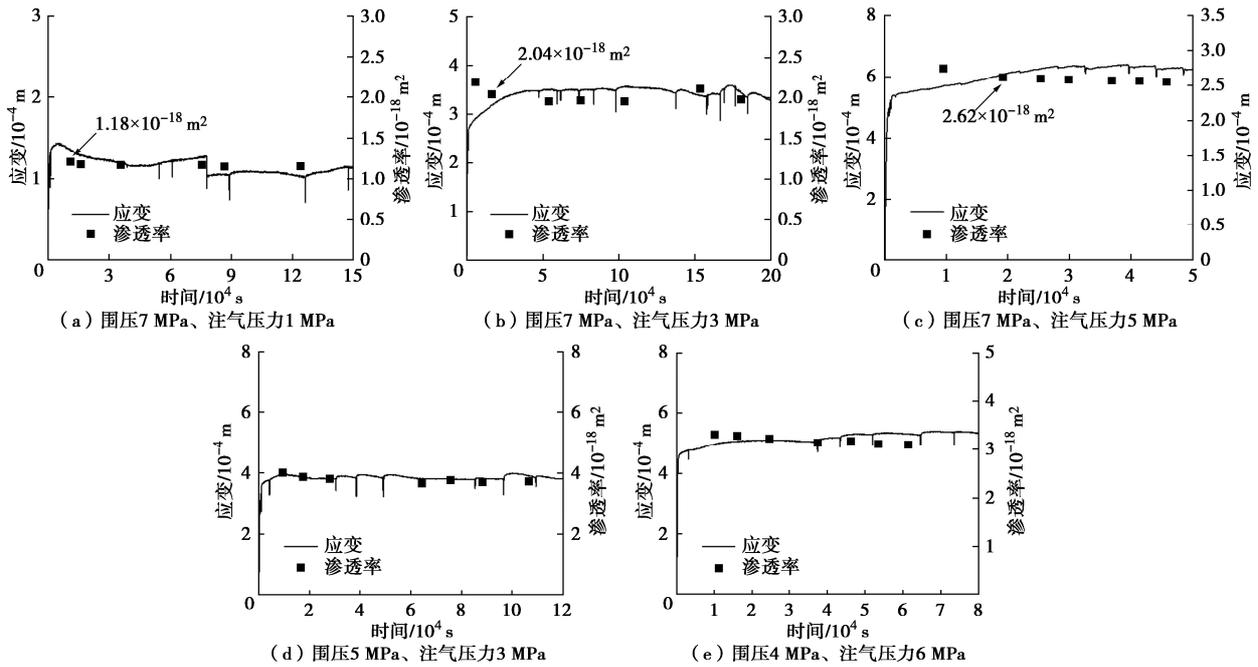


图5 煤渗透率演化与应变对比图

Fig. 5 Evolution of coal permeability versus strain

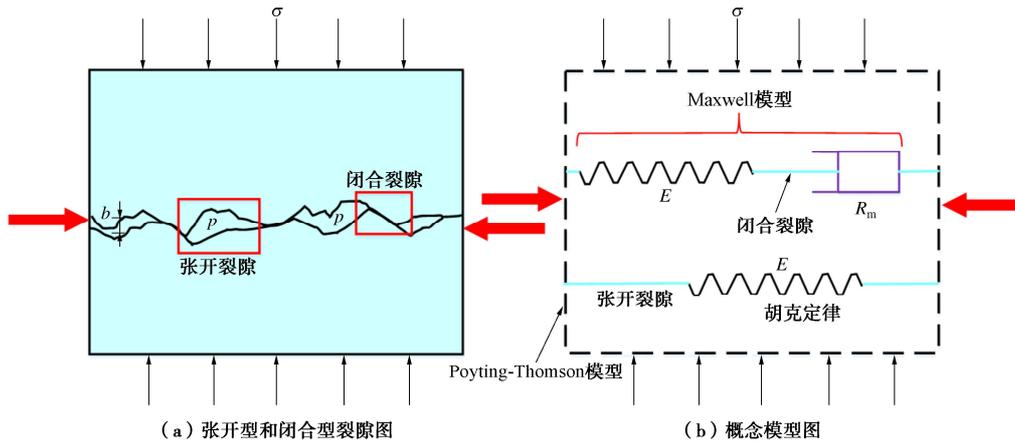


图6 裂隙几何概念模型图

Fig. 6 Conceptual model for fractures

型裂隙的孔径:

$$b_t = b_{0,t} \left( 1 - \frac{\Delta\sigma_e}{E_t} \right), \quad (6)$$

式中,  $\Delta\sigma_e$  为有效应力,  $\Delta\sigma_e = \sigma - \alpha_i p$ ,  $\alpha_i$  为有效应力系数。闭合型裂隙孔径的变化由基质与裂隙的压差产生:

$$\Delta b_d = (a + b) \frac{\Delta p}{E_t} - a \frac{\Delta p}{E_d}, \quad (7)$$

式中,  $E_d$  为闭合裂隙的杨氏模量, 表示煤软化引起的杨氏模量弱化,  $b_d$  为闭合裂隙的孔径,  $a$  为基质宽度,  $b$  为裂隙的宽度,  $\Delta p$  为裂隙和基质的气体压差。方程右边第一项为压差下煤样的总应变, 第二项为煤软化后基质应变。

$$\Delta b_d = a \frac{\Delta p}{E_t} \left( 1 - \frac{E_t}{E_d} \right) + b \frac{\Delta p}{E_t}, \quad (8)$$

式中,  $\frac{E_t}{E_d}$  代表杨氏模量的软化, 用杨氏模量软化系数  $R_m$  表示。则闭合型裂隙的应变:

$$\Delta \varepsilon_d = \frac{\Delta b_d}{b} = a \left( \frac{1 - R_m}{b} + 1 \right) \frac{\Delta p}{E_t}, \quad (9)$$

由式 (6), (9) 得裂隙与基质的有效应变:

$$\Delta \varepsilon_{fc} = \left( 1 - \frac{\Delta\sigma_e}{E_t} \right) + \frac{a(1 - R_m)}{b} \frac{p_f - p_m}{E_t}, \quad (10a)$$

$$\Delta \varepsilon_{mc} = \left( 1 - \frac{\Delta\sigma_e}{E_t} \right) - \frac{a(1 - R_m)}{b} \frac{p_f - p_m}{E_t} + \frac{p_m}{E_s}, \quad (10b)$$

式中,  $p_f$ ,  $p_m$  分别为裂隙和基质内的气体压力,  $E_s$  为煤颗粒杨氏模量。方程右边第一项为张开型裂隙的有

效应变, 第二项为闭合型裂隙的有效应变。煤孔隙度是有效应变的函数<sup>[28]</sup>。

$$\phi_f = \phi_{f0} + \alpha_f \Delta \varepsilon_{fe} \quad (11a)$$

$$\phi_m = \phi_{m0} + \alpha_m \Delta \varepsilon_{me} \quad (11b)$$

式中,  $\alpha_f$ ,  $\alpha_m$  分别为裂隙与基质的有效应力系数,  $\phi_{f0}$ ,  $\phi_{m0}$  为裂隙与基质的初始孔隙度。孔隙度与渗透率之间满足立方定律:

$$\frac{k_f}{k_{f0}} = \left( \frac{\phi_f}{\phi_{f0}} \right)^3 \quad (12a)$$

$$\frac{k_m}{k_{m0}} = \left( \frac{\phi_m}{\phi_{m0}} \right)^3 \quad (12b)$$

将式 (10), (11) 分别代入式 (12) 得到

$$\frac{k_f}{k_{f0}} = \left\{ 1 + \frac{\alpha_f}{\phi_{f0}} \left[ \left( 1 - \frac{\Delta \sigma_e}{E_t} \right) + \frac{a(1-R_m)}{b} \frac{p_f - p_m}{E_t} \right] \right\}^3 \quad (13a)$$

$$\frac{k_m}{k_{m0}} = \left\{ 1 + \frac{\alpha_m}{\phi_{m0}} \left[ \left( 1 - \frac{\Delta \sigma_e}{E_t} \right) + \frac{a(1-R_m)}{b} \frac{p_f - p_m}{E_t} + \frac{p_m}{E_s} \right] \right\}^3 \quad (13b)$$

### 2.2 固体变形方程

在外部应力作用下, 煤样发生变形。煤样的几何方程:

$$\varepsilon_{ij} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (14)$$

式中,  $\varepsilon_{ij}$  为应变张量,  $u_{i,j}$  为位移张量。煤样的平衡方程可表示为

$$\sigma_{ij,i} + f_i = 0 \quad (15)$$

式中,  $\sigma_{ij,i}$  为应力张量的分量,  $f_i$  为体力的分量。考虑裂隙和基质压差的本构方程为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \sigma_{ij} - \left( \frac{1}{6G} - \frac{1}{9K} \right) \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{\alpha}{3K} p_m \delta_{ij} - \frac{1}{3K} \Delta p \delta_{ij} = 0 \quad (16)$$

式中,  $G$  为剪切模量,  $G = E_t / 2(1 + \nu)$ ;  $K$  为体积模量,  $K = E_t / 3(1 - 2\nu)$ ;  $\delta_{ij}$  为克罗内克系数;  $\sigma_{kk}$  为外部应力张量。由式 (14) ~ (16) 得到 Navier 形式的平衡方程为<sup>[28]</sup>

$$G u_{i,kk} + \frac{G}{1-2\nu} u_{k,ki} - \alpha p_{,i} + \Delta p + f_i = 0 \quad (17)$$

### 2.3 气体流动方程

基质与裂隙内的气体质量方程为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho v) - q = 0 \quad (18)$$

式中,  $q$  为基质系统和裂隙系统之间的交换流量。

$$q = f \frac{\rho k}{\mu} (p_m - p_f) \quad (19)$$

式中,  $f$  为形状因子, 取值为 1。煤样中气体流动满足达西定律, 其流速与压力梯度成正比。

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (20)$$

式中,  $\mu$  为气体的动态黏度。

将式 (19), (20) 代入式 (18) 得到流动方程:

$$p \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -\frac{k}{\mu} \nabla p \right) - f \frac{\rho k}{\mu} (p_m - p_f) = 0 \quad (21)$$

## 3 模型验证与渗透率演化机理分析

采用脉冲衰减法进行的渗透率测试试验只能监测到裂隙与基质内孔隙压力平衡后的渗透率。因此, 为探究软化系数对渗透率演化全过程的影响, 采用数值模拟方法计算完整的渗透率动态演化数值解。并且, 通过分析基质与裂隙之间压力动态变化的数值解可进一步揭示渗透率演化的机理。

### 3.1 模型建立

图 7 (a) 所示为长 5 cm, 直径 2.5 cm 的圆柱煤样几何模型。为了简化计算, 建立了图 7 (b) 所示的二维轴对称几何模型。模型下边界为轴对称边界, 在左边界 (边界 1) 施加注气压力, 在上边界 (边界 2) 施加围压, 右边界 (边界 3) 的压力定为大气压力。数值计算所需参数大多取自试验测定, 列于表 2<sup>[30]</sup>。

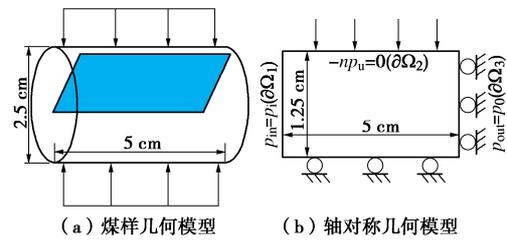


图 7 数值计算几何模型

Fig. 7 Geometric model for numerical calculation

所建模型遵循以下假设: ①气体在煤样中的流动为单相流, 适用达西定律; ②模型求解过程中无相变; ③模型对应的储层是恒温的; ④在恒温条件下气体黏性系数保持不变。

表 2 模拟采用的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters in simulations	
参数	取值
煤杨氏模量 $E_t$ / GPa	3.766
裂隙杨氏模量 $E_f$ / GPa	1.461
基质杨氏模量 $E_m$ / GPa	6.366
泊松比 $\nu$	0.339
气体黏度 $\mu$ / (pa · s)	$1.84 \times 10^{-5}$
形状因子 $f$ / m <sup>2</sup>	1
初始渗透率 $k_0$ / m <sup>2</sup>	$1.80 \times 10^{-18}$
煤的密度 $\rho_c$ / (kg · m <sup>-3</sup> )	1250
初始孔隙压力 $p_0$ / MPa	0.1
裂隙的初始孔隙率 $\phi_{f0}$ / %	2
基质的初始孔隙率 $\phi_{m0}$ / %	2.6

### 3.2 模型验证

图8所示为两种条件下模拟渗透率演化曲线与试验结果对比图。模拟结果显示了完整的渗透率动态演化规律,即随着注气时间增加,煤渗透率先上升,然后平衡一段时间后下降,最后趋于稳定。在恒围压与恒压差条件下的模拟结果与试验结果都较为一致,但两种条件下软化系数的变化不同。如在恒围压7 MPa,注气压力分别为1, 3, 5 MPa时,对应的软化系数分别为0.1, 0.5, 0.7。而恒压差下软化系数保持不变。这是因为围压恒定时,注气压力越小,基质与裂隙之间压力梯度越小,较小的裂隙应变对应较小的模量软化系数。

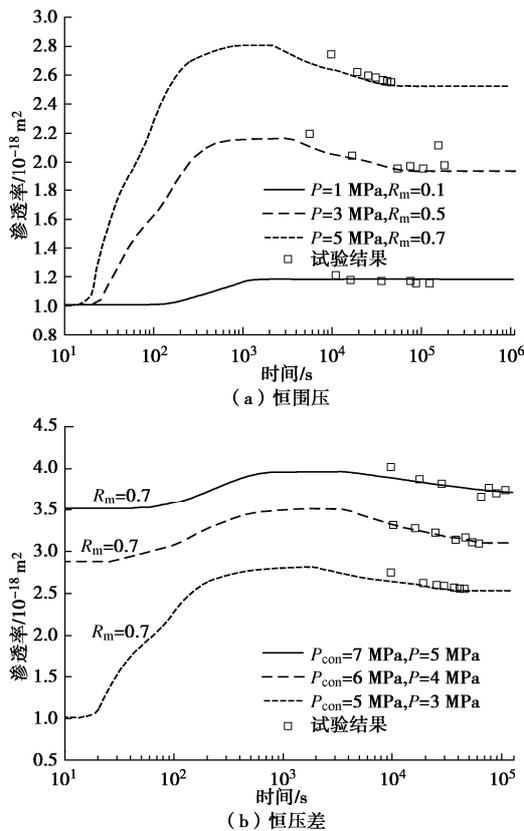


图8 改进渗透率模型验证

Fig. 8 Comparison of numerical results with experimental data

### 3.3 渗透率演化机理分析

数值模拟方案在试验方案的基础上增加了两组方案:①恒围压7 MPa时注气压力为7 MPa;②恒压差注气压力为2 MPa、围压为4 MPa。

通过数值模拟方法可以计算基质和裂隙的压力,由此得到基质与裂隙之间压差的动态变化规律。图9所示为不同条件下裂隙与基质的压差图。可以看出,随着时间增大,压差先增大后减小。注气压力越大,压差的变化敏感性越强。如图9(a)中注气压力为1, 3, 5, 7 MPa时,基质与裂隙的压差最大值分别为0.84, 2.85, 4.88, 6.89 MPa。图9(a), (b)最大的区别是压差起增点是否相同。恒围压时,起增点相同是指压

差在同一时间开始增大;而恒压差条件下,起增点不同是因为不同压差产生相同的裂隙应变所需的时间不同。如图9(b)中随着注气压力由2 MPa增大到5 MPa,压差起增点对应的的时间分别为16, 102, 138, 294 s。

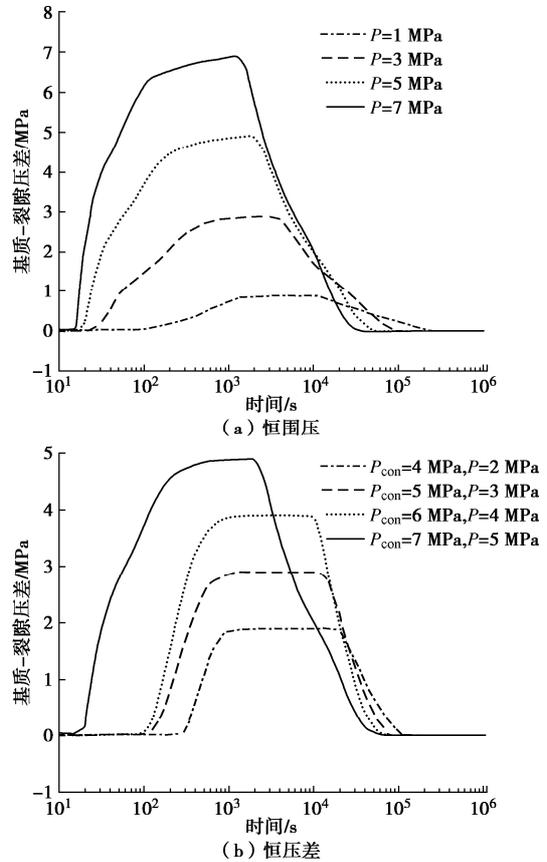


图9 基质-裂隙压差演化图

Fig. 9 Evolution of pressure difference of matrix-fracture

根据基质-裂隙之间压力的动态变化规律能够揭示煤渗透率的演化机理:气体注入煤样后,裂隙压力先升高,导致裂隙渗透率迅速上升;之后裂隙-基质压差逐渐增大,裂隙中的气体往基质内运移,基质压力开始升高,此时渗透率保持稳定;随着基质压力的进一步升高,裂隙基质间的压差开始减少,裂隙孔径被基质压缩,导致渗透率下降;当基质与裂隙内气体压力平衡时,渗透率趋于稳定。

## 4 结 论

通过提出张开型和闭合型裂隙的几何概念模型,建立了含模量软化系数的双孔渗透率模型。在模型中,考虑了渗透率的非平衡过程。通过计算得到以下主要结论:

- (1) 恒围压条件下,随着注气压力从1 MPa增大到5 MPa,应变曲线的斜率变化较大(分别为83.77, 270.54, 440.92 m/s)。

(2) 模量软化系数是有效应变的函数。其通过改变煤体内气体流量影响渗透率的演化。模量软化系数  $R_m = 1$  表示无煤软化的影响,  $R_m = 0$  代表煤软化影响最大。随着  $R_m$  从 0 增大到 1, 最大渗透率降低。

(3) 基质和裂隙压力对渗透率演化的影响: 裂隙压力先升高, 裂隙孔径增大引起渗透率增大; 随着裂隙中的气体向基质内运移, 基质压力升高引起基质膨胀压缩裂隙, 致使渗透率降低。

#### 参考文献:

- [1] WANG C G, ZHANG J D, CHEN J G, et al. Understanding competing effect between sorption swelling and mechanical compression on coal matrix deformation and its permeability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, **138**(6): 104639 - 104651.
- [2] 陈月霞, 许江, 褚廷湘, 等. 相似煤储层瓦斯压力计算模型及其空间分布特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, **50**(3): 606 - 612. (CHEN Yue-xia, XU Jiang, CHU Ting-xiang, et al. Calculation model of gas pressure in similar coal reservoir and its spatial distribution characteristics[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, **50**(3): 606 - 612. (in Chinese))
- [3] 秘昭旭, 王福刚, 石娜, 等. 多期次应力变化对砂岩渗透率和孔隙结构影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(5): 864-871. (MI Zhao-xu, WANG Fu-gang, SHI Na, et al. Experimental study on effect of multi-stage stress variations on permeability and pore structure of sandstone[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(5): 864 - 871. (in Chinese))
- [4] LIU J S, CHEN Z W, ELSWORTH D, et al. Linking gas-sorption induced changes in coal permeability to directional strains through a modulus reduction ratio[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, **83**(1): 21 - 30.
- [5] 肖智勇, 王长盛, 王刚, 等. 基质-裂隙相互作用对渗透率演化的影响: 考虑基质变形和应力修正[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(12): 2209 - 2219. (XIAO Zhi-yong, WANG Chang-sheng, WANG Gang, et al. Influences of matrix-fracture interaction on permeability evolution: considering matrix deformation and stress correction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(12): 2209 - 2219. (in Chinese))
- [6] ANGGARA F, SASAKI K, SUGAI Y. The correlation between coal swelling and permeability during CO<sub>2</sub> sequestration: a case study using Kushi low rank coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, **166**(9): 62 - 70.
- [7] BOTTOMLEY W, FURNISS J P, RAZA S S, et al. Characterising the dependence of coal permeability to methane adsorption, pore pressure and stress: laboratory testing of Walloon coals from the surat basin[C]// SPE/IATMA Asia Pacific Oil and Gas Conference. Jakarta, 2017: 18675 - 18687.
- [8] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1968, **73**(6): 2225 - 2236.
- [9] KUMAR H, ELSWORTH D, LIU J S, et al. Optimizing enhanced coalbed methane recovery for unhindered production and CO<sub>2</sub> injectivity[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, **11**(11): 86 - 97.
- [10] KUMAR H, ELSWORTH D, LIU J S, et al. Permeability evolution of propped artificial fractures in coal on injection of CO<sub>2</sub>[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, **133**(9): 695 - 704.
- [11] FENG R M, HARPALANI S, PANDEY R. Evaluation of various pulse-decay laboratory permeability measurement techniques for highly stressed coals[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, **50**(2): 297 - 308.
- [12] VIETE D R, RANJITH P G. The effect of CO<sub>2</sub> on the geomechanical and permeability behaviour of brown coal: implications for coal seam CO<sub>2</sub> sequestration[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, **66**(3): 204 - 216.
- [13] LARSEN J W. The effects of dissolved CO<sub>2</sub> on coal structure and properties[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, **57**(1): 63 - 70.
- [14] SALARI M R, SAEB S, WILLAM K J, et al. A coupled elastoplastic damage model for geomaterials[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, **193**(27/28/29): 2625 - 2643.
- [15] HU S B, WANG E Y, KONG X G. Damage and deformation control equation for gas-bearing coal and its numerical calculation method[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, **25**(7): 166 - 179.
- [16] WANG E Y, KONG X G, HU S B, et al. Multi-scale fractured coal gas-solid coupling model and its applications in engineering projects[J]. *Transport in Porous Media*, 2018, **121**(3): 703 - 724.
- [17] CHEN D, PAN Z J, SHI J Q, et al. A novel approach for modelling coal permeability during transition from elastic to post-failure state using a modified logistic growth function[J].

- International Journal of Coal Geology, 2016, **163**(6): 132 - 139.
- [18] CUI X J, BUSTIN R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams[J]. AAPG Bulletin, 2005, **89**(9): 1181 - 1202.
- [19] ZHANG X M, ZHANG D M, LEO C J, et al. Damage evolution and post-peak gas permeability of raw coal under loading and unloading conditions[J]. Transport in Porous Media, 2017, **117**(3): 465 - 480.
- [20] ZHU W C, WEI C H, LI S, et al. Numerical modeling on destress blasting in coal seam for enhancing gas drainage[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **59**(4): 179 - 190.
- [21] ZHENG C S, KIZIL M, CHEN Z W, et al. Effects of coal damage on permeability and gas drainage performance[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, **27**(5): 783 - 786.
- [22] WANG L S, CHEN Z W, WANG C G, et al. Reassessment of coal permeability evolution using steady-state flow methods: the role of flow regime transition[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, **211**(7): 103210 - 103223.
- [23] WANG C G, ZANG Y X, WANG L S, et al. Interaction of cleat-matrix on coal permeability from experimental observations and numerical analysis[J]. Geofluids, 2019, **19**(11): 1 - 15.
- [24] 刘江峰, 倪宏阳, 浦海, 等. 多孔介质气体渗透率测试理论、方法、装置及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(1): 137 - 146. (LIU Jiang-feng, NI Hong-yang, PU Hai, et al. Test theory, method and device of gas permeability of porous media and the application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(1): 137 - 146. (in Chinese))
- [25] CHEN Z W, PAN Z J, LIU J S, et al. Effect of the effective stress coefficient and sorption-induced strain on the evolution of coal permeability: experimental observations[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, **5**(5): 1284 - 1293.
- [26] XIE H C, NI G H, LI S, et al. The influence of surfactant on pore fractal characteristics of composite acidized coal[J]. Fuel, 2019, **253**(10): 741 - 753.
- [27] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of Rock Mechanics[M]. Oxford: Wiley-Blackwell Publishing, 2007: 312 - 465.
- [28] LIU J S, WANG J G, CHEN Z W, et al. Impact of transition from local swelling to macro swelling on the evolution of coal permeability[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, **88**(1): 31 - 40.
- [29] ZHANG H B, LIU J S, ELSWORTH D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: a new FE model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, **45**(8): 1226 - 1236.
- [30] RANJBAR E, HASSANZADEH H. Matrix-fracture transfer shape factor for modeling flow of a compressible fluid in dual-porosity media[J]. Advances in Water Resources, 2011, **34**(5): 627 - 639.

### 彩色插图索引

DOI: 10.11779/CJGE202210001 一文彩色插图 .....	(后插 1)
DOI: 10.11779/CJGE202210008 一文彩色插图 .....	(后插 1)
DOI: 10.11779/CJGE202210009 一文彩色插图 .....	(后插 2)
DOI: 10.11779/CJGE202210010 一文彩色插图 .....	(封 3)
DOI: 10.11779/CJGE202210011 一文彩色插图 .....	(封 3)
DOI: 10.11779/CJGE202210015 一文彩色插图 .....	(封 3)
DOI: 10.11779/CJGE202210016 一文彩色插图 .....	(封 2)
DOI: 10.11779/CJGE202210021 一文彩色插图 .....	(封 2)
DOI: 10.11779/CJGE202210022 一文彩色插图 .....	(封 2)