

张雨田, 张佳欣, 李波等. 2024. 矿物溶解作用下颗粒粗糙度对多孔岩石渗透率和电导率的影响. 地球物理学报, 67(8): 3229-3240, doi:10. 6038/cjg2024R0722.

Zhang Y T, Zhang J X, Li B, et al. 2024. Effect of grain roughness on permeability and electrical conductivity of porous rock under mineral dissolution. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 67(8): 3229-3240, doi:10. 6038/cjg2024R0722.

# 矿物溶解作用下颗粒粗糙度对多孔岩石渗透率和电导率的影响

张雨田<sup>1,2</sup>, 张佳欣<sup>1</sup>, 李波<sup>3</sup>, 罗瑀峰<sup>4</sup>, 凌博闻<sup>5,6</sup>, 王晓光<sup>1,2\*</sup>

1 成都理工大学, 成都 610059

2 天府永兴实验室, 成都 610312

3 中国石油集团测井有限公司西南分公司, 重庆 400021

4 中国石油浙江油田公司, 杭州 310012

5 中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190

6 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049

**摘要** 矿物溶解过程广泛地存在于地下储层中. 溶解作用的发生会在岩石内部产生新的流动通道, 使地下储层的孔隙度发生变化, 从而影响多孔岩石的物性参数, 例如渗透率和电导率. 为了定量研究多孔介质的颗粒粗糙度、渗透率和电导率在溶解作用下的关系, 本研究采用线性布尔模型和四参数随机生成法 (QSGS) 对不同颗粒粗糙度的多孔介质进行建模. 之后, 采用双分布格子 Boltzmann 方法模拟岩石孔隙的溶解和渗透率演化过程. 常见的溶解模式有均匀溶解、面溶解和虫洞溶解, 主要受 Péclet 数 ( $Pe$ ) 和 Damköhler 数 ( $Da$ ) 这两个无量纲数控制. 通过改变  $Pe$  数和  $Da$  数, 我们相应地重现了不同的溶解模式. 为了对岩石电导率进行数值计算, 我们采用基于最小自由能的有限元法获得多孔介质的电场, 然后根据欧姆定律计算岩石的有效电导率. 研究表明, 对于具有相同晶粒粗糙度的多孔介质, 在不同溶解模式下, 渗透率和电导率产生不同的变化规律. 虫洞溶解模式下, 渗透率和电导率变化最大; 而面溶解模式下, 变化最小. 在相同的  $Pe$  和  $Da$  下, 粗糙颗粒模型的渗透率和电导率变化显著高于光滑颗粒模型.

**关键词** 矿物溶解; 颗粒粗糙度; 渗透率; 电导率

doi:10. 6038/cjg2024R0722

中图分类号 P631

收稿日期 2023-10-30, 2024-03-08 收修定稿

## Effect of grain roughness on permeability and electrical conductivity of porous rock under mineral dissolution

ZHANG YuTian<sup>1,2</sup>, ZHANG JiaXin<sup>1</sup>, LI Bo<sup>3</sup>, LUO YuFeng<sup>4</sup>, LING BoWen<sup>5,6</sup>, WANG XiaoGuang<sup>1,2\*</sup>

1 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu 610312, China

3 China National Logging Corporation Southwest Branch, Chongqing 400021, China

4 PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou 310012, China

5 Key Laboratory For Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China

6 School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

**Abstract** Mineral dissolution widely exists in subsurface reservoirs. Dissolution process can

**基金项目** 四川省留学回国人员科技活动择优资助项目 (10900-23BZ28-02), 国家自然科学基金委项目 (42272158, 42372300, 42102300), 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院 (2022-KFKT-24) 和四川省科技厅重点研发计划重大项目 (2022YFSY0008) 联合资助.

**第一作者简介** 张雨田, 男, 1991 年生, 2022 年毕业于日本九州大学, 现任成都理工大学讲师, 主要从事多孔介质传热传质的数值模拟和岩石物理科学研究工作. E-mail: zhangyutian@cdut.edu.cn

**\* 通讯作者** 王晓光, 男, 1988 年生, 2016 年博士毕业与英国帝国理工学院, 现任成都理工大学教授、天府永兴实验室研究员, 主要从事多物理场耦合机理与数值模拟研究. E-mail: wangxiaoguang@cdut.edu.cn

make new flow channels, which leads to the porosity of the underground reservoir alteration, thereby affecting the physical parameters of porous rock such as permeability and electrical conductivity. We apply a linear Boolean model and a four-parameter stochastic generation model to quantitatively investigate the relationship between grain roughness, permeability, and electrical conductivity of porous rocks under dissolution conditions. The dual-distribution function lattice Boltzmann model was used to mimic the dissolution process and permeability evolution in porous rocks. Common dissolution patterns including uniform, surface, and wormhole dissolution, are controlled by two dimensionless numbers, the Péclet number ( $Pe$ ) and the Damköhler number ( $Da$ ). By varying  $Pe$  and  $Da$ , different dissolution regimes were reproduced. We obtain the electric field in porous media using a finite element method based on minimum free energy and then calculated the bulk electrical conductivity based on Ohm's law. Our results indicate that for porous media with the same grain roughness, different dissolution regimes lead to different effects on permeability and electrical conductivity due to changes in pore geometric structure. The wormhole dissolution regime shows the largest variations in permeability and electrical conductivity, while the face dissolution regime exhibits the smallest variations. Under the same  $Pe$  and  $Da$  conditions, models with higher grain roughness show significantly larger variations in permeability and electrical conductivity.

**Keywords** Mineral dissolution; Grain roughness; Permeability; Electrical conductivity

## 0 引言

渗透率和电导率是重要的地球物理参数,可以反映岩石的传输特性,对储层评价具有重要意义 (Iturrarán-Viveros and Parra, 2014; 路萍等, 2022; 陈进宇和杨晓松, 2017). 大量研究表明这两个物性参数与孔隙空间大小和结构有关 (王小敏和樊太亮, 2013; 唐晓敏等, 2023; Nelson, 1994; Chagneau et al., 2015). Verwer 等 (2011)、田军等 (2021)、宋延杰等 (2016) 研究发现, 由于孔隙结构的影响, 即使孔隙度相近, 碳酸盐岩储层的渗透率也可能有很大差异. 对低渗储层而言, 其内部发育越多次生孔隙和裂隙, 可以为流体流动提供更多通道, 从而提高渗透率. 田瀚等 (2020) 和姜均伟等 (2015) 研究表明, 孔隙结构是影响电导率的重要因素. 简单分散的大孔隙岩石, 孔隙网络简单, 电荷的输运通道较少, 因此电阻率较高; 而孔隙网络复杂、细小孔隙或裂隙发育的大孔隙岩石, 连通的孔隙较多, 有利于电荷输运, 因此电阻率较低.

地下储层中的流体与岩石之间的水岩相互作用会导致孔隙几何结构变化, 进而可能改变岩石物理性质, 如孔隙形态、大小、连通性、孔喉半径、孔道迂曲度等微观孔隙几何结构的变化会改变岩石的渗透率和电导率等参数 (Wang T et al., 2022; Chen

et al., 2014; Gu et al., 2015; Prikryl et al., 2017; Golfier et al., 2022). 矿物溶解有多种模式, 包括虫洞模式、面溶解模式、均匀溶解模式 (Liu et al., 2017; Zhang et al., 2022). 这些溶解模式主要受两个无量纲数控制, 即 Péclet 数 ( $Pe$ ) 和 Damköhler 数 ( $Da$ ) (Kang et al., 2002, 2003, 2006; Wang Z et al., 2022). Shovkun 和 Espinoza (2019) 研究表明, 矿物溶解会影响裂缝扩展模式. 孔隙几何结构的变化也会导致岩石电阻率和渗透率等物理性质发生改变. Upadhyay 等 (2015) 研究了初始孔径对矿物溶解导致的聚合流动效应的影响机制. Kang 等 (2014) 应用格子玻尔兹曼法研究了两种多孔介质在孔隙尺度上溶解引起的渗透率和孔隙度的变化. 结果表明, 渗透率和孔隙度的关系不仅取决于不同溶解模式 (由  $Pe$  和  $Da$  控制), 还取决于多孔介质的微观结构. 近年研究表明, 岩石孔隙的几何非均质性也在矿物溶解过程中起着重要的作用 (You and Lee, 2021; Zhou et al., 2022, 2023). Wang Z 等 (2022) 采用格子 Boltzmann 方法模拟了非均质多孔结构中的反应传输过程, 发现非均质性的增强会加剧虫洞模式的溶解现象, 导致渗透率升高. Guo 等 (2023) 则提出了一种适用于各向异性裂隙介质的电弹性联合反演方法, 并进行了验证和比较, 这种方法可以捕捉地层岩石的各向异性, 并且能精细描述裂缝物理特征.

目前, 大量研究主要集中在储层孔隙结构特

征、非均质性与渗透率之间的关系(司马立强等, 2015;梅青燕等, 2020;潘结南等, 2019;王子萌等, 2022;谷宇峰等, 2022),以及储层非均质性对电阻率和常规测井储层评价的影响(王飞腾等, 2022;姜均伟等, 2015;毛志强和高楚桥, 2000;王敏等, 2021). Liu 和 Jeng(2019)利用三维格子 Boltzmann 方法模拟孔隙尺度下,不同孔隙度、形状、表面特征和粒度分布的多孔介质中的渗流. 数值结果表明,颗粒形状和表面特征对渗透率演化的影响不容忽视. 然而,在溶解作用下,颗粒的粗糙程度对多孔介质物理性质的影响机制还不清楚,颗粒粗糙度与电阻率、渗透率的动态演化关系的研究还不充分,而电阻率、渗透率等重要的物性参数对油气藏储量估计、储层评价以及地质监测等起着不可忽视的作用. 因此,研究溶解作用下,多孔介质的颗粒粗糙度对渗透率和电导率变化规律的影响具有重要意义.

为建立不同颗粒粗糙度的多孔介质模型,本研究采用四参数随机生成法(QSGS, i. e., Quartet Structure Generation Set)(Wang and Li, 2007;刘丹等, 2021)生成粗糙颗粒多孔介质模型,并使用线性布尔(Boolean)模型(Handley, 1999)生成颗粒相对光滑的多孔介质模型. 之后,采用二维双分布多重弛豫时间的格子 Boltzmann 方法来模拟流动、溶质扩散和反应耦合的溶解过程(Zhang et al., 2022). 通过调节 Pelet 数( $Pe$ )和 Damkoler 数( $Da$ ),表征两种颗粒粗糙度多孔介质模型在不同溶解模式下渗透率和电导率的演化规律. 模拟结果表明,对同一颗粒粗糙度的多孔介质,不同溶解模式对渗透率和电导率有不同影响. 其中,虫洞溶解模式下渗透率和电导率变化最大,而面溶解模式的变化最小. 在相同的  $Pe$  和  $Da$  条件下,相对光滑模型,不同颗粒粗糙度的多孔介质中,高粗糙度模型的渗透率和电导率变化更大. 因此,在对油气和地热能开发、二氧化碳封存等地质工程应用中,需要考虑不同颗粒粗糙度的多孔介质中矿物溶解导致的渗透率和电导率的动态改变,有助于制定合理的开发方案和决策.

## 1 人工多孔介质模型的生成

### 1.1 线性布尔模型

本研究采用线性布尔随机模型来生成相对光滑的多孔介质几何模型(Handley, 1999). 使用布尔模型生成多孔介质随机几何模型需要两个步骤:首先,确定布尔模型生长过程中泊松点过程强度( $\rho_B$ )

(说明:在生成布尔模型时复制生长点位置,作为 QSGS 模型初始核心位置,即布尔模型生长点数量与 QSGS 模型核心数量相同);然后,确定半径分布,颗粒半径分布可以通过对数正态分布确定:

$$\phi(r) = \frac{1}{r\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln\left(\frac{r}{R_0}\right)}{\beta}\right]^2\right\}, \quad (1)$$

式中  $r$  为颗粒的半径,  $\beta$  和  $R_0$  分别为标准差和均值,它们的值可以被任意指定.

线性布尔模型的空缺度(即孔隙度)可以用式(2)来估计:

$$v = \exp\{-\eta\}, \quad (2)$$

其中  $\eta = \alpha\lambda$  为模型的简化密度,  $\alpha$  表示为

$$\alpha = \frac{\pi M_2}{2M_1}, \quad (3)$$

$$M_i = \int_0^\infty r^i \phi(r) dr (i = 1, 2), \quad (4)$$

$$\lambda = 2\rho_B M_1, \quad (5)$$

$M_i$  是半径  $i$ -th 分布的非中心矩的共同表达式. 因为  $\phi(r)$  是对数正态分布,等式(4)可以用式(6)表达:

$$M_i = R_0^i \exp\{i^2 \beta^2 / 2\}. \quad (6)$$

因此,如果  $v$  被指定了,则  $\eta$  可以使用等式(2)来计算;如果指定了  $\beta$  和  $R_0$ ,  $\alpha$  可以通过等式(3)和等式(6)来计算,然后利用方程  $\lambda = \alpha/\eta$  能够得到  $\lambda$ . 最后,可以用等式(5)决定  $\rho_B$ .

### 1.2 QSGS 模型

本研究采用 QSGS 模型人工生成粗糙多孔岩石模型(Wang and Li, 2007). 该模型包括液-固两相,固相视为生长相. 在模型构建过程中,三个参数决定多孔介质结构的形状,分别是分布概率( $C_d$ )、八个方向的生长概率( $P_i$ )和生长阶段的体积分数( $\varphi$ ). 其中,生长阶段体积分数等于  $(1 - \epsilon)$ ,  $\epsilon$  为孔隙度.

QSGS 模型构建三维多孔介质大致分为三步:

(1)设置固相体积分数,将生成布尔模型时的生长点位置设为初始核心位置;

(2)按照一定生长概率分配不同方向不同生长速度,生成多孔介质模型,使孔隙单元向 8 个方向的相邻点生长(图 1);

(3)重复步骤(2),当生长相达到设定固相体积分数时停止生长,完成 QSGS 多孔介质模型构建.

两种多孔介质模型具有相同的孔隙度,半径尺寸和胚芽位置(图 2),主要区别是晶粒粗糙程度不同,布尔模型(图 2a)的晶粒形状光滑圆形,而 QSGS 模型(图 2b)的晶粒形状更加粗糙,这是由粗糙晶粒

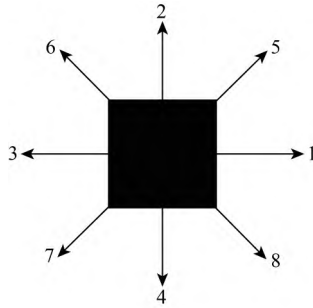


图1 格子单元生长方向

Fig. 1 Growth direction of a lattice cell

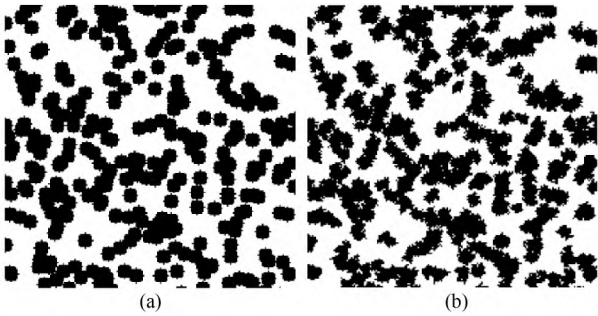


图2 布尔模型(a)和 QSGS 模型(b)分别构建出两种不同颗粒粗糙度的多孔介质模型

Fig. 2 The Boolean model (a) and the QSGS model (b) respectively construct two porous medium models with different particle roughness

形状非均质性造成的。

## 2 流体流动及反应传质数学模型

### 2.1 流体流动和传质的控制方程

对于自然中的等温不可压缩流动,连续性方程和 Navier-Stokes 方程的表达式为 (Krüger et al., 2017):

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (7)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{u} + \mathbf{F}, \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{F}$  为外力 ( $N$ ),  $\mathbf{u}$  为宏观流体速度 ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $\eta$  为流体的动态剪切黏度 ( $Pa \cdot s$ ),  $\frac{D}{Dt}$  为物质导数, 定义为

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla. \quad (9)$$

标量场浓度  $C$  的移流扩散方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C\mathbf{u}) = \mathbf{V} \cdot (D\nabla C), \quad (10)$$

其中  $D$  为分子扩散系数 (Dawson et al., 1993; Krüger et al., 2017)。

### 2.2 孔隙-矿物界面的动力学反应

对于动力学反应,假设非均相反应只发生在流-固界面(即化学反应发生相变),这取决于局部溶质浓度 (Liu and Mostaghimi, 2017)。这里,通过考虑线性动力学反应计算液-固体界面的溶解 (Kang et al., 2014; Liu and Mostaghimi, 2017) 如下:

$$D \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} = \hat{I} = k_r (C - C_{eq}), \quad (11)$$

其中,  $C_{eq}$  为平衡溶质浓度,  $\hat{I}$  为表面动力学反应的通量,  $k_r$  为反应速率常数,  $\mathbf{n}$  表示垂直于界面的方向且指向孔隙空间的单位法向量。在本研究中,没有考虑固体矿物颗粒随流体流动的运动。因此,固定矿物相的体积分数 ( $V_m$ ) 的变化表示为

$$\frac{\partial V_m}{\partial t} = \bar{V} a \hat{I}, \quad (12)$$

其中,  $\bar{V}$  和  $a$  分别为摩尔体积和比面积。

本论文对于多孔介质中的矿物溶解过程采用的是双分布分布函数的格子 Boltzmann 方法,相应的模型和程序验证可以参考我们之前的工作 (Zhang et al., 2022)。

### 2.3 控制化学反应传质的无量纲数

一般地, Péclet 数 ( $Pe$ ) 和 Damköhler 数 ( $Da$ ) 用于表征多孔介质中反应传输过程,这两个无量纲数的相关式分别表示为 (Kang et al., 2014; Soullaine et al., 2017):

$$Pe = \frac{u_c \times l_c}{D}, \quad (13)$$

$$Da = \frac{k_r \times l_c}{D}, \quad (14)$$

其中  $u_c$  为特征速度,这里取达西速度,即对整个计算域(包含固相和流体相)中沿主流方向的速度进行平均,  $l_c$  为特征长度,这里取几何模型的厚度。

本文对于每个多孔介质模型开展三种典型的溶解模式(即均匀溶解、面溶解和虫洞溶解)的模拟,通过调控  $Pe$  数和  $Da$  数,改变反应和渗流速率的比值,比较分析布尔模型和 QSGS 模型在不同  $Pe$  和  $Da$  条件下生成的光滑及粗糙颗粒多孔几何结构的渗透率和电导率变化。

### 2.4 多孔介质中的达西定律和欧姆定律

在低雷诺数 ( $\ll 1$ ) 下,流体在多孔介质中的传输符合达西定律 (Walsh and Brace, 1984):

$$Q = -\frac{KA}{\mu} \nabla p, \quad (15)$$

式中,  $Q$  为体积流量 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ),  $K$  为水力渗透率 ( $m^2$ ),  $A$  为多孔介质的横截面积 ( $m^2$ ),  $\nabla p$  为进出口之间

的压力差,其中,  $Q/A = u_c$ . 与达西定律类似,电流再多孔介质中的传输由修正的欧姆定律给出 (Walsh and Brace, 1984; Brown, 1989):

$$I = -\frac{A}{F}\sigma_f\nabla v, \quad (16)$$

其中  $I$  表示电流(A),  $F$  为地层因子(定义为孔隙流体与充满流体的多孔材料的电导率的比值),  $\sigma_f$  为流体的电阻率( $\Omega\text{m}$ ).

本文计算微观电流分布和多孔介质电导率采用的是基于最小自由能有限元方法的开源程序,详细信息见 Garboczi (1998). 这里考虑的情况是流体导电能力远远大于岩石骨架. 所以,我们设置黑色颗粒相(图 2)的电导率为  $10^{-8} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ , 白色背景相(图 2)的介质为  $1.75 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  (Sawayama et al., 2021).

### 3 结果与讨论

矿物溶解过程耦合了流体流动,溶质扩散和流固界面的非均质性化学反应. 本研究利用格子 Boltzmann 方法模拟了多孔介质中的矿物溶解过程. 对于流体流动模拟,入口端和出口端是压力边界条件,上下为无滑移边界条件;对于溶质运移模拟,入口端是固定浓度边界条件,出口端以及上下边界为零流量边界条件. 化学反应被定义为:  $A(aq) \rightleftharpoons A(s)$ , 在溶解作用开始前,孔隙中充满着溶质  $A(aq)$ , 并且与固体之间处于平衡态,其平衡态浓度为  $C_{eq}$ . 随着左侧入口段注入小于平衡浓度的狄拉克边界条件(即  $C_0 < C_{eq}$ ), 因此,溶解过程开始,孔隙度和渗透率开始增加.

本次研究采用了  $200 \times 200$  的网格,分辨率为  $2.5 \times 10^{-6} \text{ m/格子}$ . 但同时我们也对其他尺寸的网格进行了模拟. 通过对不同溶解条件下,不同尺寸的网格对光滑多孔介质模型的渗透率模拟结果的分析(图 3—图 5),可以看出低精度网格( $100 \times 100$ )下面溶解模式的渗透率演化曲线与我们选取的网格精度以及高精度的结果近似. 但是,在虫洞溶解模式和均一溶解模式下,低精度网格的渗透率演化曲线与高精度和我们选取的网格精度结果差别较大. 而  $200 \times 200$  与  $400 \times 400$  的三种溶解模式下的结果很接近,所以可以认为选取的网格精度是可以满足模拟精度要求.

我们定量分析了两种不同颗粒粗糙度模型在不同溶解模式下流体-颗粒表面接触面积与渗透率的关系(图 6). 可以发现在同一种溶解模式下,溶解

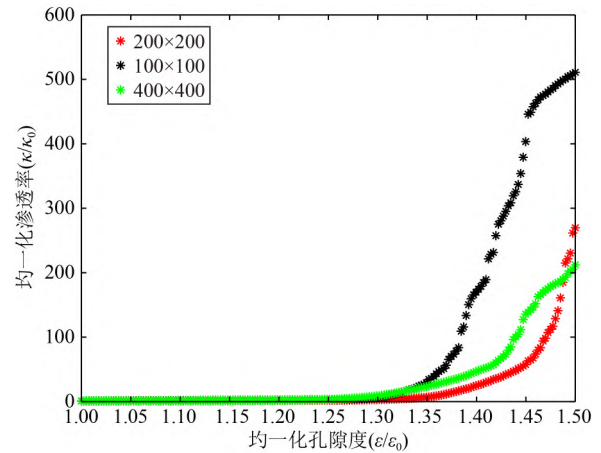


图 3 虫洞溶解模式下,不同尺寸的网格与渗透率模拟结果的关系

Fig. 3 Relationship between different grid sizes and permeability evolution results under wormhole dissolution

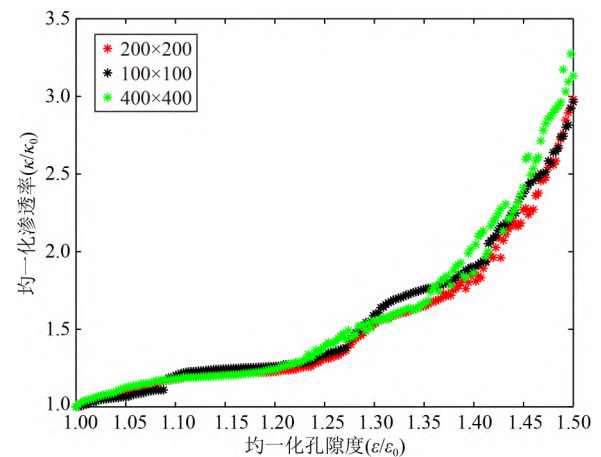


图 4 面溶解模式下,不同尺寸的网格与渗透率模拟结果的关系

Fig. 4 Relationship between different grid sizes and permeability evolution results under face dissolution

初期粗糙模型的均一化接触面积(即初始接触面积与某一时刻模型接触面积的比值)表现为大于或等于光滑模型的结果. 这是由于粗糙颗粒表面的不均质性使溶解路径更复杂. 随着溶解作用的发生,粗糙的特征减小,接触面积也发生变化. 而对于粗糙程度相同的模型,均匀溶解的接触面积最大,面溶解的接触面积最小. 因为均匀溶解的过程相对其他两种模式在多孔介质内部更均匀地发生,能够接触到更多的面积.

#### 3.1 颗粒粗糙度对渗透率演化的影响

通过改变  $Pe$  和  $Da$ , 我们讨论三种典型溶解模式的孔隙度-渗透率的演化规律. 本研究聚焦于表征渗透率的变化速率,所以选择均一化渗透率作为参

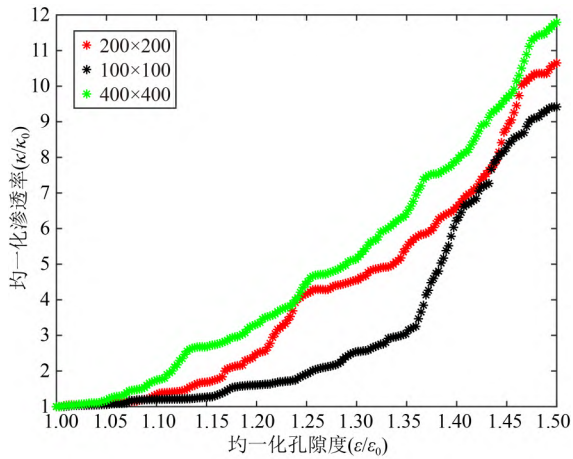


图 5 均匀溶解模式下,不同尺寸的网格与渗透率模拟结果的关系

Fig. 5 Relationship between different grid sizes and permeability evolution results under uniform dissolution

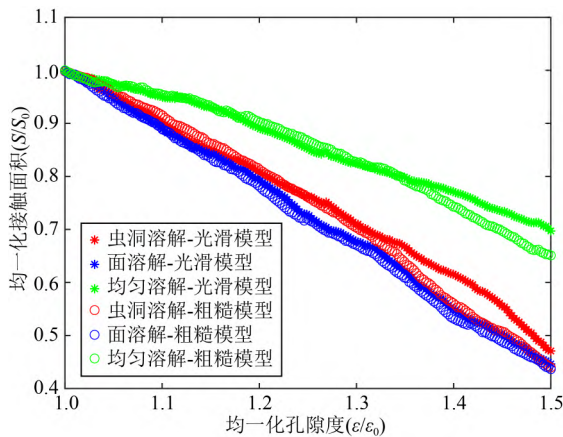


图 6 不同粗糙度模型不同溶蚀模式下的孔隙率-接触面积关系

Fig. 6 Porosity-contact area relationship in different dissolution regimes of different roughness models

考值. 当  $Pe=5.0, Da=10.0$  时, 多孔介质中发生了虫洞溶解(模式 1, 图 7). 在粗糙颗粒模型中, 在均一化孔隙度( $\epsilon/\epsilon_0$ )达到约 1.15 之前, 渗透率变化幅度较小, 之后渗透率变化速率显著增加. 相比之下, 在光滑颗粒模型中, 在  $\epsilon/\epsilon_0$  达到约 1.34 之前渗透率变化呈现平稳状态, 之后仅出现轻微增长, 但在相同的均一化孔隙度下, 其均一化渗透率的值( $\kappa/\kappa_0$ )小于粗糙颗粒模型. 这种渗透率变化的差异是由于 QSGS 模型中粗糙颗粒的非均质性, 使流体的流动路径更为复杂, 与多孔介质表面的接触面积也更大(图 6). 因此, 在粗糙模型中, 流动会加剧对优势流动通道表面的溶蚀和反应传质, 形成更多高速流动通道. 这导致两种模型的渗透率产生了显著差异.

当  $Pe=0.1, Da=10.0$  时(模式 2, 图 8), 多孔

介质中发生了面溶解, 其渗透率变化曲线呈现出阶梯式的上升趋势. 光滑模型的变化依然较粗糙模型缓慢, 但两者变化趋势基本一致, 即在  $\epsilon/\epsilon_0$  达到约 1.28 之前, 渗透率缓慢增长, 呈现平稳状态. 当  $\epsilon/\epsilon_0$  从约 1.28 上升到约 1.30 时, 渗透率出现了一个较之前更快的增长, 随后在约 1.30 处渗透率变化趋于平缓. 最后, 当  $\epsilon/\epsilon_0$  达到 1.4 时, 渗透率开始迅速增长. 这种渗透率变化的原因在于, 溶解作用主要发面生在多孔介质表面不平整的部分, 粗糙模型由于存在不规则和起伏的表面结构, 更易在表面产生不均匀的剧烈变化, 导致局部孔隙快速扩大, 形成较大的流动通道. 而光滑颗粒模型中, 凹凸不平的特征较小, 溶解作用更为均匀, 没有明显的几何变化, 所以渗透率变化相对较缓.

当  $Pe=0.1, Da=0.01$  时, 多孔介质中发生了均匀溶解(模式 3, 图 9). 渗透率变化曲线在前期基本保持不变, 光滑颗粒模型和粗糙颗粒模型的变化程度和趋势也基本一致. 但当  $\epsilon/\epsilon_0$  达到约 1.28 时, 渗透率的变化速度急剧增加. 这是因为在均匀溶解模式下, 溶解作用在多孔介质内部均匀发生, 不受孔隙表面形态影响. 然而, 粗糙颗粒模型中孔隙结构更复杂, 存在更多孔隙连接(即流动通道), 这导致孔隙中溶解反应时间更长, 引发了更显著的孔隙结构变化, 因此渗透率变化也更大.

多孔介质的渗透率-孔隙度变化图与孔隙结构中反应传质密切相关, 如图 7 中, 当出现水平线时, 意味着溶解前缘是稳定的, 或者由矿物溶解产生的新高速通道较少. 稳定的前缘表示溶质传输能力较弱, 反应速度相对较快. 因此, 溶解前缘在注入侧受到限制. 相反, 陡峭的曲线意味着出现了更多溶解的孤立颗粒, 形成更多高速流通位置和更宽的流动路径. 如图 8 和图 9 所示, 溶解前缘从一开始就不稳定, 这表明溶质传输和反应都很快.

### 3.2 颗粒粗糙度对电导率演化的影响

多孔介质中电荷传输路径与流体流动路径类似(Brown, 1989), 但两者并不完全等价. 流体流动会受到流固边界黏性阻力的影响, 而电荷流动不会受到流固无滑移边界的影响.

对于均一化的孔隙度-电导率的演化规律, 当  $Pe=5, Da=10$  时(模式 1, 图 10), 粗糙颗粒模型和光滑颗粒模型的变化趋势基本一致, 随着反应进行, 均一化孔隙度的增大, 二者的电导率均稳定增大, 且粗糙颗粒模型的电导率始终高于光滑颗粒模型. 在虫洞溶解过程中, 局部高孔隙度、高连通性的溶蚀通

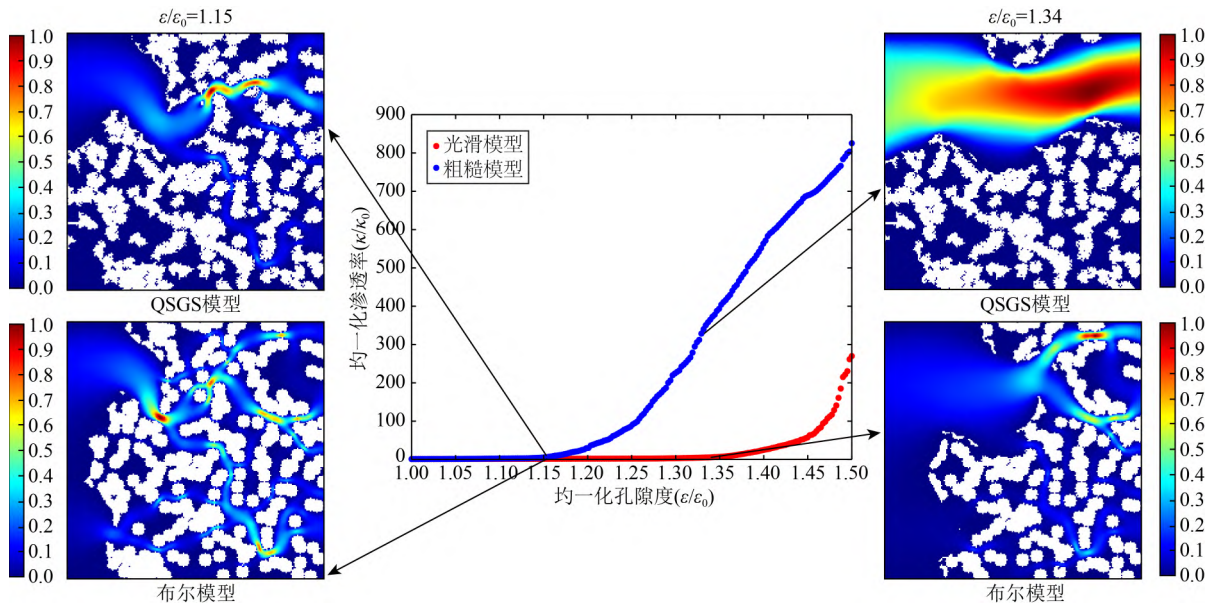


图 7 虫洞溶解发生条件下,均一化孔隙度-渗透率变化曲线

颜色由蓝到红代表流体速度低值到高值,白色区域代表固体相.

Fig. 7 The normalized porosity-permeability change curve under the wormhole dissolution condition  
Colors from black to red represent low to high values of fluid velocity and white regions represent solid phase.

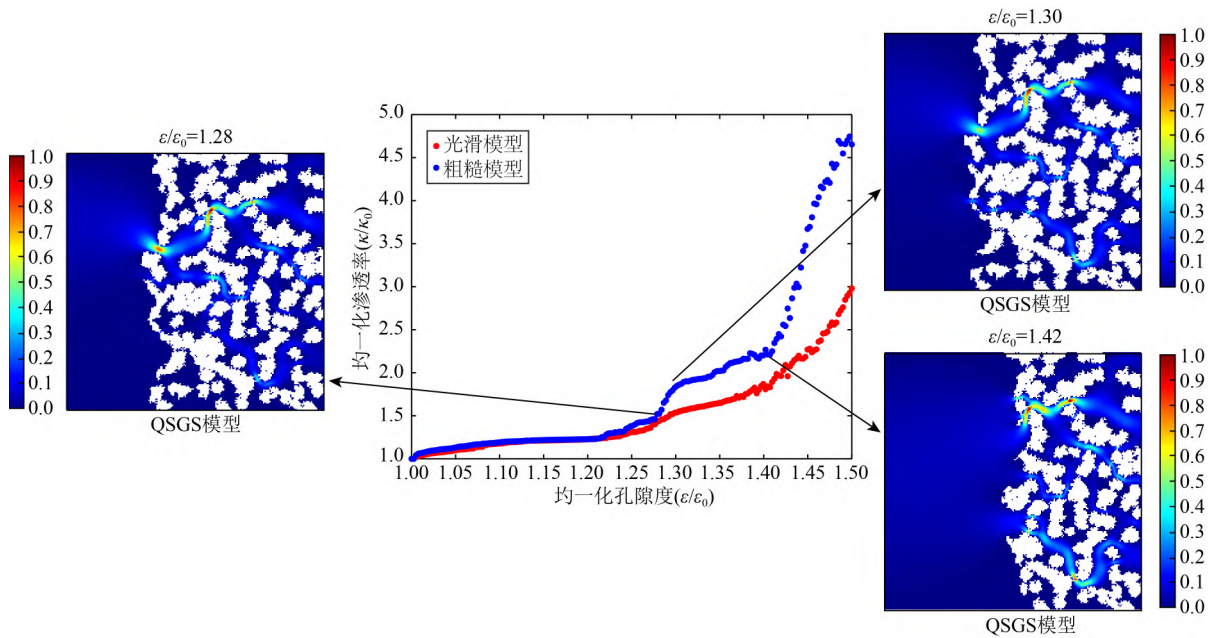


图 8 面溶解发生条件下,均一化孔隙度-渗透率变化曲线

颜色由蓝到红代表流体速度低值到高值,白色区域代表固体相.

Fig. 8 The normalized porosity-permeability change curve under the face dissolution condition  
Colors from blue to red represent low to high values of fluid velocity and white regions represent solid phase.

道和孔洞的形成,意味着电流可以在这些区域自由传播,他们提供了更顺畅的传导路径,使电流可以快速流通,因此显著提高了局部区域的电导率.这是因为溶蚀通道内电流传导通畅,电子移动更容易.当  $Pe=0.1$   $Da=10.0$  时(模式 2,图 11),电导率存在阶梯式的变化趋势.在  $\epsilon/\epsilon_0$  达到 1.23 之前,两种模

型的变化趋势相同,粗糙颗粒模型电导率略高于光滑颗粒模型.之后,粗糙颗粒模型电导率增速显著增大,当  $\epsilon/\epsilon_0$  达到 1.4 后,增速进一步增大.而光滑颗粒模型电导率则保持了较为稳定的增长.原因在于,在面溶解过程中,粗糙颗粒模型表面不平整区域的颗粒更容易溶解,形成更多微小孔洞或通道,这些局

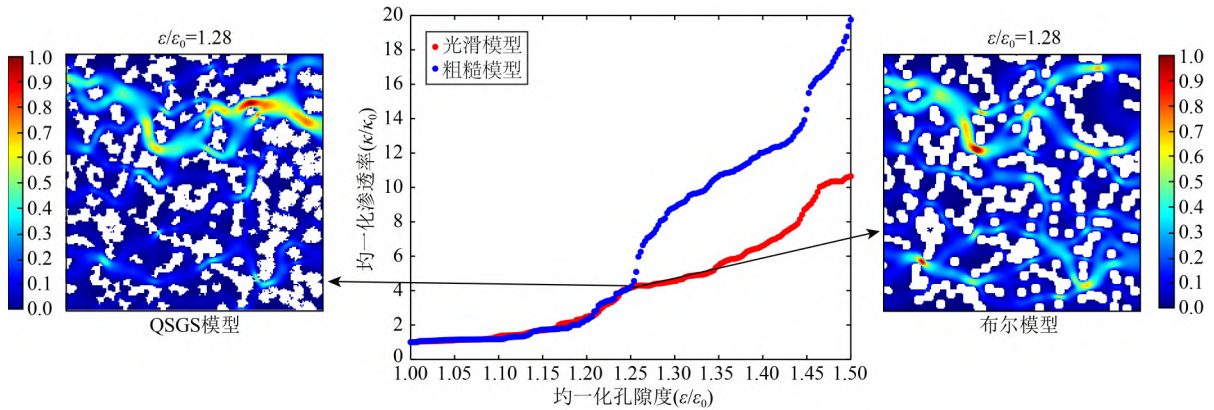


图 9 均匀溶解发生条件下, 均一化孔隙度-渗透率变化曲线  
颜色由蓝到红代表流体速度低值到高值, 白色区域代表固相。

Fig. 9 The normalized porosity-permeability change curve under uniform dissolution condition  
Colors from black to red represent low to high values of fluid velocity and white regions represent solid phase.

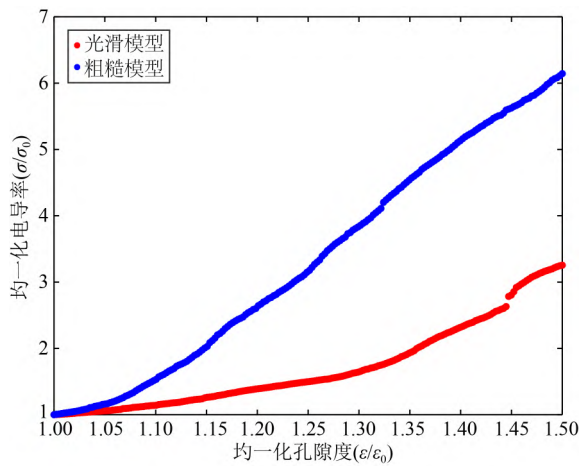


图 10 在虫洞溶解作用下均一化孔隙度-电导率变化曲线  
Fig. 10 The normalized porosity-conductivity change curve under the wormhole dissolution condition

部通道可能具有较高的孔隙性和连通性, 使电流可以自由传导, 因此在这些区域电导率显著提高. 当  $Pe=0.1, Da=0.01$  时 (模式 3, 图 12), 在  $\epsilon/\epsilon_0$  达到约 1.1 之前, 两种模型电导率的变化趋势和幅度基本一致. 之后, 粗糙颗粒模型的电导率出现不均匀增长, 曲线呈现不规则波动; 而光滑颗粒模型的电导率保持较为稳定的增长趋势. 在均匀溶解模式下, 溶解作用在多孔介质内部是均匀的, 影响了整体的孔隙结构. 由于粗糙颗粒表面不均匀, 不同区域的颗粒溶解速率可能不同, 导致孔洞结构显著变化, 进而影响电流的传导路径. 局部区域孔隙度的提高会使这些区域电流传导更加畅通, 因此电导率显著增加. 相比之下, 光滑颗粒模型孔隙结构较为均匀, 当均匀溶解发生时, 不同区域颗粒溶解速率相近, 没有明显的局部通道或孔洞形成. 因此, 电流传导相对均匀, 电导

率变化不大.

多孔介质中的矿物溶解和反应传质会产生更多细小孔隙, 增加了潜在连通孔隙数量, 有利于电荷的流动. 同时, 随着溶解反应的进行, 孔隙空间相互连接, 孔隙网络的连通性提高, 电荷流动能力增强, 电导率也随之增加. 在粗糙颗粒模型中, 溶解反应容易产生更多的局部优势流动通道, 增加了电荷的优势输导路径, 因此电导率远高于光滑颗粒模型.

### 3.3 渗透率和电导率演化的关系

我们进一步分析两种不同颗粒粗糙度模型在不同溶解模式下的电导率-渗透率的演化关系. 图 13 展示了光滑模型中三种不同溶解模式下的电-渗关系. 在面溶解和均匀溶解模式下, 电-渗曲线呈现线性关系. 但是, 在虫洞溶解模式下, 电-渗关系曲线可以分为两个区域 (图 13 中的区域 I 和区域 II). 在区域 I, 电-渗关系为线性关系, 斜率较小, 这指示溶解前缘还没有到达出口端. 在区域 II, 溶解前缘到达了出口端, 多个新的联通多孔介质两端的流动通道被建立 (图 13 中添加的均一化孔隙度为 1.36 时的孔隙几何结构图, 其中红色代表反应溶蚀的固体空间, 蓝色代表与初始状态相比未变化的空间). 随着溶解的进行, 联通通道的宽度逐渐变大, 渗透率随电导率变化的速率逐渐加快. 这是由于电导率此时的变化主要是由于虫洞溶解产生的新的优势流动通道的宽度变化而导致的, 所以呈现的是线性的变化. 而流动通道宽度的变化对于渗透率的变化是指数型.

图 14 展示了粗糙颗粒模型在三种不同溶解模式下的电-渗关系. 在面溶解和均匀溶解模式下, 电-渗曲线呈现线性关系. 在虫洞溶解模式下, 与光滑颗粒模型类似地, 电-渗关系可以也分为两个区域. 与



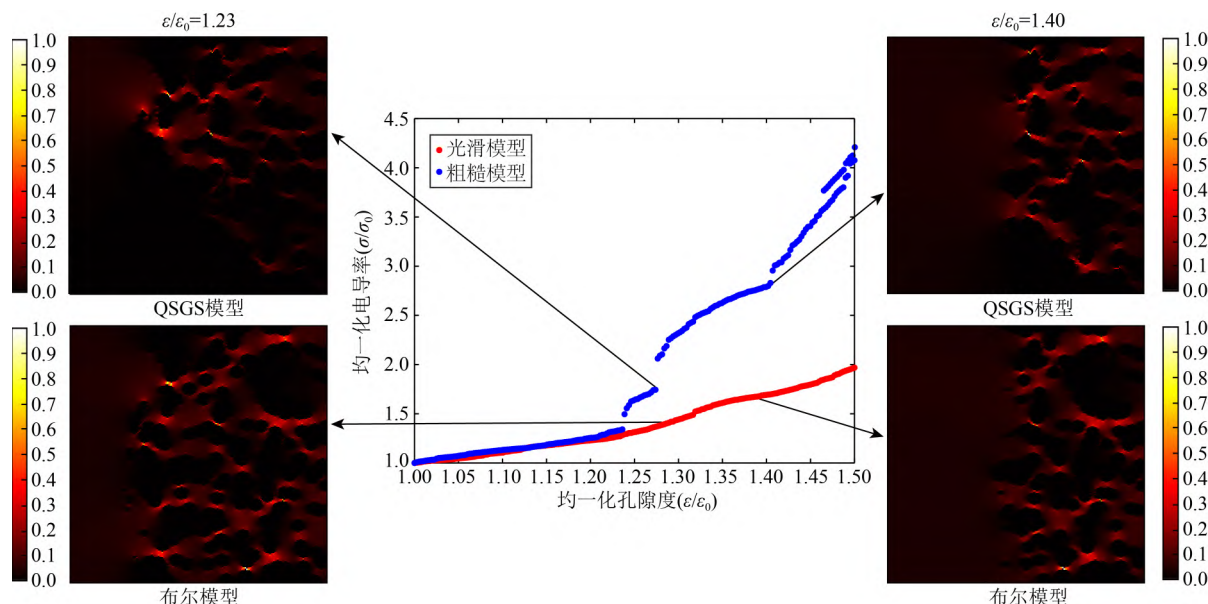


图 11 面溶解发生条件下,均一化孔隙度-电导率变化曲线

颜色由黑到红代表电流大小低值到高值.

Fig. 11 The normalized porosity-conductivity change curve under the face dissolution condition  
Colors from black to red represent low to high values of electrical current.

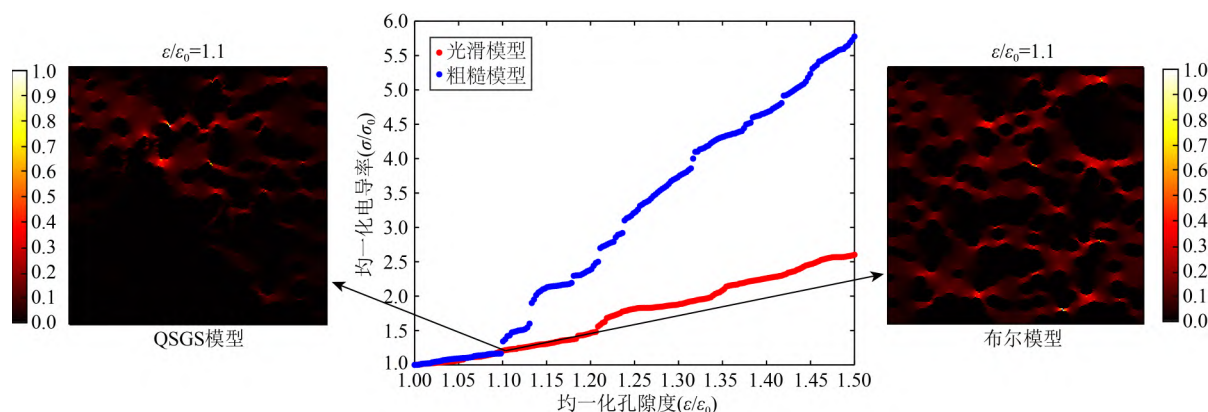


图 12 均匀溶解发生条件下,均一化孔隙度-电导率变化曲线

颜色由黑到红代表电流大小低值到高值.

Fig. 12 The normalized porosity-conductivity change curve under the uniform dissolution condition  
Colors from black to red represent low to high values of electrical current.

光滑颗粒模型不同的是,粗糙颗粒模型在虫洞溶解模式下,溶解作用更快地穿透多孔介质并创造新的优势运移通道(图 14 中均一化孔隙度为 1.19 时多孔介质几何结构图).这是由于粗糙模型具有更强的孔隙空间的非均质性,更有助于新的优势流体运移通道产生.

通过对比图 13 和图 14 的结果,对于面溶解和均一溶解作用下,渗透率-电导率关系呈线性,即可以通过建立拟合方程利用电导率数据来预测渗透率.而在虫洞溶解模式下,渗透率-电导率曲线呈现多段式,即在溶解作用未穿透多孔介质之前,变化规

律呈线性;之后呈指数型,并且其曲线形态受到多孔介质颗粒粗糙度的影响.

## 4 结论

本文研究了不同溶解模式下,颗粒粗糙度对渗透率和电导率演化的影响作用.我们提出采用线性布尔(Boolean)模型和四参数随机生成法(QSGS)构建不同粗糙程度的多孔介质模型,并采用双分布格子 Boltzmann 方法模拟三种典型的溶解模式,即虫洞溶解、面溶解和均匀溶解,并计算相应的有效渗透

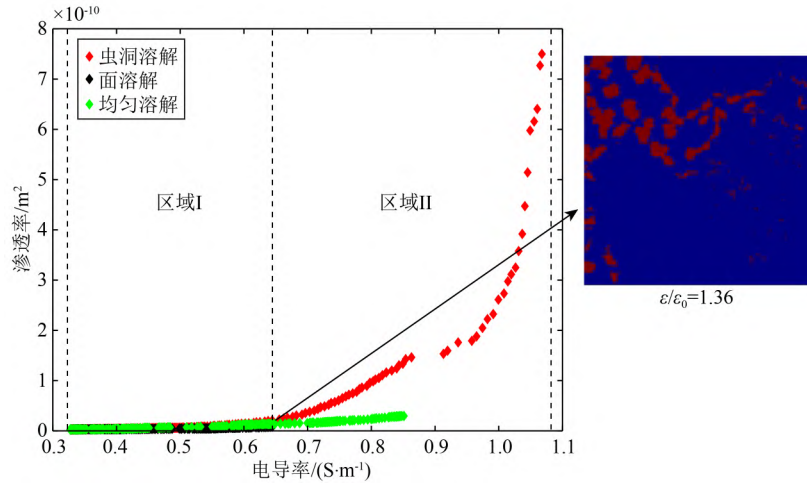


图 13 光滑模型中不同溶解作用下电导率与渗透率的关系图

Fig. 13 The relationship between electrical conductivity and permeability under different mineral dissolution regimes in smooth geometry model

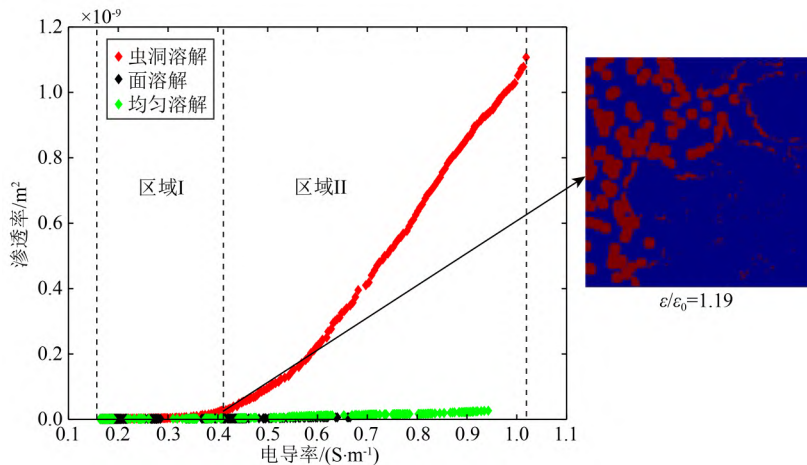


图 14 粗糙模型中不同溶解作用下电导率与渗透率的关系图

Fig. 14 The relationship between electrical conductivity and permeability under different mineral dissolution regimes in rough geometry model

率. 利用基于最小自由能的有限元法求取微观电场分布, 然后根据欧姆定律计算多孔介质的宏观电导率. 主要的结论如下:

(1) 当多孔介质模型具有相同的颗粒粗糙度时, 通过改变  $Pe$  和  $Da$  数, 不同溶解模式下, 渗透率和电导率有不同的变化规律. 渗透率变化主要源于溶解过程中产生的新的流体通道. 电导率的变化主要源于溶解形成的局部通道改变了电流路径. 对比三种典型溶解模式, 虫洞溶解区的渗透率和电导率变化最大, 而面溶解区的变化最小.

(2) 在相同的溶解模式下, 即在相同的  $Pe$  和  $Da$  条件下, 粗糙模型的渗透率和电导率变化明显比光滑模型更高. 这主要是因为粗糙模型不均匀、不规则, 更容易发生不均匀的剧烈变化和溶蚀, 从而导

致更显著、复杂的孔隙结构变化.

(3) 在面溶解和均一溶解模式下, 渗透率-电导率呈线性关系. 而在虫洞溶解模式下, 渗透率-电导率关系曲线呈现多段式.

本研究聚焦于三种典型的溶解模式下颗粒粗糙度对渗透率和电导率演化的控制机理. 在未来的工作我们将考虑更多溶解模式下(例如: 通道溶解模式, Menke et al., 2023)的多孔岩石的输运性质的演化机制.

致谢 感谢匿名审稿人提供的科学合理的建议, 这些建议在很大程度上提升了文章的质量.

## References

Brown S R. 1989. Transport of fluid and electric current through a

- single fracture. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94 (B7): 9429-9438.
- Chagneau A, Claret F, Enzmann F, et al. 2015. Mineral precipitation-induced porosity reduction and its effect on transport parameters in diffusion-controlled porous media. *Geochemical Transactions*, 16(1): 13, doi: 10.1186/s12932-015-0027-z.
- Chen J Y, Yang X S. 2017. Review of experimental studies on electrical conductivity of crustal rocks and minerals. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 32(6): 2281-2294, doi: 10.6038/pg20170601.
- Chen L, Kang Q J, Carey B, et al. 2014. Pore-scale study of diffusion-reaction processes involving dissolution and precipitation using the lattice Boltzmann method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75: 483-496, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.
- Dawson S P, Chen S, Doolen G D. 1993. Lattice Boltzmann computations for reaction-diffusion equations. *J. Chem. Phys.*, 98(2): 1514-1523, doi: 10.1063/1.464316.
- Garboczi E J. 1998. Finite element and finite difference programs for computing the linear electric and elastic properties of digital images of random materials. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.
- Golfier F, Zarcone C, Bazin B, et al. 2002. On the ability of a Darcy-scale model to capture wormhole formation during the dissolution of a porous medium. *Journal of Fluid Mechanics*, 457: 213-254, doi: 10.1017/s0022112002007735.
- Gu X, Cole D R, Rother G, et al. 2015. Pores in Marcellus shale: A neutron scattering and FIB-SEM study. *Energy & Fuels*, 29(3): 1295-1308, doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b00033.
- Gu Y F, Zhang D Y, Ruan J F, et al. 2022. A new model for permeability prediction in appraisal of petroleum reserves. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 37(2): 588-599, doi: 10.6038/pg2022FF0067.
- Guo C, Fan Z Z, Yang Z F, et al. 2023. Electrical-Elastic joint inversion method for fracture characterization in anisotropic media. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 4506112, doi: 10.1109/TGRS.2023.3312400.
- Handley J C. 1999. Discrete approximation of the linear Boolean model of heterogeneous materials. *Physical Review E*, 60(5): 6150-6152, doi: 10.1103/physreve.60.6150.
- Iturrarán-Viveros U, Parra J O. 2014. Artificial Neural Networks applied to estimate permeability, porosity and intrinsic attenuation using seismic attributes and well-log data. *Journal of Applied Geophysics*, 107: 45-54, doi: 10.1016/j.jappgeo.2014.05.010.
- Jiang J W, Zhu Y Q, Xu X, et al. 2015. Pore structure characteristics of the carbonate reservoir and their influence on electric properties in H oilfield, Iraq. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 30(1): 203-209, doi: 10.6038/pg20150131.
- Kang Q J, Chen L, Valocchi A J, et al. 2014. Pore-scale study of dissolution-induced changes in permeability and porosity of porous media. *Journal of Hydrology*, 517: 1049-1055, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.045.
- Kang Q J, Lichtner P C, Zhang D X. 2006. Lattice Boltzmann pore-scale model for multicomponent reactive transport in porous media. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5): B05203, doi: 10.1029/2005jb003951.
- Kang Q J, Zhang D X, Chen S Y, et al. 2002. Lattice Boltzmann simulation of chemical dissolution in porous media. *Physical Review E*, 65(3): 036318, doi: 10.1103/physreve.65.036318.
- Kang Q J, Zhang D X, Chen S Y. 2003. Simulation of dissolution and precipitation in porous media. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10): 2505, doi: 10.1029/2003jb002504.
- Krüger T, Kusumaatmaja H, Kuzmin A, et al. 2017. The Lattice Boltzmann Method. Cham: Springer, doi: 10.1007/978-3-319-44649-3.
- Liu M, Mostaghimi P. 2017. Characterisation of reactive transport in pore-scale correlated porous media. *Chemical Engineering Science*, 173: 121-130, doi: 10.1016/j.ces.2017.06.044.
- Liu Y F, Jeng D S. 2019. Pore scale study of the influence of particle geometry on soil permeability. *Advances in Water Resources*, 129: 232-249, doi: 10.1016/j.advwatres.2019.05.024.
- Liu Z X, Xiao H, Xu Z Z, et al. 2017. The combination bounce back model for Lattice Boltzmann Method and its application on gas flow in micro machinery. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(2): 203-209, doi: 10.1007/s12541-017-0026-3.
- Lu P, Wang H C, Gao C Y, et al. 2022. Research progress of permeability prediction technology for tight sandstone reservoirs. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 37(6): 2428-2438, doi: 10.6038/pg2022FF0236.
- Menke H P, Maes J, Geiger S. 2023. Channeling is a distinct class of dissolution in complex porous media. *Sci. Rep.*, 13: 11312, doi: 10.1038/s41598-023-37725-6.
- Nelson P H. 1994. Permeability-porosity relationships in sedimentary rocks. *The Log Analyst*, 35(3): 38-62.
- Řířký J, Jha D, Stefánsson A, et al. 2017. Mineral dissolution in porous media: An experimental and modeling study on kinetics, porosity and surface area evolution. *Applied Geochemistry*, 87: 57-70, doi: 10.1016/j.apgeochem.2017.05.004.
- Sawayama K, Ishibashi T, Jiang F, et al. 2021. Relating hydraulic-electrical-elastic properties of natural rock fractures at elevated stress and associated transient changes of fracture flow. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(5): 2145-2164, doi: 10.1007/s00603-021-02391-5.
- Shovkun I, Espinoza D N. 2019. Fracture propagation in heterogeneous porous media: Pore-scale implications of mineral dissolution. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(9): 3197-3211, doi: 10.1007/s00603-019-01766-z.
- Song Y J, Zhou Y T, Tang X M, et al. 2016. Method for determination of permeability of shaly sand formation with low porosity and permeability based on efficient flow pore. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 31(1): 327-333, doi: 10.6038/pg20160138.
- Soulaire C, Roman S, Kovscek A, et al. 2017. Mineral dissolution and wormholing from a pore-scale perspective. *Journal of Fluid Mechanics*, 827: 457-483, doi: 10.1017/jfm.2017.499.

- Tang X M, Yin X S, Lü Y J, et al. 2023. Determination of permeability of medium-low porosity and extra-low permeability reservoirs based on pore structure reservoir classification: a case study of S reservoir in block B. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 38(1): 271-284, doi: 10.6038/pg2023GG0082.
- Tian H, Wang G W, Wang K W, et al. 2020. Study on the effect of pore structure on resistivity of carbonate reservoirs. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(11): 4232-4243, doi: 10.6038/cjg2020O0110.
- Upadhyay V K, Szymczak P, Ladd A J C. 2015. Initial conditions or emergence: What determines dissolution patterns in rough fractures? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(9): 6102-6121, doi: 10.1002/2015JB012233.
- Verwer K, Eberli G P, Weger R J. 2011. Effect of pore structure on electrical resistivity in carbonates. *AAPG Bulletin*, 95(2): 175-190, doi: 10.1306/06301010047.
- Walsh J B, Brace W F. 1984. The effect of pressure on porosity and the transport properties of rock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B11): 9425-9431, doi: 10.1029/jb089ib11p09425.
- Wang M, Hu S, Ning C Q, et al. 2021. Classification method of carbonate pore structure based on fractal dimension of well logging curve. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 36(2): 668-674, doi: 10.6038/pg2021EE0156.
- Wang M R, Li Z X. 2007. An Enskog based Monte Carlo method for high Knudsen number non-ideal gas flows. *Computers & Fluids*, 36(8): 1291-1297, doi: 10.1016/j.compfluid.2006.12.006.
- Wang T, Hu R, Yang Z B, et al. 2022. Transitions of dissolution patterns in rough fractures. *Water Resources Research*, 58(1): e2021WR030456, doi: 10.1029/2021WR030456.
- Wang Z, Chen L, Wei H K, et al. 2022. Pore-scale study of mineral dissolution in heterogeneous structures and deep learning prediction of permeability. *Physics of Fluids*, 34(11): 116609, doi: 10.1063/5.0123966.
- You J H, Lee K J. 2021. Pore-scale study to analyze the impacts of porous media heterogeneity on mineral dissolution and acid transport using Darcy-Brinkmann-Stokes method. *Transport in Porous Media*, 137(3): 575-602, doi: 10.1007/s11242-021-01577-3.
- Zhang Y T, Jiang F, Tsuji T. 2022. Influence of pore space heterogeneity on mineral dissolution and permeability evolution investigated using lattice Boltzmann method. *Chemical Engineering Science*, 247: 117048, doi: 10.1016/j.ces.2021.117048.
- Zhou C X, Hu R, Li H W, et al. 2022. Pore-scale visualization and quantification of dissolution in microfluidic rough channels. *Water Resources Research*, 58(11): e2022WR032255, doi: 10.1029/2022WR032255.
- Zhou C X, Hu R, Deng H, et al. 2023. Surface-volume scaling controlled by dissolution regimes in a multiphase flow environment. *Geophysical Research Letters*, 50(18): e2023GL104067, doi: 10.1029/2023GL104067.

## 附中文参考文献

- 陈进宇, 杨晓松. 2017. 地壳岩石矿物电导率实验研究进展. *地球物理学进展*, 32(6): 2281-2294, doi: 10.6038/pg20170601.
- 谷宇峰, 张道勇, 阮金凤等. 2022. 一种用于油气储量评估中渗透率预测新模型. *地球物理学进展*, 37(2): 588-599, doi: 10.6038/pg2022FF0067.
- 姜均伟, 朱宇清, 徐星等. 2015. 伊拉克 H 油田碳酸盐岩储层的孔隙结构特征及其对电阻的影响. *地球物理学进展*, 30(1): 203-209, doi: 10.6038/pg20150131.
- 刘丹, 汪新智, 何玉荣. 2021. 随机四参数法生成多孔介质及渗流模拟. *工程热物理学报*, 42(1): 210-214.
- 路萍, 王浩辰, 高春云等. 2022. 致密砂岩储层渗透率预测技术研究进展. *地球物理学进展*, 37(6): 2428-2438, doi: 10.6038/pg2022FF0236.
- 毛志强, 高楚桥. 2000. 孔隙结构与含油岩石电阻率性质理论模拟研究. *石油勘探与开发*, 27(2): 87-90.
- 梅青燕, 邹成, 杨山等. 2020. 孔隙结构特征和非均质对碳酸盐岩气藏开发的影响. *天然气地球科学*, 31(12): 1757-1765.
- 潘结南, 张召召, 李猛等. 2019. 煤的多尺度孔隙结构特征及其对渗透率的影响. *天然气工业*, 39(1): 64-73.
- 司马立强, 袁龙, 吴思仪等. 2015. 川东北地区须三段钙质砂岩储层特征及控制因素. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 37(2): 178-188.
- 宋延杰, 周玉婷, 唐晓敏等. 2016. 基于有效流动孔隙的低孔渗泥质砂岩储层渗透率确定方法. *地球物理学进展*, 31(1): 327-333, doi: 10.6038/pg20160138.
- 唐晓敏, 殷雪松, 吕亚娟等. 2023. 基于孔隙结构储层分类的中低孔特低渗储层渗透率确定——以 B 区块 S 油层为例. *地球物理学进展*, 38(1): 271-284, doi: 10.6038/pg2023GG0082.
- 田瀚, 王贵文, 王克文等. 2020. 碳酸盐岩储层孔隙结构对电阻率的影响研究. *地球物理学报*, 63(11): 4232-4243, doi: 10.6038/cjg2020O0110.
- 田军, 赵瑾浩, 赵磊等. 2021. 基于孔隙结构的页岩渗透率研究. *金属矿山*, (3): 80-87.
- 王飞腾, 侯东梅, 李彦来等. 2022. 渤海海域 C 油田孔隙结构特征及其对油层电阻率的影响. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 37(6): 32-37.
- 王敏, 胡松, 宁从前等. 2021. 基于测井曲线分形维的碳酸盐岩孔隙结构分类方法. *地球物理学进展*, 36(2): 668-674, doi: 10.6038/pg2021EE0156.
- 王小敏, 樊太亮. 2013. 碳酸盐岩储层渗透率研究现状与前瞻. *地学前缘*, 20(5): 166-174.
- 王子萌, 蒋裕强, 付永红等. 2022. 基于核磁共振表征渝西地区五峰组-龙一 1 亚段页岩储层孔隙结构及非均质性. *地球科学*, 47(2): 490-504.

(本文编辑 张正峰)