

DOI: 10.11779/CJGE202006008

非线性渗流对裂隙岩体渗流传热过程的影响

姚 池^{1, 2}, 邵玉龙^{1, 2}, 杨建华^{*1, 2}, 何 忱^{1, 2}, 黄 帆^{1, 2}, 周创兵^{1, 2}

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330033; 2. 江西省尾矿库工程安全重点实验室, 江西 南昌 330033)

摘要: 提出了一种裂隙岩体的非线性渗流传热数值模型, 首先将 Forchheimer 方程与雷诺方程耦合得到非线性渗流控制方程, 然后结合传热控制方程, 考虑裂隙与岩石基质之间的热量交换, 研究了非线性渗流对裂隙岩体渗流传热过程的影响。通过与裂隙网络非线性渗流试验数据对比, 验证了裂隙岩体非线性渗流模型的有效性。最后, 通过二维单裂隙和三维裂隙网络模型进行了非线性渗流传热分析。结果表明: 该模型能够比较准确地描述裂隙岩体的非线性渗流特征, 随着裂隙开度 d_f 的增加, 流体的非线性效应不断加强, 与达西条件下计算的渗流传热结果的偏差就越大, 通过归一化导流系数 T/T_0 确定临界水力梯度 J_c , 发现裂隙开度对临界水力梯度 J_c 起到主导性作用, 且临界水力梯度 J_c 与裂隙开度 d_f 满足幂函数递减关系; 归一化热突破时间 $t/t_0 \geq 1$, 非线性条件下的稳定期要比线性条件下的稳定期长, 并随着裂隙开度和裂隙数量的增大而增大。

关键词: 非线性渗流; 渗流传热; Forchheimer 方程; 临界水力梯度; 裂隙开度

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)06-1050-09

作者简介: 姚 池(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事裂隙岩体渗流和多物理场耦合等研究工作。E-mail: chi.yao@ncu.edu.cn。

Effect of nonlinear seepage on flow and heat transfer process of fractured rocks

YAO Chi^{1,2}, SHAO Yu-long^{1,2}, YANG Jian-hua^{1,2}, HE Chen^{1,2}, HUANG Fan^{1,2}, ZHOU Chuang-bing^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330033, China; 2. Key Laboratory of Tailings Reservoir

Engineering Safety of Jiangxi Province, Nanchang University, Nanchang 330033, China)

Abstract: A numerical model for nonlinear flow and heat transfer in a fractured rock mass is proposed. First, the Forchheimer equation and the Reynolds equation are coupled to obtain the nonlinear seepage control equation, then combined with the heat transfer control equation, considering the heat exchange between the fracture and the rock matrix, the effect of nonlinear seepage on the flow and heat transfer process of fractured rock mass is studied. The effectiveness of the nonlinear seepage model for fractured rock mass is verified by comparing the experimental data of nonlinear seepage in fracture network. Finally, the nonlinear seepage heat transfer analysis is carried out by two-dimensional single-fracture and three-dimensional fracture network models. The result shows that the model can accurately describe the nonlinear seepage characteristics of fractured rock masses. As the fracture aperture d_f increases, the nonlinear effects of fluids continue to strengthen, and the deviation between the nonlinear conditions and the seepage heat transfer results under linear conditions is greater. The critical hydraulic gradient J_c is determined by the normalized hydraulic conductivity coefficient T/T_0 . It is found that the fracture aperture plays a dominant role in the critical hydraulic gradient J_c , and the critical hydraulic gradient J_c and the fracture aperture d_f satisfy the power function decreasing relationship. The normalized thermal breakthrough time $t/t_0 \geq 1$, and the stability period under nonlinear conditions is longer than the stable period under linear conditions and increases with the increase of the fracture aperture and the number of fractures.

Key words: nonlinear seepage; flow and heat transfer; Forchheimer equation; critical hydraulic gradient; fracture aperture

0 引言

近年来, 随着社会对能源的需求日益增大, 众多大型岩体工程建设相继开展, 如石油天然气的开采、油气能源的地下存储、深部地热开采以及高放核废料的地下处置等, 普遍涉及高温环境下裂隙岩体中的渗

流和热交换问题^[1]。在早期的研究中, 通常基于达西

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1765207, 41762020, 51969015);
江西省自然科学基金项目(20181BCD40003, 20192ACB20020,
20192ACB2102)

收稿日期: 2019-10-24

*通信作者(E-mail: yangjianhua86@ncu.edu.cn)

线性流将裂隙岩体简化为光滑平行板模型, 通过求解N-S方程推导出经典的立方定律, 用于分析裂隙岩体中的渗流过程, 并结合传热控制方程来分析裂隙岩体中的渗流和传热过程。Lauwerie^[2]在研究储油层传热问题时, 假设裂隙中的流速满足达西定律, 提出了二维单裂隙渗流传热模型, 并给定了裂隙内不同位置水温度的解析解; 由于天然岩体中存在高度发育的裂隙簇, 陈必光等^[3]基于二维离散裂隙网络模型, 在商业有限元软件COMSOL中实现一种计算已知裂隙网络的裂隙岩体渗流和传热过程的数值方法; 路威等^[4]研究了填砂裂隙岩体渗流传热, 通过模型试验与数值模拟发现裂隙水流速与裂隙开度越大, 裂隙水对水平传热的阻滞作用越明显。

上述的模型都是基于达西线性流的前提下, 但在复杂的地质构造环境条件下, 岩体裂隙的粗糙度、张开程度、接触面积分布以及内部的充填物等对裂隙的渗透特性有着显著影响, 在流量较大条件下, 粗糙裂隙渗流不再满足线性达西流动^[5]。Bear^[6]提出雷诺数和摩擦因子来解释Forchheimer流动现象; Zimmerman等^[7]首次通过试验和数值的方法, 观察到雷诺数 $Re > 20$ 时粗糙裂隙Forchheimer流动现象; 刘日成等^[8]制作裂隙网络试验模型, 建立高精度渗流试验系统, 通过求解N-S方程, 模拟流体在裂隙网络内的流动状态, 研究发现当水力梯度较大时, 可采用Forchheimer方程计算流体流动。

很多研究^[2-4, 9-11]都是基于达西线性流研究裂隙岩体的渗流传热特征, 而对非线性渗流传热的数值研究很少, 只有一些关于粗糙单裂隙渗流传热的试验^[12-15]。鉴于此, 本文提出一种裂隙岩体的非线性渗流传热数值模型, 利用有限元方法, 实现非线性渗流传热数值模型的求解, 并通过二维单裂隙模型以及三维裂隙网络模型初步探讨了非线性渗流对裂隙岩体渗流传热过程的影响。

1 非线性渗流传热数值模型

1.1 渗流场控制方程

当流速较小时, 流体流动属于线性的达西流动区域, 随着流速的逐渐增大, 将依次进入非线性的弱惯性效应区域^[16]和强惯性区域^[6], 导致流速和压力梯度不再线性相关, 立方定律不再适用^[17]。Bear^[6]提出了用Forchheimer方程来描述流速与压力梯度的非线性关系,

$$-\nabla P = A Q + B Q^2 \quad (1)$$

式中 Q 为体积流量 (m^3/s), P 为压强 (Pa); A , B 为系数, 与裂隙的开度, 宽度以及粗糙度等有关, 其

中 A 为线性项 ($\text{kg}/(\text{m}^5 \cdot \text{s})$), B 为非线性项 (kg/m^8), Liu等^[18]、Long等^[19]提出了方程式的参数表达式:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{12\mu}{Wd_f^3}, \\ B &= \frac{\beta\rho_w}{W^2 d_f^2}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, d_f 为裂隙的开度 (m), W 为裂隙的宽度 (m), ρ_w 为水的密度 (kg/m^3), μ 为水的动力黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), β 为非达西系数, 主要与裂隙的粗糙度有关, 单位为 $1/\text{m}$, 刘杰^[20]通过试验得到 JRC 与 β 的函数关系, 如图1所示。

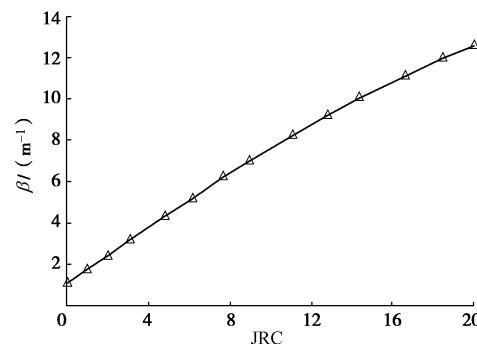


图1 非达西系数 β 与 JRC 关系曲线
Fig. 1 Relationship between non-Darcy coefficient β and JRC

将式(1)变换, 使其等式右边为0, 可得

$$AQ + BQ^2 + \nabla P = 0 \quad (3)$$

上述方程是一个关于 Q 的一元二次方程, 该方程的解为

$$Q = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 - 4B\nabla P}}{2B} \quad (4)$$

因为体积流量 $Q > 0$, 故

$$Q = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B\nabla P}}{2B} \quad (5)$$

裂缝内流体流动可以用雷诺方程代替N-S方程来描述^[21-22], 其控制方程为

$$\nabla(-T_s \nabla H) = 0 \quad (6)$$

式中, T_s 为导水系数 (m^2/s), 则出口处的体积流量用导水系数表示为

$$Q = T_s \left| \frac{\nabla P}{\rho g} \right| W \quad (7)$$

将式(5), (7)联立可得

$$T_s \left| \frac{\nabla P}{\rho g} \right| W = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B\nabla P}}{2B} \quad (8)$$

由此可以得到耦合Forchheimer方程后的导水系数为

$$T_s = \frac{2\rho g}{[A + \sqrt{A^2 - 4B\nabla P}]W} \quad (9)$$

将式(9)代入式(6)中可以得到耦合 Forchheimer 方程的雷诺方程:

$$\nabla \left(-\frac{2\rho g}{[A + \sqrt{A^2 - 4B\nabla P}]W} \nabla H \right) = 0 \quad (10)$$

1.2 温度场控制方程

(1) 岩石基质温度场方程

假设岩石基质是致密不透水, 且其传热方式只有热传导, 用能量守恒来描述该过程^[9]:

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \nabla(k_m \nabla T_m) + W_m \quad (11)$$

式中 T_m 为岩石基质的温度 (K); t 为时间 (s); k_m 为岩石基质的导热系数 (W/(m·K)); ρ_m 为岩石基质的密度 (kg/m³); c_m 为岩石基质的比热容 (J/(kg·K)); W_m 为热源 (W/m³)。

(2) 裂隙温度场方程

水在裂隙流动的过程中, 会与周围的高温岩体发生对流换热^[10], 不考虑裂隙中的充填物, 裂隙中的传热平衡方程为

$$d_f \rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + d_f \rho_w c_w u_w \nabla T_w = d_f \nabla(k_w \nabla T_w) + W_f \quad (12)$$

式中 T_w 为裂隙中水的温度 (K); d_f 为裂隙开度 (m); c_w 为水的比热容 (J/(kg·K)); u_w 为裂隙中水的流速 (m/s); k_w 为水的导热系数 (W/(m·K)); W_f 为单位面积上裂隙表面水从基岩吸收的热量 (W/m²)^[11],

$$W_f = h(T_m - T_f) \quad (13)$$

式中, h 为对流换热系数 (W/(m²·K))。

1.3 模型的求解

采用等效模拟方法将裂隙视作为无厚度单元, 岩石基质采用实体单元离散, 利用 MATLAB 程序在商业有限元软件 COMSOL^[23-24]中进行二次开发, 求解裂隙岩体非线性渗流和传热数值模型, 其中岩石基质采用软件内置的传热模块, 而裂隙面单元则采用软件提供的低维单元 (coefficient form boundary PDE) 来模拟传热和非线性渗流过程, 通过设置岩石基质与裂隙单元之间的物理量交换来实现耦合。

2 模型验证

为了验证本文方法的有效性, 建立三维离散裂隙网络模型, 本文采用无厚度单元对三维交叉裂隙进行了平面等效, 采用如图 2, 3 所示的交叉裂隙模型进行非线性渗流验证。图 2 为一个 0.5 m×0.5 m×0.005 m 的定义域, 模型中含有 4 个交叉裂隙, 交叉裂隙的交叉角度为 60°, 交叉裂隙开度分别为 1.37×10^{-3} , 1.40×10^{-3} , 1.20×10^{-3} , 9.5×10^{-4} m, 分别模拟 3 种不同的进口和出口组合 (出口 3、出口 2+4、出口 2+3)

的情况。图 3 为一个 0.5 m×0.5 m×0.005 m 的定义域, 其中模型的左侧为入口, 右侧为出口, 离散裂隙的开度 $d_f = 4 \times 10^{-3}$ m。利用本文提出的非线性渗流控制式 (10) 进行数值模拟, 并将数值模拟的结果分别与 Li 等^[25]和刘日成等^[8]的试验结果进行对比, 如图 4, 5 所示。从图 4, 5 中可以看出, 数值预测的结果与试验的结果几乎比较吻合, 这说明本文非线性渗流模拟的方法是有效的。文献 [4, 10, 11] 已经证明了用 COMSOL Multiphysics 求解渗流传热问题的可行性和准确性, 本文不再赘述。

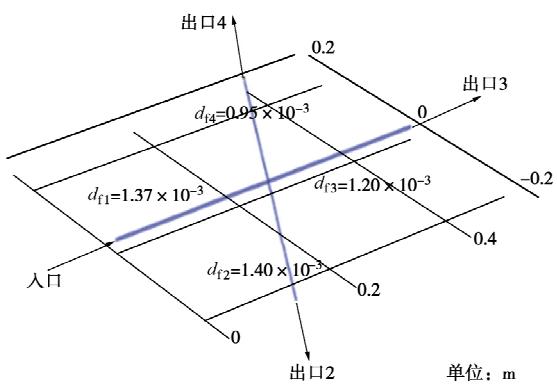


图 2 4 个交叉裂隙模型

Fig. 2 Four-intersecting fracture model

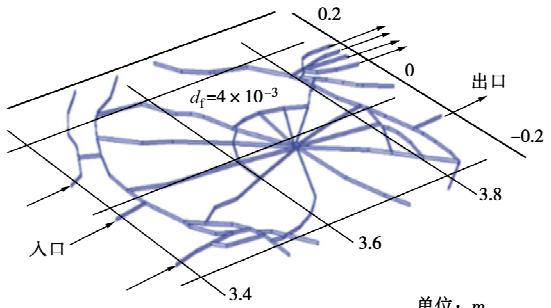


图 3 离散裂隙网络模型

Fig. 3 Discrete fracture network model

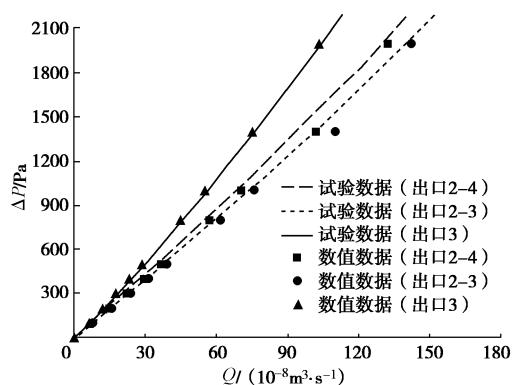


图 4 4 个交叉裂隙模型的试验与数值模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between experimental and numerical simulation results of four-intersecting fracture model

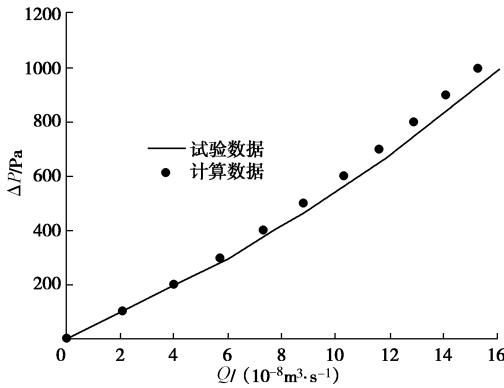


图 5 离散裂隙网络模型的试验与数值模拟结果对比

Fig. 5 Comparison between experimental and numerical simulation results of discrete fracture network model

3 非线性渗流对二维单裂隙渗流传热过程的影响

3.1 非线性渗流对渗流场的影响

如图 6 所示, 一个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的方形岩石基质被一个水平裂隙平均分成两部分, 裂隙左端为进水口, 右端为出水口, 岩石基质不透水, 水只在裂隙中流动, 假设裂隙中水温沿 y 轴保持相同, 即裂隙水的温度只与 x 坐标相关。为了更好地对比非线性渗流的影响, 将线性渗流作为对照组, 其裂隙的渗透率可以用立方定律来描述, 若不考虑裂隙粗糙度, 根据达西定律, 其线性流速可以用下式来描述:

$$u = \frac{d_f^2 \Delta P}{12 \mu \rho g L} \quad . \quad (14)$$

根据图 1, 若不考虑裂隙的粗糙度 (即 $JRC=0$), 非达西系数 β 对应为 1.06, 其模型参数: 岩石密度为 2700 kg/m^3 , 岩石导热系数为 3 W/(m·K) , 水的比热容为 4200 J/(kg·K) , 裂隙的开度为 $(0.6 \sim 1.2) \times 10^{-3} \text{ m}$, 起始注入水温度为 30°C , 岩石比热容为 1000 J/(kg·K) , 水的密度为 1000 kg/m^3 , 水的动力黏度为 0.001 Pa·s , 起始岩石温度为 120°C 。为研究裂隙开度对非线性渗流传热的影响, 本文裂隙开度取值为 $0.6 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$, 压力梯度取值为 $1.0 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4 \text{ Pa/m}$, 其压力梯度与流量的关系如图 7 所示, 其中带有符号的曲线表示非线性流, 线段表示线性流。从图 7 中可以明显发现, 对于非线性渗流曲线而言, 其系数 A 与 B 两者相差 2 个数量级, 随着裂隙开度 d_f 的增加, 扩大了流动面积, 过流量会不断增大, 对于非线性流而言, 其曲线的曲率也不断增大, 说明流体的非线性流态不断增强。

在以往的研究中, 许多学者采用导流系数 T 来评

估裂隙岩体的非线性渗流行为, 在经典达西定律中, 导流系数 T 是一个和裂隙岩体渗透系数和过流面积相关的定值, 本文采用下式对导流系数进行分析计算:

$$T = \frac{\mu}{-\nabla P} Q \quad . \quad (15)$$

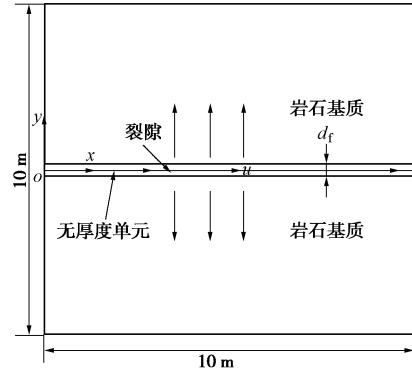


图 6 二维单裂隙渗流传热模型

Fig. 6 Two-dimensional single fracture seepage heat transfer model

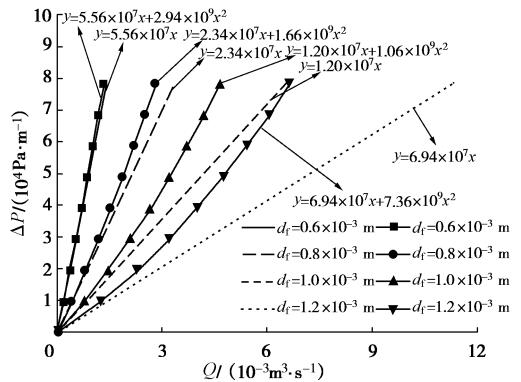
图 7 压力梯度- ∇P 与流量 Q 的曲线关系

Fig. 7 Curve relationship between pressure gradient $-\nabla P$ and flow rate Q

图 8 为归一化导流系数 T/T_0 随水力梯度 J 的变化特征, 其中 T 为非线性导流系数, T_0 为相同条件下的线性导流系数, J 为水力梯度, $J=-\nabla P/\rho g$, 由图 8 可知, 在 $J < 10^{-4}$ 时, 此时 T/T_0 的比值为 1, 流体流动属于达西线性区域; 当 $10^{-4} < J < 10^{-1}$ 时, 流体的非线性作用增强, 流体流动属于弱惯性效应区域; 当 $J > 10^{-1}$ 时, T/T_0 随着 J 的增加而急剧减少, 属于强惯性效应区域, 这和刘日成等^[8]的试验结果趋势相一致。流体从达西线性流转入非线性流的临界点为临界水力梯度 (J_c), 图 9 给出了临界水力梯度 J_c 与裂隙开度的关系, 并进行数据拟合, 从图中可以发现, 随着 d_f 的增加, 临界水力梯度呈幂函数递减:

$$y = 2 \times 10^{-33} x^{-9.895} \quad . \quad (16)$$

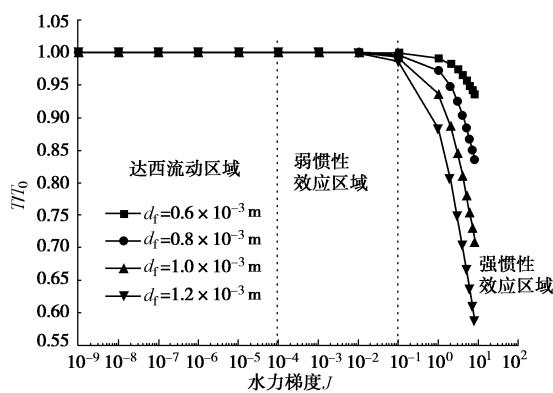


图 8 归一化导流系数 T/T_0 随水力梯度 J 的变化特征
Fig. 8 Variation characteristics of normalized hydraulic conductivity T/T_0 with hydraulic gradient J

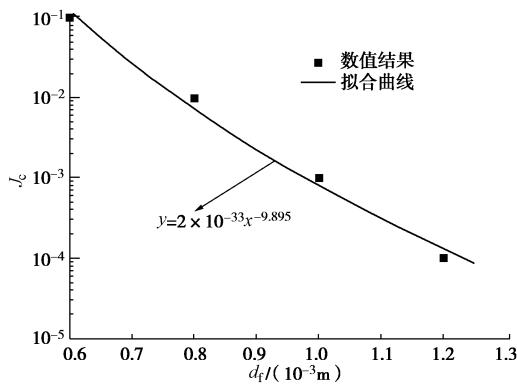


图 9 临界水力梯度 J_c 与裂隙开度 d_f 的关系

Fig. 9 Relationship between critical hydraulic gradient J_c and fracture aperture d_f

3.2 非线性渗流对传热场的影响

低温流体沿着裂隙流动的过程中会与周围的高温岩体进行热量交换, 导致岩体的温度降低。图 10 展示了不同裂隙开度出口处流体温度随时间的变化关系, 其中曲线段为非线性条件下的温度曲线, 符号表示为线性条件下的温度曲线, 从整体上来说, 曲线由稳定段和下降段组成, 在同一水力梯度, 同一时间非线性条件下的出口流体温度要高于线性条件下的出口流体温度, 随着裂隙开度 d_f 的增加, 流体的非线性效应不断加强, 这两曲线之间的误差逐渐增大; 在同一裂隙开度, 曲线的稳定期随着水力梯度 J 的增加而逐渐减少, 而非线性条件下的温度曲线和线性条件下的温度曲线之间的误差随着水力梯度 J 的增加而逐渐增大。这也充分说明水力梯度越大, 裂隙开度越大时, 此时若用达西线性流描述流体运动将会造成很大的误差。

热突破时间 t 是指出口流体温度由稳定段转向下降段的临界时间, 图 11 研究归一化热突破时间 t/t_0 与裂隙开度和水力梯度的关系曲面, 其中 t 为非线性条件下计算所得的热突破时间, 而 t_0 为线性条件下计算所得的热突破时间。热突破时间 $t/t_0 \geq 1$, 当 $J < 10^{-4}$ 时, 流体属于达西流动区域, 此时 t/t_0 的比值不会随裂隙

开度和水力梯度的变化而变化; 当 $10^{-4} < J < 10^{-1}$ 时, 流体属于弱惯性效应区域, 此时 t/t_0 的比值随着裂隙开度和水力梯度的增加而缓慢增大; 当 $J > 10^{-1}$ 时, 流体属于强惯性效应区域, 此时 t/t_0 的比值随着裂隙开度和水力梯度的增加而急剧增大。

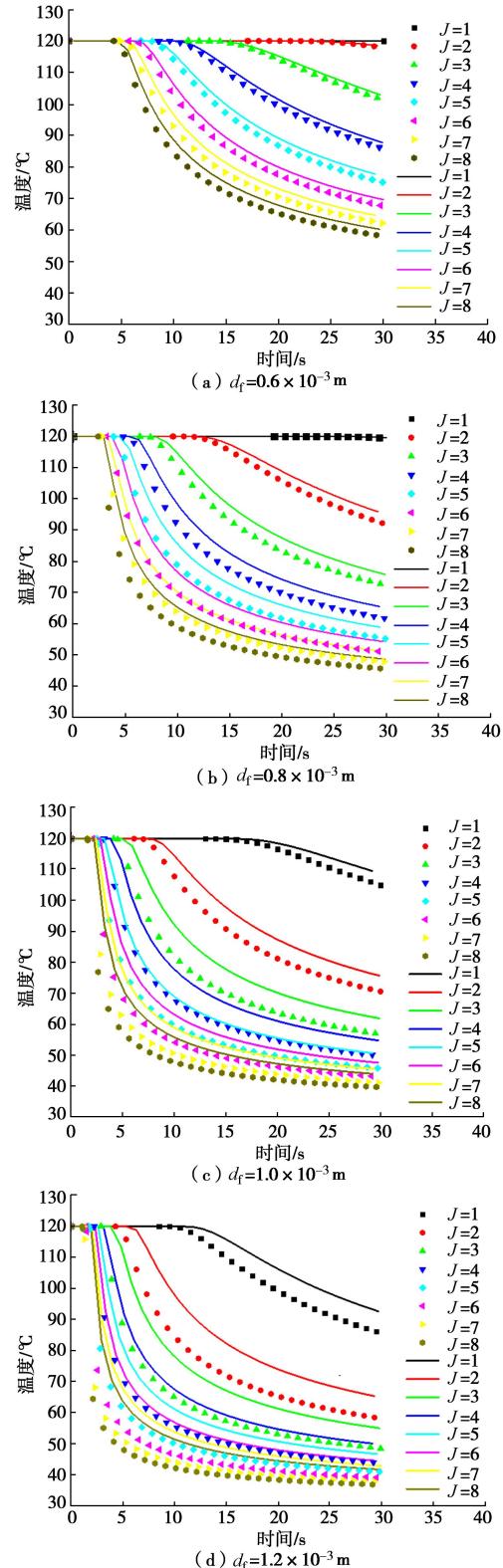


图 10 不同裂隙开度下出口处的流体温度随时间变化曲线
Fig. 10 Variation of fluid temperature at the outlet with time under different fracture apertures

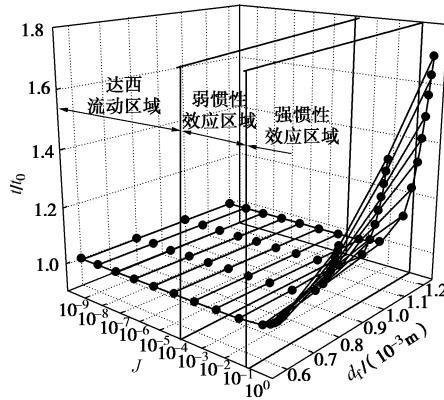
图 11 归一化热突破时间 t/t_0 与裂隙开度和水力梯度的关系

Fig. 11 Relationship among normalized breakthrough time t/t_0 , fracture aperture and hydraulic gradient

4 非线性渗流对三维裂隙网络渗流传热过程的影响

4.1 非线性渗流对三维裂隙网络渗流场的影响

如图 12 为裂隙网络模型的示意图, 其中裂隙岩体为一个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的立方体, 内含有 8 条长为 10 m 宽为 8 m 的正交裂隙。岩石不透水, 水只能在裂隙中流动, 模型的上边界 ($z = 10 \text{ m}$) 为模型的入水口, 下边界 ($z = 0 \text{ m}$) 为模型的出水口, 考虑不同压力梯度和裂隙开度对非线性渗流和传热的影响, 其模型的参数与单裂隙相同。与第三节相类似, 将线性渗流作为对照组来分析非线性渗流对三维裂隙网络渗流传热过程的影响, 裂隙开度取值为 $0.6 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$, 压力梯度取值为 $1.0 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4 \text{ Pa/m}$, 其压力梯度与流量的关系如图 13 所示, 其中带有符号的曲线段表示非线性流, 线段表示线性流。通过与图 7 对比发现, 由于裂隙网络增加了流体通道的数目, 增加了裂隙岩体的过流能力, 其系数 A 与 B 相继减少且两者相差很小, 裂隙开度 d_f 越大, 流体的非线性流态越强。

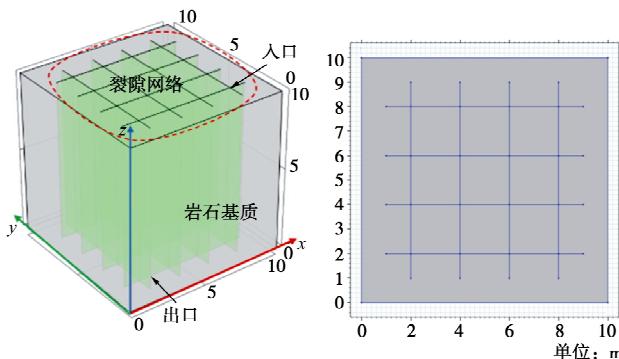


图 12 裂隙网络模型示意图

Fig. 12 Schematic diagram of fracture network model

与二维单裂隙相类似, 对裂隙网络模型进行导流

系数 T/T_0 归一化分析, 如图 14 所示。对比图 8 可以发现, 两图有很好的相似性, 由于本文将裂隙视为光滑且所有裂隙的几何特性是一致的, 而临界水力梯度 J_c 只与裂隙开度以及裂隙粗糙度等裂隙的几何特性决定, 且裂隙开度起主导性作用, 这与文献[26~28]的结论是一致的。

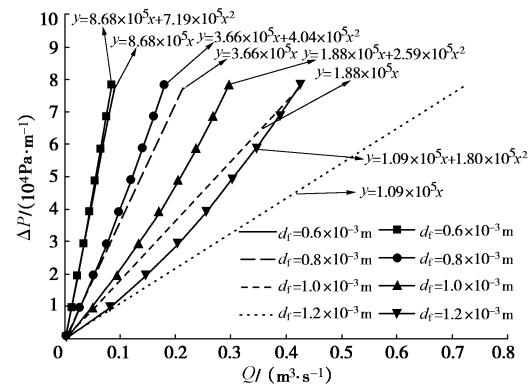
图 13 压力梯度 $-\nabla P$ 与流量 Q 的曲线关系

Fig. 13 Curve relationship between pressure gradient $-\nabla P$ and flow rate Q

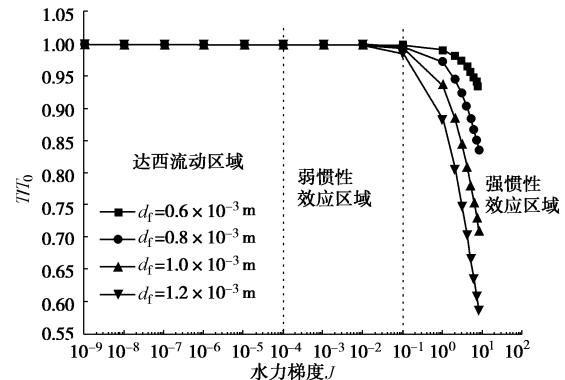
图 14 归一化导流系数 T/T_0 随水力梯度 J 的变化特征

Fig. 14 Variation characteristics of normalized hydraulic conductivity T/T_0 with hydraulic gradient J

4.2 非线性渗流对三维裂隙网络传热场的影响

裂隙网络为流体渗流提供了多条通道且热交换面积增大, 使得裂隙岩体出口处的热通量增大, 使得裂隙岩体的温度下降很快。图 15 为基于三维裂隙网络模型不同裂隙开度下出口处流体温度随时间的变化曲线, 其中曲线段为非线性流条件下的温度曲线, 符号为线性条件下的温度曲线, 从整体上来说, 曲线由稳定段和下降段组成, 在同一水力梯度, 同一时间非线性条件下的出口流体温度要高于线性条件下的出口流体温度, 随着裂隙开度 d_f 的增加, 流体的非线性效应不断加强, 这两曲线之间的误差逐渐增大; 与图 10 不同的是, 裂隙数量的增加加速了岩体热量的交换, 使得出口流体的温度在很早的时间就下降到入口温度

30℃。

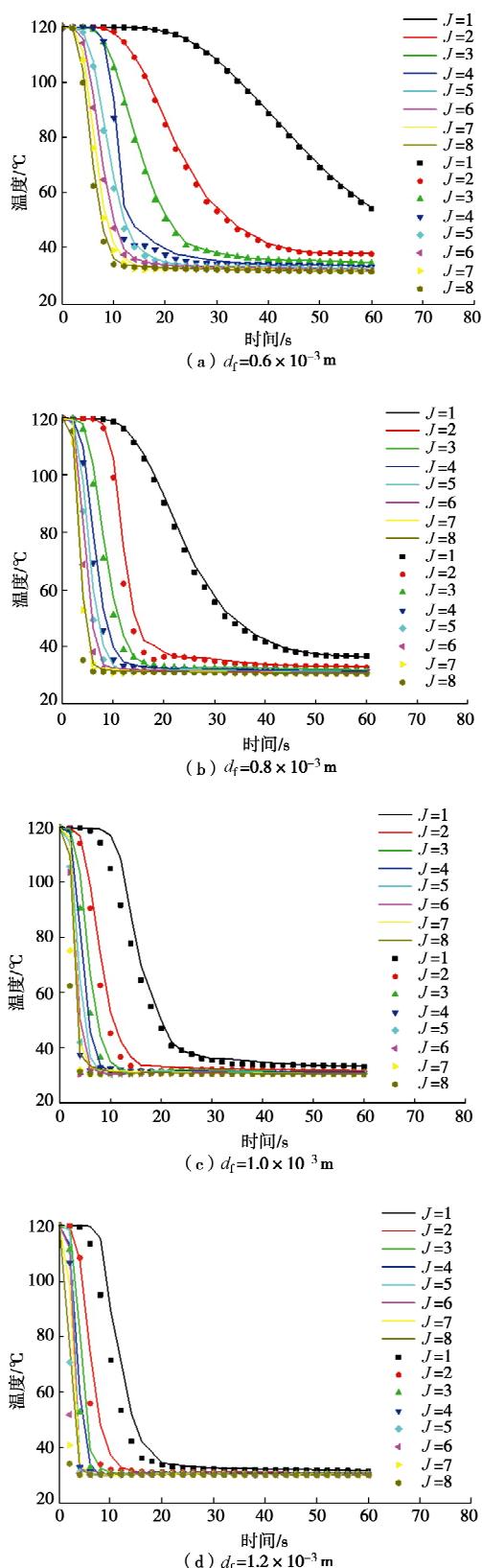


图 15 不同裂隙开度下出口处的流体温度随时间变化

Fig. 15 Variation of fluid temperature at the outlet with time under different fracture apertures

图 16 研究了三维裂隙网络模型归一化热突破时

间 t/t_0 与裂隙开度和水力梯度的关系曲面，其中 t 为非线性条件下计算所得的热突破时间，而 t_0 为线性条件下计算所得的热突破时间。对比图 11 发现，与二维单裂隙模型相类似的是曲面被临界水力梯度分为 3 个区域，当 $J < 10^{-4}$ 时，流体属于达西流动区域，热突破时间 $t/t_0 = 1$ ；当 $10^{-4} < J < 10^{-1}$ 时，流体属于弱惯性效应区域，此时 t/t_0 的比值随着裂隙开度和水力梯度的增加而缓慢增大；当 $J > 10^{-1}$ 时，流体属于强惯性效应区域，此时 t/t_0 的比值随着裂隙开度和水力梯度的增加而急剧增大；与图 11 不同的是在弱惯性和强惯性效应区域中，对应点裂隙网络模型条件下的 t/t_0 值要大于二维单裂隙模型条件下的 t/t_0 ，这也充分说明在地下高温高流速的复杂裂隙岩体中，若用线性流去描述裂隙的渗流将会造成很大的误差。

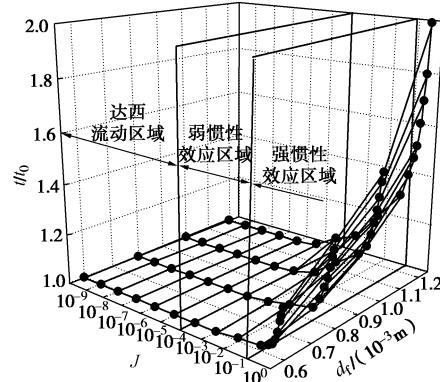
图 16 归一化热突破时间 t/t_0 与裂隙开度和水力梯度的关系

Fig. 16 Relationship among normalized breakthrough time t/t_0 , fracture aperture and hydraulic gradient

5 结 论

本文提出了一种描述非线性渗流传热数值模型的方法，通过与非线性渗流试验的对比，验证了本文非线性渗流模拟方法的有效性，并初步探讨了非线性渗流对渗流传热过程的影响，为精确模拟地下裂隙岩体渗流传热提供了一条新思路。

(1) 利用本文提出的方法可以较好地描述裂隙渗流的非线性渗流特征，通过归一化导流系数 T/T_0 确定临界水力梯度 J_c ，在确定裂隙粗糙度等裂隙几何特性的前提下，裂隙开度 d_f 对临界水力梯度 J_c 起主导性作用，且临界水力梯度 J_c 与裂隙开度 d_f 满足幂函数递减关系。

(2) 出口流体温度曲线由稳定段和下降段组成，在同一水力梯度，同一时间非线性条件下的出口流体温度要高于线性条件下的出口流体温度，随着裂隙开度 d_f 的增加，流体的非线性效应不断加强，这两曲线之间的误差逐渐增大； $t/t_0 \geq 1$ ，非线性条件下计算所

得稳定时间要比线性条件下的稳定时间长, 水力梯度 J 越大, 裂隙开度 d_f 越大, 则 t/t_0 的比值越大。

(3) 对比单裂隙与裂隙网络模型的传热结果, 发现由于裂隙网络为流体渗流提供了多条通道且热交换面积增大, 裂隙岩体出口处的流量和热通量增大, 出口处的流体温度在很快的时间就到达注入温度, 对应点裂隙网络模型下的 t/t_0 值要大于二维单裂隙模型条件下的 t/t_0 , 这充分说明在地下高温高流速的复杂裂隙岩体中, 若用线性流去描述裂隙的渗流将会造成很大的误差。

需要补充的是, 本文提出的非线性渗流传热数值模型将岩石基质视为不透水, 同时没有考虑岩体变形, 将所有裂隙粗糙度等裂隙几何特性视为一致, 这与实际是不太相符的, 且本文提出的临界水力梯度与裂隙开度的数学表达式只适合本模型, 若要推广到一般形式, 还需进入进一步研究。

参考文献:

- [1] 段云星. 干热岩地热资源开采井网优化数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017. (DUAN Yun-xin. Numerical Simulation of Well Pattern Optimization for Hot Dry Rock Geothermal Resources Exploitation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese))
- [2] LAUWERIE H A. The transport of heat in an oil layer caused by the injection of hot fluid[J]. Applied Scientific Research: Section A, 1955, **5**(2/3): 145 – 150.
- [3] 陈必光, 宋二祥, 程晓辉. 二维裂隙岩体渗流传热的离散裂隙模型数值计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 43 – 51. (CHEN Bi-guang, SONG Er-xiang, CHENG Xiao-hui. Numerical calculation method of discrete fracture model for two-dimensional fractured rock mass seepage and heat transfer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 43 – 51. (in Chinese))
- [4] 路 威, 项彦勇, 唐 超. 填砂裂隙岩体渗流传热模型试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, **32**(11): 3448 – 3454. (LU Wei, XIANG Yan-yong, TANG Chao. Model experiment and numerical simulation of flow and heat transfer for sand-filled fractured rock model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(11): 3448 – 3454. (in Chinese))
- [5] 熊 峰, 孙 昊, 姜清辉, 等. 粗糙岩石裂隙低速非线性渗流模型及试验验证[J]. 岩土力学, 2018, **39**(9): 3294 – 3302, 3312. (XIONG Feng, SUN Hao, JIANG Qing-hui, et al. Theoretical model and experimental verification on non-linear flow at low velocity through rough-walled rock fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(9): 3294 – 3302, 3312. (in Chinese))
- [6] BEAR J. Dynamics of Fluids in Porous Media[M]. New York: Elsevier, 1972. 764.
- [7] ZIMMERMAN R W, AL-YAARUBI A, PAIN C C, et al. Nonlinear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(3): 163 – 169.
- [8] 刘日成, 李 博, 蒋宇静, 等. 等效水力隙宽和水力梯度对岩体裂隙网络非线性渗流特性的影响[J]. 岩土力学, 2016, **37**(11): 3165 – 3174. (LIU Ri-cheng, LI Bo, JIANG Yu-jing, et al. Effects of equivalent hydraulic aperture and hydraulic gradient on nonlinear seepage properties of rock mass fracture networks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(11): 3165 – 3174. (in Chinese))
- [9] 刘 伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (LIU Wei, FAN Ai-wu, HUANG Xiao-ming. Theory and Application of Heat and Mass Transfer in Porous Media[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [10] SONG X, SHI Y, LI G, et al. Numerical simulation of heat extraction performance in enhanced geothermal system with multilateral wells[J]. Applied Energy, 2018, **218**: 325 – 337.
- [11] XU C S, DOWD P A, TIAN Z F. A simplified coupled hydro-thermal model for enhanced geothermal systems[J]. Applied Energy, 2015, **140**: 135 – 145.
- [12] 黄奕斌, 张延军, 于子望, 等. 考虑多级流速下的岩石粗糙单裂隙渗流传热特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊1): 2654 – 2667. (HUANG Yi-bin, ZHANG Yan-jun, YU Zi-wang, et al. Experimental study on seepage heat transfer characteristics of rough single crack in rock considering multistage flow velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S1): 2654 – 2667. (in Chinese))
- [13] 李正伟, 张延军, 张 驰, 等. 花岗岩单裂隙渗流传热特性试验[J]. 岩土力学, 2018, **39**(9): 3261 – 3269. (LI Zheng-wei, ZHANG Yan-jun, ZHANG Chi, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of single fracture in granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(9): 3261 – 3269. (in Chinese))
- [14] 张 驰. 干热岩单裂隙渗流—传热实验与数值模拟研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2017. (ZHANG Chi. Experimental Study and Numerical Simulation of Single Fissure Flow and Heat Transfer in Dry Hot Rock[D]. Jilin: Jilin University, 2017. (in Chinese))

- [15] 李正伟. 干热岩裂隙渗流—传热试验及储层模拟评价研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2016. (LI Zheng-wei. Fracture Seepage-Heat Transfer Test and Reservoir Simulation evaluation of Dry Hot Rock[D]. Jilin: Jilin University, 2016. (in Chinese))
- [16] MEI C C, AURIAULT J L. The effect of weak inertia on flow through a porous medium[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, **222**: 647 – 663.
- [17] ZIMMERMAN R W, AL-YAARUBI A, PAIN C C, et al. Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**: 163 – 169.
- [18] LIU R C, LI B, JIANG Y J. A fractal model based on a new governing equation of fluid flow in fractures for characterizing hydraulic properties of rock fracture networks[J]. Computers & Geotechnics, 2016, **75**: 57 – 68.
- [19] LONG J C S, REMER J S, WILSON C R, et al. Networks of discontinuous fractures[J]. Porous Media Equivalents for Resources Research, 1982, **18**(3): 645 – 658.
- [20] 刘杰. 岩体裂隙网络二维非线性渗流特性与模型[D]. 济南: 山东大学, 2019. (LIU Jie. Two-Dimensional Nonlinear Seepage Characteristics and Model of Rock Mass Fracture Network[D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese))
- [21] HUANG N, JIANG Y, LI B, et al. A numerical method for simulation fluid flow through 3-D fracture networks[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2016, **33**: 1271 – 1281. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.072>.
- [22] ZIMMERMAN R W, AL-YAARUBI A, PAIN C C, et al. Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2004, **41**(3): 163 – 169. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.12.045>.
- [23] 周广磊, 徐涛, 朱万成, 等. 基于温度 - 应力耦合作用的岩石时效蠕变模型[J]. 工程力学, 2017, **34**(10): 1 – 9, 25. ZHOU Guang-lei, XU Tao, ZHU Wan-cheng, et al. A time-dependent thermo-mechanical creep model of rock[J]. Engineering Mechanics, 2017, **34**(10): 1 – 9, 25. (in Chinese))
- [24] 张伟, 曲占庆, 郭天魁, 等. 热应力影响下干热岩水压致裂数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, **40**(5): 2001 – 2008. (ZHANG Wei, QU Zhan-qing, GUO Tian-kui, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing in hot dry rocks under the influence of thermal stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(5): 2001 – 2008. (in Chinese))
- [25] LI B, LIU R, JIANG Y. Influences of hydraulic gradient, surface roughness, intersecting angle, and scale effect on nonlinear flow behavior at single fracture intersections[J]. Journal of Hydrology, 2016, **538**: 440 – 453.
- [26] CHEN Y F, ZHOU J Q, HU S H, et al. Evaluation of Forchheimer equation coefficients for non-Darcy flow in deformable rough-walled fractures[J]. Journal of Hydrology, 2015, **529**: 993 – 1006.
- [27] 许凯, 雷学文, 孟庆山, 等. 非达西渗流惯性系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(1): 164 – 170. (XU Kai, LEI Xue-wen, MENG Qing-shan, et al. Study of inertial coefficient of non-darcy seepage flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(1): 164 – 170. (in Chinese))
- [28] 周佳庆. 裂隙介质非线性渗流与非费克传输的宏细观机制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018. (ZHOU Jia-qing. Mechanisms of Nonlinear Flow and Anomalous Transport in Fractured Media: From Micro to Macro-scale[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese))