

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.04.035

基于格子 Boltzmann 方法的岩体单裂隙面渗流特性研究

王志良¹, 申林方¹, 李邵军², 徐则民¹

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为了研究层流状态下粗糙单裂隙面的渗流特性, 基于格子 Boltzmann 方法, 建立了压力作用下单裂隙面渗流的数值模型。采用 D2Q9 模型模拟离散速度分布方向, 在宏观尺度上, 上、下边界设置为不透水边界 ($u_x = u_y = 0$), 左、右边界为压力边界 (左侧压力 p_{in} 大于右侧压力 p_{out}); 在微观尺度上, 左、右边界及光滑裂隙表面采用非平衡态外推格式, 粗糙裂隙表面采用标准反弹格式。编制了相应的计算程序, 验证了光滑平板裂隙流的立方定律。采用分段随机裂隙长及裂隙宽的方法生成了粗糙裂隙面, 并基于格子 Boltzmann 方法研究了不同粗糙裂隙面方案的渗流特性。研究结果表明: 对于粗糙裂隙面, 渗流特征极大程度取决于裂隙表面形貌, 随着相对粗糙度的增加, 裂隙渗流规律明显偏离立方定律。为此, 考虑裂隙面相对粗糙度的影响, 根据不同裂隙粗糙面方案的数值计算结果, 提出了层流状态下粗糙裂隙面渗流的立方定律修正公式, 为系统研究复杂粗糙裂隙的水力特性奠定了一定的基础。

关键词: 格子 Boltzmann 方法; 单裂隙面; 渗流特性; 数值模拟

中图分类号: O 357.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)04-1203-08

Seepage characteristics of a single fracture based on lattice Boltzmann method

WANG Zhi-liang¹, SHEN Lin-fang¹, LI Shao-jun², XU Ze-min¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: To investigate seepage characteristics of a single rough fracture, based on lattice Boltzmann method, a numerical model is established to analyze the water flow in laminar under pressure. The D2Q9 model is applied to simulate the discrete velocity direction. On the macroscopic-scale, the upper and lower boundaries ($u_x = u_y = 0$) are assumed to be impermeable, and the left and right boundaries are controlled by pressure (i.e., the pressure on the left side is larger than that on the right side). On the microscopic-scale, the non-equilibrium extrapolation scheme is set on the pressure boundary and smooth fracture surface boundary, and the standard bounce-back scheme is set on the rough fracture surface boundary. The corresponding program is compiled to verify the classical cubic law of smooth plate fracture flow. The rough fracture surface is generated by setting piecewise random length and random width, and seepage characteristics of different rough fracture surfaces are discussed in detail. The results show that fracture surface roughness greatly affects seepage characteristics. With the increase of relative roughness, the deviation from cubic law becomes more obvious. Therefore, by considering the effect of relative fracture surface roughness, the modified cubic law is proposed according to numerical results of different schemes of rough fracture surface. This study lays the foundation for further research on the complex hydraulic characteristics of rough fracture.

Keywords: lattice Boltzmann method; single fracture; seepage characteristics; numerical simulation

1 引言

天然岩体由于受到漫长的地质演化作用以及

无数次的地质变迁过程, 在其内部形成了大量的结构面。这些结构面形态各异、成因也不尽相同, 主要以节理、断层等裂隙的形式存在于岩体当中。由

收稿日期: 2015-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 51408284, No. 51508253, No. U1502231); 云南省应用基础研究计划项目(No. 2016FB077)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51408284, 51508253, U1502231) and the Yunnan Applied Basic Research Project (2016FB077).

第一作者简介: 王志良, 男, 1982年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程渗流方面的研究工作。E-mail: wangzhiliangtj@126.com

于裂隙的透水能力远大于岩石, 错综复杂的裂隙网络构成了岩体中水分运动的主要通道, 也决定了岩体的渗透特性^[1-2]。单条裂隙是岩体裂隙网络的基本单元, 其水力特性影响着整个岩体的渗流规律, 因此, 系统深入地研究单裂隙面的渗透特性可以为合理预测工程岩体复杂的渗流状态奠定坚实的基础。

对于岩体单裂隙面渗流特性的研究, 国内外学者在试验研究、理论推导及数值模拟等方面进行了大量工作, 并取得了丰硕的成果。试验研究方面, 速宝玉等^[3]用人工粗糙裂隙面模拟天然岩体裂隙进行物理模型试验, 讨论了天然裂隙的渗流机制, 并提出了渗流计算的改进理论公式。许光祥等^[4]采用人工概化裂隙进行单裂隙渗流试验研究, 并根据超立方定律和次立方定律来揭示粗糙裂隙的渗流规律。理论推导方面, 柴军瑞等^[5]依据渗流量等效原理推导出变裂隙宽光滑平板裂隙流等效裂隙宽的计算公式, 并结合网络渗流模型验证了其有效性。徐维生等^[6]根据裂隙分布统计特征生成了粗糙裂隙, 推导了不同渗流本构关系下的单宽裂隙流量、裂隙等分点水头公式及等效隙宽公式等。然而, 由于天然裂隙面产状及地下水渗流流态的复杂性, 理论推导及试验条件均难以达到天然状态下裂隙面渗流的条件。而数值模拟方法不仅可以研究复杂条件下岩体裂隙的渗流规律, 并能够指导、验证试验的研究成果, 还可以大大减小试验的工作量。因此, 数值模拟已成为解决岩土工程问题的重要工具, 并在岩体裂隙渗透特性研究方面得到了较为广泛的应用。段慕白等^[7]根据节理粗糙度标准剖面轮廓曲线, 采用逆向数字化建模方法, 模拟了岩体不同节理裂隙粗糙度的渗流特征。刘晓丽等^[8]利用 Monte Carlo 模拟技术生成表征岩体裂隙结构信息的虚拟裂隙网络, 采用有限元法研究了岩体裂隙的水力学特性, 并探讨了裂隙几何形貌对其渗流状态的影响。

与传统的数值模拟方法相比, 格子 Boltzmann 方法是一种介观模拟方法, 它克服了宏观连续性假设引起的计算精度问题以及微观分子动力学模型在时间及空间上的限制, 能准确地求解流体流动的 Navier-Stokes 方程及模拟复杂的边界条件, 已成为研究岩体裂隙渗流较为有效的数值计算方法之一^[9-10]。为此, 本文基于格子 Boltzmann 方法, 对压力作用下岩体单裂隙面的渗流特性进行了分析计算, 验证了光滑平板裂隙流的立方定律; 同时采用分段随机裂隙长及裂隙宽的方法生成了粗糙裂隙面的基本结

构, 讨论了粗糙裂隙面的渗流规律, 并结合裂隙面的相对粗糙度提出了修正立方定律, 为系统研究复杂粗糙裂隙的水力特性奠定了一定的基础。

2 裂隙面粗糙度表征及裂隙面生成

在天然状态下, 岩体裂隙结构面是粗糙不平的, 如图 1 所示。由于受到自然界风化、水岩化学反应等影响, 其裂隙面的粗糙度存在较大差别。为了表征不同裂隙面的粗糙程度, 常采用相对粗糙度 δ 对其进行描述:

$$\delta = \frac{\Delta}{\bar{b}} \quad (1)$$

式中: Δ 为裂隙面的绝对粗糙度^[11], $\Delta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |b_{i+1} - b_i|$, n 为裂隙面所划分的区间段数, 对于一侧光滑、一侧粗糙的裂隙面而言, $\Delta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{b_{i+1} - b_i}{2} \right|$; \bar{b} 为裂隙的平均隙宽, $\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i$ 。为便于分析讨论, 本文的数值计算均采用一侧光滑、一侧粗糙的裂隙面。

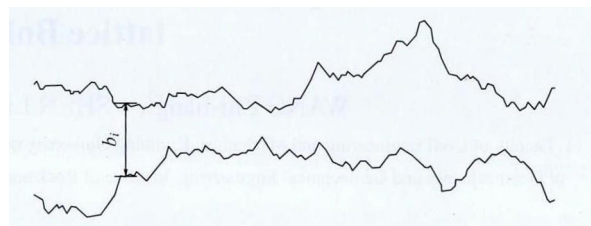


图 1 粗糙裂隙面示意图

Fig.1 Schematic of rough fracture surface

为了使生成的裂隙面更加接近于天然状态, 采用分段随机裂隙长和裂隙宽方法生成裂隙的粗糙曲面, 如图 2 所示。将裂隙总长度 L 分割成长度不等的小段 $L = \sum_{i=1}^n L_i$, 每一段的长度取为 $L_i = L_{\max} \times \text{rand}(0,1)$ 。式中 L_{\max} 为每一段的最大长度, $\text{rand}(0,1)$ 为 0~1 之间的一个随机数。每一段末端的高度取为 $h_i = h_{\max} \times \text{rand}(0,1)$, h_{\max} 为每一段的最高高度。将各分段裂隙的首尾相接, 即可生成粗糙的裂隙面。表 1 列出了裂隙总长度为 400、宽度 (包括粗糙面的厚度) 为 50, 下侧粗糙面的厚度为 $20 + h_i$, $L_{\max} \times h_{\max}$ 分别取为 5×5 、 10×5 、 15×5 及 20×5 时, 随机生成裂隙结构面的基本形状。为了数值计算方便, 所生成粗糙裂隙面的单位均为格子单位。

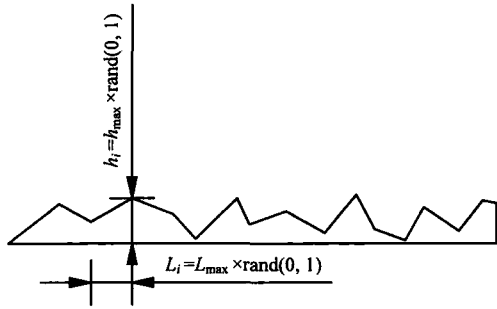


图 2 分段随机生成粗糙面示意图

Fig.2 Schematic of rough surface generated by the piecewise random method

表 1 分段随机生成粗糙裂隙面的基本形状

Table 1 Basic shape of rough fracture surface generated by the piecewise random method

| $L_{max} \times h_{max}$ | δ | 裂隙形状基本情况 |
|--------------------------|----------|----------|
| 5×5 | 0.018 45 | |
| 10×5 | 0.010 80 | |
| 15×5 | 0.008 22 | |
| 20×5 | 0.007 20 | |

3 裂隙面渗流理论研究

裂隙中水的运动遵从 Navier-Stokes 方程，对于理想的光滑平板裂隙流，其渗流特性满足立方定律：

$$q = \frac{gb^3}{12\nu} J \quad (2)$$

式中： q 为裂隙水流的单宽流量； b 为裂隙隙宽； g 为重力加速度； ν 为水的黏滞系数； J 为水力比降。

然而，由于自然界的天然裂隙面均为粗糙的，其裂隙隙宽 b 沿程变化，并非是一个定值，采用立方定律无法准确地解释其渗流特性。为此，一些学者根据岩体裂隙面的粗糙程度，对立方定律进行适当的修正，以描述粗糙裂隙的渗流规律。

Louis^[11]根据相关试验资料推导出的修正公式为

$$q = \frac{gb^3}{12\nu} J \frac{1}{1 + 8.8 \left(\frac{\Delta}{2b} \right)^{1.5}} \quad (3)$$

前苏联学者 Lomize^[12]提出了层流状态下立方定律的修正公式为

$$q = \frac{gb^3}{12\nu} J \frac{1}{1 + 6 \left(\frac{\Delta}{b} \right)^{1.5}} \quad (4)$$

Amadei 等^[13]采用数值算法计算得到了裂隙面的经验公式为

$$q = \frac{g\bar{b}^3}{12\nu} \frac{J}{1 + 0.6 \left(\frac{\sigma_e}{\bar{b}} \right)^{1.2}} \quad (5)$$

式中： \bar{b} 、 σ_e 分别为裂隙隙宽的均值和方差。

由上述可知，层流状态下粗糙裂隙面立方定律的修正公式可统一表示为

$$q = \frac{g\bar{b}^3}{12\nu} \frac{J}{1 + A\delta^B} \quad (6)$$

式中： A 、 B 为经验系数。

4 格子 Boltzmann 模型

4.1 格子 Boltzmann 方程

Boltzmann 方程是统计力学中用以描述非平衡态分布函数演化规律的方程，可表示为^[14-15]

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{a} \cdot \frac{\partial f}{\partial \xi} = \Omega_f \quad (7)$$

式中： f 为粒子速度分布函数，可表示为 $f(\mathbf{r}, \xi, t)$ ； ξ 为粒子速度矢量； t 为时间； \mathbf{r} 为粒子的空间位置矢量； \mathbf{a} 为粒子的加速度矢量，如无外力作用， $\mathbf{a} = 0$ ； Ω_f 为碰撞项，表征由于粒子碰撞而引起 f 的变化。

由于碰撞项 Ω_f 为粒子分布函数 f 的非线性项，而且还与分子作用力有关，Boltzmann 方程很难进行求解。因此，常采用 BGK 近似将碰撞项 Ω_f 简化为 f 的线性函数^[15]：

$$\Omega_f = \frac{1}{\tau} (f^{eq} - f) \quad (8)$$

式中： τ 为弛豫时间； f^{eq} 为 Maxwell 平衡态分布函数。

忽略外力的影响，将式 (8) 代入式 (7)，得

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} = \frac{1}{\tau} (f^{eq} - f) \quad (9)$$

为了对式 (9) 进行求解，需将其速度、时间及空间进行离散化，在相空间内将速度离散为有限维的速度空间 $\{e_0, e_1, \dots, e_{N-1}\}$ ， N 为速度离散方向种类数；同时将粒子分布函数 f 也相应地离散为 $\{f_0, f_1, \dots, f_{N-1}\}$ ，则速度离散的格子 Boltzmann 方程为

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \mathbf{e}_i \cdot \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{r}_i} = \frac{1}{\tau} (f_i^{eq} - f_i) \quad (10)$$

要数值求解式 (10)，还需在时间和空间上对该方程进行离散：

$$f_i(r_i + e_i \delta_t, t + \delta_t) = f_i(r_i, t) + e_i \cdot \frac{\partial f_i}{\partial r_i} \delta_t + \delta_t \frac{\partial f_i}{\partial t}$$

$$(i = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (11)$$

将式 (10) 与式 (11) 联系, 即可得到完全离散格子 Boltzmann 方程为

$$f_i(r_i + e_i \delta_t, t + \delta_t) - f_i(r_i, t) = \frac{1}{\tau} (f_i^{eq} - f_i)$$

$$(i = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (12)$$

Qian 等^[16]提出的二维九速 (D2Q9) 模型为格子 Boltzmann 的基本模型, 其粒子速度方向如图 3 所示。离散速度 e 由 9 个方向上的速度向量构成如下的集合:

$$e = c \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: c 为格子速度, $c = \delta_x / \delta_t$; δ_x 、 δ_t 分别为离散的格子步长和时间步长。

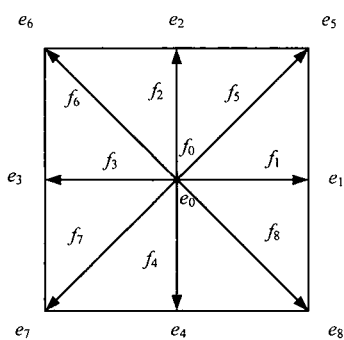


图 3 D2Q9 格子模型
Fig.3 D2Q9 lattice model

平衡态分布函数为

$$f_i^{eq} = \rho \omega_i \left[1 + \frac{e_i \cdot u}{c_s^2} + \frac{(e_i \cdot u)^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right] \quad (14)$$

式中: c_s 为格子声速, $c_s^2 = \frac{c^2}{3}$; ω_i 为权重系数。

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{4}{9} & i = 0 \\ \frac{1}{9} & i = 1, 2, 3, 4 \\ \frac{1}{36} & i = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (15)$$

利用 Chapman-Enskog 多尺度展开方法, 可以将式 (12) 还原为宏观的质量和动量守恒定律。同时, 可以得到模型的宏观密度、速度与微观粒子分布函数间的关系以及宏观变量粘滞系数 ν 、压力 p 的表达式分别为

$$\rho = \sum_{i=0}^8 f_i \quad (16)$$

$$u = \frac{1}{\rho} \sum_{i=0}^8 f_i e_i \quad (17)$$

$$\nu = c_s^2 \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \delta_t \quad (18)$$

$$p = \rho c_s^2 \quad (19)$$

4.2 边界条件

边界条件的处理在格子 Boltzmann 方法中起着至关重要的作用, 它对计算效率、计算精度以及计算稳定性均有较大的影响。本文对岩体裂隙渗流的进口、出口压力边界及光滑裂隙面边界采用平衡态外推格式, 对于裂隙的粗糙面边界采用标准反弹格式。

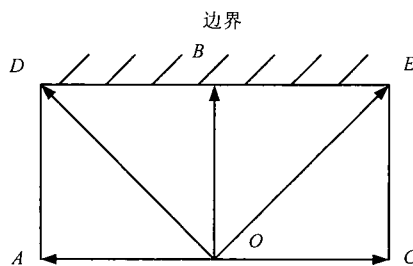


图 4 非平衡态外推格式示意图
Fig.4 Non-equilibrium extrapolation scheme

非平衡态外推格式是 Guo 等^[17]于 2002 年提出的一种边界处理方式, 它在时间和空间上均具有二阶计算精度, 且操作简单, 数值稳定性好。图 4 为非平衡态外推格式的示意图, 图中格点 D 、 B 、 E 位于流场边界, 格点 A 、 O 、 C 处于流场中。在 t 时刻, 格点 O 处的分布函数 $f_i(O, t)$ 是已知的, 而边界 B 点的分布函数 $f_i(B, t)$ 是未知的。为求得 B 点的分布函数, 将 $f_i(B, t)$ 分解为: 平衡态 $f_i^{eq}(B, t)$ 和非平衡态 $f_i^{neq}(B, t)$, 即

$$f_i(B, t) = f_i^{eq}(B, t) + f_i^{neq}(B, t) \quad (20)$$

通常情况下, $f_i^{eq}(B, t)$ 可根据式 (14) 由宏观边界条件确定, 而 $f_i^{neq}(B, t)$ 的计算通常比较困难。为简化计算, 将 $f_i^{neq}(B, t)$ 用与之相邻流场内的 $f_i^{neq}(O, t)$ 来代替, 则边界 B 点的分布函数可表示为

$$f_i(B, t) = f_i^{eq}(B, t) + [f_i(O, t) - f_i^{eq}(O, t)] \quad (21)$$

标准反弹格式在低马赫数的情况下具有二阶精度, 能够严格保证系统的质量及动量守恒定律。假设粒子与壁面发生碰撞后速度发生逆转, 如图 5

所示。边界格点 (i, j) 的分布函数 f_8 ，可以从格点 $(i-1, j+1)$ 迁移得到，而碰到壁面反弹以后，可以得到格点 (i, j) 的分布函数 $f_6=f_8$ 。类似地，可以由格点 $(i, j+1)$ 的 f_4 及格点 $(i+1, j+1)$ 的 f_7 获得格点 (i, j) 的 f_2 及 f_5 。因此，壁面格点 (i, j) 发生标准反弹后的粒子分布函数为

$$f_{2,5,6}(i, j) = f_{4,7,8}(i, j) \quad (22)$$

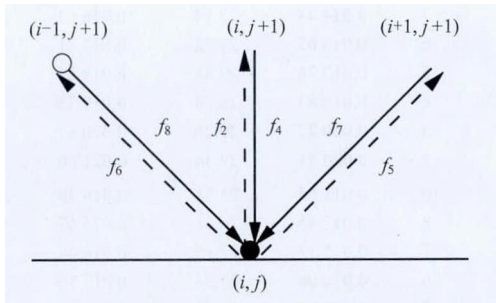


图 5 标准反弹格式示意图
Fig5 Standard bounce-back scheme

4.3 计算结果收敛判断依据

本文采用两个相邻时步宏观速度的相对误差来判断计算结果的收敛性，其计算公式如下：

$$err = \frac{\sqrt{\sum [u_x(r, t + \delta_t) - u_x(r, t)]^2 + [u_y(r, t + \delta_t) - u_y(r, t)]^2}}{\sqrt{\sum [u_x(r, t + \delta_t)^2 + u_y(r, t + \delta_t)^2}}} \quad (23)$$

给定一个计算收敛标准的小量 ε ，如果 $err < \varepsilon$ ，则表示计算结果收敛，可以终止计算；否则继续计算。

4.4 计算程序流程图

为了研究粗糙裂隙面的渗流特性，编制了格子 Boltzmann 方法的计算程序，其程序流程图如图 6 所示。

5 算法的验证

为验证本数值计算方法的可靠性，采用格子 Boltzmann 方法模拟了压力作用下的光滑平板裂隙流。模型中所有单位均为格子单位，裂隙长度取为 $L=400$ ，裂隙隙宽 b 分别取为 10、20、30、40、50、60，计算模型如图 7 所示。在宏观上，将模型的上、下方设置成不透水边界 ($u_x=u_y=0$)；左、右侧面设置成压力边界。为了保证在渗流过程中始终处于层流状态，故设置成较小的压力梯度，左边为流场入口 ($p_{in}=1.001/3$)，右边为流场出口 ($p_{out}=0.999/3$)。

在微观上，边界条件均设置成非平衡态外推格式。格子 Boltzmann 模型的参数分别取：时间步长 $\delta_t=1.0$ ，横向及纵向取为等格子步长 $\delta_x=\delta_y=1.0$ ，格子速度 $c=1.0$ ，格子声速 $c_s=1/\sqrt{3}$ ，弛豫时间 $\tau=1.0$ ，计算收敛标准取为 $\varepsilon=10^{-8}$ 。

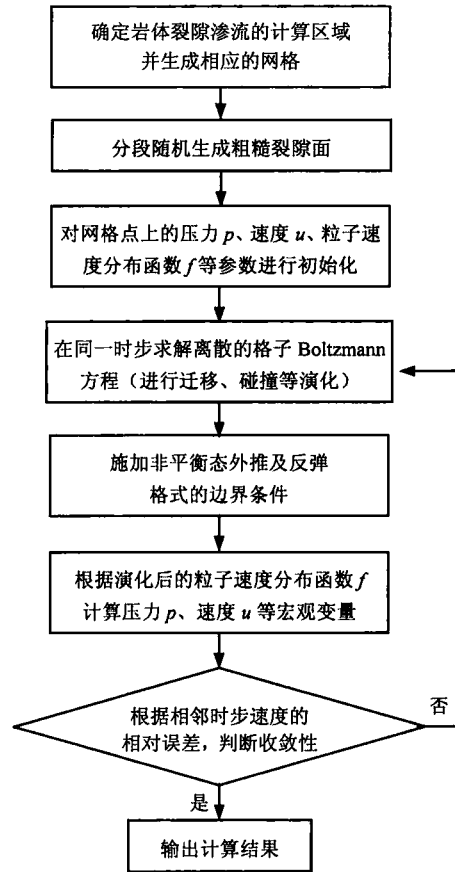


图 6 计算程序流程图
Fig.6 Flow chart of calculation program

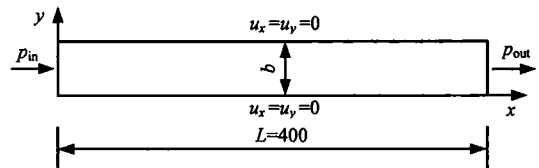


图 7 计算模型示意图
Fig.7 Schematic of calculation model

经计算得到裂隙隙宽 b 取为 10、20、30、40、50、60 时，雷诺数分别为 0.005、0.040、0.134、0.319、0.622、1.075，故裂隙的渗流均处于层流状态。图 8、9 分别为本文数值计算得到的裂隙渗流量与裂隙隙宽的关系及裂隙隙宽 $b=50$ 时裂隙断面渗流流速的分布。从图中可以发现，本文格子 Boltzmann 方法的数值解与立方定律的经典理论解非常吻合，充分证明了本计算方法的正确性。

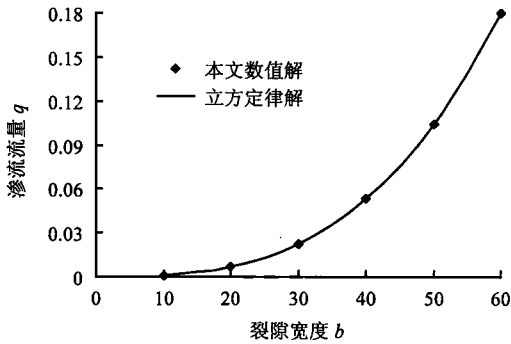


图8 裂隙渗流量与裂隙隙宽的关系图
Fig.8 Relationship between seepage quantity and fracture width

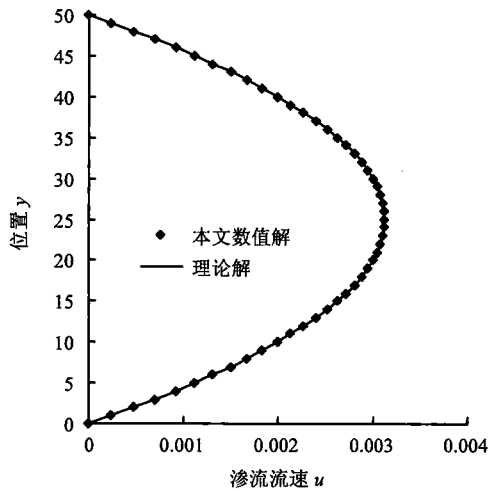


图9 b=50时断面渗流流速分布图
Fig.9 Distribution of seepage velocity at the fracture section when b is equal to 50

要准确地描述岩石粗糙裂隙面的渗流特性，必须对立方定律进行修正。

表2 粗糙裂隙渗流量数值解与解析解的对比
Table 2 Comparison of numerical solution and analytical solution for seepage quantity of rough fracture

| L_{max} | h_{max} | 本文数值解 | 平均隙宽 \bar{b} | 立方定律解 | 误差/% |
|-----------|-----------|----------|----------------|----------|-------|
| 5 | 5 | 0.016 87 | 28.18 | 0.018 61 | 10.34 |
| | 4 | 0.017 98 | 28.53 | 0.019 31 | 7.39 |
| | 3 | 0.019 62 | 29.13 | 0.020 56 | 4.80 |
| | 2 | 0.020 94 | 29.54 | 0.021 43 | 2.33 |
| | 7 | 0.014 44 | 27.14 | 0.016 63 | 15.20 |
| 10 | 6 | 0.016 05 | 27.72 | 0.017 71 | 10.31 |
| | 5 | 0.017 76 | 28.48 | 0.019 21 | 8.14 |
| | 4 | 0.018 83 | 28.74 | 0.019 73 | 4.81 |
| | 3 | 0.020 27 | 29.28 | 0.020 87 | 2.95 |
| | 2 | 0.020 71 | 29.34 | 0.021 00 | 1.39 |
| 15 | 10 | 0.011 65 | 25.58 | 0.014 39 | 23.50 |
| | 8 | 0.013 85 | 26.61 | 0.015 67 | 13.17 |
| | 7 | 0.015 17 | 27.15 | 0.016 64 | 9.69 |
| | 6 | 0.016 06 | 27.54 | 0.017 36 | 8.11 |
| | 5 | 0.017 65 | 28.29 | 0.018 84 | 6.74 |
| 20 | 4 | 0.019 04 | 28.81 | 0.019 88 | 4.41 |
| | 3 | 0.020 24 | 29.20 | 0.020 72 | 2.37 |
| | 2 | 0.021 18 | 29.55 | 0.021 47 | 1.33 |
| | 12 | 0.009 74 | 24.39 | 0.012 07 | 23.97 |
| | 10 | 0.011 91 | 25.37 | 0.013 59 | 14.10 |
| 20 | 8 | 0.013 36 | 26.07 | 0.014 73 | 10.24 |
| | 7 | 0.015 11 | 26.98 | 0.016 33 | 8.10 |
| | 6 | 0.016 47 | 27.57 | 0.017 43 | 5.82 |
| | 5 | 0.017 54 | 28.13 | 0.018 51 | 5.50 |
| | 4 | 0.019 07 | 28.76 | 0.019 79 | 3.79 |
| 20 | 3 | 0.019 87 | 29.00 | 0.020 29 | 2.09 |
| | 2 | 0.020 85 | 29.35 | 0.021 03 | 0.83 |

6 数值计算结果讨论

通过设定分段裂隙的 L_{max} 及 h_{max} 随机生成单侧粗糙裂隙面（如表 1 所示），计算参数、渗流场出、入口的压力、收敛标准与验证算例作相同的取值，而粗糙的裂隙面边界采用标准反弹处理方式，基于格子 Boltzmann 方法计算了压力作用下粗糙裂隙的渗流状态。将裂隙的平均隙宽 \bar{b} 代替均匀隙宽 b ，并采用立方定律对随机生成粗糙裂隙面的渗流情况进行了讨论，本文的数值解与立方定律解的渗流量对比情况如表 2 所示。

从表可以看出，粗糙裂隙的平均隙宽均在 24~30 之间，与本文光滑平板流相比可知，流体的流动均处于层流状态。在 L_{max} 一定的情况下， h_{max} 越大，裂隙面渗流量的数值解与立方定律解间的差别越大，当 $L_{max} \times h_{max} = 20 \times 12$ 时，两者间的误差达 23.97%。因此，裂隙面的粗糙程度对其渗流情况有较大的影响，将粗糙裂隙的平均隙宽 \bar{b} 代替均匀隙宽 b ，采用立方定律计算得到粗糙裂隙面的渗流特征与实际的渗流情况间存在较大的差距。由此可见，

对于层流状态下立方定律修正公式的统一形式（式（6））进行变换，得

$$A\delta^B = \frac{g\bar{b}^3 J}{12qv} - 1 \tag{24}$$

对式（24）两边取对数，并进行变换，得

$$\lg A + B \lg \delta = \lg \left[\frac{g\bar{b}^3 J}{12qv} - 1 \right] \tag{25}$$

为了求解系数 A 、 B ，将 $\lg \delta$ 作为自变量， $\lg \left[\frac{g\bar{b}^3 J}{12qv} - 1 \right]$ 作为应变量为简化，令 $C = \frac{g\bar{b}^3 J}{12qv} - 1$ ，

对表 2 中各个粗糙裂隙方案的计算结果进行曲线拟合，图 10 为相关数据的曲线拟合结果。从图中可以看出， $\lg \left[\frac{g\bar{b}^3 J}{12qv} - 1 \right]$ （即 $\lg C$ ）与 $\lg \delta$ 之间具有较好的

线性关系，相关系数 $R^2 = 0.874 2$ 。通过拟合曲线得到的相关参数，可以求得系数 $A = 46.946 2$ 、系数 $B = 1.230 5$ ，则粗糙裂隙渗流的修正立方定律可表示为

$$q = \frac{gb^{-3} J}{12\nu(1 + 46.946 2\delta^{1.2305})} \quad (26)$$

针对不同 L_{max} 及 h_{max} 随机生成的粗糙裂隙面方案，采用修正后的立方定律对裂隙面的渗流情况进行了分析计算，并将修正立方定律的计算结果与本文的数值计算结果及文献[11-12]修正公式解进行了对比，表 3 为相应计算结果的对比情况，由表可知，本文修正立方定律的计算结果要明显优于文献[11-12]的修正公式，尤其是在相对粗糙度较大的情况下。

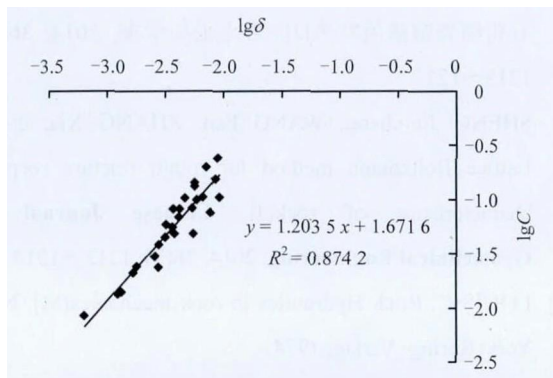


图 10 裂隙渗流量与相对粗糙度的拟合曲线图
Fig.10 Fitting curve of seepage quantity and relative roughness

图 11 为 $L_{max} \times h_{max} = 20 \times 10$ 时随机生成一侧光滑一侧粗糙的裂隙面，在压力 ($p_{in} = 1.001/3$, $p_{out} = 0.999/3$) 作用下，采用格子 Boltzmann 方法计算得到的渗流流速分布云图。从图中可以看出，粗糙裂隙面算例的渗流处于层流状态，且裂隙面的局部隙宽越宽，其断面的平均渗流速度越小，整条裂隙的渗流流速分布情况符合粗糙裂隙流的变化规律。

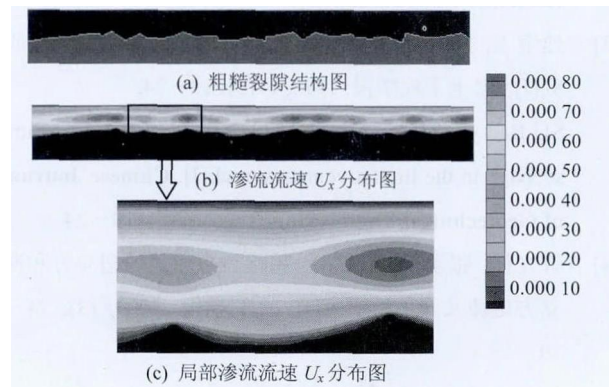


图 11 $L_{max} \times h_{max} = 20 \times 10$ 粗糙裂隙面渗流流速分布云图
Fig.11 Distribution of seepage velocity in rough fracture when $L_{max} \times h_{max} = 20 \times 10$

表 3 粗糙裂隙渗流量数值解与修正理论解的对比
Table 3 Comparison of numerical solution and modified analytical solution for seepage quantity of rough fracture

| L_{max} | h_{max} | δ | 本文数值解 | 本文修正解 | Lomize 解 | Louis 解 |
|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 5 | 5 | 0.009 23 | 0.016 87 | 0.015 95 | 0.018 51 | 0.018 36 |
| | 4 | 0.007 67 | 0.017 98 | 0.017 03 | 0.019 23 | 0.019 09 |
| | 3 | 0.005 49 | 0.019 62 | 0.018 87 | 0.020 51 | 0.020 41 |
| | 2 | 0.002 75 | 0.020 94 | 0.020 63 | 0.021 41 | 0.021 36 |
| | 7 | 0.008 66 | 0.014 44 | 0.014 40 | 0.016 55 | 0.016 42 |
| 10 | 6 | 0.006 63 | 0.016 05 | 0.015 92 | 0.017 65 | 0.017 54 |
| | 5 | 0.005 40 | 0.017 76 | 0.017 66 | 0.019 16 | 0.019 07 |
| | 4 | 0.003 74 | 0.018 83 | 0.018 68 | 0.019 71 | 0.019 64 |
| | 3 | 0.002 56 | 0.020 27 | 0.020 15 | 0.020 85 | 0.020 81 |
| | 2 | 0.001 32 | 0.020 71 | 0.020 67 | 0.020 99 | 0.020 97 |
| 15 | 10 | 0.007 23 | 0.011 65 | 0.012 38 | 0.013 87 | 0.013 78 |
| | 8 | 0.005 73 | 0.013 85 | 0.014 32 | 0.015 63 | 0.015 55 |
| | 7 | 0.005 85 | 0.015 17 | 0.015 18 | 0.016 60 | 0.016 51 |
| | 6 | 0.004 22 | 0.016 06 | 0.016 30 | 0.017 34 | 0.017 27 |
| | 5 | 0.004 11 | 0.017 65 | 0.017 72 | 0.018 81 | 0.018 74 |
| 20 | 4 | 0.003 12 | 0.019 04 | 0.019 02 | 0.019 86 | 0.019 81 |
| | 3 | 0.001 80 | 0.020 24 | 0.020 24 | 0.020 71 | 0.020 68 |
| | 2 | 0.001 23 | 0.021 18 | 0.021 16 | 0.021 46 | 0.021 44 |
| | 12 | 0.008 86 | 0.009 74 | 0.010 41 | 0.012 01 | 0.011 92 |
| | 10 | 0.005 67 | 0.011 91 | 0.012 43 | 0.013 55 | 0.013 48 |
| 20 | 8 | 0.004 65 | 0.013 36 | 0.013 73 | 0.014 70 | 0.014 64 |
| | 7 | 0.003 71 | 0.015 11 | 0.015 47 | 0.016 31 | 0.016 26 |
| | 6 | 0.003 22 | 0.016 47 | 0.016 64 | 0.017 41 | 0.017 36 |
| | 5 | 0.003 60 | 0.017 54 | 0.017 56 | 0.018 48 | 0.018 42 |
| | 4 | 0.002 78 | 0.019 07 | 0.019 04 | 0.019 77 | 0.019 73 |
| 20 | 3 | 0.001 68 | 0.019 87 | 0.019 86 | 0.020 28 | 0.020 25 |
| | 2 | 0.000 64 | 0.020 85 | 0.020 88 | 0.021 02 | 0.021 01 |

7 结 论

- (1) 基于格子 Boltzmann 方法，计算了压力作用下单裂隙面的渗流特征。结合光滑平板裂隙流的立方定律，验证了该计算方法的有效性和可靠性。
- (2) 对于粗糙裂隙面，其渗流特征在很大程度上取决于裂隙表面形貌，随着相对粗糙度的增加，裂隙渗流规律明显偏离立方定律。
- (3) 根据不同裂隙面方案渗流特征的数值计算结果，提出了考虑裂隙粗糙度的立方定律修正公式，并与已有的经典修正公式进行了对比。通过对比表明，随着相对粗糙度的增加，经典修正公式与数值解存在较大偏差，本文修正公式解与数值解更为吻合。
- (4) 由于本文粗糙裂隙面的基本形状比较简单且渗流流态也较为简单，所得立方定律修正公式的适用范围还有待于进一步的验证。

参 考 文 献

[1] 刘日成, 蒋宇静, 李博, 等. 基于逆 Broyden 秩 1 拟牛顿迭代的岩体裂隙网络渗流特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 219-228.
LIU Ri-cheng, JIANG Yu-jing, LI Bo, et al. A study of hydraulic properties of rock fracture networks based on rank-one inverse Broyden quasi-Newton method[J]. Rock

- and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 219–228.
- [2] 陈益峰, 周创兵, 盛永清. 考虑峰后力学特性的岩石节理渗流广义立方定律[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1825–1831.
CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing, SHENG Yong-qing. A generalized cubic law for seepage flow through rock joints considering post-peak mechanical response[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1825–1831.
- [3] 速宝玉, 詹美礼, 赵礼. 仿天然岩体裂隙渗流的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 19–24.
SU Bao-yu, ZHAN Mei-li, ZHAO Jian. Study on fracture seepage in the limitative nature rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(5): 19–24.
- [4] 许光祥, 张永兴, 哈秋龄. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J]. 水利学报, 2003, (3): 74–79.
XU Guang-xiang, ZHANG Yong-xing, HA Qiu-ling. Super-cubic and sub-cubic law of rough seepage and its experiment study[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, (3): 74–79.
- [5] 柴军瑞, 仵彦卿. 变隙宽裂隙的渗流分析[J]. 勘察科学技术, 2000, (3): 39–41.
CHAI Jun-rui, WU Yan-qing. Analysis of seepage through fracture network with variable apertures[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2000, (3): 39–41.
- [6] 徐维生, 陈兴周, 李娟娟. 岩体粗糙裂隙渗流研究[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(2): 218–222.
XU Wei-sheng, CHEN Xing-zhou, LI Juan-juan. Research on seepage in coarse fractures of rock mass[J]. **Journal of Xi'an University of Technology**, 2010, 26(2): 218–222.
- [7] 段慕白, 李皋, 孟英峰, 等. 不同节理粗糙度系数的裂隙渗流规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 41–44.
DUAN Mu-bai, LI Gao, MENG Ying-feng, et al. Research on regulation of fracture seepage in different joint roughness coefficients[J]. **Journal of Water Resources & Water Engineering**, 2013, 24(5): 41–44.
- [8] 刘晓丽, 王恩志, 王思敬, 等. 裂隙岩体表征方法及岩体水力学特性研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(9): 1814–1821.
LIU Xiao-li, WANG En-zhi, WANG Si-jing, et al. Representation method of fractured rock mass and its hydraulic properties study[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(9): 1814–1821.
- [9] 张霞, 李凤滨, 盛金昌, 等. 格子 Boltzmann 方法模拟土体渗流场研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(10): 61–64.
ZHANG Xia, LI Feng-bin, SHENG Jin-chang, et al. Lattice Boltzmann method for simulation seepage field of soil[J]. **Water Resources and Power**, 2012, 30(10): 61–64.
- [10] 盛金昌, 王璠, 张霞, 等. 格子 Boltzmann 方法研究岩石粗糙裂隙渗流特性[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1213–1217.
SHENG Jin-chang, WANG Fan, ZHANG Xia, et al. Lattice Boltzmann method for rough fracture seepage characteristics of rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(7): 1213–1217.
- [11] LOUIS C. Rock Hydraulics in rock mechanics[M]. New York: Spring-Verlag, 1974.
- [12] LOMIZE G M. Flow in fractured rock[M]. Moscow City: Gosemergoizdat, 1951.
- [13] AMADEI B, ILLANGASEKARE T. A mathematical model for flow and solute transport in non-homogeneous rock fracture[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1994, 31(6): 719–731.
- [14] 郭照立, 郑楚光. 格子 Boltzmann 方法的原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
GUO Zhao-li, ZHENG Chu-guang. Theory and applications of lattice Boltzmann method[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [15] 何雅玲, 王勇, 李庆. 格子 Boltzmann 方法的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
HE Ya-ling, WANG Yong, LI Qing. Lattice Boltzmann method: theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [16] QIAN Y H, D'HUMIÈRES D, LALLEMAND P. Lattice BGK model for Navier-Stokes equation[J]. **Europhysics Letters**, 1992, 17(6): 479–484.
- [17] GUO Z L, ZHENG C G, SHI B C. Non-equilibrium extrapolation method for velocity and pressure boundary conditions in the lattice Boltzmann method[J]. **Chinese Physics**, 2002, 11(4): 366–374.