



基于 MRT-LBM 的分形裂隙网络渗流数值模拟

樊火, 郑宏*

中国科学院武汉岩土力学所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071

* E-mail: hzheng@whrsm.ac.cn

收稿日期: 2013-04-23; 接受日期: 2013-09-11

国家自然科学基金(批准号: 11172313)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2011CB013505)和国家杰出青年科学基金(批准号: 50925933)资助项目

摘要 单一裂隙渗流规律的研究是岩体裂隙网络渗流规律及渗流场与应力场耦合作用研究的基础和关键. 由分形插值算法重构天然粗糙裂隙面, 用 Lattice Boltzmann 方法的 MRT-LBM 模型, 在岩石粗糙裂隙表面微观结构的层次上, 对两种具有不同垂直比例因子的粗糙裂隙面进行了数值模拟, 得到优势渗流路径长度后, 预估了渗透率. 针对难以找到优势渗流路径的天然裂隙网络, 在数值试验的背景下, 提出了一个新的预估渗透率的截面渗透率加权法. 该算法不具体针对某条优势路径或某些较优势路径, 而是考虑每个截面对阻碍流体通过的贡献. 接着对两组基于图像处理的天然裂隙网络进行了数值模拟, 预估了各自的渗透率并再现了偏流现象, 发现优势渗流路径在演化初期已具雏形, 以后逐渐被强化. 此外, 使用该方法可以清楚地观察到渗流网络中的局部流体流动细节, 局部分支路径回流和局部漩涡可能同时存在. 证明了该方法的有效性, 并为后期的跨尺度渗流模拟奠定基础.

关键词
MRT-LBM
分形插值
裂隙网络
渗流模拟
微观机理

单一裂隙是构成岩体裂隙网络的基本元素, 单一裂隙渗流规律的研究也就成了岩体裂隙网络渗流规律及裂隙岩体渗流场与应力场耦合作用研究的基础和关键. 历史上, 研究单一裂隙渗流规律采用了光滑平板裂隙^[1]、仿天然裂隙^[2]等进行试验研究, 人们发现了偏流^[3]、沟槽流^[4, 5]等现象, 提出了等效水力隙宽^[6]、裂隙粗糙度^[7]、面积接触率^[8]、单裂隙曲折率^[9]等概念来描述单一裂隙的渗流特征, 加深了对这一现象的认识, 也取得了相当多的研究成果, 包括经典的立方定律及其各种修正形式^[10, 11], 大致可概括为次立方定律、立方定律和超立方定律^[12]以及可以考虑裂隙法向变形的广义立方定律^[13]. 然而, 各种经验公式之间存在着巨大的差异, 迄今为止, 对天然粗糙单

裂隙渗流机理和规律的认识远未统一.

就裂隙网络渗流而言, 王恩志^[14]采用图论描述裂隙网络的基本构成, 提出了相应的裂隙网络渗流数值模型. Chai 和 Xu^[15]建立了一个在坝基裂隙网络内非稳定渗流场和应力场耦合分析的数学模型. 值得一提的是, 基于 Zheng 等人^[16]提出的基于连续介质无压渗流 Signorini 型不等式提法的思想, 姜清辉和叶祖洋等人^[17-20]提出了求解裂隙网络稳定与非稳定渗流问题的变分不等式方法, 并成功应用于求解裂隙网络稳定与非稳定无压渗流问题, 最近又将其推广到求解三维情形下的裂隙网络无压渗流问题中^[21].

单一裂隙渗流的研究偏重于唯象论的试验研究,

英文版发表信息: Fan H, Zheng H. MRT-LBM-based numerical simulation of seepage flow through fractal fracture networks. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 3115-3122, doi: 10.1007/s11431-013-5402-3

而裂隙网络渗流的数值解法可采用有限差分法^[22]、边界元法^[23]、无网格法^[24], 但目前主要还是有限元法. 值得注意的是, 王均星等人^[25]、Jiang 等人^[26]分别将数值流形法应用到连续介质的二维和三维无压渗流问题. 因为数值流形法是一种能统一连续介质和离散介质的先进算法, 相信该方法也能应用到裂隙网络渗流模拟中.

总而言之, 无论是单一裂隙渗流还是裂隙网络渗流, 针对渗流机理的数值模拟研究相当很少, 尤其是基于裂隙细观结构的数值模拟更是如此. 分形几何学为裂隙粗糙表面的定量描述等问题提供了一种全新的方法. 大量研究表明^[27-30], 运用分形几何方法定量描述岩石节理的表面形态具有明显的优越性. 而格子 Boltzmann 方法从微观动力学出发, 自底向上对宏观物理系统建立演化模型, 已被成功应用到多孔介质领域^[31, 32], 能方便处理不规则几何边界, 是对于基于岩石裂隙细观结构的渗流模拟的不二选择. 相关研究表明, 其应用广泛的单松弛模型(SRT-LBM)数值稳定性差且存在渗透率与黏性相关等不足, 而多松弛模型(MRT-LBM)则能有效加以克服^[33].

本文拟就从微观角度对裂隙渗流的机理进行研究, 首先用分形插值算法重构天然粗糙裂隙面, 再用 MRT-LBM 直接模拟其中的渗流运动, 提出计算渗透率的截面渗透率加权法, 进而对两种天然裂隙进行渗流模拟, 并预估其渗透率.

本文结构安排如下: 第 1 节简要介绍二维九速(D2Q9)格子 Boltzmann 方法的 MRT-LBM 模型; 第 2 节简单描述重构裂隙面的分形插值算法; 第 3 节分别对两组具有不同垂直比例因子的重构裂隙进行数值模拟并预估其渗透率; 第 4 节分别对两组具有不同内部孔隙裂隙结构的天然裂隙网络进行直接数值模拟, 并用提出的截面渗透率加权法预估其渗透率; 第 5 节对全文进行总结.

1 MRT-LBM 模型

D2Q9 格子 Boltzmann 模型演化方程的一般形式为

$$f_{\alpha}^*(\mathbf{r}, t) = f_{\alpha}(\mathbf{r}, t) - \mathbf{A}[f_{\alpha}(\mathbf{r}, t) - f_{\alpha}^{eq}(\mathbf{r}, t)], \quad (1)$$

$$f_{\alpha}(\mathbf{r} + \mathbf{e}_{\alpha}\delta_t, t + \delta_t) = f_{\alpha}^*(\mathbf{r}, t), \quad (2)$$

其中 f_{α} 为分布函数, $\mathbf{r}(x, y)$ 为位置矢量, \mathbf{e}_{α} 为离散速度矢量, t 为时间, \mathbf{A} 为松弛对角矩阵, f_{α}^{eq} 为平衡态分布函数. $\mathbf{e}_0=0$, 其他离散速度矢量为^[34]

$$\mathbf{e}_{\alpha} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \cos[(\alpha-1)\pi/2] \\ \sin[(\alpha-1)\pi/2] \end{pmatrix} c, & \alpha = 1, 2, 3, 4, \\ \sqrt{2} \begin{pmatrix} \cos[(\alpha-5)\pi/2 + \pi/4] \\ \sin[(\alpha-5)\pi/2 + \pi/4] \end{pmatrix} c, & \alpha = 5, 6, 7, 8, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $c = \delta_x / \delta_t$. 对于不可压流体, 平衡态分布函数采用:

$$f_{\alpha}^{eq} = \omega_{\alpha} \left\{ \rho + \rho_0 \left[\frac{3\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u}}{c^2} + \frac{9(\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u})^2}{2c^4} - \frac{3\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}}{2c^2} \right] \right\}, \quad (4)$$

其中 ρ 为流体密度, ρ_0 为流体平均密度, 权重系数 $\omega_0=4/9$, $\omega_{i=1,2,3,4}=1/9$, $\omega_{i=5,6,7,8}=1/36$. 并且, 系统声速为 $c_s = c/\sqrt{3}$, 压强为 $p = c_s^2 \rho$, 运动黏性系数为 $\nu = (\tau - 0.5)c_s^2 \delta_t$.

宏观密度和速度定义为

$$\rho = \sum_{\alpha} f_{\alpha}, \quad \rho \mathbf{u} = \sum_{\alpha} f_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}. \quad (5)$$

对于松弛对角矩阵 \mathbf{A} , 其形式为

$$\mathbf{A} = \text{diag}(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8). \quad (6)$$

显然, 当取 $a_{\alpha}=1/\tau$ 时, D2Q9 格子 Boltzmann 模型演化方程的一般形式退化为 SRT-LBM. Lallemand 和 Luo^[35]引入一个速度矩列向量和一个分布函数列向量:

$$\begin{cases} \mathbf{m} = (\rho, e, \varepsilon, j_x, q_x, j_y, q_y, p_{xx}, p_{yy})^T, \\ \mathbf{f} = (f_0, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8)^T, \end{cases} \quad (7)$$

其中 ρ 为流体密度, e 为内能, ε 与内能 e 的平方有关, j_x 和 j_y 为动量通量分量, q_x 和 q_y 为内能通量分量, p_{xx} 和 p_{yy} 分别为应力张量的对角线和非对角线分量.

MRT-LBM 的演化方程可表示为

$$\begin{cases} f_{\alpha}^*(\mathbf{r}, t) = f_{\alpha}(\mathbf{r}, t) - M_{ij}^{-1} S_{ij} [m_j - m_j^{eq}(\mathbf{r}, t)], \\ f_{\alpha}(\mathbf{r} + \mathbf{e}_{\alpha}\delta_t, t + \delta_t) = f_{\alpha}^*(\mathbf{r}, t), \end{cases} \quad (8)$$

其中 f_α^* 为碰撞后的分布函数, \mathbf{M} 为 \mathbf{f} 到 \mathbf{m} 的转换矩阵, 即 $\mathbf{m}=\mathbf{M}\mathbf{f}$, 其形式为

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} \rho \\ e \\ \varepsilon \\ j_x \\ q_x \\ j_y \\ q_y \\ p_{xx} \\ p_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -4 & -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & -2 & -2 & -2 & -2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 2 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \\ f_7 \\ f_8 \end{bmatrix} = \mathbf{M}\mathbf{f}, \quad (9)$$

其中 \mathbf{m}^{eq} 为平衡态速度矩列向量, 其形式为

$$\mathbf{m}^{eq} = (\rho, -2\rho + 3(u^2 + v^2), \rho - 3(u^2 + v^2), \rho u, -u, \rho v, -v, u^2 - v^2, uv)^T. \quad (10)$$

松弛矩阵 \mathbf{S} 为

$$\mathbf{S} = \text{diag}(s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8). \quad (11)$$

为保证碰撞前后质量和动量守恒应取 $s_0=s_3=s_5=0$, 取 $s_7=s_8=1/\tau$, 运动黏性系数表达式不变, s_1, s_2, s_4, s_6 为比 1 稍大的自由松弛参数. 本文取 $s_1=s_2=1.4, s_4=s_6=1.2$. 若取 $s_1=s_2=s_4=s_6=s_7=s_8=1/\tau$, MRT-LBM 回归到 SRT-LBM.

2 裂隙面分形插值重构

一般函数难以描述天然裂隙面粗糙不平、曲折迂回的复杂形态, 但天然裂隙面具有很好的统计自相似或自仿射特征, 采用分形几何方法对其进行定量描述具有明显的优越性. 重构天然裂隙面的分形插值算法^[36]简介如下.

令 $I=[a, b], J=[c, d], D=\{(x, y): a \leq x \leq b, c \leq y \leq d\}$, 用 $\Delta x, \Delta y$ 剖分 D :

$$\begin{cases} a = x_0 < x_1 < \dots < x_N = b, \\ c = y_0 < y_1 < \dots < y_M = d. \end{cases} \quad (12)$$

给定一组数 $\{(x_i, y_i, z_{ij}), i=0, 1, \dots, N, j=0, 1, \dots, M\}$, 构造分形插值函数 $f: D \rightarrow R$, 满足

$$f(x_i, y_j) = z_{ij}, \quad i=0, 1, \dots, N, j=0, 1, \dots, M. \quad (13)$$

考虑区域 $K=D \times [h_1, h_2] (-\infty < h_1 < h_2 < +\infty)$, 对 $(c_1, d_1, e_1), (c_2, d_2, e_2) \in K$ 定义距离

$$d((c_1, d_1, e_1), (c_2, d_2, e_2)) = \max\{|c_1 - c_2|, |d_1 - d_2|, |e_1 - e_2|\}. \quad (14)$$

记 $I_n=[x_{n-1}, x_n], J_m=[y_{m-1}, y_m], D_{n,m}=I_n \times J_m, n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{1, 2, \dots, M\}$.

又令 $\Phi_n: I \rightarrow I_n, \Psi_m: J \rightarrow J_m$ 为压缩映射, 且满足:

$$\begin{cases} \Phi_n(x_0) = x_{n-1}, & \Phi_n(x_N) = x_n, \\ \Psi_m(y_0) = y_{m-1}, & \Psi_m(y_M) = y_m, \\ |\Phi_n(c_1) - \Phi_n(c_2)| < k_1 |c_1 - c_2|, \\ |\Psi_m(d_1) - \Psi_m(d_2)| < k_2 |d_1 - d_2|, \end{cases} \quad (15)$$

其中 $c_1, c_2 \in I, d_1, d_2 \in J, 0 \leq k_1 < 1, 0 \leq k_2 < 1$. 假定 $L_{n,m}: D \rightarrow R^2$ 是压缩映射.

$$L_{n,m}(x, y) = (\Phi_n(x), \Psi_m(y)), F_{n,m}: K \rightarrow [h_1, h_2] \text{ 连续,}$$

令

$$\begin{cases} F_{n,m}(x, y, z) = e_{n,m}x + f_{n,m}y + g_{n,m}xy + s_{n,m}z + k_{n,m}, \\ n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{1, 2, \dots, M\}, \end{cases} \quad (16)$$

且满足:

$$\begin{cases} F_{n,m}(x_0, y_0, z_{0,0}) = z_{n-1, m-1}, \\ F_{n,m}(x_N, y_0, z_{N,0}) = z_{n, m-1}, \\ F_{n,m}(x_0, y_M, z_{0,M}) = z_{n-1, m}, \\ F_{n,m}(x_N, y_M, z_{N,M}) = z_{n, m}. \end{cases} \quad (17)$$

对任意的 $(c, d) \in D$ 和 $z_1, z_2 \in [h_1, h_2]$, 有

$$\begin{cases} |F_{n,m}(c, d, z_1) - F_{n,m}(c, d, z_2)| \leq k_3 |z_1 - z_2|, \\ n \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{1, 2, \dots, M\}, 0 \leq k_3 < 1. \end{cases} \quad (18)$$

根据矩形域上的分形插值和迭代函数系统原理, 求得分形插值显函数表达式为

$$f(x, y) = e_{n,m} \Phi_n^{-1}(x) + f_{n,m} \Psi_m^{-1}(y) + g_{n,m} \Phi_n^{-1}(x) \Psi_m^{-1}(y) + s_{n,m} f(\Phi_n^{-1}(x), \Psi_m^{-1}(y)) + k_{n,m}, \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} \Phi_n^{-1}(x) = (x - x_{n-1}) \frac{x_N - x_0}{x_n - x_{n-1}} + x_0, \\ x \in [x_{n-1}, x_n], n \in \{1, 2, \dots, N\}, \\ \Psi_m^{-1}(y) = (y - y_{m-1}) \frac{y_M - y_0}{y_m - y_{m-1}} + y_0, \\ y \in [y_{m-1}, y_m], m \in \{1, 2, \dots, M\}, \end{cases} \quad (20)$$

其中 $e_{n,m}, f_{n,m}, g_{n,m}, k_{n,m}$ 由(16)和(17)式求得; $s_{n,m}$ 为垂直

比例因子.

在某 50 mm×50 mm 的裂隙表面, x, y 方向间隔均为 10 mm, 测得一组数据, 用线性插值重构裂隙面和具有不同垂直比例因子 $s_{n,m}$ 的分形插值重构裂隙面分别如图 1~3 所示.

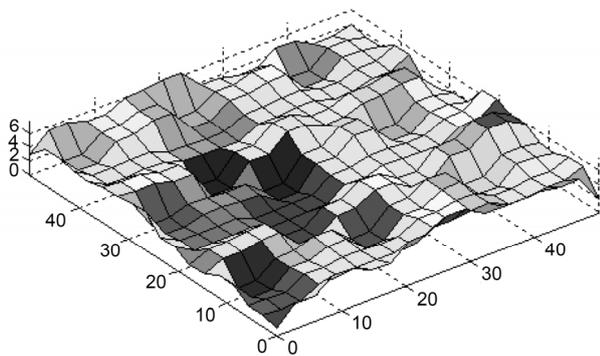


图 1 50 mm×50 mm 线性重构裂隙面

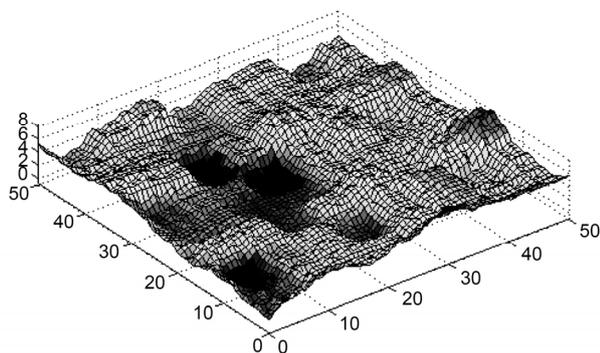


图 2 50 mm×50 mm 分形插值重构裂隙面($s_{n,m}=0.25$)

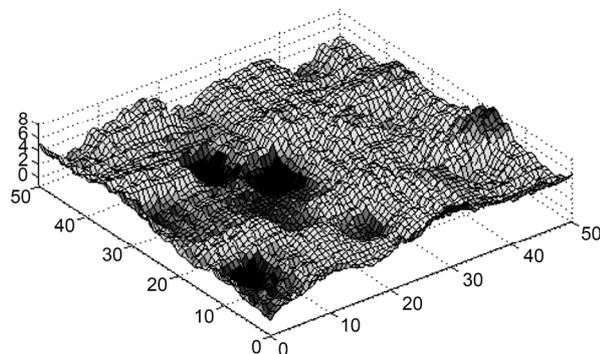


图 3 50 mm×50 mm 分形插值重构裂隙面($s_{n,m}=0.25$)

3 分形重构裂隙渗流模拟

在图 2 和 3 中取 $y=25$ mm 处截面构成裂隙渗流通道如图 4 和 5 所示, 裂隙宽度约为 1 mm. 裂隙通道进出口均向外延长 1 倍进出口宽度实现进出口稳定加压. 对 2 个具有不同垂直比例因子的分形裂隙渗流通道进出口取不同的压强 p , 形成压强差 Δp 驱动的渗流.

数值模拟中均取无量纲数参数, 进出口处格子数 $D=11$, x 方向格子数 $L=573$, 取 $\delta_x=\delta_y=1$, 流体密度 $\rho=1$, 格子动力黏性系数和运动黏性系数相等 $\mu=\nu=0.01$. 优势渗流路径长 L_s , 压力梯度 $G=\Delta p/L_s$, 为保证数值稳定由 $u_{\max}=GD^2/(8\nu)$ 估算进口处的最大流速以控制进出口压强差. 由 $\Omega=1/(3\nu+0.5)$ 确定 MRT-LBM 中的松弛参数 $s_7=s_8=1.8868$, 由模拟得进口最大流速 U_{\max} 确定雷诺数 $Re=U_{\max}D/\nu$, 进口流量 Q 采用数值积分计算. 渗透率定义为

$$K = \frac{\mu Q}{GA} = \frac{\mu \int u_{in}(y) dy}{GA}. \quad (21)$$

另外, 进出口采用 Inamuro 等人^[37]提出的反滑移速度边界处理格式, 上下分形表面采用反弹处理格式. 采用关于速度场的稳定判断标准为

$$\frac{\sqrt{\sum (u^{(n+1)} - u^{(n)})^2}}{\sqrt{\sum (u^{(n+1)})^2}} < 1.0 \times 10^{-9}. \quad (22)$$

从表 1 中可以看出, 分形裂隙渗 I 的渗透率稳定在 $K_1=6.7688$ 附近; 从表 2 可以看出, 分形裂隙渗 II



图 4 分形重构裂隙 I($s_{n,m}=0.25$)



图 5 分形重构裂隙 II($s_{n,m}=0.35$)

表 1 重构分形裂隙渗 I 数值模拟参数

Δp	U_{\max}	Re	K
0.004/3	0.00131276	1.444036	6.77654260
0.005/3	0.00163935	1.803285	6.75936402
0.006/3	0.00196512	2.161632	6.77060807
$D=11 \quad L_s=947 \quad \nu=0.01 \quad s_7=s_8=1.8868$			

的渗透率稳定在 $K_2=12.0017$ 附近. 显然, 分形裂隙渗 II 的渗透能力远大于分形裂隙渗 I, 从图 4 和 5 可以看出, 分形裂隙渗 I 的裂隙突起高度明显高于分形裂隙渗 II, 且突起出现得要频繁, 这是产生渗透率差异的主因.

4 天然裂隙网络渗流模拟

2007 年, 崔冰^[38]分别用可见光和紫外光照射得到了某岩样的天然裂隙照片如图 6(a)和(b)所示. 对其进行预处理, 并去掉明显的渗流孤立点, 得到如图 7 所示的裂隙内部结构.

2008 年, 彭韬和王卫星^[39]用图像分割技术得到图 8 所示的具有分形特性的天然裂隙.

对于类似图 7 和 8 这样的天然裂隙网络, 由于内部孔隙裂隙结构复杂, 难以确定优势渗流路径的长度, 水力梯度不易计算, 本文采用如下策略.

当 MRT-LBM 模拟稳定后, 对于任意孔隙裂隙介质数值模拟试样, 建立沿渗流方向各断面的平均

表 2 重构分形裂隙渗 II 数值模拟参数

Δp	U_{max}	Re	K
0.004/3	0.00205928	2.265208	11.99107627
0.005/3	0.00274311	3.017421	12.01420060
0.006/3	0.00342519	3.767709	11.99989292
$D=11 \quad L_s=802 \quad \nu=0.01 \quad s_7=s_8=1.8868$			

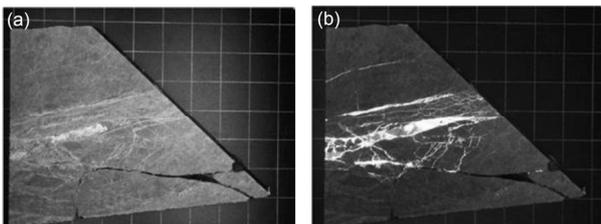


图 6 某岩样裂隙照片
(a) 可见光照片; (b) 紫外光照片



图 7 天然裂隙网络 I

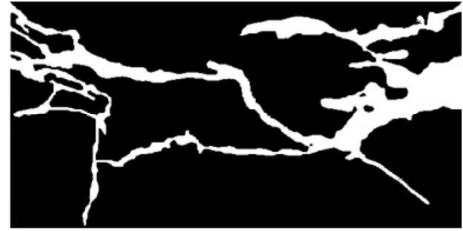


图 8 天然裂隙网络 II

压强曲线, 因为每个断面的孔隙结构不同, 对流体流动的阻碍作用就不同, 可以想见, 该曲线必定呈非线性, 如图 9 所示.

每个断面的渗透率为

$$K_i = \frac{\mu Q}{G_i A_i}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (23)$$

在此基础上建立如下的渗透率表达式

$$K = \frac{\sum K_i G_i A_i}{\sum G_i A_i}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (24)$$

其中 K 为数值模拟试样的平均渗透率, K_i, G_i, A_i 分别为第 i 个断面的渗透率, 孔隙面积和压强梯度且 $G_i=(p_i-p_{i+1})/\Delta x_i$.

先用 MRT-LBM 对天然裂隙网络 I 中的渗流进行直接数值模拟, 网格规模为 610×350 , 由(23)和(24)式估算其渗透率.

MRT-LBM 对图 7 所示的数值试样进行了很好的渗流模拟. 在计算渗透率时, 由于有些流体充满孔隙后其速度可能很快稳定下来后, 不参与或在很低程度上参与以后的流场的调整, 因此, 在进行断面平均压强统计时设一个阈值不考虑这些孔隙. 天然裂隙网络 I 的断面平均压强如图 10 所示, 渗透率见表 3.

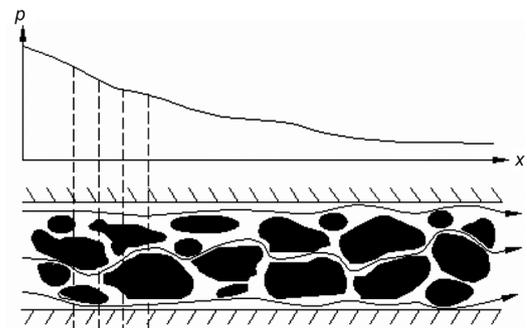


图 9 孔隙裂隙介质沿渗流方向的断面平均压强曲线

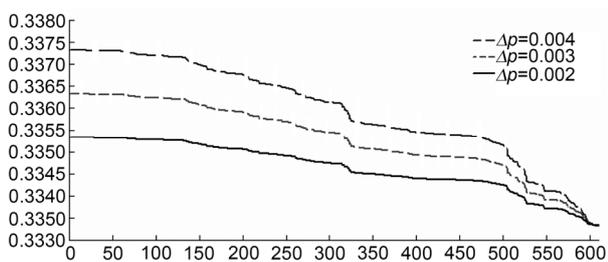


图 10 天然裂隙网络 I 的断面平均压强曲线

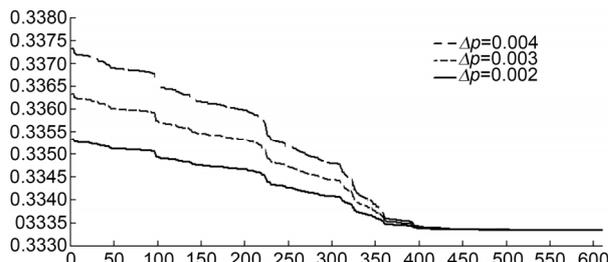


图 12 天然裂隙 II 的断面平均压强曲线

表 3 天然裂隙网络 I 数值模拟参数

Δp	U_{max}	Q	K
0.002	0.00313283	0.213233	5.19386
0.003	0.00457213	0.306757	5.19377
0.004	0.00593858	0.393527	5.19383

表 4 天然分形裂隙 II 数值模拟参数

Δp	U_{max}	Q	K
0.002	0.00075817	0.034420	1.85471
0.003	0.00117470	0.051391	1.85467
0.004	0.00161243	0.068171	1.85463

稳定时的流场如图 11 所示, 图 11(a)中用蓝色阴影表示低速度, 红色阴影表示高速度, 可以看出明显的优势渗流路径, 优势路径是随演化逐渐被强化的. 用红色箭头表示流体在各个渗流通道中的流动方向, 在局部放大图 11(b)中能发现许多流动细节. 局部分支路径的回流和局部的漩涡同时存在.

再用 MRT-LBM 对天然裂隙网络 II 中的渗流进行直接数值模拟, 网格规模为 610×310 , 由(23)和(24)式估算其渗透率.

同样, MRT-LBM 对该数值试样也进行了很好的渗流模拟. 同前, 统计断面平均压强时设一个阈值不考虑某些孔隙的影响. 在进行天然裂隙 II 的断面平均压强如图 12 所示, 渗透率见表 4.

稳定时的渗流场如图 13 所示, 图 13(a)中用蓝色阴影表示低速度, 红色阴影表示高速度, 可以看出明显的优势渗流路径, 优势路径是随演化逐渐形成的. 用红色箭头表示流体在各个渗流通道中的流动方向,

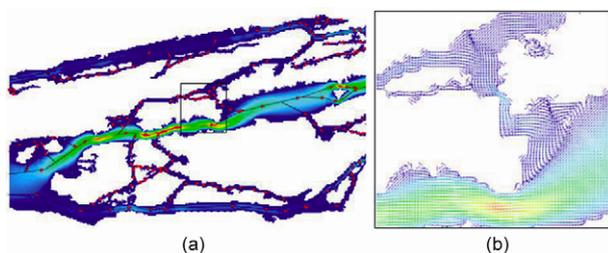


图 11 天然裂隙网络 I 的优势渗流路径
(a) 渗流场; (b) 局部放大

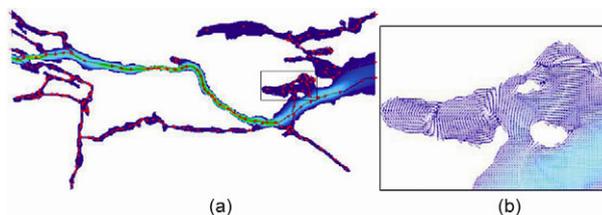


图 13 天然裂隙 II 的优势渗流路径
(a) 渗流场; (b) 局部放大

在局部放大图 13(b)中能发现许多流动细节. 局部分支路径回流和局部漩涡同时存在.

5 结论

格子 Boltzmann 方法的 MRT-LBM 模型具有良好的数值稳定性且能保证介质的渗透率与格子的黏性系数无关, 这与渗透率的物理意义相一致. 通过对具有两种不同垂直比例因子的分形重构裂隙渗流的直接数值模拟发现, 均采用优势渗流路径长度计算压强梯度, 裂隙突起的高度和出现的频繁是产生渗透率差异的主因. 由于天然裂隙网络难以找到优势渗流路径的长度, 在数值试验的背景下, 提出一个新的预估渗流率的截面渗透率加权法. 通过对两种天然裂隙网络的直接数值模拟发现, 优势渗流路径在模拟演化的初期就已具雏形, 随后各渗流分支会向优势渗流路径补充流量, 优势渗流路径逐渐被强化. 从局部的流体流动细节可以看出, 裂隙网络渗流内部

极为复杂, 局部分支路径的回流和局部的漩涡可能同时存在. 进一步证明, 流动的复杂性与裂隙网络内部结构的复杂性呈正相关. 天然条件下, 裂隙网络由导水裂隙和阻水裂隙的交错配置所构成, 由于阻水裂隙的存在, 造成地下水流的不连续^[40], 通过基于裂隙

微观结构的渗流直接数值模拟, 可以发现流体在导水裂隙中形成纵横交错的水网, 具有盲端的裂隙被水充满后会在较低程度上参与流量交换. 这些结论对孔隙裂隙介质中污染物运移、孔隙裂隙介质注浆加固、堤坝防渗排渗等具有一定的参考价值和指导意义.

参考文献

- 1 Lomize G M. Flow in fractured rock (in Russian). Gosemergoizdat, Moscow, 1951, 127-129
- 2 速宝玉, 詹美礼, 赵坚. 仿天然岩体裂隙渗流的实验研究. 岩土工程学报, 1995, 17: 19-24
- 3 田开铭. 裂隙水交叉流的水力特性. 地质学报, 1986, 2: 202-214
- 4 Tsang Y W, Tsang C F Channel model of flow through fractured media. Water Resour Res, 1987, 23: 467-479
- 5 Dahan O, Nativ R, Adar E M, et al. On fracture structure and preferential flow in unsaturated chalk. Ground Water, 2000, 38: 444-451
- 6 Barton, Bandiss, Bakhtark. Strength deformation and conductivity coupling of rock joints. Int J Rock Mech Mining Sci Geomech Abstracts, 1985, 22: 121-140
- 7 Louis C. Rock Hydraulics in Rock Mechanics. York: Springer-New Verlag, 1974
- 8 Iwai K. Fundamental Studies of Fluid Flow Through a Single Fracture. Berkely: University of California, 1976
- 9 杨米加, 陈明熊, 贺永年, 等. 单裂隙曲折率对流体渗流过程的影响. 岩土力学, 2001, 22: 78-82
- 10 王瑗, 速宝玉. 单裂隙面渗流特性及等效水力隙宽. 水科学进展, 2002, 13: 61-68
- 11 张文杰, 周创兵, 李俊平, 等. 裂隙岩体渗流特性物模试验研究进展. 岩土力学, 2005, 26: 1517-1524
- 12 许光祥, 张永兴, 哈秋龄, 等. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究. 水利学报, 2003, 3: 74-79
- 13 周创兵, 熊文林. 岩石节理的渗流广义立方定律. 岩土力学, 1996, 17: 1-7
- 14 王恩志. 岩体裂隙的网络分析及渗流模型. 岩石力学与工程学报, 1993, 12: 214-221
- 15 Chai J R, Xu W S. Coupling analysis of unsteady seepage and stress fields in discrete fractures network of rock mass in dam foundation. Sci China Tech Sci, 2011, 54(Suppl 1): 133-139
- 16 Zheng H, Liu D F, Lee C F, et al. A new formulation of Signorini's type for seepage problems with free surfaces. Int J Numer Meth Eng, 2005, 64: 1-16
- 17 姜清辉, 叶祖洋, 姚池, 等. 复杂裂隙网络无压渗流分析的变分不等式提法. 中国科学: 技术科学, 2012, 42: 1339-1350
- 18 Jiang Q H, Ye Z Y, Yao C, et al. A new variational inequality formulation for unconfined seepage flow through fracture networks. Sci China Tech Sci, 2012, 55: 3090-3101
- 19 叶祖洋, 姜清辉, 姚池, 等. 岩体裂隙网络非稳定渗流分析与数值模拟. 岩土力学, 2013, 34: 1171-1178
- 20 Jiang, Q H, Yao C., Ye Z Y, et al. Seepage flow with free surface in fracture networks. Water Resour Res, 2013, 49: 176-186
- 21 Yao C, Jiang Q H, Wei W, et al. The variational inequality formulation for unconfined seepage through three-dimensional dense fracture networks. Sci China Tech Sci, 2013, 56: 1241-1247
- 22 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. 岩土力学, 2011, 32: 3448-3454
- 23 李新强, 陈祖煜. 三维裂隙网络渗流计算的边界元法及程序. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4: 81-87
- 24 李晓春, 陈剑平, 石丙飞, 等. 交叉裂隙渗流无网格法初探. 岩土力学, 2007, 28Z: 371-374
- 25 王均星, 吴雅峰, 白呈富. 有自由面渗流分析的流形单元法. 水电能源科学, 2003, 21: 23-25, 57
- 26 Jiang Q H, Deng S S, Zhou C B, et al. Modeling unconfined seepage flow using three-dimensional numerical manifold method. J Hydrodynamics, 2010, 22: 554-561
- 27 赵阳升, 马宇, 段康廉, 等. 岩层裂隙分形分布相关规律研究. 岩石力学与工程学报, 2002, 21: 219-222
- 28 Zhou H W, Xie H. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock. Surface Rev Lett, 2003, 10: 751-762
- 29 Koyama T, Fardin N. Numerical simulation of shear-induced flow anisotropy and scale-dependent aperture and transmissivity evolution of rock fracture replicas. Int J Rock Mech Min Sci, 2006, 43: 89-106
- 30 孙洪泉, 谢和平. 岩石断裂表面的分形模拟. 岩土力学, 2008, 29: 347-352
- 31 Succi S, Foti E, Higuera F. Three dimensional flows in complex geometries with the lattice Boltzmann method. Europhys Lett, 1989, 10: 433-438
- 32 Dardis O, McCloskey J. Lattice Boltzmann scheme with real numbered solid density for the simulation of flow in porous media. Phys Rev E, 1998, 57: 4834-4837

- 33 Pan C, Luo L S, Miller C T. An evaluation of lattice Boltzmann scheme for porous medium flow simulation. *Comput Fluids*, 2006, 35: 898–909.
- 34 Qian Y H, d’Humières D, Lallemand P. Lattice BGK model for Navier–Stokes equation. *Europhys Lett* 1992, 17: 479
- 35 Lallemand P, Luo L S. Theory of the lattice Boltzmann method: dispersion, dissipation, isotropy, Galilean invariance, and stability. *Phys Rev E*, 2000; 61: 6546
- 36 Xie H P, Sun H Q, Ju Y, et al. Study on generation of rock fracture surfaces using fractal interpolation. *Int J Solid Struct*, 2001, 38: 5765–5787
- 37 Inamuro T, Yoshino M, Ogino F. A non-slip boundary condition for lattice Boltzmann simulations, *Phys Fluids*, 1995, 7: 2928–2930
- 38 崔冰. 复杂岩石节理裂隙图像处理及几何复杂度分析. 硕士学位论文. 重庆: 重庆邮电大学, 2007
- 39 彭韬, 王卫星. 基于分形的彩色岩石裂隙分割. *微计算机信息*, 2008, 24: 261–299
- 40 王恩志, 杨成天. 裂隙网络地下水流数值模型及非连通裂隙网络水流的研究. *水文地质工程地质*, 1992, 19: 12–14