论文

不同JRC粗糙单裂隙的渗流机理数值模拟研究

张戈^{1,2}, 田园², 李英骏^{2*}

1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088;

2. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083

*联系人, E-mail: lyj@aphy.iphy.ac.cn

收稿日期: 2018-07-04; 接受日期: 2018-08-15; 网络出版日期: 2018-10-18

国家自然科学基金(编号: 51727807, 11772064)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

摘要 岩体裂隙的渗流理论具有广泛的应用价值, 其中裂隙的表面粗糙和结构迂曲特征是影响渗流的重要因素. 因此, 在构建的粗糙单裂隙模型基础上开展了关于裂隙粗糙特性和迂曲特性对渗流影响的机理性研究. 自行编写了基于格子Boltzmann方法用于模拟裂隙内流动的计算程序并进行了验证. 利用该程序对具有不同JRC值和开度的单裂隙进行数值模拟. 将模拟结果与考虑迂曲度修正的渗流立方定律(LCL)结果比较, 发现迂曲修正的立方定律预测流量具有一定偏差. 分析认为在粗糙单裂隙中, 迂曲和粗糙两种因素同时对渗流作用, 并且相互耦合, 随着裂隙开度不同而相互转化, 因此需要同时考虑迂曲和粗糙作用, 使用两者对单裂隙渗流立方定律修正. 结果认为含迂曲和粗糙双重作用的模型在预测粗糙单裂隙渗流特征时能获得相对更准确的结果, 具有一定的工程应用价值.

关键词 渗流, 单裂隙, 节理粗糙系数, 迂曲度, 格子Boltzmann方法

PACS: 47.56.+r, 47.85.Dh, 02.60.-x

1 引言

岩体作为能源与资源开发、岩土及水利工程结构物建设的基础, 其各种性质对生产建设具有重要的影响. 通常岩体中发育有一定的裂隙, 因此地下水、油气等有价值的能源、资源可以在岩体中得到运移, 同时污染物或其他有害物质也通过裂隙进行运移^[1,2]. 裂隙的流体输运特性对页岩气开采、地热能利用等现代能源产业具有重要影响, 另一方面也影响着矿井有害气体如瓦斯等的抽放、CO₂地质封存情况以及涉及工

程施工、结构物使用安全的各个方面^[3,4]. 因此, 岩体裂隙渗流成为众多工程领域关注的一大热点问题. 但是, 由于真实裂隙形态较为复杂, 且其相互交错形成网络结构, 而裂隙渗流特性又受到诸多因素的影响, 使得直接由裂隙网络入手研究岩体渗流特性十分困难. 针对裂隙网络的基本组成单元——单裂隙进行渗透特性的机理性研究, 是认识岩体裂隙整体渗流特征的基础, 也是目前较多采用的研究思路^[5,6].

从单裂隙出发研究岩体渗流机理已经有一定历史, 在1965年Snow^[7,8]基于Navier-Stokes方程提出了裂

引用格式: 张戈, 田园, 李英骏. 不同JRC粗糙单裂隙的渗流机理数值模拟研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 014701
Zhang G, Tian Y, Li Y J. Numerical study on the mechanism of fluid flow through single rough fractures with different JRC (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 014701, doi: 10.1360/SSPMA2018-00247

隙渗流的立方定律, 将其裂隙壁面简化为光滑平板, 以方便获得单裂隙的渗透特性. 立方定律能够在一定范围内把握基本渗透特征, 并且能够简单地由单裂隙推广到裂隙网络, 从而评估整个岩体的渗透特征. 但是就工程实际而言, 由于岩体自身特性和地质历史的影响, 裂隙壁面具有一定程度的粗糙特征, 同时裂隙内常常有如黏土矿物填充等改变流道的因素存在, 使得立方定律的适用性受到了相当的限制. 为此, 考虑到影响单裂隙渗透性的粗糙因素, 国内外学者做了大量研究^[9,10]. 其中Sun和Faghri^[10], Zhang和Jia^[11]认为裂隙壁面粗糙结构可以简化为一系列基本组成单元——粗糙元, 因此使用一些规则的几何形状来构建人工粗糙元, 就可以通过探究人工粗糙元的作用机理, 认识复杂的裂隙粗糙表面对流动的影响^[12,13]. 然而基于人工粗糙元的简化模型虽然在一定程度上能够方便机理探究, 但其与实际裂隙结构之间仍有不小距离, 通常难以给出工程实用的结论.

另一研究思路则是直接对粗糙单裂隙整体进行评估, 以获得与工程应用密切相关的结论. 其中, 基于单裂隙内的粗糙结构具有分形特征这一认识, 大批学者直接借助分形手段构建了粗糙裂隙并进行渗流规律研究, 取得了显著的成果^[14,15]. 但是分形维数的获得需要通过一系列较为复杂的分析手段, 因此难以通过观测裂隙形态直接而获得. 节理粗糙度系数(Joint Roughness Coefficients, JRC)作为表征裂隙表面粗糙性态的半定量标准, 是由Barton和Choubey^[16]根据大量不同岩块的试验和观测结果, 总结并用于评估岩石节理表面粗糙起伏状态. 1978年国际岩石力学学会(ISRM)将10条Barton曲线推荐为确定JRC的参考线^[17]. 因此, JRC被广泛应用于裂隙粗糙性态的评价. 在实际工程中有许多有效的方法可以用于评估JRC, 如表面粗糙度参数法^[18]、直接测量法^[19]、伸长率法^[20]、分形(Fractal)法^[21]等. 因此, 利用JRC构建接近于实际的粗糙单裂隙模型以获得针对该模型的渗透特性认识, 能够取得较好的工程应用价值.

由于渗流立方定律(LCL)作为一个基本的局部控制方程普遍应用于裂隙网络渗流模型. 因此在获得关于复杂单裂隙渗流的机理性认识之后, 将裂隙结构等因素考虑在内, 对渗流立方定律进行修正, 有希望进一步帮助复杂裂隙网络的工程应用.

由于实际单裂隙几何形态复杂, 因此采用一种有

效的流体动力学数值模拟方法以准确捕捉到流动细节十分重要. 基于Boltzmann方程的介观流体数值模拟方法——格子Boltzmann方法(Lattice Boltzmann Method)物理概念清晰、计算简单且易于处理复杂流体边界, 能够很好反映出微观结构附近的流动细节^[22], 近年来在复杂多孔介质研究中应用广泛^[23,24]. 本文基于格子Boltzmann方法编写了适用于粗糙裂隙流动计算的程序, 并将其应用于借助Barton的节理粗糙系数(JRC)曲线构建的单裂隙模型渗流模拟中. 在此基础上, 通过测试不同粗糙程度、不同裂隙开度条件下裂隙间流体的渗透规律, 采用定性和定量的分析手段, 探索了粗糙单裂隙渗流中迂曲因素的作用, 并分析了裂隙内流场的特征. 最后, 将结论应用于修正渗流立方定律, 并与其他模型进行比较.

2 模型及方法

2.1 粗糙单裂隙模型构建

为了构建粗糙单裂隙模型, 将具有确定JRC值的Barton曲线^[17](如图1所示)在高分辨率条件下提取像素点信息, 将其转换成相应的数字矩阵. 通过将轮廓线平移一定距离, 获得具有确定开度和JRC数值的粗糙单裂隙模型. 由此, 下文中的裂隙开度即指的是曲线在

图 1 具有确定JRC值的Barton曲线^[17]

Figure 1 Barton's curves with certain JRC [17].

竖向平移的距离. 上述做法保证了在竖向上的各个位置具有相同的流体通过面积, 同时也符合拉(压)导致开裂的实际情况.

在以往的研究中, 对于光滑壁面的单裂隙, 可以采用渗流立方定律对其渗透特性进行预测(忽略重力影响):

$$q = \frac{b^3}{12\nu} J, \quad (1)$$

其中, q 为通过裂隙的流量, b 为裂隙开度, ν 为运动黏滞系数, J 为水力坡度.

当考虑到裂隙壁面的粗糙特性, 相对粗糙度往往作为表征裂隙壁面粗糙程度的参数:

$$\sigma = \frac{m}{b}, \quad (2)$$

其中, m 为绝对粗糙度, 可以采用裂隙壁面粗糙结构在开度方向高度的方差表示(取样点结构高度 h_i , 平均高度 $\bar{h}$), 即:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}). \quad (3)$$

通过引入相对粗糙度, 可以对渗流立方定律进行修正, 以期获得更接近于实际的裂隙渗流特性. 例如, Louis^[25]提出的修正公式:

$$q = \frac{b^3}{12\nu} J \frac{1}{1 + 8.8 \left(\frac{m}{2b} \right)^{1.5}}. \quad (4)$$

Lomize^[26]提出了十分相似的修正公式:

$$q = \frac{b^3}{12\nu} J \frac{1}{1 + 6 \left(\frac{m}{b} \right)^{1.5}}. \quad (5)$$

诸如此类的修正公式十分常见, 根据其形式待定两个参数, 可以统一归纳成式(6):

$$q = \frac{b^3}{12\nu} J \frac{1}{1 + X \left(\frac{m}{b} \right)^Y}. \quad (6)$$

考虑到单裂隙沿长度方向往往具有一定起伏特征, 其会导致流体通过裂隙的路径变得曲折, 从而在进出口压力差相同时, 相当于增加了流动长度. 因此, Rose^[27]提出了迂曲度(Tortuosity)的概念以用于表征渗流路径的曲折特征. 通常将迂曲度 τ 定义为沿着裂隙走

向由一端走至末尾的实际长度 L_c 与裂隙端尾间直线距离 L 之比^[28-30]:

$$\tau = \frac{L_c}{L}. \quad (7)$$

考虑到裂隙的迂曲特性, 常常将迂曲度 τ 引入渗流定律进行修正:

$$q = \frac{b^3}{12\nu\tau} J. \quad (8)$$

其物理意义为, 无论流动路径是否曲折, 局部的压力梯度均是固定值, 路径曲折与平直的区别在于局部压力梯度的大小不同. 这一假设在低速渗流情况下基本是可以接受的. 在接下来的研究中, 为了确定迂曲度, 采用流体通过裂隙中间位置的流线长度作为流体实际通过距离 L_c , 而将裂隙左右两段的直线距离作为 L , 代入式(7)以完成计算.

2.2 数值模拟方法

格子Boltzmann方法(LBM)从介观层面的流体微团出发, 基于速度离散的分布函数统计获得宏观流体动力学量. 具体而言, LBM首先将相空间的分布函数在速度空间进行离散, 建立离散速度模型, 各个离散的速度具有相应的离散分布函数. 依据基本守恒律, 通过对流场中各个格点上离散分布函数求速度矩, 得到流速、压强等宏观量. 本文采用Qian等人^[31]提出的D2Q9模型, 其演化方程和模型信息如下.

演化方程:

$$\begin{aligned} f_a(\mathbf{r} + \mathbf{v}_a \delta t, t + \delta t) - f_a(\mathbf{r}, t) \\ = -\frac{1}{\eta} [f_a(\mathbf{r}, t) - f_a^{\text{eq}}(\mathbf{r}, t)], \end{aligned} \quad (9)$$

其中, 弛豫时间 η 与流体运动黏度 ν 之间存在关系 $\nu = c_s^2 \left(\eta - \frac{1}{2} \right) \delta t$; 离散的平衡态分布函数 f_a^{eq} 表达式采用Maxwell分布Taylor展开的二阶截断:

$$f_a^{\text{eq}} = \rho w_a \left[1 + \frac{\mathbf{v}_a \cdot \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{v}_a \cdot \mathbf{u})^2}{2c_s^4} - \frac{\mathbf{u}^2}{2c_s^2} \right], \quad (10)$$

其中, $c_s = c^2/3$ 为格子声速, $c = \delta x / \delta t$ 为格子空间的迁移特征速度.

离散速度模型为

$$\mathbf{v}_\alpha = \begin{cases} (0, 0), & i = 0, \\ c(\cos[(i-1)\pi/2], \sin[(i-1)\pi/2]), & i = 1, 2, 3, 4, \\ \sqrt{2}c(\cos[(2i-1)\pi/4], \sin[(2i-1)\pi/4]), & i = 5, 6, 7, 8. \end{cases} \quad (11)$$

通过对分布函数求矩就可以获得一系列所关心的物理量.

密度

$$\rho = \sum_{\alpha} f_{\alpha}^{\text{eq}}, \quad (12)$$

流速

$$\mathbf{u} = \sum_{\alpha} f_{\alpha}^{\text{eq}} \mathbf{v}_{\alpha} / \rho, \quad (13)$$

压强

$$p = \rho c_s^2. \quad (14)$$

在计算裂隙渗流问题时, 将裂隙外的格点标记为固体格点, 裂隙内区域标记为流体格点, 流固边界上采用无滑移的反弹边界条件^[32], 出入口采用压力边界条件^[33].

首先验证自编程序的准确性与有效性. 针对无粗糙度影响的理想二维裂隙, 即平板Poiseuille流, 采用长×宽为2000×50的网格, 设置流体运动黏度系数 $\nu=0.5$, 出入口压差 $\Delta p=0.01$, 运行程序获得数值结果. 将其与解析解进行比对, 如图2所示, 流体在Y轴方向(即垂直于流体流动方向)的速度分布呈现抛物线形态, 并在裂隙中央位置处速度达到最大, 与根据Navier-Stokes方程给出的理论解符合较好. 沿流动方向, 其压力分布如图所示, 呈现线性分布规律, 符合Poiseuille定律中长度方向压力梯度为线性变化的结论. 通过以上验证, 基于格子Boltzmann方法所编写程序可以有效地进行裂隙中流动问题的模拟计算.

在模拟中, 为了充分反映流动细节, 设置流场的横向大小为2000个格子单位长度, 初始开度为50个格子单位长度(相应网格数即为100000). 通过数值模拟, 探究相同开度、不同JRC下的岩体单裂隙渗流规律; 并在此基础上, 进一步研究开度变化的情况下单裂隙内的渗流情况. 在使用格子Boltzmann方法的模拟中, 选取流体运动黏度系数为 $\nu=0.5$, 弛豫时间 $\eta=2.0$, 出入口压差 $\Delta p=0.01$, 为保证数值计算的稳定性与结果的准确性, 设置不同时间步的流场物理量相对误差判据, 当流

图2 (网络版彩图) LBM模拟Poiseuille流速和压强分布
Figure 2 (Color online) Velocity and pressure distribution in the Poiseuille flow obtained by LBM simulation.

动达到稳定状态时即输出结果. 基于上述模型和模拟参数, 进行关于粗糙单裂隙内流动的数值模拟.

3 结果与讨论

3.1 等开度条件下的粗糙单裂隙渗流

在开度一定的条件下, 改变裂隙的JRC值, 模拟不同JRC值下单裂隙内的渗流情况. 下文各图中JRC值为0代表着同等开度下光滑壁面单裂隙的情况.

图3反映了在相同开度条件下, 流量、流速等随着JRC值的变化情况. 此时设置的裂隙开度为50, 相比较于裂隙长度2000相差了40倍, 可以认为是一条狭长的裂隙, 具有一定的代表性. 观察图3发现, 各组单裂隙的流量、速度峰值及平均速度虽然随JRC的增大呈现总体下降趋势, 但并非随着JRC值的增加而单调减小. 具体而言, 在开度为50的条件下, 通过第5, 6, 7, 8组裂隙(JRC值分别为: 8-10, 10-12, 12-14, 14-16)的流量十分接近. 第2, 3, 4组(JRC值分别为: 2-4, 4-6, 6-8)呈现出不规律的变化, 第2组相较于第1组流量下降了14.51%, 第3组相较于第2组流量则上升了18.91%, 而第4组相较于第3组的流量则又下降了30.89%, 第5组相较于第4组流量上升了8.70%. 因此, 流量与JRC值之间的关系并非是随着JRC值增加而严格地单调递减. 奇异性出现在JRC值为4-6和JRC值为6-8的第3组和第4组. 这主要是因为JRC虽然是对裂隙粗糙性态的综合考量, 但由于具体的裂隙结构从多个方面对渗流产生

图3 (网络版彩图)不同JRC值单裂隙的流动情况。(a) 流量; (b) 速度最大值和平均值

Figure 3 (Color online) The flow characters in single fractures with different JRC value. (a) Flux; (b) maximum and mean velocity.

影响,并且在特定开度的情况下,其作用效果也不同所致,在下文中将进一步对此进行探讨。虽然存在有奇异组别,但流量仍然具有随JRC值增加而减小的整体趋势。

观察裂隙内的速度大小、局部流向等细节(如图4所示),发现随着JRC值的增加,不仅裂隙内的流动速度下降,而且流动路径也变得更加曲折。同时发现,裂隙中流体的流向基本与裂隙的走向一致,当裂隙走向变得复杂时,流体的流动路径也相应变得曲折。由于裂隙两段的压力差固定,流体实际通过的距离随路径的曲折程度的不同而变化,因此在同等的压差作用下,若流动路径更为曲折,则意味着在该压差下流体被驱动着走过了相对较长的一段距离,因此导致局部的压力梯度减小,从而进一步影响流量和流速。

按照1.1节中所述的方式计算出图4各个单裂隙的渗流迂曲度 τ ,并将其代入到修正的渗流立方定律中获得预测流量值(图5)。观察发现,在开度50的情况下, JRC值为4-6的单裂隙其迂曲度小于JRC值为2-4的一

图4 (网络版彩图)单裂隙内部流动情况: 流速和流线(图内仅保留裂隙轮廓删除裂隙外固体区域)

Figure 4 (Color online) Flow details in single fractures, the velocity and the streamline are shown (only keep the profile of fractures).

图5 (网络版彩图)通过裂隙实际流量与迂曲度修正后流量比较

Figure 5 (Color online) Comparison between tortuosity corrected flux and the real flux in JRC fractures.

组,因此修正后对应的流量值符合在前文中分析的第3组大于第2组的情况;而第4组和第5组的迂曲度却非常接近,因此两者迂曲修正后的流量也十分接近,这在一定程度上解释了开度为50的情况下流量随JRC值的变化关系并不严格单调递减的现象。同时,虽然修正后的流量相对于理想的光滑裂隙情形有所减小,并且其基

本变化趋势是随着JRC值的增加而递减, 但迂曲度修正所预测的流量与实际值仍有较大差异. 因此, 仅引入迂曲度修正来预测粗糙单裂隙的渗流特性显然是不完备的, 除迂曲作用之外, 还存在其他影响渗流的因素.

迂曲度对流动特性的影响实质是增加了流体的运移路径, 即迂曲使得流场中的局部压力梯度减小. 而另一种对渗流有着显著作用效果的因素则是粗糙作用, 粗糙作用虽然往往发生在局部尺度上, 引起某一位置的流动阻力增加, 但是在裂隙中, 各个位置由于粗糙引起的局部阻力同时作用, 影响着裂隙的渗透特性. 其作用效果使得靠近壁面区域的流体, 不仅仅由于壁面的无滑移特性而使得壁面处流体流速为0, 而且由于壁面的粗糙结构, 使得距离壁面一定范围内的流体流速均较小, 随着JRC值的增加, 壁面附近流速减小更加明显, 因此相应单裂隙的渗透性相对较差, 流量、平均速度及速度峰值均较小.

3.2 变开度条件下的粗糙单裂隙渗流

为了进一步探讨单裂隙渗流的影响因素, 改变裂隙的开度, 对各种开度下的裂隙渗流情况进行模拟并获得相应结果.

在不同的开度条件下, 通过单裂隙的流量与JRC值之间的关系如图6所示. 在开度较小的情况下, JRC值为4–6和6–8的两组数据显然偏离其他组数据较大, 同时导致整个关系曲线在此处发生偏折; JRC值到达14–16时, 流量也没有平滑下降, 该现象已经在前文2.1节指出. 但是随着裂隙开度的增加, 可以发现具有奇异性的几组数据(如图6中所标注出), 其偏离程度逐渐变小, 而流量与JRC值之间的关系曲线变得平滑. 同时, 在较大开度条件下, 随着JRC增加, 流量相对减小量比较小于小开度情况要小很多, 也就意味着影响渗流的因素, 其效果随着开度的增加而有所变化.

选择差异较大的两组JRC曲线(JRC值0–2与JRC值18–20), 分析其沿流向的压强值变化(图7). 当开度为50时, 沿流向的压力分布呈现出明显的非线性特征, 而当开度为100或更大时, 压强分布则逐渐趋近于线性, 接近于理想的无迂曲、无粗糙的情形. 通过比较发现, JRC值较大的情况下, 压强分布曲线更加曲折, 而JRC值较小的压强曲线则更为平直光滑.

改变同一JRC值单裂隙的开度大小(图8), 发现随

图6 (网络版彩图)不同开度条件下单裂隙流量随JRC值变化图(Q 为通过裂隙的流量, Q' 为相同开度条件下光滑裂隙的流量)

Figure 6 (Color online) The relationship between flux and JRC value under different aperture (Q represents the flux and Q' is the flux of smooth fracture with the same aperture).

图7 (网络版彩图)不同单裂隙在不同开度条件下沿流线压强变化

Figure 7 (Color online) Pressure profile on the streamlines of different JRC single fracture with different aperture.

着开度的增加, 受到表面小结构影响的边界层作用变弱, 主流区域的范围在逐渐扩大. 而观察流线发现, 随着开度的增加, 流线趋于光滑和平直, 因此在小开度条件下对流动方向起到控制作用的裂隙表面结构, 在大开度条件下仅仅影响着与其距离较近范围内的流体. 相同JRC值的单裂隙, 随着开度的增大, 其渗流路径变得平直, 即意味着相应迂曲度的减小; 而裂隙表面起伏的结构, 其作用范围也随开度的增加而减小, 逐渐变成局部的作用, 也就是粗糙作用. 因此, 在粗糙单裂隙中, 存在着局部表面粗糙和整体结构迂曲两种作用机制, 两者同时影响流动, 并且其作用随着裂隙开度的变化

图 8 (网络版彩图)JRC值18–20的不同开度单裂隙内流动细节: 流速和流线(等值线云图按照相应裂隙内的流速最大最小值进行划分, 因此分别给出了参考标尺)

Figure 8 (Color online) Flow details in a series of different aperture single fractures with a common JRC value of 18–20, the velocity and the streamline are shown (the contour map is divided according to the maximum and minimum flow velocity in the fracture, so the reference scale is given respectively).

而有所不同。

分析认为, 在接近实际的粗糙单裂隙中, 由于迂曲和粗糙对渗流的共同作用, 需要引入一定的机制来同时考虑二者的影响。因此, 采用相对粗糙度 σ 以及迂曲度 τ 来表征粗糙和迂曲对渗流的作用。

将两种作用因素引入到渗流立方定律, 获得综合考虑相对粗糙度和迂曲度的立方定律修正公式, 其形式如式(15)所示。该公式本质上相当于同时修正了裂隙的开度和压力梯度:

$$q = \frac{b^3}{12\tau\nu} J \frac{1}{1+X\sigma^Y}, \quad (15)$$

其中, X 和 Y 均为需要标定的系数。

为获得式(15)中的待定系数 X 和 Y , 对不同JRC值、不同开度的裂隙渗流数据进行统计, 为便于拟合, 将式(15)进行简单的变换:

$$X\sigma^Y = \frac{b^3}{12\tau\nu} J \frac{1}{q} - 1. \quad (16)$$

将具有不同粗糙特性的单裂隙在不同开度情况下的渗流数值模拟结果进行整理(如图9所示), 对数据进行分析, 获得根据式(16)中的两个变量 $\ln\left(\frac{b^3}{12\tau\nu} J \frac{1}{q} - 1\right)$ (简称为 $\ln N$)与 $\ln\sigma$ 之间的关系。分析图9中的拟合数据, 可以确定式(16)的待定系数为 $X=0.61308$, $Y=0.60912$ 。

为了检验该公式的准确性, 进一步将拟合公式用于预测开度大小为50, 75, 100和125共4种条件下的单裂隙渗流, 并与其他几种修正模型进行比较(如图10所示)。发现仅考虑粗糙度修正, 预测的流量往往会较真实值低, 而仅进行迂曲度修正的模型预测流量较真实值高。同时考虑迂曲和粗糙双重作用建立的模型, 在引入迂曲作用的同时, 弱化了部分粗糙作用, 因此能够获得相对更加准确的流量预测结果。

4 结论

基于具有确定JRC的Barton曲线构建了粗糙单裂隙模型, 采用格子Boltzmann方法对单裂隙中的渗流情况进行了数值模拟, 分析了单裂隙内的流场并研究了渗流特性相关的作用因素及机理:

从流体实际流经路径(L_e)与表观渗流长度(L)的比值出发定义迂曲度, 则流道迂曲特性影响着流场内局部的压强梯度大小; 而粗糙特性是使得局部流态发生变化, 从而导致通过裂隙流量发生改变。迂曲和粗糙两种作用机制在本文所构建单裂隙的渗流中同时体

图 9 (网络版彩图)不同开度单裂隙的流量-相对粗糙度-迂曲度关系

Figure 9 (Color online) The relationship of flux-relative roughness-tortuosity for single fractures with different aperture.

图 10 (网络版彩图)不同修正模型对不同JRC值单裂隙的流量预测. (a) 开度50; (b) 开度75; (c) 开度100; (d) 开度125

Figure 10 (Color online) Flux prediction of single fractures with different aperture by modified models. (a) Aperture: 50; (b) aperture: 75; (c) aperture: 100; (d) aperture: 125.

现, 并且随着开度变化, 两种特性对渗流的影响均发生变化, 因此需要同时考虑才能更好地对单裂隙渗流特征进行估计.

引入迂曲和相对粗糙两种作用机制修正了粗糙单

裂隙渗流模型, 验证发现相比较于只考虑单种因素的修正, 其预测效果更好. 因此, 对于参考Barton曲线或用JRC度量的粗糙单裂隙, 本文所获得结论对其渗流特性的预测具有一定工程指导意义.

参考文献

- 1 Neuman S P. Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks. *Hydrogeol J*, 2005, 13: 124–147
- 2 Xiong X B, Zhang C H, Wang E Z. A review of steady state seepage in a single fracture of rock (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2009, 28: 1839–1847 [熊祥斌, 张楚汉, 王恩志. 岩石单裂隙稳态渗流研究进展. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28: 1839–1847]
- 3 Zhu H G, Xie H P, Yi C, et al. Analysis of properties of fluid flow in rock fractures (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32: 657–663 [朱红光, 谢和平, 易成, 等. 破碎岩体裂隙的流体流动特性分析. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32: 657–663]
- 4 Odling N E, Gillespie P, Bourgin B, et al. Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs. *Pet Geosci*, 1999, 5: 373–384
- 5 Ju Y, Zhang Q G, Yang Y M, et al. An experimental investigation on the mechanism of fluid flow through single rough fracture of rock. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 2070–2080 [鞠杨, 张钦刚, 杨永明, 等. 岩体粗糙单裂隙流体渗流机制的实验研究. *中国科学: 技术科学*, 2013, 10: 1144–1154]
- 6 Qian J, Chen Z, Zhan H, et al. Experimental study of the effect of roughness and Reynolds number on fluid flow in rough-walled single fractures: A check of local cubic law. *Hydrol Process*, 2011, 25: 614–622

- 7 Snow D T. A parallel plate model of fractured permeable media. Dissertation for Doctoral Degree. Berkeley: University of California, 1965
- 8 Snow D T. Closure on rock fracture spacings, openings, and porosities. *J Soil Mech Foundat Div*, 1969, 95: 880–883
- 9 Brown S R. Fluid flow through rock joints: The effect of surface roughness. *J Geophys Res*, 1987, 92: 1337–1347
- 10 Sun H, Faghri M. Effect of surface roughness on nitrogen flow in a microchannel using the direct simulation Monte Carlo method. *Numer Heat Transfer Part A-Appl*, 2003, 43: 1–8
- 11 Zhang T, Jia L. Numerical simulation of roughness effect on gaseous flow and heat transfer in microchannels. In: IEEE International Conference on Nano/micro Engineered and Molecular Systems. Bangkok: IEEE, 2007. 136–141
- 12 Amini H, Sollier E, Masaeli M, et al. Engineering fluid flow using sequenced microstructures. *Nat Commun*, 2013, 4: 1826
- 13 Zhang G, Feng C Y, Gong W B, et al. Simulation and analysis of the effect of roughness elements on fluid flow through single fracture based on lattice Boltzmann method (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 024701 [张戈, 冯程远, 龚文波, 等. 粗糙元对单裂隙渗流影响的格子Boltzmann方法模拟及分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 024701]
- 14 Cai J, Hu X, Standnes D C, et al. An analytical model for spontaneous imbibition in fractal porous media including gravity. *Colloids Surfs A-Physicochem Eng Aspects*, 2012, 414: 228–233
- 15 Ju Y, Zhang Q, Zheng J, et al. Fractal model and lattice Boltzmann method for characterization of non-Darcy flow in rough fractures. *Sci Rep*, 2017, 7: 41380
- 16 Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech*, 1977, 10: 1–54
- 17 Barton N. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *ISRM, Int J Rock Mech Mining Sci Geomech Abstracts*, 1978, 15: 319–368
- 18 Tse R, Cruden D M. Estimating joint roughness coefficients. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstracts*, 1979, 16: 303–307
- 19 Turk N, Dearman W R. Investigation of some rock joint properties: Roughness angle determination and joint closure. In: Proceedings of international symposium on fundamentals of rock joints. 1985. 197–204
- 20 Wang Q. Study on rock joint roughness coefficient using elongation rate (in Chinese). In: Selected Works of Under-ground Engineering Experience Exchange, 1982 [王岐. 用伸长率 R 确定岩石节理粗糙度系数的研究. 见: 地下工程经验交流会论文选集, 1982]
- 21 Lee Y H, Carr J R, Barr D J, et al. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstracts*, 1990, 27: 453–464
- 22 Succi S. The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond. New York: Princeton University Press, 2001
- 23 He Y L, Wang Y, Li Q. Theory and Application of Lattice Boltzmann Method (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [何雅玲, 王勇, 李庆. 格子Boltzmann方法的理论及应用. 北京: 科学出版社, 2009]
- 24 Eker E, Akin S. Lattice Boltzmann simulation of fluid flow in synthetic fractures. *Transp Porous Media*, 2006, 65: 363–384
- 25 Louis C. Rock Hydraulics in Rock Mechanics. New York: Springer-Verlag, 1974
- 26 Lomize G M. Flow in Fractured Rock. Moscow City: Gosemergoizdat, 1951
- 27 Rose W, Bruce W A. Evaluation of capillary character in petroleum reservoir rock. *J Pet Tech*, 1949, 1: 127–142
- 28 Walsh J B, Brace W F. The effect of pressure on porosity and the transport properties of rock. *J Geophys Res*, 1984, 89: 9425–9431
- 29 Ge S M. A governing equation for fluid flow in rough fractures. *Water Resour Res*, 1997, 33: 53–61
- 30 Waite M E, Ge S, Spetzler H. A new conceptual model for fluid flow in discrete fractures: An experimental and numerical study. *J Geophys Res*, 1999, 104: 13049–13059
- 31 Qian Y H, D’Humières D, Lallemand P. Lattice BGK models for Navier-Stokes equation. *Europhys Lett*, 1992, 17: 479–484
- 32 Lavallée P, Boon J P, Noullez A. Boundaries in lattice gas flows. *Physica D*, 1991, 47: 233–240
- 33 Chen S, Martínez D, Mei R. On boundary conditions in lattice Boltzmann methods. *Phys Fluids*, 1996, 8: 2527–2536

Numerical study on the mechanism of fluid flow through single rough fractures with different JRC

ZHANG Ge^{1,2}, TIAN Yuan² & LI YingJun^{2*}

¹ *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;*

² *State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*

The permeability theory of fractured rock mass has a wide range of engineering applications. The surface roughness and structure tortuosity have a significant effect on the character of fluid flow through the fracture. Based on the standard fracture curves with different JRC values given by Barton (1977), a rough single fracture model is constructed. A detailed mechanism study on the effect of roughness and tortuosity on fluid flow is carried out on the single fracture model. A code for simulating the flow in the fractures based on the lattice Boltzmann method was programmed and verified. Using this code, numerical simulations are performed on single fracture models with different JRC values and apertures. Physical properties like the velocity field of the flow are observed and analyzed. Comparing the simulation results with the tortuosity modified the cubic law of single fracture flow (LCL), it is found that the cubic law prediction has a certain deviation on the flow rate. The analysis emphasizes that in the single rough fracture, two factors of tortuosity and roughness act simultaneously on the penetration, and these two factors are coupled that they can transform from one to the other as the aperture changes. Therefore, it is necessary to consider both the tortuosity and the rough effect and implement the two factors to modify the local cubic law for single fracture permeability. The modified model shows the result which is relatively more accurate in predicting the flux through rough single fractures. It is convinced that the research is engineering valuable.

permeability, single fracture, joint roughness coefficient (JRC), tortuosity, lattice Boltzmann method

PACS: 47.56.+r, 47.85.Dh, 02.60.-x

doi: [10.1360/SSPMA2018-00247](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00247)