

# 裂隙多孔介质双重逾渗模型的算法实现

张旭辉<sup>1</sup>, 郑 委<sup>1</sup>, 刘庆杰<sup>2</sup>, 鲁晓兵<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘 要:** 简要介绍基于孔隙逾渗和裂隙逾渗叠加的双重逾渗模型, 阐述模型的原理、算法及其实现过程. 初步研究模型的分形特性, 认为分形维数  $D$  是能够衡量模型连通性的重要参数. 最后探讨模型的蒙特卡罗数值计算方法, 兼顾计算精度与计算耗时, 提出可操作的计算规模.

**关键词:** 裂隙; 多孔介质; 蒙特卡罗模拟; 双重逾渗; 连通性

中图分类号: TU45

文献标志码: A

## 0 引言

裂隙多孔介质是自然界中各种地质体最为普遍的一种存在形式. 煤层、油气储层、地下含水层都是裂隙多孔介质. 在这些地质体当中, 或由于风化、或由于地质运动、或由于人类生产活动影响等, 完整岩体发生破裂, 产生微裂缝和裂隙, 成为地下油、气、水等流体的主要渗流通道; 同时, 由于岩体本身的多孔介质属性, 岩石基质中的孔隙为流体提供主要的存储空间的同时, 也会相互连通或与裂隙连通成为渗流路径. 研究裂隙多孔介质的渗流特性, 对油、气、水资源开发、环境保护和温室气体埋存等工程都具有重要意义.

长时间以来, 裂隙多孔介质的研究一直停留连续介质假设和寻找等效渗透系数上. 自 20 世纪 50 年代以来, 两种新的理论逐渐活跃起来——逾渗理论和裂隙渗流理论.

逾渗理论最早由 Broadbent 和 Hammersley 于 1957 年创立<sup>[1]</sup>, 用以研究无序孔隙介质中流体的流动等随机物理过程. 其基本理论构型是: 介质内部有许多节点, 它们经由许多路径连接在一起, 形成多个节点集团, 并伴随着外部条件而逐步演化成为贯通整个孔隙介质的节点集团<sup>[2]</sup>. 逾渗理论自建立以来, 在许多领域得到了应用, 如半导体信号连通性<sup>[3]</sup>、病毒感染与传播<sup>[4]</sup>、磁阻<sup>[5]</sup>、材料制备<sup>[6-7]</sup>、多孔介质渗流<sup>[8]</sup>. 这种经典的逾渗理论研究应用于岩土介质时, 仅仅局限于孔隙渗流, 忽略了裂隙这一主要的渗流通道. 裂隙渗流理论通过建立随机裂隙网络, 研究了流体在裂隙网络中的流动, 但忽略了孔隙这一渗流通道<sup>[9]</sup>.

近年来, 已有研究者开始将介质中的裂隙-孔隙综合起来考虑. 冯增朝<sup>[10-13]</sup>等人建立了网格模型, 采用座逾渗原理模拟孔隙介质, 并在此基础上叠加随机裂隙, 对这种裂隙-孔隙多孔介质的渗流连通性进行了研究. 这种模型将区域离散成为  $N \times N$  四边形格子, 设孔隙率为  $n$ , 则在这  $N^2$  个格子中随机挑选出  $n \times N$  格子作为孔隙, 设定为连通, 其他格子作为不连通的基质; 模型中裂隙的引入则是通过将裂隙的迹线叠加到格子网络中, 凡是迹线经过的格子一律设定为连通. 判断双重介质模型的连通性时, 将区域内所有格子进行分析, 认为任意两个相邻格子之间的边界是连通的(即键是连通的), 若相邻的两个格子都设定为连通, 则这两个格子构成连通集团, 以此类推最终构成逾渗集团. 这种模型较为规整, 概念通俗易懂, 与有限单元法结合上也具有优势; 但是这种模型中的裂隙尺度必须远远大于格子的尺度时才能保证精度, 这就意味着, 当裂隙网络规模增大时, 裂隙数量增多, 为保证精确性格子的数目会变得惊人的大, 从而难以进行计算. 这种模型更适合计算以孔隙为主的裂隙多孔介质, 且介质中存在一条或几条较长裂隙的情况.

郑委等人<sup>[14-15]</sup>已针对双重逾渗模型的基本概念、连通性、渗透参数等进行了介绍和初步分析, 在裂隙网络的基础上, 从键逾渗的角度出发, 叠加介质中孔隙和喉道的影响. 这种双重逾渗模型不仅能够同时考虑孔

收稿日期: 2013-05-30; 修回日期: 2013-08-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)“温室气体提高石油采收率的资源化利用及地下埋存”资助项目

作者简介: 张旭辉(1982-), 男, 博士, 助理研究员, 从事岩土力学研究, E-mail: zhangxuhui@imech.ac.cn

隙和裂隙的作用,而且针对孔隙-裂隙控制参数分布规律的大量统计可以模拟具有相同裂隙孔隙分布特征的大规模裂隙网络的连通性和渗流特征.本文主要考察含裂隙双重逾渗模型的算法实现及模型验证,为相关研究提供参考.

## 1 双重逾渗模型

在逾渗理论中,通常有两个基本的构成单元:座和键.在本问题中,取二维四边形构型.即取一个正方形平面区域进行研究,将该正方形平面区域剖分成 $N \times N$ 的正方形网格,网格的各个节点称为座,将各个节点联系起来的短边称为键.每一个座分别通过四条键与周围的四个座连接.若键是通路,则键两端的两个座所代表的空间点是相互连通的(连键);若键是断路,则键两端的两个座所代表的空间点是不连通的(断键).由这些能够相互连通的座和键组成的集合,我们称之为连通集团.等到连键增长到一定规模时,会突然出现贯通整个网络连通集团,此时我们称之为发生逾渗.这个连通两个对边的连通集团我们称之为逾渗集团.在此定义连键概率 $p$ 为区域内连通的键的数量与所有键的总数之比.大量的理论推导和实验证明<sup>[16]</sup>,在逾渗模式和构型确定的情况下,连键概率达到或超过一个常数 $p_c$ ,总是会出现逾渗集团.

裂隙是裂隙多孔介质中主要的渗流通道.裂隙逾渗中必须首先生成简单合理的裂隙网络.在裂隙高度发育的岩体中,岩体中的裂隙看似杂乱无章的,但也存在概率统计特征. Priest 和 Hudson 等人曾对裂隙的尺寸和产状概率分布进行研究,认为裂隙尺寸服从正态分布,而裂隙间距则往往服从指数分布<sup>[17]</sup>.康天合等人提出裂隙的尺寸分布还具有分形特征<sup>[18]</sup>.因此在生成裂隙网络时,考虑的主要因素有:单位区域内裂隙数量 $FPD$ (fracture population density)、裂隙的长度 $\delta$ 、宽度 $d$ 、产状(倾角) $\alpha_0$ 、空间分布特征等.

裂隙网络生成之后,就可以将裂隙之间的相互关联关系进行数学抽象,以类似于键逾渗的方法研究裂隙带来的区域连通性.将每一条裂隙抽象成为一个实体座,每个座(裂隙)与其他所有座之间的连通性决定于两个座之间键的连通性.而键的连通性与两条裂隙的空间位置、产状、长度都有关系:若两条裂隙经过计算在空间上是相交的,则键连通;反之亦然.在裂隙长度不均匀时,较长裂隙有时会穿过其周边裂隙与更远处的裂隙相交,这种情况具有随机性,无法确定其发生的具体位置和影响范围.因此在判断时,必须判断每条裂隙与其他所有裂隙的连通关系.所以这种寻找裂隙网络连通性的过程,可以看作一种构型高度复杂化的键逾渗:每个座均与其他所有座存在潜在连通关系,并由键相连.

孔隙是裂隙多孔介质中一个重要的补充渗流通道.特别是在低渗和高应力条件下,较大的孔隙会在高渗透性的裂隙之间提供潜在的连通通道;若裂隙之间存在薄弱的缺陷,在高压长期作用下也可能发生损伤从而造成两条并不相交的裂隙之间发生连通,这两种情况造成的孔隙连通都可以采用孔隙逾渗的方法来模拟.增加孔隙逾渗研究裂隙区域的连通性,主要关心两个关键部分:裂隙和裂隙之间可能连通的孔隙.对应于键逾渗的概念进行数学抽象,将整条裂隙抽象为键逾渗中的座,裂隙之间潜在连通的孔隙通道对应为键逾渗中的键.连键表示两条裂隙之间发生了通过孔隙通道连通的情况;反之,断键表示两条裂隙之间的孔隙通道是堵塞的.孔隙与孔隙间的流体交换方式一般如下:一种孔隙喉道半径很小,毛管压力与粘滞力相比占流动控制作用时,孔隙中流体流动模拟采用入侵逾渗形式,即流体在孔隙中的流动条件满足,则孔隙被流体填满;一种是粘滞力与毛管压力相比占流动控制作用时,孔隙中流体流动采用泊肃叶流等<sup>[15]</sup>.但针对裂隙多孔介质孔隙与裂隙不同尺度中流体流动的数值模拟,需考虑不同尺度流动的特征时间差异,以免计算与实际物理过程相差甚远.

所述的双重逾渗模型,就是以键逾渗为理论模型的裂隙逾渗和孔隙逾渗的二重叠加<sup>[14-15]</sup>.本文中,将孔隙逾渗叠加到裂隙逾渗之上,考虑的裂隙介质中含较多的天然裂隙或者人工压裂或者存在高压易导致裂隙的情况,以便直接地反映孔隙间以及孔隙与裂隙间的连通对整个逾渗网络连通性的影响.裂隙网络由于增加了孔隙连通通道,会有更多的裂隙由于孔隙连通形成连通集团,在不考虑材料损伤的情况下,连键发生毛细突破时,连键概率 $p$ 的主要影响因素是孔隙度 $n$ 、孔隙压力 $P$ 、流体粘度 $\nu$ 、裂隙间距 $\delta$ 等;若考虑材料损伤,则还与孔隙材料劈裂有关.以上诸多因素中,孔隙度 $n$ 对于岩体的渗透性质影响较大,在外部边界条件确定的情况下,往往是主要因素.出现逾渗集团时的逾渗阈值必须以函数形式表述: $f_c(\mu, \sigma, \alpha, FPD; n, P, \nu, \dots) = 0$ ,也即 $f_c > 0$ 时发生逾渗, $f_c < 0$ 时不发生逾渗.

该双重逾渗模型的突出特点是能够同时考虑孔隙和裂隙的影响. 如果将该模型进行简化:

1) 若在模型中取孔隙通道连通率  $p = 0$ , 则模型退化为裂隙网络模型, 能够与裂隙网络连通性研究和裂隙岩体渗流研究相对应;

2) 若在模型中取裂隙平均长度为 0, 则模型退化为经典键逾渗模型, 能够与经典的逾渗理论对应. 这也说明在裂隙逾渗中叠加孔隙逾渗与孔隙逾渗中叠加裂隙逾渗形成双重逾渗在原理上并无本质差别.

在本文研究中, 对孔隙逾渗选取四边形简单构型; 对已经生成的裂隙网络进行简单的区域分组, 分别以每一条裂隙为中心找到附近的四条裂隙, 中心裂隙和附近的四条裂隙之间进行连键和断键判断, 如图 1. 键是否连通的判断标准由外部给定的孔隙通道连通率  $p$  (除去裂隙外孔隙喉道的连通性) 来判断. 这种研究方法事实上是将键逾渗中的规整四边形网格, 根据裂隙分布规律进行了空间变换, 成为不规整的四边形网格. 因此, 键逾渗中的研究方法, 如蒙特卡洛法、逾渗阈值等, 仍将适用于新模型.

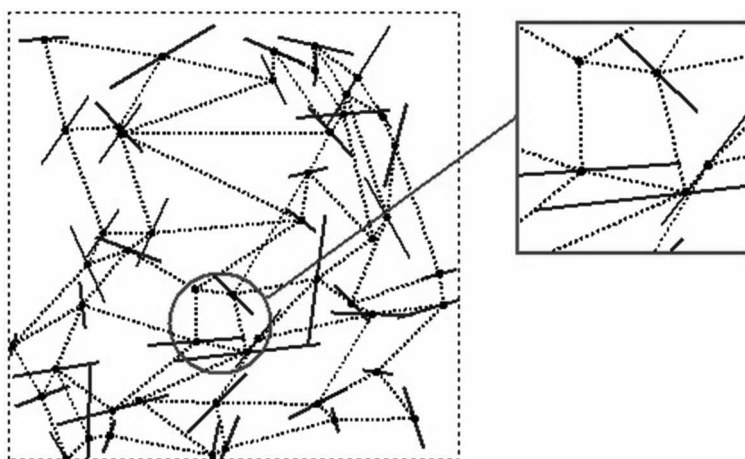


图 1 双重逾渗模型中裂隙网络与孔隙网络叠加示意图

Fig. 1 Pore network and fracture network combination in dual percolation model

## 2 基于双重逾渗模型的算法实现

为了初步探索和验证该双重逾渗模型的特性, 仍采用蒙特卡洛统计方法进行数值计算研究. 在同样假设和完全一致的参数组合条件下, 对于同一区域, 随机生成  $N$  个裂隙网络样本, 进行  $N$  次重复计算; 然后统计这种条件下出现逾渗集团的网络样本数目  $N_i$ , 得到逾渗概率为  $N_i/N$ . 逾渗发生过程是一个突变过程, 在逾渗阈值左右, 区域的连通性往往截然不同, 逾渗概率曲线近似于垂直<sup>[14]</sup>. 因此我们将逾渗阈值选取为逾渗概率等于 50% 时的参数组合, 认为这种参数组合条件下  $f_c(\mu, \sigma, \alpha, FPD; n, P, \nu, \dots) = 0$ .

### 2.1 算法介绍

计算中, 取裂隙长度  $\delta$  服从  $(\mu, \sigma)$  正态分布, 裂隙中心点的位置在计算区域内服从均匀分布. 裂隙倾角  $\alpha_0$  服从  $[-\alpha, \alpha]$  均匀分布,  $\alpha$  作为统计参数, 其取值在不同计算工况中可变:  $\alpha$  最大取为  $90^\circ$ , 此时裂隙的方向可以取为  $[-90^\circ, 90^\circ]$  之间的任何方向, 这种情况对应于裂隙产状处于高度无序化状态;  $\alpha$  最小取值  $0^\circ$ , 此时区域内所有裂隙方向相同, 具有同一产状, 这种情况对应于裂隙产状高度一致的状态. 为保证一般性, 形成裂隙网络时, 裂隙的长度取为无量纲数, 即  $\delta = \langle l \rangle / \lambda$ ,  $\lambda$  为特征长度 (一般选为区域的边长  $\langle L \rangle$ ),  $\langle l \rangle$  为有量纲的裂隙长度. 计算区域的尺寸取为无量纲数 1, 即  $\langle L \rangle / \lambda = 1$ , 其中  $\langle L \rangle$  表示计算区域的真实尺寸. 计算模拟过程中, 不断改变孔隙通道的连通概率  $p$ , 并取不同  $FPD$  进行数值计算. 蒙特卡洛法研究逾渗问题的核心在于基于大量的样本给出统计规律. 一般来说, 样本的规模越大, 即重复试验的次数越多, 得到的规律越精确; 另一方面, 研究连通性时, 需要针对各种概率分布参数寻找特定参数组合下的逾渗阈值  $f_c$  曲线,  $FPD$  的取值会影响  $f_c$  曲线的幅值, 但不影响其变化规律, 待得到特定  $FPD$  情况下的逾渗阈值  $f_c$  曲线后, 可通过重整化处理或其他等效处理规律将结果对应于其他  $FPD$  情况下关心区域的连通性情况.

双重逾渗模型的逾渗阈值规律数值模拟方法实现过程(图2)如下:

- 1) 首先确定裂隙的分布规律,本研究中认为裂隙位置呈均匀分布,裂隙长度呈正态分布,在不考虑边界影响的连通性计算中,进一步将裂隙长度的正态分布简化为  $C_v = \sigma/\mu = 0$  的等长裂隙;
- 2) 然后,确定  $FPD$  值、 $p$  值和裂隙倾角摆动极值  $\alpha$ ,取较小的  $\mu$  值,生成  $N$  个符合这些统计参数的双重逾渗网络,作为该种组合情况下的样本;
- 3) 通过计算,得到上述规模为  $N$  的样本中,发生连通的网络数目  $N_i$ ,得到在该种参数组合情况下  $(FPD, \alpha, \mu, p)$  的逾渗概率  $N_i/N$ ;
- 4) 最后,变化  $\mu$  值,再次重复 2) 和 3) 的计算过程,保存计算结果  $(FPD, \alpha, \mu; p) \sim N_i/N$  的一一映射关系。

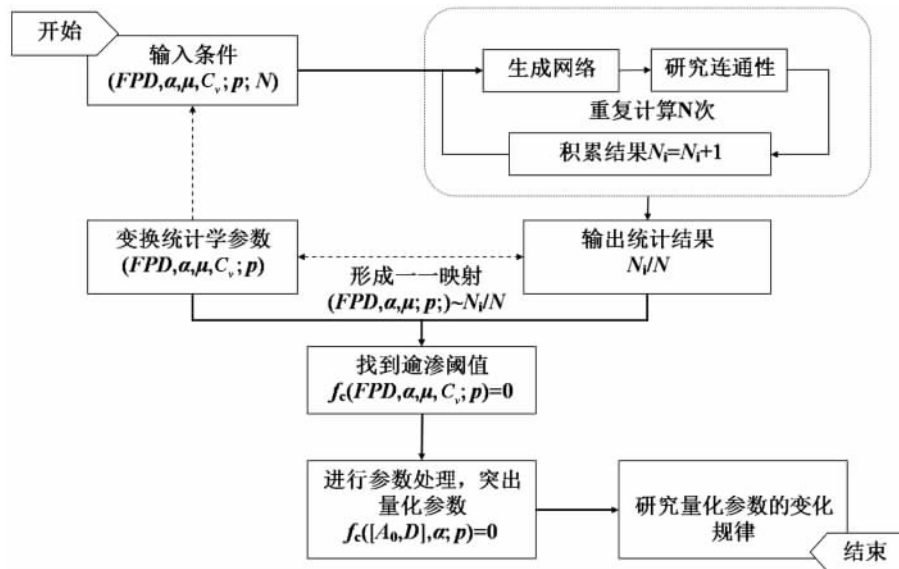


图 2 计算流程图

Fig. 2 Schematic of numerical simulation

以一个算例介绍算法实现过程,参数选取范围见表 1.

表 1 计算参数

Table 1 Parameters in numerical simulation

裂隙密度	裂隙平均长度 $\mu$	裂隙长度标准差 $\sigma$	裂隙倾角 $\alpha/^\circ$	连键概率 $p$
900、1 600、2 500、4 900、10 000	0.005 ~ 0.23	0 ~ 0.001	0 ~ 90	0 ~ 0.2

图 3 中右图所示的曲线表示在  $FPD = 900$ 、孔隙连通概率  $p = 0.2$ 、 $\alpha = 1.57(90^\circ)$  情况下,逾渗阈值的寻找过程:可以看到该曲线具有明显的突变特征,根据前述逾渗阈值的性质,取得曲线上逾渗概率为 50% 的点所对应的  $\mu$  值;于是形成一种特定的参数组合  $(FPD, p, \alpha, \mu)$ ,这个参数组合即为达到逾渗阈值的条件.经过多次变参数计算后,这些对应于逾渗阈值的特定参数组合  $(FPD, p, \alpha, \mu)$  构成四维空间中的一个曲面.图 3 中左图所示的是在  $(FPD, p, \alpha, \mu)$  四维空间中,固定  $FPD = 900$   $\alpha = 1.57$  时,四维空间中所对应的  $p \sim \mu$  曲线,体现了不同  $p$  值的情况下出现逾渗阈值时所对应的裂隙长度  $\mu$  随  $p$  的增大而减小的趋势.在  $p$  值较小的情况下 ( $< 0.4$ ) 逾渗阈值对应的  $\mu$  会随着  $p$  的减小而线性减小;  $p > 0.4$  以后,逾渗阈值对应的  $\mu$  随  $p$  减小速度明显加快;在  $p = 0.5$  时,逾渗阈值对应的  $\mu = 0$ ,表示此时发生了孔隙逾渗,不再需要裂隙的连通作用即可达到逾渗阈值.

图 4 说明不同裂隙密度时,即  $FPD = 1 600, 2 500, 10 000$  都会出现上述特征,只不过  $\mu$  值的变化范围有所不同.在  $p$  相同、 $FPD$  不同时,  $\mu$  值会随着  $FPD$  增大而相应减小.

当  $\alpha$  值取不同时,上述规律仍然存在,如图 5 和图 6 所示,  $\mu$  值随  $p$  值线性下降,  $p = 0.4$  为拐点位置.曲

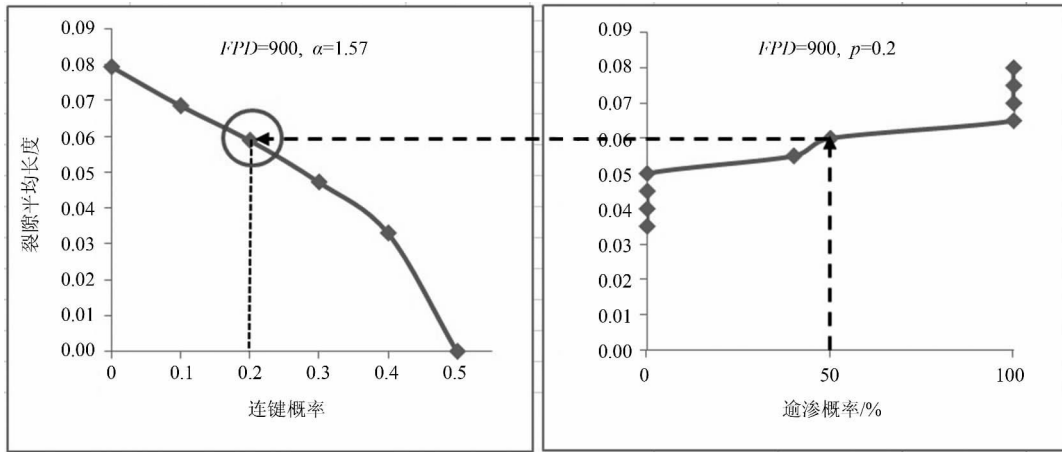


图 3 寻找逾渗阈值参数组合的过程

Fig. 3 Determining combination of parameters for percolation threshold

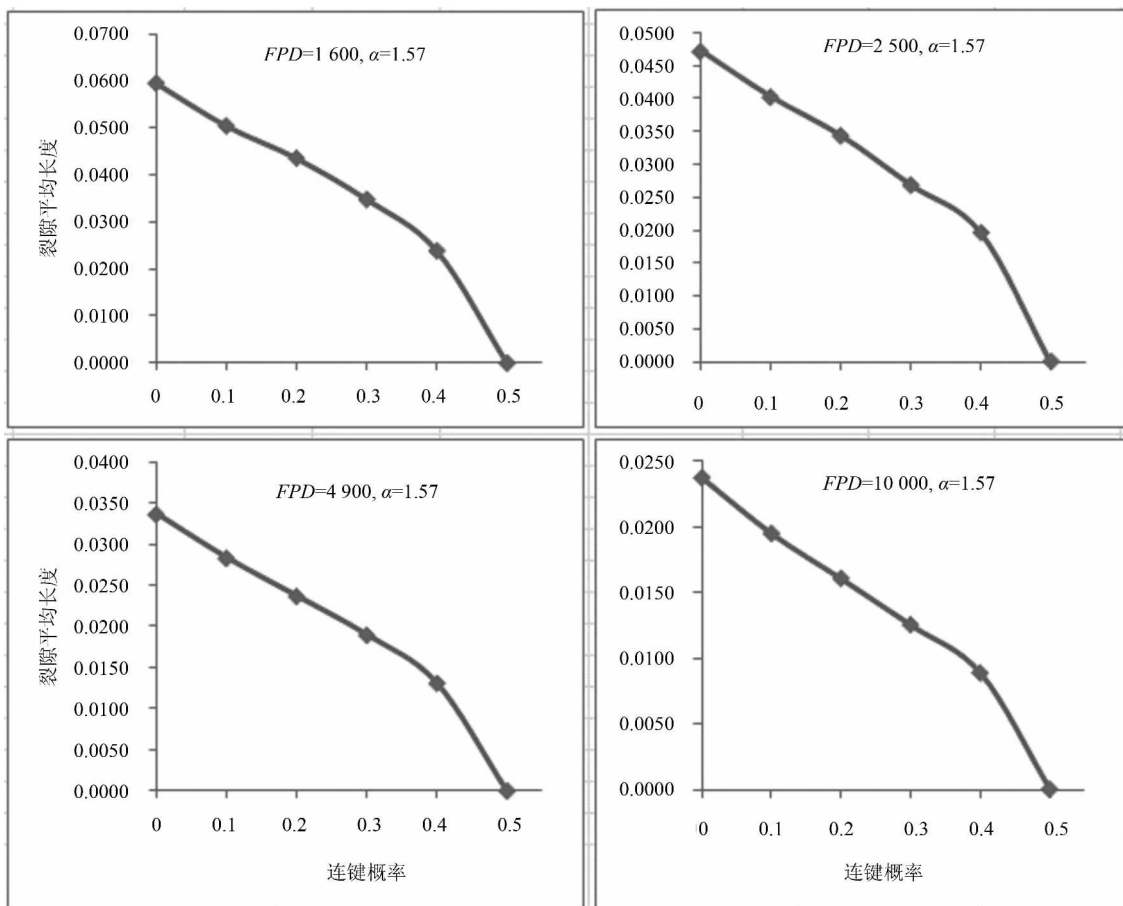


图 4 FPD 取不同值所对应的  $p \sim \mu$  曲线

Fig. 4  $p \sim \mu$  curves with different FPD

线下方为不发生逾渗(即连通)的安全区域. 各条曲线所包含的数据是按照  $A_0 = FPD \cdot \mu^D$  进行整理的, 在  $D$  取合理数值时,  $A_0 \sim FPD$  曲线能够在相应坐标系中保持一条直线, 如图 7 所示, 即存在这样一个分形维数  $D$ , 使得在  $(p, \alpha)$  确定的情况下, 只需要得到  $FPD$  较小时相应双重逾渗网络逾渗阈值条件(如  $\mu$ ) 即可通过公式  $A_0 = FPD \cdot \mu^D$  推导出  $FPD$  较大时对应的逾渗阈值条件(如  $\mu$ ).

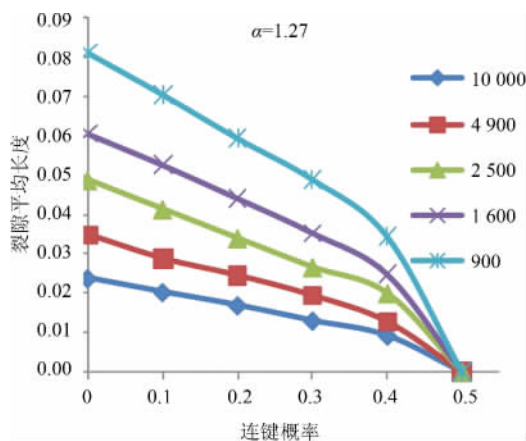


图 5  $\alpha = 1.27$  时  $FPD$  取不同值所对应的  $p \sim \mu$  曲线  
Fig. 5  $p \sim \mu$  curves at  $\alpha = 1.27$  and different  $FPD$

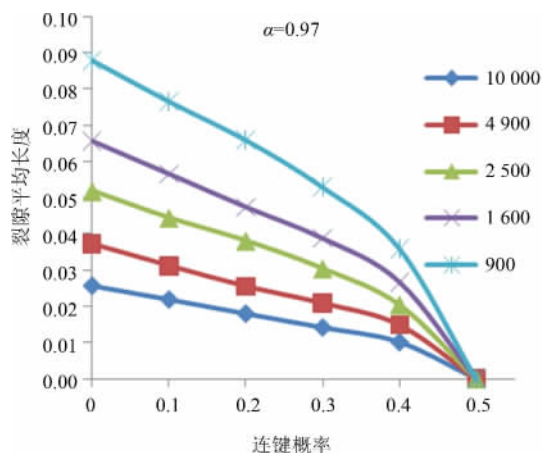


图 6  $\alpha = 0.97$  时  $FPD$  取不同值所对应的  $p \sim \mu$  曲线  
Fig. 6  $p \sim \mu$  curves at  $\alpha = 0.97$  and different  $FPD$

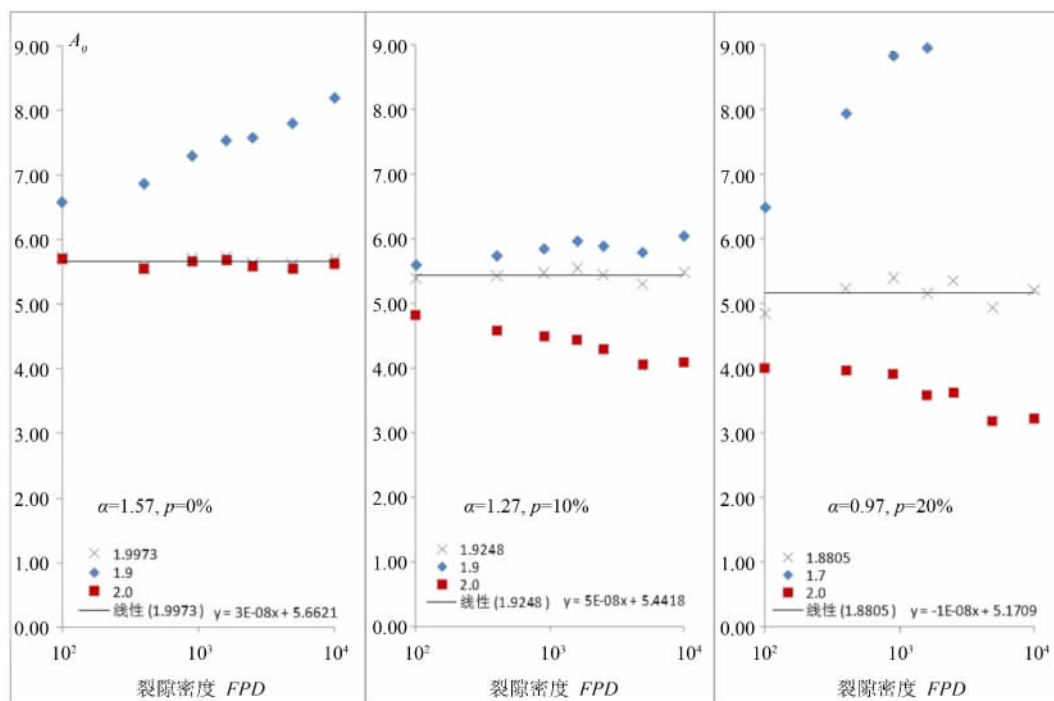


图 7 寻找  $A_0$  和分形维数  $D$  的过程

Fig. 7 Determining  $A_0$  and  $D$

重复图 7 所示的寻找  $A_0$  和分形维数  $D$  的过程,即可将双重逾渗模型达到逾渗阈值时对应的  $(FPD, p, \alpha, \mu)$  空间等价于  $([A_0, D], p, \alpha)$  三维空间,  $[A_0, D]$  相互关联,逾渗阈值的对应参数中不再包含有  $FPD$  和  $\mu$  等量级变化频繁的参数,有利于观察到模型随各参数变化而体现出来的规律,分析逾渗阈值时的物理意义.

### 2.2 算法验证

裂隙多孔介质具有明显的分形特征<sup>[19]</sup>.康天合等人通过测量统计分析,得出了天然裂隙介质中的指数分形规律:  $N(L) = A_0 L^{-D}$ ,其中  $N(L)$  为  $L$  长度的裂隙数量,  $A_0$  是比例系数,  $D$  是分形维数.

针对单重裂隙网络模型,Robinson 指出参量  $\hat{N}_c = (\text{line density}) \times (\text{length scale})^2$  能够用以判断裂隙网络连通性. Balberg 等人<sup>[20]</sup> 和 Berkowitz 等人<sup>[21]</sup> 提出在位置和方向随机分布的等长裂隙系统中,所有的临界连通裂隙网络符合量化规律  $B_c = N_c (2/\pi) L^2$ ,其中  $B_c = 3.58 \sim 3.62$ ,  $N_c$  表示临界裂隙密度,  $L$  表示裂隙长

度. 在上述二式中长度的指数 2 也可以认为是裂隙网络连通时的特征分形维数  $D$ , 且二式均可以改写为  $N(L) = A_0 L^{-D}$  的形式, 从而使得模型连通性判断与岩石的分形特征能够量化对应. 本文在计算中, 将双重逾渗模型简化至与 Balberg 等人 and Berkowitz 等人的研究条件相同时, 即考虑位置和方向均随机分布的等长裂隙系统, 能够得到与前人相一致的结果, 从而验证了双重逾渗模型及其计算方法. 图 8 中实线与虚线间表示不同裂隙密度条件下 Balberg 和 Berkowitz 等人  $B_c$  的范围, 实线表示上限 3.62, 虚线表示下限 3.58.

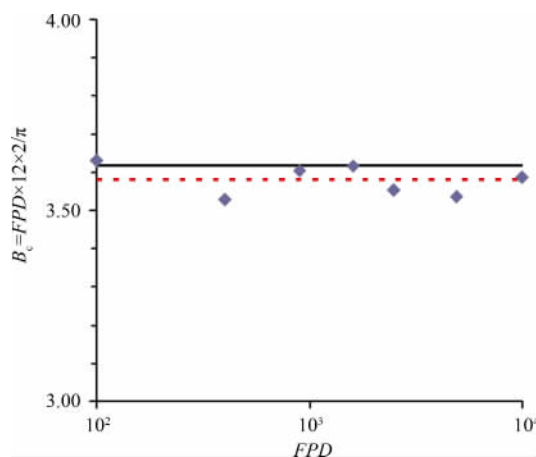


图 8 简化模型的计算结果对比  
Fig. 8 Results of simplified model and in Refs. [20 - 21]

### 2.3 样本规模与计算精度

一般来说, 样本的规模越大, 即重复试验的次数越多, 得到的规律越精确; 另一方面, 研究连通性时, 需要针对各种概率分布参数寻找特定参数组合下的逾渗阈值  $f_c$  曲线,  $FPD$  的取值会影响  $f_c$  曲线的幅值, 但不影响其变化规律, 待得到特定  $FPD$  情况下的逾渗阈值  $f_c$  曲线后, 可通过重整化处理或其他等效处理规律将结果对应于其他  $FPD$  情况下关心区域的连通性情况. Robinson 的结果表明,  $FPD$  (裂隙数量密度) 增加有利于结果精度的提高<sup>[22]</sup>. 但是由于数值计算的变量众多,  $FPD$  的增加会使得单个样本的 CPU 运算时间指数增长, 样本规模的扩大也会带来统计时间的加长. 因此提高计算精度, 需要在样本规模和  $FPD$  规模之间寻找合理平衡点.

图 9 给出了逾渗概率曲线随样本规模的变化, 计算时设孔隙通道连通率  $p = 0.2$ , 裂隙位置和裂隙长度为均匀分布. 图中横坐标表示关心区域的所有裂隙的无量纲总长度  $L = \mu \times FPD$ , 纵坐标表示在横坐标所示的参数组合条件下, 所有统计样本中发生了逾渗现象的样本所占总样本数目的比例, 即逾渗概率. 图中的彩色实线表示样本规模在 100 ~ 10 000 时的计算结果, 他们基本上相互重合, 表示精确度相似, 可以认为当样本规模超过 100 时, 增大样本规模对结果的精确度增加作用不大. 虚线表示样本规模取 10 时的计算结果, 通过比较可以看出, 在  $FPD = 100$  和  $FPD = 400$  时, 虚线明显体现出波动性, 与其他结果相差较大; 在  $FPD = 900$  时, 波动现象不明显, 与其他结果差异性较小; 在  $FPD = 1600$  时, 黑色虚线与其他结果基本重合. 由此可以确定随着  $FPD$  增加, 小样本规模的计算结果会逐渐精确. 考虑到 CPU 运算时间随样本规模线性增长, 而随  $FPD$  规模指数增长, 本文的计算中取  $FPD = 900$  为基准并适当提升样本规模至 50 ~ 100 以减小误差.

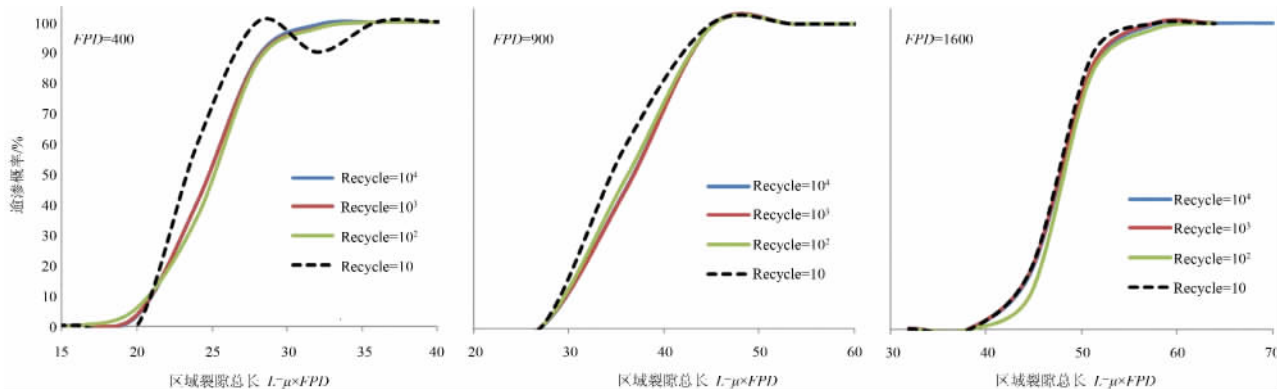


图 9 样本规模和 FPD 规模对数值计算精确度影响

Fig. 9 Effects of sample scale and FPD on precision of computation

### 3 结论和建议

阐述了裂隙多孔介质双重逾渗模型的算法、实现过程, 并与国外同类数值计算进行对比. 基于蒙特卡洛

法的双重逾渗模型是基于大量统计结果,同时兼顾计算速度和计算精度,从而得到统计规律的数值方法。

对该模型的控制参数进行初步探索,研究结果表明:

1) 将计算区域内裂隙数量限制在 900 左右,在孔隙、裂隙连通性数值模拟时样品规模基本合适;

2) 分形维数受孔隙连通率  $p$  影响,而对裂隙最大倾角的变化不敏感;

3) 双重逾渗模型具有分形特征,分形维数可以与裂隙岩石的分形特性相对应,可用于估算岩石的连通性,又可成为模拟更接近实际的孔隙裂隙岩石特征下的渗流规律研究工具。该模型基于等长裂隙分布的计算结果与国外报道一致。

目前,模型尚未考虑双重逾渗模型中不同尺度的孔隙、裂隙流动的微观物理机制,建议下一步研究探讨双重逾渗模型中的渗流规律,以更好地应用于工程中岩层对流体的封闭性评估。

### 参 考 文 献

- [1] Broadbent S R, Hammersley J M. Percolation processes [J]. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1957, **53**(3): 629–641.
- [2] Grimmett G R. Percolation [M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 1999.
- [3] Ma Z F, Zhuang Y C, Du L, Wei S. A percolation study of RTS noise in deep sub-micron MOSFET by Monte Carlo simulation [J]. Chinese Physics, 2005, **14**(4): 808–811.
- [4] 牟威圩, 许小亮. 感染生长模型的逾渗模拟 [J]. 物理学报, 2006, **55**(6): 2871–2875.
- [5] Wu J C, Sun H, Li Z Y. The effects of current-path patterns on magnetotransport in spatially-confined structures by Monte Carlo simulation [J]. Chinese Physics B, 2009, **18**(11): 5061–5065.
- [6] 江建军, 袁林, 邓联文, 何华辉. 磁性纳米膜的微磁学模拟 [J]. 物理学报, 2006, **55**(6): 3043–3048.
- [7] 曹春斌, 蔡琪, 江锡顺, 宋学萍, 孙兆奇. Ag-MgF<sub>2</sub> 复合纳米金属陶瓷薄膜的渗透阈研究 [J]. 物理学报, 2006, **55**(6): 3147–3151.
- [8] 刘志峰, 赖远庭, 赵刚, 张有为, 刘正峰, 王晓宏. 随机多孔介质逾渗模型渗透率的临界标度性质 [J]. 物理学报, 2008, **57**(4): 2011–2015.
- [9] John A Hudson, John P Harrison. engineering rock mechanics [M]. 2nd ed. Elsevier Science Ltd, 2000.
- [10] 冯增朝, 赵阳升, 文再明. 煤岩体孔隙裂隙双重介质逾渗机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(2): 236–240.
- [11] 冯增朝, 赵阳升, 吕兆兴. 强随机分布裂隙介质的二维逾渗规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(supp): 3904–3908.
- [12] 吕兆兴, 冯增朝, 赵阳升, 谭礼平. 孔隙裂隙双重介质的三维逾渗数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2007, **28**(supp): 291–294.
- [13] 冯增朝, 赵阳升, 吕兆兴. 二维孔隙裂隙双重介质逾渗规律研究 [J]. 物理学报, 2007, **56**(5): 2796–2801.
- [14] 郑委, 鲁晓兵, 刘庆杰, 张旭辉. 基于双重逾渗模型的裂隙多孔介质连通性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(6): 1289–1296.
- [15] 鲁晓兵, 郑委, 刘庆杰, 张旭辉. 一种基于逾渗模型的裂隙岩石渗透系数确定方法 [J]. 西北地震学报, 2011, **33**(Supp): 43–47.
- [16] 刘柏谦, 吕太. 逾渗理论应用导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [17] 康天合, 赵阳升, 靳钟铭. 煤体裂隙尺度分布的分形研究 [J]. 煤炭学报, 1995, **20**(4): 393–398.
- [18] Robinson P C. Connectivity of fracture systems: A percolation theory approach [J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1983, **16**: 605–614.
- [19] 谢和平. 分形—岩石力学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [20] Balberg I, Anderson C H, Alexander S, Wagner N. Excluded volume and its relation to the onset of percolation [J]. Physical Review B, 1984, **30**(7): 3933–3943.
- [21] Brian B. Analysis of fracture network connectivity using percolation theory [J]. Mathematical Geology, 1995, **27**(4): 467–483.
- [22] Priest S D, Hudson J A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geo-mechanics Abstracts, 1981, **18**: 183–197.



## Algorithm Implementation of Dual-Percolation Model of Fractured Pore Media

ZHANG Xuhui<sup>1</sup>, ZHENG Wei<sup>1</sup>, LIU Qingjie<sup>2</sup>, LU Xiaobing<sup>1</sup>

(1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *Research Institute of Exploration and Development of Chinese Petroleum, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** An algorithm and implementation of a dual-percolation model based on bond-percolation theory was introduced which combines pore-network with fracture-network. Monte-Carlo numerical simulation was conducted based on statistical analysis of key parameters, i. e. fracture population densities, Fracture angles, fracture lengths, and pore connectivity possibilities. Fractal dimension was presented to quantify fractal connectivity. Numerical results were in agreement with those of Balberg and Berkowitz et al. Finally, appropriate sample scale was discussed considering both calculation precision and computing time.

**Key words:** fracture; porous media; Monte-Carlo; dual-percolation; connectivity

---

**Received date:** 2013-05-30; **Revised date:** 2013-08-15