

# 基于双重逾渗模型的裂隙多孔介质连通性研究

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

(1. 中国科学院力学研究所 水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100190; 2. 中国石油勘探开发研究院采收率所, 北京 100083)

**摘要:** 孔隙和裂隙是裂隙多孔介质的 2 种渗流通道。在低渗和特低渗情况下, 孔隙和裂隙能否构成贯穿的通道, 决定介质能否发生渗流。针对低渗和特低渗裂隙多孔介质的连通性, 结合孔隙逾渗理论和裂隙逾渗理论, 提出一种双重逾渗模型。基于该模型, 提出能够反映和比较裂隙多孔介质连通性的 2 个量化参数  $A_0$  和  $D$ , 并重点讨论这 2 个量化参数物理意义。根据  $A_0$  和  $D$  这 2 个参数分析裂隙多孔介质的连通性特征。分析结果表明, 以  $D=2$  为临界值, 可以将裂隙多孔介质分为 3 种类型: “弥散型”、“临界型”、“指向型”。当  $D>2$  时, 介质具有自封闭趋势, 属于“指向型”; 随着孔隙连通和裂隙方向随机性的增强, 这种自封闭趋势会被破坏, 使介质趋向于“弥散型”, 即利于连通。少量长裂隙的存在对介质的连通性起决定作用。

**关键词:** 岩石力学; 双重逾渗; 连通性; 裂隙逾渗; 孔隙逾渗

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2011)06 - 1289 - 08

## STUDY OF CONNECTIVITY OF FRACTURED POROUS MEDIA BASED ON DUAL-PERCOLATION MODEL

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

(1. Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Pores and fractures are two main flow channels in fractured porous media. Under low and ultra-low permeability conditions, whether seepage occurs in media or not is decided by whether pores and fractures can form a penetrated channel or not. A dual-percolation model coupled the pore percolation theory and the fracture percolation theory is presented to study the conductivity of the low and ultra-low fractured porous media. Based on the presented dual-percolation model, two parameters  $A_0$  and  $D$  are presented to reflect and compare the conductivities of fractured porous media; and the physical meaning of these two parameters is quantitatively discussed. The connectivity of low and ultra-low permeability fractured porous media is investigated based on these two parameters. It is shown that the low and ultra-low permeability fractured porous media can be generally divided into three types by taking  $D=2$  as the critical value, i.e. dispersion type, critical type, and directional type. Media are self-sealing when  $D>2$  and they can be named as directional type. However, with the enhancements of randomnesses of porous connectivity and fracture directions, the self-sealing tendency will be destroyed and the conductivity will increase, which causes the media tending to become dissipation type. A few long fractures can play a great role on the connectivity of media.

**Key words:** rock mechanics; dual-percolation; connectivity; fracture percolation; pore percolation

## 1 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, 产生裂缝和裂隙, 成为地下油、

收稿日期: 2010 - 06 - 25; 修回日期: 2011 - 04 - 08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB705800)

作者简介: 郑 委(1985 -), 男, 2007年毕业于清华大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土力学和二氧化碳地下封存方面的研究工作。

E-mail: zhengwei-03@tsinghua.org.cn

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，也会连通成为渗流路径。研究这些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。

20 世纪 60 年代开展核废料埋存时，工程选址中需要同时分析岩层的低渗性质和低连通性质，以防辐射物质发生泄漏污染地下水环境<sup>[1]</sup>。但是在传统分析方法中，备选地层的极低渗条件和不均匀性使得连续介质模型难以良好适用。从此，裂隙渗流理论和逾渗理论发展起来，从非连续性介质的角度来研究地层的连通性。近年来，温室气体埋存工程中也面临类似问题，CO<sub>2</sub> 埋存后，尤其在初期，可能通过盖层中的孔隙、裂隙等各种通道逃逸，地层的连通性判断更为复杂且更有必要。基于此，本文结合裂隙渗流理论和逾渗理论，提出一种双重逾渗模型，研究多孔裂隙介质的连通性。在低渗和特低渗岩层中，孔隙和裂隙不一定能构成贯通整个介质的通道并能够发生渗流。本文所述的连通性是指多孔裂隙介质可以发生贯通性渗流。以下首先介绍双重逾渗模型的基本概念，再阐述双重逾渗模型用于连通性研究的情况。

## 2 研究裂隙多孔介质的双重逾渗模型

逾渗理论最早由 S. R. Broadbent 和 J. M. Hammersley<sup>[2]</sup>于 1957 年提出，用以研究无序孔隙介质中流体的流动等随机物理过程，基本理论构型为：介质内部有许多“节点”（称之为“点座”），它们经由许多“路径”（称之为“键”）连接在一起，形成多个“节点集团”（称为“连通集团”），并可能伴随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>[3]</sup>（即“逾渗集团”）。本文提出的双重逾渗模型，借鉴逾渗理论中的“键逾渗”概念，以裂隙网络为基础，叠加上孔隙和孔道的影响，以此来研究裂隙多孔介质的连通性。

本文中双重逾渗模型的第一重逾渗是裂隙网络逾渗。如图 1 所示，区域内随机分布的裂隙之间相互关联交接构成裂隙网络，其中考虑单位区域内的裂隙数量  $FPD$  (fracture population density)、长度  $\delta$ 、宽度  $d$ 、产状(倾角)  $\alpha_0$ 、空间分布特征等因素。在判断裂隙网络的连通性时，将每一条裂隙抽象成为

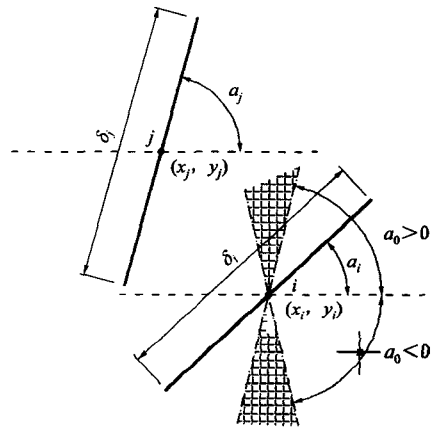


图 1 裂隙参数示意图

Fig.1 Sketch of the fracture parameters

一个概念“点座”，每个“点座”（裂隙）与其他所有“点座”之间的连通性决定于 2 个“点座”之间“键”的连通性：若 2 条裂隙在空间上是相交的，则“键”连通；反之亦然。在裂隙长度不均匀时，较长裂隙不仅会与近处裂隙相交，还可能与远处的裂隙相交，因此在判断连通性时，必须判断每条裂隙与其他所有裂隙相交与否。故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“点座”均与其他所有“点座”存在潜在连通关系，并由“键”（由孔隙构成）相连。

本文中双重逾渗模型的第二重逾渗是孔隙逾渗，孔隙逾渗是指在裂隙之间构成连通的辅助通道，即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，使得任意 2 条并不相交的裂隙以一定概率发生连通，这个概率就是孔隙连通概率  $p$ 。在考虑孔隙逾渗时，将整条裂隙抽象为键逾渗中的“点座”，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 2 条裂隙之间发生了通过孔隙通道的连通；断键表示 2 条裂隙之间的孔隙通道是堵塞的。在本文中，孔隙逾渗选取四边形简单构型：首先将已经生成的裂隙网络进行区域分组，分别以每一条裂隙为中心找到邻近的 4 条裂隙，中心裂隙和邻近的 4 条裂隙之间进行连键和断键判断，如图 2 所示，将“键逾渗”中的规整四边形网格，根据裂隙分布规律进行空间变换，成为不规整的四边形网格。

在孔隙/裂隙网络叠加后的连通性判断中：2 条裂隙之间的相交与否用(1, 0)来表示；2 条裂隙之间是否存在孔隙连通通道同样用(1, 0)来判断；然后叠加 2 种连接状态：1+1 = 1+0 = 0+1 = 1, 0+0 = 0,

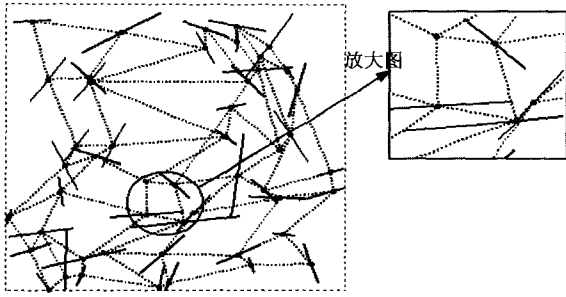


图2 双重逾渗模型中裂隙网络与孔隙网络叠加示意图  
Fig.2 Sketch of combining of fracture network and pore network in dual-percolation model

从而得到任意2条裂隙的连通情况。这样，将孔隙逾渗叠加到裂隙逾渗之上，就构成了双重逾渗。裂隙网络由于增加了孔隙连通通道，会有更多的裂隙由于相互连通形成连通集团，出现逾渗集团时的逾渗阈值需要用函数表示，即

$$f_c(\mu, \sigma, \alpha, FPD, p) = 0 \quad (1)$$

当  $f_c > 0$  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，而且在模拟大规模裂隙网络时更加快捷简便。如果将该模型进行简化：(1) 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) 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。

本文计算中应用蒙特卡洛法从统计学角度研究模型特性，计算中设裂隙中心点的位置服从均匀分布，裂隙倾角  $\alpha_0$  服从  $[-\alpha, \alpha]$  均匀分布。参照 S. D. Priest 和 J. A. Hudson<sup>[4]</sup> 对裂隙尺寸的研究结果，认为裂隙长度  $\delta$  服从  $(\mu, \sigma)$  正态分布。

### 3 能够量化描述多孔裂隙介质连通性的参数

#### 3.1 量化参数的选取

在研究裂隙多孔介质的连通性时，虽然能够根据裂隙、孔隙的统计规律，采用双重逾渗模型确定逾渗阈值，从而判断连通性，但是这种简单的方式具有以下缺点：(1) 缺乏易于操作的判定方法，工程应用不便，无法根据现场参数快速判断连通性；(2) 判断过程缺乏规律性，难以被工程界接受；(3) 模型中的抽象参数与实际岩体中裂隙、孔隙的特征参数脱节，难以形成主观认识。

针对上述缺点，本文将在前人研究成果的基础上，寻找概念明确、规律性好的量化参数来判断连通性。事实上，自逾渗理论应用于裂隙网络研究开始，科学界也一直在努力寻求这样量化参数：

(1) P. C. Robinson<sup>[5]</sup> 提出用参量  $\hat{N}_c = \lambda\mu^2$  (即裂隙网络模型的线密度  $\lambda$  与裂隙平均长度  $\mu$  平方的乘积) 来判断裂隙网络的连通性，并证明了  $\hat{N}_c$  在简单参数变化下为常数。

(2) K. Hestir 和 J. C. S. Long<sup>[6]</sup> 提出用参量  $\zeta = \lambda_a \mu^2 H(\theta)$  来判断裂隙网络的连通性，其中  $\lambda_a$  表示区域中裂隙的数量密度， $\mu$  表示区域中裂隙的平均长度， $H(\theta)$  为裂隙方向分布的修正系数，有  $0 \leq H(\theta) \leq 1$ 。

(3) I. Balberg 等<sup>[7-8]</sup> 也先后提出了参量  $B_c \sim N_c \langle V_{ex} \rangle$ ，其中  $N_c$  表示临界裂隙密度 (critical number of objects at threshold)， $\langle V_{ex} \rangle = (2/\pi)\mu^2$  表示裂隙的排他面积 (excluded volume)，经过证明  $B_c$  为常数。

上述3个参数实际上均是  $N_c = A_0\mu^{-2}$  的变种，其中  $A_0$  为常数。谢和平<sup>[9]</sup> 指出裂隙多孔介质具有明显的分形特征，康天合等<sup>[10-11]</sup> 也通过测量值的统计结果，得出了天然裂隙介质中的指数分形规律为

$$N(\mu) = A_0\mu^{-D} \quad (2)$$

式中： $N(\mu)$  为  $\mu$  的裂隙数量， $A_0$  为比例系数， $D$  为分形维数。

考虑到  $N_c = A_0\mu^{-2}$  与  $N(\mu) = A_0\mu^{-D}$  具有相似性，在本文研究中同时选取  $A_0$  和  $D$  为参数，寻找双重逾渗模型的逾渗阈值与分形性质之间的关联，有

$$FPD = A_0\mu^{-D} \quad (3)$$

在计算中裂隙长度选取为正态分布，可以模拟裂隙长度较为均匀的岩石，这类岩石的分形数决定于平均长度相近的裂隙数量与平均长度之间的负指数关系。

#### 3.2 量化参数 $A_0$ 和 $D$ 的物理意义

学者们一直采用固定  $D = 2$ 、修正  $A_0$  的方式来研究裂隙网络的连通规律，其中  $A_0$  为比例系数<sup>[5-6]</sup>，或者逾渗网络中连通点座的影响范围<sup>[7-8]</sup>。但对为什么取  $D = 2$  这一分形维数鲜有讨论，更少论及其物理意义。本文结合尺度比拟的原理，研究了双重逾渗模型公式  $A_0 = FPD\mu^D$  中分形维数  $D$  的物理意义。

应用双重逾渗模型时，计算区域的真实尺寸对应于特征长度  $\lambda$ ，裂隙的平均长度  $\mu = \delta/\lambda$ 。因此，在数学模型中，将计算区域抽象为  $1 \times 1$ ，而裂隙的

平均长度为  $0 < \mu \leq 1$ 。若仅从数学模型的角度进行研究, 则得到的分形维数  $D$  仅具统计学意义。但在裂隙多孔介质中, 裂隙(孔隙)的分布规律、统计学参数(如  $\mu$  和  $\sigma$  等)是已定的, 裂隙/孔隙网络也是固定的。不存在同样特征尺度  $\lambda$  内裂隙密度显著变化的情况, 计算区域(1×1)内裂隙密度的变化仅代表特征尺度  $\lambda$  的变化, 如图 3 所示。建立如下的  $FPD-\lambda$  关系:

$$FPD = C_1^2 \lambda_i^2 \tag{4}$$

式中:  $C_1^2$  为比例系数, 且为常数;  $\lambda_i$  为  $FPD = i$  时计算区域的特征长度。如图 3 所示, 在整体裂隙网络固定的情况下,  $4\lambda_{100} = 2\lambda_{400} = \lambda_{1600}$ ,  $\mu_i = \delta_i / \lambda_i$ 。

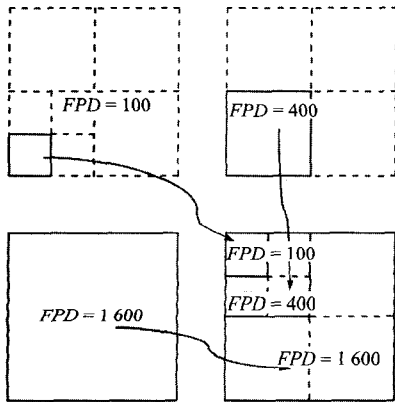


图 3 考虑尺度对应的计算区域示意图

Fig.3 Sketch of computation zone considering the corresponding scales

当分形维数取不同值时, 情况如下:

(1) 当分形维数  $D = 2$  时, 可得到  $A_0 = FPD\mu^D = (C_1\delta_i)^2$ , 由于  $A_0$  为常数, 因此  $\delta_i$  也为常数。在这种情况下, 只要  $FPD$  取任一值时, 该等式成立, 则  $FPD$  取其他任意值时该等式也成立, 如计算区域内  $FPD = 100$  时的连通性与计算区域  $FPD = 1600$  时的连通性相同。换言之, 若  $FPD = 100$  时对应的计算区域的真实尺寸为  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ ,  $FPD = 1600$  时对应的计算区域真实尺寸为  $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ , 则  $100\text{ m}^2$  的区域连通性与  $1600\text{ m}^2$  的区域连通性相同, 即较小区域的连通性特征可以代表较大区域的连通性特征。对应于这种情况的裂隙多孔介质( $D = 2$ ), 只需要研究较小区域的连通性特征即可推知整体。符合这种规律的裂隙多孔介质, 可称其为“临界型”裂隙多孔介质。

(2) 当分形维数  $D < 2$  时, 则可推导得出  $A_0 = FPD\mu^D = (M_1\lambda_i)^{2-D}(M_1\delta_i)^D$ , 由于  $A_0$  为常数,

则有  $2 - D > 0$ , 因此  $\delta_i$  与  $\lambda_i$  呈反比例关系。采用与情况(1)中类似的例子, 当  $\lambda_{1600} > \lambda_{400} > \lambda_{100}$  时, 则有逾渗阈值  $\delta_{1600} < \delta_{400} < \delta_{100}$ , 即有区域连通性  $1600\text{ m}^2 > 400\text{ m}^2 > 100\text{ m}^2$ 。在这种情况下, 模型考察范围越大, 包含的裂隙越多, 得到的结果越趋于发生连通; 反之亦然。对于这类岩石, 小范围的裂隙孔隙介质连通性计算结果不能有效代表大范围岩石的连通性特征。符合这一条件的岩石若出现在地层中, 其范围越大, 对地层的封闭性越不利。符合这种规律的裂隙多孔介质, 可以称其为“弥散型”裂隙多孔介质。

(3) 当分形维数  $D > 2$  时, 可推导得出  $A_0 = FPD\mu^D = (M_1\delta_i)^D / (M_1\lambda_i)^{D-2}$ , 由于  $A_0$  为常数, 则有  $D - 2 > 0$ , 因此  $\delta_i$  与  $\lambda_i$  呈正比例关系。仍采用与情况(1)中类似的例子, 当  $\lambda_{1600} > \lambda_{400} > \lambda_{100}$  时, 则有逾渗阈值  $\delta_{1600} > \delta_{400} > \delta_{100}$ , 即区域的连通性  $1600\text{ m}^2 < 400\text{ m}^2 < 100\text{ m}^2$ 。这种情况下, 模型考察范围越大, 包含的裂隙越多, 得到的结果越趋于不发生连通; 反之亦然。对于这类岩石, 较小范围内的裂隙孔隙介质连通性计算结果若满足封盖条件, 就能保证大范围内该种介质保持非连通性。符合这一条件的岩石若出现在地层中, 其范围越大, 对地层的封闭性越有利。符合这种规律的裂隙多孔介质, 可称其为“指向型”裂隙多孔介质。

### 4 计算结果

在计算中假设如果在研究区域内存在一条同时满足以下 2 个条件的裂隙: (1) 本身能够贯穿一端边界; (2) 能够寻找到一条连通的通道与另一条贯穿另一端边界的裂隙相连, 或者本身也能够贯穿另一端边界, 那么就认为研究区域内的双重逾渗网络发生了逾渗连通, 这时网络中的参数组合就称为发生逾渗的参数组合。

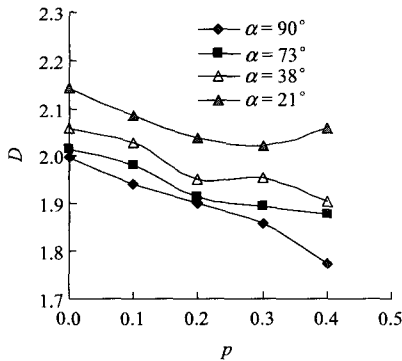
计算中采用蒙特卡洛法, 针对不同的参数组合 ( $FPD, p, \alpha, \mu, \sigma$ ) 的每一种情况, 重复选取 50~100 个样本进行计算, 统计该参数组合下发生连通样本的概率。刘伯谦和吕太<sup>[12]</sup>的研究表明, 当逾渗概率达到 50% 时, 材料发生逾渗。故本文设连通概率达到 50% 时, 认为该参数组合为逾渗阈值, 即  $f_c(FPD, p, \alpha, \mu, \sigma) = 0$ 。对逾渗阈值  $f_c(FPD, p, \alpha, \mu, \sigma)$  依照前述公式  $A_0 = FPD\mu^D$  进行整理, 得到  $([A_0, D], p, \alpha, \sigma)$  对应的逾渗阈值, 将其分情

况整理，就可得到后面几节将要阐述的结果。

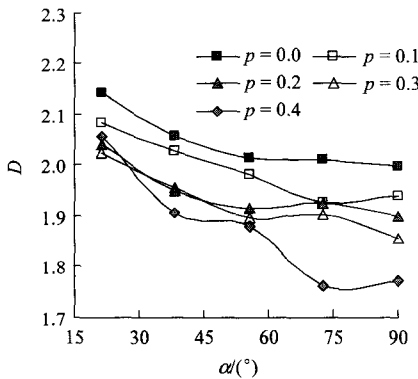
### 4.1 等长裂隙时的结果

在本节中，设裂隙位置均匀分布，角度在  $[-\alpha, \alpha]$  随机分布，裂隙等长(即  $C_v = \sigma / \mu = 0$ )，得到在  $\alpha, p$  取不同值时的曲线，如图4所示。

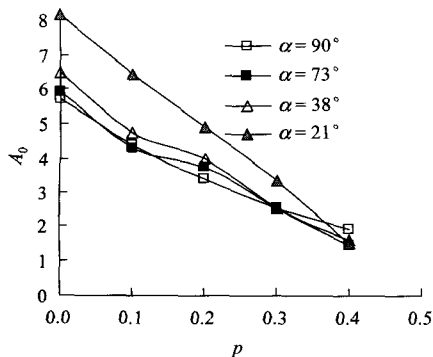
由图4(a)可见：(1) 随着  $p$  增大，分形维数  $D$  呈线性下降的趋势，各条曲线的斜率为  $-4.0 \sim -5.0$ ， $p$  越大则越趋向于“弥散型”裂隙多孔介质。(2) 在  $p$  值较大( $>0.3$ )时，分形维数  $D$  值开始出现较大的波动，表明孔隙连通率较大时，双重逾渗网络中的孔隙逾渗已经趋近于逾渗阈值，以裂隙长度表示的逾渗阈值发生较大的波动。(3)  $\alpha$  值越小则分形维数  $D$



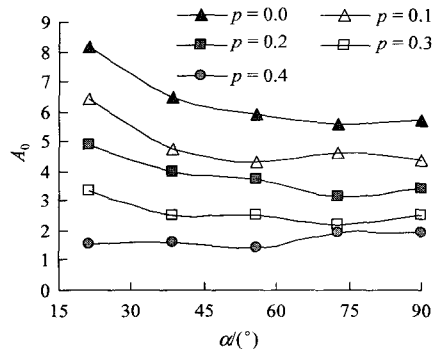
(a) 裂隙最大倾角  $\alpha$  不同时，分形维数  $D$  值随孔隙连通概率  $p$  变化



(b) 孔隙连通概率  $p$  不同时，分形维数  $D$  值随裂隙最大倾角  $\alpha$  的变化



(c) 裂隙最大倾角  $\alpha$  不同时， $A_0$  值随孔隙连通概率  $p$  变化



(d) 孔隙连通概率  $p$  不同时， $A_0$  值随裂隙最大倾角  $\alpha$  的变化

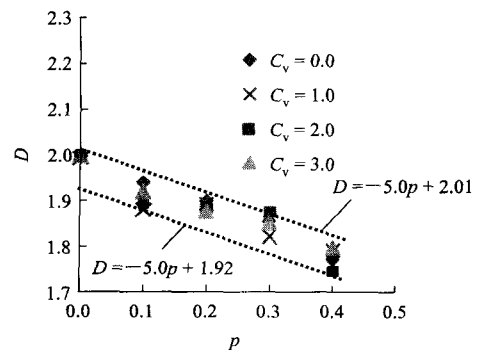
图4 裂隙最大倾角  $\alpha$ ，孔隙连通概率  $p$  取不同值时分形维数  $D$  和  $A_0$  的变化曲线( $C_v = 0$ )

Fig.4 Variation curves of fractal dimension  $D$  and  $A_0$  at different values of different maximum angle  $\alpha$  and pore connective probability  $p(C_v = 0)$

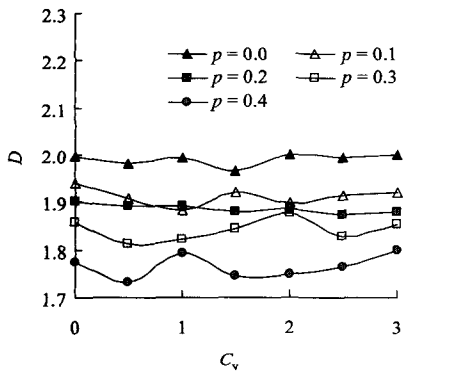
越大， $\alpha = 21^\circ$ 时整条曲线都位于  $D = 2$  之上，表明  $\alpha = 21^\circ$ 时，双重逾渗网络不会体现出“弥散型”裂隙介质的特征，具有这种特征的岩体不易发生连通。由图4(c)可知，在  $\alpha$  取不同值时， $A_0$  均随  $p$  的增大而线性减小，表明随着裂隙多孔介质中孔隙连通性增强，达到逾渗阈值时所需要的裂隙长度(即裂隙之间的连通性)减小。由图4(d)可知： $A_0$  值在  $p < 0.4$  时，会随着  $\alpha$  值的增大而有所减小，表明在裂隙多孔介质中，裂隙方向趋于同向时，不利于所在区域出现连通，反之亦然；而在  $p = 0.4$  时， $A_0$  值重合，表明孔隙连通性已经在逾渗中起到控制性作用。

### 4.2 非等长裂隙时的结果

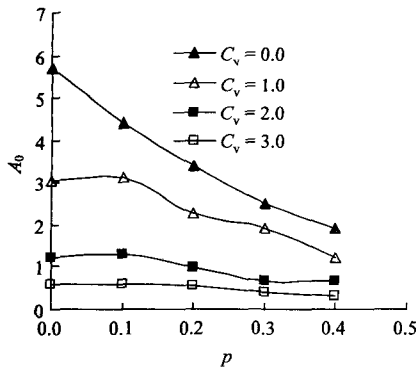
在本节的计算结果中将考虑裂隙长度的不均匀性，即设裂隙长度符合正态( $\mu, \sigma$ )分布，考虑到  $FPD$  不同时  $\mu$  值的变化较大，均方差  $\sigma$  用  $C_v = \sigma / \mu$  体现。图5给出了裂隙位置均匀分布、角度在  $[-90^\circ, 90^\circ]$  随机分布， $C_v = 0.0 \sim 3.0$  时， $p$  取不同值得到的结果。



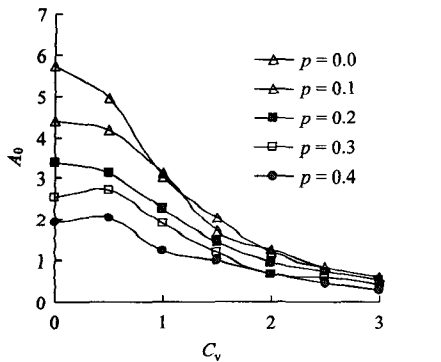
(a)  $C_v$  不同时，分形维数  $D$  值随孔隙连通概率  $p$  的变化



(b) 孔隙连通概率  $p$  不同时, 分形维数  $D$  值随  $C_v$  的变化



(c)  $C_v$  不同时,  $A_0$  值随孔隙连通概率  $p$  的变化



(d) 孔隙连通概率  $p$  不同时,  $A_0$  值随  $C_v$  的变化

图5 孔隙连通概率  $p$ ,  $C_v$  取不同值时, 分形维数  $D$  和  $A_0$  的变化曲线(裂隙最大倾角  $\alpha = 90^\circ$ )

Fig.5 Variation curves of fractal dimension  $D$  and  $A_0$  at different values of pore connective probability  $p$  and  $C_v$ (different maximum angle  $\alpha = 90^\circ$ )

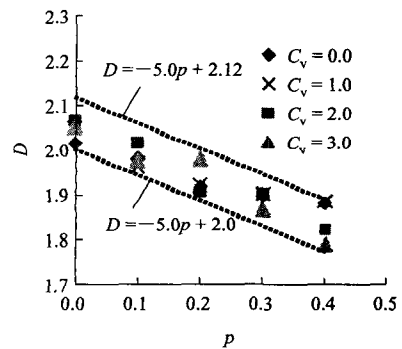
由图 5(a), (b)可知: (1) 随着  $p$  增大, 分形维数  $D$  呈线性下降。 $C_v$  取不同值时, 所得结果全部落在  $D = -5.0p + 2.01$  与  $D = -5.0p + 1.92$  两条直线之间, 2 条直线在均值之间的波动范围为  $\pm 2.5\%$ 。(2) 在  $\alpha = 90^\circ$  的情况下,  $C_v$  值变大时,  $D$  值波动性会增强, 但整体上仍在均值附近震荡。无论  $p$  取何值,  $D$  值均小于 2.0, 属于“弥散型”裂隙多孔介质。

由图 5(c)可知, 随着  $C_v$  值的变大,  $A_0$  曲线的位置迅速降低。对同一条  $A_0$  曲线,  $A_0$  随  $p$  值增大而减小。在  $C_v = 0$  时, 这种减小趋势近似线性; 在  $C_v > 0$  时,  $p < 0.1$  时  $A_0$  值变动不大, 而在  $p > 0.1$  后,  $A_0$  呈线性减小规律。

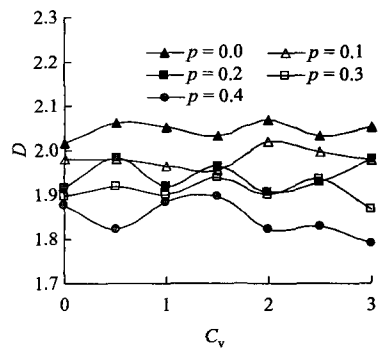
由图 5(d)可知: (1) 在  $p$  值不变的情况下,  $A_0$  随  $C_v$  值的增大而迅速减小。这是因为区域中出现了较长的裂隙, 较长的裂隙虽然较少, 却在裂隙网络的连通中起到更大作用。 $C_v$  值越大, 长裂隙越多, 长裂隙对连通的贡献就越大, 而长度在平均值附近的裂隙的作用减弱, 这时平均长度的裂隙只需少量发生连通就可保证区域的连通性。(2)  $p$  值越大,  $A_0$  曲线位置越低。原因同前述, 孔隙连通率增加导致逾渗对裂隙连通的依赖降低。

图 6 给出了考虑边界影响, 裂隙位置均匀分布, 角度在  $[-73^\circ, 73^\circ]$  随机分布,  $C_v = 0.0 \sim 3.0$  时,  $p$  取不同值得到的结果。可以看出, 得到的结果与  $\alpha = 90^\circ$  时的结果规律保持一致, 但是  $A_0$  曲线的位置略高,  $D$  值的范围在  $D = -5.0p + 2.12$  与  $D = -5.0p + 2.0$  两条直线之间, 2 条直线与均值之间的误差为  $\pm 3.0\%$ 。

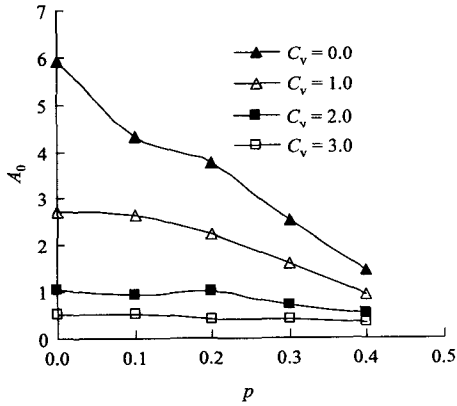
图 7 所示为  $C_v$  值固定( $C_v = 1.5$ )时, 考察  $\alpha$  变化对



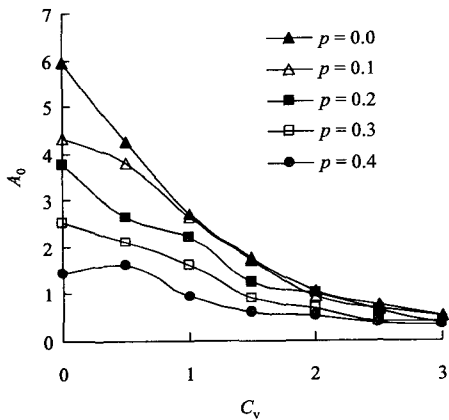
(a)  $C_v$  不同时, 分形维数  $D$  随孔隙连通概率  $p$  的变化



(b) 孔隙连通概率  $p$  不同时, 分形维数  $D$  随  $C_v$  的变化



(c)  $C_v$ 不同时,  $A_0$ 值随孔隙连通概率  $p$  的变化

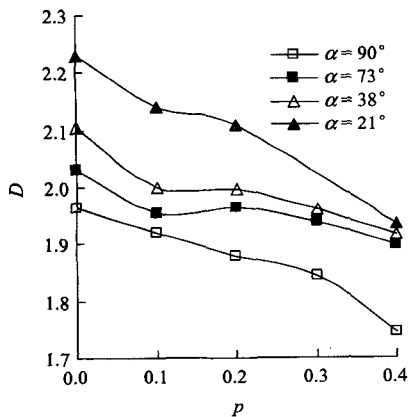


(d) 孔隙连通概率  $p$  不同时,  $A_0$ 值随  $C_v$  的变化

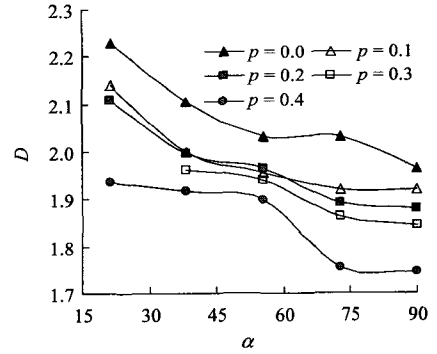
图6 孔隙连通概率  $p$ ,  $C_v$  取不同值时,  $D$  和  $A_0$  的变化曲线(裂隙最大倾角  $\alpha = 73^\circ$ )

Fig.6 Variation curves of fractal dimension  $D$  and  $A_0$  at different values of pore connective probability  $p$  and  $C_v$ (different maximum angle  $\alpha = 73^\circ$ )

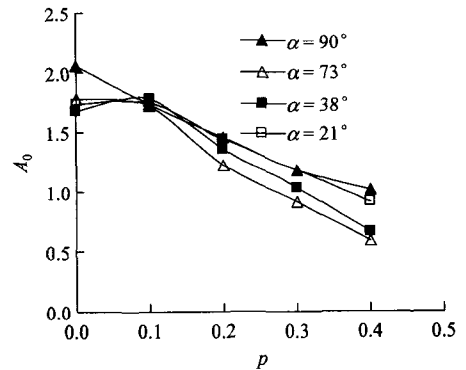
分形规律带来的影响。图 6(a), (b) 表现出来的  $D$  值规律与图 4(a), (b) 非常相似,  $\alpha = 21^\circ$  时为“指向型”裂隙多孔介质。但是在图 7(a) 中, 由于裂隙长度不



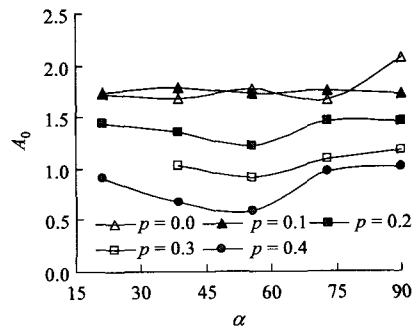
(a) 裂隙最大倾角  $\alpha$  不同时, 分形维数  $D$  值随孔隙连通概率  $p$  变化



(b) 孔隙连通概率  $p$  不同时, 分形维数  $D$  值随裂隙最大倾角  $\alpha$  变化



(c) 裂隙最大倾角  $\alpha$  不同时,  $A_0$  值随孔隙连通概率  $p$  变化



(d) 孔隙连通概率  $p$  不同时,  $A_0$  值随裂隙最大倾角  $\alpha$  变化

图7 裂隙最大倾角  $\alpha$ , 孔隙连通概率  $p$  取不同值时, 分形维数  $D$  和  $A_0$  的变化曲线( $C_v = 1.5$ )

Fig.7 Variation curves of fractal dimension  $D$  and  $A_0$  at different values of different maximum angle  $\alpha$  and pore connective probability  $p$  ( $C_v = 1.5$ )

确定性的影响, 导致不同  $\alpha$  值时  $D-p$  曲线的间隔比图 4(a) 大一些。图 7(c) 与图 4(c) 表现出来的  $A_0-p$  曲线有所不同, 图 7(c) 中不同  $\alpha$  值时  $A_0-p$  曲线有相互重合的情况。

### 5 结论

(1) 基于裂隙岩体在满足逾渗阈值时各参数符

合  $A_0 = FPD\mu^2$  这一规律的基础上, 本文引入新的参数——分形维数  $D$ , 将规律修正为  $A_0 = FPD\mu^D$ 。

(2) 对分形维数  $D$  的物理意义进行了研究, 认为:  $D=2$  是判定岩石连通属性的临界值;  $D<2$  时岩石属于“弥散型”裂隙多孔介质, 范围越大, 对地层的封闭性能越不利;  $D>2$  时岩石属于“指向型”裂隙多孔介质, 范围越大, 对地层的封闭性能越有利。

(3) 等长裂隙分布时, 假设裂隙位置均匀分布。这种情况下,  $D$  随  $p$  的增大呈线性减小, 而对  $\alpha$  的变化不敏感。 $A_0$  值表征了达到逾渗阈值时, 网络中裂隙平均长度的大小,  $A_0$  随  $p$  的增大而减小, 减小速度不呈线性,  $p$  较小时的减小速度较慢,  $p$  较大时的减小速度变快, 存在一个拐点。该拐点的存在表明在这个临界值以后, 孔隙连通效应在双重逾渗中起到主要作用, 而之前, 裂隙的连通作用占据主导。 $\alpha$  值越大,  $A_0$  值越小, 即裂隙方向越趋于同向, 越不利于所在区域出现连通, 反之亦然。

(4) 非等长裂隙分布时, 假设裂隙长度按正态分布, 裂隙位置均匀分布。这种情况下,  $D$  随  $p$  的增大依然呈现出线性减小。在  $\alpha=90^\circ$  时,  $D$  位于 2 条直线  $D=-5.0p+2.01$  与  $D=-5.0p+1.92$  之间; 在  $\alpha=73^\circ$  时,  $D$  位于 2 条直线  $D=-5.0p+2.12$  与  $D=-5.0p+2.0$  之间。 $A_0$  值会随  $C_v$  值增大而迅速减小, 意味着出现了较长的裂隙, 对连通作用起控制作用。

## 参考文献(References):

- [1] WILSON C R, WITHERSPOON P A, LONG J C S, et al. Large-scale hydraulic conductivity measurements in fractured granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6): 269 - 276.
- [2] BROADBENT S R, HAMMERSLEY J M. Percolation processes[J]. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1957, 53(3): 629 - 641.
- [3] GRIMMETT G R. Percolation[M]. 2nd ed. New York: Springer Publishing, 1999: 378 - 396.
- [4] PRIEST S D, HUDSON J A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(3): 183 - 197.
- [5] ROBINSON P C. Connectivity of fracture systems: a percolation theory approach[J]. Journal of Physics A: Mathematical General, 1983, 16(3): 605 - 614.
- [6] HESTIR K, LONG J C S. Analytical expressions for the permeability of random two-dimensional Poisson fracture networks based on regular lattice percolation and equivalent media theories[J]. Journal of Physics Research, 1990, 95(B13): 21 565 - 21 581.
- [7] BALBERG I, ANDERSON C H, ALEXANDER S, et al. Excluded volume and its relation to the onset of percolation[J]. Physical Review B: Condensed Matter, 1984, 30(7): 3 933 - 3 943.
- [8] BERKOWITZ B. Analysis of fracture network connectivity using percolation theory[J]. Mathematical Geology, 1995, 27(4): 467 - 483.
- [9] 谢和平. 分形 - 岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1 - 11.(XIE Heping. Introduction to fractal-rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996: 1 - 11.(in Chinese))
- [10] 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.(KANG Tianhe, ZHAO Yangsheng, JIN Zhongming. Fractal study of crack scale distribution in coal mass[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(4): 393 - 398.(in Chinese))
- [11] 吕兆兴, 冯增朝, 赵阳升, 等. 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(增): 291 - 294.(LU Zhaoxing, FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng, et al. Numerical simulation of percolation law of 3D porous and fractured double-medium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Supp.): 291 - 294.(in Chinese))
- [12] 刘柏谦, 吕太. 逾渗理论应用导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 84 - 89.(LIU Boqian, LU Tai. Introduction to percolation theory application[J]. Beijing: Science Press, 1997: 84 - 89.(in Chinese))