

# 基于离散裂隙网络模型的节理岩体渗透张量及特性分析

王培涛<sup>1,2</sup>, 杨天鸿<sup>1,2</sup>, 于庆磊<sup>1,2</sup>, 刘洪磊<sup>1,2</sup>, 夏 冬<sup>1,2</sup>, 张鹏海<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 沈阳 110819; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819)

**摘 要:** 节理岩体几何结构非常复杂, 研究其渗流特性对于指导含水岩层稳定性分析具有重要价值。应用离散裂隙网络模型 DFN 方法, 基于 VC++6.0 软件平台, 建立了平面渗流分析方法, 分析了节理岩体不同几何分布情况下的渗透率张量特征, 通过定义渗流定向性系数对岩体渗流的定向性特征进行了定量分析。结果表明: 单组节理岩体渗流具有明显的各向异性特征, 渗流定向性随着节理角度变化显著; 节理随着节理贯通性增加, 节理渗透率呈现对数增加趋势; 两组节理情况下, 各向异性特征随着节理组间夹角变化; 两组节理岩体渗流特征研究中, 正交分布下, 岩体仍存在各向异性, 但渗流定向性系数较低; 当节理倾角服从正态分布时, 随着节理倾角标准差增大, 渗透率增加; 两组节理夹角不同时, 节理渗透主方向倾角随着夹角增大而相应增大, 基本沿两组节理夹角方向的角平分线方向。

**关 键 词:** 节理岩体; 渗透张量; 离散裂隙网络; 定向性系数; 各向异性

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

## Permeability tensor and seepage properties for jointed rock masses based on discrete fracture network model

WANG Pei-tao<sup>1,2</sup>, YANG Tian-hong<sup>1,2</sup>, YU Qing-lei<sup>1,2</sup>, LIU Hong-lei<sup>1,2</sup>, XIA Dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng-hai<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** Joint systems in rock masses are geometrically complex; and investigation of the hydraulic properties is important for understanding the hydraulic behavior of jointed rock masses and stability analysis of rock engineering. A discrete fracture network (DFN) model was designed using C++ language based on VC++6.0 platform to realize a fracture network for seepage analysis. The permeability coefficients, possibility of equivalent permeability tensors of the jointed rock masses were examined by simulating flow through DFN models of varying joint properties. A directionality coefficient was defined to quantitatively assess the principal flow direction in jointed rock masses. The results show that the permeability coefficients are anisotropic according to permeability tensor analysis for rock masses with only one set of joints. The degree of obliquities of joint plane affects obviously the principal direction of permeability. The permeability coefficients increase logarithmically with the increase of joints connectivity rates. In the scenarios where two sets of joints existed, the anisotropic properties vary with the joints geometrical distribution. The permeability anisotropy in a fracture network with two mutually perpendicular sets of joints still exists; and however, the directionality coefficients are examined smaller. For the dip angles whose probability distribution can be effectively by normal function, the permeability coefficients increase with increasing of the standard deviation. The principal direction of permeability runs similarly along the direction of angle bisector between two sets of joints.

**Key words:** jointed rock mass; permeability tensor; discrete fracture network(DFN); directionality coefficient; anisotropy

## 1 引 言

岩体是处于一定地质环境下的地质体, 地下水

在岩体中的运动称为岩体渗流。由于岩体结构的复杂性, 使得岩体中地下水的运动十分复杂。由于岩体中结果面的不连续性、岩体介质的非均质性和各

收稿日期: 2013-02-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (No. 2013CB227902); 国家自然科学基金项目 (No. 50904013, No. 51174045); 国家自然科学基金重点项目 (No. 51034001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. N090101001, No. N120601002)。

第一作者简介: 王培涛, 男, 1987 年生, 博士研究生, 从事岩石力学参数表征学习和研究。E-mail: peitaowpt@163.com

向异性, 岩体渗流具有不连续性、渗透具有各向异性等特点。开展节理岩体渗透特性研究, 探究不同分布节理对渗透规律影响, 对于指导工程设计具有重大的理论意义和实践作用<sup>[1]</sup>。一般的, 岩体裂隙发育极不规则, 裂隙网络的几何构成非常复杂<sup>[2]</sup>, 近十几年来, 随着计算机技术的不断发展, 国内外很多学者应用离散裂隙网络 (discrete fracture network) 模型开展了大量岩体渗流领域的研究<sup>[3-10]</sup>。

应用离散裂隙网络方法研究调查区域节理岩体的渗流问题对岩体渗流的各向异性进行分析, 能够较为深刻地认识裂隙渗流的本质<sup>[7]</sup>。Baghbanan 等<sup>[8]</sup>基于 UDEC 计算平台, 结合离散节理网络方法, 研究了节理开度及迹长对渗透张量的影响, 并对渗透各向异性进行了分析, 表明裂隙网络方法可以用于研究复杂节理的渗流特性。文献<sup>[9]</sup>基于多点统计法建立了节理网络模型, 并推广到 Yucca 山渗流问题研究中, 该方法将渗流问题与力学问题相结合, 具有很好地工程价值。文献<sup>[10]</sup>借助 3GSM 三维岩体不接触测量技术, 建立了三维岩体结构面空间分布模型, 并进一步得到研究区域的裂隙网络切面, 分析了范各庄煤矿渗透张量参数, 对于指导岩体渗流研究具有重要的科学意义。

裂隙网络模型一般与裂隙网络的赋存组数、节理倾角及其分布特性、贯通率等密切相关, 而裂隙网络如何影响节理岩体渗透特性缺乏定量分析, 因此, 本文从裂隙网络研究渗流问题出发, 基于 VC++ 6.0 平台, 建立平面裂隙网络渗流分析方法, 分别分析单组节理和两组节理情况下, 不同几何分布节理岩体的渗流规律, 并分析不同节理几何分布情况下的各向异性和渗流定向性特征, 研究结果将为岩体渗流问题的进一步研究奠定基础。

## 2 渗透张量分析的基本原理

### 2.1 离散介质网络模型

对于二维裂隙网络模型, 节理主要为直线状, 相互交叉。通过现场实测可以得到节理倾角、迹长、间距或者密度以及节理的隙宽, 进一步获得每组变量的统计分布规律, 最后, 应用 Monte Carlo 方法生成节理网络如图 1 所示。

对应该裂隙网络, 主要结构因素包括裂隙交点及交点间线元。如图 1 所示, 该裂隙样本渗流区域内, 有  $N$  个裂隙交叉点 (节点)、 $M$  个线元, 每个节点对应一个坐标值, 而每条线元对应定向长度为  $l_j$  的裂隙段, 裂隙隙宽为  $b_j$ 。

在裂隙网络系统中取一由节点  $i$  和  $N'$  个交于节

点  $i$  的线元组成的均衡域, 按水流均衡原理 (质量守恒), 得节点  $i$  处的水流方程为<sup>[11]</sup>

$$\left( \sum_{j=1}^{N'} q_j \right)_i + Q_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中:  $q_j$  为  $j$  线元流进或流出节点  $i$  的流量;  $N'$  为节点  $i$  的度数, 即交于  $i$  节点裂隙线元的总数;  $Q_i$  为节点  $i$  处的源 (汇) 项。

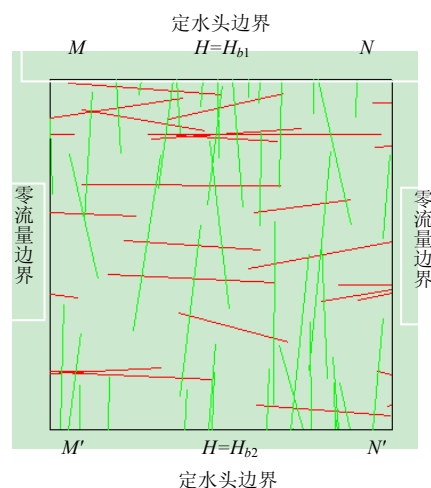


图 1 二维裂隙网络示意图

Fig.1 Sketch of two-dimensional fractures network

二维渗流区域  $MN$  和  $M'N'$  为定水头边界,  $MM'$  和  $NN'$  为零流量边界, 由式 (2) 得其裂隙网络渗流数学模型为

$$\left. \begin{aligned} Aq + Q &= 0 && \text{域内} \\ H|_{MN} &= H_{b1} \\ H|_{M'N'} &= H_{b2} \\ \partial H / \partial n|_{MM', NN'} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: 内节点和零流量边界节点的水头  $H$  为未知量;  $q$  包含有  $H$  项, 其中第  $j$  线元的流量由单一裂隙渗流公式求得

$$q_j = \frac{\gamma b_j^3}{12\mu} \frac{\Delta h_j}{l_j} \quad (3)$$

式中:  $\Delta h_j$  为水头差;  $\mu$  为水的黏度系数;  $\gamma$  水的重度;  $b_j$  为节理水力开度。上述模型可建立  $N$  个方程组, 用数值方法求得每个线元的流量  $q$  和节点的水头  $H$ 。在渗透系数计算中, 基质不透水, 边界  $MN$ 、 $NN'$ 、 $M'N'$  和  $MM'$  当作裂隙处理, 沿边界可发生渗流。

### 2.2 等效渗透系数张量分析

利用离散介质模型数值方法可以计算出裂隙网络各节点的水头, 从而计算出水流流入 (或流出)

研究区域内的流量, 利用达西定理可得到网络整体的渗透系数。如图 1 所示,  $MN$ 、 $M'N'$  为定水头边界,  $MM'$  和  $NN'$  为隔水边界,  $MN$ 、 $M'N'$  之间的等效渗透系数为<sup>[12]</sup>

$$K = \frac{\Delta q \cdot M'M}{\Delta H \cdot MN} \quad (4)$$

式中:  $\Delta q$  为流入(或流出)研究区域的总流量( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $\Delta H$  为流入边界与流出边界的水头差( $\text{m}$ );  $K$  为  $MM'$  方向的等效渗透系数( $\text{m/s}$ );  $MN$  和  $M'M$  分别为模型的边长( $\text{m}$ )。

### 3 基于裂隙网络渗流分析

当不考虑裂隙储水问题时, 岩体的渗流主要涉及到裂隙的导水问题。岩体内部赋存的节理形态、大小、贯通率等直接影响着岩体的渗流特性。一般的, 岩体裂隙网络渗流具有一定的定向作用, 节理

组越发育, 节理方向性越强, 渗流主方向越明显。尤其对于层状分布岩体 (layered rock mass), 渗流具有定向、各向异性的特点。对于多组节理分布的块状岩体 (blocked rock mass), 其渗流主要为裂隙网络渗流, 具有一定的定向流动性和非连续性。下文将分别针对单组节理网络模型和两组节理网络模型进行系统分析, 研究不同几何分布形态下节理样本的渗流规律。

#### 3.1 单组节理网络模型渗透张量

##### 3.1.1 节理倾角与张量主方向倾角相关性

矿床的层状围岩在采矿实践中并不少见, 一般层状分布岩体诸如沉积岩主要赋存单组节理。为研究该类型岩体的渗透张量, 本文建立  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  尺寸的裂隙样本, 节理倾角、迹长、间距等几何参数及分布率模型如表 1 所示。当样本尺寸大于节理间距 4~8 倍时<sup>[13]</sup>, 可以避免尺寸效应带来的影响。

表 1 结构面概率模型统计  
Table 1 Statistics of parameters of structural plane probability model

倾角			迹长			间距			断距		
分布律	均值/(°)	标准差/(°)	分布律	均值/m	标准差/m	分布律	均值/m	标准差/m	分布律	均值/m	标准差/m
正态	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90	5	负指数	2	0.5	均匀	0.2	0.5	均匀	0.5	0.05

注: 水力开度值取 0.5 mm。

为了研究不同节理倾角对渗透率张量的影响, 选取  $0^\circ \sim 90^\circ$  每隔  $15^\circ$  节理倾角  $\theta$  共 7 个研究方案作为对比。其中生成的水平分布 ( $\theta = 0^\circ$ ) 裂隙样本如图 2 所示。

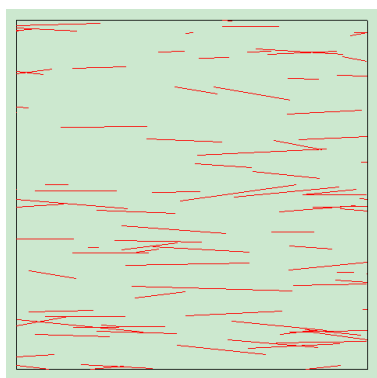


图 2 单组节理  $\theta = 0^\circ$  裂隙样本

Fig.2 Fractures network for joint planes where  $\theta = 0^\circ$

##### (1) 渗透张量

根据文献[10]的分析方法, 模拟生成裂隙网络的区域为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ , 固定区域的中心点, 每隔  $\alpha = 15^\circ$  方向逆时针旋转矩形, 根据单元网络施加图 1 所示的水头边界条件, 并用流量等效原则计算出水流流

入(或流出)研究区域内的流量, 由式(4)可得网络整体的渗透系数。根据裂隙网络几何对称性, 一般选取 6 个方向网络即可得不同方向的渗透系数, 进而求出节理网络渗透张量。

图 3 为不同节理倾角下得到的渗透张量。该结果可以直观地反映网络渗透特性受控于节理几何分布规律。分析图 3(a)~3(g), 节理面从  $0^\circ \sim 90^\circ$  变化时, 节理样本的渗透系数主方向由  $0^\circ$  上升到  $90^\circ$ 。由图 3(a)可知, 节理层状分布 ( $0^\circ$ ) 时, 渗透系数在研究方向为水平方向时 ( $\alpha = 0^\circ$ ) 达到最大值  $8.06 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 同时, 垂直于节理层面方向节理渗透系数最小, 仅  $2.94 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 此时水主要沿节理方向渗流, 与预期结果一致。

##### (2) 渗流定向性系数

节理岩体渗流存在定向性, 但尚未见变量给予渗流定向性特征的定量评价。本文定义渗流定向性系数  $r = K_\theta / K_{\min}$  ( $\theta$  表示节理渗透张量研究中不同旋转角度;  $K_{\min}$  表示渗透张量最小值), 用于表征渗透特性的方向性。一般的,  $r$  越大, 表明渗透方向性越强, 裂隙岩体的渗流定向性越明显。

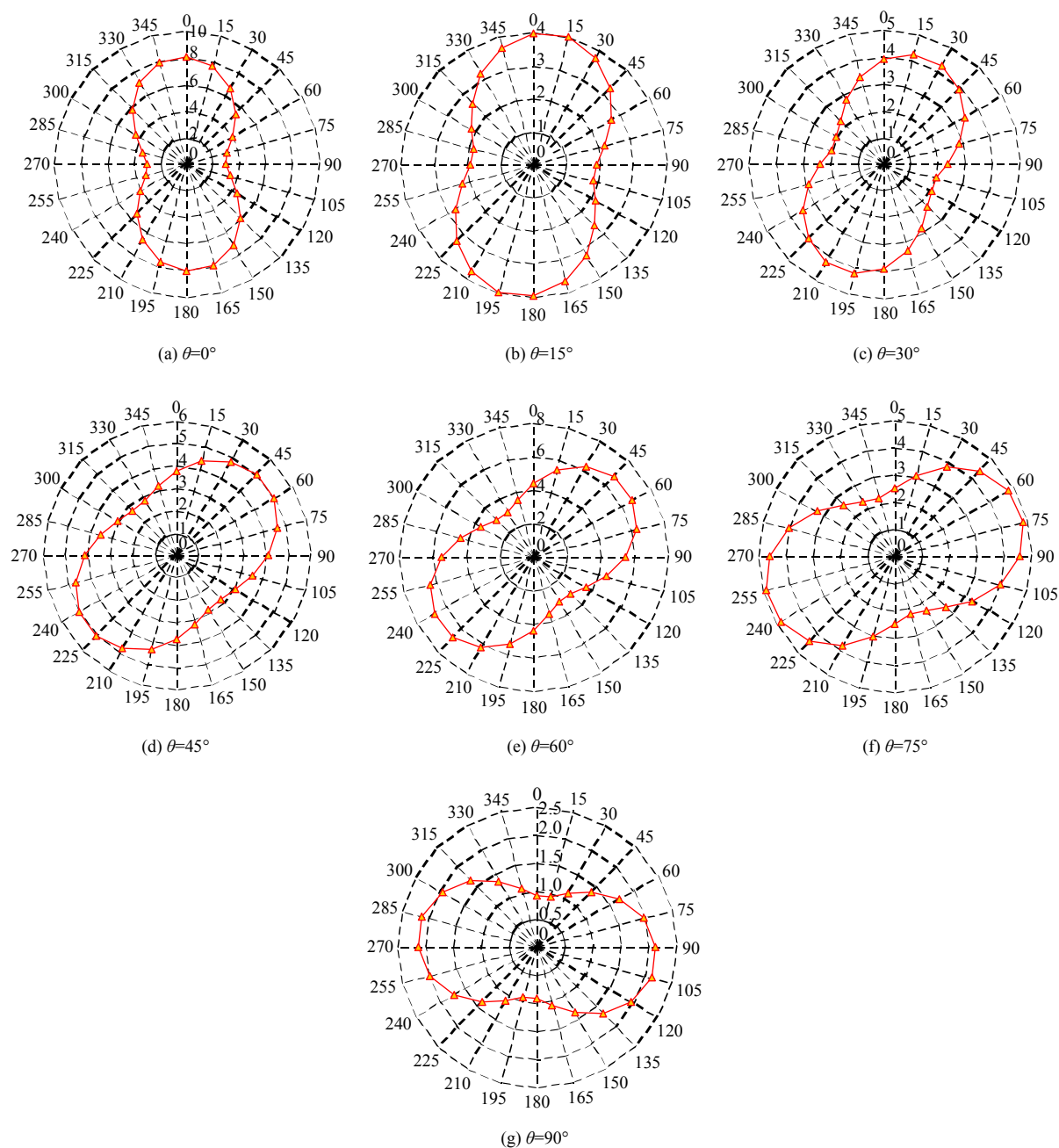
图 3 不同节理倾角渗透张量 (单位:  $10^{-7}$  m/s)Fig.3 Permeability tensors in different joint dip angles(unit:  $10^{-7}$  m/s)

图 4 分析了不同节理倾角样本定向性系数  $r$  随旋转角度  $\alpha$  关系。根据分析结果,当节理水平分布时,  $r(\alpha = 0^\circ)$  达到最大值,此时渗透定向性特征最强,主渗透方向水平分布;随着节理倾角  $\theta$  增加,定向性系数  $r$  峰值对应旋转角度  $\alpha$  逐渐增加,当倾角  $\theta$  达到  $90^\circ$  时,旋转角度  $\alpha$  对应的渗透定向性系数  $r$  基本达到峰值 1.98,说明此时渗流定向性特性较高。

另外,对比水平分布节理与  $45^\circ$  分布节理的定向性系数,当水平分布时,定向性系数  $r$  达到 2.74,节理以  $45^\circ$  倾角分布时,  $r$  值仅达到 1.83,说明后者

定向性较前者差。对比图 3(a)与图 3(d),前者渗透系数椭圆更细长,进一步表明该裂隙样本水平方向渗透能力强。

### 3.1.2 节理贯通率对渗透特性影响

相对某尺寸裂隙样本,节理贯通率  $C_j$  指的是某方向上单位长度节理段所占的比例。如图 5 所示,  $C_j$  可由式 (5) 定义。

$$C_j = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{L} \quad (5)$$

一般的,节理贯通率是确定节理岩体抗剪强度的重要指标之一。本文将研究节理贯通率对渗流特

性的影响规律。取水平层状分布节理裂隙样本, 研究贯通率分别为 0.1、0.2、0.4、0.5、0.6、0.7、1.0 时裂隙渗透张量的变化关系。

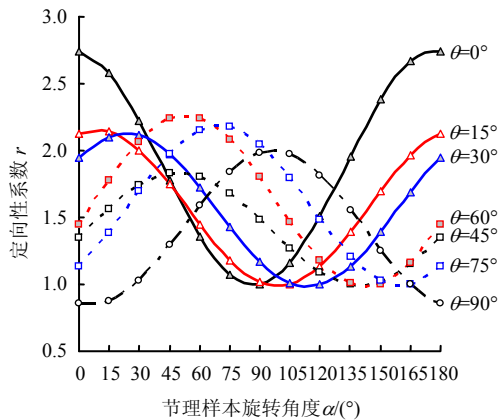


图 4 不同节理倾角样本定向性系数  $r$  随旋转角度  $\alpha$  关系  
Fig.4 Relations between directionality coefficient  $r$  and rotation angle  $\alpha$  in different joint dip angles

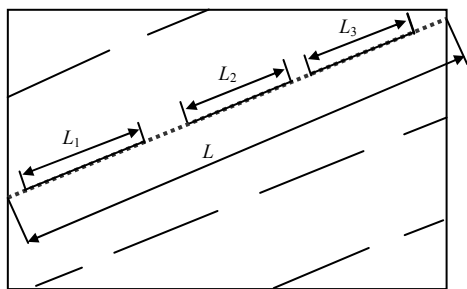


图 5 节理岩体贯通率示意图  
Fig.5 Sketch of joint connectivity rate

图 6(a)为节理贯通率  $C_j = 0.6$  时裂隙网络模型。需要说明的是, 程序在识别渗流路径过程中, 首先将独头不连通节理线元删除, 其次对于交叉线元, 识别组成节点的各线元, 并删除未连通线元, 识别渗流路径结果如图 6(b)所示, 从图中可以观察到水平方向上的渗流路径。

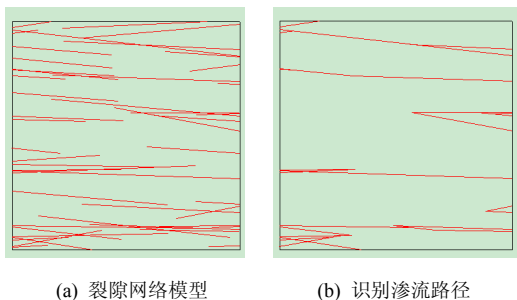


图 6 节理贯通率  $C_j = 0.6$  裂隙网络及渗流路径识别模型  
Fig.6 Fracture network and seepage path identified model with joint connectivity rate of 0.6

的不同贯通率情况下裂隙样本主渗流系数如图 7 所示。结果表明, 节理条数增加后, 总体渗透系数呈上升趋势。对于某特定分布裂隙网络, 随着节理贯通率的增加, 渗透系数逐渐呈对数增加趋势。

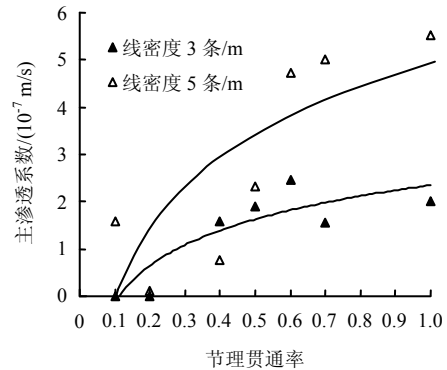


图 7 不同分布密度节理贯通率与主渗透系数关系  
Fig.7 Relations between permeability coefficient and joint connectivity rate

### 3.2 两组节理网络模型渗透张量

前文研究了单组节理情况下样本的渗流特征, 一般工程岩体, 尤其对于铁矿、金矿等矿山岩体多赋存两组甚至更多组结构面, 因此, 研究多组节理分布裂隙样本渗流同样具有一定的意义。应用平面 DFN 模型, 本文主要针对赋存两组节理情况下裂隙网络的渗流规律进行分析。

#### 3.2.1 正交分布节理渗透张量主方向及定向性

两组节理倾角分别取  $0^\circ$  与  $90^\circ$ , 迹长服从正态分布, 均值为 1 m, 标准差为 0.5 m, 线密度均为 1 条/m。生成裂隙样本见图 8(a), 识别的渗流路径见图 8(b)。

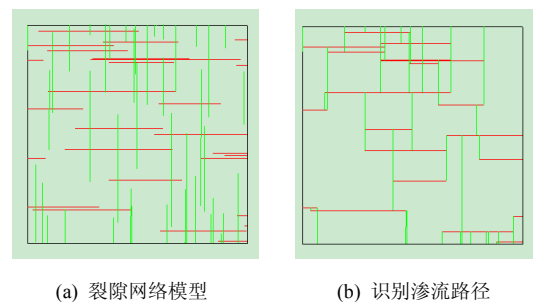


图 8 两组正交节理贯通率  $C_j = 0.5$  裂隙网络及识别渗流路径

Fig.8 Fracture network and identified seepage path for two sets of orthogonal joints with  $C_j = 0.5$

如图 9 所示, 分析该情况下渗透张量, 在节理贯通率  $C_j = 0.5$  时,  $0^\circ$  情况下, 裂隙样本的渗透系数最小, 仅  $6.42 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 当样本旋转至  $90^\circ$  时渗透系数达到最大值  $8.86 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , 此时渗透定向性



数达到最大  $r_{\max} = 1.38$ 。根据图 10 定向性系数分析结果, 当样本旋转至  $75^\circ \sim 90^\circ$  之间时, 定向性系数最高, 说明此时方向性最强, 对应图 1 水头施加条件, 此时对应该正交分布节理样本的近水平方向。

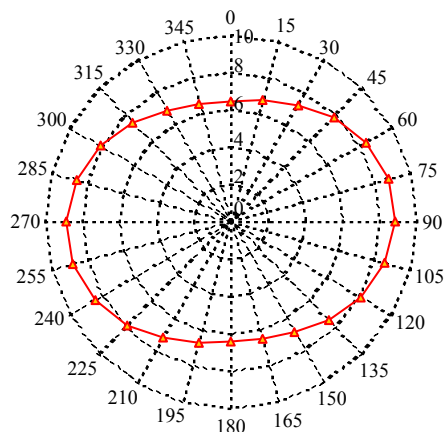


图 9 两组正交节理贯通率  $C_j = 0.5$  渗流张量  
(单位:  $10^{-7}$  m/s)

Fig.9 Permeability tensors for two sets of orthogonally distributed joints with  $C_j = 0.5$ (unit:  $10^{-7}$  m/s)

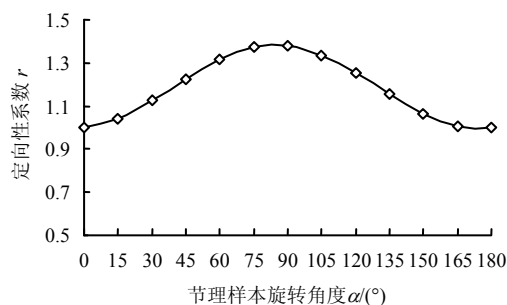


图 10 节理样本定向性系数  $r$  随旋转角度  $\alpha$  关系  
Fig.10 Relations between directionality coefficient and rotation angle

### 3.2.2 倾角离散性对渗透张量主方向影响

图 11 为当节理倾角呈正态分布时, 倾角标准差为  $3^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $7^\circ$ 、 $9^\circ$  情况下的裂隙岩体网络模型及对应的识别渗流路径。

对比渗流路径识别结果, 当标准差较小时( $3^\circ$ ), 节理倾角离散性较小, 此时渗流路径较图 8 计算结果相近; 随着倾角标准差增大, 节理呈现明显不规则分布, 如图 11(e)、图 11(g)所示, 渗流路径增加, 如图 11(f)、图 11(h)所示。根据图 12 渗透张量计算结果, 渗透率相应增加, 渗透主方向亦随倾角变化发生改变。

根据两组正交节理渗透张量及不同倾角标准差情况下渗透张量分析结果, 正交分布情况下, 渗透方向性仍然存在, 但渗透性各向异性椭圆离心率较

小, 定向性系数较单组节理低; 随着节理倾角的离散性增加, 渗流路径增多, 渗透系数升高。

### 3.2.3 不同夹角情况渗透张量

上述内容研究了两组正交分布节理对渗透率主值及渗流各向异性的影响, 下面研究两组不同夹角节理情况下, 节理样本的渗透规律。节理迹长、间距、断距仍按表 1 取值。两组节理倾角以一组  $0^\circ$  固定, 另外一组分别旋转  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ , 倾角正态分布标准差取  $0^\circ$ 。由于篇幅限制, 图 13 仅列出夹角为  $45^\circ$  时裂隙网络模型。

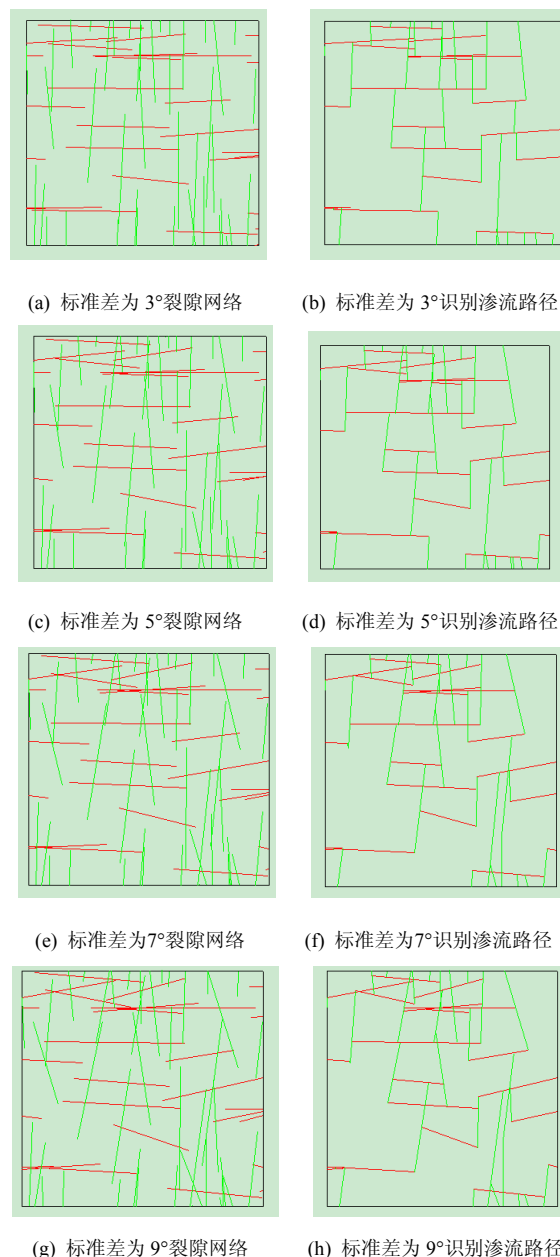


图 11 两组正交节理贯通率  $C_j = 0.5$  裂隙网络及识别渗流路径

Fig.11 Fracture networks and identified seepage paths for two sets of orthogonal joints with  $C_j = 0.5$

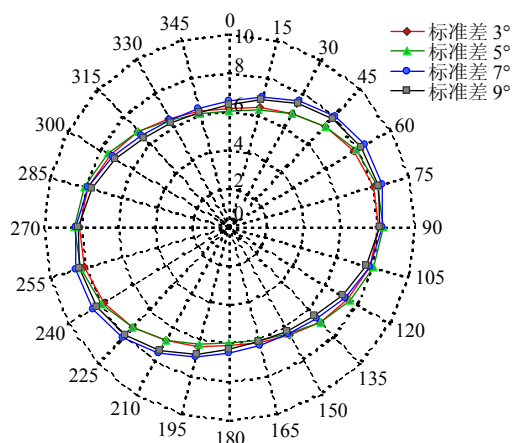


图 12 不同倾角正态分布标准差下裂隙岩体渗流张量  
(单位:  $10^{-7}$  m/s)

Fig.12 Permeability tensor with different normal distribution standard deviation values for dip angle(unit:  $10^{-7}$  m/s)

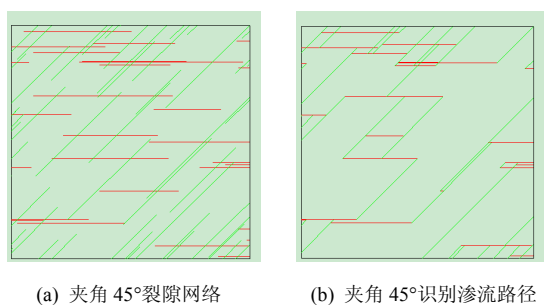


图 13 贯通率  $C_j = 0.5$  裂隙网络及识别渗流路径

Fig.13 Fracture network and identified seepage path with joint connectivity rate of 0.5

由图 14、15 所示,随着夹角的变化,裂隙渗透主方向逐渐增加。当夹角为  $30^\circ$  时,渗透定向性系数最大为 2.31,对应主方向角度为  $15^\circ$ ;当夹角上升到  $45^\circ$  时,节理渗透定向性系数在大约  $30^\circ$  达到峰

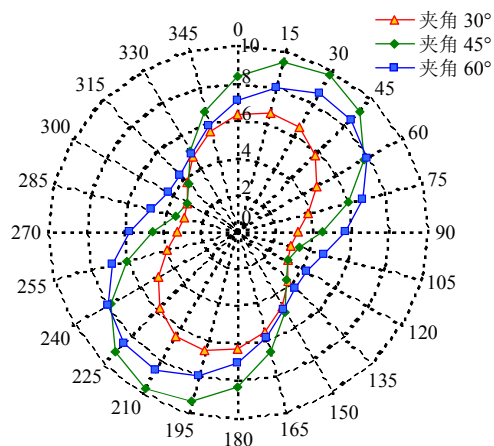


图 14 不同夹角情况裂隙岩体渗流张量 (单位:  $10^{-7}$  m/s)

Fig.14 Permeability tensor with different intersection angles (unit:  $10^{-7}$  m/s)

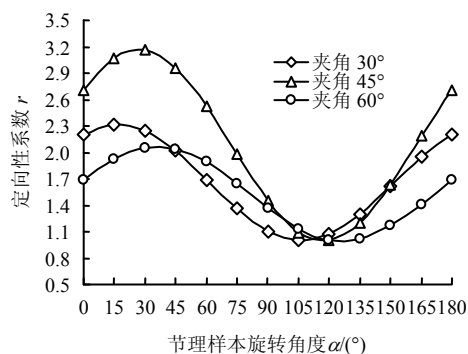


图 15 节理样本定向性系数  $r$  随旋转角度  $\alpha$  关系  
Fig.15 Relations between directionality coefficient and rotation angle

值 3.16,对应该方向即裂隙渗透主方向;夹角为  $60^\circ$  时,渗透定向性系数在  $30^\circ \sim 45^\circ$  区间达到峰值,说明当节理倾角取单一值的情况下,渗透主方向基本沿两组节理夹角方向的角平分线方向。

## 4 结 论

(1) 应用离散介质网络,基于 VC++ 6.0 平台建立了渗流分析方法,可以有效地分析离散节理分布情况的渗流特性。

(2) 单组节理岩体渗流具有明显的各向异性特征,渗流定向性随着节理角度变化显著;当样本分析方向与节理方向一致时,对应渗流定向性系数达到最大;随着节理贯通性增加,节理渗透率呈现对数增加趋势。

(3) 两组节理岩体渗流特征研究中,正交分布下,岩体仍存在各向异性,但渗流定向性系数较低,说明渗流定向性较差;当节理倾角服从正态分布时,随着节理倾角标准差增大,渗透率相应增加,渗透主方向亦随倾角分布变化发生改变,说明倾角的离散性对与渗透张量存在较大影响;两组节理夹角不同时,节理渗透主方向倾角随着夹角增大而相应增大,基本沿两组节理夹角方向的角平分线方向。

本文主要研究了二维节理网络渗流计算方法,在实际工程问题中,渗流是一个空间问题,而且受岩体结构内部应力的影响,岩体与地下水力学耦合关系及空间渗流规律将在下一步工作中进行研究。

## 参 考 文 献

- [1] MALEKI M R. Study of the engineering geological problems of the Havasan Dam, with emphasis on clay-filled joints in the right abutment[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(6): 695—710.

- [2] ZHANG Xing, SANDERSON D J. Numerical study of critical behaviour of deformation and permeability of fractured rock masses[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 1998, 15(6): 535—548.
- [3] 姚池, 姜清辉, 叶祖洋, 等. 裂隙网络无压渗流分析的初流量法[J]. **岩土力学**, 2012, 33(6): 1896—1903.  
YAO Chi, JIANG Qing-hui, YE Zu-yang, et al. Initial flow method for unconfined seepage problems of fracture networks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1896—1903.
- [4] DOOLINA D M, MAULDONB M. Fracture permeability normal to bedding in layered rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(2): 199—210.
- [5] SUN Jian-ping, ZHAO Zhi-ye. Effects of anisotropic permeability of fractured rock masses on underground oil storage caverns[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2010, 25(5): 629—637.
- [6] CHESNAUXA R, ALLENA D M, JENNIB S. Regional fracture network permeability using outcrop scale measurements[J]. **Engineering Geology**, 2009, 108(3-4): 259—271.
- [7] 杨天鸿, 张永彬, 冷雪峰, 等. 岩体结构面网格渗透张量分析方法[J]. **东北大学学报(自然科学版)**, 2003, 24(9): 911—914.  
YANG Tian-hong, ZHANG Yong-bin, LENG Xue-feng, et al. Tensor analysis of seepage flow from structural plane network of rock mass[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2003, 24(9): 911—914.
- [8] BAGHBANAN A, JING Lan-ru. Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2007, 44(5): 704—719.
- [9] LIU Xiao-yan, ZHANG Cheng-yuan, LIU Quan-sheng, et al. Multiple-point statistical prediction on fracture networks at Yucca Mountain[J]. **Environmental Geology**, 2009, 57(6): 1361—1370.
- [10] 杨天鸿, 于庆磊, 陈 阔, 等. 范各庄煤矿砂岩岩体结构数字识别及参数表征[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(12): 2482—2488.  
YANG Tian-hong, YU Qing-lei, CHEN Shi-kuo, et al. Rock mass structure digital recognition and hydro-mechanical parameters characterization of sandstone in Fangezhuang coal mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2482—2488.
- [11] 彦卿, 张 元. 岩体水力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005: 77—83.
- [12] 杨天鸿, 肖裕行. 露天矿边坡岩体结构面调查及渗透特性分析[J]. **勘察科学技术**, 1998, 16(3): 27—30.  
YANG Tian-hong, XIAO Yu-xing. Structural plane survey and analysis of permeability characteristics of open pit mine slope rock mass[J]. **Site Investigation Science and Technology**. 1998, 16(3): 27—30.
- [13] 夏露, 刘晓非, 于青春. 基于块体化程度确定裂隙岩体表征单元体[J]. **岩土力学**, 2010, 31(12): 3991—3997.  
XIA Lu, LIU Xiao-fei, YU Qing-chun. Determining representative elementary volume of fractured rock mass based on blockiness analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3991—3997.