

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.01.19

# 基于离散裂隙网络模型的核素粒子迁移数值模拟研究

魏亚强<sup>1,2</sup>, 董艳辉<sup>1,2</sup>, 周鹏鹏<sup>1,2</sup>, 王礼恒<sup>1,2</sup>, 宋凡<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 高放废物地质处置过程中涉及的核素在围岩裂隙地下水中的迁移问题已引起广泛关注, 数值模拟是研究核素粒子运移的重要方法。目前裂隙介质中渗流模型主要是等效连续介质模型、双重介质模型和离散裂隙网络模型。对于岩体尺度裂隙地下水的流动, 离散裂隙网络模型能充分表现裂隙介质的各向异性、不连续性等特征。因此, 针对裂隙介质准确概化及核素迁移模拟等难点, 文章结合 Monte Carlo 随机生成裂隙方法、裂隙渗流有限元算法和高放射性核素衰变方程等方法, 依据花岗岩深钻孔裂隙统计数据, 采用离散裂隙网络模型对内蒙古阿拉善高放废物地质处置预选区展开了核素粒子迁移数值模拟研究, 并讨论了实例预测分析结果。结果显示: 针对设定的地质模型, 核素粒子从中心运移到边界的迁移路径长度平均为 1293.35 m, 粒子运移到边界耗费的时间平均为  $1.70 \times 10^{11}$  d。

**关键词:** 离散裂隙网络; 裂隙; 核素; 粒子追踪; 阿拉善地区

中图分类号: X141

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)01-0123-08

## Numerical simulation of radionuclide particle tracking based on discrete fracture network

WEI Yaqiang<sup>1,2</sup>, DONG Yanhui<sup>1,2</sup>, ZHOU Pengpeng<sup>1,2</sup>, WANG Liheng<sup>1,2</sup>, SONG Fan<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The migration of high-level radioactive waste in fracture media during geological disposal has caused widespread concern, and the numerical simulation of radionuclide particle transport is an important research methods. Current flow simulation methods of fractured media are mainly equivalent continuum model, the dual media model and the discrete fracture network model. For the rock scale studies, the first two models view the fracture media as a continuous medium, cannot adequately represent fractured anisotropic media and discontinuities features. Therefore, this study constructed numerical simulation method of radionuclide particle migration based on the discrete fracture network model, in combination with the Monte Carlo method, the finite element method and the radionuclide particle transport model. We carry out this study of alternative high-level nuclear waste site (Alax) and calculated radionuclide particle migration results. The results show that for the established numerical model, the pathway lengths of radionuclide particles in the model are averaged 1293.35 m, which spent an average time of  $1.70 \times 10^{11}$  days. Drilling data are used in this study to verify the reliability of the model, and the above results prove that the radionuclide particle simulation method we constructed can be used to predict the high-level radioactive migration in waste disposal site. This study can provide a reference for selecting the geological repository of high-level radioactive waste.

**Keywords:** discrete fracture network; fracture; nuclide; particle tracking; Alxa

收稿日期: 2016-04-21; 修订日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202182); 中国科学院青年创新促进会(2016 063)

第一作者: 魏亚强(1990-), 博士研究生, 研究方向为裂隙介质地下水数值模拟。E-mail: weiyang0000@126.com

核能的生产以及核技术应用会产生放射性废物,其中的高放射性废物的安全处置是一个世界性难题。深地质处置是目前国际上普遍接受的可行方案,即把高放废物埋在距离地表深 400~1 000 m 的地质体中,把它永久与人类的生存环境隔离。选择低渗透性岩体作为处置库的围岩在开展高放废物地质处置研究中已成为共识。目前主要的处置库候选围岩是结晶岩(如花岗岩)、凝灰岩和黏土岩等。以花岗岩为例,地下水在花岗岩中的主要流动通道是遍布其中的裂隙网络,这也是放射性核素迁移的主要通道。因此,裂隙介质中核素迁移预测评价成为高放废物处置库场址选择中十分重要的研究内容。

数值模拟是研究核素粒子运移的重要方法。目前针对裂隙介质中核素运移模型的裂隙系统概化主要有三种方式:等效连续介质模型、双重介质模型和离散裂隙网络模型(DFN)。第一种模型中,裂隙岩体被看作是一个假想的连续体,系统中每一点的物理量都处于局部平衡状态,重点研究裂隙岩体的宏观流动特征<sup>[1]</sup>,目前已经被用于美国<sup>[2~3]</sup>、加拿大<sup>[4]</sup>、瑞典<sup>[5]</sup>的核废料处置场地研究以及国内的核素迁移研究<sup>[6~7]</sup>。第二种模型认为介质是由裂隙和基岩两组平行的连续系统组成,两系统间通过窜流函数联系起来;被裂隙分割的基岩被假定具有相同的大小和形状,由于过于简化而不能充分表现裂隙介质的各向异性、不连续性等特征<sup>[11]</sup>,目前已被用于瑞典<sup>[8]</sup>、美国 Yucca 山场址<sup>[9]</sup>等核素运移的评价研究。第三种模型(DFN)的研究始于岩石水力学,该模型认为基质岩块是不渗透的,把裂隙介质视为离散的独立模型,用裂隙参数建立表征介质各向异性的数学模型,从而确定裂隙网络中流体的真实流动状态。DFN 模型充分考虑裂隙岩体的非均质性和非连续性特征,能较好地刻画裂隙流体的流动特征。当基质岩块很致密,渗透性可以忽略时,DFN 模型具有拟真性好、精度高的优点,但是 DFN 模型的建立需要清晰的裂隙几何形态和空间位置。

目前已逐渐有研究者将 DFN 模型运用在核素粒子迁移研究中,针对中国高放废物备选场址北山岩体,赵宏刚等<sup>[10]</sup>进行三维大断裂的建模,并进行了二维平面上的核素运移模拟。宗自华等<sup>[11]</sup>基于已有地表裂隙统计数据,对北山 BS03 孔周边岩体进行了裂隙建模,并分析了裂隙连通性。Follin 等<sup>[12]</sup>对瑞典核废料处置场地进行 DFN 的裂隙建模;Selroos 等<sup>[13]</sup>对该 DFN 模型进行了核素运移的计算。Blessent 等<sup>[14]</sup>对芬

兰核废料处置场地进行了溶质运移研究,但该模型仅考虑了场地较大断层,对于裂隙介质未完全刻画。已有的粒子迁移模拟研究并未采用实际场地数据验证模型,而野外钻孔数据是支撑模型的重要指标,如何利用钻孔数据构建 DFN 模型并针对高放废物地质处置场址中的核素迁移问题展开研究,显得尤为重要。

目前中国高放废物处置库尚处于选址阶段,预选场地的裂隙介质中核素迁移数值模拟研究则是场地评价的直接依据。对于裂隙介质的精确数值模拟研究,其模拟的范围仅限于处置库及附近数平方千米岩体尺度内,通常可能存在小规模导水裂隙。在这样的低渗透岩体中,地下水流速和流向的分布主要受小规模导水裂隙几何形态、位置及水力性质的控制。因此,要模拟岩体尺度地下水的流动,首先需要查清裂隙的发育特征及导水性质,形成裂隙网络。在这种规模的模拟中,将介质视为连续介质的模型已经难以适用,可以考虑采用不连续介质模型进行模拟。

本文针对裂隙介质中的核素粒子迁移数值模拟问题,采用离散裂隙网络模型,结合 Monte Carlo 随机生成裂隙方法、裂隙渗流有限元算法和高放射性核素衰变方程,对中国高放核废料预选场址之一——内蒙古阿拉善预选区展开了核素粒子迁移数值模拟研究,并讨论了实例预测分析结果,为高放废物地质处置库选址提供科学指导。

## 1 研究方法

DFN 模型通过展布三维空间中各类裂缝片组成的裂缝网络构建整体的裂缝模型,每类裂缝网络由大量具有不同形状、隙宽、方位的裂缝片组成,实现了对裂缝系统从几何形态到渗流行为的逼真细致的有效描述。本文结合 FracMan 软件<sup>[15]</sup>说明离散裂隙网络模型构建、渗流计算以及核素粒子运移模拟的相关原理,由于篇幅所限,将着重说明核素粒子运移的模拟方法。

### 1.1 离散裂隙网络模型构建

对于实际裂隙岩体,垂向不同位置裂隙密度多数是不同的。DFN 模型纵向可按照等密度区划分为多层,即把裂隙密度相同的井段作为同一段生成裂隙并参与分析,同时采用裂缝集交互识别系统对不同深度裂隙的倾角和倾向进行统计分析。之后采用 Monte Carlo 随机生成离散裂隙网络模型。由于涉及到时间序列的反复生成,Monte Carlo 法是以高容量和高速度的计算机为前提条件的,已得到广泛推广<sup>[16]</sup>。

在利用 Monte Carlo 方法随机生成离散裂隙网络模型之后,需要根据沿钻孔裂隙密度曲线(CFI 曲线)以及裂隙分布极点图对模型构建结果进行验证,对比实际穿插钻孔裂隙和构建模型情况,调整模型参数。最终确定更接近实际情形的 DFN 模型。

## 1.2 裂隙渗流计算方法

裂隙网络内的渗流计算通常有三种方法。第一种方法是混合数值-解析法,单裂隙内的渗流关系利用解析法计算,整个裂隙系统的渗流关系则使用基于单裂隙内的解析解的数值方法计算;第二种方法是单裂隙内的渗流利用边界元法计算,边界元法可以使问题的维数降低一维,极大地减少了计算量,而且也很容易对裂隙进行离散<sup>[17]</sup>,但边界元法以存在相应微分算子的基本解为前提,对于非均质介质等问题难以应用;第三种方法是单裂隙内的渗流利用有限元法计算,使用有限元网格剖分裂隙岩体会形成大量网格数据(单元和节点)裂隙交线,通过质量守恒和水头相等关系建立方程,能更好地反映渗流特征,但是计算量非常大,需要采用高性能的数值计算机。

因此,该研究中对于 DFN 裂隙渗流的处理拟采用有限单元法,在不考虑基质渗流的情形下,将裂隙空间剖分成三角网格进行计算。对于不可压缩流体,当流体在二维裂隙平面内流动时,连续性方程可简化为一个体积守恒方程:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} - T \nabla^2 h = q \quad (1)$$

$$T = \frac{k\rho gb}{\mu} \quad (2)$$

式中:  $S$ ——裂隙存储系数(无量纲);

$h$ ——水头/m;

$t$ ——时间/s;

$T$ ——裂隙导水系数;

$k$ ——渗透率/ $\text{m}^2$ ;

$q$ ——源汇项;

$\nabla^2$ ——二维拉普拉斯算子;

$\rho$ ——流体密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ ;

$\mu$ ——流体黏度/ $(\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1})$ ;

$g$ ——重力加速度  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;

$b$ ——裂隙隙宽/m。

模型采用 Galerkin 有限元算法求解,同时考虑了核素运移衰变的过程。

## 1.3 考虑核素衰变的粒子迁移模拟方法

有限单元法求解首先需要将裂隙网络剖分成三

角网格,由此可以将三维的离散裂隙网络分割为单个的三角网格进行处理。而每个三角网格中的粒子运移,也可概化为从网格边界到另一个边界的一维运动。该方法中将溶质运移用粒子追踪方式刻画,每个粒子代表一定质量的溶质,多个粒子从源注入模型中,在每一个时间步长上,粒子跟随对流运移,同时也伴随着随机的弥散运动<sup>[18]</sup>。每个时刻的平均浓度分布表示为:

$$c = \frac{N \cdot M}{\rho \cdot A \cdot b} \quad (3)$$

式中:  $N$ ——粒子数目;

$M$ ——单个粒子质量/kg;

$A$ ——裂隙面积/ $\text{m}^2$ 。

经典的一维溶质运移解析解为:

$$c(x, t) = C_0 (4\pi d_L V t)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(x - Vt)^2}{4d_L V t}\right];$$

$$c(0, 0) = C_0; c(x, 0) = 0; V(x, t) = V_0 \quad (4)$$

式中:  $V$ ——地下水对流速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ;

$d_L$ ——纵向弥散度/m;

$C_0$ ——初始浓度/ $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$ ;

$x$ ——距离坐标/m;

$c$ ——相对浓度。

其中后三项为边界条件和初始条件,上述解析解符合一个均值为  $Vt$ , 方差为  $2d_L Vt$  的正态分布。则纵向和横向弥散运移距离可以表示为:

$$X_d = N_L (2d_L X_c)^{1/2}$$

$$Y_d = N_T (2d_T X_c)^{1/2} \quad (5)$$

式中:  $N_L, N_T$ ——正态分布的随机数(均值为 0, 方差为 1);

$d_T$ ——横向弥散度/m;

$X_c$ ——对流运移距离/m。

定义一个有效速度系数  $f_v$  和偏离角度  $\theta$ :

$$f_v = (X_d + X_c) / X_c \quad (6)$$

$$\tan\theta = Y_d / (X_d + X_c) \quad (7)$$

对于每个三角网格给定一个局域坐标系(图 1), 则三个边界可表示为:

$$\begin{aligned} y &= 0 && \text{边界 1} \\ y &= [Y_k / (X_k - X_j)] (x - X_j) && \text{边界 2} \\ y &= (Y_k / X_k) x && \text{边界 3} \end{aligned} \quad (8)$$

此时假设单个裂隙中的平均对流流速相同,由达西定律可知:

$$V_x = K(h_i - h_j) / X_j \quad (9)$$

$$V_y = K[X_j \cdot (h_i - h_k) + X_k \cdot (h_j - h_d)] / Y_k X_j \quad (10)$$

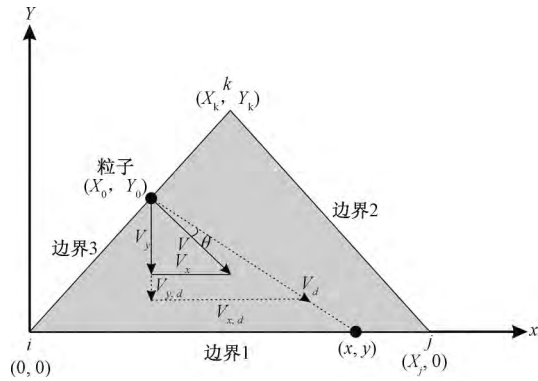


图1 粒子在三角网格中运移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of particle transport in the triangular mesh

式中:  $V_x$ 、 $V_y$  ——  $x$ 、 $y$  方向的对流速度分量/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );

$K$  —— 渗透系数/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );

$H$  —— 节点水头/ $\text{m}$ 。

纵向有效速度和横向有效速度可表示为:

$$V_l = f_v \cdot \sqrt{(V_x^2 + V_y^2)} = f_v \cdot V$$

$$V_l = \tan\theta \cdot V_l$$
(11)

将有效速度( $V_l$ ,  $V_l$ ) 投影到局部坐标系内:

$$V_{x,d} = V_l \cdot \frac{V_x}{V} - V_l \cdot \frac{V_y}{V} = f_v (V_x - \tan\theta \cdot V_y)$$
(12)

$$V_{y,d} = V_l \cdot \frac{V_x}{V} + V_l \cdot \frac{V_y}{V} = f_v (\tan\theta \cdot V_x + V_y)$$

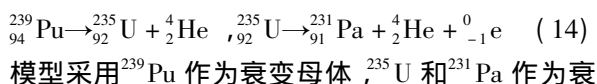
式中:  $V_{x,d}$ 、 $V_{y,d}$  —— 考虑弥散的  $x$ 、 $y$  方向的速度分量/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );

则新的粒子坐标为:

$$x = X_0 + V_{x,d} \cdot \Delta t$$

$$y = Y_0 + V_{y,d} \cdot \Delta t$$
(13)

其中, ( $x$ ,  $y$ ) 为粒子新位置的坐标。在粒子运移同时, 需要考虑放射性核素的衰变过程。高放射性废物的危害主要来源于非天然放射性核素, 主要包括裂变碎片、活化产物以及超铀元素等。其中超铀元素中的钚同位素 $^{239}\text{Pu}$ 的半衰期在超铀核素中最长, 为 24100 a, 这也说明了该核素是存在长距离迁移可能的, 可作为重点研究核素。它主要是由天然铀作装料的热中子反应堆产生, 可作为反应堆核燃料的核武器装料。 $^{239}\text{Pu}$ 为极毒性核素, 钚在机体中易水解成难溶的氢氧化物胶体或聚合物。因此本次模拟采用 $^{239}\text{Pu}$ 作为特征核素开展研究。 $^{239}\text{Pu}$ 衰变方程如下:



模型采用 $^{239}\text{Pu}$ 作为衰变母体,  $^{235}\text{U}$ 和 $^{231}\text{Pa}$ 作为衰

变子体, 其半衰期为  $7.04\text{E}+08$  a 和  $3.28\text{E}+04$  a。放射性同位素的放射性衰变均遵循以下公式;

$$N_R(t) = N_{R0} e^{-\left(\frac{0.693}{L_R}\right)t} \quad (15)$$

$$f_L(L) = \left(\frac{0.693}{L_R}\right) e^{-\left(0.693L/L_R\right)} \quad (16)$$

式中:  $N_R(t)$  ——  $t$  时刻的放射性核素原子数目;

$N_{R0}$  —— 放射性核素 R 的初始数目;

$L_R$  —— 核素 R 的半衰期/s;

$f_L(L)$  —— 粒子寿命的指数分布函数。

粒子在到达它们随机分配的寿命之前一直保持者其本身特性, 之后会转化为一个子核素产物。这个过程一直重复, 直至一个稳定核素产生, 或者模型运行终止。

## 2 阿拉善花岗岩场址数值模型构建与验证

阿拉善预选区是中国高放废物地质处置备选场址之一, 位于内蒙古自治区西部的阿拉善高原, 高原北为中蒙国界线, 东界贺兰山, 西面直抵黑河西岸的马鬃山地东端, 南面则是阿拉善地台边缘山地的龙首山—合黎山(北山), 邻接河西走廊(图2)。钻孔NRG01位于阿拉善盟腾格里沙漠北部花岗岩场址中, 钻孔揭露岩性单一且完整, 揭露段未见区域构造, 岩体节理发育程度不高。该区域地下水赋存方式为基岩裂隙水, 未发现导水性较好的构造及断裂, 地下水自然水位埋深 9.40 ~ 12.50 m, 地下水径流缓慢, 水文地质条件简单。



图2 研究场地位置示意图

Fig. 2 Location of the study site

### 2.1 野外试验资料分析

本研究使用NRG01钻孔开展的钻孔成像试验数据, 展开DFN建模和核素迁移分析。NRG01钻孔深603 m。钻孔成像共记录有53条裂隙穿插钻孔。其裂隙法向方向的走向倾角分布见图3。

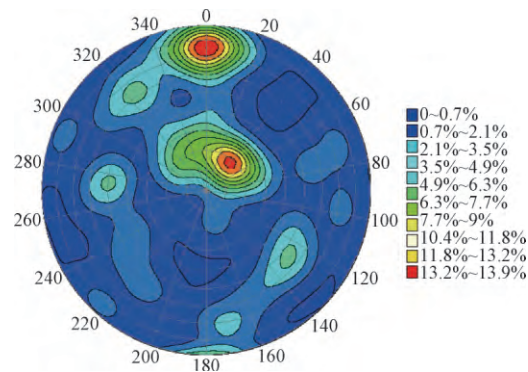


图 3 裂隙法向方向的走向倾角极点图

Fig. 3 Distribution figure of trend and plunge for the fracture pole direction

采用线密度分区法构建离散裂隙网络地质模型。NRG01 钻孔的 CFI 曲线和沿深度裂隙分布直方图见图 4,可分析出钻孔裂隙共存在 5 个等密度区间,对不同区段的线密度进行了计算,区间具体分布情况及线密度值见表 1。

针对 5 个分区内裂隙分布特征,分别进行了裂缝集交互识别系统分析,结果见表 2。

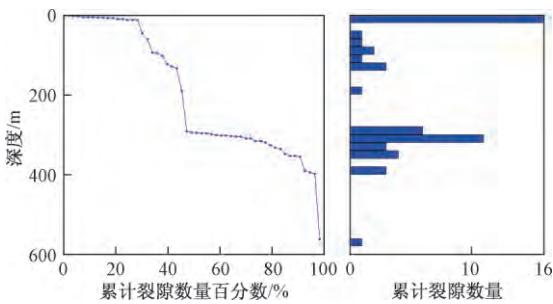


图 4 钻孔裂隙密度曲线及裂隙分布直方图

Fig. 4 Cumulative fracture density curve and histogram of fracture distribution

表 1 NRG01 钻孔等密度分区及对应线密度值

Table 1 Divided zones of fracture density and density values

区段	起始深度/m	终止深度/m	线密度/(个·m <sup>-1</sup> )
Zone1	0	15	1.067
Zone2	15	140	0.064
Zone3	140	280	0.007
Zone4	280	400	0.225
Zone5	400	600	0.005

表 2 不同分区优势产状及其参数统计分布特征

Table 2 Statistical parameter features of different zones

分区	Zone1	Zone2		Zone3	Zone4	Zone5
		Zone2-1	Zone2-2			
优势走向,倾角/(°)	48.065,45.348	325.000,52.000	156.213,0.917	305,74	349.871,33.488	270,32
拟合形式	Elliptical Fisher	Elliptical Fisher		Elliptical Fisher	Elliptical Fisher	Elliptical Fisher

2.2 数值模型构建

根据 NRG01 钻孔深度与核废料处置要求,建立 NRG01 钻孔岩体离散裂隙网络模型(图 5),模型范围为 1000 m × 1000 m × 600 m。模型纵向按照等密度区划分为 5 层,共生成 135635 条裂隙。尽管真实岩体裂隙具有粗糙的表面、变化的开口度等,但在数值模拟中,为了简化,一般都假定单条裂隙具有恒定的隙宽、光滑的表面,并应用立方定律来计算裂隙渗透率  $k$ :

$$k = \frac{b^2}{12}$$
 (17)

式中:  $b$ ——裂隙隙宽/m,统一设为 0.005 mm。

处置库拟放置在地下 500 m 处,对应模型 Zone5 区域。目前我国高放核废料地质处置尚处于选址阶段,具体核废料储存位置待定。假定处置库在 Zone5 区内发生渗漏,渗漏点为 NRG01 钻孔与 Zone5 区内裂隙穿插部位,深度为 421.304 m 处,考虑高放射性核素

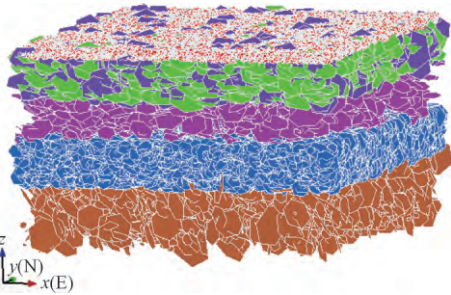


图 5 NRG01 围岩裂隙模型结构图

Fig. 5 Modeling structure of the surrounding rock

在 Zone5 区内裂隙介质中流动。

由于处置库位置较深,研究区为干旱区域,降水量极小,模型地表和底部均设置为零通量边界,岩体附近地下水主要从北至南流动。东西边界依流线设置为零通量边界。根据区域水文地质资料,模型南北边界均设为定水头边界,水力梯度为 0.833%。钻孔揭露该处地下水位埋深为 3.75 m,因此将模型初始水头设为



-3.75 m(以地表为基准面)。

模型采用稳定流模拟,在 NRG01 钻孔 Zone5 深度范围内设置核素粒子。研究中假设核素主要来源于玻璃固化体,其盘存量为  $1.60\text{E}-01\text{ mol}$ ,即 38.24 g。假设单个粒子 0.01912 g,共包含核素粒子 2000 个。玻璃固化体中的  $^{239}\text{Pu}$  盘存量全部发生泄露,核素粒子从钻孔和揭露裂隙连接处泄露,进入周边裂隙含水层中,采用粒子追踪方式对核素展开模拟。使用有限元法求解粒子迁移过程,首先对离散裂隙网络进行网格划分,划分后如图 6 所示。

### 2.3 模型验证

模型显示和钻孔直接连通裂隙为 68 条。由图 7 可以看出,模型生成和钻孔直接连通裂隙的 CFI 曲线和实际情况吻合的较好,说明模型具有较高可信度。极点对比图也可以看出,生成钻孔连通裂隙和实测裂

隙有着较好的对应关系,模型基本可以反映该区段实际裂隙分布情况。

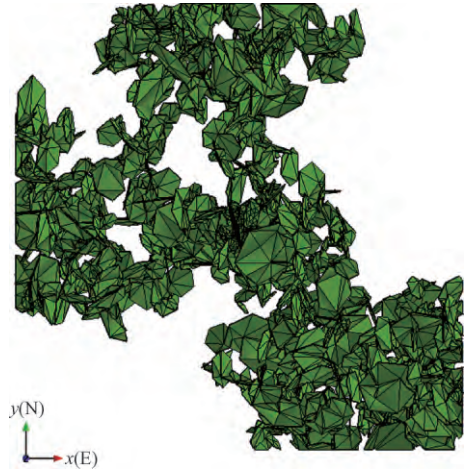


图 6 Zone5 连通裂隙划分网格图

Fig. 6 Subdivision meshes of the connected fractures in Zone5

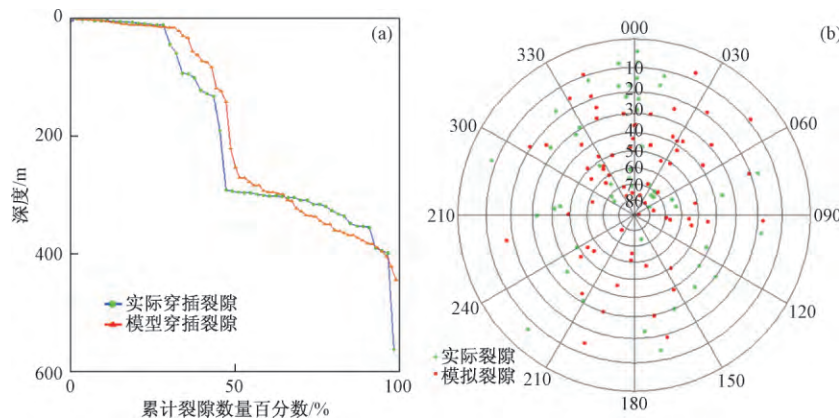


图 7 (a) 直接连接钻孔裂隙 CFI 对比图; (b) 模型生成直接连通钻孔裂隙和实际裂隙对比极点图

Fig. 7 (a) Compared cumulative fracture intensity curves of the intersective fractures;

(b) Pole maps of the modelling intersective fractures and the field data

## 3 核素迁移模拟结果与讨论

利用 Zone5 区域内连通裂隙展开 DFN 核素迁移的模拟。2000 个核素粒子在裂隙介质中的迁移路径及路径长度柱状图如图 8 所示。

计算结果显示,所有粒子运移到边界的迁移路径长度平均为 1293.35 m,粒子运移到边界耗费的时间平均为  $1.70\text{E}+11\text{ d}$ (约为  $4.66\text{E}+8\text{ a}$ )。实际场地的离散裂隙网络系统中,可能存在部分裂隙未能和其余裂隙相连通,产生渗流的“死角”,在不考虑基质渗流的情形下,粒子运移到该处便被“卡住”而无法移动,该模型中共有 347 个粒子发生堵塞情况,占有所有粒子的 17.35%。

由图 9(a) 可以看出粒子运移到模型南边界的路径较短,运移到模型东边界的路径偏长。由图 9(b) 可以看出多数时刻,粒子运移流速小于  $5\text{E}-8\text{ m/s}$ ,在中间部位出现了流速偏快区域,可能是由于多个裂隙在该处交叉导致。

为了更清晰地展示核素迁移过程,选取 A 和 B 两个粒子进行分析。将  $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{235}\text{U}$  和  $^{231}\text{Pa}$  分别编号为 1、2 和 3。两个粒子的核素种类随时间变化见图 10。A、B 粒子初始状态均为  $^{239}\text{Pu}$  粒子,均在半衰期  $2.41\text{E}+4\text{ a}$  后发生衰变产生  $^{235}\text{U}$ ,之后 A 粒子以  $^{235}\text{U}$  形态运移至边界时还未发生衰变,B 粒子以  $^{235}\text{U}$  形态在运移  $9.53\text{E}+8\text{ a}$  后发生衰变产生  $^{231}\text{Pa}$  粒子,之后运移至模型边界。

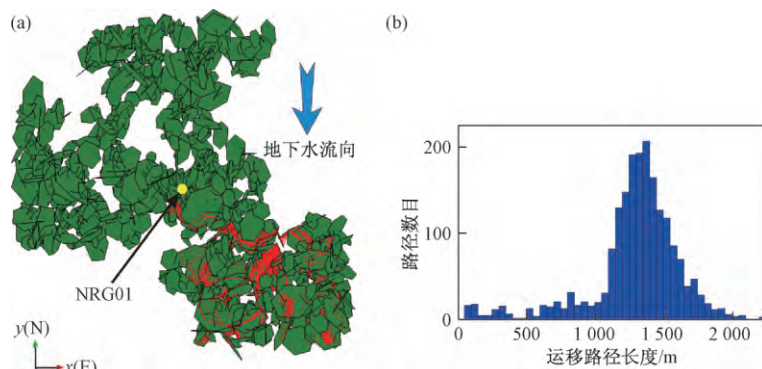


图 8 (a) 核素在裂隙中迁移路线图(图中红线); (b) 不同粒子迁移总长度柱状图

Fig. 8 (a) Radioactive nuclide particle trajectories in fractures( red lines );  
(b) Histogram of total travel length of different particles

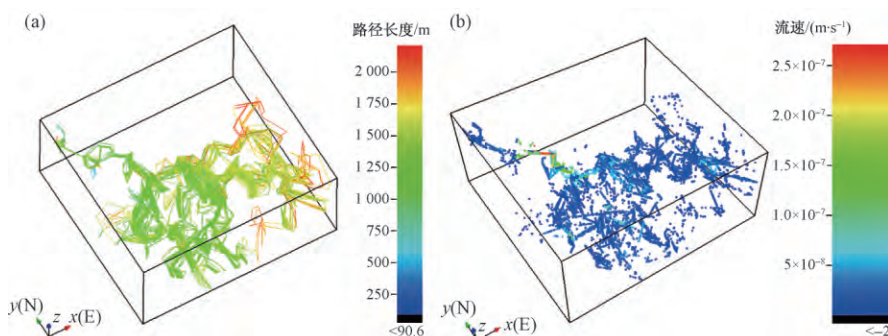


图 9 (a) 粒子迁移路径长度展示图; (b) 不同时刻粒子迁移速度分布图

Fig. 9 (a) Sketch map of particle trajectories ,colored by total travel length;  
(b) Particles distribution within each time step ,colored by velocities

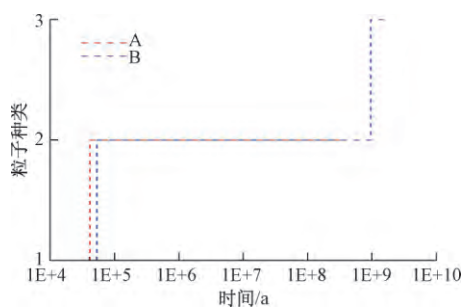


图 10 核素粒子衰变过程示意图

Fig. 10 Schematic diagram of radionuclide  
particle decay process

图 11 展示了三种不同核素粒子的数目在迁移过程中随时间变化曲线,图中可以看出 $^{239}\text{Pu}$ 在开始迁移时便开始衰变,从 2000 个粒子逐渐减少,到半衰期 $8.796 \times 10^6 \text{ d}$ 时, $^{239}\text{Pu}$ 粒子共剩余 982 个,共衰变 1018 个粒子并产生 $^{235}\text{U}$ 核素,此时并没有核素运移到模型边界并发生堵塞。随后 $^{239}\text{Pu}$ 粒子继续衰变,在 $1.00 \times 10^8 \text{ d}$ 时已完全衰变,随后 $^{231}\text{Pa}$ 粒子逐渐增多,

伴随着逐渐由粒子运移至模型边界,粒子运移终止,导致粒子数目下降较快,到 $^{235}\text{U}$ 半衰期 $2.569 \times 10^{11} \text{ d}$ 时,仅剩余正在运移的 $^{235}\text{U}$ 粒子 435 个, $^{231}\text{Pa}$ 粒子 395 个。到 $1.00 \times 10^{12} \text{ d}$ 时,仅剩余正在运移的粒子共计 30 个,占初始粒子数目的 1.5%。

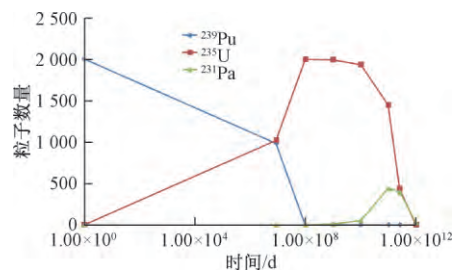


图 11 不同核素粒子的数目随时间变化曲线

Fig. 11 Number variation of different radionuclides with time

综上,针对阿拉善预选区的岩体尺度模型,主要处理方式是:在获取野外裂隙统计数据基础上,构建了阿拉善预选区 NRG01 钻孔附近岩体的三维离散裂隙网络模型,并对模型进行了验证和分析,该模型预测结果

显示 核素粒子从中心运移到边界的迁移路径长度平均为 1293.35 m ,粒子运移到边界耗费的时间平均为  $1.70\text{E}+11$  d ,共有 17.35% 的粒子发生堵塞情况 ,多数时刻粒子运移流速小于  $5\text{E}-8$  m/s。

#### 4 结论

(1) 针对设定的地质模型 ,核素粒子从中心运移到边界的迁移路径长度平均为 1293.35 m ,粒子运移到边界耗费的时间平均为  $1.70\text{E}+11$  d ,据此可见该场地具有作为处置库的潜力。离散裂隙网络模型为高放废物地质处置场地的核素粒子迁移预测提供了新的思路。

(2) 离散裂隙网络模型结构验证是精确预测核素粒子迁移的关键。将野外钻孔数据用作验证模型的重要资料 ,在建模过程中显得很重要 ,而这点目前少有研究提及。而本研究也充分展示了对钻孔资料的充分运用 ,弥补了裂隙介质模拟校验研究的不足 ,增强了模型的可靠性。

(3) 目前对于裂隙介质渗流模拟研究基本采用随机生成方式 ,裂隙介质单次随机生成过程不可避免地产生了单一情景的不确定性问题 ,本研究对于单一确定性地质情景进行了详细的刻画 ,并揭示了核素粒子在裂隙介质的运移情况 ,为今后进一步开展不确定性研究提供良好的基础。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 王月英,姚军,黄朝琴. 裂隙岩体流动模型综述 [J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35( 5): 42 - 48. [WANG Y Y, YAO J, HUANG Z Q. A review of fluid flow models in fractured rock [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35( 5): 42 - 48. ( in Chinese) ]
- [ 2 ] Kelkar S, G Srinivasan, B A Robinson, *et al.* Breakthrough of contaminant plumes in saturated volcanic rock: implications from the Yucca Mountain site [J]. Geofluids, 2013, 13( 3): 273 - 282.
- [ 3 ] Browning L, W M Murphy, C Manepally, *et al.* Reactive transport model for the ambient unsaturated hydrogeochemical system at Yucca Mountain, Nevada [J]. Computers & Geosciences, 2003, 29( 3): 247 - 263.
- [ 4 ] Ophori D U. A simulation of large-scale groundwater flow and travel time in a fractured rock environment for waste disposal purposes [J]. Hydrological Processes, 2004, 18( 9): 1579 - 1593.
- [ 5 ] Selroos J O, H Cheng, S Painter, *et al.* Radionuclide transport during glacial cycles: Comparison of two approaches for representing flow transients [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2013, 64: 32 - 45.
- [ 6 ] 王金生,杨志峰,李书绅,等. 低中放废物处置场核素经地下水迁移对环境影响预测 [J]. 环境科学学报, 2000, 20( 2): 162 - 167. [WANG J S, YANG Z F, LI S S, *et al.* Environmental impact prediction of radionuclides migration through groundwater at a repository with Low-Intermediate Level Radioactive Waste [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20( 2): 162 - 167. ( in Chinese) ]
- [ 7 ] 彭泽洲,聂晶,谷照升. 三维放射性核素在裂隙介质中迁移模型及应用 [J]. 工程勘察, 2004( 1): 21 - 25. [PENG Z Z, NIE J, GU Z S. 3D radioactive nuclides migration simulation in fracture medium and its application [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2004( 1): 21 - 25. ( in Chinese) ]
- [ 8 ] Schwartz M O. Modelling radionuclide transport in large fractured-media systems: the example of Forsmark, Sweden [J]. Hydrogeology Journal, 2012, 20( 4): 673 - 687.
- [ 9 ] Spycher N F, E L Sonnenthal, J A Apps. Fluid flow and reactive transport around potential nuclear waste emplacement tunnels at Yucca Mountain, Nevada [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003( 62/ 63): 653 - 673.
- [ 10 ] 赵宏刚, K Herbert, 王驹. 甘肃北山旧井地段三维地质建模及 RockFlow 在核素迁移模拟研究中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26( 增刊 2): 3989 - 3994. [ZHAO H G, KUNZ H, WANG J. 3D geological modelling in Jiujingblock, Beishan area, Gansu Province and application of rockflow to nuclides migration simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26( Sup2): 3989 - 3994. ( in Chinese) ]
- [ 11 ] 宗自华,王驹,苏锐,等. BS03 钻孔周围裂隙特征分析及 3D 裂隙网络模拟 [C]// 第二届废物地下处置学术研讨会论文集. 兰州, 2008: 83 - 90. [ZONG Z H, WANG J, SU R, *et al.* Characteristics of fracture and modeling of 3D fracture network surrounding borehole BS03 [C]// Second Symposium on underground disposal of waste. Lanzhou, 2008: 83 - 90. ( in Chinese) ]

( 下转第 136 页)



- floor water bursting evaluation in Zhaogezhuang coal mine [J]. Coal Geology of China, 2009, 21(6): 40–44. (in Chinese) ]
- [7] 武强, 李博, 刘守强, 等. 基于分区变权模型的煤层底板突水脆弱性评价——以开滦蔚州典型矿区为例[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1516–1521. [WU Q, LI B, LIU S Q, *et al.* Vulnerability assessment of coal floor groundwater bursting based on zoning variable weight model: A case study in the typical mining region of KaiLuan [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1516–1521. (in Chinese) ]
- [8] 武强, 张波, 赵文德, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 V: 基于 GIS 的 ANN 型、证据权型、Logistic 回归型脆弱性指数法的比较[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 21–26. [WU Q, ZHANG B, ZHAO W D, *et al.* A new practical methodology of coal seam floor water burst evaluation: the comparison study regression among ANN, the weight of evidence and the logistic vulnerable index method based on GIS [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 21–26. (in Chinese) ]
- [9] 韩超, 泮晓华, 李国梁, 等. 基于 GIS 多源信息集成的含水层富水性模糊层次分析法[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 19–25. [HAN C, PAN X H, LI G L, *et al.* The fuzzy analytic hierarchy process of water abundance of an aquifer based on GIS and multi-source information fusion techniques [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(4): 19–25. (in Chinese) ]
- [10] 海龙, 梁冰. 断层构造对煤层底板突水的影响分析[J]. 化工矿产地质, 2009, 31(1): 31–34. [HAN L, LIANG B, Analysis on the influence of fault structure to water-inrush coal floor [J]. Geology of Chemical Minerals, 2009, 31(1): 31–34. (in Chinese) ]
- [11] 王清源, 潘旭海. 熵权法在重大危险源应急救援评估中的应用[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2011, 33(3): 87–92. [WANG Q Y, PAN X H. Entropy method for major hazards emergency rescue [J]. Journal of Nan Jing University of Technology: Natural Science, 2011, 33(3): 87–92. (in Chinese) ]

责任编辑: 汪美华

(上接第 130 页)

- [12] Follin S, L Hartley, I Rhén, *et al.* A methodology to constrain the parameters of a hydrogeological discrete fracture network model for sparsely fractured crystalline rock, exemplified by data from the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden [J]. Hydrogeology Journal, 2013, 22(2): 313–331.
- [13] Selroos J O, S L Painter. Effect of transport-pathway simplifications on projected releases of radionuclides from a nuclear waste repository (Sweden) [J]. Hydrogeology Journal, 2012, 20(8): 1467–1481.
- [14] Blessent D, R Therrien, C W Gable. Large-scale numerical simulation of groundwater flow and solute transport in discretely-fractured crystalline bedrock [J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(12): 1539–1552.
- [15] 王礼恒, 李国敏, 董艳辉. 裂隙介质水流与溶质运移数值模拟研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 84–88. [WANG L H, LI G M, DONG Y H. Review of numerical simulation of flow and solute transport in fractured media [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 84–88. (in Chinese) ]
- [16] 王晋丽, 陈喜, 黄远洋, 等. 岩体裂隙网络随机生成及连通性研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 30–35. [WANG J L, CHEN X, HUANG Y Y, *et al.* A study of stochastic generation and connectivity of fracture network in rock mass [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 30–35. (in Chinese) ]
- [17] 宋晓晨, 徐卫亚. 裂隙岩体渗流模拟的三维离散裂隙网络数值模型: 稳定渗流计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2021–2026. [SONG X C, XU W Y. Numerical model of three-dimensional discrete fracture network for seepage in fractured rocks( II): Computation of steady flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2021–2026. (in Chinese) ]
- [18] Prickett, T A, T G Naymik, *et al.* A “Random-Walk” Solute Transport Model for Selected Groundwater Quality Evaluations [M]. State of Illinois: Illinois State Water Survey, 1981: 11–56.

责任编辑: 汪美华