



移动扫码阅读

肖钧升. 地下水中核素在岩体破碎区迁移扩散特性分析[J]. 能源环境保护, 2021, 35(4): 64-69.

XIAO Junsheng. Analysis on nuclide migration characteristics in groundwater in the fractured zone[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(4): 64-69.

地下水中核素在岩体破碎区迁移扩散特性分析

肖钧升

(上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233)

摘要:为探讨地下水中核素在岩体破碎区的迁移扩散特性,采用 Visual Modflow 数值模拟软件分析了破碎区岩体渗透系数对核素迁移运动规律的影响。结果表明:局部存在的非贯通岩体破碎区会对核素的迁移速率产生不利影响;核素浓度在迁移衰变过程中呈现先快后慢的降低特征;随着时间的推移,核素浓度变化受破碎区渗透系数的影响程度逐渐减小;当破碎区渗透系数取值为围岩的 30 倍时,地下水中核素最大浓度从第 1 年的 4.65×10^6 Bq/L 降至第 90 年的 1.22 Bq/L;核素浓度极值、扩散时间与相对渗透系数之间遵循函数关系式 $c = 0.269 16 \times e^{-n/6.544 59} + 0.575 19 \times e^{-n/0.985 8} + 0.118 95$ 。

关键词:地下水;破碎区;渗透系数;核素迁移;浓度极值

中图分类号: X523

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2021)04-0064-06

Analysis on nuclide migration characteristics in groundwater in the fractured zone

XIAO Junsheng

(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: In order to study the migration characteristics of nuclide in groundwater, the influence of permeability coefficient of rock mass in fractured zone on nuclide migration was discussed by numerical simulation software Visual Modflow. The results show that non-penetrating fractured zones causes negative effects on the migration rate of nuclides. Nuclide concentration decreases quickly and then slowly during the migration and decay process. The influence of permeability coefficient of fractured zone on the change of nuclide concentration decreases gradually with time. When the permeability coefficient of the fractured area was 30 times of that of the surrounding rock, the maximum nuclide concentration in the groundwater decreases from 4.65×10^6 Bq/L to 1.22 Bq/L within 90 years. The functional relationship of the maximum nuclide concentration, the diffusion time and the relative permeability coefficient is fitted as $c = 0.269 16 \times e^{-n/6.544 59} + 0.575 19 \times e^{-n/0.985 8} + 0.118 95$.

Key Words: Groundwater; Fractured zone; Permeability coefficient; Nuclide migration; Maximum concentration

0 引言

目前,由于国内外核电厂的选址建设,核电厂的环境影响尤其是核电厂址中放射性核素在地下水迁移^[1]、吸附和沉积是需要特别关注的问题。美国核管会的“Standard Review Plan”(NUREG-

0800)规定在核电厂的安全分析报告中必须评价事故工况^[2]下放射性液体释放对厂址区地下水体的影响。2011年3月日本福岛核电站事件^[3]中,地震海啸引起核电站故障并造成放射性物质向地下、海水以及大气的释放引起公众对核电站的环境影响问题的关注空前加大。目前,核素在地下

水中的迁移研究主要集中在放射性废物处理及处置工艺技术研究^[4]方面,并且取得了一定的成果,朱君等人通过三维数值模型研究了核素在粉质土壤中的迁移规律^[5],李洪辉等人研究了深地质处置缓冲材料(膨润土)中¹³⁵Cs核素迁移特性^[6],李博通过以地气流为核素迁移的载体,探究核素在土壤中的迁移运移机制^[7],而核电厂地基主要为岩质地基,如裂隙岩体^[8]情况下核电厂产生的放射性核素在地下水中的迁移研究较少,对于地基存在渗流通道^[9]的特殊工程情况,放射性废物在地下水中的迁移可能会对厂区环境造成不利影响。本文结合国内相关核电工程,进行事故工况下放射性核素在岩质地基地下水中迁移特性的三维模拟,探讨非均质地基中破碎区渗透系数^[10]变化对核素迁移速率、影响范围及浓度变化等特性的影响,为核电厂环境影响评价^[11]提供理论参考。

1 研究区概况

某核电厂地处黄海之滨,三面环海,整体呈西北~东南走向,为滨海核电厂。规划容量为 6×10^3 MW核电机组,厂区一次规划,分期建设,二期工程为2台AP1000核电机组,位于一期工程的东侧。

二期工程核岛区位于厂区的中偏西部,根据厂址区地质测绘成果和钻探资料,厂区出露的地层岩性主要为第四系地层和中生代早白垩世莱阳群水南组地层,人工填土层主要分布在核岛区的南侧,回填区厚度由北向南逐渐增大,揭露厚度2.0~10.10 m;厂区内基岩揭露岩性为中薄层状粉砂岩、细砂岩及薄层状页岩,以互层、夹层、夹薄层等形式出现,岩石风化程度主要有中等风化和微风化两种。

拟建场地现已开挖整平至设计标高,在厂区内无地表水体,根据前期岩土工程勘察资料与水文地质调查资料,厂址区内地下水主要为基岩裂隙水和第四系孔隙水两种类型,其中以基岩裂隙水为主,第四系孔隙水仅局部存在,主厂区内地下水主要受大气降水补给,以径流、蒸发等形式排泄。地下水流向整体呈现北侧高,南侧低的态势,最终流入黄海。

3#核岛区存在一条破碎带P1,示意图如图1所示,破碎带由南向北贯穿核岛区,带宽0.26~2.30 m,破碎带内岩体破碎,风化强烈,可见粉末

状黏土物质,破碎带内岩石为角砾岩,多数胶结良好,个别段岩芯破碎,在P1破碎带与其东侧紧邻的辉绿玢岩岩脉之间还有两条小型的破碎带,导致P1破碎带与其东侧辉绿玢岩岩脉之间的岩体整体比较破碎。

由于上述破碎带及其周边岩体破碎,可能会成为地下水的较好通道,对核素在地下水中的迁移产生不利影响,因此本文重点研究P1破碎带与其东侧辉绿玢岩岩脉之间的破碎区岩体的渗透系数变化对放射性核素迁移所产生的影响。

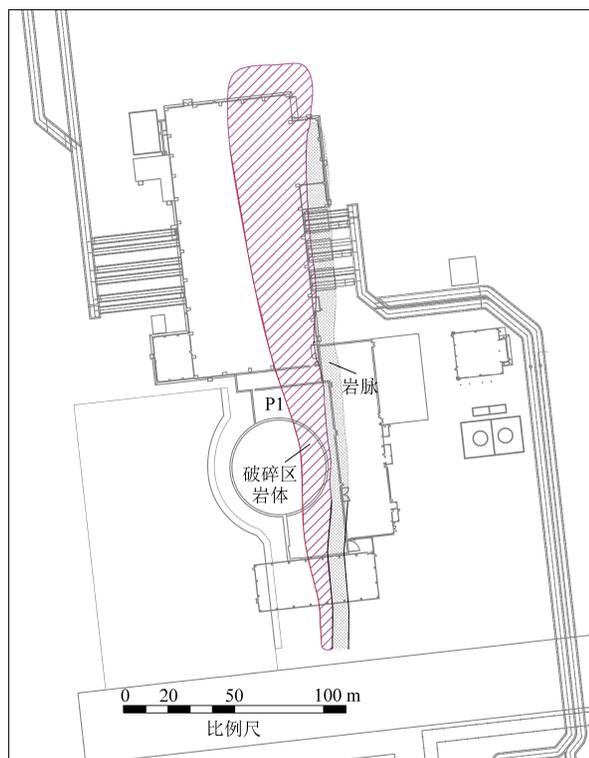


图1 破碎区岩体示意图

Fig.1 Schematic diagram of fractured zone

2 地下水数值模型

本文采用 Visual MODFLOW 进行核素在地下水中迁移的数值模拟工作。Visual MODFLOW 广泛应用与科研、生产、环境保护等行业。其通过输入模块可以将所评价区域划分为若干层网状单元格,确定边界类型,后经输入源项的范围,初始浓度等参数信息,通过有限差分法迭代模拟核素在地下水系统中迁移扩散方式,输出模块输出图形包括等值线图和示踪流线图以及局部区域水均衡图等一系列图件。

2.1 控制方程

孔隙介质中地下水在三维空间的流动可用如式(1)的偏微分方程表示:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

其中: K_{ij} 为渗透系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; h 为水头, m ; q_s 为源处单位体积含水层的流量, s^{-1} ; S_s 为孔隙介质贮水率, m^{-1} ; t 为时间, s 。

在考虑地下水的对流、水动力弥散、流体源汇项、平衡吸附以及一级不可逆反应(如放射性衰变)的情况下,单一化学组分迁移的数学方程为^[12]:

$$\theta R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (q_i C) + q_s C_s - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \quad (2)$$

式中: R 为延迟因子, $R = 1 + (\rho_b / \theta) (\partial \bar{C} / \partial C)$; C 为溶解浓度, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$; \bar{C} 为吸附浓度, $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$; q_i 为达西速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; D_{ij} 为弥散系数张量, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; q_s 为源处单位体积含水层的流量, s^{-1} ; C_s 为源的浓度, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$; λ_1 为溶解相的反应速率常数, s^{-1} ; λ_2 为吸附相的反应速率常数, s^{-1} ; θ 为孔隙度; ρ_b 为介质的体积密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

迁移控制方程与地下水水流控制方程可以通过达西定律^[13]建立联系:

$$q_i = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (3)$$

水流方程(1)和溶质迁移方程(2)可独立求解,模拟过程中由水流方程得出研究区域及时段的速度分量,后将速度作为输入通过溶质迁移方程求解。

2.2 计算范围

从空间上看,地下水流向以水平为主,根据地质层岩性分布,模型厚度取 50 m。同时满足质量和能量守恒定律,地下水流动速度比较小,可视为层流运动,符合达西定律,含水层参数随空间变化,体现了水流的非均质性。

综上所述,将地下水概化为非均质各向同性三维稳定流。本次数值模拟的计算范围取为 250 m × 310 m,包括厂区内回填土层、微风化基岩微透水含水层、中风化基岩弱透水含水层以及破碎区透水层。对模型范围进行网格离散,网格大小考虑了计算精度及数值计算收敛的要求,区域单元网格边长约为 2.5 m,250 m × 310 m 的模型范围分成 100 × 124 个单元格,如图 2 所示,然后进行渗流计算,构造研究区的地下水水流场。破碎区模型示意图如图 3 所示。

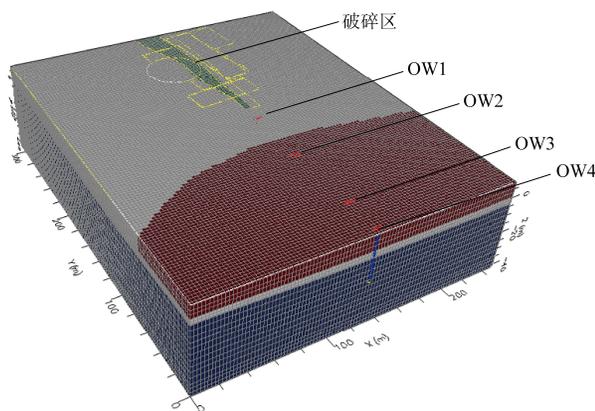


图2 三维有限元模型网格

Fig.2 3D FEM of calculation model

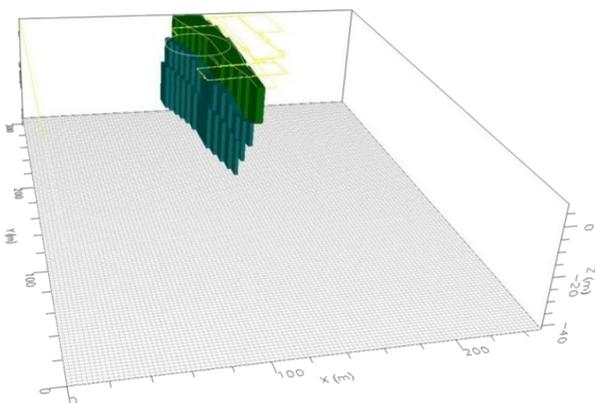


图3 破碎区有限元网格示意图

Fig.3 FEM of fractured zone

2.3 边界条件

根据地下水等水位等值线图,取厂区北部边界概化为定水头边界,根据实际地下水位进行赋值;取厂区东部和西部两侧边界概化为隔水边界;模型南部边界为黄海,可概化为定水头边界,以黄海年平均水位作为水头值。

2.4 计算参数

根据本厂址的岩土工程勘察及水文地质调查资料,本次数值计算中用到的参数取值依据如下。

(1)渗透系数:对中~微风化基岩区,主要依据多次压水试验结果取其平均值;对厂区内回填区,结合其他工程经验进行取值;破碎区岩层由于缺乏有效的试验结果,现根据场地岩性描述并考虑最保守及最不利工况,将破碎区岩体渗透系数分别取为其围岩的 1、2、5、10、20、30 倍进行敏感性分析,对应计算工况为工况 1~6。

(2)孔隙率:根据室内试验及现场密度试验结果,结合其他工程经验取值。

(3)干密度:根据室内试验及现场密度试验结果,结合其他工程经验取值。

(4)弥散度:根据结合其他工程经验取值。数如表 1 所示。

综合以上分析,计算中所用到的水文地质参

表 1 地下水中迁移参数取值

Table 1 Value of migration parameters in groundwater

计算区域	渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)	孔隙率	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	弥散度
微等风化基岩区	0.036	0.035 6	2.68	$\alpha_L = 10 m$
中等风化基岩区	0.432	0.093 4	2.57	
破碎区岩体	0.036、0.072、0.180	0.105 1	2.58	$\alpha_L / \alpha_T = 3$
	0.360、0.720、1.080			
回填区	2.780	0.400 0	1.47	

为了便于计算分析,假设事故发生时,流出液瞬时全部进入地基岩土层,并在地基岩土层中形成一个长方体初始污染区,浓度均匀分布,然后此初始污染区随着地下水的流动而迁移扩散,示意图如图 4 所示。即假设放射性泄漏景象为瞬时体源释放模型。

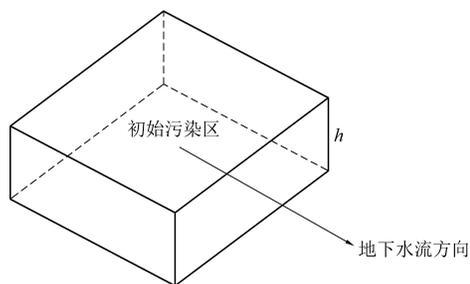


图 4 放射性核素泄漏迁移模型

Fig.4 Radionuclide leakage migration model

污染区的体积 V 可按下式计算:

$$V = \frac{V_0}{n} \quad (4)$$

式中: V_0 为从储罐内泄漏的废液体积,为 $84.8 m^3$; n 为地基岩土介质的孔隙率。

为了比较直观的模拟地下水中核素迁移的动态过程,本次模拟过程中选取不被吸附滞留的核

素(即滞留因子 $R=1$)进行计算分析,由于地下水实际流速较小,只有在较长的时间内才能产生明显的迁移距离,由于不被吸附滞留的核素迁移到厂区边界需要数十年,因此选取核素 H-3(半衰期为 4.49×10^3 天)进行模拟分析,流出液暂存箱中核素 H-3 浓度为 3.74×10^4 Bq/g,模拟过程中时间尺度以天计。

3 模拟成果分析

3.1 浓度等值线分布

工况 1~6 核素 H3 在厂址地下水中的 10 年时浓度等值线分布如图 5 所示,根据模拟成果,污染物均是从污染源起始位置出发向南迁移至水体,其路径与地下渗流场水流方向保持一致,工况 1~6 核素浓度等值线分布图表明,破碎区处的核素浓度等值线图随着破碎区岩体渗透系数的增大发生了较为明显的弯曲,表明核素迁移速率在破碎区处有明显增大,破碎区岩体的存在对核素浓度分布产生了显著的影响,并随着破碎区岩体渗透系数的增大,核素浓度等值线分布受影响程度逐渐增大,扩散程度逐渐增大。

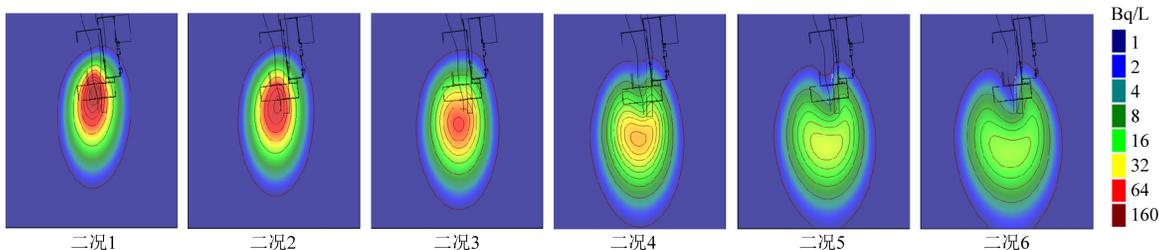


图 5 核素浓度等值线分布(Bq/L,10年)

Fig.5 Isoline distribution of the nuclide concentration(Bq/L,10th year)

3.2 迁移速率

本次模拟过程中在核素迁移路径上共布置了四个浓度观测孔(OW1~4),从而监测核素在地层

中迁移的浓度及到达时间,观测孔中浓度达到最大值时的时间如表 2 所示,从工况 1 至工况 6,观测孔 OW1 核素浓度达到极值的时间从 10.5 年递

减至 3.1 年,OW2 核素浓度达到极值的时间从 18.3 年递减至 9.4 年,OW3 核素浓度达到极值的时间从 26 年递减至 16.6 年,OW4 核素浓度达到极值的时间从 31.1 年递减至 21.1 年,模型边界观测孔 OW4 核素浓度变化—时间关系曲线如图 6 所示,随破

表 2 观测孔核素浓度达到极值所需时间

Table 2 Time of the maximum nuclide concentration in observation hole

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
OW1	10.5	9.4	6.6	5	3.6	3.1
OW2	18.3	16.6	13.8	12.2	10.0	9.4
OW3	26.0	24.4	21.1	19.3	17.7	16.6
OW4	31.1	29.3	26.0	24.4	22.2	21.1

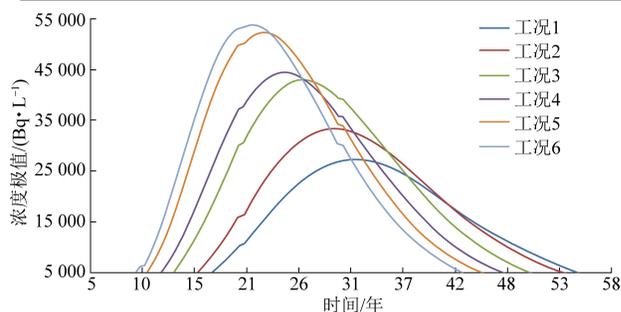


图 6 OW4 核素浓度变化—时间关系曲线

Fig.6 Relationship of OW4 nuclide concentration and time

3.3 浓度极值

不同工况条件下地下水中核素的最大浓度值与时间关系如图 7 所示,结果表明:在破碎区渗透系数与其围岩相同时,地下水中核素最大浓度从第 1 年至第 90 年由 2.00×10^7 Bq/L 降至 29.5 Bq/L,当破碎区渗透系数取值为其围岩的 30 倍时,地下水中核素最大浓度从第 1 年至第 90 年由 4.65×10^6 Bq/L 降至 1.22 Bq/L,地下水中核素浓度随时间延长而逐渐降低,其过程基本上遵循先快后慢的规律,随着时间的推移,不同工况下核素浓度极值趋近于同一近似值,随破碎区渗透系数的增大,核素在迁移衰变过程中浓度极值随破碎区渗透系数的增大而逐渐降低,基本上呈现先快后慢的趋势,经过一定时间的迁移衰变,核素浓度极值变化受破碎区渗透系数的影响逐渐减小。

由浓度极值与时间关系曲线可知,各工况下两者的关系曲线均形如 $y = a - b \times c^x$ 曲线,因此通过 Origin8.0 软件进行拟合,得出核素迁移过程中浓度极值、扩散时间与破碎区和周围岩体相对渗透系数三者之间的函数关系如(5)~(8)所示。

$$Q = A(a - b \times c^t) / 10\,000 \quad (5)$$

$$a = (0.004\,82 + 0.000\,777\,443n)^{-1} \quad (6)$$

碎区渗透系数的增大,模型边界的浓度极值逐渐增大,核素整体迁移速率也逐渐增大,表明地基中局部存在非贯通的岩体破碎区时会对核素整体迁移速率产生不利影响。

$$b = 309.782\,86 \times e^{-n/2.990\,59} - 9\,950.069\,84 \quad (7)$$

$$c = 0.269\,16 \times e^{-n/6.544\,59} + 0.575\,19 \times e^{-n/0.985\,8} + 0.118\,95 \quad (8)$$

式中: Q 为核素迁移过程中的浓度极值(Bq/L); A 为核素初始浓度(Bq/L); t 为核素迁移扩散时间(年); n 为破碎区岩体与周围岩体渗透系数比值。

通过上述函数关系式,在已知破碎区岩体与周围岩体渗透系数比值的前提下,可以便捷地求解出核素在迁移过程中任意时刻的浓度极值,为评价核素浓度对地基环境的影响程度提供参考。

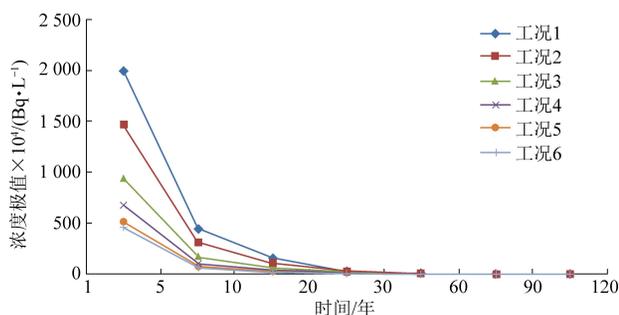


图 7 核素浓度极值—时间关系图

Fig.7 Relationship of the maximum nuclide concentration and time

4 结 论

本文结合相关工程实例,通过地下水数值模拟软件,针对破碎区存在的不同情况,对地层中核素迁移的特性进行了敏感性分析,并拟合出核素迁移过程中浓度极值、扩散时间与破碎区和周围岩体相对渗透系数三者之间的函数关系,结果表明:

(1)地基中局部存在非贯通的岩体破碎区会对地下水中核素的迁移状态产生不利影响。

(2)随着破碎区渗透系数的增大,核素在迁移过程中扩散程度逐渐增大,在破碎区核素的分布形态受影响程度逐渐增大,核素整体迁移速率逐渐增大。

(3)核素浓度在核素迁移衰变过程中遵循先快后慢的降低原则,随着破碎区渗透系数的增大,浓度极值逐渐减小,变化趋势趋于一致,随着时间推移,核素浓度变化受破碎区渗透系数的影响程度逐渐减小。

(4)本文的模拟计算分析针对的是特定破碎区的渗透系数变化,对于破碎区的形态变化对地下水中核素迁移特性的影响分析以及岩层深度方向的核素扩散模式有待进一步讨论。

参考文献

- [1] 包敏,王群书. 熔岩玻璃体 ^{239}Pu 在地下水中的迁移模拟研究 [J]. 原子能科学技术, 2014, 48 (10): 1757-1765.
- [2] 漏汇,钱磊,倪依雨. AP1000 核电厂严重事故废液处理应急措施研究 [A]. 中国核学会 2015 年学术年会 [C]. 绵阳:中国核学会, 2015: 252-258.
- [3] 王川,马志刚,袁添鸿. 福岛核电站事故对我国核电发展的启示 [J]. 工业安全与环保, 2014, 40 (2): 83-85.
- [4] 方祥洪,耿忠林,马若霞,等. AP1000 核电厂放射性废液处理工艺研究 [J]. 科技资讯, 2017, 15 (14): 89-91.
- [5] 朱君,邓安嫦,张艾明. 实验室尺度三维含水层核素迁移模型试验 [J]. 核化学与放射化学, 2019, 41 (3): 290-296.
- [6] 李洪辉,赵帅,维李鹏,等. 深地质处置缓冲材料中 ^{135}Cs 核素迁移计算及参数灵敏度分析 [A]. 第七届废物地下处置学术研讨会论文集 [C]. 上海:中国原子能出版社, 2018: 343-355.
- [7] 李博. 地气作用下地质处置核废物中核素迁移的行为研究 [D]. 成都:成都理工大学, 2018: 43-47.
- [8] 王锦国,周志芳. 裂隙岩体溶质运移模型研究 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (2): 270-276.
- [9] 蒋媛媛,沈振中,郭娜,等. 岩溶-裂隙介质渗流的三重介质模型 [J]. 中国科学技术大学学报, 2004, 34 (z1): 361-366.
- [10] 卜万奎. 断层内破碎岩石渗透性的试验研究 [J]. 实验力学, 2009, 27 (4): 469-473.
- [11] 谭承军,李帷,魏国良,等. 核电厂地下水环境影响评价需关注的几个问题 [J]. 人民长江, 2017, 48 (24): 31-36.
- [12] Neveen B. Abd El-Mageed, Muhammad A. Abdul-Muttalib, Yasmien A. Heiba. Validating visual modflow numerical model to predict future impact of brine disposal on groundwater [J]. Journal of Engineering Research and Reports, 2019, 5 (1): 1-9.
- [13] M. W. Nchabeleng, A. G. Fareo. Group invariant solution for a fluid-driven permeable fracture with Darcy flow in porous rock medium [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2018, 99: 79-85.