

文章编号: 1673 - 0062 (2009) 04 - 0001 - 04

松散破碎射气介质中氡运移的气液两相耦合数学模型及其数值解

徐文平, 丁德馨*, 饶 龙, 李广悦, 陈 翔

(南华大学 核资源与核燃料工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 虽然原地爆破浸出采铀技术是一种经济、高效、适合我国铀矿床特点的新的开采技术, 但它所引起的井下氡污染已不容忽视。根据原地爆破浸出采铀采场铀矿堆所具有的松散、破碎和非均匀的特性, 将铀矿堆抽象为松散破碎射气介质, 基于多孔介质中的气 - 液两相渗流理论和氡运移的扩散 - 渗流理论, 建立了松散破碎射气介质中氡运移的气液两相耦合作用数学模型, 并采用有限差分法求出了模型的数值解。通过数值解研究了松散破碎射气介质中气 - 液两相渗流状态下氡的活度浓度分布特征, 为松散破碎射气介质中氡的运移状况的预测和预报, 及原地破碎浸出采场氡污染的治理与控制提供了理论依据。

关键词: 松散破碎射气介质; 氡运移; 气液两相流; 模型

中图分类号: TL752.2 **文献标识码:** A

A Coupled Mathematic Model for Radon Migration through Gas - liquid Two - phase Fluid in Loose Fragmented Radioactive Medium

XU Wen-ping, DING De-xin*, RAO Long, LI Guang-yue, CHEN Xiang

(School of Nuclear Resources and Nuclear Fuel Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In - place leaching of fragmented uranium ore by blasting is a new mining technology for Chinese uranium deposits. This method has the advantages of being economical and efficient, but the underground radon contamination brought by it has become a widely concerned problem. In this research, the uranium ore heap is abstracted to a loose fragmented radioactive medium according to its characteristics of being loose, fragmented and inhomogeneous. Firstly, a mathematic model for radon migration through gas - liquid two - phase fluid in loose fragmented radioactive medium is established based on the theories of two - phase flow through a porous medium and radon migration by diffusion and convection. Secondly, the finite difference method was used to solve the differential equations. Fi-

收稿日期: 2009 - 06 - 20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10575048); 湖南省教育厅重点科研基金资助项目 (07A061)

作者简介: 徐文平 (1986 -), 男, 四川峨眉山人, 南华大学核资源与核燃料工程学院硕士研究生。主要研究方向: 溶浸采铀。* 通讯作者。

nally, the distribution characteristics of the activity concentration of radon in a loose fragmented radioactive medium are studied in the state of gas - liquid two - phase flow. The theoretical foundation is provided for forecasting migration of radon in a loose fragmented radioactive medium and radon control in stopes of in - place leaching of fragmented uranium ore by blasting

Key words: loose fragmented radioactive medium; radon migration; gas - liquid two - phase flow; model

0 引言

原地爆破浸出采铀是当前较为经济有效的采铀方法之一. 由于它具有能耗低、污染少、基建投资省等优点, 因而在我国铀矿山获得了广泛的应用^[1-2]. 原地爆破浸出须在井下进行较大规模的爆破, 爆破之后形成的铀矿堆具有松散、破碎和非均匀的特性, 可将其抽象为松散破碎射气介质. 与传统的采矿方法不同, 原地爆破浸出则是对爆破下来的数以万吨计的铀矿石进行就地喷淋浸出. 在这个过程中, 铀矿石析出的可移动的放射性氡, 随着松散矿堆孔隙中气体和溶浸液的流动进行扩散和对流, 这就造成了氡在松散破碎射气介质中的气液两相运移, 给原地爆破浸出采铀带来了严重的氡污染问题^[3-4]. 研究表明, 长期吸入氡及其子体浓度较高的空气, 相当于受到连续的慢性照射, 可能出现的远期效应是肺癌的发生. 因此, 松散破碎射气介质中氡的气液两相运移行为的研究对于原地爆破浸出采铀矿山的通风防氡, 对于铀矿铀资源的绿色开采和铀矿冶工业的可持续发展都有重要的意义^[5-6].

近年来, 随着氡运移的扩散、对流理论和气液两相渗流理论的发展, 人们对铀矿堆中氡运移的机理有了深刻的认识: 铀矿石产生的可移动氡, 一部分通过介质孔隙中的气体进行扩散和对流传播, 另一部分溶于溶浸液中进行扩散和对流传播. 在这过程中, 气相和液相中的氡也会进行交换, 以维持氡在气液两相之间的动态平衡. 在以往的氡运移理论研究中仅考虑了氡在气相中的运移^[7-10], 而忽略了氡在液相中的运移. 定量研究氡在松散破碎射气介质中扩散和对流的研究也不多. 因此, 本文基于氡运移的对流 - 扩散理论和气 - 液两相渗流理论, 建立了氡在松散破碎射气介质中气液两相耦合运移的数学模型, 对该数学模型采用有限差分法进行数值求解, 并分析了介质中氡活度浓度的分布特征, 为原地爆破浸出采铀矿山的通风降氡提供了理论依据.

1 基本理论

氡在松散破碎射气介质中的运移属于气液两相渗流问题和对流 - 扩散问题, 前者要用气液两相渗流方程来描述, 后者要用氡运移的对流 - 扩散耦合方程来描述. 在建立方程前首先引入几个基本假设: 松散破碎射气介质共由三相组成: 固相、液相和气相; 介质为各向同性, 且固相不发生变形; 渗透过程为等温; 不考虑溶浸过程之中介质孔隙度的变化; 孔隙气体为等温理想气体; 气液两相流体在介质孔隙中流动, 满足达西定律, 并且不考虑毛细作用力.

1.1 气 - 液两相渗流方程

连续性方程:

$$\text{气相: } \frac{\partial(\rho_g V_{gx})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_g V_{gy})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_g V_{gz})}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\text{液相: } \frac{\partial V_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial V_{wy}}{\partial y} + \frac{\partial V_{wz}}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中: ρ_g 为气相密度; V_g 、 V_w 为气相和液相的渗流速度矢量, 满足达西定律, 其表达式为

$$\text{气相: } V_g = - \frac{k_g}{\mu_g} \cdot \nabla P_g \quad (3)$$

$$\text{液相: } V_w = - K_w \cdot \nabla H \quad (4)$$

代入式 (1)、式 (2) 可得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_g}{v_g} \frac{\partial P_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_g}{v_g} \frac{\partial P_g}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_g}{v_g} \frac{\partial P_g}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_w \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_w \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_w \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 \quad (6)$$

式中: k_g 为气相的有效渗透率, m^2 ; μ_g 为气体的动力粘滞系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; v_g 为气体的运动粘滞系数; P_g 为气相的压力, Pa ; K_w 为液相的渗透系数, m/s ; H 为液相的压力水头, m .

在压力和温度变化不大的情况下, 可认为 k_g 、 v_g 和 K_w 均为常数, 则式 (5)、式 (6) 可写成

$$\frac{\partial^2 P_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_g}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

1.2 氡的气-液两相对流-扩散耦合方程

液相:

$$\frac{D_w}{\varepsilon \theta} \nabla^2 C_w - \frac{V_w}{\varepsilon \theta} \nabla C_w - \lambda C_w + \frac{GL}{\varepsilon \theta} = 0 \quad (9)$$

气相:

$$\frac{D_g}{\varepsilon(1-\theta)} \nabla^2 C_g - \frac{V_g}{\varepsilon(1-\theta)} \nabla C_g - \lambda C_g + \frac{G(1-L)}{\varepsilon(1-\theta)} = 0 \quad (10)$$

式中: C_w 、 C_g 分别为液相和气相中氡的活度浓度, Bq/m^3 ; D_w 、 D_g 分别为氡在液相和气相中的扩散系数, m^2/s ; V_w 、 V_g 分别为介质中液相和气相流体的渗流速度, m/s ; ε 为介质的孔隙率; θ 为介质含水饱和度, 即介质孔隙中水相的体积与孔隙的体积之比; λ 为氡的衰变常数, 2.1×10^{-6} ; G 为介质可移动氡产生能力, $Bq/(m^3 \cdot s)$; L 为氡在水中的溶解度系数 (293 K 时取 $0.26^{[11]}$).

其中, 松散破碎射气介质中可移动氡产生能力由下式计算^[12]:

$$G = 0.26 \rho_s U K_p f_{Rn} \quad (11)$$

式中: ρ_s 为介质的密度, kg/m^3 ; U 为介质中铀的含量, %; K_p 为铀镭平衡系数; f_{Rn} 为射气系数.

1.3 定解条件

考虑形状为长方体 (长: l 宽: b 高: h) 的原地爆破浸出堆场中的气-液两相流问题 (如图 1 所示), 其边界条件为

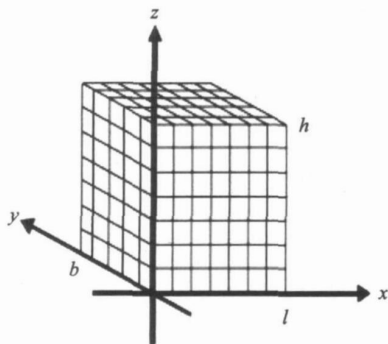


图 1 物理模型

Fig 1 Physical model

当 $x = 0$, $x = l$, $y = 0$, $y = b$ 时,

$$\frac{\partial P_g}{\partial x} = \frac{\partial P_g}{\partial y} = \frac{\partial P_g}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial H}{\partial z} = 0;$$

当 $z = 0$ 时, $P_g = P_l$;

当 $z = h$ 时, $P_g = P_0$, $\frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{V_{wz}}{K_w}$.

考虑堆场中氡运移的对流-扩散问题, 其边界条件为

当 $x = 0$ 和 $x = l$ 时, $\frac{\partial C_g}{\partial x} = \frac{\partial C_w}{\partial x} = 0$;

当 $y = 0$ 和 $y = b$ 时, $\frac{\partial C_g}{\partial y} = \frac{\partial C_w}{\partial y} = 0$;

当 $z = h$ 时, $C_g = C_g^0$, $C_w = C_w^0$.

2 数学模型的数值解

本文采用有限差分方法离散渗流微分方程 (7)、(8) 和氡运移微分方程 (9)、(10). 微分方程的有限差分形式可以表示为在 (i, j, k) 点的离散化方程, 令 $\Delta x = \Delta y = \Delta z$:

$$P_{i+1,j,k} + P_{i-1,j,k} + P_{i,j+1,k} + P_{i,j-1,k} + P_{i,j,k+1} + P_{i,j,k-1} - 6P_{i,j,k} = 0 \quad (12)$$

$$H_{i+1,j,k} + H_{i-1,j,k} + H_{i,j+1,k} + H_{i,j-1,k} + H_{i,j,k+1} + H_{i,j,k-1} - 6H_{i,j,k} = 0 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{D_w}{\Delta x^2} - \frac{(V_{wx})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{w(i+1,j,k)} + \left[\frac{D_w}{\Delta x^2} - \frac{(V_{wy})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{w(i,j+1,k)} + \left[\frac{D_w}{\Delta x^2} - \frac{(V_{wz})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{w(i,j,k+1)} \\ & + \left[-\frac{6D_w}{\Delta x^2} - \lambda \varepsilon \theta \right] C_{w(i,j,k)} + \left[\frac{D_w}{\Delta x^2} + \frac{(V_{wx})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{w(i-1,j,k)} + \left[\frac{D_w}{\Delta x^2} + \frac{(V_{wy})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{w(i,j-1,k)} \\ & + \left[\frac{D_w}{\Delta x^2} + \frac{(V_{wz})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{w(i,j,k-1)} = -GL \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{D_g}{\Delta x^2} - \frac{(V_{gx})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{g(i+1,j,k)} + \left[\frac{D_g}{\Delta x^2} - \frac{(V_{gy})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{g(i,j+1,k)} + \left[\frac{D_g}{\Delta x^2} - \frac{(V_{gz})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{g(i,j,k+1)} \\ & + \left[-\frac{6D_g}{\Delta x^2} - \lambda \varepsilon (1-\theta) \right] C_{g(i,j,k)} + \left[\frac{D_g}{\Delta x^2} + \frac{(V_{gx})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{g(i-1,j,k)} + \left[\frac{D_g}{\Delta x^2} + \frac{(V_{gy})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{g(i,j-1,k)} \\ & + \left[\frac{D_g}{\Delta x^2} + \frac{(V_{gz})_{i,j,k}}{2\Delta x} \right] C_{g(i,j,k-1)} = -G(1-L) \end{aligned} \quad (15)$$

将以上式子写成矩阵形式, 则可得一般形式

$$Ax = b \quad (16)$$

式中: 系数矩阵 A 为大型稀疏矩阵.

本文采用逐次超松弛迭代法 (SOR) 迭代求解上述数值方程, 即

$$X_i^{(k+1)} = X_i^{(k)} + \omega (b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} X_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} X_j^{(k)}) / a_{ii} \quad (17)$$

式中: ω 为松弛因子, $\omega > 1$; $i = 1, 2, \dots, n$

3 实例计算分析

以我国某原地爆破浸出采铀矿山 6[#]采场为例. 该采场采用有底柱阶段深孔爆破落矿筑堆, 筑堆长 16 m, 宽 8 m, 高 24 m; 筑堆平均品位为 0.079%, 孔隙率约为 0.25, 布液饱和阶段的溶浸液体积含量约为 16%, 采场上下气体压差为 180 Pa, 采场布液强度为 25 L/(m²·h), 采场上部入风氡浓度为 500 Bq/m³.

图 2 为模拟计算的原地爆破浸出采场矿堆中气相和液相氡的平均活度浓度随矿堆深度变化的曲线. 从图 2 可以看出: 原地爆破浸出采场矿堆中氡的运移存在于气液两相之中; 当矿堆中的气液两相流体的渗流方向为自上而下时, 矿堆内部气相和液相中氡的平均活度浓度均随着矿堆深度增大而呈线性增长, 且气相中氡的活度浓度高于液相中氡的活度浓度; 堆场底部集液口处的气氡和水氡的活度浓度达到 52.8 kBq/m³ 和 17.6 kBq/m³, 显然如此高浓度的氡将会对集液巷道带来严重的氡污染, 这与原地爆破浸出采铀采场实际情况一致. 因此, 原地爆破浸出矿井的通风量不能按常规矿山排氡公式进行设计, 必须考虑溶浸液中氡的运移; 此外, 原地爆破浸出采场集液池部位积聚了大量的氡, 必须对集液池进行加盖密封处理并利用局部通风将污风直接引入回风道, 以避免其对入风流造成污染.

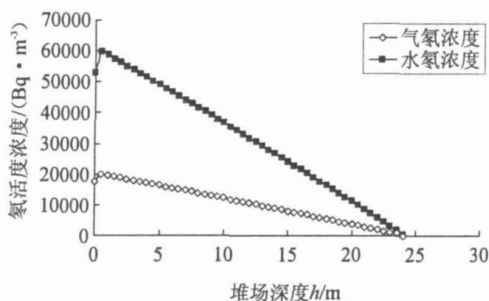


图 2 氡的活度浓度随堆场深度变化曲线

Fig 2 The variation curves of radon activity concentration varying with the depth of ore heap

4 结论

1) 建立了气液两相渗流状态下松散破碎射气介质中氡运移的气液两相耦合数学模型, 并利用有限差分程序进行了数值求解.

2) 对稳态情况下的原地爆破浸出采场中氡运移进行了有限差分数值求解, 通过数值模拟反应了采场铀矿堆氡浓度的分布特征.

3) 本文所建立的松散破碎射气介质中氡运移的气液两相渗流耦合作用模型为研究原地爆破浸出采铀采场中氡运移的问题奠定基础, 对原地爆破浸出采铀矿山通风控氡具有重要的理论价值和实际意义.

参考文献:

- [1] 丁德馨, 邹国和. 低品位铀矿床留矿 - 原地浸出试验研究 [J]. 中国核科技报告, 1998, 13 (S6): 35 - 36
- [2] 丁德馨, 杨仕教, 李明. 745 矿原地爆破破碎浸铀矿块底部结构的设计与施工 [J]. 中国核科技报告, 1998, 13 (S6): 25 - 26
- [3] 李先杰, 邓文辉, 潘佳林. 原地爆破浸出铀矿山通风降氡问题初探 [J]. 铀矿冶, 2004, 23 (4): 192 - 195
- [4] 潘英杰. 浅谈原地爆破浸出矿井通风防护问题 [J]. 铀矿冶, 2005, 24 (2): 99 - 103
- [5] 程业勋. 环境中氡及其子体的危害与控制 [J]. 现代地质, 2008, 22 (5): 857 - 868
- [6] 邓文辉, 李先杰, 周炬, 等. 铀矿井采场氡子体 α 潜能浓度设计限制的确定 [J]. 铀矿冶, 2009, 28 (3): 142 - 145
- [7] 周星火. 铀矿井氡渗流机理与控氡技术 [J]. 铀矿冶, 2004, 23 (2): 97 - 100
- [8] 刘菁华, 王祝文, 田钢, 等. 均匀覆盖层中氡迁移的数值模拟 [J]. 地球物理学报, 2007, 50 (3): 921 - 925
- [9] 张雄杰, 张叶, 张俊奎, 等. 氡迁移二维数值模拟可视化系统的设计 [J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28 (3): 576 - 579
- [10] Cecile Ferry, Patrick Richon, Alain Beneito, et al. Radon exhalation from uranium mill tailings: experimental validation of a 1 - D model [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 54: 99 - 108
- [11] Rogers V C, Nielson K K. Multiphase radon generation and transport in porous materials [J]. Health Physics, 1991, 60 (6): 807 - 815
- [12] 张智慧. 空气中氡及其子体的测量方法 [M]. 北京: 原子能出版社, 1994