

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2022.03.002

低频振动下铀尾砂氡析出机理研究

张桂锋¹, 赵勇^{1,2}

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 100000)

摘要:为探究铀尾砂氡析出内在机理,以铀尾砂为研究对象,针对振动频率、振幅、试验温度、试样含水率四个因素,采用控制变量法,以开环的形式进行振动氡析出试验。结果表明:振动作用加剧了铀尾砂氡析出。振动频率加快,铀尾砂愈发疏松、颗粒裂隙增多,加剧氡析出;振幅小于 A 时,振动作用导致铀尾砂堆松散程度增加,利于氡原子从颗粒间隙中逸出;振幅大于 A 小于 $5A$ 时,振动导致铀尾砂颗粒反复摩擦,愈发光滑,促使颗粒间愈发密实,填堵了原有的气流通道,氡析出减弱;振动下温度升高,铀尾砂颗粒内外形成孔隙压、浓度差,氡热运动加剧,致使氡析出加剧;含水率小于15%时,孔隙水增强氡射气成为主导,捕获更多的氡原子,随着含水率增大,氡析出加剧;含水率大于15%时,孔隙水阻碍氡扩散成为主导,抑制氡析出,随着含水率增大,氡析出减弱。

关键词:氡析出;铀尾砂;振动作用;含水率

中图分类号:X753;X591 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2022)03-0008-08

Study on the Mechanism of Radon Exhalation from Uranium Tailings Under Low Frequency Vibration

ZHANG Guifeng¹, ZHAO Yong^{1,2}

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Department of Nuclear Safety, China Institute of Atomic Energy, Beijing 100000, China)

Abstract: In order to explore the internal mechanism of radon exhalation from uranium tailings, the uranium tailings are taken as the research object, and the vibrational radon exhalation test is carried out in an open-loop form by using the controlled variable method ac-

收稿日期:2021-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(11705086);湖南省自然科学基金项目(2018JJ3424);湖南省教育厅科学研究项目基金项目(16C1387)

作者简介:张桂锋(1995—),男,硕士研究生,主要从事放射性核素在环境介质中的迁移方面的研究。E-mail:15285506820@163.com。*通信作者:赵勇(1984—),男,讲师,博士,主要从事放射性核素在环境介质中的迁移等方面的研究。E-mail:zy6863368@163.com

ording to the four factors of vibration frequency, amplitude, test temperature, and sample moisture content. The results show that: vibration intensifies the exhalation of radon from uranium tailings. The vibration frequency is accelerated, the uranium tailings become looser, the adsorbed radon is desorbed, and the particle cracks increase, which intensifies the radon exhalation; When the amplitude is less than A , the vibration will lead to an increase in the loosening of the uranium tailings pile, which is conducive to the escape of radon atoms from the particle gap; When the amplitude is greater than A and less than $5A$, the vibration causes the uranium tailings particles to rub repeatedly and become smoother, making the particles more dense, filling the original airflow channel, and weakening the radon exhalation; When the temperature rises under vibration, the pore pressure and concentration difference are formed inside and outside the uranium tailings particles, which weaken the physical adsorption capacity of radon, reduce the solubility of radon in pore water, increase the thermal movement of radon, and increase the exhalation of radon; When the humidity is less than 15%, the pore water enhances the radon emission to become the dominant, capturing more radon atoms. As the humidity increase, the exhalation of radon increase; When the humidity is greater than 15%, the pore water hinders the diffusion of radon and becomes the dominant one, which inhibits the precipitation of radon. As the humidity increases, the radon exhalation decreases.

key words: radon exhalation; uranium tailings; vibration; humidity

0 引言

我国核工业发展产生的大量铀尾砂具有极高的镭含量^[1-2],赋存的²²⁶Ra衰变能产生大量的氡原子^[3],长期吸入氡及其子体容易诱发肺癌^[4-5]。铀尾矿库是铀尾砂集中处理的地方,在长达千年的时间内,铀尾矿库将受到各种人类活动,甚至突发极端地震所引起的低频振动^[6-7]。铀尾砂又是氡析出的源头,因此,研究铀尾砂在振动作用下,氡的内在析出机理,对改进控氡措施极具意义。

目前,众多国内外学者对控氡方法的研究,多集中在覆盖材料的种类及其参数等方面。H. A. A. Ghany 等^[8]、叶维荣等^[9]研究了不同覆盖材料,对铀尾矿库氡析出的影响;谭凯旋等^[10]基于分形理论,研究了覆盖材料的粒度分布分形特征,对尾矿库氡析出的影响;徐卫东等^[11]开展了覆盖材料压实度对铀尾矿库氡析出的影响;黄建兵、周芙蓉等^[12-13]对降氡效果最好的覆土厚度进行了研究;谢腾飞等^[14]开展了铀尾矿库滩面覆盖材料中,黏土压实度和含水率参数变化对降氡效果的影响研究。前人的控氡研究,大多是建立在未受扰动的工程背景下,通过改变覆盖材料及其参数展开的。关于在振动作用下,铀尾砂对氡析出影

响的研究并不多。虽然 Z. Cai 等^[15]研究了低频振动对类铀矿岩氡析出规律的影响,李向阳等^[16]研究了在 TVU 耦合作用下砂岩型类铀矿岩的氡析出规律,但是都集中于研究块状类铀矿岩的氡析出规律,与铀尾砂小颗粒散体大量堆积的情形相比,在析出途径上有很大区别。袁劲帆等^[17]开展了振动作用下,铀尾矿库覆盖层滩面氡析出规律的研究,但是并未对氡析出的内在机理进行分析。

由此可知,目前针对铀尾砂在振动作用下,氡析出的研究并不多。因此,本文以铀尾砂为研究对象,在分析频率、振幅、温度和含水率对氡析出规律的影响的基础上,研究氡析出的内在机理,为控氡方法的优化提供一定的理论依据。

1 振动试验及数据处理方法

1.1 试验方案

试验采用控制变量法,即分别以频率、振幅、含水率、温度四个影响因素为变量。振动试验均持续 300 min。试验中,令输出功率为 1.5 W 之时的振幅为 A ,通过功率放大器成倍数地调节输出电流,以达到振幅成倍的增大(见表 1)。

1.2 试验装置

试验装置由激振系统、析出系统、检测系统 3 部分组成,如图 1 所示。

表 1 试验方案

Table 1 Experiment scheme

方案	频率/Hz	振幅 A	试验温度/°C	含水率/%	方案	频率/Hz	振幅 A	试验温度/°C	含水率/%
方案一	0	0	30	5	方案三	10	5	30	5
	10	5	30	5		10	5	35	5
	20	5	30	5		10	5	40	5
	30	5	30	5		10	5	45	5
方案二	10	1	30	5	10	5	50	5	
	10	2	30	5	方案四	10	5	30	5
	10	3	30	5		10	5	30	10
	10	4	30	5		10	5	30	15
	10	5	30	5		10	5	30	20
10	5	30	5	10		5	30	25	

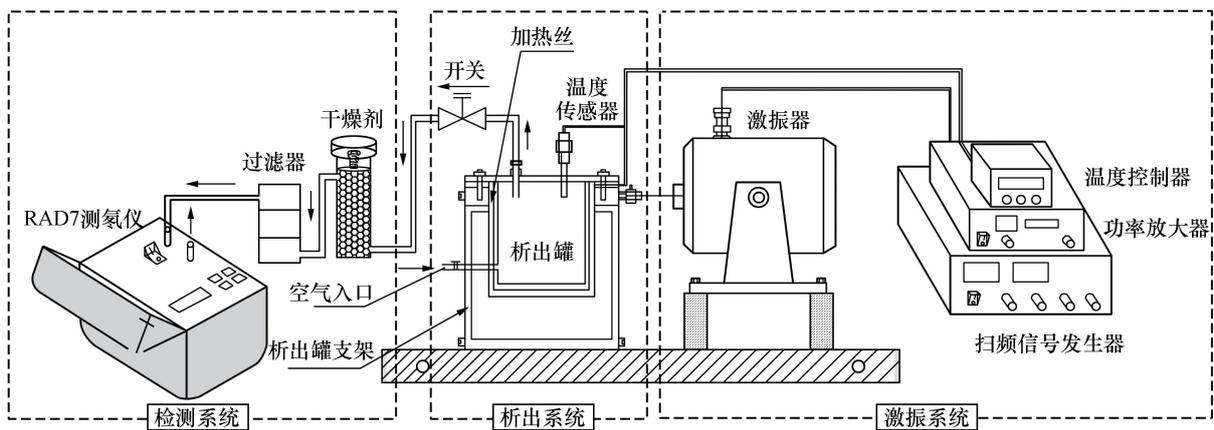


图 1 振动氡析出测试装置

Fig.1 Vibration radon release test device

激振系统:主要包括温度控制器、HY5872A 型功率放大器、YE1311 型扫频信号发生器、JZQ-20 型电动式激振器。其中,电动式激振器和析出罐通过螺杆相连,由激振器带动螺杆对析出罐及其支架施加激振力。

析出系统:主要由析出罐、包裹于析出罐四周的加热丝和用于固定析出罐的支架组成。析出罐是内部尺寸为 $\Phi 130 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$ 、材质为 304 不锈钢的圆柱形密封容器。顶盖为橡胶圈密封法兰盖,法兰盖上装有温度传感器与温度控制器相连,用于监控加热温度。析出罐通过支架与底座相连。

检测系统:析出罐通过密封的橡胶导气管经过管道开关、干燥剂、过滤器与 RAD-7 测氡仪相连。气体从进气孔进入,流经析出罐内腔经管道到达 RAD-7 测氡仪,然后排向大气。

1.3 试验过程

筛选粒径为 0.15 mm 到 0.55 mm 的铀尾砂,

充分混合均匀后,按照单一变量的原则制备 400 g 的试样若干。400 g 试样装入析出罐的初始堆积深度为 2.5 cm。

为了还原真实的自然环境对铀尾砂中氡迁移的影响,采用开环的形式进行氡测量,过程如下:

- 1) 装入试样并拧紧密封盖,依次打开进气阀和管道开关,并将试样加热至试验温度。
- 2) 温度稳定后,打开 RAD-7 测氡仪,净化 15 min,以便排出测试系统残留氡气并将湿度降至 10% 以下。
- 3) 调节功率放大器和扫频信号发生器,设定试验所需的频率和振幅。
- 4) 将 RAD-7 测氡仪设置为“sniff”模式,用来跟踪析出罐内快速变化的氡浓度。振动开启的同时,RAD-7 测氡仪开始测氡浓度。每次测量时间为 20 min,测量循环次数为 15 次,总共 300 min。
- 5) 分析不同变量下,析出的累积氡浓度值,

计算氡析出率。

1.4 数据处理

铀尾砂表面氡析出率用下式计算^[18-19]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{JS}{V} + \frac{G_v C_0}{V} - \frac{G_v C}{V} - \lambda C - R_c C \quad (1)$$

式中: C 为铀尾砂的表面氡浓度, Bq/m^3 ; C_0 为析出罐中的初始氡浓度, Bq/m^3 ; t 为振动试验时间, s ; J 为铀尾砂表面氡析出率, $Bq/(m^2 \cdot s)$; S 为试样析出面积, m^2 ; V 为析出罐净空间体积, m^3 ; G_v 为析出罐内的通风流量, $0.0167 L/s$; λ 为氡衰变常数, $2.1 \times 10^{-6} s^{-1}$; R_c 为氡的抗扩散率和泄漏率之和, s^{-1} 。

将式(1)移项变换得:

$$\frac{dC}{dt} + \left(\frac{G_v}{V} + \lambda + R_c\right)C = \frac{JS + G_v C_0}{V} \quad (2)$$

求解微分方程有:

$$C = e^{-\int(\frac{G_v}{V} + \lambda + R_c) dt} \left\{ \int \frac{JS + G_v C_0}{V} e^{\int(\frac{G_v}{V} + \lambda + R_c) dt} dt + M \right\} \quad (3)$$

其中 M 为积分常数。对式(3)进行积分有,

$$C = e^{-\left(\frac{G_v}{V} + \lambda + R_c\right)t} \left\{ \frac{JS + G_v C_0}{G_v + \lambda V + R_c V} e^{\left(\frac{G_v}{V} + \lambda + R_c\right)t} + M \right\} \quad (4)$$

由式(1)可知,边界条件: $t=0$ 时 $C=C_0$, 所以积分常数 M 解得:

$$M = C_0 - \frac{JS + G_v C_0}{G_v + \lambda V + R_c V} \quad (5)$$

由于试验以开环的方式测定氡析出率,氡的抗扩散率和泄漏率之和 R_c 可认为是 $0 s^{-1}$, 故铀尾砂的表面氡浓度可表示为:

$$C = \frac{V}{\lambda V + G_v} \left\{ \frac{JS}{V} + \frac{G_v C_0}{V} + \left(\lambda C_0 - \frac{JS}{V}\right) e^{-t\left(\lambda + \frac{G_v}{V}\right)} \right\} \quad (6)$$

令 $\frac{G_v}{V} = \lambda_v$, λ_v 为析出罐通风流量强度。其中,

$S/V=1/h$, 故式(6)可简化为:

$$C = \frac{1}{\lambda + \lambda_v} \left\{ \frac{J}{h} + \lambda_v C_0 + \left(\lambda C_0 - \frac{J}{h}\right) e^{-t(\lambda + \lambda_v)} \right\} \quad (7)$$

经 RAD-7 测定,实验室大气中的氡浓度值相较于试验时样品的表面氡浓度值非常小,且析出罐直接又与大气相连,所以可认为 $C_0=0 Bq/m^3$ 。因此,铀尾砂表面氡析出率可表示为:

$$J = \frac{hC(\lambda + \lambda_v)}{1 - e^{-t(\lambda + \lambda_v)}} \quad (8)$$

2 振动结果与分析

2.1 振动频率对氡析出的影响

图 2 可知,振动作用明显加剧了铀尾砂的氡析出,随着振动时间的增加,累积氡浓度均近似线性增长。而且,频率越快累积氡浓度越大,10 Hz、20 Hz、30 Hz 的累积氡浓度与静置时的 $368.9 Bq/m^3$ 相比增大了约 $524.3 Bq/m^3$ 、 $831.05 Bq/m^3$ 、 $1161.6 Bq/m^3$ 。

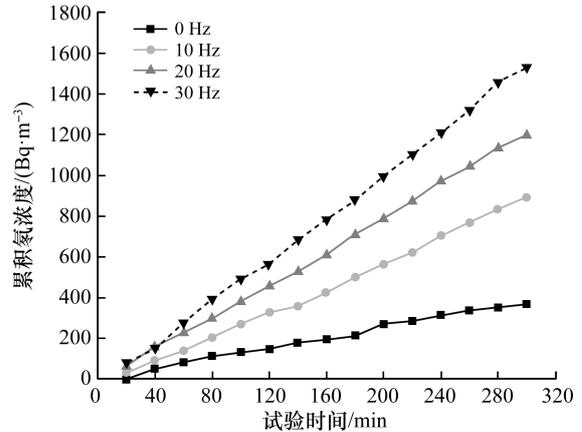


图 2 不同频率作用下的累积氡浓度

Fig. 2 Cumulative radon concentration under different frequencies

通过式(8)计算不同频率作用下 15 个测量循环内的瞬时氡析出率,将瞬时氡析出率进行平均处理,得到如图 3 所示结果。由图 3 可知,振动作用增大了铀尾砂的平均氡析出率。随着频率的加快,平均氡析出率近似线性增长,振动频率为 30 Hz 时的平均氡析出率达到 $0.9984 Bq/(m^2 \cdot s)$, 约为静置时 $0.2546 Bq/(m^2 \cdot s)$ 的 3.9 倍。

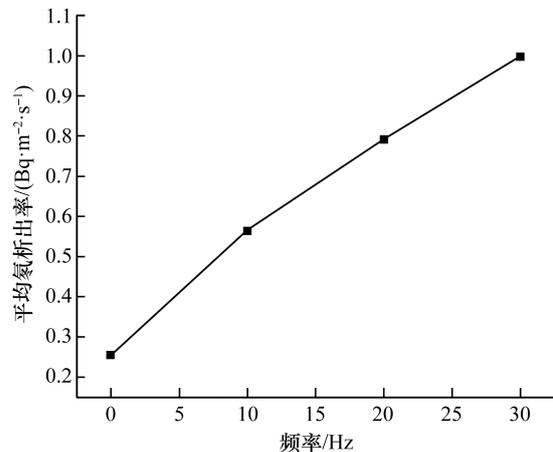


图 3 不同频率作用下的平均氡析出率

Fig. 3 Average radon extraction rate under different frequencies

铀尾砂颗粒在振动过程中,小颗粒铀尾砂下沉,大颗粒上移,使原本密实的铀尾砂愈发疏松,且频率越快效果越明显^[20]。此外,频率越快,铀尾砂颗粒获得的动能就越大,颗粒间及颗粒与析出罐内壁的摩擦、碰撞越剧烈,导致颗粒内部孔隙、裂纹增多,氦在晶格中的反冲路程得到了缩短,降低了成为自由氦所必需的反冲能量。同时,氦动能的增大,反冲能力得到增强,加剧氦析出。

2.2 振幅对氦析出的影响

图4可知,随着振动时间的增加,累积氦浓度均近似线性增长。振动作用加剧了铀尾砂的氦析出,但振幅大于A后,增大振幅却能相对抑制氦的析出。

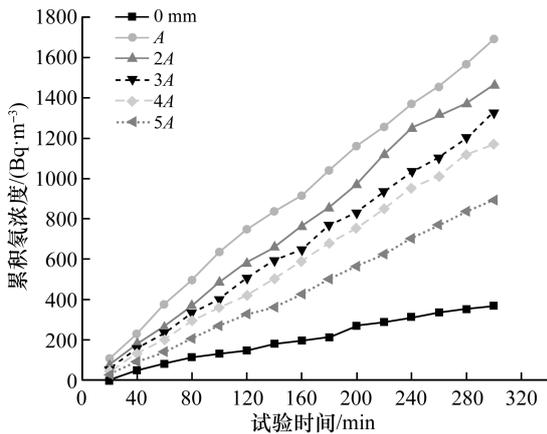


图4 不同振幅作用下的累积氦浓度

Fig. 4 Cumulative radon concentration under different amplitudes

通过式(8)计算不同振幅作用下15个测量循环内的瞬时氦析出率,将瞬时氦析出率进行平均处理,得到如图5所示结果。从图5中可知,振动作用增大了铀尾砂的平均氦析出率;振幅小于A时,增大振幅平均氦析出率增大;振幅大于A小于5A时,振幅增大平均氦析出率近似线性减小。当振幅为A和5A时对应的平均氦析出率分别为1.1627 Bq/(m²·s)和0.5645 Bq/(m²·s),相对于静置情况下的平均氦析出率约增大了3.6倍和1.2倍。

当振幅小于A时,振动作用导致铀尾砂堆松散程度增加,振幅增大,有利于氦原子从颗粒间隙中逸出。但是,当振幅大于A时,振动中铀尾砂颗粒间的相对运动随振幅的增大而加剧,反复的摩擦致使铀尾砂颗粒越来越光滑,进而促使颗粒间越来越密实,堵塞了原有的一些气流通道,阻碍氦的逸出。

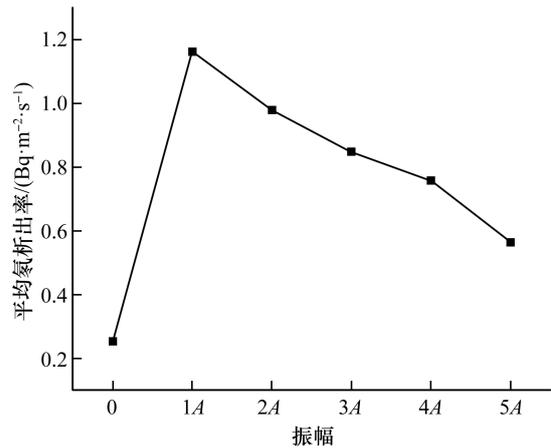


图5 不同振幅作用下的平均氦析出率

Fig. 5 Average radon extraction rate under different amplitudes

2.3 振动下温度对氦析出的影响

图6可知,随着振动时间的增加,累积氦浓度均近似线性增长。振动作用下,温度为35℃、40℃、45℃、50℃时,相对30℃(10 Hz)而言,累积氦析出量增大了约5.1%、20.3%、35.7%、44.9%,相对30℃(0 Hz)约增大了1.5倍、1.9倍、2.3倍、2.5倍。由此可知,振动作用下,温度升高,累积氦浓度不断增大。而且,温度和振动共同作用于铀尾砂时,累积氦浓度增大得更多,说明二者的共同作用加剧了铀尾砂的氦析出。

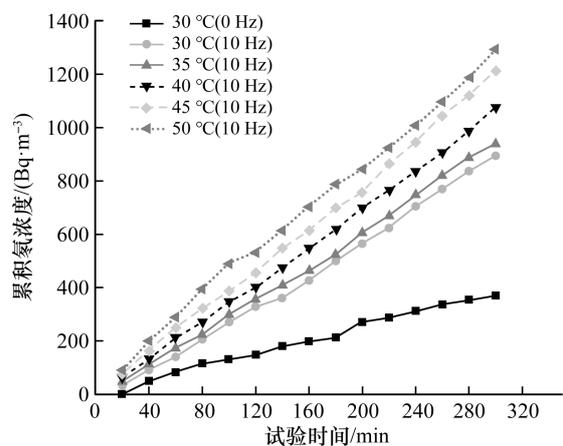


图6 振动作用下不同试验温度时的累积氦浓度

Fig. 6 Cumulative radon concentration at different test temperatures under vibration

通过式(8)计算振动作用下不同试验温度时15个测量循环内的瞬时氦析出率,将瞬时氦析出率进行平均处理,得到如图7所示结果。由图7可知,振动作用下,铀尾砂平均氦析出率,随着温

度的升高近似线性增长,与张忠相等^[21]、董魁等^[22]的研究结果类似。温度为 50 ℃ 时平均氡析出率达到最大,为 0.875 2 Bq/(m²·s),约为 30 ℃ (10 Hz) 的 1.6 倍、静置时的 3.4 倍。

振动作用,促使铀尾砂产生更多的次生孔隙和裂纹,孔隙率变大,氡原子扩散的路径增多,对氡原子的扩散阻碍作用减弱,扩散系数增大,加剧氡析出。此外,温度升高,将增强氡在铀尾砂中的扩散能力,微孔、裂隙中的气体在振动的同时受热膨胀、分子热运动加剧,导致氡局部的瞬间积聚,与颗粒外部形成一定的孔隙压、浓度差,增强氡在微孔、裂隙中的扩散迁移能力。此外,温度升高,导致氡在孔隙中的溶解度降低,氡的析出能力增强^[23],所以,振动下温度升高,平均氡析出率近似线性增大。

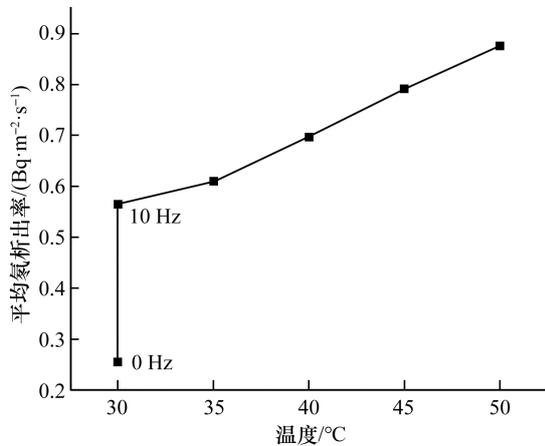


图 7 振动作用下不同温度时的平均氡析出率

Fig. 7 The average radon extraction rate at different test temperatures under vibration

2.4 振动下含水率对氡析出的影响

图 8 可知,随着振动时间的增加,累积氡浓度均近似线性增长。振动作用下,含水率的增大,累积氡浓度先增大后减小,15% 时最大。相较于含水率为 5% (0 Hz),振动和湿度共同作用于铀尾砂时累积氡浓度增大得更多,说明二者共同作用加剧了铀尾砂的氡析出。

通过式(8)计算振动作用下不同含水率时 15 个测量循环内的瞬时氡析出率,将瞬时氡析出率进行平均处理,得到如图 9 所示结果。从图 9 中可知,振动作用下,含水率增大,铀尾砂平均氡析出率先增大后减小,与叶勇军等^[24]、F. Fournier 等^[25]、A. Sakoda 等^[26]的研究结果类似。含水率为 15% 时,平均氡析出率最大,为 1.200 3 Bq/(m²·s),约

是 5% (10 Hz) 的 2.2 倍,是静置时的 4.7 倍。

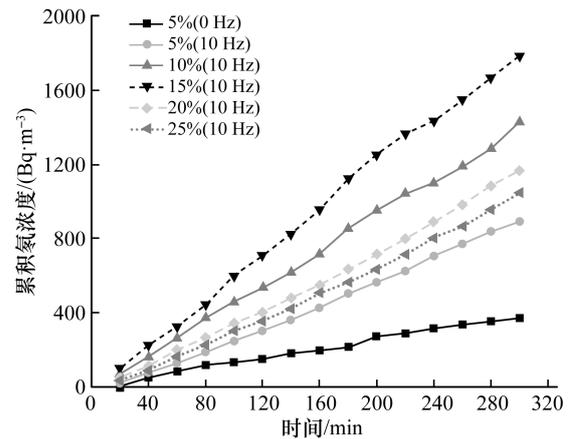


图 8 振动作用下不同含水率时的累积氡浓度

Fig. 8 Cumulative radon concentration under vibration with different water content

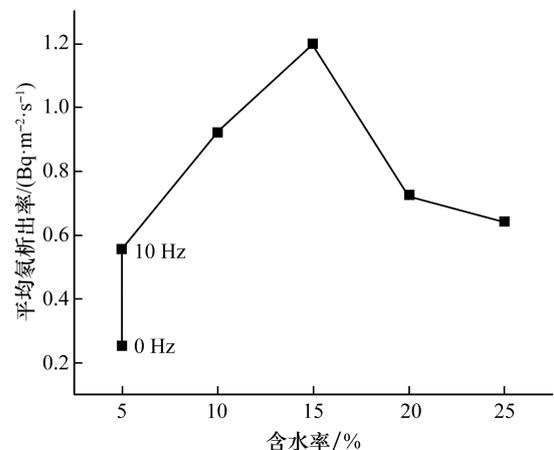


图 9 振动作用下不同含水率时的平均氡析出率

Fig. 9 Average radon exhalation rate at different water content under vibration

温度升高,氡在铀尾砂颗粒上的物理吸附减少^[26],增强了氡的射气能力,并使氡的热运动加剧,增大氡的反冲能量。部分氡原子从铀尾砂颗粒的晶格反冲到微孔、裂隙中时仍有剩余能量,氡原子会继续向着相邻晶格运动,导致氡原子镶嵌进入邻近的晶格中成为束缚氡。但是,当含水率小于 15% 时,孔隙水将耗掉氡原子巨大的动能,将氡原子滞留在微孔、裂隙中成为自由氡,孔隙水增强氡的射气能力成为主导。与此同时,振动作用增大微孔隙、裂纹,缩短氡在晶格中反冲路程的同时,为氡原子在微孔裂隙水中的反冲提供了更大的缓冲区,获得更多的自由氡,加剧氡析出。含水率越大,平均氡析出越大。但是,含水率大于

15%时,孔隙水阻碍氡扩散成为主导,阻碍氡逸出。含水率增大时,平均氡析出率减小。

3 结 论

1) 频率加快,铀尾砂颗粒间愈发疏松,颗粒裂隙增多缩短氡反冲路程,导致氡析出加剧,平均氡析出率近似线性增长。

2) 振幅小于 A 时,振动作用导致铀尾砂堆松散程度增加,有利于氡原子从颗粒间隙中逸出;振幅大于 A 时,振幅增大,铀尾砂颗粒在振动中反复摩擦变得愈发光滑,颗粒间愈发密实,填堵原有气流通道,氡析出减弱,平均氡析出率近似线性减小。

3) 振动下温度升高,铀尾砂颗粒内外形成孔隙压、浓度差,氡的热运动加剧,导致平均氡析出率近似线性增长。

4) 振动下含水率增大,平均氡析出率先增大后减小,15%时的平均氡析出率最大。这是因为含水率小于15%时,孔隙水增强氡射气成为主导,捕获了更多的自由氡,加剧氡析出;含水率大于15%时,孔隙水阻碍氡扩散成为主导,减弱氡析出。

参考文献:

[1] XIE D, WANG H Q, KEARFOTT K J, et al. Radon dispersion modeling and dose assessment for uranium mine ventilation shaft exhausts under neutral atmospheric stability[J]. *Journal of environmental radioactivity*, 2014, 129:57-62.

[2] BARILLON R, ÖZGÜMÜS A, CHAMBAUDET A. Direct recoil radon emanation from crystalline phases. Influence of moisture content[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2005, 69(11):2735-2744.

[3] BARILLON R, ÖZGÜMÜS A, CHAMBAUDET A. Direct recoil radon emanation from crystalline phases. Influence of moisture content[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2005, 69(11):2735-2744.

[4] ELÍO J, CROWLEY Q, SCANLON R, et al. Estimation of residential radon exposure and definition of radon priority areas based on expected lung cancer incidence[J]. *Environment international*, 2018, 114(1):69-76.

[5] YOON J Y, LEE J, JOO S W, et al. Indoor radon exposure and lung cancer: A review of ecological studies[J]. *Annals of occupational and environmental medicine*, 2016, 28(1):15.

[6] 蔡梓麒, 李向阳, 雷波, 等. 低频振动对高温类铀矿岩氡析出规律的影响研究[J]. *工业安全与环保*, 2018, 44(4):22-26.

[7] 刘晓璐. 低频动荷下铀尾矿库滩面裂隙与氡析出特征的试验研究[D]. 衡阳:南华大学, 2021:2-3.

[8] GHANY H A A, ELAASSY I E, IBRAHIM E M, et al. White sand potentially suppresses radon emission from uranium tailings[J]. *Radiation physics and chemistry*, 2018, 144:100-105.

[9] 叶维荣, 黄强. 用黄土覆盖废石堆降低氡析出率的研究[J]. *工业安全与防尘*, 1991, 17(10):9-10.

[10] 谭凯旋, 胡寒桥, 刘泽华, 等. 不同覆盖物抑制铀尾矿氡析出的效果[J]. *矿物学报*, 2012, 32(2):233-237.

[11] 徐卫东, 徐啸川, 尧丽丽. 尾矿库覆土效果参数确定[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(6):128-129.

[12] 黄建兵. 某铀矿山废石场及尾砂库氡污染调查[J]. *环境监测管理与技术*, 2001, 13(2):27-30.

[13] 周芙蓉, 杨寿南, 黄星宇, 等. 覆土对渣堆氡析出率与伽玛辐射的影响试验[J]. *四川地质学报*, 2015, 35(4):614-617.

[14] 谢腾飞, 李君利, 王玲. 铀尾矿库覆盖降氡黏土参数优化[J]. *辐射防护*, 2013, 33(4):243-248.

[15] CAI Z, LI X, LEI B, et al. Laboratory experimental laws for the radon exhalation of similar uranium samples with low-frequency vibrations[J]. *Sustainability*, 2018, 10(8):2937-2950.

[16] 李向阳, 朱海, 袁劲帆, 等. TVU 耦合作用对砂岩型铀矿岩氡析出影响的试验研究[J]. *铀矿冶*, 2019, 38(2):140-145.

[17] 袁劲帆, 李向阳, 洪昌寿, 等. 单向低频振动对铀尾矿库滩面氡析出影响的实验研究[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(1):9-15.

[18] CAI Z, ZHANG Q, LI X, et al. Research on radon exhalation characteristics of uranium tailings with cover materials under the coupling load of low-frequency vibration and seepage gradient[J]. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 2021, 327(1):359-371.

[19] YE Y J, DAI X T, DING D X, et al. Modeling and experimental examination of water level effects on radon exhalation from fragmented uranium ore[J]. *Journal of environmental radioactivity*, 2016, 165:219-226.

[20] 王永才, 冯玮, 侯彦珍. 低频振动作用下土壤中氡浓度变化的初步实验研究[J]. *华北地震科学*, 1986, 4(4):17-22.

[21] 张忠相, 李向阳, 邓文辉, 等. 温度对多孔射气介质氡析出影响试验研究[J]. *工业安全与环保*, 2016, 42(6):30-32.

[22] 董魁, 邬剑明, 吴玉国. 煤升温过程中氡析出率与温度之间关系的试验研究[J]. *科技情报开发与经济*, 2009, 19(17):151-152.

(下转第46页)

- [8] 郭春红,陶忠,张品乐. ABAQUS 显式算法的准静态加速分析方法研究[J]. 低温建筑技术,2015,37(8):73-75.
- [9] KAITILA O. Web crippling of thin-walled cold formed steel cassettes[J]. Journal of constructional steel research,2017,63(6):766-778.
- [10] BAROUTAJI A, GILCHRIST M D, OLABI A G, et al. Quasi-static, impact and energy absorption of internally nested tubes subjected to lateral loading [J]. Thin-walled structures,2016,98:337-350.
- [11] FAN Z, SHEN J, LU G, et al. Dynamic lateral crushing of empty and sandwich tubes [J]. International journal of impact engineering,2013,53:3-16.
- [12] NATARIO P, SILVESTRE N, CAMOTIM D. Computational modelling of flange crushing in cold-formed steel sections [J]. Thin-walled structures,2014,84:393-405.
- [13] YOU Z P, LIU Y. Three-dimensional discrete element simulation of asphalt concrete subjected to haversine loading [J]. Road materials and pavement design,2010,11(2):273-90.
- [14] SONG S H, PAULINO G H, BUTTLAR W G. Simulation of crack propagation in asphalt concrete using an intrinsic cohesive zone model [J]. Journal of engineering mechanics,2006,132(11):1215-1223.
- [15] CHANG L, KAIJIAN N. Simulation of asphalt concrete cracking using cohesive zone model [J]. Construction and building materials,2013,38:1097-106.
- [16] YIN A Y, YANG X H, GAO H, et al. Tensile fracture simulation of random heterogeneous asphalt concrete with cohesive crack model [J]. Engineering fracture mechanics,2012,92:40-55.
- [17] DONG Z, GONG X, ZHAO L, et al. Mesostructural damage simulation of asphalt concrete using microscopic interface contact models [J]. Construction and building materials,2014,53:665-73.
-
- (上接第14页)
- [23] 陈翔,徐文平,李广悦,等. 氡的溶解与析出的试验研究[J]. 核技术,2010,33(6):473-476.
- [24] 叶勇军,丁德馨,罗润,等. 体积含水率对铀尾矿氡析出率影响的试验研究[J]. 安全与环境学报,2012,12(3):124-126.
- [25] FOURNIER F, GROETZ J E, JACOB F, et al. Simulation of radon transport through building materials: Influence of the water content on radon exhalation rate [J]. Transport in porous media,2005,59(2):197-214.
- [26] SAKODA A, ISHIMORI Y, YAMAOKA K. A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash [J]. Applied radiation and isotopes,2011,69(10):1422-1435.