

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.01.001

圆管状多孔射气介质氡析出规律的理论研究

黄俊尧,叶勇军*,吴文浩

(南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:基于在多孔射气介质中氡的渗流-扩散迁移理论,建立了圆管状多孔射气介质氡的迁移数学模型,并获得了稳态条件下氡浓度分布的解析解和氡析出率的计算公式。通过研究,获得以下结论:1)圆管管壁内靠近圆管内外表面的氡浓度和氡浓度梯度随着扩散系数的增大而减小;2)圆管内外表面的氡析出率随扩散系数的增大而增大,并逐渐趋于最大值;整个圆管的氡析出份额随扩散系数的增大而增大并逐渐趋于1;3)圆管管壁内的氡浓度峰值的大小随着圆管内外表面压差值的增大而减小;其中氡浓度峰值最大时压差为20 Pa;氡浓度峰值最小时压差为60 Pa;4)当圆管内外表面存在压差时,高压侧的圆管表面的氡析出率随着压力梯度的增大而减小,并逐渐趋于0;低压侧的圆管表面的氡析出率随着压力梯度的增大而增大,并逐渐趋于最大值;整个圆管的氡析出份额随着压差值的增大而增大,并逐渐趋于1。

关键词:多孔射气介质;数学模型;压力;扩散系数;氡析出率

中图分类号:TL75 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2020)01-0001-08

Theoretical Study on Radon Exhalation in Circular Tubular Porous Media

HUANG Junyao, YE Yongjun*, WU Wenhao

(School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China,
Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Based on the theory of seepage and diffusion migration of radon in porous media, the mathematical model of radon migration in tubular porous media was established, and the analytical solution of radon concentration distribution and the calculation formula of radon exhalation rate under steady state were obtained. Through the study, the following conclusions are obtained: 1) The radon concentration and radon concentration gradient near the inner and outer surface of the tube wall decrease with the increase of diffusion co-

收稿日期:2019-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(11575080)

作者简介:黄俊尧(1994-),男,硕士研究生,主要从事铀矿冶安全理论与技术方面的研究。E-mail:1226327992@qq.com。*通信作者:叶勇军(1979-),男,教授,博士,主要从事铀矿冶安全理论与技术方面的研究。E-mail:yongjunye@163.com

efficient. 2) The radon exhalation rate on the inner and outer surface of the tube increases with the increase of diffusion coefficient, and gradually tends to the maximum value; The radon exhalation share of the whole tube increases with the increase of diffusion coefficient and tends to one. 3) The peak value of radon concentration in the tube wall decreases with the increase of the pressure difference between the inner and outer surfaces of the tube; The maximum radon concentration peak at pressure difference was 20 Pa; The minimum radon concentration peak at pressure difference was 60 Pa. 4) When there is a pressure difference between the inner and outer surfaces of the circular tube, the radon exhalation rate of the surface of the circular tube on the high-pressure side decreases with the increase of the pressure gradient, and gradually tends to zero; the radon exhalation rate of the surface of the circular tube at the low-pressure side is increased with the increase of the pressure gradient, and the maximum value is gradually increased; The radon exhalation share of the whole circular tube increases with the increase of the pressure difference, and gradually tends to one.

key words: porous emanation media; mathematical model; pressure; diffusion coefficient; radon exhalation rate

0 引言

放射性气体氡(^{222}Rn)及其子体是人类所受天然辐射照射最主要的贡献者,其生物效应可诱发肺癌,其已经被世界卫生组织列为 19 种致癌物质之一^[1-5],半个世纪以来,氡及其子体的研究一直是辐射防护领域研究的热点。

氡在多孔射气介质中的运移主要还是以渗流迁移和扩散迁移为主^[6-7]。基于氡扩散迁移与渗流迁移理论模型,得到了土壤中氡浓度分布的表达式,建立了相应的模型及原理分析过程,为后继多孔介质氡模型的发展及应用奠定了基础^[8-10]。但是这些研究大多数是以板状射气介质为模型研究氡渗流与扩散迁移理论^[11]。然而,自然界中还存在着许多非板状模型的射气介质,如隧道、地下防空洞、矿山的巷道支护及矿山的天井等,该类型射气介质可以认为是类似圆管状模型的射气介质。当研究圆管状多孔射气介质时,以板状射气介质为模型的氡渗流与扩散迁移理论就不适用了。而对于厚度极大的圆管状多孔射气介质的氡迁移研究是有涉及的^[12-13],但当介质表面存在压差非常大时,这种应用于厚度极大的圆管状多孔射气介质的氡迁移的理论可能将不适用。

因此,急需弥补圆管状模型中的氡渗流与扩散迁移理论的不足,建立了能同时适用厚度有限及厚度极大的圆管状多孔射气介质的氡迁移数学模型。同时,也为复杂的环境中氡的迁移和析出

规律的研究提供理论依据。

1 氡迁移的数学模型

1.1 圆管状多孔射气介质氡的渗流-扩散迁移数学模型

按图 1 选取计算坐标。假定圆管内外表面存在稳定的压力差,在不考虑气体的可压缩性时,该圆管内的空气渗流速度为^[14]:

$$v = \frac{k(P - P_0)}{ur(\ln r_2 - \ln r_1)} \quad (1)$$

式中: k —多孔射气介质的渗透率, m^2 ; u —空气的黏滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; r_1 —圆管内半径, m ; r_2 —圆管外半径, m ; P —圆管外表面的大气压力, Pa ; P_0 —圆管内表面的大气压力, Pa 。

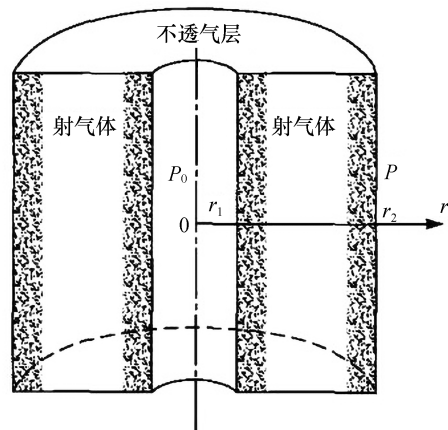


图 1 圆管渗流计算坐标

Fig. 1 Calculation coordinates of pipe seepage

圆管管壁内的压力梯度(单位:Pa/m),公
式为:

$$\text{grad } P = \frac{\Delta P}{r(\ln r_2 - \ln r_1)} = \frac{P - P_0}{r(\ln r_2 - \ln r_1)} \quad (2)$$

其圆管内氢渗流-扩散迁移微分方程为^[15-16]:

$$D\left(\frac{d^2 C}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dC}{dr}\right) - \frac{v}{\eta} \frac{dC}{dr} - \lambda C + \alpha = 0 \quad (3)$$

边界条件为 $r=r_1$ 处 $C=C_1$; $r=r_2$ 处, $C=C_2$ 。

式中: C —多孔射气介质的氢浓度, Bq/m^3 ; v —空气渗流速度, m/s ; D —氢在多孔射气介质中的扩散系数, m^2/s ; λ —氢的衰变常数, $\lambda = 2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; C_1 —圆管内表面的氢浓度, Bq/m^3 ; C_2 —圆管外表面的氢浓度, Bq/m^3 ; α —介质中单位时

间产生可移动的氢, $\text{Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

微分方程(3)的解为^[15-16]:

$$C = \frac{\alpha}{\lambda} + r^n \left(AI_{-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r \right) + BI_n \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r \right) \right) \quad (4)$$

式中: I_n —第一类 n 阶虚宗量 Bessel 函数; A, B —积分常数; n —不为整数。

$$n = \frac{k\Delta p}{\eta u (\ln r_2 - \ln r_1)} \frac{1}{2D} \quad (5)$$

其中:

$$A = \left(C_1 - \frac{\alpha}{\lambda} \right) \frac{1}{r_1^n I_{-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1 \right)} - \frac{BI_n \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1 \right)}{I_{-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1 \right)} \quad (6)$$

$$B = \frac{\left[C_2 r_1^n I_{-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1 \right) - C_1 r_2^n I_{-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_2 \right) + \frac{\alpha}{\lambda} \left[r_2^n I_{-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_2 \right) - r_1^n I_{-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1 \right) \right] \right]}{r_1^n r_2^n \left[I_{-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1 \right) I_n \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_2 \right) - I_n \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1 \right) I_{-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_2 \right) \right]} \quad (7)$$

圆管内表面的氢析出率为^[17]:

$$J_1 = D \frac{dC}{dr} \Big|_{r=r_1} - \frac{v}{\eta} C_1 = D \left(2nr_1^{n-1} BI_n \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1 \right) + \sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1^n \cdot \left(BI_{n+1} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1 \right) + AI_{1-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_1 \right) \right) \right) - \frac{v}{\eta} C_1 \quad (8)$$

圆管外表面的氢析出率为^[17]:

$$J_2 = -D \frac{dC}{dr} \Big|_{r=r_2} + \frac{v}{\eta} C_2 = -D \left(2nr_2^{n-1} BI_n \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_2 \right) + \sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_2^n \cdot \left(BI_{n+1} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_2 \right) + AI_{1-n} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r_2 \right) \right) \right) + \frac{v}{\eta} C_2 \quad (9)$$

1.2 圆管状多孔射气介质氢的扩散迁移模型

在不考虑渗流对氢迁移影响时,圆管状多孔射气介质氢扩散迁移微分方程为^[18-19]:

$$D\left(\frac{d^2 C}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dC}{dr}\right) - \lambda C + \alpha = 0 \quad (10)$$

微分方程(10)的解为^[18-19]:

$$C = \frac{\alpha}{\lambda} + AI_0 \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r \right) + BK_0 \left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r \right) \quad (11)$$

式中: I_0 —第一类零阶虚宗量 Bessel 函数; K_0 —第二类零阶虚宗量 Bessel 函数; A, B —积分常数。

其中^[20]:

$$A = \left(C_1 - \frac{\alpha}{\lambda} \right) \frac{1}{I_0 \left(r_1 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right)} - B \frac{K_0 \left(r_1 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right)}{I_0 \left(r_1 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right)} \quad (12)$$

$$B = \frac{\left[C_2 I_0 \left(r_1 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right) - C_1 I_0 \left(r_2 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right) + \frac{\alpha}{\lambda} \left[I_0 \left(r_2 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right) - I_0 \left(r_1 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right) \right] \right]}{\left[K_0 \left(r_2 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right) I_0 \left(r_1 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right) - K_0 \left(r_1 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right) I_0 \left(r_2 \sqrt{\frac{\lambda}{D}} \right) \right]} \quad (13)$$

当 $C_1 = C_2 = 0$ 时^[21]:

$$A = -\frac{\alpha}{\lambda} \left\{ \frac{1}{I_0\left(r_1\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right)} + \frac{\left[1 - \frac{I_0\left(r_2\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right)}{I_0\left(r_1\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right)}\right]}{\left[I_0\left(r_2\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) - I_0\left(r_1\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) \frac{K_0\left(r_2\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right)}{K_0\left(r_1\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right)}\right]} \right\} = -A_0 \frac{\alpha}{\lambda} \quad (14)$$

$$B = \frac{\alpha}{\lambda} \frac{I_0\left(r_1\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) - I_0\left(r_2\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right)}{\left[I_0\left(r_2\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) K_0\left(r_1\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) - K_0\left(r_2\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) I_0\left(r_1\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right)\right]} = B_0 \frac{\alpha}{\lambda} \quad (15)$$

由公式(14)和公式(15)代入公式(11),解算得到浓度分布方程为:

$$C = \frac{\alpha}{\lambda} \left[1 - A_0 I_0\left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r\right) + B_0 K_0\left(\sqrt{\frac{\lambda}{D}} r\right) \right] \quad (16)$$

圆管内表面的氡析出率为:

$$J_1 = D \frac{dC}{dr} \Big|_{r=r_1} = \alpha \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \left[A_0 I_1\left(r_1\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) + B_0 K_1\left(r_1\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) \right] \quad (17)$$

式中: I_1 —第一类一阶虚宗量 Bessel 函数; K_1 —第二类一阶虚宗量 Bessel 函数; A_0, B_0 —积分常数。

圆管外表面的氡析出率为:

$$J_2 = -D \frac{dC}{dr} \Big|_{r=r_2} = -\alpha \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \left[A_0 I_1\left(r_2\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) + B_0 K_1\left(r_2\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) \right] \quad (18)$$

2 分析和讨论

2.1 纯扩散作用下圆管状多孔射气介质氡的迁移规律

2.1.1 氡浓度分布

为进行模拟计算不同扩散系数条件下圆管状多孔射气介质内氡浓度变化。对相关参数假设如下:圆管内半径 $r_1 = 1$ m,圆管外半径 $r_2 = 1.5$ m,圆管管壁厚度 $d = 0.5$ m,圆管内外表面的氡浓度 $C_1 = C_2 = 0$,圆管状多孔射气介质可移动氡产生率 $\alpha = 30$ Bq/(m² · s)。

利用公式(16)计算氡的扩散系数 D 分别为 2.1×10^{-6} 、 2.1×10^{-7} 、 2.1×10^{-8} 、 2.1×10^{-10} m²/s 时圆管状多孔射气介质内氡浓度随氡扩散系数得变化,如图 2 所示。

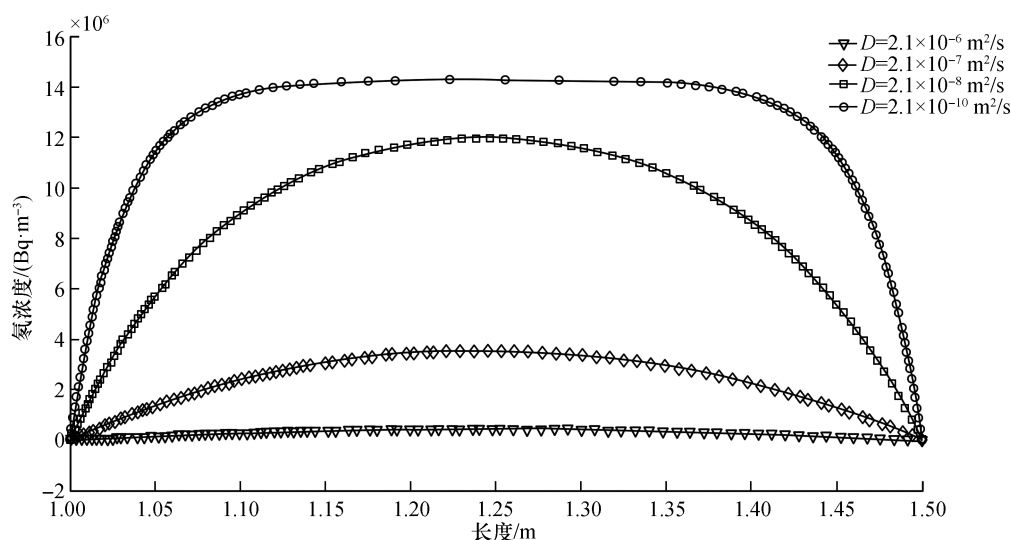


图 2 不同扩散系数条件下圆管壁内氡浓度分布

Fig. 2 Distribution of radon concentration in circular tube wall under different diffusion coefficients

由图2可知,对于一定厚度的圆管状多孔射气介质,圆管管壁内靠近圆管内外表面的氡浓度和氡浓度梯度都随着扩散系数的增大而减小。

2.1.2 扩散系数对氡析出的影响

为进行模拟计算不同扩散系数条件下圆管内外表面氡析出率的变化。对相关参数假设如下:圆管内半径 $r_1=1$ m,圆管外半径 $r_2=1.5$ m,圆管管壁厚度 $d=0.5$ m,圆管长度 $h=1$ m,圆管内外表面的氡浓度 $C_1=C_2=0$,圆管状多孔射气介质可

移动氡产生率 $\alpha=30$ Bq/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)。

利用公式(17)和公式(18)分别计算不同扩散系数下圆管状多孔射气介质内外表面的氡析出率和氡析出份额的大小如表1所示。图3是根据表1的数据绘制的圆管状射气体内外表面氡析出率及整个圆管的氡析出份额与扩散系数的关系曲线;其中氡析出份额计算公式为:

$$\frac{J}{V\alpha} = \frac{2\pi h(r_1 J_1 + r_2 J_2)}{\pi h(r_2^2 - r_1^2)\alpha} \quad (19)$$

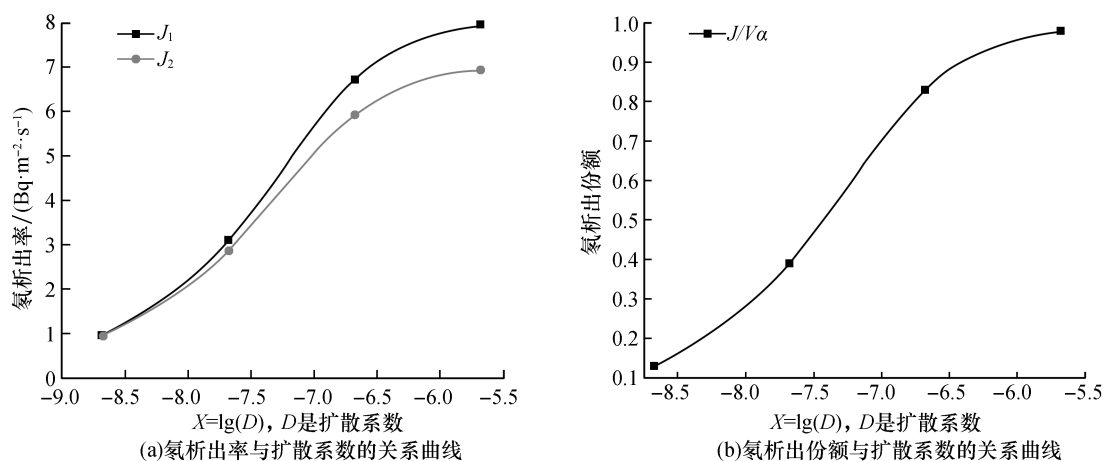


图3 氡析出与扩散系数的关系曲线($d=0.5$ m)

Fig.3 Relationship between radon exhalation and diffusion coefficient ($d=0.5$ m)

表1 扩散系数对氡析出影响

Table 1 Effect of diffusion coefficient on radon exhalation

$D/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2.1×10^{-9}	2.1×10^{-8}	2.1×10^{-7}	2.1×10^{-6}
$J_1/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	0.96	3.10	6.72	7.95
$J_2/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	0.94	2.87	5.93	6.94
$J/V\alpha$	0.13	0.39	0.83	0.98

从由表1及图3(a)(b)可知:1)对于一定厚度的圆管状多孔射气介质,圆管内外表面的氡析出率随扩散系数的增大而增大并逐渐趋于最大值;2)圆管内表面的氡析出率大于圆管外表面氡析出率;3)整个圆管的氡析出份额随扩散系数的增大而增大并逐渐趋于1。

2.2 渗流-扩散作用下圆管状多孔射气介质氡的迁移规律

2.2.1 氡浓度分布

为进行模拟计算不同压差条件下的圆管状射气介质内氡浓度变化。对相关参数假设如下:圆管内半径 $r_1=1$ m,圆管外半径 $r_2=1.5$ m,圆管管壁厚度 $d=0.5$ m,圆管内外表面的氡浓度 $C_1 =$

$C_2=0$,多孔介质孔隙率 $\eta=10\%$,圆管状多孔射气介质可移动氡产生率 $\alpha=30$ Bq/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)。氡的扩散系数为 $D=2.1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

利用公式(4)绘制压差 ΔP 分别为 20 Pa、40 Pa、60 Pa、-20 Pa、-40 Pa、-60 Pa 时圆管状多孔射气介质内氡浓度分布曲线,如图4所示,规定:由圆管内表面指向外表面为压力的正方向。

由图4可知,对于一定厚度的圆管状多孔射气介质,圆管管壁内氡浓度峰值的位置和大小受压力的方向和压差的大小影响,当 $\Delta P < 0$ 时,压差值越大,圆管管壁内的氡浓度峰值越偏向圆管外表面,且氡浓度峰值越小;当 $\Delta P > 0$ 时,压差值越大,圆管管壁内的氡浓度峰值越偏向圆管内表面,

且氡浓度峰值越小。

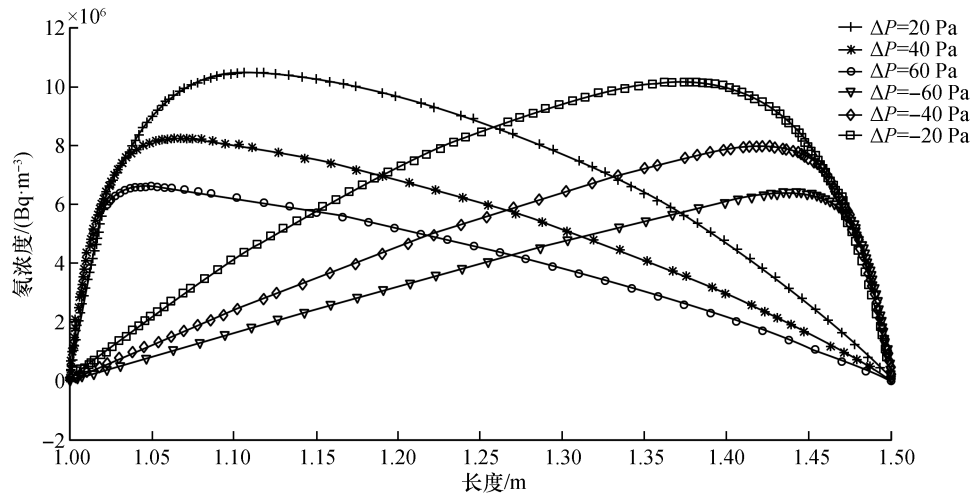


图4 不同压差条件下圆管壁内氡浓度分布

Fig. 4 Distribution of radon concentration in circular tube wall under different pressure differences

2.2.2 压力对氡析出的影响

为进行模拟计算不同的压力梯度条件下圆管内外表面氡析出率的变化。对相关参数假设如下:圆管内半径 $r_1 = 1$ m, 圆管外半径 $r_2 = 1.5$ m, 圆管厚度 $d = 0.5$ m, 圆管长度 $h = 1$ m, 圆管内外表面的氡浓度 $C_1 = C_2 = 0$, 圆管状多孔射气介质可移动氡产生率 $\alpha = 30$ Bq/(m²·s), 多孔介质孔隙率 $\eta = 10\%$, 空气的粘滞系数 $\mu = 1.8 \times 10^{-5}$ Pa·s, 氡

在多孔射气介质中的扩散系数 $D = 2.1 \times 10^{-8}$ m²/s, 多孔射气介质的渗透率 $k = 2 \times 10^{-14}$ m²。

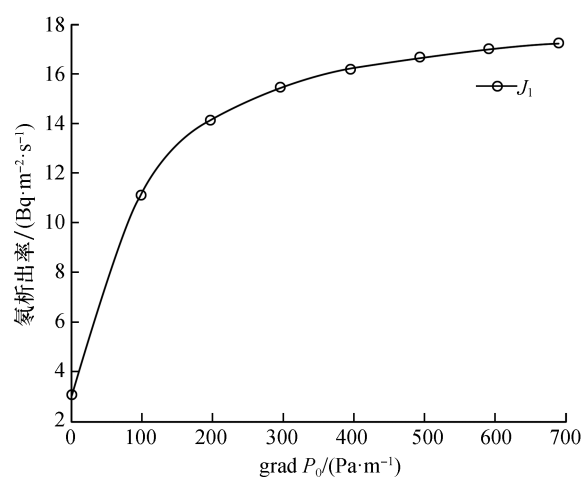
利用公式(8)和公式(9)分别计算压差 ΔP 分别为 0 Pa、40 Pa、80 Pa、120 Pa、160 Pa、200 Pa、240 Pa、280 Pa 时, 圆管状多孔射气介质内外表面的氡析出率和氡析出份额随压力差的变化数据如表 2 所示, 内表面为 $\text{grad } P_0$, 外表面为 $\text{grad } P_1$, 相关图形如图 5、图 6 所示。

表2 压力对氡析出的影响

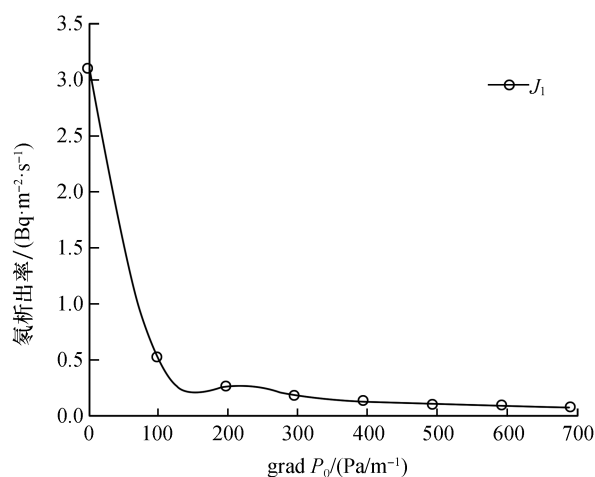
Table 2 The effect of pressure on radon precipitation								(Bq · m ⁻² · s ⁻¹)	
$\Delta P/\text{Pa}$	0.00	40.00	80.00	120.00	160.00	200.00	240.00	280.00	
grad $P_0/(\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	0.00	98.70	197.30	296.00	394.60	493.30	591.90	690.50	
grad $P_1/(\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	0.00	65.80	131.50	197.30	263.10	328.80	394.60	460.40	
$P_0 < P$	J_1	3.10	11.11	14.12	15.45	16.19	16.66	16.98	17.22
	J_2	2.87	0.71	0.38	0.26	0.19	0.15	0.13	0.11
	$J/V\alpha$	0.39	0.65	0.78	0.84	0.88	0.90	0.92	0.93
$P_0 > P$	J_1	3.10	0.52	0.26	0.18	0.13	0.10	0.09	0.07
	J_2	2.87	7.77	9.61	10.44	10.90	11.19	11.39	11.54
	$J/V\alpha$	0.39	0.65	0.78	0.84	0.88	0.90	0.92	0.93

从图 5(a)(b)及图 6(a)(b)可知:1)当圆管内表面压力大于圆管外表面压力时,圆管外表面的氡析出率随着压力梯度的增大而增大,并逐渐趋于最大值;圆管内表面的氡析出率随着压力梯度的增大而减小,并逐渐趋于 0;2)当圆管内表面压力小于圆管外表面压力时,圆管外表面的氡析出率随着压力梯度的增大而减小,并逐渐趋于 0;

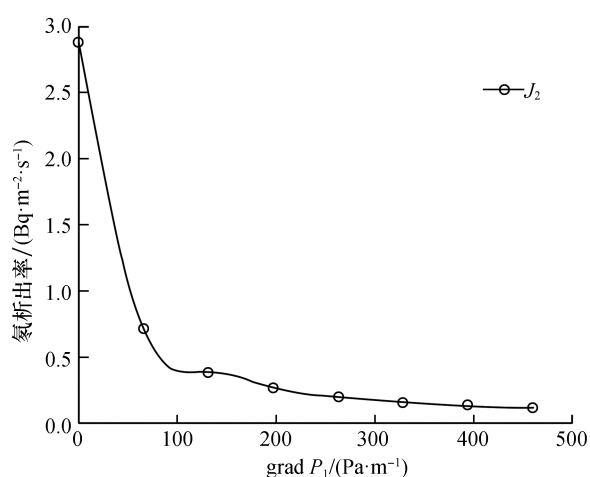
圆管内表面的氡析出率随着压力梯度的增大而增大并逐渐趋于最大值。从图 5(c)及图 6(c)可知,不管是圆管内表面压力大于圆管外表面压力,还是圆管内表面压力小于圆管外表面压力,整个圆管的氡析出份额随着圆管内外表面的压差值的增大而增大,并逐渐趋于 1。



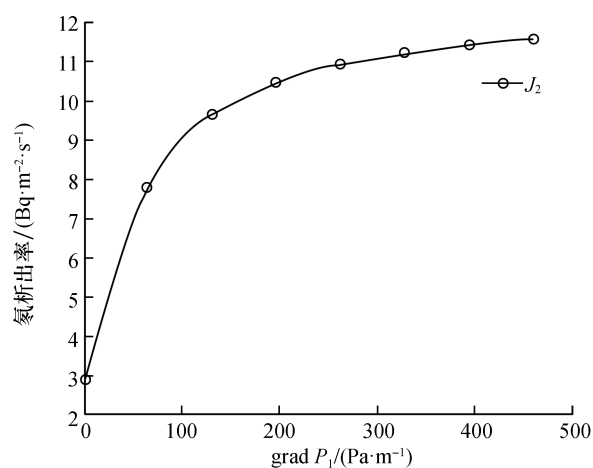
(a)内表面氡析出率与压力梯度关系曲线



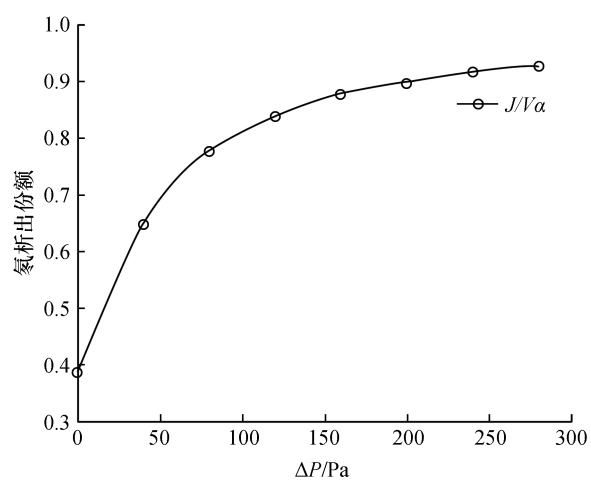
(a)内表面氡析出率与压力梯度关系曲线



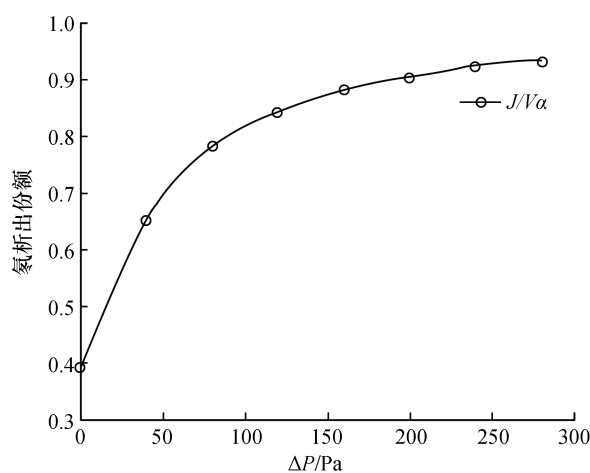
(b)外表面氡析出率与压力梯度关系曲线



(b)外表面氡析出率与压力梯度关系曲线



(c)氡析出份额与压差关系曲线



(c)氡析出份额与压差关系曲线

图5 氡析出与压力关系曲线 ($P_0 < P$)Fig.5 Relationship curve between radon exhalation and pressure ($P_0 < P$)图6 氡析出与压力关系曲线 ($P_0 > P$)Fig.6 Relationship curve between radon exhalation and pressure ($P_0 > P$)

3 结 论

基于在多孔射气介质中氡的渗流-扩散迁移理论,以我地下环境中存在的圆管状多孔射气介质为对象,建立了圆管状多孔射气介质氡的迁移数学模型,并获得了稳态条件下氡浓度分布的解析解和氡析出率的计算公式。通过研究,获得以下结论。

1)对于一定厚度的圆管状多孔射气介质,圆管管壁内靠近圆管内外表面的氡浓度和氡浓度梯度随着扩散系数的增大而减小。

2)对于一定厚度的圆管状多孔射气介质,圆管内外表面的氡析出率随扩散系数的增大而增大并逐渐趋于最大值;整个圆管的氡析出份额随扩散系数的增大而增大并逐渐趋于1。

3)对于一定厚度的圆管状多孔射气介质,圆管管壁内外表面存在着压差值的大小和压力方向影响圆管状多孔射气介质内的氡浓度峰值的位置和方向。当 $\Delta P > 0$ 时,压差值越大,圆管管壁内的氡浓度峰值越偏向圆管内表面,且氡浓度峰值越小。当 $\Delta P < 0$ 时,压差值越大,圆管管壁内的氡浓度峰值越偏向圆管外表面,且氡浓度峰值越小。

4)当圆管内表面的压力大于圆管外表面压力时,圆管外表面的氡析出率随着压力梯度的增大而增大,并逐渐达到最大值;圆管内表面的氡析出率随着压力梯度的增大而减小,并逐渐趋于0。当圆管内表面的压力小于圆管外表面压力时,圆管外表面的氡析出率随着压力梯度的增大而减小,并逐渐达到0;圆管内表面的氡析出率随着压力梯度的增大而增大,并逐渐趋于最大值。整个圆管的氡析出份额随着圆管内外表面的压差值的增大而增大,并逐渐趋于1。

参考文献:

- [1] WHO. WHO hand book on indoor radon: a public health-perspective [R]. Geneva 27, Switzerland: World Health Organization, 2009: 35-36.
- [2] 安慧茹,景钰,苏玉凤,等. 室内氡浓度的影响因素分析[J]. 科技创新与应用, 2019(30): 24-25.
- [3] FERLAY J, AUTIER P, BONIOL M, et al. Estimates of the cancer incidence and mortality in Europe in 2006 [J]. Annals of oncology, 2007, 18(3): 581-592.
- [4] 陈鹏,耿世彬,刘艳妮,等. 地下工程模拟氡室的研制[J]. 防护工程, 2019, 41(2): 62-66.
- [5] DARBY S. Radon in homes and risk of lung cancer[J]. Epidemiology, 2006, 17(6): 67-68.
- [6] 王立恒,叶勇军,丁德馨,等. 破碎射气介质内氡渗流运移和析出规律的实验研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(9): 1718-1724.
- [7] 黄仁桂,赵影,李雨泽,等. 地震氡观测计量溯源初步探究[J]. 地震, 2019, 39(2): 183-190.
- [8] 张德华,刘晓超,王汉青. 复杂管网式地下铀矿井氡浓度分布研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2019, 33(3): 15-20.
- [9] ROGERS V C, NIELSON K K. Correlations for predicting air permeabilities and ^{222}Rn diffusion coefficients of soils [J]. Health physics, 1991, 61(2): 225-230.
- [10] 叶勇军,苏杭,丁德馨,等. 地下铀矿山留矿法采场受限空间内氡迁移的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 217-223.
- [11] LEUNG J K, TSO M Y, HUNG L C. Radon mitigation by depressurization of concrete walls and slabs [J]. Health physics, 1999, 77(4): 420-426.
- [12] UNGER A, FINSTERLE S, BODVARSSON G. Transport of radon gas into a tunnel at Yucca Mountain—estimating large-scale fractured tuff hydraulic properties and implications for the operation of the ventilation system [J]. Journal of contaminant hydrology, 2003, 70(3): 153-171.
- [13] SCHERY S D, SIEGEL D. The role of channels in the transport of radon from the soil [J]. Journal of geophysical research: solid earth, 1986, 91(B12): 12366-12374.
- [14] GARRA R, SALUSTI E. Application of the nonlocal Darcy law to the propagation of nonlinear thermoelastic waves in fluid saturated porous media [J]. Physica D nonlinear phenomena, 2013, 250(5): 52-57.
- [15] ROGERS V C, NIELSON K K. Multiphase radon generation and transport in porous materials [J]. Health physics, 1991, 60(6): 807-815.
- [16] YE Y J, WU W H, HUANG C H. Theoretical study of the exhalation of radon from a circular tubular cover layer [J]. Indian journal of physics, 2019, 93(5): 667-672.
- [17] SCHERY S D, GAEDDERT D H, WILKENING M H. Transport of radon from fractured rock [J]. Journal of geophysical research: solid earth, 1982, 87(B4): 2969-2976.
- [18] SAHOO B K, SAPRA B K, GAWARE J J, et al. A model to predict radon exhalation from walls to indoor air based on the exhalation from building material samples [J]. Science of the total environment, 2011, 409(13): 2635-2641.
- [19] YE Y J, WU W H, FENG S Y, et al. Simultaneous determination of the radon diffusion coefficient and the free radon production rate from compact porous emanation media [J]. Building and environment, 2018, 144: 66-71.

- [6] 吕淑然,张媛媛,杨凯. 尾矿砂爆炸效应实验研究[J]. 爆破,2014,31(1):5-9.
- [7] JAMES M, AUBERTIN M. The use of waste rock inclusions to improve the seismic stability of tailings impoundments[C]//Oakland, California, United States. GeoCongress 2012: State of the art and practice in geotechnical engineering, 2012:4166-4175.
- [8] KAMUNDA C, MATHUTHU M, MADHUKU M. The use of waste rock inclusions to improve the seismic stability of tailings impoundments[J]. International journal of environmental research and public health, 2016, 13(1):138.
- [9] PARVIN P, DAVOUD-ABADI G R, KARIMINEZHAD H. Radon monitoring for earthquake prediction using hybrid U(V) LIDAR-Phoswich system[C]//Proceedings of the 23rd International Laser Radar Conference. Nara, Japan, 2006.
- [10] YOSHIDA H, AOKI K, SEMBA T, et al. Overview of the stability and barrier functions of the granitic geosphere at the Kamaishi Mine; relevance to radioactive waste disposal in Japan[J]. Engineering geology, 2000, 56(1/2):151-162.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 刘小松, 丘寿康. 一种较准确而快速测量氡析出率的方法[J]. 辐射防护, 2007, 27(3):156-162.
- [14] 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.
- [15] 李诗珺. 土壤样品氡析出率室内测定方法研究[D]. 北京:中国地质大学, 2015:20-26.
- [16] WANG L, SUN W, LIU R Q, et al. Flotation recovery of vanadium from low-grade stone coal[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2014, 24(4):1145-1151.
- [17] 李元松. 岩土力学[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2013:1-50.
- [18] 马玉莹, 雷廷武, 庄晓晖. 测量土壤颗粒密度的体积置换法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15):130-139.
- [19] 倪成锦. 比重瓶法测物质密度[J]. 鞍山师范学院学报, 1991(3):54-55;97.
- [20] ISHIMORI Y, LANGE K, MARTIN P, et al. Measurement and calculation of radon releases from NORM residues[R]. Vienna:IAEA, 2013.

(责任编辑:周泉)

(上接第8页)

- [20] 吴文浩. 圆管状多孔射气介质氡的迁移与析出规律研究[D]. 衡阳:南华大学, 2019:37-39.
- [21] CHAO C Y H, TUNG T C W, CHAN D W T, et al. Determination of radon emanation and back diffusion char-

acteristics of building materials in small chamber tests[J]. Building and environment, 1997, 32(4):355-362.

(责任编辑:扶文静)