

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2021.04.007

压差对含裂缝硐室氡运移影响的数值模拟研究

王汝佳^{1,2,3,4}, 谢 东^{1,2,3,4}, 王汉青^{2,3,4,5}, 窦秀敏^{1,2,3,4}, 查舒卫^{1,2,3,4}

(1. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 装配式建筑节能技术湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001;
3. 南华大学 建筑环境控制技术湖南省工程实验室, 湖南 衡阳 421001; 4. 南华大学 建筑环境气载污染物治理
与放射性防护国家地方联合工程研究中心, 湖南 衡阳 421001; 5. 中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘 要:为研究地下硐室存在裂缝下的氡运移规律,依据某人防工程的构造和物理几何尺寸,建立了适合裂缝网络渗流特性的数学模型和氡运移方程,采用计算流体力学方法,研究了不同室内外压差条件下含裂缝硐室内氡的运移规律。结果表明:分形裂缝网络的渗流模型来表征墙体裂缝的渗流特性具有可行性;随压差从 5 Pa 增至 30 Pa,压差抑制了氡从裂缝中扩散到室内的运移,裂缝处流出的氡质量流量总减少 76.5%;压差对排氡起促进作用,从排风口处流出的质量流量总增加了 186.2%。硐室在滤毒通风状况下,压差为 20 Pa 时排氡效率最高,最有利于室内氡的控制。压差的增大可等效为换气次数的增加,顶送下回的送风方式容易造成靠近送风口处氡的堆积且在室内易产生涡流。

关键词:环境工程;压差;氡运移

中图分类号:TD926.4 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2021)04-0041-08

Numerical Simulation Study on the Influence of Pressure Difference on Radon Migration in Underground Chambers with Cracks

WANG Rujia^{1,2,3,4}, XIE Dong^{1,2,3,4}, WANG Hanqing^{2,3,4,5},
DOU Xiumin^{1,2,3,4}, ZHA Shuwei^{1,2,3,4}

(1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2. Key Lab of Hunan for the Technologies of Energy Conservation in Prefabricated Buildings,
Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Engineering Lab of Hunan for Building Environment Control,
University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 4. National & Local Joint Engineering
Research Center for Airborne Pollutants Control and Radioactivity Protection in Buildings,
University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 5. College of Civil Engineering,

收稿日期:2021-01-03

基金项目:国家自然科学基金项目(U1867221)

作者简介:王汝佳(1997—),女,硕士研究生,主要从事核通风与空气净化方面的研究。E-mail:979804555@qq.com。

*通信作者:谢 东(1978—),男,教授,博士,主要从事建筑节能与建筑环境方面的研究。E-mail:
nhxiedong@126.com

Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410000, China)

Abstract: In order to study the migration law of radon in underground chamber with cracks, according to the structure and physical geometry size of a civil air defense project, mathematical model for seepage characteristics of fracture network and radon migration equation was established. CFD was adopted in this paper to make the numerical simulation of the migration law of radon in the chamber under different pressure difference conditions. The results indicate that based on the basic theory and method of porous media fractal, it is feasible to use the fractal fracture network seepage model to characterize the seepage characteristics of wall cracks. The model has been verified to be accurate and reliable. With the increase of pressure difference from 5 Pa to 30 Pa, the pressure difference inhibits the migration of radon from the cracks to the room, and the total mass flow rate of radon flowing out of the cracks was reduced by 76.5%; The pressure difference promotes the radon exhaust, the total mass flow from out of the exhaust port increased by 186.2%. When the pressure difference is 20 Pa, the mass flow reduction rate at the crack and the mass flow increase rate at the air outlet both reach the maximum. Therefore, in the chamber under the condition of poison filtering and ventilation, when the pressure difference is 20 Pa, the radon removal efficiency is the highest, which is most conducive to the control of indoor radon. The increase in pressure difference can be equivalent to an increase in the number of air changes. Under the condition of ensuring a constant pressure difference, the top-supply bottom-return mode is likely to cause the accumulation of radon near the air inlet and the two sides of the air supply port are likely to produce eddy currents indoors.

key words: environmental engineering; differential pressure; radon migration

0 引言

高浓度的氡和氡子体主要存在于洞穴和地下工程中^[1]。岩石土壤中镭衰变产生的气体氡极易通过地基和界面的裂缝孔隙扩散和渗流进入地下坑道空间,其进入速度由压力梯度、孔隙度或湿度等环境参数决定^[2-3]。全国高本底地区土壤中铀镭含量较高,在有通风的情况下地下硐室内空气中氡浓度总体水平也较高,严重危害到坑道内工作人员的健康。不平衡的机械通风可引起室内外的压差,进一步影响室内氡浓度的大小。因此,研究压差对氡在硐室的迁移规律对安全生产意义重大。

关于压差对氡运移的影响,国内外学者开展了大量的理论和实验研究。2019年,Y. Ye首次建立了圆形管状多孔射气介质中氡运移的数学模型,对管状混凝土试块两侧在不同压力梯度下的氡析出率进行了测定,低压侧的氡析出率会随压差的增加而增大,而高压侧相反^[4]。而2018年,雷云研究了不同风压差作用下多孔介质氡析出,结果显示随压差的增大相同时刻的集氡空间氡浓

度逐渐减少^[5]。2019年,B. Collignan根据现场试验提出增加室内降压会导致氡活度浓度的增加概念,表明地面气态污染物室内存在的影响因素主要是室内降压和建筑的换气率水平^[6]。各学者对压差下的氡运移做了深入研究,但这些研究大多未考虑室内存在裂缝的情况,对氡在压差作用下的运移轨迹以及变化量级未作定量研究。

由于介质内部的裂隙空间分布的无序性和复杂性,从微观层面研究其内部流体的渗流特性是十分艰难的^[7]。所以研究者通过研究多孔介质的渗流规律来探讨裂缝的渗流特性:选定一个表征单元体以表征裂缝区域的渗流特性^[8],即当研究样品的体积大于某定值后,测得的渗透率将不再改变^[9]。2015年,苗同军根据多孔介质分形几何理论和裂缝层流立方定律,建立了裂隙岩石渗透率的分形模型。他推导了裂隙岩石渗透率的解析表达式,并验证了分形模型的正确性^[7]。2020年,S. Y. Feng结合分形理论和离散裂缝网络模型,提出了一种模拟压裂介质中氡运移的新模型。该模型可以预测氡的扩散系数和析出率^[10]。所

以从宏观考虑,为简化裂缝研究本文将采用分形几何的方法研究裂缝的渗透率。

综上所述,压差和裂缝都是影响氡运移的重要因素。在实际地下硐室中,裂缝不能简单采用较大尺寸并且直接挖空进行表征,氡迁移过程还涉及三维、封闭通风空间和复杂边界条件等因素的综合影响。鉴于此,本文使用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的方法,选定了表征单元体并采用分形几何的方法表征墙体裂缝的渗流特性,模拟了不同室内外压差下地下工程存在裂缝情况的氡运移的过程。

1 数学物理模型

1.1 房间的几何模型

本研究模型是根据某人防工程进行建立。该人防工程是将地下岩石层挖空之后再建立房间,房间与岩石之间存在一个空气层隔开未直接接触,其结构如图1所示。本研究将其进行了简化,无限延伸的岩石层被简化成一个岩石面,并将多余空气层省略,该模型的简化几何配置如图2所示。该房间尺寸为:6 m×4 m×3 m,墙体厚度为0.3 m,空气层厚度为1 m。房间顶部和底部各设有一个通风口,通风口尺寸为0.4 m×0.4 m。

受到设计及施工的影响,地下室常会出现一些裂缝问题^[11]。由于建筑设计或混凝土楼板的自然收缩,地板和地下室墙体的连接处会存在裂缝,此间隙是房屋下层结构中唯一明显的开口,因此也是氡气流动的唯一通道。该高本底地区中,硐室内地面已铺设瓷砖,墙面已粉刷乳胶漆,岩石析出的氡浓度远超过室内墙体以及地面析出浓度,所以本模型中忽略墙体、地面等因素对氡浓度的影响。岩石被认为是室内氡的唯一来源。

本文中选择裂缝的面密度来表示裂缝网络的发育程度^[12],房间墙体裂缝通过有效孔隙度来进行表征,裂缝网格区域尺寸为0.3 m×0.2 m×1 m。为充分考虑参数空间对氡进入室内的影响,模型采用三维模型。

1.2 数学模型

采用基于连续性、动量和污染物运移控制方程的CFD模型对室内氡的分布进行了数值模拟。室内气流通常处于湍流区,为了更好的模拟室内空气流动产生的涡流,故选用Realizable k-ε湍流模型来模拟室内气流。数学模型基于一定的假设:1)岩石面氡析出率恒定,是各向同性且均质的;

2)新鲜空气不含任何污染物;3)室内污染物仅考虑氡;4)氡在裂缝中流动为层流。

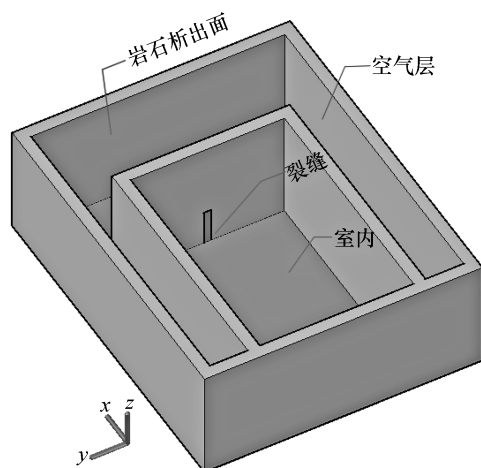


图1 人防工程的物理模型

Fig. 1 Physical model of civil air defense engineering

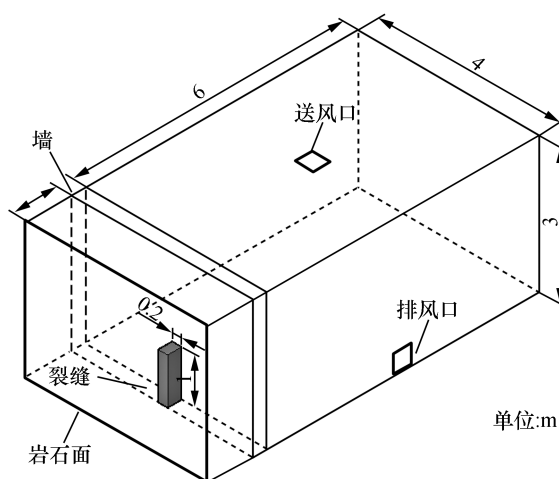


图2 硐室的尺寸简图

Fig. 2 Dimension sketch of underground chamber

对于稳定不可压缩流体,利用连续性方程和Navier-Stokes方程在室内建立了稳态流场,可以分别写成:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu_t + \mu) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g \quad (2)$$

其中, x 是 i 方向的坐标轴($i=0,1,3$); y 是 j 方向的坐标轴,是速度矢量的表示; u_i 对应于 i 方向上的平均速度,m/s; ρ 为空气密度,kg/m³; P 是压强,N/m², μ_t 是紊流粘度,N·s/m²; μ 为分子粘

度, $N \cdot s/m^2$; g 是重力加速度, m^2/s 。

根据菲克定律和达西定律,²²Rn 在硐室中通过空气的迁移可以用以下方程来描述:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_m \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - \lambda C \quad (3)$$

其中, C 是空气中氡的平均浓度, Bq/m^3 ; D_m 为氡在室内空气中的有效扩散系数, m^2/s ; λ 氡衰变常数, $2.1 \times 10^{-6} s^{-1}$ 。

Realizable- ε 模型的可实现效应是通过湍流涡粘性的常数 C_μ 实现的, 它是湍流场、平均应变和旋转速率的函数而不再是常数。该模型已经在包括边界层和分离流在内的各种流动中得到了广泛的验证^[13]。 k 与 ε 的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (5)$$

式中: $C_1 = \max(0.43, \eta/(\eta+5))$, 其中 $\eta = kS/\varepsilon$, ν 为运动粘度, 其余各常数取值为 $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$ 。随湍流粘度而定: $\nu_t = C_\mu k^2/\varepsilon$, $C_\mu = \frac{1}{4.04} + \frac{A_s k U^*}{\varepsilon}$, $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$, $\phi = (1/3) \times \arccos \sqrt{6} W$,

$W = S_{ij} S_{jk} S_{ki} / \tilde{S}^3$, $\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$, $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}}$, $\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k$, $\bar{\Omega}_{ij}$ 是在以角速度 ω_k 旋转的旋转坐标系中得到的平均旋转速率。

1.3 裂缝渗流参数方程

裂隙介质中的裂缝长度, 在满足自相似的范围, 就可类似于多孔介质中的孔隙。在 Fluent 软件中, 多孔介质模型通过在动量方程中增加动量源项来实现^[14]:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{k} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho v_m v_i \right) \quad (6)$$

式中: v_m 为速度方向的模值; k 为介质的渗透率, m^2 ; μ 为气体的动力粘度, $kg/(m \cdot s)$; C_2 为惯性阻力系数。

根据分析理论进行扩展, 牛顿流体通过裂缝网络的渗透率为^[15]:

$$K = \frac{\beta^3 D (1 - D_f)}{128 (4 - D_f)} \frac{(1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \theta)}{[1 - (\phi)^{\frac{1-D_f}{2-D_f}}]} l_{\max}^3 \quad (7)$$

气体裂缝流动惯性阻力系数 C_2 为^[16]:

$$C_2 = \phi^2 C (l_{\max}^{1-\xi})^{3/\xi} a^{2-3/\xi} \quad (8)$$

式中, α 和 θ 分别为裂缝的方位角和倾角; a 是裂缝的开度, $a = \beta l$, β 是比例系数, ξ 为粗糙指数取 0.8; C 为常数 4.4。

裂缝中分形维数与孔隙率之间的关系:

$$D_f = d_E + \frac{\ln \phi}{\ln(l_{\max}/l_{\min})} \quad (9)$$

式中, $l_{\max}$ 和 $l_{\min}$ 代表最大和最小裂缝长度, ϕ 是岩石裂缝的有效孔隙度, d_E 是欧几里德维数, 三维空间中 $d_E = 3$ 。

裂缝密度定义为^[7]:

$$D = \frac{(2 - D_f) [1 - (\phi)^{\frac{1-D_f}{2-D_f}}] \phi}{(1 - D_f) \beta l_{\max} (1 - \phi)} \quad (10)$$

综上所述, 裂缝区域设置成多孔介质, 裂缝有效孔隙度设置为 0.2, $l_{\max}$ 为 0.1 m, 裂缝倾角 θ 为 0, 比例系数 β 为 0.02。通过方程(7)与(8)可计算出裂缝区域的渗透率为 $K = 5 \times 10^{-9} m^2$ (裂隙渗透率的确定结果)与惯性阻力系数。

1.4 模型网格与边界条件

根据硐室尺寸, 采用 Workbench 软件对硐室进行结构化网格划分。结构网格体由六面体和四面体网格^[17]混合绘制而成, 减少网格单元体数, 提高网格质量并提升计算效率。对裂缝、进出风口处的网格进行了加密处理(裂隙区网格划分的方案), 本模型中网格总数为 505 104。

采用活性炭盒 γ 能谱法对不同硐室岩石表面氡析出率进行测量, 各测点表面氡析出率范围为 $1.46 \text{ mBq}/(m^2 \cdot s) \sim 2.45 \text{ mBq}/(m^2 \cdot s)$ 。取氡析出率值为 $2 \text{ mBq}/(m^2 \cdot s)$, 根据岩石暴露面积以及氡析出率, 经过氡单位换算^[18]之后, 岩石面可设置为质量流量入口, 质量流量为 $4.2 \times 10^{-18} \text{ kg/s}$, 流体及介质的物性参数见表 1^[19]。为研究压差的变化保证总压不变, 顶部风口设为压力入口, 底部风口设为压力出口。其余墙面均设为绝热静壁面。室内湿度为 30%, 门处于关闭状态。并启用了组分运输方程。

1.5 网格无关性分析

采用相同画法对计算域进行网格划分, 计算网格总数分别为 29 万、50 万、72 万下 1.5 m 高度水平面处的氡浓度。如表 2 所示, 不同网格下氡浓度差异很小, 不同网格计算结果误差在 10% 以内, 验证了网格的独立性。权衡网格精度和计算效率之后, 本研究采用 50 万网格进行数值计算。

表 1 流体及介质的物性参数
Table 1 Physical parameters of fluid and medium

物性参数	介质			
	空气	氦气	水蒸气	混凝土
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.225	9.73	0.554 2	2 100
导热率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.024 2	0.003 6	0.026	1.8
定压热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1 006.43	96.35	2 014	880
动力粘度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.79×10^{-5}	1.8×10^{-5}	1.34×10^{-5}	—
分子量/($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	28.966	222	18.015 3	—
扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	5×10^{-6}	10^{-6}	—	—

表 2 不同网格密度在 $Y=2 \text{ m}$ 处的氡浓度值
Table 2 Radon concentrations of different grid densities at $Y=2 \text{ m}$ 单位: $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$

不同网格密度	X/m									
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	4.5	5	5.5
29 万	445	443	440	454	485	169	472	407	376	385
50 万	462	460	457	461	468	182	488	419	404	410
72 万	473	469	468	477	480	187	503	420	424	432

2 模拟结果与讨论

为研究地下硐室存在裂缝条件下,不同压差对室内氡迁移的影响,将进出口之间压差设置为:5、10、15、20、25、30 Pa。同时据云图数据表 3 显示,裂缝两侧空气层与室内之间的压差为 4 Pa 左右(两侧空气的压力差为 4 Pa 左右,已删除恒定),对结果影响较小。

表 3 不同压差下裂缝两侧空气层与室内的压力
Table 3 Pressure between air layer and room under different pressure difference

空间	压差/Pa					
	5	10	15	20	25	30
空气层	1.5	3.4	4.6	7	8.5	10.3
室内	5.5	7.2	8.8	10.75	12.5	14.4
ΔP	4	3.8	4.2	3.75	4	4.1

图 3 为在裂缝渗透率 $K=5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 、室内湿度为 30% 时,不同压差情况下 $Y=2 \text{ m}$ 截面处氡浓度分布的对比图。从图 3 中可以看出,压差的改变明显改变了室内氡的浓度水平和分布。随压差从 5 Pa 增大到 30 Pa,室内总氡浓度明显减少。

压差为 5 Pa 时,送风口处空气流量较小,容易造成裂缝出口处的氡堆积,此时硐室内体平均氡浓度为 $573.75 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 。随着压差从 10 Pa 增加至 20 Pa,送风口处风量增大,室内体平均氡浓度分别为 480.43 、 466.29 、 $379.39 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 。裂缝出口近地面处氡浓度降低,图中可明显看出氡运移轨迹为漩涡状,具有向上运动的趋势(氡运移轨迹)。压差从 25 Pa 增至 30 Pa,房间内氡浓度进一步降低,只有裂缝出口处局部氡浓度高,此时体平均氡浓度分别为 $353.45 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 、 $295.83 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 。整个变化过程中室内平均氡浓度减少了 48.4%。

不管压差的高低,都可以发现氦气运移在竖直方向上的运移能力比水平方向更强。在封闭条件下,任何形式的通风都能不同程度地降低整体氡浓度,不同之处在于降氡效果不同。在靠近风口处浓度下降最明显,其余区域浓度分布均匀。

为研究压差从 5 Pa 增大到 30 Pa 时,室内氡浓度减少的具体原因,对从裂缝流向室内截面处的氡质量流量,以及排风口截面处的质量流量进行了监测,计算稳定后数据如图 4 所示。根据图 4 可以发现,随压差从 5 Pa 增大到 30 Pa,裂缝处流出的氡质量流量依次减少 10.9%、21.5%、41.7%、22.4%、25.7%,裂缝处流出的氡质量流量总减少 76.5%(数量级正确);而从排风口处流

出的质量流量依次增加了 38.6%、20.2%、56.1%、5.7%、4.1%，流出的质量流量总增加了

186.2%。在压差为 20 Pa 时,裂缝处质量流量减少率与排风口处质量流量增加率均达到最大值。

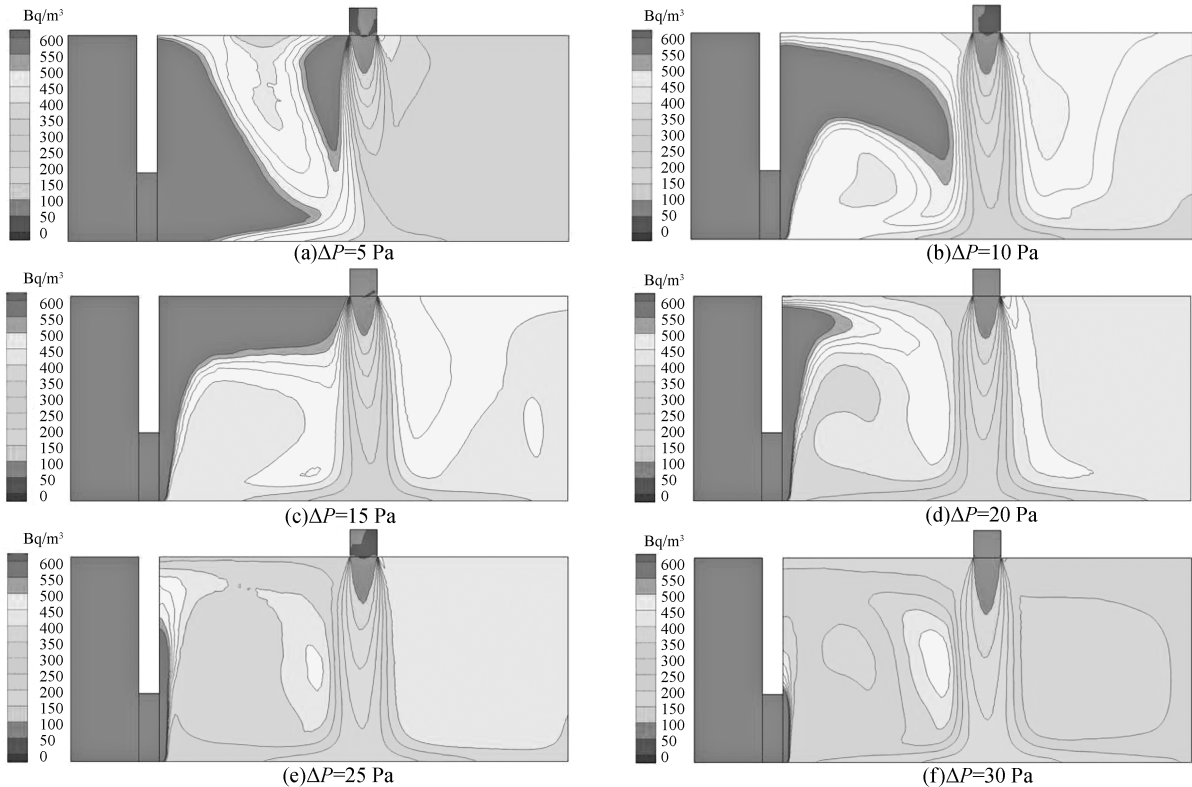


图 3 不同压差下 $Y=2$ m 截面处氡浓度对比图

Fig. 3 Comparison of radon concentration for different pressure differences on the surface of $Y=2$ m

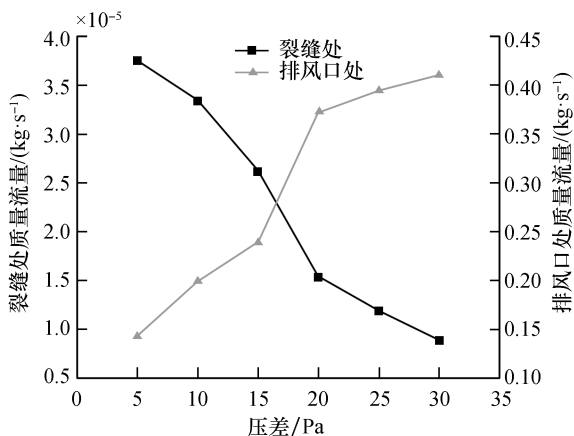


图 4 不同压差下裂缝与排风口处氡的质量流量

Fig. 4 Mass flow of radon at cracks and outlets under different pressure differences

再观察 $X=3$ m 截面处氡浓度对比图 5, 可以发现室内中氡气的流向是沿压力梯度即从高压区向低压区流动。由于压差恒定, 在压差为 5 Pa 时送排风口风量均较小, 易造成出口处氡排出量小而产生氡堆积。而随压差增大, 氡气在整个房间

内的流动增强。从 10 Pa 开始, 在送风口的左侧, 低压处的排风口开始有利于氡气的排出; 送风口的右侧, 因涡流易造成靠近送风口处区域氡气的聚集, 与 5 Pa 时情况相反。

3 试验对照

通过房间送风量将模拟压差换算为室内换气次数如表 4 所示, 换气次数符合《人民防空地下室设计规范》GB50038—2005 中的要求。

为验证模拟结果的准确性, 进行了试验测量验证。采用连续测氡仪 RAD7 对分别在通风状态下(指机械通风)和未通风状态下(关停风机、但洞口开着, 硐室内没有窗户)硐室内靠近裂缝处区域的测点进行氡浓度测量。通过测点多次测量取平均值来减少统计误差, 测量结果见表 5。

由表 5 可知, 实测值在 5 Pa 压差下与模拟值的误差最大为 12%, 氡浓度变化量级与本文模拟得出的结论相差不大, 说明模拟具有一定的准确性。本文采用了分形裂缝网络的渗流模型来表征

墙体裂缝的渗流特性,实验证明该模型用于表征裂缝具有可行性。由于本硐室使用情况特殊,不能完全归属于常规的地下建筑。在非常时期的应用上可规划于长期居住的室内,根据最新标准《民用建筑工程室内环境污染控制标准》

GB50325—2020 中 I 类与 II 类建筑氡浓度限值均为 150 Bq/m^3 ,本案例中氡浓度远远超过这个限制,本研究为存在裂缝的地下硐室考虑压差控氡的方式,提供了氡运移规律。

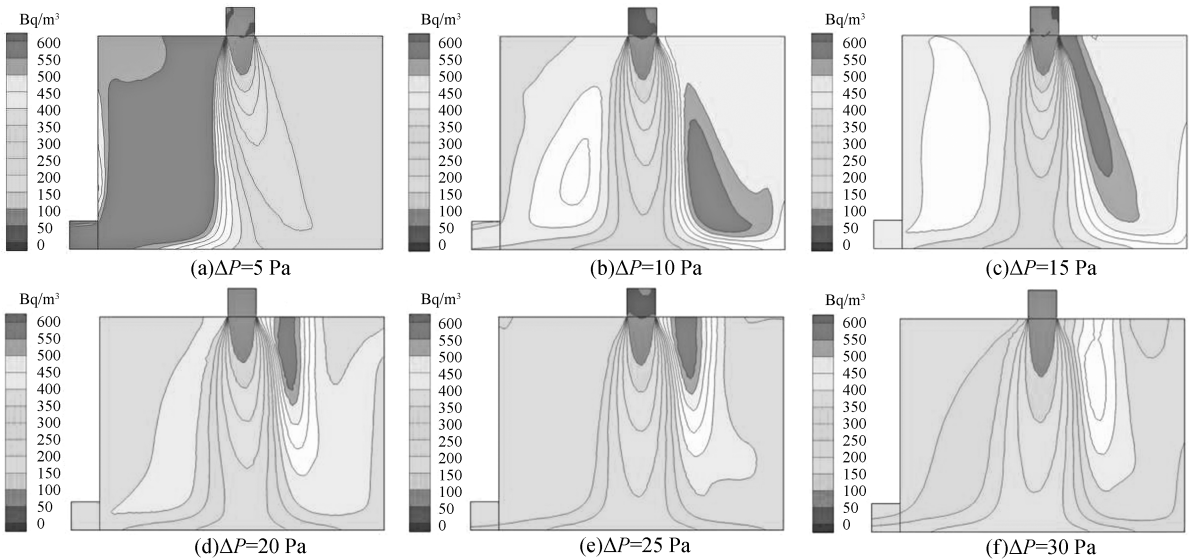


图 5 不同压差下 $X=3\text{ m}$ 截面处氡浓度对比图

Fig. 5 Comparison of radon concentration for different pressure differences on the surface of $X=3\text{ m}$

表 4 不同压差下的房间送风量与等效换气次数

Table 4 Room air supply and equivalent air changes under different pressure differences

参数	压差/Pa					
	5	10	15	20	25	30
房间送风量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	466.7	682.7	836.6	977.8	1 093.6	1 199.4
换气次数/ h^{-1}	6.5	9.5	11.6	13.6	15.2	16.7

表 5 硐室通风与未通风下氡浓度实测数据

Table 5 Measured radon concentration in the ventilated and unventilated Chambers

参数	房间号	设计风量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	实际风量/ $(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$	氡浓度/ $(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$	
				通风	未通风
实验值	西 024	432	537	504 ± 33	758 ± 62
	西 008	432	468	555 ± 32	724 ± 57
	南 018	432	463	532 ± 28	765 ± 35
模拟值	—	—	466.7	573.75	787.47

4 结 论

根据某人防工程结构建立了地下存在裂缝的硐室模型,利用数值模拟方法探讨了不同室内外压差下氡的运移规律,得到以下结论。

1) 基于多孔介质分形基本理论与方法,本文研究了适合墙体裂缝网络渗流特性的数学模型,采用分形裂缝网络的渗流模型来表征墙体裂缝的渗流特性。该模型已被验证是准确的,具有可靠性^[15]。本文证明用于研究氡气在裂缝中扩散具

有可行性。

2) 压差的改变明显改变了室内氡的浓度水平和分布。在裂缝渗透率 $K=2\times 10^{-8} \text{ m}^2$, 室内湿度为 30% 情况下, 随着压差从 5 Pa 增大到 30 Pa, 压差抑制了氡从裂缝中扩散到室内的运移, 裂缝处流出的氡质量流量依次减少 10.9%、21.5%、41.7%、22.4%、25.7%, 裂缝处流出的氡质量流量总减少 76.5%; 压差对排氡起促进作用, 从排风口处流出的质量流量依次增加了 38.6%、20.2%、56.1%、5.7%、4.1%, 从排风口处流出的质量流量总增加了 186.2%。裂缝处氡气流向是从高压区向低压区流动, 整个变化过程中室内平均氡浓度减少了 48.4%。

3) 当压差为 20 Pa 时, 裂缝处质量流量减少率与排风口处质量流量增加率均达到最大值。所以硐室在滤毒通风状况下, 压差为 20 Pa 时排氡效率最高, 最有利于室内氡的控制(是最佳排氡率)。

4) 将本模拟中压差通过房间送风量换算为室内换气次数, 压差的增大实际上为换气次数的增加。在保证压差恒定的情况下, 顶送下回的送风方式容易造成靠近送风口处氡的堆积且送风口两侧在室内易产生涡流。压差对存在裂缝的地下硐室的降氡具有指导意义。

参考文献:

- [1] 张哲, 朱民安, 张永祥. 地下工程与人居环境氡防护技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2010: 7-12.
- [2] CHUNG L K, MATA L A, CARMONA M A, et al. Radon kinetics in a natural indoor radon chamber[J]. The science of the total environment, 2020, 734(6): 139167.
- [3] BALTRĖNAS P, GRUBLIAUSKAS R, DANILA V. Seasonal variation of indoor radon concentration levels in different premises of a university building[J]. Sustainability, 2020, 12(15): 6174.
- [4] YE Y, WU W, HUANG C, et al. Experimental study of the effect of seepage on radon exhalation in circular tubular porous emanation media[J]. Indoor and built environment, 2019, 29(5): 701-710.
- [5] 雷云. 压差作用下含水多孔射气介质氡析出规律的试验研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2018: 42.
- [6] COLLIGNAN B, POWAGA E. Impact of ventilation systems and energy savings in a building on the mechanisms governing the indoor Radon activity concentration[J]. Journal of environmental radioactivity, 2019, 196: 268-273.
- [7] 苗同军. 裂缝型多孔介质渗流特性的分形分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 28-29.
- [8] 侯贵廷. 裂缝的分形分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 1994, 2(4): 299-305.
- [9] 周志芳. 裂隙介质水动力学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 47-61.
- [10] FENG S Y, WANG H Q, CUI Y, et al. Fractal discrete fracture network model for the analysis of radon migration in fractured media[J]. Computers and geotechnics, 2020, 128: 103810.
- [11] 唐声飞, 胡小芳. 加气混凝土砌块墙体裂缝产生的机理及防治[J]. 南华大学学报(理工版), 2004, 18(2): 67-69.
- [12] 潘文庆, 侯贵廷, 齐英敏, 等. 碳酸盐岩构造裂缝发育模式探讨[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 188-195.
- [13] BULAT M P, BULAT P V. Comparison of turbulence models in the calculation of supersonic separated flows[J]. World applied sciences journal, 2013, 27(10): 1263-1266.
- [14] 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.
- [15] MIAO T J, YU B M, DUAN Y G, et al. A fractal analysis of permeability for fractured rocks[J]. International journal of heat and mass transfer, 2015, 81: 75-80.
- [16] 傅英. 压裂气井生产过程中支撑剂回流机理研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2006: 35-36.
- [17] ZHANG C, LIU L G. Manifold construction over polyhedral mesh[J]. Communications in mathematics and statistics, 2017, 5(3): 317-333.
- [18] AKBARI K, MAHMOUDI J. Numerical simulation of Radon transport and indoor air conditions effects[J]. International journal of scientific and engineering research, 2012, 3(6): 1-10.
- [19] 田伶. 双层介质中氡迁移动力学模型及控制研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2019: 38.