

瓷砖地板接缝与非接缝处氡析出差异的实验研究

叶勇军,周 乐,李梦艺,夏 铭,刘淑媛

(南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:为了探究缝隙的存在对建筑结构表面氡析出的影响,采用局部静态法,以机房、客厅、实验室贴瓷砖的地面为对象,测量了瓷砖与瓷砖接缝处的一字缝和十字缝以及非接缝处即瓷砖表面的氡析出率。结果表明:1)接缝处的集氡罩内平衡氡浓度远高于瓷砖表面;2)不同瓷砖表面的氡析出率不同,客厅、机房、实验室分别是 $0.327 \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $0.413 \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $0.072 \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;3)一字缝、十字缝及瓷砖表面的氡析出率相差很大,在机房、客厅、实验室三处地面,一字缝表面氡析出率分别是瓷砖表面的3.19倍、2.43倍、2.25倍,十字缝表面的氡析出率分别是瓷砖表面的7.95倍、11.36倍、6.25倍。

关键词:氡;楼板;氡析出率;局部静态法;氡眼

中图分类号:X591 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2022)03-0001-07

Experimental Study on the Difference of Radon Exhalation Between Joint and Non-joint of Ceramic Tile Floor

YE Yongjun, ZHOU Le, LI Mengyi, XIA Ming, LIU Shuyuan

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

Abstract: To explore the influence of the existence of gaps on radon exhalation on the surface of building structures, the radon exhalation rate of single and cross joints and non-joints of ceramic tile surface was measured by using local static method on the ground covered with ceramic tile in computer room, living room and laboratory. The results show that: (1) The equilibrium concentration of radon in the radon collecting enclosure at the joint is much higher than that on the ceramic tile surface; (2) The radon exhalation rate of different ceramic tile surface is different, which is $0.327 \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ in living room,

收稿日期:2021-12-02

基金项目:国家自然科学基金项目(11575080)

作者简介: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

0.413 mBq/(m²·s) in computer room and 0.072 mBq/(m²·s) in laboratory; (3) The radon exhalation rate on single joints, cross joints and ceramic tile surface has huge difference. In the computer room, living room and laboratory, the radon exhalation rate on single slit surface is 3.19 times, 2.43 times, 2.25 times of that on ceramic tile surface respectively. The radon exhalation rate on cross slit surface is 7.95 times, 11.36 times, 6.25 times of that on ceramic tile surface respectively.

key words: radon; floor; radon exhalation rate; local static method; Radon Eye

0 引言

氡是一种无色无味的放射性稀有气体,普遍存在于大气环境与建筑室内之中,其对肺癌的诱发程度仅次于吸烟^[1],氡诱发的肺癌占有肺癌的3%~14%^[2],2001年世界卫生组织将氡列入19种环境致癌物质之一^[1]。近年来,氡对人体健康的有害影响受到了人们广泛的关注。人的一生有80%~90%的时间都在室内^[3],因此,普通公众接收氡的剂量主要在建筑室内。室内氡的来源主要是地基下的土壤与岩石、建筑材料和燃气等^[4],对于二层以上的建筑,建筑材料是室内不可忽视的氡污染来源^[5]。因为现代节能建筑气密性增强和通风不良,氡会在室内积聚,在室内环境中吸入氡及其子体会造成人类最大的自然辐射暴露量^[6-7]。

近年来,关于建筑材料氡析出率的研究方面,B. Frutos^[8]探讨了厚构件(如承重墙、结构地板和拱顶)内部填充物产生的析出率,发现他们接近于在土壤中观察到的值,比在建筑材料(如花岗岩)中发现的值大一到两个数量级,认为结构构件中的内部填充物是氡高析出率的主要来源。R. Rabi^[9]利用有限体积法(finite volume method, FVM)研究室内氡分布,他的研究表明室内氡浓度分布不均匀是由于不同来源(墙、地板和天花板)的氡浓度差异造成的。I. T. Celikovic^[10]采用密闭室法测量了几种常用建筑材料的氡和钍表面析出率,结果表明,不同材料的氡析出率有很大的变化范围,并提出监测现代建筑材料的氡析出率具有重要意义。

目前的很多研究都将单一建筑材料(一块瓷砖或一块砌体)作为研究对象,将单块建材的氡析出率作为建筑结构的氡析出率,忽略了这些建材构成了建筑结构后产生的差异,比如单块瓷砖和贴瓷砖的地面在结构上发生变化,以及在实际使用过程中产生的变化,比如地板因保养不当出现开裂等情况。

1 材料和方法

1.1 实验对象与装置

本次实验选择南华大学第一教学楼机房地面(以下统称为机房)、衡阳某小区住宅客厅地面(以下统称为客厅)和南华大学某实验室地板(以下统称为实验室)为试验对象,具体如下:

实验对象1:机房楼层位于第八层,现浇钢筋混凝土楼板,楼板厚度为200 mm,地面铺有0.8 m×0.8 m的抛光瓷砖,瓷砖厚度为10 mm,瓷砖与瓷砖之间的缝隙宽度为(2±0.2) mm,缝隙由白水泥填充。实验期间,该机房的两台空调处于运行状态,测量期间室内温度为(27±0.45)℃。

实验对象2:实验室楼层位于第二层,现浇钢筋混凝土楼板,楼板厚度为100 mm,室内长期开展多同材料的氡迁移与析出实验,地面铺有0.6 m×0.6 m的抛光瓷砖,瓷砖厚度为8 mm,测量处缝隙宽度为(1.1±0.3) mm,缝隙由白水泥填充。实验期间,室内开窗通风,室内温度为(20±0.37)℃。

实验对象3:客厅楼层位于第五层,现浇钢筋混凝土楼板,楼板厚度为110 mm,地面铺有0.6 m×0.6 m的抛光瓷砖,瓷砖厚度为8 mm,瓷砖与瓷砖之间的缝隙宽度为(1.5±0.2) mm,缝隙由补缝剂填充,实验期间,依靠窗户自然通风,室内外温度为(13±0.13)℃。

测量仪器:本实验相关测量仪器包括长度测量仪器与氡浓度测量仪器。

本实验用于测量瓷砖尺寸与集氡罩尺寸的仪器为皮尺,精度为0.001 m,用于测量地板缝隙的仪器为游标卡尺,精度为0.000 2 m。

本试验中用于测量集氡罩内氡浓度的仪器为radon eye(以下统称为氡眼),型号为RadonEye Plus2 (BLE & Wi-Fi),测量范围为7~9 435 Bq/m³,测量误差≤10%。其顶部有一个液晶显示屏,用于实时显示仪器测量的氡浓度,该数值每10 min更新一次,每60 min进行一次数据存储。此外,氡眼

在监测氡浓度时也将同时监测温度室内温度与湿度,仪器工作的环境湿度范围为:10℃~40℃,RH<80%。仪器使用前在南华大学氡室进行标定,得出标定系数。

集氡罩:集氡罩是一个顶部封闭,底部敞开,底部边缘略宽,长(29.5±0.23)cm,宽(23.6±0.15)cm,高(14.4±0.13)cm厚度约为0.2cm的亚克力容器,亚克力材料的氡扩散系数为 $2.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^{[11]}$ 。

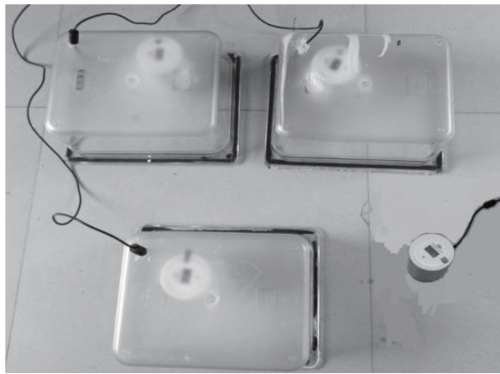


图1 测量系统示意图

Fig.1 Physical diagram of measurement system

1.2 实验步骤

1) 清理地面,将地面上的垃圾、灰尘及其他杂物清理干净,以排除这些杂物对测量结果的影响;

2) 在集氡罩顶部打孔,将氡眼电源线穿过集氡罩顶部的小孔,把氡眼放置在合适的位置,接上电源线,再用环氧树脂胶将孔洞密封,环氧树脂胶氡扩散系数为 $2.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^{[11]}$;

3) 在集氡罩的底部边缘贴上致密的EVA海绵双面胶,EVA材料的氡扩散系数为 $5.7 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}^{[11]}$,3个集氡罩分别扣在瓷砖与瓷砖交接的一字缝与十字缝处及瓷砖表面,其中,一字缝处覆盖的缝隙长度为29.5,十字缝处覆盖的两条缝隙分别长29.5cm,23.6cm,再用工具压实覆有双面胶的四周,使之与地面紧贴,然后在集氡罩与地面接触的地方再覆盖一层致密的环氧树脂胶,防止氡气从集氡罩与地面接触处泄露;

4) 将氡眼电源线连接上电源,开始监测集氡罩内氡浓度的变化,同时,在集氡罩附近的地面上放置一个氡眼,用于监测同高度位置室内氡浓度的变化。待集氡罩内氡浓度趋于稳定后(3~4d

测量系统如图1所示,将底部边缘略宽的集氡罩扣在贴有瓷砖的地板上,集氡罩的覆盖区域分别是瓷砖与瓷砖的一字缝、十字缝交接处及瓷砖表面非交接处。将氡眼放置在集氡罩内,氡眼电源线从集氡罩顶部的小孔穿过。测量系统总体积为 $9\,063.92 \pm 105.04 \text{ cm}^3$ (集氡罩的容积减去氡眼的固体体积),集氡罩覆盖面积为 $(692.89 \pm 1.99) \text{ cm}^2$ 。

左右),读取累积过程中氡眼储存的数据(氡活度浓度)。

1.3 局部静态法地面氡析出率测量原理

假设待测介质表面的氡析出率为 E 为一个常数,集氡罩外空气氡浓度较低,采用局部静态法测定氡析出率时,集氡罩内氡浓度为:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{E \cdot S}{V} - (\lambda + \lambda_1 + \lambda_b) \cdot C \quad (1)$$

式中: C 为集氡罩内氡浓度, Bq/m^3 ; E 为氡析出率, $\text{Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; λ 为氡的衰变常数, $\lambda = 2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; λ_1 为反扩散系数, s^{-1} ; λ_b 为泄露系数, s^{-1} ; S 为集氡罩覆盖面积, m^2 ; V 为测量系统气体体积, m^3 。

若初始氡浓度 $C|_{t=0} = C_0$,式(1)解析解为:

$$C(t) = \frac{E \cdot S}{(\lambda + \lambda_1 + \lambda_b) V} (1 - e^{-(\lambda + \lambda_1 + \lambda_b)t}) + C_0 e^{-(\lambda + \lambda_1 + \lambda_b)t} \quad (2)$$

在本文中数据处理是利用Origin Pro中的非线性曲线拟合的功能,拟合方程由式(3)所示:

$$y = \frac{a}{b} (1 - e^{(-bt)}) + C_0 \times e^{(-bt)} \quad (3)$$

其中: $a = \frac{E \cdot S}{V}$

$$b = \lambda + \lambda_1 + \lambda_b$$

则氡析出率与反扩散系数及泄露系数为:

$$E = \frac{a \times V}{S}$$

$$\lambda_1 + \lambda_b = b - 2.1 \times 10^{-6} \quad (4)$$

氡析出率不确定度的传播由下式体现:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{S}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_v}{V}\right)^2} \quad (5)$$

式中: σ_a 为拟合参数 a 的不确定度, σ_b 拟合参数 b 的不确定度, σ_s 为由测量误差引起的 S 的不确定性, σ_v 为由测量误差引起的 V 的不确定性。

2 结果与讨论

2.1 集氡罩内氡浓度测量结果

客厅、机房、实验室三处建筑室内地面集氡罩内从初始状态到平衡状态氡浓度的变化曲线如图2所示。

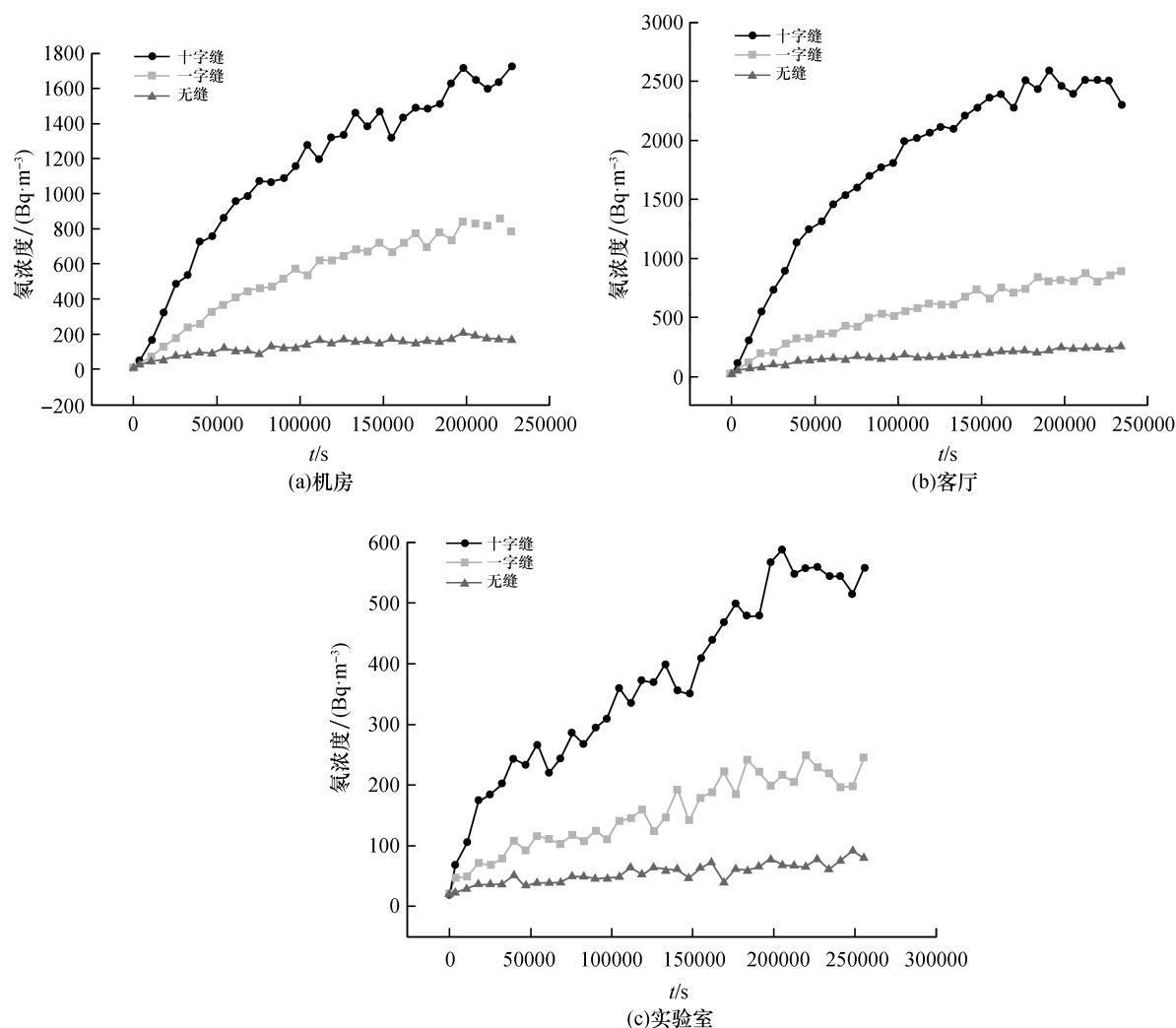


图2 集氡罩内氡浓度变化曲线

Fig.2 Variation curve of radon concentration in radon hood

由图2可以看出:

1) 集氡罩内氡浓度在开始的一段时间上升速度较快,而后经历了一段缓慢的增长后趋于稳定;

2) 机房、客厅、实验室中覆盖瓷砖表面的集氡罩

内平衡氡浓度均不相同,分别是 $(185 \pm 13) \text{ Bq/m}^3$, $(235 \pm 23) \text{ Bq/m}^3$, $(78 \pm 8) \text{ Bq/m}^3$;

3) 三处地点中,覆盖了一字缝、十字缝与瓷砖表面的集氡罩内平衡氡浓度有显著差异。机房、客厅、实验室覆盖一字缝的集氡罩平衡氡浓度

分别为: $(733 \pm 43) \text{ Bq/m}^3$, $(835 \pm 54) \text{ Bq/m}^3$, $(195 \pm 23) \text{ Bq/m}^3$; 覆盖十字缝的集氡罩内平衡氡浓度分别为: $(1\ 623 \pm 54) \text{ Bq/m}^3$, $(2\ 475 \pm 48) \text{ Bq/m}^3$, $(539 \pm 33) \text{ Bq/m}^3$ 。

2.2 氡析出率计算结果

图3(a)为实验期间室内温度的变化情况,

图3(b)为实验期间监测的三处室内氡浓度的变化,取平均值作为建筑室内的初始氡浓度 C_0 , 机房、客厅、实验室内初试氡浓度分别为 10 Bq/m^3 , 20 Bq/m^3 , 35 Bq/m^3 。利用式(3)进行非线性曲线拟合,拟合结果如图4所示。

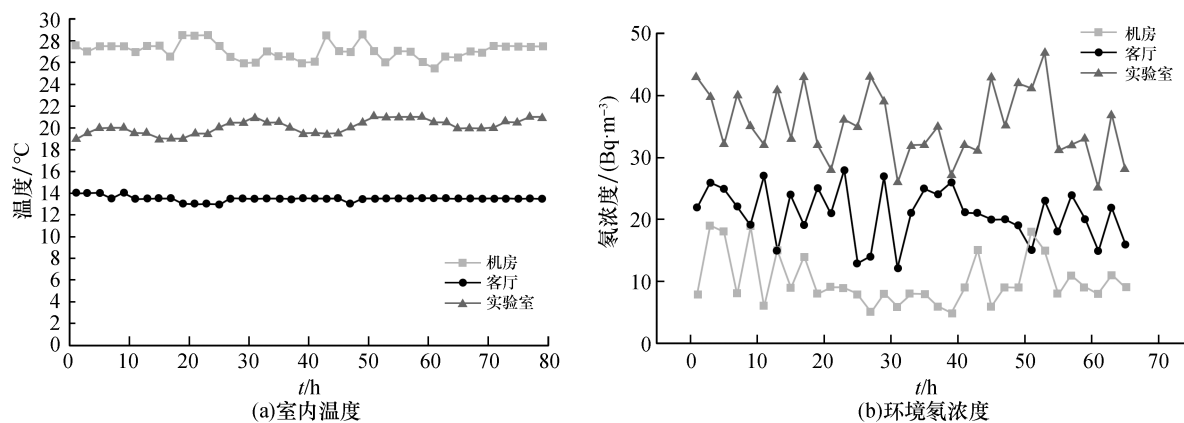


图3 实验期间室内温度与环境氡浓度

Fig. 3 Indoor temperature and radon concentration during the experiment

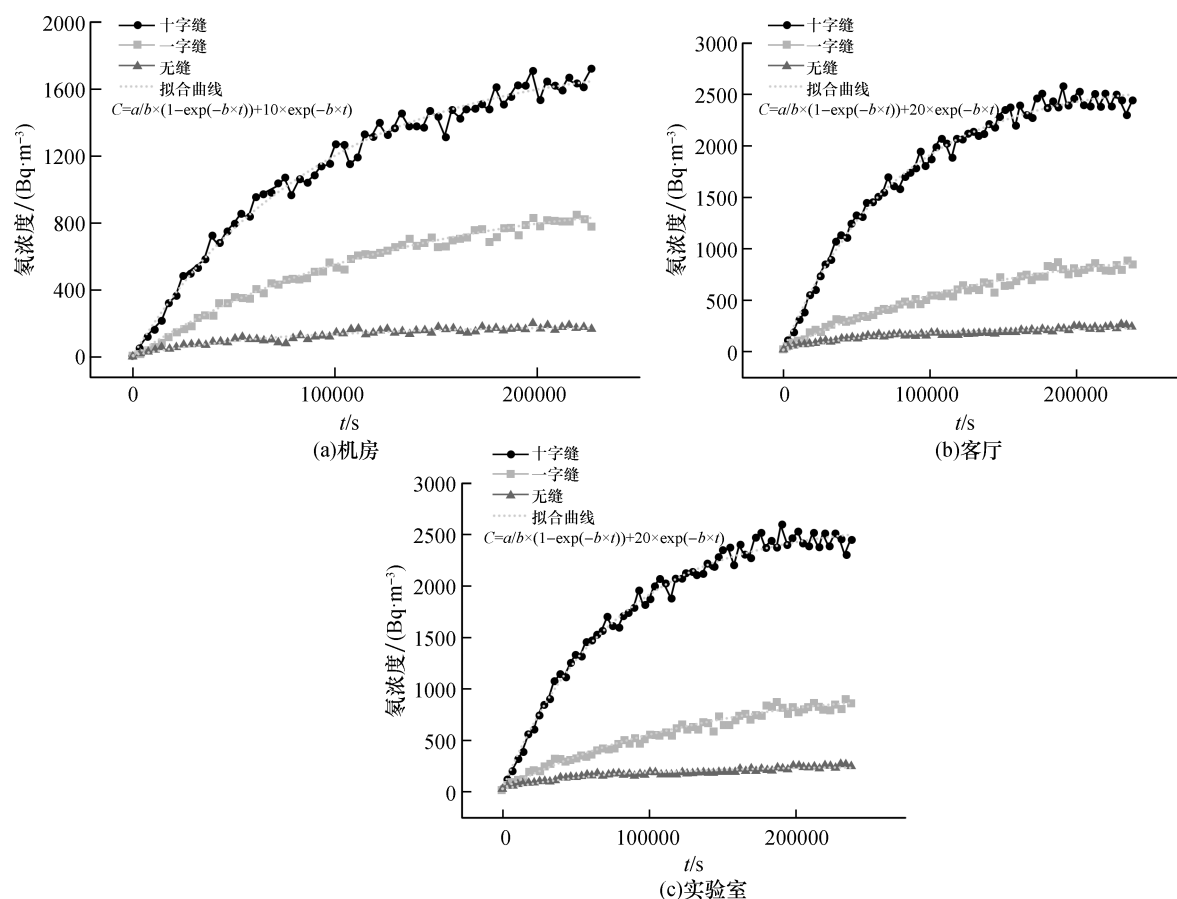


图4 地面氡析出率拟合结果

Fig. 4 Fitting results of radon exhalation rate on the ground

根据非线性曲线拟合的结果,利用公式(4) 算结果见表 1。
和公式(5)计算出氡析出率 E 及其不确定度。计

表 1 氡析出率计算结果
Table 1 Calculation results of radon exhalation rate

		$a/(10^{-4}\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$	$b/(10^{-6}\text{s}^{-1})$	R^2	$E/(\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\lambda_1+\lambda_b/(10^{-6}\text{s}^{-1})$
机房	无缝	25.00±1.43	13.69±1.12	0.911	0.327±0.033	11.59±0.94
	一字缝	79.80±1.61	8.00±0.31	0.991	1.044±0.047	5.90±0.22
	十字缝	198.80±4.24	11.11±0.38	0.988	2.600±0.109	9.01±0.30
客厅	无缝	31.60±1.91	13.44±1.14	0.889	0.413±0.043	11.34±0.96
	一字缝	76.90±2.26	7.29±0.44	0.978	1.005±0.069	5.19±0.31
	十字缝	341.5±6.56	13.06±0.37	0.990	4.466±0.162	10.96±0.31
实验室	无缝	5.54±0.68	7.02±1.45	0.807	0.072±0.017	4.92±1.01
	一字缝	12.40±0.77	2.33±0.61	0.955	0.162±0.044	0.23±0.06
	十字缝	34.40±2.10	3.67±0.74	0.933	0.450±0.095	1.57±0.31

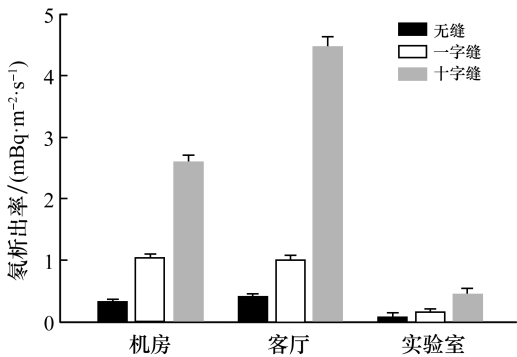


图 5 不同情况下的氡析出率
Fig. 5 Radon exhalation rate of ground under different conditions

由表 1 及图 5 可知:

- 1) 尽管都是瓷砖地面,但客厅、机房、实验室三处地点瓷砖表面氡析出率差异也比较大。客厅最高($0.413 \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),机房次之($0.327 \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),实验室最低($0.074 \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$);
- 2) 瓷砖与瓷砖交接处缝隙的存在对地面氡析出率有很大的影响。在机房、客厅、实验室中,十字缝处的表面氡析出率分别 7.95 倍、11.36 倍、6.25 倍,一字缝处表面氡析出率分别是瓷砖表面氡析出率的 3.19 倍、2.43 倍、2.25 倍;
- 3) 缝隙面积大小也会导致氡析出率产生差异,本次实验中,十字缝的缝隙面积大约是一字缝缝隙面积的 1.8 倍,在机房、客厅、实验室中,十字缝地面氡析出率分别是一字缝地面氡析出率的

2.5 倍、4.4 倍、2.7 倍。

同是瓷砖表面,氡析出率却有很大的差异,产生这种差异的原因有很多:其一,机房、客厅、实验室所在的建筑物不同,使用的建筑材料不同,建筑物的使用年限有差别,建筑材料的老化程度不一;其二,三处地面贴的瓷砖并非同一品牌,生产工艺有差异;其三是季节的影响,客厅里地面氡析出率的测量时间在冬季,而实验室和客厅两处地面氡析出率的测量时间在春夏交接的季节。

氡气从地板中向外迁移时,会优先从缝隙中出来,这可能是由于缝隙处孔隙率较其他部分大,有利于氡从多孔介质中迁移出来,逃逸到空气中。从瓷砖表面迁移出来的氡远远少于从瓷砖与瓷砖相接的缝隙中迁移出来的氡。由此可见,对于贴瓷砖的地板或者其他存在缝隙的墙体等建筑维护结构,在监测其氡析出率时,不能仅仅用某个表面的氡析出率代替整体的氡析出率,要考虑缝隙的存在对氡析出率的影响。此外,在研究室内氡的来源与抑制氡析出的手段时,可以从抑制氡的主要通道着手,利用更能阻挡氡迁移的材料将缝隙密封,切断氡的析出通道。

3 结 论

采用局部静态法,以实验室、客厅以及机房三处建筑室内贴瓷砖地面为对象,监测了一字缝、十字缝及瓷砖表面的氡析出率,得出以下结论:

- 1) 机房、客厅、实验室瓷砖表面的氡析出率分

别是 $0.327 \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $0.413 \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $0.072 \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2) 缝隙对贴瓷砖地面的氡析出率影响很大, 缝隙越多的地方, 表面氡析出率越大。一字缝地面氡析出率分别是 $(1.044 \pm 0.047) \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $(1.005 \pm 0.068) \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $(0.162 \pm 0.044) \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 十字缝地面氡析出率分别是 $(2.600 \pm 0.109) \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $(4.466 \pm 0.162) \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $(0.450 \pm 0.095) \text{ mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

3) 在监测地面、墙体等建筑结构的表面氡析出率时, 要考虑砌体交接处的缝隙或因开裂产生的缝隙的影响, 不能简单地使用某一处的氡析出率作为整体氡析出率。

4) 缝隙是氡从建材中溢出的重要通道, 对于由于老化产生开裂现象的地面、墙面等建筑结构, 可以利用致密材料填补裂隙的方法抑制氡的析出。

参考文献:

- [1] TING D K S. WHO handbook on indoor radon: A public health perspective[J]. The international journal of environmental studies, 2010, 67(1): 100-102.
- [2] LORENZO-GONZÁLEZ L, TORRES-DURÁN T, BARBOSA-LORENZO B, et al. Radon exposure: A major cause of lung cancer[J]. Expert review of respiratory medicine, 2019, 13(9): 839-850.
- [3] 陈光玲. 掺粉煤灰试块的氡析出规律及抑制效果研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2020: 4-5.
- [4] DE JONG P, VAN DIJK W, VAN DER GRAAF E R, et al. National survey on the natural radioactivity and ^{222}Rn exhalation rate of building materials in The Netherlands[J]. Health physics, 2006, 91(3): 200-210.
- [5] SINGH S, KUMAR A, SINGH B. Radon level in dwellings and its correlation with uranium and radium content in some areas of Himachal Pradesh, India[J]. Environment international, 2002, 28(1/2): 97-101.
- [6] IYOGI T, UEDA S, HISAMATSU S, et al. Radon concentration in indoor occupational environments in Aomori Prefecture, Japan[J]. Journal of environmental radioactivity, 2003, 67(2): 91-108.
- [7] MAGALHAES M H, AMARAL E C S, SACHETT I, et al. Radon-222 in Brazil: An outline of indoor and outdoor measurements[J]. Journal of environmental radioactivity, 2003, 67(2): 131-143.
- [8] FRUTOS B, MARTÍN-CONSUEGRA F, ALONSO C, et al. Inner wall filler as a singular and significant source of indoor radon pollution in heritage buildings: An exhalation method-based approach[J]. Building and environment, 2021, 201: 108005.
- [9] RABI R, OUFNI L. A theoretical investigation of the distribution of indoor Radon concentrations[J]. Indian journal of physics, 2017, 91(5): 471-479.
- [10] ČELIKOVIC I T, PANTELIC G K, ŽIVANOVIĆ M Z, et al. Radon and thoron exhalation rate measurements from building materials used in Serbia[J]. Nukleonika, 2020, 65(2): 111-114.
- [11] ROVENSKA K, JIRÁNEK M. 1st International comparison measurement on assessing the diffusion coefficient of radon[J]. Radiation protection dosimetry, 2011, 145(2/3): 127-132.