

文章编号:0253-9950(2011)06-0375-04

地下室排氡及数学模型的建立

李小该,章英杰,刘 超

中核清原环境技术工程有限公司,北京 100037

摘要:本工作对退役过程中氡含量过高的地下仓库排氡通风概念设计进行了描述,据此建立了预测仓库内氡活度浓度变化的数学模型,并根据工程中所获得的数据对数学模型进行了修正。修正后的数学模型可用于通风期间仓库内氡活度浓度的预测和排氡通风时间的计算,有效避免了工作人员进入室内测氡的辐照风险。

关键词:氡气;通风;数学模型;修正

中图分类号:O613.16;O552.32 **文献标志码:**A

Ventilation of Radon Gas From Underground Storeroom and Its Mathmatical Model

LI Xiao-gai, ZHANG Ying-jie, LIU Chao

CNNC-Everclean Co., Ltd., Beijing 100037

Abstract: A conceptual design of a ventilation system for elimination of high radioactivity concentration radon gas from a decommissioning underground storeroom is described in this paper. A mathematical model is constructed for prediction of the variation of radon radioactivity concentration upon time in the storeroom during ventilation. The model is further improved by introduction of a modification factor M whose value is determined by fitting to the experimental data. The final model is $C_t = C_0 e^{-(MN)t} + \frac{E/V + C_{air} \cdot (MN)}{MN - \lambda} [e^{-\lambda t} - e^{-(MN)t}]$.

The modified model can satisfactorily predict the radon radioactivity concentration in the storeroom at any time, and precisely calculate the ventilation time needed for decrease the radon radioactivity concentration to an acceptable level to avoid harmful inner irradiation by inhalation.

Key words: radon; ventilation; mathmatical model; modify

氡是一种具有放射性的气体,吸入人体内将导致内照射,具有致癌的危险性。GB18871—2002 中规定^[1]:工作场所中氡放射性浓度在 500~1 000 Bq/m³ 时,必须对氡进行防护。达到 500 Bq/m³ 时宜考虑采取补救行动,达到 1 000 Bq/m³ 时应采取补救行动。上海跃龙化工厂退役工程^[2]

中,现仍存放硝酸钍半成品的地下室型仓库内氡气活度浓度超标(2 000 Bq/m³ 左右),在进入地下仓库进行废物回取及去污施工前,必须对仓库内的氡进行排除,控制氡活度浓度在 500 Bq/m³ 以下时方可进入施工。本工作对工程中的排氡通风概念设计进行了描述,但施工过程中仓库内氡活度

浓度是否达标需要工作人员携带仪表进入库内测量,为减少工作人员的辐照剂量,建立了通风期间氡活度浓度预测的数学模型,根据数学模型可以计算出排氡通风时间,有效避免了人员进入库内测氡的辐照风险。该数学模型对室内氡活度浓度的控制和辐射环境评价等工作也具有一定的指导意义。

1 排氡通风概念设计

对于氡活度浓度过高的封闭空间,通风是排氡最常采用的方法^[3]。原仓库呈地下室结构,地上部分为一敞口的建筑物。地下室除东侧有进入的楼梯与外界相通外,其余各侧均密闭于地下,东侧墙壁上开有一 $1.0\text{ m} \times 2.2\text{ m}$ 的通道门,仓库内部呈长方体结构。设计通风时,在尽量不破坏原结构的基础上,以原通道门为进风口,在门对面靠墙处的天花板上开一小孔作为排风口,排风机安置于仓库地上的水泥楼面上,通风管通过开凿的小孔,一端连接于排风机上,另一端置于仓库内靠地面处。为防止通风时仓库内的粉渣被大量吸入造成排风机堵塞,近地面处端口设计成 90° 的弯角,管口与地面平行。仓库内的空气经通风小车过滤后排至大气环境中。排风机采用带过滤器的核级空气净化通风小车,通风小车的额定排风量为 $1700\text{ m}^3/\text{h}$ (效率 80%),通风管采用硬质 PVC 塑料管。通风概念设计示意图示于图 1。通风期间,仓库内的氡活度浓度会逐渐减少。

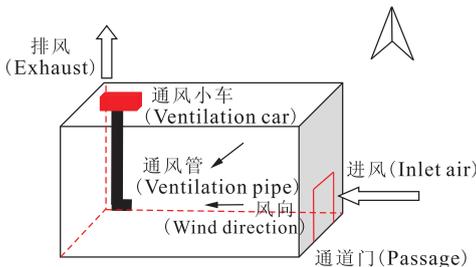


图 1 通风概念设计示意图

Fig. 1 Concept design of ventilation

2 理论数学模型的建立

研究的项目和指标如下: V 为仓库空间大小, m^3 ; C_t 为实验进程中 t 时刻仓库内的氡气放射性活度浓度(与质量浓度成正比), Bq/m^3 ; E 为仓库内废渣及墙壁、地面的氡析出速率, $\text{Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; C_{air} 为仓库外周边空气中的氡放射性活度浓度, Bq/m^3 ; q 为排风机排风速率, m^3/s ; λ 为氡的放射

性衰变常数, s^{-1} 。

假设条件:(1) 室外氡活度浓度恒定;(2) 氡均匀地分布在仓库内,从外面送入的新鲜空气进入库内后立即与仓库内的气体充分混合;(3) 仓库内气压恒定,即送风速率等于排风速率;(4) 由于 ^{232}Th 系衰变在自然界中被认为是达到平衡的,衰变体系中各核素的活度浓度基本维持不变^[4]。根据文献[5],认为库房内废渣及建材表面的氡析出速率 E 固定不变。

单位时间内仓库内氡活度浓度的改变由以下因素决定:(1) 仓库内废渣及墙壁、地面产生的氡(E);(2) 因通风而进入的氡($C_{\text{air}} \cdot q$);(3) 因通风而排出的氡($C_t \cdot q$);(4) 氡自身的衰变减少,其衰减因子为 $e^{-\lambda t}$ 。

根据氡的质量守恒关系式,可建立以下方程:

$$V \frac{dC_t}{dt} = (E + C_{\text{air}} \cdot q) e^{-\lambda t} - C_t \cdot q \quad (1)$$

引入 $N = q/V$, N 为仓库内空气的交换频率 (s^{-1}), 则(1)式可变形为:

$$\frac{dC_t}{dt} = (E/V + C_{\text{air}} \cdot N) e^{-\lambda t} - C_t \cdot N \quad (2)$$

求解上述微分方程(2), 方程(2)的初值条件为时间 $t=0$ 时, 库内氡活度浓度 $C=C_0$ (C_0 可通过仪表直接测出)。将(2)式积分, 可得到任意时间 t 时, 仓库内的氡活度浓度:

$$C_t = C_0 e^{-Nt} + \frac{E/V + C_{\text{air}} \cdot N}{N - \lambda} (e^{-\lambda t} - e^{-Nt}) \quad (3)$$

3 模型的验证与修正

数学模型(3)可应用于工程中预测通风期间库内的氡活度浓度。仓库尺寸为: $9.8\text{ m} \times 9.2\text{ m} \times 2.8\text{ m}$; 排风机排风量为 $1700\text{ m}^3/\text{h}$ (效率 80%); 根据仓库体积, 对应的最大换气频率 $N = q/V = 1.38 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$; 氡的衰变常数 $\lambda = 2.1 \times 10^{-6}$; 仓库外周边空气中的氡活度浓度 C_{air} 用美国 DURRIDGE 公司 RAD-7 型测氡仪测得为 $205\text{ Bq}/\text{m}^3$; 氡的析出速率 E 为常量, 但具体数值未知, 需求算。因此, 为对仓库内的氡活度浓度进行预测, 就必须先计算出 E 值, 再采用该数学模型对通风期间的氡活度浓度进行计算。

3.1 E 值的计算

考虑氡的惰性气体性质, 在室内生成后不产生明显化学性降解。仓库内氡的析出速率 E 可通过停止通风期间氡的析出累积公式计算出来。 $q=0$ 时, (2)式变形为:

$$\frac{dC_t}{dt} = (E/V)e^{-\lambda t} \quad (4)$$

方程(4)的初值条件为 $t=0$ 时, $C_t=C_0$ (C_0 可通过仪表测出), 求解微分方程(4), 得:

$$C_t = C_0 + \frac{E}{\lambda V} - \frac{E}{\lambda V}e^{-\lambda t} \quad (5)$$

式中: C_t 为 t 时刻的氡活度浓度, C_0 为初始时刻的氡活度浓度。以实验过程中所测得的 C_t 对 t 作图, 拟合函数, 根据拟合函数的参数值即可确定 E (图 2)。图 2 结果表明, 氡活度浓度 C_t 和时间 t 的关系能很好地与指数函数 $y = A_1 - A_2e^{-kx}$ 拟合 ($r^2 = 0.9877$), 拟合函数的参数值 $A_2 = E/(\lambda V)$, 已知 λ 、 V 值, 代入计算得到 $E = 0.61 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。此外, 拟合函数的指数系数 $k = 7.4 \times 10^{-6}$, 与氡的衰变常数 λ 在同一数量级上, 这也在一定程度上说明了停止通风期间氡累积公式的合理性。

3.2 模型的修正

代入 $E = 0.61 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 即可采用数学模

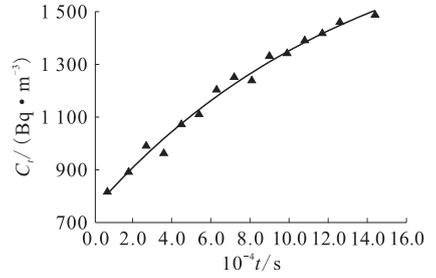


图 2 停止通风期间库房内氡活度浓度随时间的变化
Fig. 2 Radon radioactivity concentration in the storeroom as a function of time after the ventilation turned off
▲——测量数据(Measurement data), ———拟合函数(Function fitting)

型: $C_t = C_0 e^{-Nt} + \frac{E/V + C_{\text{air}} \cdot N}{N - \lambda} (e^{-\lambda t} - e^{-Nt})$, 对通风期间仓库内的氡活度浓度进行预测。同时采用 RAD-7 测氡仪对库房内的氡活度浓度进行测定, 所得到的测量数据和通过数学模型得到的计算数据列于表 1。

表 1 通风期间库内氡活度浓度变化数据表

Table 1 Variation of radon radioactivity concentration upon ventilation time

通风时间 (Ventilation time)/h	$C_t/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$		通风时间 (Ventilation time)/h	$C_t/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$	
	实测值 (Measurement)	计算值 (Calculation)		实测值 (Measurement)	计算值 (Calculation)
0	2 180.6	2 180.6	6.0	320.6	197.7
1.0	1 539.7	219.1	7.0	269.7	196.2
2.0	968.3	203.9	8.0	211.5	194.7
3.0	683.1	202.3	9.0	226.2	193.3
4.0	512.9	200.7	10.0	199.4	191.8
5.0	382.3	199.2			

对比测量数据和通过数学模型得到的计算数据, 发现两者存在较大差异, 需要对现有模型进行修正。分析认为, 主要是因为建模的过程中使用了假定条件(2)所致: 氡均匀地分布在仓库内, 从外面送入的新鲜空气进入仓库内立即与库内的空气充分混合。而事实上库内空气与从库外进入的新鲜空气存在着氡的扩散过程(氡活度浓度不同), 该过程需要一定时间才能达到平衡, 进入的新鲜空气有可能在未达到氡扩散平衡前已被排出。这一因素反映到模型中将导致仓库内空气交换频率 N 的实际值比计算值 ($N=q/V$) 偏小。另外, 在排风过程中, 通风小车的过滤器逐渐被堵塞, 排风量减少, 也将导致空气交换频率 N 值减少。因此, 考虑在该模型的基础上对空气交换频率 N 添加一影响因子 M , 从而使模型转化为:

$$C_t = C_0 e^{-(MN)t} +$$

$$\frac{E/V + C_{\text{air}} \cdot (MN)}{MN - \lambda} [e^{-\lambda t} - e^{-(MN)t}] \quad (6)$$

尝试取修正因子 $M=0.01, 0.1, 0.5$, 采用修正后数学模型对氡活度浓度进行预测, 所得结果示于图 3。从

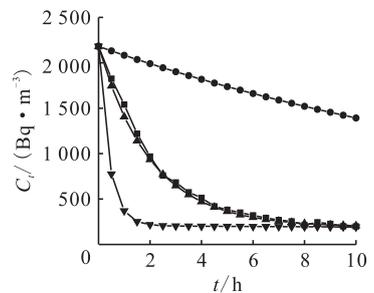


图 3 不同 M 值时的理论氡活度浓度
Fig. 3 Calculated radon radioactivity concentrations by using different modification factor M

■——实测数据(Measurement data),
●—— $M=0.01$, ▲—— $M=0.1$, ▼—— $M=0.5$

图 3 可以看出,当 $M=0.1$ 时,通过数学模型计算得到的数据能较好地符合实际测量数据,相对误差控制在小于 10%,这在工程是可以接受的。将获得的 M 值代入模型,当库内初始氡活度浓度不同时,通过模型计算出的理论数据和实测数据均能较好地吻合,具体示于图 4。图 4 结果表明,经过修正后的模型 $C_t = C_0 e^{-(MN)t} + \frac{E/V + C_{\text{air}} \cdot (MN)}{MN - \lambda} [e^{-\lambda t} - e^{-(MN)t}]$ 是比较符合实际情况的,可用于仓库内氡活度浓度的预测。

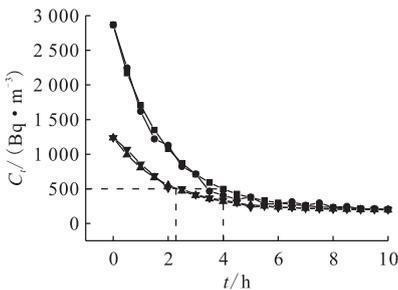


图 4 修正后数学模型计算得到的理论值与实测值
Fig. 4 Radon radioactivity concentrations of experimentally measured and calculated by the modified model

■——计算数据 (Calculating data, $C_0 = 2870 \text{ Bq/m}^3$),
●——实测数据 (Measurement data, $C_0 = 2870 \text{ Bq/m}^3$),
▲——计算数据 (Calculating data, $C_0 = 1236.1 \text{ Bq/m}^3$),
▼——实测数据 (Measurement data, $C_0 = 1236.1 \text{ Bq/m}^3$),
---——氡活度浓度控制值 (Control value of radon radioactivity concentration)

4 结果与讨论

从该模型可以看出,为迅速排出库内的氡气,可以考虑在原通风概念设计的基础上于仓库内加设一风扇类的空气混合器,以加速库内空气与从库外进入的新鲜空气间的氡扩散过程,起到增大有效空气交换频率(MN)的效果。

进一步的研究还发现,通过调节通风小车的排风量,控制空气交换频率 N 在 $2.76 \times 10^{-4} \sim 1.38 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 范围内变化时, M 与 N 存在良好的线性相关性,示于图 5。

M 、 N 的线性关系拟合为:

$$M = 0.64 - 388.19N \quad (r^2 = 0.9962) \quad (7)$$

公式(7)为 $N = 2.76 \times 10^{-4} \sim 1.38 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时计算 M 提供了便捷方法,结合式(7)和数学模型(6)即可对通风期间库内氡活度浓度进行预测。确定氡活度浓度的控制值 C_t , 仅需测量得氡活度浓度

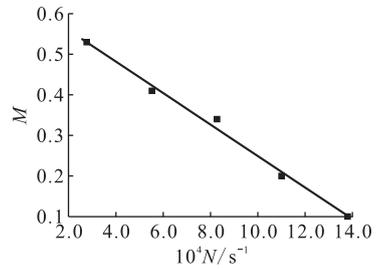


图 5 修正因子 M 与空气交换频率 N 的关系曲线
Fig. 5 Relationship between the modification factor M and the air replacement frequency

的初始值 C_0 , 即可根据数学模型计算出通风时间 t , 相比工程人员携带仪表多次进入仓库内测量以检测氡活度浓度是否降到控制值以下, 有效地避免了人员辐照风险。数学模型(6)可推广应用于其他情况下封闭室内氡活度浓度的预测, 但式(7)只是从本实验中所提取的经验公式, 是否适用于其他工程还需进一步验证。

5 结论

(1) 建立了通风期间仓库内氡活度浓度预测的数学模型, 根据工程中所获得的数据对数学模型进行了验证与修正, 修正后的数学模型为: $C_t = C_0 e^{-(MN)t} + \frac{E/V + C_{\text{air}} \cdot (MN)}{MN - \lambda} [e^{-\lambda t} - e^{-(MN)t}]$, M 为修正因子。并研究得到了当空气交换频率 $N = 2.76 \times 10^{-4} \sim 1.38 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, $M = 0.64 \sim 388.19N$ 。

(2) 该模型可用于通风期间仓库内氡活度浓度的预测、计算排氡通风时间, 有效避免了工作人员进入室内测氡的辐照风险。同时还可根据数学模型对原通风概念设计进行改进。

参考文献:

- [1] 潘自强, 叶常青, 张延生, 等. GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 中国国家质量监督检验检疫总局, 2002:188.
- [2] 中核清原环境技术工程有限公司. 上海跃龙污染治理项目实施总方案[Z]. 2009.
- [3] 张哲. 氡的析出与排氡通风[M]. 北京: 原子能出版社, 1982:38.
- [4] 从慧玲. 使用辐射安全手册[M]. 北京: 原子能出版社, 2007:3.
- [5] 孙凯男, 郭秋菊, 程建平. 我国部分地区土壤氡析出率的理论模型[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2004, 6:581-584.