

CNIC-01268

SAEC-0001

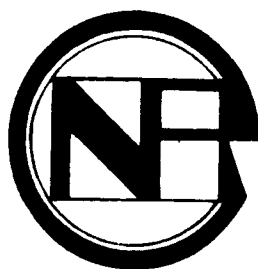
中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

室内氡气传输的数值模拟

THREE-DIMENSIONAL TRANSIENT NUMERICAL
SIMULATION OF INDOOR RADON TRANSPORT

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01268, SAEC-0001: 室内氦气
传输的数值模拟/何斌等著. —北京: 原子能出版社,
1998. 9

ISBN 7-5022-1853-X

I. 中… II. 何… III. 核技术-中国-研究报告 IV
. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 16393 号

室内氦气传输的数值模拟

何斌等著

©原子能出版社, 1998

原子能出版社出版发行

责任编辑: 李曼莉

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16·印张 1·字数 20 千字

1998 年 9 月北京第一版·1998 年 9 月北京第一次印刷

定价: 5.00 元



何斌：博士，中国人民解放军第二炮兵工程学院讲师。1984年毕业于第二炮兵工程学院。1998年获西安交通大学反应堆工程与反应堆安全专业博士学位。

He Bin: Graduated from Second Artillery Engineering college in 1984. Received Ph. D degree from Xi'an Jiaotong University in 1998. Majoring in nuclear reactor engineering and nuclear reactor safety.

CNIC-01268

SAEC-0001

室内氦气传输的数值模拟

何 斌 尚爱国 张全虎 张海英

(第二炮兵工程学院, 西安市, 710025)

摘 要

根据粒子输运理论和气体分子动力学,建立了室内氦的三维瞬态传输模型,提出了与过去不同的边界条件。利用差分方法离散了室内氦的三维瞬态传输方程、渗流速度方程、压差方程以及定解条件。通过编程计算,对室内氦的三维瞬态传输过程进行了数值模拟。与实测的室内氦浓度比较,计算值与实测值符合得比较好。同时,还模拟了环境气压、气温、风和机械通风等因素随时间变化时,室内和地板裂缝中氦浓度的变化过程。计算表明:气压、气温、风和机械通风等环境因素的变化,将引起室内压差的变化,从而影响室内和裂缝中的氦浓度;与稳态的结果比较,室内氦浓度与压差之间的相位差大于 180° ,裂缝中的氦更显著地影响室内氦气浓度。

Three-Dimensional Transient Numerical Simulation of Indoor Radon Transport

(In Chinese)

HE Bin SHANG Aiguo ZHANG Quanhua ZHANG Haiying
(Second Arterlary Engineering College, Xi'an, 710025)

ABSTRACT

According to the theory of particle transport and dynamics of molecular gas, the mathematic model of three-dimensional transient numerical simulation of indoor radon transport has been setup, and the different boundary condition has been offered. By means of the different method, the equations of transport of indoor radon gas, convection velocity and pressure difference and boundary conditions have been discretized. After programming and calculating, the numerical simulation has been finished. Comparing with references and experiments, the indoor radon concentrations of simulation are in good agreemet with them. Meanwhile, the real changing processes of the radon in indoor and cracks have been simulated, when the environmental factors (such as atmosphere, temperature, wind and mechanic air-conditioning) changed with time. The calculating results show that the radon concentrations in indoor and cracks are affected, when the indoor pressure difference are induced by the environmental fators; comparing with the steady results, the phase difference between the indoor radon and pressure difference is bigger than 180° ; and the indoor radon concentration is much obviously affected by the radon in cracks.

引言

氡是镭核衰变产生的一种放射性气体。过去人们只认为铀矿山中产生的氡才对人类造成威胁。但近几十年来,人们已发现,在正常生活条件下,环境中的氡对人类也会造成危害。有文献^[1]报道,环境氡是除吸烟以外诱发慢性肺癌的第二大因素。因此,研究环境氡的产生和传输特性,对防止和减少环境氡的危害具有非常重要的意义。

居室内的氡主要来源于水泥地板、土壤、天花板、周围的墙壁的装饰材料,以及地板裂缝和墙与地板的连接缝隙^[1]。室内氡浓度的大小不仅与建筑材料的特性和镭的含量有关,也与环境气压、气温、风、机械通风等因素有关。一般情况下,房间和地板裂缝的几何结构是不对称的,环境因素是随时间变化的,因此对室内氡的传输特性研究,用三维瞬态模型才能真实和正确的反映室内氡的传输过程。

1 数学模型

我国一般居室的建筑结构如下图所示:

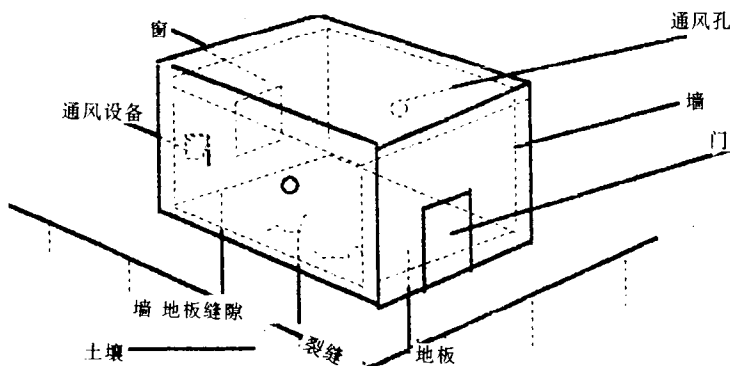


图1 居室建筑结构示意图

居室内氡主要来源于水泥地板、土壤、天花板、周围墙壁的装饰材料,以及地板裂缝和墙与地板的连接缝隙。放射性核素氡由镭核衰变产生以后,由于核反冲作用,一部分氡进入到介质的毛细管中,以气态形式存在。当不同地点的氡气浓度存在差异时,由于分子热运动,氡将从高浓度区向低浓度区扩散;如果介质中压力分布不均匀,那么在压力的梯度方向将产生气体的流动,介质毛细管中的氡气将从高压区向低压区渗透,渗透的速度决定于压力的梯度与介质的渗透率。

1.1 室内氡的三维瞬态传输方程

氡气在介质中的传输和其它气体在介质中的传输一样,主要形式是扩散与渗流。根据 Fick 定律,氡的扩散密度流可表为:

$$J_D = -D_e \nabla C \quad (1)$$

式中 D_e 是氡的有效扩散系数 (cm^2/s), 它与介质的类型和特性有关; C 为氡气浓度 (Bq/m^3), 是时间和位置的函数。

当介质中压力分布不均匀时,氡气将从高压区向低压区渗透。根据分子动力学原理,氡的渗流密度流可表为:

$$J_i = VC \quad (2)$$

其中 V 是氢的速度矢量, 它的三个分量分别为 u, v, w , 它们都与时间和位置有关。

若介质是均匀且各向同性的, 那么根据粒子输运理论, 介质中氢气的传输方程可表为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{\eta} \nabla \cdot J_T - \lambda C + S \quad (3)$$

式中 S 为氢气源项, 即氢气的体积产生率 ($Bq/m^3 \cdot s$), 它一般是位置的函数; J_T 为总的氢气通量密度流 ($Bq/m^2 \cdot s$), λ 为氢气的衰变常数 (s^{-1})。

(3) 式中氢的通量密度流 J_T 由两部分组成: 一是扩散密度流; 二是渗流密度流, 即:

$$J_T = J_D + J_i \quad (4)$$

因而, (3) 式可写为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - (1/\eta) \nabla \cdot (CV) - \lambda C + S \quad (5)$$

其中 D 是氢的扩散系数 (cm^2/s), 它与有效扩散系数的关系是:

$$D_e = \eta D \quad (6)$$

将方程 (5) 用直角坐标表示, 并分别用于不同介质, 则室内氢的三维瞬态传输方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \left[\frac{\partial}{\partial x} (D_i \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_i \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_i \frac{\partial C}{\partial z}) \right] \\ & - \frac{1}{\eta_i} \left[\frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} \right] - \lambda C + S_i \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $D_i, \eta_i, S_i, i=1, 2, 3$ 分别表示空气、混凝土和土壤的氢扩散系数、空隙率与氢的体积产生率, 其中空气中氢的产生率 $S_1=0$ 。

1.2 渗流速度方程和压差方程

当介质中存在压力时, 将在其毛细管中形成气体的流动, 流动速度由 Darcy 定律确定, 即:

$$V = - (k/\mu) \nabla (p + \rho g z) \quad (8)$$

式中 k 为介质的渗透率 (cm^2), μ 为空气的动力学粘性系数 ($Pa \cdot s$), p 为介质中的绝对压力 (Pa), ρ 为气体密度 (g/cm^3), g 为重力加速度 (m/s^2), z 为距离表面的深度 (cm)。

根据流体力学质量连续性要求, 气体密度和流动速度满足如下质量连续方程:

$$\frac{\partial (\eta \rho)}{\partial t} = - \nabla \cdot (\rho V) \quad (9)$$

将 Darcy 方程代入质量连续性方程, 有:

$$\frac{\partial (\eta \rho)}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\frac{k}{\mu} \rho \nabla (p + \rho g z) \right] \quad (10)$$

假设气体是理想气体, 则压力和密度满足理想气体状态方程, 即:

$$\rho = \frac{M}{RT} p \quad (11)$$

式中 M 是氢的气体分子量, R 是普适气体常数, T 是绝对温度 (K)。

如果气体也是绝热的, 则有:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{M}{RT} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (12)$$

把 (10) 式和 (11) 式代入 (9) 式, 就可得到介质中的压力方程, 即为:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{\eta} \nabla \cdot \left[\frac{k p}{\mu} \nabla (p + \rho g z) \right] \quad (13)$$

一般情况下介质空隙中气体的密度是很小的,因此由气体重量引起的压力差可以忽略不计,这样方程(12)可简化为:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{\eta} \nabla \cdot \left[\frac{k p}{\mu} \nabla p \right] \quad (14)$$

如果将介质中的绝对压力表示成平均压力和压差之和,即:

$$p = \bar{p} + \Delta p \quad (15)$$

那么,将(15)式代入(14)式,得:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = \frac{1}{\eta} \nabla \cdot \left[\frac{k \bar{p}}{\mu} \nabla \Delta p + \frac{k \Delta p}{\mu} \nabla \Delta p \right] \quad (16)$$

忽略二阶小量,方程(16)变为:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = \frac{1}{\eta} \nabla \cdot \left[\frac{k \bar{p}}{\mu} \nabla \Delta p \right] \quad (17)$$

式(17)就是压差分布方程。

用压差表示的速度方程为:

$$\mathbf{V} = -\frac{k}{\mu} \nabla \Delta p \quad (18)$$

将(17)式与(18)式表示为三维形式,有:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = \frac{1}{\eta_i} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_i \bar{p}}{\mu} \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_i \bar{p}}{\mu} \frac{\partial \Delta p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_i \bar{p}}{\mu} \frac{\partial \Delta p}{\partial z} \right) \right] \quad (19)$$

$$\begin{cases} u = -\frac{k_i}{\mu} \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \\ v = -\frac{k_i}{\mu} \frac{\partial \Delta p}{\partial y} \\ w = -\frac{k_i}{\mu} \frac{\partial \Delta p}{\partial z} \end{cases} \quad (20)$$

式中, k_i , $i=1, 2, 3$ 分别表示裂缝、混凝土和土壤中氢的渗透率,其中裂缝的渗透率为:

$$k_1 = \frac{e^2}{12} \quad (21)$$

式中 e 为裂缝宽度。

2 定解条件

2.1 氢传输方程的定解条件。

初值条件: 介质中氢浓度在 $t=0$ 时刻的值等于其稳态时的值。

微分方程的边界条件是: 在相同介质的计算边界处, 没有氢的净流动, 因而氢浓度的一阶偏导数为零^[2], 即:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=\pm \frac{a}{2}} = 0 \\ \left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{y=\pm \frac{b}{2}} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中, a , b 分别为房间的长度和宽度。

不同介质的交界处, 有氢的净流动, 根据连续性要求, 氢浓度及其密度流应在交界面连续^[1,2],

即:

$$\begin{cases} C(t, x, y, 0^+) = C(t, x, y, 0^-) \\ D_1 \eta_1 \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0^+} = D_2 \eta_2 \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0^-} \\ C(t, x, y, h^+) = C(t, x, y, h^-) \\ D_2 \eta_2 \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=h^+} = D_3 \eta_3 \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=h^-} \end{cases} \quad (23)$$

式中 h 是地板的厚度。

土壤中的无穷远处, 氡浓度等于单位体积单位时间内镭衰变产生的并能进入土壤空隙的氡^[1,2], 即:

$$C(t, x, y, -\infty) = C_0 \quad (24)$$

在现在已有的有关氡的文献^[3,4]中, 另一个边界条件是令地板表面的氡浓度等于零, 其理由是空气中的氡浓度远比地板和土壤中的氡浓度低。但仔细推敲一下不难发现, 虽然空气中的氡浓度比地板和土壤中的氡浓度低, 但由于连续性要求, 地板表面的氡浓度显然是可以和地板中的氡浓度相比较的。同时, 由于室内空气中的氡主要来至于地面, 因而氡浓度低于地面的浓度, 如果令地面的氡浓度等于零, 那么室内空气中的氡浓度就是一个负值, 这是不符合实际情况的。根据物理理论的要求, 氡浓度应在空气中的无穷远处为零^[3], 因此我们的边界条件是:

$$C(t, x, y, +\infty) = 0 \quad (25)$$

地板裂缝四周的边界条件: 在裂缝四周的边界处氡浓度及其密度流连续, 其形式与上面的一样。

2.2 压差方程的定解条件

初值条件: 介质中不同地点的压差在 $t=0$ 时刻的值等于其稳态时的值。

压差方程的边界条件^[5]是:

$$\begin{cases} \Delta p(t, x, y, 0) = \Delta p_0(t) \\ \Delta p(t, x, y, -\infty) = 0 \\ \frac{\partial \Delta p}{\partial x} \Big|_{x=\pm \frac{a}{2}} = 0 \\ \frac{\partial \Delta p}{\partial y} \Big|_{y=\pm \frac{b}{2}} = 0 \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \Delta p(t, x, y, h^+) = \Delta p(t, x, y, h^-) \\ \frac{\partial \Delta p}{\partial z} \Big|_{z=h^+} = \frac{\partial \Delta p}{\partial z} \Big|_{z=h^-} \end{cases} \quad (27)$$

式中 $\Delta p_0(t)$ 是地面的压力差。

裂缝四周的边界条件是: 在裂缝四周的边界处压差和其一阶导数连续。

3 环境因素对室内压差的影响^[5]

一般情况下, 环境气压、气温、风、机械通风等因素是随时间变化的。当这些因素发生变化时, 将改变介质中的速度和压力分布, 引起介质毛细管中气体的流动, 从而改变环境中的氡浓度。因此, 环境因素的变化是引起室内氡浓度改变的一个重要方面。

3.1 环境温度变化诱发的室内压差

空气是一种可压缩性流体, 可近似看作理想气体, 其密度和温度成反比。当环境温度与室内温度存在差异时, 将引起室内外密度差, 进而引起压力差, 这就是所谓的“堆积效应”(Stack

Effect)。根据流体静力学定律，压力差与密度差之间的关系为：

$$\frac{d\Delta p_s}{dz} = -g\Delta\rho \quad (28)$$

对上式积分并引入状态方程，那么由室内外温差引起的压力差为：

$$\Delta p_s = -\rho g \Delta T(z - NPL)/T_0 \quad (29)$$

式中： Δp_s ——由室内外温差所引起的压差 (Pa)； T_0 ——室外温度 (K)， ΔT ——室外温度减去室内温度的差值 (K)； z ——距离居室天花板的高度 (m)； NPL ——室内压力中值对应的高度 (m)。

3.2 风诱发的室内压差

环境风的变化，将在室内引起一个三维的压力分布，迎风面上产生正的压力差，背风面上产生负的压力差。若假定风按层流流动，根据贝努利定律，有：

$$\Delta p_w = A_i \rho_0 (\mathbf{V}_w \cdot \mathbf{V}_w) / 2 \quad (30)$$

式中 Δp_w 是风诱发的室内外压力差 (Pa)， A_i 是由建筑物结构、有效泄漏面积 ELA 及风向所决定的参数， $\mathbf{V}_w$ 是风流动的速度矢量 (cm/s)。

3.3 机械通风诱发的室内压差

随着人们生活水平的提高，室内安装通风设备已非常普遍，但当设备起动时，将引起室内外压力差，造成空气和氡气的流动。机械通风的形式一般有两种：平衡通风和排气通风。平衡通风不会引起室内外的压力差，造成室内氡浓度的变化。而排气通风则会引起压差，造成室内氡浓度的变化，由排气通风所引起的压差可表为：

$$\Delta p_{ev} = -(\rho_0/2)(Q_{ev}/ELA)^2 \quad (31)$$

其中： Δp_{ev} ——通风引起的压差 (Pa)， Q_{ev} ——通风流动率 (m^3/s)， ELA ——房间有效总泄漏面积 (m^2)。

一般情况下，环境因素的变化总是几种因素同时发生的，因此，由各种环境因素变化，引起的室内外总的压力差等于各个因素引起的压力差的总和，即：

$$\Delta p = \Delta p_s + \Delta p_w + \Delta p_{ev} \quad (32)$$

4 实验和参数的选取

在现有实验室条件下，我们完成了对土壤、混凝土和岩石的镭含量（比活度）及其密度（干的）的测量。为了检验所编程序的正确性，我们选用了一间不受人为干扰的实验室，作为计算模型，测量了房间和裂缝的尺寸，大气压力和室内的氡浓度。

4.1 土壤和混凝土镭含量及密度的测量。

对土壤和混凝土镭含量的测量，我们是选用了目前处于国内先进水平“环境样品放射性核素含量测量分析系统”完成的，土壤样品采集在我院院区，混凝土样品是我室实验室装修时留下的废弃混凝土块。样品经去除杂物后，烘干、称重、研磨、过筛，然后密封在样品测量盒中 ($\phi 75 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$)，放入仪器，进行测量。密度的测量是用精密天平称重来完成的。测量结果见表 1，表 2。

表 1 土壤和混凝土镭的比活度

	土壤	混凝土
比活度/ (Bq/kg)	33.7 ± 1.3	21.5 ± 1.1

表 2 土壤和混凝土干密度

	土壤	混凝土
密度/(g/cm ³)	1.06	1.15

4.2 房间及裂缝尺寸的测量

用卷尺分别测量了实验房间和裂缝的尺寸,其具体值为:房间尺寸:210(长)×210(宽)×260(高)cm³;裂缝尺寸:80(长)×0.3125(宽)×20(深)cm³,位于进门左面墙 89.8 cm,前面墙 110 cm;混凝土地板厚度为 20 cm。

4.3 室内大气压力和氡浓度的测量

为了保证大气压力测量的正确性,我们选用了壁挂式大气压力计和大气压力表来同时测量室内的气压变化,氡浓度则采用 REM-Ⅰ 型连续测氡仪测量,其读数见表 3:

表 3 室内大气压力和氡浓度读数*

北京时间	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00
压力计	995.90	995.92	995.91	995.89	995.88	995.92
压力表	995.90	995.92	995.91	995.89	995.88	995.92
氡浓度	6.0	5.7	5.5	5.9	6.5	6.6
北京时间	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
压力计	995.92	995.94	995.89	995.87	995.91	995.92
压力表	995.92	995.94	995.89	995.87	995.91	995.92
氡浓度	5.9	5.1	4.9	5.5	6.0	5.6

* 表中压力的单位是 hPa,氡浓度的单位 Bq/m³,室内平均气压为 995.90 hPa,室内平均氡浓度的 5.758 Bq/m³。

4.4 其它参数的选取。

计算中一些参数引自国内外大量文献。

本文选用的土壤和混凝土的参数见表 4 和 5。

表 4 土壤的特性参数^[4]

参 数	典型值	范 围
扩散系数/cm ² ·s ⁻¹	0.01	0.005~0.5
渗透率/cm ²	10 ⁻⁸	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁵
孔隙率	0.5	0.4~0.6
空隙密度	2650	2600~2800
发射系数/kg·cm ⁻³	0.2	0.05~0.7

表 5 混凝土的特性参数^[1]

参 数	典型值	范 围
扩散系数/cm ² ·s ⁻¹	10 ⁻⁴	1.4×10 ⁻⁴ ~0.5
渗透率(墙)/cm ²	10 ⁻⁶	10 ⁻¹¹ ~10 ⁻⁵
孔隙率	0.2	0.1~0.2
空隙密度/kg·cm ⁻³	2100	
发射系数	0.2	

其它参数的取值^[6,5]为：氨的衰变常数 $\lambda=2.06 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ，空气动力学粘性系数 $\mu=18.178 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，风诱发压力系数 $A_i=-0.13$ ，密封透风率 $EPR=0.78$ ，空气密度 $\rho_0=1.2041 \text{ kg/m}^3$ ，重力加速度 $g=9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，压力中值高度 NPL =天花板到地面距离的一半，房间有效泄漏面积 $ELA=0.0025 \text{ m}^2$ 。

5 计算结果和分析

利用差分方法，对室内氨的传输方程、速度方程、压差方程以及定解条件进行离散化，采用变步长空间网格，Gauss-Seidel 迭代算法，对差分方程进行数值求解。由于差分方程是隐式的，系数矩阵是块状正定的，根据误差理论和矩阵理论^[7]，差分方程的误差是不累积的，迭代过程是稳定的，一致收敛的。

由于室内的氨主要来源于地板和裂缝^[8]，因而在计算中，我们忽略了墙壁和天花板对室内氨的贡献。当然，考虑墙壁和天花板的作用，分析和计算方法仍然是一样的。

5.1 程序计算框图

三维瞬态计算程序的框图如图 2 所示：

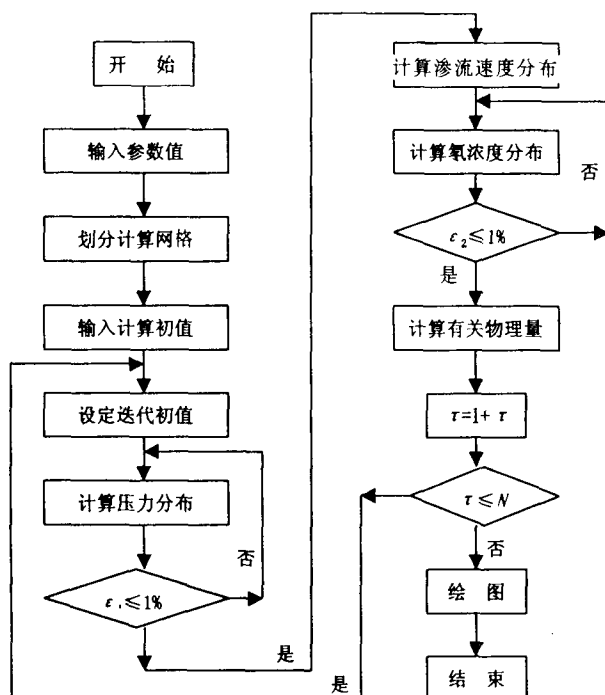


图 2 三维瞬态室内氨浓度的计算框图

图中 ϵ_1 , ϵ_2 是迭代误差, τ , N 是时间网格

节点变量与最大节点编号

5.2 计算结果与分析

5.2.1 程序的验证

利用实测的实验数据及其它筛选的参数，我们对三维瞬态程序进行了验证，将本程序计算的室内平均氨浓度与实测的室内氨浓度进行比较，其结果是令人满意的，数据列于表 6 中。

表 6 计算与实测室内氡浓度比较

北京时间	8: 00	9: 00	10: 00	11: 00	12: 00	13: 00
计算值	5.758	5.654	5.604	5.681	5.866	5.970
实测值	6.0	5.7	5.5	5.9	6.5	6.6
北京时间	14: 00	15: 00	16: 00	17: 00	18: 00	19: 00
计算值	5.966	5.868	5.842	5.927	5.987	5.955
实测值	5.9	5.1	4.9	5.5	6.0	5.6

* 表中氡浓度的单位为 Bq/m^3 。

5.2.2 计算结果与分析

(1) 北京时间 12 点, 裂缝中心剖面处土壤、地板及裂缝中的压差分布, 室内氡浓度分布, 地板表面扩散氡析出率与渗流板出率分布如图 3~图 6 所示:

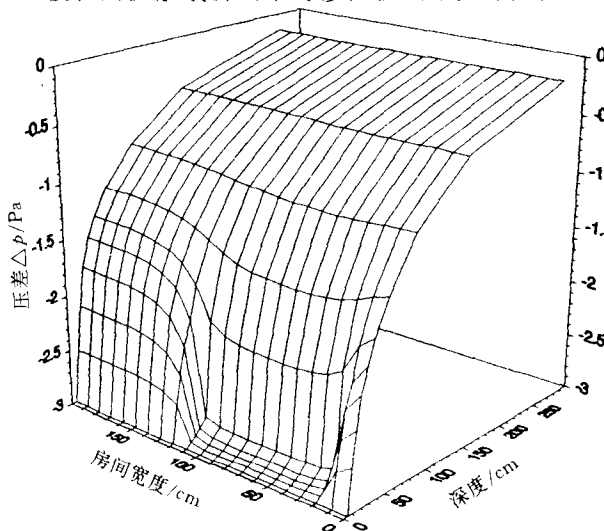


图 3 裂缝中心剖面上土壤、裂缝和地板中的压差分布

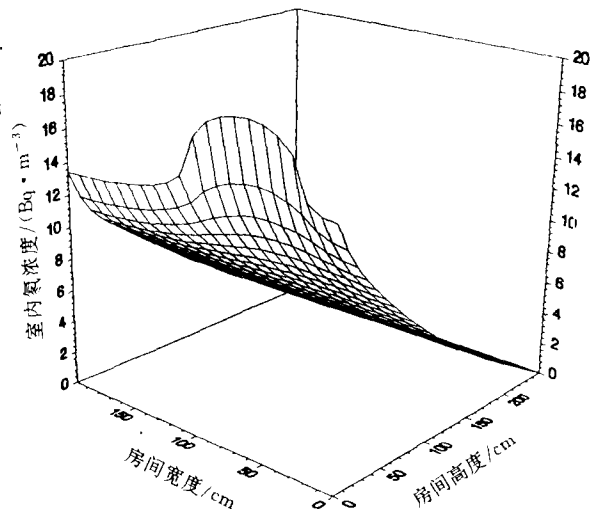


图 4 裂缝中心剖面上室内氡浓度分布

如图 3 所示: 北京时间 12 点时, 室内的压差是负的; 裂缝中压差与地面压差相差不大; 土壤和地板中的压差分布是随着深度增加逐渐增大的; 但在同一位置, 瞬态时的负压差比稳态时的负压差更高, 这是由于瞬态时的负压差受前一个时刻压差的影响。北京时间 11 点, 室内的压差也是负的, 因此, 12 点介质中的压差分布要同时受到两个时刻地面压差的影响。从室内氡浓度分布图 4 看到: 室内氡浓度是随着高度的增加逐渐减小的; 在裂缝开口附近, 氡浓度明显高于同层的其它地方, 并向四周传播, 如图中凸出的地方。图 5 显示的裂缝及其附近地板表面的氡扩散析出率表明, 裂缝底部的扩散析出率远大于地板表面其它地方的扩散析出率。这是由于土壤与混凝土的扩散系数相差 2~3 个数量级, 且土壤的孔隙率大于混凝土的孔隙率的原故; 又由于氡析出的连续性要求, 因而裂缝附近表面的氡扩散析出率也大于地板表面其它地方的氡扩散析出率。图 6 显示了裂缝底面及其附近地板表面氡的渗流析出率分布。由于土壤的氡渗透率比混凝土的氡渗透率大, 因而裂缝底部的渗流速度比地板表面的渗流速度大; 又由于裂缝中的氡浓度比室内的氡浓度高, 所以由渗流速度与氡浓度确定的渗流析出率在裂缝的底部及其附近要比地板表面的其它地方大。如

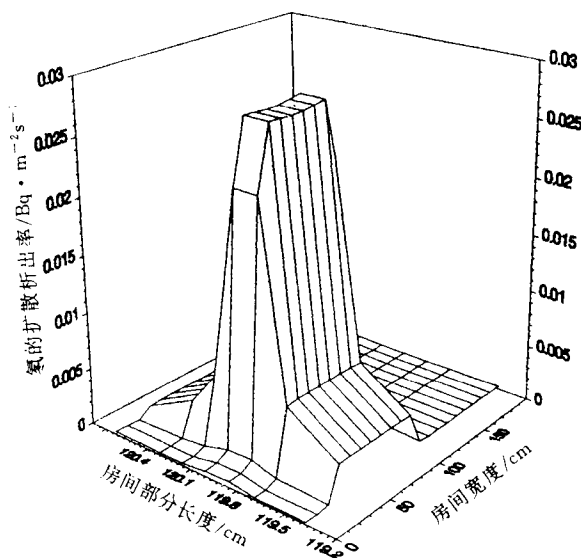


图5 裂缝底部及其附近地面的扩散析出率分布

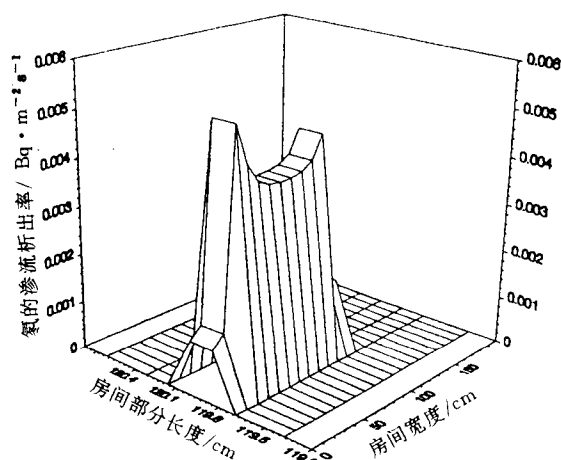


图6 裂缝底部及其附近地面的渗流析出率分布

果在计算室内氡浓度时,假设地面的浓度等于零,那么裂缝底部与地板表面的氡渗流析出率也就等于零,这显然是不符合实际情况的,而本文提出的边界条件则较好的解决了室内有压差时,表面氡的渗流析出率问题。比较图5和图6,可以发现同一位置的氡扩散析出率比渗流析出率大,这说明扩散在氡的传输中占主要的地位,但随着室内压差的增大,渗流将起到越来越重要的作用。

(2) 北京时间16点时,裂缝中心剖面处土壤、地板及裂缝中的压差分布,室内氡浓度分布,地板表面扩散析出率与渗流析出率分别如图7~图10所示:

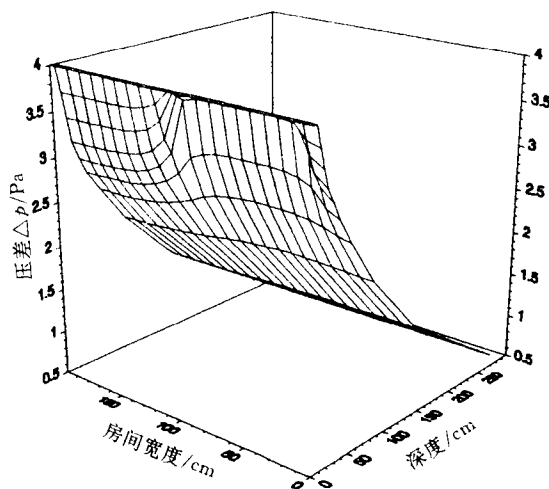


图7 裂缝中心剖面上土壤、
裂缝和地板中的压差分布

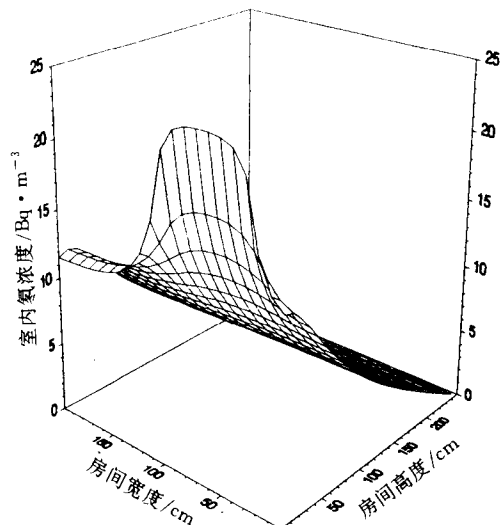


图8 裂缝中心剖面上
室内氡浓度分布

由图7可以发现:北京时间16点,室内地面的压差是正的;与负压差的情况相似,地板和土壤中的压差逐渐减小,裂缝中的压差与地面的压差差不多,降低很少。与负压差的情况比较,正压差时由于氡的反向渗透和扩散,使室内的氡浓度随时间逐渐降低,这一点可以从图8中看出,但裂缝开口处的氡浓度仍然高于室内其它地方的氡浓度。从图9可以看出:正压差下,氡的扩散析

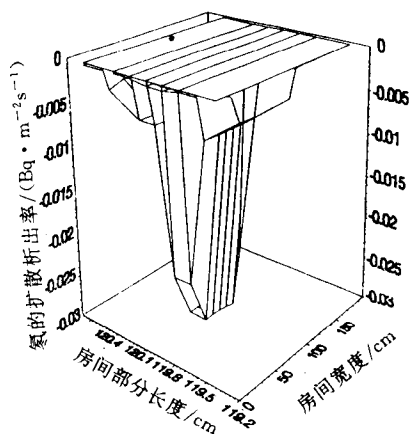


图9 裂缝底部及其附近地面的扩散析出率分布

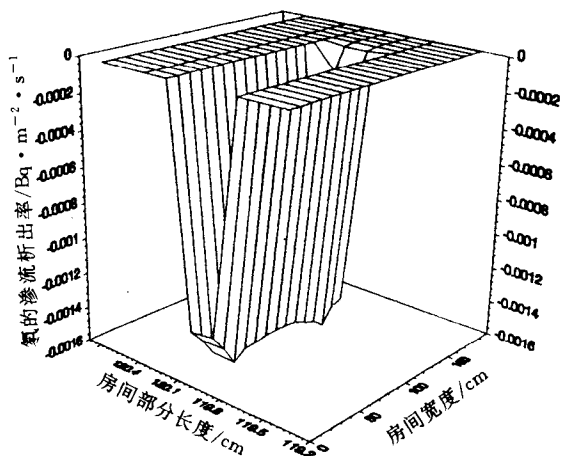


图10 裂缝底部及其附近地面的渗流析出率分布

出率是负的；裂缝底部及其附近地面的氡扩散析出率比地面的其它地方更低。这是由于正的压差，产生反向氡的渗流，从而改变了氡的梯度方向。如图10，正压差时，渗流速度与坐标轴是反向的，而氡浓度总是一个正数，因此表面氡的渗透率是负的；裂缝底部的渗流速率比地面其它地方的渗流速率大，所以氡的渗流析出率就更低。

(3) 环境因素与室内和裂缝中平均氡浓度的关系

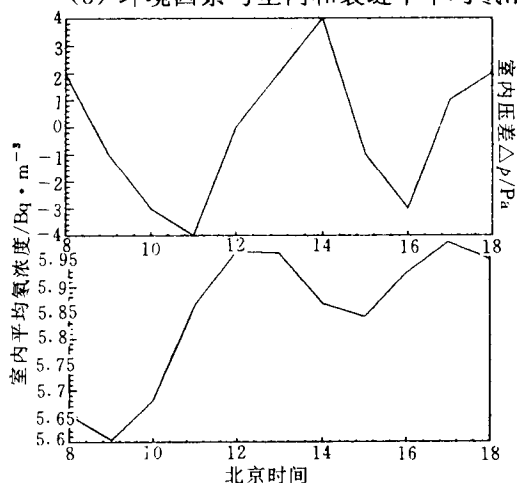


图11 室内压差与室内平均氡浓度随时间的变化

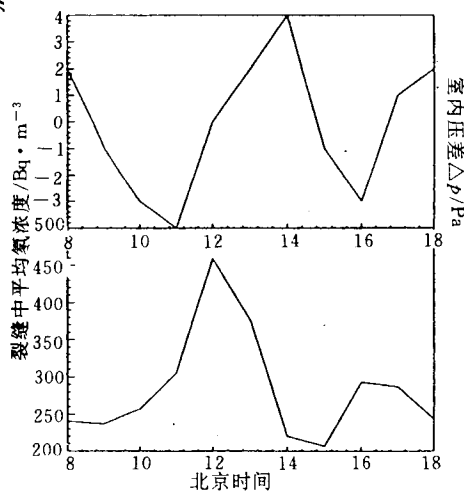


图12 室内压差与裂缝中平均氡浓度随时间的变化

如图11和12所示，随着不同时刻室内压差的变化，室内的氡浓度也发生相应的变化：正压差增大，氡浓度减小，正压力减小，氡浓度增大；负压差增大，氡浓度增大，负压力减小，氡浓度减小。但应注意到，氡浓度的变化与压差的变化并不是完全反相位的，其相位差大于 180° ，这是由于压差从大到小或从小到大时，扩散方向的改变迟缓一段时间。这与文献[9]的结论是一致的。通风是降低室内氡浓度的有效措施，这一结论由图13所示的室内氡浓度与通风率的关系得到了证实。由图可见，通风一开始，室内的氡浓度就迅速降低，但只要通风一结束，室内的氡浓度又逐渐开始上升。因此，为了使室内保持低的氡浓度水平，就应该坚持定时通风，而且应是吸气通风。（图中的时间是指以开始的时刻记为零，然后逐渐增加，不是时间增量。以下图中的情况相

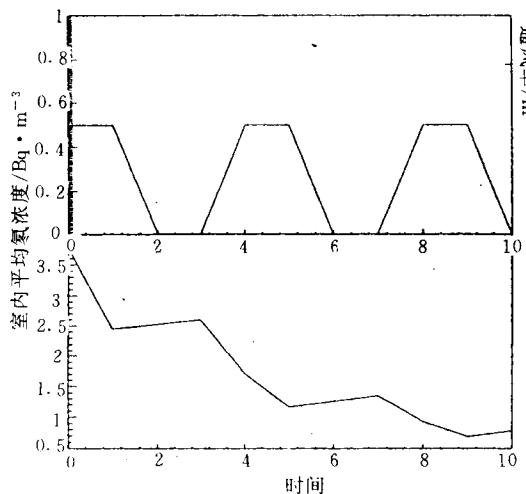


图 13 通风率与室内平均氡浓度随时间的变化

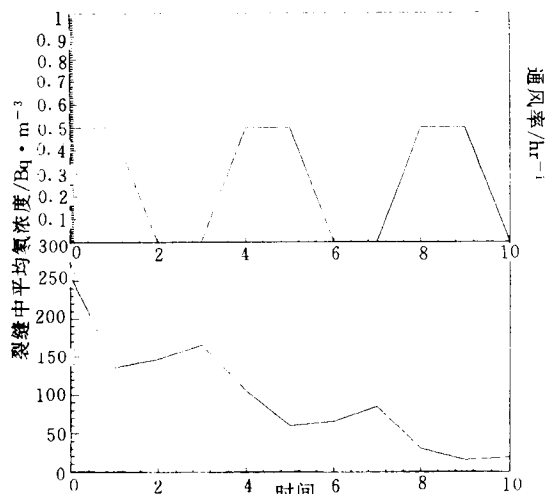


图 14 通风率与裂缝内平均氡浓度随时间的变化

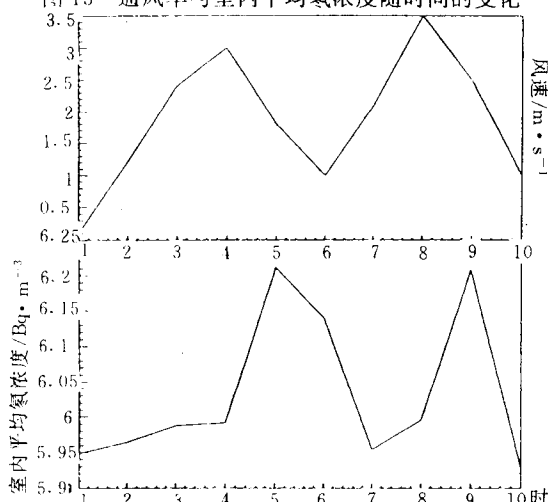


图 15 风与室内平均氡浓度随时间的变化

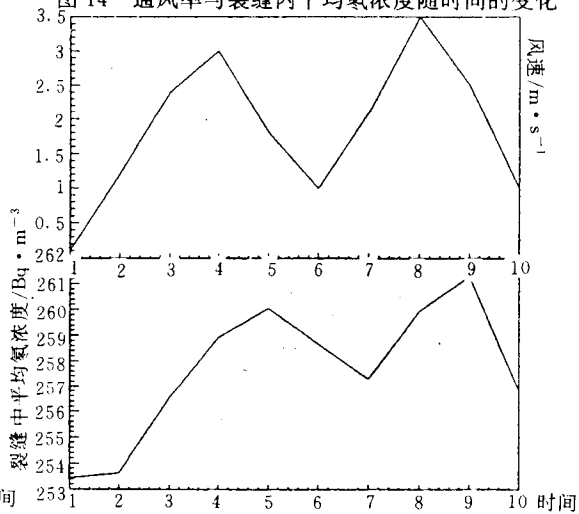


图 16 风与裂缝内平均氡浓度随时间的变化

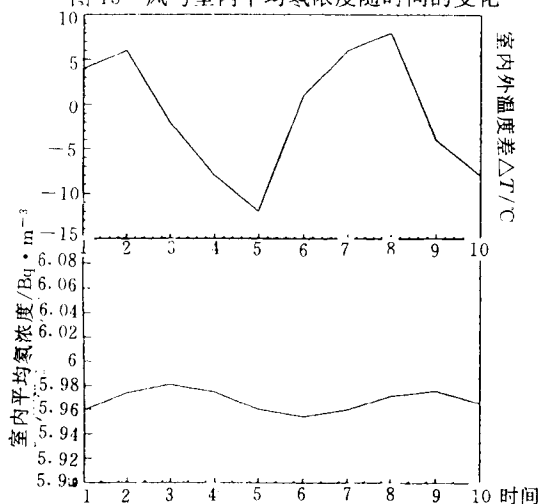


图 17 室内外温差与室内平均
氡浓度随时间的变化

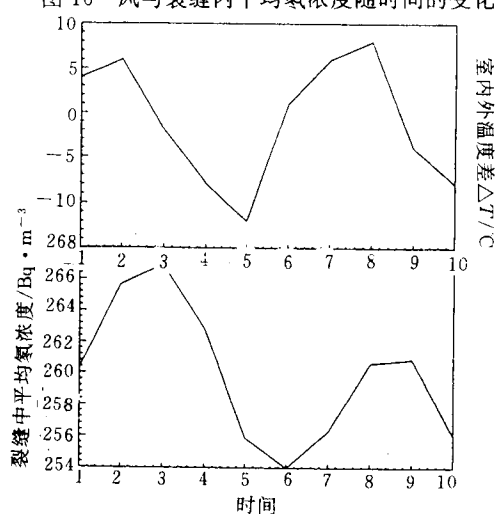


图 18 室内外温差与裂缝内平均
氡浓度随时间的变化

同)。同室内一样,通风也将极大的影响裂缝内的氡气浓度。如图 14 所示。当环境有风吹动时,将在室内产生负压差,它对室内与裂缝中氡浓度的影响规律与环境压力变化对室内与裂缝中氡浓度的影响规律是一样的:风速增大,室内与裂缝中的负压差也增大,因而室内与裂缝中的氡浓度相应的增大;反之,当风速减慢或停止时,室内与裂缝中将出现正的压差,因而室内与裂缝中的氡浓度将降低,如图 15 和 16 所示。当环境温度与室温不相同,将在室内产生压力差,因而影响室内与裂缝中的氡气浓度,如图 17 和 18 所示。如果环境温度高于室内温度,则室内将出现负的压差,因而室内与裂缝中的氡浓度增大。反之,如果环境温度低于室内温度,则室内将出现正的压差,这时室内与裂缝中的氡浓度将降低。

参考文献

- 1 Sranden E, Berteig L. Radon In Dwelling And Influencing Factors. Health Phys. 1980, 39 (8): 275~284
- 2 Kerry A. Landman. Diffusion of Radon Through Cracks In a Concrete Slab. Health Phys. 1982, 43 (3): 225~230
- 3 HE Bin, Shang A. G., And Guo H. P., Discussion About Surface Boundary Conditions of Radon Concentration and Surface Exhalation Rate Calculations in Indoor Concrete Slab. Health Phys, 1998, 74 (3): 366~369
- 4 Celso O. Lourelro, etc Three-dimensional Simulation Of Radon Transport Into House With Basement Under Constant Negative Pressure. Environ. Sci. Technol. 1990, 24 (9): 1338~1348
- 5 LBL-22067
- 6 何斌. 氡的动力学研究: [学位论文], 西安交通大学, 1998
- 7 王典恩编“矩阵分析”, 陕西人民教育出版社, 1988
- 8 王功鹏, 赵法编著“生物和环境样品放射分析方法”, 中国环境科学出版社, 1987
- 9 Tsang Y. W., And Narasimhan T., " Effects Of Periodic Atmospheric Pressure Variation On Radon Entry into Buildings. " J. Geophy. Res. 97, 1992