

建 筑 工 程

防 氦 技 术

郑天亮 周竹虚 尚 兵 编著



北京航空航天大学出版社

10

2006

建筑工程防氡技术

郑天亮 周竹虚 尚 兵 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

全书系统、全面地介绍了建筑工程防氡的理论与技术,包括氡的危害、来源,氡与地质构造及建筑材料的关系,氡的测量方法,氡的防护标准,国内外建筑防氡的方法与经验,以及建筑工程防氡的基本原则、技术措施和施工做法等内容,使读者对氡的危害和治理有比较全面的了解。书中对一些专业名词和术语、公式推导及理论概念的叙述力求深入浅出,并配以必要的插图和表格,图文并茂,易于阅读理解。

本书的读者对象主要是从事建设规划管理的人员,建筑工程特别是地下工程设计、施工、维护、管理的技术人员,科研和教学人员,研究生、大学生和其他读者。

图书在版编目(CIP)数据

建筑工程防氡技术/郑天亮等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2006.6

ISBN 7-81077-782-3

I. 建… II. 郑… III. 建筑工程—氡—预防
IV. TU7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 018840 号

建筑工程防氡技术

郑天亮 周竹虚 尚 兵 编著

责任编辑 王媛媛

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpres@263.net

北京时代华都印刷有限公司印制 各地书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:9.25 字数:249 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷 印数:2 500 册

ISBN 7-81077-782-3 定价:28.00 元

前 言

现代社会中,人一生的大部分时间是在建筑物内度过的。在发达国家,人们有 90 % 以上的时光在室内度过。我国城镇居民在室内度过的时间也在 80 % 以上。室内环境的好坏,对人体的健康格外重要。有学者提出,继煤烟型污染和光化学烟雾型污染之后,人们已经进入一个以室内空气污染为标志的第三污染时期。也正是在这样的大背景下,人们对室内空气质量的重要性有了更进一步的认识。

室内环境污染分为放射性污染、生物性污染和化学性污染。氡污染是一种放射性污染。20 世纪 60 年代末期人们首次发现室内氡危害。氡对人的辐射占人体所受到的全部环境辐射的 55 % 以上,对人体健康威胁很大。氡气被吸入人体呼吸道后,除了氡本身通过放射性衰变释放出 α 粒子对人体造成辐射外,氡衰变产生一系列新的固态的放射性氡子体。这些短寿命子体粘附在气管壁和肺泡上并释放出 α 、 β 和 γ 射线,造成更强的内辐射。吸入氡对人体产生的危害主要是氡的短寿命子体造成的。科学研究已经证实,氡及其子体是诱发肺癌的主要因素之一。氡已被世界卫生组织(WHO)公布为 19 种致癌物质之一,被国际癌症机构(IARC)列为 I 类致癌因素。氡无色无味,使它的危害更具隐蔽性和危险性。氡对人体健康的危害已受到国内外社会的普遍关注与重视。

如何控制、防止和治理室内环境的高氡污染,是避免氡危害人民身体健康的关键。室内环境主要包括地面建筑和地下建筑内部空间。随着我国经济发展,人民生活水平不断提高,公共建筑、住宅建筑和室内装修、装饰水平的档次也在不断提高,人们都希望营造一个舒适典雅的生活与工作环境。与此同时因为建筑材料和地

质环境引起的建筑物内部环境氡超标现象在不少地区严重存在。居民与房地产开发者之间的氡超标纠纷也时有发生。以建筑装修、装饰材料为主要污染源的室内空气污染问题不仅在地面建筑中存在,在地下空间中也同样存在。由于地下工程的空间相对封闭、通风条件差,空气污染物容易积聚,在一般情况下,污染程度比地面更加严重。城市地下空间是人类尚未充分利用的宝贵自然资源,开发利用地下空间是解决城市土地资源紧缺,缓解城市交通拥挤、环境污染与生态恶化等“城市综合症”的有效措施。地下建筑由于直接和土壤岩石接触,氡的扩散与渗透比地面建筑影响更大,问题更严峻。因此建筑工程包括地面和地下工程的防氡问题是一个必须直面的与人民健康密切相关的重要问题。

本书作者在承担人防工程防氡材料研究这一课题中,查阅和收集了国内外大量有关氡的文献资料和著作,受到的启示和裨益很大,同时也感到,在氡的防治工作中,还缺少一部综合的理论和实践相结合的比较全面的著作。正是基于这样一个出发点,本书作者在国内外专家、学者和工程技术人员研究成果的基础之上,结合作者多年来在氡的检测与预防,建筑工程防氡设计与防氡新材料研究开发的研究成果与工作经验,编著了这部书。

编写本书是为了帮助工程技术人员了解氡的基本性质、氡的危害以及建筑工程内部环境中氡的来源,掌握防氡的理论和应当采取的技术措施,了解工程环境中氡的测量方法等;帮助读者全面掌握建筑工程防氡技术知识,控制建筑工程内部环境氡污染,提高工程内部环境质量。

全书共分10章。第1章、第2章、第4章和第9章由尚兵编写,第3章、第8章以及附录由周竹虚编写,第5章、第6章、第7章和第10章由郑天亮编写,由郑天亮统编全书。此外杨青、林莉萍、张华、王轩和王月红参加了资料的收集整理、部分文字内容修改与图表的绘制和修饰。

本书在编写过程中得到了北京航空航天大学材料学院、研究

生院、教务处和北航出版社等单位的大力支持和帮助,在此特致谢意。作者还要特别感谢核工业湖南矿冶局张哲副总工程师,他在氡的析出与排氡通风的理论分析上给予作者以无私的帮助和指导。氡问题专家、环境工程研究员、全国首批执业核安全注册工程师、清华大学工程物理系朱立博士对全书进行了审阅并给予了学术指导,这里由衷地表示感谢。

本书的读者对象主要是从事建设、规划、管理的人员,建筑工程特别是地下工程设计、施工、维护、管理的技术人员,相关专业的科研和教学人员、研究生、大学生和其他读者。

由于建筑工程内部环境氡污染的防治还是一门新的技术,囿于我们的经验和水平,书中错误敬请广大专家和读者批评指正。

郑天亮

2005年10月

目 录

第 1 章 氡的基本知识

1.1 放射性基础知识	1
1.2 氡的性质	3
1.2.1 氡的理化性质	3
1.2.2 氡的同位素	4
1.2.3 ^{222}Rn 的辐射特征	5
1.3 大气环境中的氡	8
1.3.1 大地的释放	8
1.3.2 海洋的释放	9
1.3.3 植物和地下水的载带	9
1.3.4 核工业的释放	9
1.3.5 煤的燃烧	10
1.3.6 磷酸盐工业的释放	10
1.3.7 天然气的燃烧	10
1.3.8 建筑物的释放	11
1.4 氡对健康的危害	13
1.4.1 斯尼伯格矿山病	13
1.4.2 流行病学调查	14
1.4.3 氡子体致肺癌的机理	15
1.4.4 氡致肺癌危险估计	16
1.4.5 氡的毒性	17
1.5 氡的浓度单位及换算	17
1.5.1 氡浓度 C_{Rn} (Radon Concentrations)	18
1.5.2 平衡当量氡浓度 EEC_{Rn} (Equivalent Equilibrium	

Concentrations)	18
1.5.3 α 潜能浓度 PAEC 或 C_p (Potential Alpha Energy Concentration)	18
1.5.4 平衡因子 F (Equilibrium Factor)	19
第 2 章 地面工程室内环境氡的来源和氡水平	
2.1 斯坦利事件与室内氡	21
2.2 室内氡的来源	22
2.2.1 氡的扩散和迁移	22
2.2.2 室内氡的来源	24
2.2.3 室内氡的进入模型	26
2.3 我国室内氡浓度的水平与分布	27
2.3.1 以往我国对环境氡浓度的研究	27
2.3.2 近年来我国对室内氡水平的研究	29
2.3.3 我国室内氡浓度的地区分布	31
2.3.4 我国主要城市房屋中的氡浓度的变化趋势	33
2.4 高氡建筑物原因分析	35
2.4.1 建筑材料	35
2.4.2 传统生土建筑	39
2.4.3 大型建筑物	41
2.4.4 伴生矿与温泉	42
第 3 章 地下工程内部环境中氡的来源和氡水平	
3.1 地下工程内部环境中氡的来源	44
3.1.1 岩石和土壤	44
3.1.2 地下水	47
3.1.3 建筑材料	48
3.2 地下工程内部环境的氡水平	50
第 4 章 氡的控制标准	
4.1 辐射防护的基本原则和 ICRP 的建议	70
4.2 国外氡的控制标准	72

4.3 我国有关氢的控制标准	76
第5章 氡地质潜力与氡地质势图	
5.1 氡地质潜力的评价	81
5.1.1 氡地质潜力调查	82
5.1.2 地质资料	83
5.1.3 航空放射数据	85
5.1.4 土壤测量数据	86
5.1.5 室内氡数据	87
5.1.6 氡指数和置信度指数	87
5.2 氡地质远景势图	89
5.2.1 美国的氡远景	90
5.2.2 我国的氡地质填图与氡地质势研究	93
第6章 建筑工程防氡理论分析	
6.1 氡的迁移机制	97
6.1.1 氡借助母体长距离迁移(有源氡迁移)	97
6.1.2 氡借助流体长距离迁移(无源氡迁移)	97
6.1.3 氡的扩散迁移(无源氡迁移)	98
6.2 氡的扩散系数与射气系数	98
6.2.1 扩散系数	98
6.2.2 射气系数	100
6.3 射气介质表面的氡析出	102
6.3.1 氡在射气介质中的传播	102
6.3.2 半无限大介质表面的氡析出	104
6.4 氡的积累	115
6.4.1 氡积累的一般方程和计算模型	115
6.4.2 封闭空间中氡的积累	120
6.4.3 稳定通风状态下,通道型通风空间风流中 氡浓度的增长	123
6.4.4 房间型通风空间中的氡浓度	126

第7章 地面建筑室内氡污染的防治措施

7.1 国外居住建筑常用的降氡方法	128
7.1.1 自然通风	128
7.1.2 强迫通风	129
7.1.3 热回收式通风	130
7.1.4 覆盖暴露的土壤	131
7.1.5 密封裂缝和开口	131
7.1.6 排水孔管抽气	132
7.1.7 从地板下面抽气通风	133
7.1.8 砌块墙通风	134
7.1.9 防止室内负压	135
7.1.10 室内增压	135
7.1.11 地基减压	136
7.1.12 空气净化器	137
7.2 国外新建住宅的防氡方法	137
7.2.1 氡进入住宅的主要途径	137
7.2.2 新建建筑物的原则	139
7.2.3 减少氡进入室内路径的方法	140
7.2.4 减少真空效应的方法	143
7.2.5 易于实行降氡的建造房屋的方法	144
7.3 国外高氡房屋的确认和采取降氡改造的实例	146
7.3.1 初次测量	147
7.3.2 跟踪测量	147
7.3.3 氡的来源分析	147
7.3.4 地质潜势分析	148
7.3.5 房屋的降氡改造	150
7.4 国内地面建筑室内氡污染的主要防治措施	152
7.4.1 地基或底层地面的防氡处理	153
7.4.2 墙面的防氡	154

第 8 章 地下建筑防氡设计

8.1 氡污染防治的指导思想和原则	156
8.2 地下工程的勘察选址	159
8.3 工程建筑材料的放射性核素含量的控制	167
8.3.1 工程建筑材料的放射性核素含量	167
8.3.2 工程建筑材料的放射性核素含量指标—— 内照射指数和外照射指数	169
8.3.3 工程建筑材料的放射性核素含量指标控制	170
8.3.4 国内外建材放射性核素限量标准的比较 ..	174
8.3.5 地下工程建筑材料放射性核素限量的 控制的注意事项	175
8.4 地下工程建筑隔氡措施	178
8.4.1 地下工程建筑隔氡主要解决氡向室内的 对流与扩散	178
8.4.2 地下工程围护结构的防氡要求和建筑防氡的 构造措施	182
8.4.3 地下工程围护结构内的建筑防氡层主要是 防止氡的扩散进入	188
8.5 工程通风降氡的计算与选择	192
8.5.1 通风降氡的计算	193
8.5.2 地下工程内表面氡平均析出率的估算	194
8.5.3 降氡通风率的选择	196
8.5.4 降氡通风在工程中的应用	198
8.6 工程给水排水的防氡设计	199
8.6.1 水中氡向室内空气中的扩散转移	200
8.6.2 地热水资源的开发和应用	201
8.6.3 工程给排水的防氡设计	203
8.7 防氡工程验收	204

8.7.1	民用建筑工程及其室内装修工程验收时, 应检查下列资料	205
8.7.2	防氡工程验收的评价	205
第9章 氡浓度的测量		
9.1	室内氡浓度的测量	207
9.1.1	概 述	207
9.1.2	室内氡测量的不确定度	208
9.1.3	快速测量和连续测量方法	211
9.1.4	累积测量方法	216
9.1.5	氡衰变产物的测量	221
9.1.6	筛选测量和跟踪测量	224
9.1.7	质量控制	226
9.1.8	对氡测量仪器和人员的基本要求	228
9.2	土壤氡浓度的测量	229
9.2.1	静电扩散法	230
9.2.2	静电收集- α 谱分析	230
9.2.3	ATD 探测器	232
9.3	表面析出率的测量	233
9.3.1	α 谱法	233
9.3.2	闪烁室法	235
9.3.3	驻极体法	235
9.4	水中氡浓度的测量	236
第10章 防氡材料与施工		
10.1	国内外建筑防氡材料的研究进展	238
10.2	防氡材料氡发射率检测方法	240
10.2.1	驻极体法测量氡表面析出率	240
10.2.2	活性炭法检测	243
10.3	不同建筑材料的防氡性能研究	243
10.3.1	聚合物水泥砂浆的防氡性能研究	243

10.3.2	其他建筑材料的防氡性能检测	253
10.4	防氡涂料的研究	254
10.4.1	墙面和顶面的防氡涂料	255
10.4.2	防氡复合地面材料	255
10.4.3	防氡涂料的制备工艺	256
10.4.4	颜料浆主要组分的选择	257
10.4.5	防氡涂料基本配方的确定	259
10.4.6	颜基比对涂膜防氡效率的影响	259
10.4.7	厚度对涂膜防氡效率的影响	260
10.4.8	不同涂膜的防氡效率	261
10.4.9	自然老化对涂膜防氡效率的影响	261
10.4.10	防氡涂层防氡效率检测	262
10.4.11	涂料性能和有害物质含量检测	263
10.4.12	抗裂封底涂层性能检验	264
10.5	防氡工程的施工	264
10.5.1	防氡工程的设计要求	264
10.5.2	建筑工程防氡施工需要注意的问题	265
10.5.3	施工要求	267
10.5.4	材料要求	268
10.5.5	防氡涂料施工方法	268
10.6	防氡工程验收	270
10.6.1	民用建筑工程及其室内装修工程验收时 应检查的资料	270
10.6.2	防氡工程验收的评价	271

附录 有关标准规范目录

参考文献

第 1 章 氡的基本知识

1.1 放射性基础知识

在自然界中有一些原子核是不稳定的,能够自发地发生衰变成为另一种原子核。这些不稳定的原子核,被称为放射性原子核(或放射性核素),这个自发衰变过程叫做放射性衰变。在放射性衰变过程中,原子会放出 α 粒子、 β 粒子、 γ 光子、中子及其他射线。现在已经发现的 111 种元素的 2 500 多种同位素中,大约只有 300 多种是稳定核素,剩下 2 000 多种是放射性核素。大约有 60 种是天然放射性核素,其余是用人工方法制造的放射性核素。放射性广泛地存在于自然界中,与人们生活密切相关,因此应该对放射性的基本特性有所了解。

1. 放射性与放射性同位素

原子核自发地放射出射线的性质称为放射性。具有放射性的同位素称为放射性同位素。含有放射性核素的物质称为放射性物质。

2. 三种常见的射线

(1) α 衰变:由不稳定的重原子核($Z > 83$)自发放出 α 粒子的转变称为 α 衰变。 α 粒子由高速运动的氦原子核(2 个质子+2 个中子)组成。 α 粒子的贯穿本领最小,一张纸就可以将 α 粒子挡住,但其电离作用最强。 α 衰变后产生的新核的质量数比原核的质量数减少 4,新核的电荷数比原核的电荷数减少 2,所以新核在元素周期表中的位置要向前移两位。如 ${}^{224}_{88}\text{Ra} \longrightarrow {}^{220}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ 。

(2) β 射线:高速运动的电子流。它的贯穿本领比 α 射线强,但电离作用比 α 射线弱。原子核自发发射 β 射线的转变称为 β 衰

变。 β 衰变分 β^- 衰变和 β^+ 衰变,原子核发生 β 衰变后,电荷数改变一个单位,质量数不变,如 ${}_{90}^{234}\text{Th} \longrightarrow {}_{91}^{234}\text{Pa}^m + e + \bar{\nu}$ 。

(3) EC衰变:电子俘获衰变,是原子核俘获轨道电子并放射中微子的放射性衰变。一次EC衰变后,该原子核的原子序数减少1,质量数不变,如 ${}_{23}^{48}\text{V} + e \longrightarrow {}_{22}^{48}\text{Ti} + \nu$ 。

3. 半衰期

放射性元素衰变到原来数量一半时所需的时间称为该放射性元素的半衰期。任一放射性元素的半衰期都是定值,但不同的放射性元素的半衰期相差很大,短的不到 $1\mu\text{s}$,长的可到几十亿年。

4. 放射性活度

一个放射源在单位时间内发生衰变的原子核数称为它的放射性活度(或称衰变率)。

5. 放射性比活度

某种核素的放射性比活度是指物质中的某种核素放射性活度除以该物质的质量而得的商。

$$\text{表达式} \quad a = \frac{A}{m}$$

式中: a 为放射性比活度,单位为 $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$; A 为核素放射性活度,单位为 Bq ; m 为物质的质量,单位为 kg 。

$1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$, Bq 为贝可[勒尔],表示每秒衰变一次。

6. 电离辐射

α 粒子、 β 粒子、质子等带电粒子,可直接引起物质电离; X 射线、 γ 光子和中子等不带电荷,与物质作用产生的“次级粒子”也可使物质电离。所有这些现象,统称电离辐射,习惯简称为辐射。另外,红外线、紫外线、微波、激光等被称为非电离辐射。非电离辐射的能量通常较低,不足以改变物质的化学性质。相反,电离辐射(例如 α 粒子及 β 粒子)有足够的能量使原子中的电子游离而产生带电离子。电离过程通常会引发生物组织产生化学变化,因而对生物构成伤害。辐射是无声、无色、无臭、无味的,只有通过特殊的

仪器才可以探测和度量到。

7. 照射量

表示 X 射线或 γ 射线在空气中电离能力大小的物理量。国际制单位为 C/kg(库[仑]/千克), 原来的专用单位为 R(伦[琴]), $1 \text{ C/kg} = 3\,876 \text{ R}$, $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ 。

8. 吸收剂量

表示在单位质量被照射物质中吸收电离辐射能量大小的物理量。国际制单位是 Gray(戈[瑞]), 用符号 Gy 表示, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ 。以往常用单位是 Rad(拉[德]), $1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rad}$ 。

9. 剂量当量

人体组织接受不同类型辐射时, 尽管吸收剂量相同, 但所引起的生物学效应却因辐射类型而异。0.1 Gy 的快中子吸收剂量产生的生物学损伤与 0.1 Gy 的 γ 辐射吸收剂量产生的生物学损伤是不同的。因此, 从辐射防护角度考虑, 为对各种类型致电离辐射的生物效应有一可比尺度, 定义了剂量当量(H)。

$$H = DQN$$

式中 Q 称为品质因数; N 是其他修正因数的乘积, 目前暂定为 1。

剂量当量的国际制单位为 J/kg(焦[耳]/千克), 剂量当量的 SI 单位名称是 sievert(希[沃特]), 符号为 Sv, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ 。

1.2 氡的性质

1.2.1 氡的理化性质

氡(Rn)的原子序数是 86, 位于元素周期表第 VI 周期的零族元素, 属惰性气体族, 其化学性质不活泼, 如图 1-1 所示。化学物质登记编号 CASRN (Chemical Abstracts Service Registry Number) 为 10043-92-2。

常温下氡是一种无色无味的放射性气体, 分子直径仅为 0.22

nm。氡转化为固态的温度约为 $-113\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，熔点为 $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，沸点为 $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1个标准大气压下氡气的密度为 $9.73\times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$ ，摩尔体积为 $50.5\text{ cm}^3/\text{mol}$ 。

氡易溶于水和有机溶剂。在水中的溶解度与温度有关， $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时氡的溶解度分别为 $510\text{ cm}^3/\text{L}$ 、 $230\text{ cm}^3/\text{L}$ 和 $169\text{ cm}^3/\text{L}$ 。氡在脂肪中的溶解度比水高120倍，氡在人体中的毒理与这一特征有一定的关系。氡易被活性炭、橡胶、硅胶、石蜡、黏土等吸附。常温下氡及其子体在空气中能形成放射性气溶胶而污染空气。

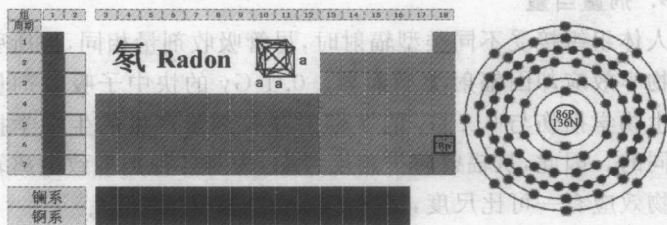


图 1-1 氡在化学周期表的位置和氡原子的外层电子排列

1.2.2 氡的同位素

1899年德国科学家欧文(R. B. Owens)在研究钍放射性时，首先发现放射性气体 ^{220}Rn 。1900年他的同事道恩(F. Dorn)发现了 ^{222}Rn 。1908年雷姆(Rem)和戈瑞(Gray)通过实验将氡分离，确定了其在周期表中的位置。

氡共有33种同位素，从 ^{196}Rn 到 ^{228}Rn 。最重要的是3个天然放射系(铀系、钍系和锕系)中镭的子体 ^{222}Rn (Radon)、 ^{220}Rn (Thoron)和 ^{219}Rn (Actinium emanation)。 ^{219}Rn 半衰期不到4s，从它产生的地点到人类呼吸带之前就衰变完了； ^{220}Rn 的半衰期为55.6s，在特定的环境下才有卫生学意义，通常所说的氡仅指 ^{222}Rn 。