

地下工程与人居环境 氡防护技术

张 哲 朱民安 张永祥 著



原子能出版社

地下工廠與人居環境 同防乎-捷市

◎ 林 豐 著 吳 敏 譯

地下工程与人居环境 氦防护技术

张 哲 朱民安 张永祥 著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

地下工程与人居环境氡防护技术/张哲,朱民安,张永祥著.

—北京:原子能出版社,2010.10

ISBN 978-7-5022-5043-0

I. ①地… II. ①张… ②朱… ③张… III. ①地下工程—氡—辐射防护②民用建筑—氡—辐射防护 IV. ①X591

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 183205 号

地下工程与人居环境氡防护技术

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 谭俊 黄厚坤

责任印制 潘玉玲

印刷 保定市中画美凯印刷有限公司

经销 全国新华书店

开本 787 mm×1092 mm 1/16

印张 18.5 字数 462 千字

版次 2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5022-5043-0 定价 58.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>

E-mail:atomep123@126.com

发行电话:010-68452845

版权所有 侵权必究

序

就放射性防护发展的历史而言,氡及其子体是放射性防护中历史最悠久的有害因素之一。就放射性伤害因素的影响范围而言,氡及其子体几乎存在于人所有生活、学习、工作的环境中,是影响最广泛的放射性有害因素之一。也是最受社会关注的辐射防护问题。

氡及其子体都是天然放射性核素,开放性极强,与人的生活接触非常紧密,活度的时空分布变化大。认识并掌握它们的活动规律对有效开展氡的防护很有意义。《地下工程与人居环境氡防护技术》一书以气体在多孔介质中的渗流——扩散运移理论为基础对氡析出过程和影响因素进行了系统的、比较深入的分析,结合地下工程的机械通风和自然通风理论对地下空间的氡及其子体浓度进行了估计,对地下空间和人居环境的氡防护技术进行了比较全面的归纳、整理和提高。

这项工作很有意义,它的有益之处首先在于把氡防护知识系统化了,揭示了氡防护技术与氡析出过程之间的紧密联系,对氡防护技术的发展在提高防护水平和降低防护成本两方面都做了有益的展示。其中有一些理论推导结果尚需实验结果的验证和补充,为氡防护技术的发展提出了若干课题。作为一家之言,技术特点鲜明,服务目的明确,以现有实验成果为基础,对发展前景进行了大胆预测,值得重视,更值得欢迎。

氡是仅低于吸烟的第2位诱发肺癌的因素。在人类所受照射中,就单一核素来说,氡及其子体产生的照射是最大的,约占天然辐射产生的照射的50%,在核燃料循环中对工作人员和公众产生的照射,氡及其子体也是最大的,铀矿山和非铀地下矿山的氡问题要重视,居住环境的氡问题也值得关注。广大居民的群体有效剂量比地下矿山的矿工大得多,而且居住环境中有许多氡的源项有待评价,最优化的防护措施有待进一步开发。最终解决这些问题需要坚实的理论基础。理论是客观存在在人头脑中反映的系统化,是人对客观存在的共识。地下矿山和居住环境氡的析出在理论上共同之处,矿工和居民的氡防护属于不同的范畴,防护措施各有特点。无论从中国看还是从一些发达国家看,氡的研究都还有很大的发展空间。希望今后有更多的研究成果发表,使这一领域更加充实。

这是一种期望,写在这里作为本书之序。

潘自强
2009. 11. 20

前 言

1982 年曾由原子能出版社出版过一本《氡的析出与排氡通风》的小册子,主要面对铀矿山的通风防护。当时,中国铀矿开发的辐射防护工作已经走过了 20 多年的历程,所有铀矿山都建立了完善的机械通风系统,普遍开展了氡及其子体的检测,正在积极开展铀矿通风防护各个方面的研究。其中包括在氡析出理论方面的探索。1975 年,按照周恩来总理的指示,铀矿通风防护人员参加了“云锡矿工肺癌防治通风防护协作组”的工作,作者用氡在多孔介质中的渗流——扩散运移理论分析云锡井下氡问题形成的原因,提出解决方法的建议。在解决云锡矿山井下氡问题的过程中做出了自己的贡献的同时,氡析出理论也得到了深入和进一步完善。使矿井防氡在理论的完整性和技术的可靠性都取得了明显的进步,值得向社会介绍。在核工业第六研究所同事的支持和帮助下,结合铀矿防氡的理论研究和防护实践,在矿井防氡学习班讲义的基础上,写了那一本专门论述氡在岩石和土壤中运移规律和矿井防氡技术的小册子。

现在世人对氡问题的认识比 25 年前更广泛,也更深刻,不仅对地下工程氡问题的广泛性有了更明确的认识,对居住环境内的氡防护也更为重视。建筑物内防氡研究在许多室内环境保护的著作中都有论述。许多著作中大量介绍了我国科学家和工程师获得的室内外氡及其子体浓度和变化的实际测量结果,使我们对地下工程和居室内氡的现状有了比较清楚的认识。本书就是在这一背景下写成的。

本书是为辐射防护的专业工作者、环境保护专业工作者和大专院校有关专业的教师写的、适合研究生和高年级学生阅读和参考,强调知识的系统性、理论的完整性和防护手段应用的灵活性。为了其他专业人员也能在需要时借助本书解决一些具体问题,因而也引用了一些相关的知识和数据。但是,这并不意味着关于氡析出和防护的发展已经成熟,矿山辐射防护这门科学仍很年轻,需要解决的问题仍然很多。如果此书能作为承前启后的一个阶段小结,便足以使作者心安了。考虑到有关教学研究人员的需要,不揣冒昧,本书中进行了比较多的理论推导,希望有助于认识的深化。由于水平有限,错误和不足之处在所难免,诚恳希望获得批评指正。

作者

2010 年 2 月

目 录

绪论	(1)
第1章 氡及射气介质的基本性质	(4)
1.1 天然衰变系和氡的产生	(4)
1.1.1 三个天然衰变系	(4)
1.1.2 放射平衡与铀镭平衡系数	(5)
1.2 氡及其子体	(7)
1.2.1 氡及其子体的产生	(7)
1.2.2 氡及其子体的性质	(8)
1.2.2.1 氡的性质	(8)
1.2.2.2 氡子体的性质	(9)
1.2.3 自然条件下氡的产生和存在	(10)
1.2.4 生产条件下氡的存在和防护标准	(12)
1.2.4.1 工作场所氡的防护标准	(12)
1.2.4.2 地下矿山氡防护现状	(13)
1.3 射气系数和扩散系数	(13)
1.3.1 射气系数	(13)
1.3.2 扩散系数	(16)
第2章 均匀多孔射气介质表面的氡析出	(18)
2.1 氡在射气介质中的运移	(18)
2.1.1 氡的运移通道	(18)
2.1.2 促成氡运移的动力	(19)
2.1.2.1 氡的主动运移——扩散	(19)
2.1.2.2 氡的被动运移——渗流	(20)
2.1.3 氡的运移方程和边界条件	(20)
2.2 半无限大射气介质表面的氡析出	(23)
2.2.1 半无限大射气体中氡浓度的分布	(23)
2.2.1.1 氡浓度分布方程	(23)
2.2.1.2 外部氡浓度对内部氡浓度分布的影响	(24)
2.2.1.3 渗流对内部氡浓度分布的影响	(24)
2.2.2 半无限大介质表面的氡析出	(26)
2.2.2.1 氡析出率	(26)
2.2.2.2 外部氡浓度 C_0 对氡析出率的影响	(26)
2.2.2.3 空气渗流对氡析出率的影响	(28)
2.2.2.4 扩散系数变化的影响	(29)

2.2.2.5 关于氡析出率影响因素的小结	(29)
2.2.3 渗流影响氡析出率的具体实验	(30)
2.3 其他一维条件下的氡析出	(31)
2.3.1 圆柱状通风空间的氡析出	(31)
2.3.2 板状射气介质的氡析出	(33)
2.3.3 局部类型体的氡析出	(35)
2.3.3.1 不含水时的氡析出	(35)
2.3.3.2 地下堆浸过程中铀矿石的氡析出	(37)
2.3.4 扩散系数的计算方法和讨论	(39)
2.4 板状射气体与半无限大射气体的结合	(43)
2.4.1 覆盖射气体的材料不含镭-226	(43)
2.4.1.1 一般方程	(43)
2.4.1.2 无渗流条件下覆盖的防氡效率	(44)
2.4.1.3 向内渗流($V>0$)对覆盖层防氡效率的影响	(46)
2.4.1.4 向外渗流($V<0$)对覆盖层防氡效率的影响	(48)
2.4.2 被覆盖介质不含镭-226	(50)
2.4.3 无孔隙覆盖层对氡析出的影响	(52)
第3章 空气渗流及其对氡析出的影响	(54)
3.1 稳定渗流和非稳定渗流	(54)
3.1.1 稳定渗流	(54)
3.1.2 非稳定渗流	(57)
3.1.2.1 地下矿山自然通风压力在岩层中造成的渗流	(57)
3.1.2.2 半无限大介质外部气压突变造成的非稳定渗流	(60)
3.2 通风压力对地下矿山氡析出的影响	(64)
3.2.1 稳定渗流的建立	(64)
3.2.1.1 地下矿山渗流模型	(64)
3.2.1.2 上覆岩层中稳定流场的建立	(66)
3.2.2 风压状态对氡析出的影响	(66)
3.2.2.1 机械通风的压力状态	(66)
3.2.2.2 机械通风的压力分布	(67)
3.2.2.3 机械通风风路上的风压分配	(69)
3.2.2.4 渗流几何修正系数	(70)
3.2.2.5 机械风压对氡析出率的影响	(70)
3.2.3 风压分布对氡析出的影响	(71)
3.2.4 岩体表面渗流速率的估算方法	(73)
3.2.4.1 由等效扩散系数估算其渗流速率	(73)
3.2.4.2 由氡析出量的变化估算其渗流速率	(73)
3.2.4.3 按上覆岩层模型估算渗流速率	(74)
3.2.5 自然风压对氡析出影响的估计	(75)
3.2.5.1 估计方法	(75)
3.2.5.2 增温温度对渗流影响系数的影响	(76)
3.2.5.3 渗透性对渗流影响系数的影响	(77)

3.2.6 自然风压与机械风压的联合作用	(78)
3.3 爆破对氡析出的影响	(81)
3.3.1 爆破瞬间的氡释放量	(81)
3.3.2 爆破后的氡析出量	(84)
3.3.2.1 爆破后新鲜表面的氡析出率	(84)
3.3.2.2 爆破后矿石的氡析出量	(85)
第4章 破碎介质的氡析出	(86)
4.1 破碎介质内氡的运移	(86)
4.1.1 破碎介质计算模型	(86)
4.1.2 有限厚破碎介质的氡析出	(87)
4.2 有限厚破碎介质中的氡运移实例	(89)
4.2.1 留矿法矿房氡析出的控制	(89)
4.2.2 采空区中的氡	(91)
4.3 地面堆积破碎介质的氡析出	(92)
4.3.1 废渣堆氡析出的分析	(92)
4.3.1.1 热因素影响废渣堆内渗流的过程分析	(93)
4.3.1.2 风力因素影响废渣堆氡析出的过程分析	(95)
4.3.2 废渣堆表面扩散氡析出率的估计方法	(95)
4.3.3 铀矿废石堆氡析出的实际测量	(97)
4.4 水对破碎介质内氡运移的影响	(100)
4.4.1 降雨对废石堆氡析出的影响	(100)
4.4.1.1 降雨影响废石堆氡析出率机理分析	(100)
4.4.1.2 降雨影响尾矿堆氡析出率机理分析	(101)
4.4.2 水冶尾矿氡析出率的实验结果	(101)
4.4.3 铀矿山废石堆与铀水冶尾矿堆氡析出率的比较	(102)
4.5 地面破碎介质的覆盖	(103)
4.5.1 按氡在黄土中的扩散系数计算覆盖厚度	(104)
4.5.2 按黄土的渗透率计算覆盖厚度	(104)
4.5.3 尾矿堆的覆盖	(107)
第5章 射气介质外部空间氡浓度的变化	(109)
5.1 硐室型通风空间氡浓度变化的一般方程	(109)
5.1.1 氡的来源及其特点	(109)
5.1.2 硐室型通风空间氡浓度	(111)
5.1.2.1 变化方程	(111)
5.1.2.2 等效衰变系数	(111)
5.1.2.3 稳定状态下的氡浓度	(112)
5.1.2.4 非稳定状态下的氡浓度	(113)
5.2 必要通风时间的计算	(113)
5.2.1 必要通风时间和必要换气次数	(113)
5.2.2 重新开启密闭空间的必要通风时间	(116)
5.2.2.1 密闭空间氡浓度的积累	(116)
5.2.2.2 必要通风时间	(116)

5.2.3	爆破后达到氡浓度限值水平的必要通风时间	(119)
5.2.3.1	无渗流情况下的通风时间	(119)
5.2.3.2	有渗流情况下的必要通风时间	(122)
5.2.3.3	用无渗流通风率处理有渗流的爆破后的通风	(125)
5.3	巷道型通风空间氡浓度的变化	(126)
5.3.1	氡浓度变化的一般规律	(126)
5.3.2	巷道型通风空间的排氡量	(127)
5.3.2.1	氡析出量和排氡量	(127)
5.3.2.2	巷道的排氡量	(128)
5.3.3	计算点的通风压力	(128)
5.4	自然通风条件下氡浓度的变化	(128)
5.4.1	自然通风风量的不稳定性	(128)
5.4.2	自然通风条件下硐室型通风空间氡浓度的变化	(129)
5.4.2.1	氡浓度变化的一般方程	(129)
5.4.2.2	氡浓度变化的等间隔取样估计法	(129)
5.4.2.3	计入渗流影响的氡浓度变化	(133)
5.4.2.4	主扇风机停车后井下氡浓度的增长	(135)
5.4.3	重新启动主扇风机的必要通风时间	(136)
5.5	机械通风下的井下氡浓度	(137)
5.5.1	机械通风对通风空间氡浓度的影响	(137)
5.5.1.1	表达氡浓度变化的一般关系式	(137)
5.5.1.2	正压状态氡浓度的变化	(137)
5.5.1.3	负压状态氡浓度的变化	(138)
5.5.1.4	负压状态下的极限风量和最低氡浓度	(139)
5.5.2	自然风压对机械通风效果的干扰	(142)
5.5.2.1	单纯机械通风方式下的干扰	(142)
5.5.2.2	压抽联合式通风与自然通风的联合作用	(143)
5.5.3	恒常氡析出对氡浓度变化的影响	(144)
5.5.3.1	恒常氡析出场所氡浓度变化	(144)
5.5.3.2	复合氡析出场所氡浓度的变化	(145)
5.5.3.3	复合氡析出下的极限风量和最低氡浓度	(146)
第6章	氡析出率的测量方法	(148)
6.1	氡析出率	(148)
6.1.1	氡析出率的物理意义	(148)
6.1.2	当量氡析出率	(150)
6.2	氡析出率测量方法综述	(151)
6.2.1	氡析出率测量的基本公式	(151)
6.2.1.1	硐室型通风空间氡浓度与氡析出率的关系	(151)
6.2.1.2	巷道型通风空间排风氡浓度与氡析出率的关系	(152)
6.2.2	测量方法的分类	(152)
6.2.3	基本参数的选取	(153)
6.3	全巷动态法测氡析出率	(153)

6.3.1	测量点的布置和基本测量	(153)
6.3.2	测量过程和数据处理	(155)
6.4	局部静态法测氡析出率	(156)
6.4.1	氡收集器	(156)
6.4.2	等效衰变系数的确定	(157)
6.4.2.1	不取空气样时估计方法的推导	(157)
6.4.2.2	取空气样时估计方法的推导	(158)
6.4.3	测量过程和数据处理	(159)
6.4.4	测量实例	(160)
6.4.5	板状射气体表面氡析出率的测量	(161)
6.5	结合定向 γ 测量确定面平均氡析出率	(164)
6.5.1	射气体表面氡析出率与 γ 辐射强度线性相关	(164)
6.5.2	射气体表面氡析出率与 γ 辐射强度线性相关实例	(165)
6.5.2.1	依山堆放型废石堆氡析出率与定向 γ 测量结果的线性正相关	(165)
6.5.2.2	废石场氡析出率随时间的变化与定向 γ 测量结果不相关	(166)
6.5.2.3	尾矿场氡析出率与定向 γ 测量结果的线性相关	(166)
6.5.3	确定面平均氡析出率必需的最小测量点数	(167)
第7章	氡子体	(169)
7.1	氡子体浓度的增长	(169)
7.1.1	氡子体的 α 潜能和平衡氡浓度	(169)
7.1.2	氡子体活度变化的一般方程	(170)
7.1.3	氡子体 α 潜能的增长	(172)
7.2	通风空间氡子体活度的增长	(174)
7.2.1	硐室型通风空间氡子体活度的增长	(174)
7.2.1.1	氡子体活度的变化	(175)
7.2.1.2	氡子体活度平衡因子的变化	(175)
7.2.2	巷道型通风空间氡子体活度的增长	(176)
7.2.2.1	氡子体活度的变化	(176)
7.2.2.2	氡子体活度平衡因子的变化	(177)
7.3	氡子体 α 潜能的增长	(178)
7.3.1	硐室型通风空间氡子体 α 潜能的增长	(178)
7.3.1.1	氡子体 α 潜能的变化	(178)
7.3.1.2	氡子体 α 潜能平衡因子的变化	(179)
7.3.2	巷道型通风空间氡子体 α 潜能的增长	(180)
7.3.2.1	氡子体 α 潜能的变化	(180)
7.3.2.2	氡子体 α 潜能平衡因子的变化	(180)
7.4	影响通风空间氡子体 α 潜能水平的其他因素	(181)
7.4.1	入风氡子体 α 潜能影响的估计方法	(181)
7.4.2	两种通风空间氡子体 α 潜能平衡比的比较	(182)
7.4.3	氡子体的沉降损失	(183)
7.4.3.1	概况	(183)
7.4.3.2	关于氡子体沉降的思考	(184)

7.4.4	空气中氡子体的清除	(186)
7.4.4.1	空气净化器	(186)
7.4.4.2	空气中氡子体的清除	(187)
7.4.4.3	循环净化	(189)
7.4.4.4	风流净化	(191)
7.4.4.5	空气净化器的选择	(192)
第8章	地下矿山氡防护	(193)
8.1	排氡通风风量计算方法	(193)
8.1.1	矿井氡析出量的计算	(193)
8.1.1.1	氡析出量的一般计算方法	(193)
8.1.1.2	地下矿山的氡析出量和排氡量	(194)
8.1.1.3	氡析出密度和通风率	(195)
8.1.2	按氡浓度管理限值计算矿井通风量	(195)
8.1.2.1	按氡浓度变化推导的风量计算方法	(195)
8.1.2.2	技术规范确定的计算方法	(196)
8.1.3	按氡子体 α 潜能管理限值计算矿井通风量	(196)
8.1.3.1	硐室型通风空间风量计算公式	(196)
8.1.3.2	巷道型通风空间风量计算公式	(198)
8.1.3.3	技术规范确定的计算方法	(199)
8.1.4	矿井风量分项计算法	(199)
8.1.5	风量计算公式的分析	(200)
8.1.5.1	排氡风量计算公式的统一模式和参数	(200)
8.1.5.2	排氡和控制氡子体的风量差异	(201)
8.1.5.3	通风空间模型不同造成的风量计算差异	(202)
8.2	井下氡及子体浓度分布估计	(202)
8.2.1	风量分配计算	(202)
8.2.1.1	风量分配和个人剂量	(202)
8.2.1.2	矿井风量分配的计算方法	(204)
8.2.2	氡浓度分布估计	(206)
8.2.3	氡子体 α 潜能分布的估计	(206)
8.2.3.1	氡子体 α 潜能变化基本公式	(206)
8.2.3.2	串联通风氡子体 α 潜能的计算方法	(206)
8.2.3.3	风流混合氡子体 α 潜能的计算方法	(208)
8.2.3.4	风流分支氡子体 α 潜能的计算方法	(209)
8.3	通风方式的选择	(210)
8.3.1	扇风机的三种工作方式	(210)
8.3.2	合理通风方式的基本判别条件	(210)
8.3.2.1	极限风量应不小于必要通风量	(210)
8.3.2.2	最低氡浓度应不大于管理限值	(211)
8.3.2.3	防护费用最少	(211)
8.3.3	通风方式的经济与安全评价	(212)
8.3.3.1	通风方式的安全评价指标	(212)

8.3.3.2	经济评价	(217)
8.3.4	关于通风方式影响氡析出的两个实验	(218)
8.3.4.1	铀矿山通风方式影响氡析出的实验	(218)
8.3.4.2	非铀矿山通风方式影响氡析出的实验	(219)
8.3.4.3	两项实验的比较	(221)
8.3.4.4	改变压力分布对氡析出的影响	(222)
8.3.4.5	抽出式通风铀矿防护状况的演变	(223)
8.4	排氡通风的局部措施	(224)
8.4.1	采空区管理	(224)
8.4.1.1	采空区的三种状况	(224)
8.4.1.2	密闭隔墙	(224)
8.4.1.3	防氡密闭的质量要求	(225)
8.4.2	调整通风压力分布	(226)
8.4.2.1	控制通风空间的容积	(226)
8.4.2.2	降低邻近空间的通风压力	(227)
8.4.2.3	提高通风空间的通风压力	(227)
8.4.2.4	高浓度氡的局部抽排	(227)
8.4.3	减少漏风的措施——动压通风	(227)
8.4.3.1	导风板引风防漏	(227)
8.4.3.2	无风墙辅扇通风	(229)
8.4.3.3	风门	(230)
8.4.4	防氡覆盖层	(231)
8.4.4.1	混凝土防氡覆盖层	(231)
8.4.4.2	水泥砂浆和有机覆盖层	(231)
8.4.4.3	爆落矿石洒水防尘降氡	(231)
8.5	地下矿山氡防护的管理	(232)
8.5.1	氡防护的优化管理	(232)
8.5.1.1	氡防护的限值	(232)
8.5.1.2	氡防护的最优化	(232)
8.5.2	氡浓度和氡子体 α 潜能的监测	(232)
8.5.2.1	监测的目的	(232)
8.5.2.2	监测结果的分析	(233)
8.5.3	主扇风机运行制度	(233)
8.5.3.1	主扇风机停止运行后危险的估计	(233)
8.5.3.2	重开主扇的必要预通风时间	(233)
8.5.3.3	保持通风压力分布的稳定	(233)
8.5.4	个体防护	(234)
8.5.4.1	呼吸防护用具	(234)
8.5.4.2	体表的清洗	(236)
第9章	居住环境氡防护	(237)
9.1	居住环境的氡问题	(237)
9.1.1	氡问题的发展和深入	(237)

9.1.2	居住环境氡的防护标准	(238)
9.1.2.1	居住环境的氡照射不是职业照射	(238)
9.1.2.2	室内氡浓度的控制标准	(238)
9.1.2.3	氡子体是居住环境的主要控制对象	(239)
9.2	居住环境的氡的来源	(239)
9.2.1	地面是大气中氡的主要来源	(239)
9.2.2	建筑材料是居室中氡的主要来源	(242)
9.2.2.1	根据建筑材料的用量估计室内的氡析出量	(242)
9.2.2.2	根据墙面和地板表面的氡析出率估计氡析出量	(244)
9.2.2.3	北京地区建筑物表面的氡析出率	(244)
9.2.3	地下工程氡的来源	(245)
9.2.4	其他来源	(246)
9.3	居住环境氡浓度水平的估计	(246)
9.3.1	大气氡浓度随高度的分布	(246)
9.3.2	居住环境中的氡浓度	(250)
9.3.3	通风对室内氡浓度影响的分析	(252)
9.3.3.1	影响室内氡浓度的诸因素	(252)
9.3.3.2	氡浓度的昼夜变化——开窗的影响	(252)
9.3.3.3	氡浓度的日平均值与日平均通风换气时间的关系	(258)
9.3.4	通风对居室中氡子体浓度的影响	(260)
9.3.4.1	氡子体的活度浓度	(260)
9.3.4.2	氡子体浓度的日平均值	(263)
9.3.4.3	氡子体 α 潜能浓度和平衡因子	(264)
9.3.5	通风与空气净化对氡子体浓度的综合影响	(269)
9.3.5.1	室内空气净化	(269)
9.3.5.2	空气净化对平衡因子的影响	(270)
9.4	生活环境的防氡措施	(271)
9.4.1	通风排出	(271)
9.4.1.1	在用地下工程必须有机械通风	(271)
9.4.1.2	置换式通风	(273)
9.4.2	降低氡析出密度	(273)
9.4.2.1	选用低放射性含量的建筑材料	(273)
9.4.2.2	使用防氡内墙涂料	(275)
9.4.2.3	底层居室的地板高出地面	(278)
9.4.3	降低平衡因子	(278)
9.4.3.1	降低空气中颗粒物浓度	(278)
9.4.3.2	空气净化	(279)
9.4.4	远离氡源,健康生活	(279)
参考文献		(280)

绪 论

大气中的氡及其子体对人的伤害是天然辐射伤害的主要部分。近期的研究结果表明,地表大气和居室中的氡及其子体对人造成的辐射剂量达到了天然辐射剂量的 50% 以上,流行病学研究成果已经证实了居室环境中氡及其子体浓度过高增加了居民罹患肺癌的相对危险,国际癌症研究机构(IARC/WHO)依据多个大样本队列的矿工肺癌的流行病学调查结果,已经正式将氡列为致人类癌症的 I 类致癌物^[56]。虽然居民接受大气中氡及其子体的集体辐射剂量远远高于地下矿山的矿工,地下矿山仍然是氡及其子体危害人类的主要场所。因为,高浓度的氡和氡子体主要存在于洞穴和地下工程中。地下矿山的矿工是遭受这种危害的主要成员,特别是在岩矿石中铀含量比较高的地下矿山中工作的矿工遭受氡及其子体伤害的机会更多^[1~4]。

一般认为人们对氡危害的感知始于欧洲中部厄尔士山区,真正认识则从 20 世纪 30 年代在德国南部和捷克的波希米亚地区的矿井中测得高浓度的氡算起。在这些矿山中工作的矿工中肺癌发病率一直很高。19 世纪就已经有人提出了有关这方面的报告^[1]。不过,在相当长的一段时间里,人们对氡是否为导致矿工中肺癌发病率高的主要原因存在怀疑。这一方面是因为吸入氡及其子体导致的矿工肺癌是辐射的随机效应,发生的概率与矿工接受的氡的辐射剂量成正比,肺癌的高发病率需要有比较大的辐射剂量,而比较大的辐射剂量需要比较长的积累时间。另一方面,矿井大气成分复杂,氡往往和其他有害物如砷、重金属尘等混合在一起,扰乱了人们的视线。在人们认识氡危害的过程中,同时加强了对氡的防护措施的科学研究。1964 年,国际原子能机构(IAEA)在维也纳召开了“核材料开采与加工过程中的放射卫生与安全”国际会议。矿井防氡在国际上终于得到了重视。

为减少氡及其子体对人,特别是对矿工的危害,根本的措施是改善地下矿山和居室环境的空气质量,降低空气中氡及其子体的浓度,这就需要了解大气中的氡是从哪里来的,它是怎样跑到大气中去的,是什么原因使地下工程和某些居住环境空气中氡及其子体的浓度增高,怎样才能降低这些场所空气中氡及其子体的浓度,把工人和居民所接受的氡及其子体的辐射剂量减少到“可合理达到的尽可能低”的水平。所有这些问题都与氡及其子体的运移规律有密切关系,氡运移规律的研究是解决防氡问题的基础层面。

原子能的广泛应用使铀矿开发具有更重大的意义。放射性物理勘探的理论和技術迅速发展,作为放射性物探技术一部分的射气测量也随之发展起来。氡在岩石中迁移规律的研究得到重视并迅速发展起来。据有关专家的看法,对氡在岩石中迁移规律的认识有多种。渗流——扩散理论也是其中之一。把这种理论与氡防护的实践相结合已经解决了地下矿山的多项问题。并在氡防护技术的发展中广为运用,已经成为氡防护技术的理论基础之一。

我国铀矿开发起步比较晚,但对矿山辐射防护工作十分重视。20 世纪 50 年代就在铀矿冶的科研设计院所建立了防护专业,铀矿冶企业普遍设立剂量防护室,开展井下工作面和地面大气中氡及其子体浓度的测量。从国外引进了铀矿通风防护技术规范,从铀矿基建时起就在矿山开始进行氡气测量。铀矿通风防护科研工作广泛开展起来;地下铀矿的通风防

护技术和氡及其子体的测量技术水平大幅度提高,氡浓度得到有效的控制;同时积累了大量的资料,保护了铀矿工的健康,保证了铀矿冶事业的健康发展。在努力开发氡及其子体的防护技术和测量技术的同时进行了认真的理论探索,逐渐形成对铀矿山氡析出规律的系统认识。

1974年云南锡矿工人肺癌问题引起了社会的广泛重视。在非铀矿山出现高浓度的氡并同时出现矿工肺癌的高发病率不能不引起高度警惕。一系列调查表明,非铀矿山的氡问题存在比较普遍,国外如此,国内也是如此。特别是国内的地方矿,氡问题更值得注意^[60]。基本安全标准根据ICRP第65号出版物的建议,修改了照射量和氡的转换系数,与1982年版相比,换算系数减小为原来的1/2。根据上述原则,我国大部分有色金属矿山、部分地下煤矿和其他矿山的工作人员所受照射可能要列入职业性照射^[72]。云南锡业公司矿工肺癌防治通风防护协作组与该公司员工共同努力,根据当时铀矿山的氡析出规律的初步研究成果,成功地解决了该公司的氡问题,不仅验证了当时已有的对氡析出规律的认识,而且更加丰富了这种认识,使对氡析出规律的研究更加深入、更加全面,并且更加实用。多孔介质中氡的扩散——渗流运移理论已经成为地下工程防氡的重要理论基础。对辐射环境保护和改善居室辐射环境也有重要的参考价值。

1992年核工业湖南矿冶局经中国核工业总公司授权组织核工业第六研究所、核工业272厂、核工业712矿和核工业716矿结合铀矿退役对废石堆和尾矿场的氡析出进行了实验室模拟与实地观察紧密结合的研究。这是我国在原有氡析出理论指导下对松散介质氡析出的第一次规模较大的系统观察和研究。结合在这项研究开展的前后国内已经进行的多项类似实验研究工作,对地面松散介质的氡析出规律有了更深刻、更系统的认识。把地下岩矿体的氡析出规律与地面松散介质氡析出规律的认识组合起来,不仅扩展了氡析出研究的涵盖范围,也增大了这项研究的实用价值。在指导地下工程、居住环境和环境保护的防氡工作方面有了更多的指导意义。

在矿工肺癌病因说提出不久就开始氡吸入的动物实验研究。法国核材料研究中心(COGEA)从20世纪60年代末开始此项研究,1981年提出的报告显示观察的结果与矿工肺癌的多数研究结果相一致。美国西北太平洋实验室(PNL)的动物吸氡实验研究也从60年代末开始,实验结果与法国相似。进入20世纪80年代,人们认识到长期低水平氡子体暴露可以引起肺癌增加,居民在室内外生活环境中接受的氡子体暴露受到社会的深切关注^[71]。1988年在第七届致癌物年报告中首次被列入A类致癌物(确定性致癌物)。世界卫生组织在《2000空气质量准则》中将氡列入17种重要的环境致癌物质之一。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)2000年给出世界范围内居室空气中氡浓度平均水平约为40 Bq/m³,它的辐射剂量占天然辐射剂量的一半以上。我国的辐射防护科学机构和科学家对居住环境中氡的存在状况进行了广泛的调查和研究,开展了氡与肺癌的剂量响应关系的流行病学调查,建立了许多与居住环境的辐射防护,特别是氡的防护有关的国家防护标准。

氡是国际放射防护委员会(ICRP)推荐了慢性照射行动水平具体数据的唯一核素。国际原子能机构(IAEA)和许多国家都制定了相应的标准,这些标准基本相同。在人类所受照射中,就单一核素来说,氡及其子体产生的照射是最大的,在核燃料循环中,对工作人员和公众产生的照射,氡及其子体也是最大的。这种状况使得对氡的研究得到了重视,对氡的防护必然是其中的重要环节。掌握氡在各种介质中的传播规律又是提高防护水平的重要前

提。研发防氡技术必须以研究氡的析出规律为基础,以降低空气中氡浓度,减少氡的剂量为目的,以收到的效益最大而付出的代价(以各种形式付出的代价)最小为最高水平,不仅对铀矿山是迫切的工作,对所有地下工程和居民建筑都十分重要。

目前的地下矿山排氡通风计算仍然着眼于使工作场所的氡及其子体的浓度不超过法定管理限值,而防护标准的发展已经着眼于控制矿工的个人剂量。中国的铀矿已经开展了矿工个人剂量的检测。氡防护技术的发展应当相应地建立估计地下矿山氡及其子体时空分布的方法和矿工个人计量的估计方法。现在对多孔介质中的渗流——扩散运移规律的认识绝大多数仍然建立在稳态方程的分析基础之上,而现实的氡析出几乎都是非稳态的,分析结果只能是某种程度的近似。这种近似在估计稳定氡浓度方面有相应高度的现实意义,但是否适用于估计氡及其子体浓度的时空变化和矿工个人剂量方面还是一个需要结合具体实践探讨的问题。矿山辐射防护的发展应当对地下矿山的矿工所面临的照射和矿山辐射防护的可靠性给出恰当的预期,以适应防护标准的新发展。

氡防护技术的发展还应当在降低防护成本方面作出新贡献。研究氡在多孔介质中的渗流——扩散运移规律的目的不仅是认识矿井中氡的源项,而且包括利用渗流控制源项,降低防护代价,提高实践的效益。目前这种理论的运用多数还停留在定性认识阶段,比如合理通风方式的选择。地下铀矿山的吨矿通风量大大高于非铀矿山,云南锡业公司所属矿山曾经想用加大风量的方法解决氡浓度过高问题,结果事与愿违。改用正压控氡技术以后,不需增加额外风量,按一般金属矿山进行通风设计即可满足氡防护的要求。现有的氡防护技术可以满足不计成本的氡防护要求,将来应当把降低防护成本作为重要的发展方向。

控制居室环境的氡浓度属于减少天然辐射照射的范畴,不能把矿山辐射防护技术简单地移植到居室降氡中来,而应当根据具体情况采取适当的补救措施。但是氡在多孔介质中的渗流——扩散理论仍然可以指导居室环境的氡防护问题,地下矿山的某些防护措施也可供参考。

总之,需要具体解决氡问题的项目还很多,氡析出理论和防氡技术的发展都还有很大的空间。