

氮学导论

DONG XUE DAO LUN

过惠平 尚爱国 吕 宁 吕汶辉 魏志浩◎著

西北工业大学出版社

013071419

0613.16
02

氮学导论

过惠平 尚爱国 吕 宁 吕汶辉 魏志浩 著



西北工业大学出版社



北航

C1678607

出版发行：西北工业大学出版社
通信地址：西安市友谊西路127号 邮编：710073
电 话：(029)86433844 86491787
网 址：www.nwpu.com.cn
印 刷：西安西京印务有限公司
开 本：787mm×1092mm 1/16
印 张：10.2
字 数：251千字
定 价：35.00元

0613.16

02

014150810

【内容简介】 氡作为天然放射性气体,广泛存在于自然界中。随着生活水平的提高,人们对氡愈发关注,对与之相关知识的了解愈发迫切。

本书以介绍氡及其子体测量为主,内容分八章(四大部分):第一部分(第一章):简单介绍氡的来源、基本性质、危害以及简单的防治常识;第二部分(第二、三章):详细介绍氡的衰变及放射性平衡、 α 粒子与物质的相互作用,这是进行氡探测的物理基础;第三部分(第四、五、六、七章):重点介绍与氡测量有关的基本概念及术语、氡及其子体浓度的测量方法、测氡仪器的检定;第四部分(第八章):举例介绍作者曾参与过的氡水平调查与评价工作。

本书知识结构完整合理,重点突出,无需专门的核物理专业背景便可读懂,可供高年级本科生学员作为教材使用,也可供相关技术人员参考。

著 者 过 惠 平 参 考 文 献 著 者 过 惠 平

图书在版编目(CIP)数据

氡学导论/过惠平等著. —西安:西北工业大学出版社,2012.10

ISBN 978-7-5612-3507-2

I. ①氡… II. ①过… III. ①氡—研究 IV. ①O613.16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 253926 号



出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:10.5

字 数:251 千字

版 次:2013 年 3 月第 1 版

2013 年 3 月第 1 次印刷

定 价:25.00 元

陕西出版集团

前言

氡,作为铀、钍等天然放射系的衰变产物,是自然界中唯一存在的天然放射性惰性气体。在人们吸入氡后,氡及其子体产物沉积在呼吸道和肺部,造成辐射损伤,并可导致癌症。估计天然辐射所致人平均有效剂量的50%以上来自氡及其子体。经过多年研究,高浓度的氡长期照射会导致受照射人群肺癌发病率增加已被世界卫生组织(WHO)、国际辐射防护委员会(ICRP)、联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)等学术组织和团体所公认。GB18871-2002《电离辐射防护和辐射源安全基本标准》中,将“天然源照射,如建筑物和工作场所内氡的照射”列为要求采取补救行动的持续照射情况,应加以“干预”;更有对氡子体的摄入量及照射量限值要求。

近年来,国家积极发展核能,对核燃料的需求势必增加,在铀矿开采与冶炼大为发展的同时,也增加了氡及其子体对相关人员的潜在危险。其实,氡及其子体不仅存在于铀矿中,它还广泛地富集在人们生活的各个角落:山体隧道、掩体工事、地下室甚至一间长久不通风的居室。随着生活水平的提高,人们对氡愈发关注,对与之相关知识的渴求愈发迫切:氡有哪些性质?对人有哪些危害?该如何测量并防治?这正是本书所要解决的问题。

本书以介绍氡及其子体测量为主,八章内容共分四大部分:第一部分:从宏观入手简单介绍氡的来源、基本性质、危害以及简单的防治常识,内容对应第一章;第二部分:详细介绍氡的衰变及放射性平衡、 α 粒子与物质的相互作用,这是进行氡探测的物理基础,既有经典理论介绍,又有模拟计算示例,内容包括第二、三章;第三部分:重点介绍与氡有关的专业术语、氡及其子体的测量方法、测氡仪器的检定,内容包括第四至七章;第四部分:与氡有关的应用技术研究,举例介绍笔者曾参与过的从测氡仪器研制到氡水平调查与治理工作,偏重于实践,内容对应第八章。

一直以来,从事氡测量与评价工作对专业技术背景要求较高:需掌握原子核物理、核电子学、核辐射探测与核辐射防护等专门知识,常使人望而却步。对此,在本书的编写过程中笔者考虑最广泛的受众面,从“实用”出发组织理论知识,撷选原子核物理中的衰变规律及放射性平衡规律、核辐射探测中的 α 粒子与物质的相互作用、核电子学中的相关知识予以深入浅出、针对性强的介绍;又以“实用”为归宿,力求所介绍的方法算法能够直接指导氡及其子体的测量。应该说,氡测量所涉及知识的宽泛在本书中得以较好的集中,这正是本书的一大特点。因此,无需专门的核物理专业背景,读者便可理解掌握。本书可供高年级本科生作为教材使用,也可供相关技术人员参考。

笔者长期耕耘在核辐射探测及防护领域,从事氡测量与评价的教学科研工作多年。在此,谨对曾经不遗余力相助笔者起步、发展的核辐射探测、氡学前辈们以及他们的著作表达虔诚的感谢!虽然与有些前辈未曾谋面,但早已相识于文献互鉴中了。同样,亦对所有从事氡研究及

应用的同行们的工作致以崇高的科学敬意！盼能早日沟通请教共同感兴趣的课题。

引征经典与前辈们工作的同时，书中不少内容是对笔者及多年来所带研究生从事与氦相关工作的总结，也许尚未成熟。成书之时，昔日师生之间教学相长、其乐融融历历在目，字里行间寄托了多少希冀与想念，愿他们发挥所学、青出于蓝。推而广之，本书若能起到抛砖引玉之效，将深慰不已！希望更多的青年学子关心、关注我国与氦有关等核技术的发展。

感谢第二炮兵，这支为祖国掌握倚天长剑的战略导弹部队，对氦的研究与测量一直保持着高度的关注，为笔者从事相关科研工作创造了诸多机会；感谢第二炮兵工程大学，多年来各级领导与同事的支持与鼓励，这是笔者不敢懈怠、不断成长与进步的坚强后盾。对于军校教员来说，能够学有所用、教有所用、研有所用、用在国防是笔者最大的欣慰和动力。

本书的编写初衷是为有着理工科背景的本科生提供一本入门教材，加之水平有限，难免挂一漏万，欢迎大家斧正，将有幸与您共勉进步。

著者

2012年10月于西安

同的氦氖混合气体，其成分与空气不同，且其物理性质也与空气迥异，因此在工业上有着广泛的应用。

氦气是一种无色、无味、无毒的气体，其化学性质非常稳定，不与任何物质发生反应。

氦气的物理性质包括：沸点低（-268.9℃）、熔点低（-272.3℃）、密度小（0.1786 g/L）。

氦气的化学性质非常稳定，不与任何物质发生反应，因此在工业上有着广泛的应用。

氦气的物理性质包括：沸点低（-268.9℃）、熔点低（-272.3℃）、密度小（0.1786 g/L）。

氦气的化学性质非常稳定，不与任何物质发生反应，因此在工业上有着广泛的应用。

氦气的物理性质包括：沸点低（-268.9℃）、熔点低（-272.3℃）、密度小（0.1786 g/L）。

氦气的化学性质非常稳定，不与任何物质发生反应，因此在工业上有着广泛的应用。

氦气的物理性质包括：沸点低（-268.9℃）、熔点低（-272.3℃）、密度小（0.1786 g/L）。

氦气的化学性质非常稳定，不与任何物质发生反应，因此在工业上有着广泛的应用。

氦气的物理性质包括：沸点低（-268.9℃）、熔点低（-272.3℃）、密度小（0.1786 g/L）。

氦气的化学性质非常稳定，不与任何物质发生反应，因此在工业上有着广泛的应用。

氦气的物理性质包括：沸点低（-268.9℃）、熔点低（-272.3℃）、密度小（0.1786 g/L）。

氦气的化学性质非常稳定，不与任何物质发生反应，因此在工业上有着广泛的应用。

氦气的物理性质包括：沸点低（-268.9℃）、熔点低（-272.3℃）、密度小（0.1786 g/L）。

氦气的化学性质非常稳定，不与任何物质发生反应，因此在工业上有着广泛的应用。

氦气的物理性质包括：沸点低（-268.9℃）、熔点低（-272.3℃）、密度小（0.1786 g/L）。

氦气的化学性质非常稳定，不与任何物质发生反应，因此在工业上有着广泛的应用。

氦气的物理性质包括：沸点低（-268.9℃）、熔点低（-272.3℃）、密度小（0.1786 g/L）。

氦气的化学性质非常稳定，不与任何物质发生反应，因此在工业上有着广泛的应用。

氦气的物理性质包括：沸点低（-268.9℃）、熔点低（-272.3℃）、密度小（0.1786 g/L）。

72	变异的剂量率	第二章
82	立体的去公本基	第三章
101	志放三	第四章
103	志三波具并	第五章
104	志新	第六章
108	志具正	第七章
109	志二小景对	第八章
111	宝録的处量既科千摩又摩	第九章
第一章 概述		1
第一节 氡的来源		1
第二节 氡的基本性质		7
第三节 氡的危害和防治		14
第二章 氡的衰变和放射性平衡		19
第一节 放射性衰变		19
第二节 放射性衰变的一般规律		22
第三节 级联衰变规律		27
第四节 氡的衰变		33
第三章 α 粒子与物质的相互作用		37
第一节 带电粒子与靶物质原子的碰撞		37
第二节 重带电粒子与物质的相互作用		39
第四章 氡测量有关的基本概念及术语		57
第五章 氡的测量		62
第一节 静电计法		62
第二节 闪烁室法		65
第三节 双滤膜法		68
第四节 固体径迹法		74
第五节 活性炭-液闪计数法		78
第六节 闪烁体-静电收集法		86
第七节 半导体-静电收集 ^{218}Po 法		88
第八节 其他测氡方法简介		92
第六章 氡子体浓度的测量		94
第一节 取样中的氡子体积累		94

第二节	取样后的衰变	97
第三节	基本公式的建立	98
第四节	三点法	101
第五节	托马斯三段法	102
第六节	α 能谱法	107
第七节	五段法	108
第八节	加权最小二乘法	109
第七章	氡及氡子体测量仪的检定	111
第一节	标准氡室	111
第二节	氡及氡子体测量参数的测定	112
第三节	测氡仪的检定	113
第四节	氡子体测量仪的检定	116
第八章	与氡有关的应用技术研究	118
第一节	基于嵌入式系统的氡测量仪二次仪表开发实例	118
第二节	火花计数器用于固体径迹片读出实验研究	131
第三节	西安市某小区室内氡浓度监测与评价	139
第四节	活性炭降氡能力实验研究	144
附录		153
附录 A	氡测量常用的法定计量单位	153
附录 B	室内氡浓度水平限值	154
附录 C	氡及其子体的控制限值	155
附录 D	Rn 的衰变历程和主要核数据	157
附录 E	氡在不同材料中的溶解度系数	158
参考文献		159

第一章 概述

氡是自然界中唯一存在的天然放射性惰性气体,凡是有物质存在的地方就有放射性气体氡。氡的放射性水平可以用氡浓度来表示,氡浓度因时因地而异,同时其变化也取决于温度、压力和湿度等因素。

15 世纪,捷克的亚希莫夫矿山工人在开采白银时,发现其位于一种坚硬的油黑色岩石中。1789 年,德国化学家克拉普罗斯第一次从这种油黑色岩石中分离出铀的化合物。1827 年,这种含有铀化合物的岩石被称为沥青铀矿。1896 年,法国物理学家贝克勒尔发现的放射性正是从这种岩石中得到的。后来, M. 居里和 P. 居里从沥青铀矿中分离出放射性元素镭。

事实上,氡作为镭的衰变产物,其发现最早可追溯至人们对于镭的研究。

1898 年, M. 居里发现与镭接触的空气中具有放射性,但并不知道这种放射性的来源和性质。

1900 年, F. 多恩(F. Dorn)在镭制品中发现镭射气,即氡-222。此后不久, E. 卢瑟福、 F. 索迪和 W. 拉姆奇等一致确认这种气体是一种惰性气体, E. 卢瑟福称这种惰性气体为 Emanation(射气),而 W. 拉姆奇和 R. 戈瑞将这种射气命名为 Neon。1910 年, W. 拉姆奇和 R. 戈瑞测定了氡的相对原子质量,并确定了其在周期表中的位置为 86 号元素,符号为 Rn,相对原子质量为 222,半衰期为 3.825 d,这在氡的性质研究方面迈出了关键的一步。

与此同时,不同研究者还发现了氡的不同同位素。

1899 年,加拿大化学家欧文(R. B. Owens)在研究钍的放射性时发现了钍不断放出一种气态的放射性物质,并确定其是化学惰性的,并且具有较高的相对原子质量。由于来源于钍,被称为钍射气,符号为 ThEm。1918 年德国化学家施密特按惰性气体氦、氖等命名方式,称它为 Thoron,元素符号定为 Th,其相对原子质量为 220,半衰期为 54.5 s。

氡的第三种同位素是 F. O. 吉塞尔于 1903 年发现的,当时被称作锕射气(Actinium emanation),符号为 An,其相对原子质量为 219,半衰期为 3.92 s。

86 号元素在很长时间内还是被称作“射气”,直到 1923 年国际会议上采取了“氡”这一术语,一直沿用至今。氡是所有天然射气中寿命最长,并且是用处最大的一个。氡的所有同位素都具有放射性。

第一节 氡的来源

放射性气体氡,元素符号为 Rn,其主要同位素²²²Rn 来源于²²⁶Ra 的衰变,而²²⁶Ra 作为²³⁸U 的多代衰变子体,其多少取决于自然界中的²³⁸U 含量;同样,氡的同位素²²⁰Rn 来源于²²⁴Ra 的衰变,²²⁴Ra 是²³²Th 的多代衰变子体;氡的同位素²¹⁹Rn 来源于²²³Ra 的衰变,²²³Ra 是²²⁷Ac 的多代衰变子体。铀、钍是自然界中广泛分布的微量元素,人类的生产实践改变了其在自然界中的分布,使得氡的来源也多样化。

与人类生活密切相关的,一是环境大气中氡的来源,二是室内空气中氡的来源,下面分别讨论。

一、环境大气中氡的来源

环境大气中氡的来源是多种多样的,主要有以下八个方面:

1. 大地释放

铀在地壳中的质量比份是 3g/t,海洋中是 3g/1 000t,陆地为海洋的 1 000 倍。陆地上铀的总量为 4×10^9 t,是黄金总量的 1 000 倍。

铀(^{238}U)在土壤和岩石中的含量是不同的(见表 1-1),在世界范围内的平均含量为 $2.8\times10^{-4}\%$,相应土壤中的 ^{226}Ra 的放射性含量为 $25\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,因此土壤中的氡含量很高,是空气中的 $10^4\sim10^6$ 倍。 Ra 衰变产生的一部分氡原子经放射性反冲、扩散迁移至地表,进入大气中。地表氡的平均析出率为 $16\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,每年为 $5.05\times10^5\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$,乘上陆地的总面积 $1.5\times10^{14}\text{m}^2$,得 $7.6\times10^{19}\text{Bq}\cdot\text{a}^{-1}$,即陆地表面每年向大气中释放 $7.6\times10^{19}\text{Bq}$ 的氡。

表 1-1 岩石和土壤中的铀含量

种 类	土壤	花岗岩	页岩	石灰岩	基性火成岩	砂岩
铀含量/($10^{-4}\%$)	1.80	4.70	3.70	2.20	0.90	0.45

陆地表面氡的析出率受许多因素的影响,如土壤和岩石中的镭含量、孔隙度、水分、气象条件等。其中气压、水分、温度的影响是明显的。

(1)气压影响。大气压力的微小变化都会导致氡析出率的大幅度改变。图 1-1 是墙壁内氡析出率随气压的变化曲线,而土壤中氡析出率随气压的变化比这更要显著。气压变化 1%,氡析出率要向相反的方向变化 1 倍。

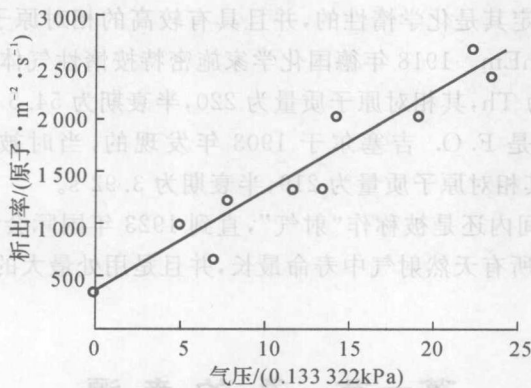


图 1-1 氡析出率随气压的变化

(2)水分影响。稍微潮湿的土壤比干燥土壤中氡的析出率高,但水分增加到一定程度时析出率急剧下降,因为水分子堵塞了氡原子运动的通道。

(3)温度影响。随着温度的增加氡析出率也增加,但也有相反的实验结果。

世界不同地区氡的析出率差异很大,已发表的数值摘要列于表 1-2。

2. 海洋释放

海水中含有一定量的²²²Rn,平均浓度为 $1\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$,海底比海面要高一个数量级。这样的镭浓度导致海洋表面氡的平均析出率为 $7\times10^{-5}\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,即 $2.2\times10^3\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,乘以海洋的总面积 $3.6\times10^{14}\text{ m}^2$,得 $8\times10^{17}\text{ Bq}\cdot\text{a}^{-1}$,即海洋每年向大气释放 $8\times10^{17}\text{ Bq}$ 的氡。该值比陆地释放量低两个数量级,可见海洋上大气中的氡浓度明显低于陆地。

表 1-2 某些地区氡析出率 单位: $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

地 区	土壤类型	析出率	地 区	土壤类型	析出率
奥地利 格拉茨	山地	20,9	香港地区	黑土	53
因斯布鲁克	山地	19	阿贡	黑土	21
法国 萨克来	灰壤	15,14	苏联 基洛夫	灰壤	15
德国 亚琛	灰壤	17	莫斯科	灰壤	3.8
爱尔兰 都柏林	灰壤	27	西南喀山斯坦	沙漠	5
日本 大阪	砖红壤	3.4,8.8	列宁格勒	灰壤	7.3
菲律宾 马尼拉	砖红壤	11	高加索	山地黑土	11
美国 新墨西哥	沙漠	34	中亚	山地沙漠	19
尤卡弗莱特	沙漠	18	南乌拉尔	山地灰壤	11

大陆和海洋上大气中氡浓度差异悬殊,导致了海岸附近大气中的氡浓度会受风向的影响。当风从海上吹向陆地时,氡浓度下降,反之上升。即使距海岸几百千米的大陆深处,这种影响也是明显的。

3. 植物和地下水的载带

植物的生长将增加地表氡的释放。实测结果表明,种五谷的土地氡的释放率是那些不毛之地的3~5倍。地下水会把地壳深处的氡带到地面而释放到环境大气中。地下水中的氡浓度很高,一般在 $1.85\times10^5\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,高者可达 $1.85\times10^7\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$,可能形成局部地区的重要氡源。由于植物和地下水的作用,每年向大气中释放约 $1\times10^{19}\text{ Bq}$ 的氡。

4. 核工业释放

核工业的发展,尤其是在核燃料生产过程中,如采矿、水冶是释放氡的主要环节。随着对核燃料需要量的增加,铀矿石的产量在以惊人的速度增长着。以铀产量来衡量这种增长,1855—1900年间全世界的铀产量总共只有3t,第二次世界大战期间迅速增加,1942年的年产量上升到100t,目前的年产量已超过30000t。美国、俄罗斯、中国、加拿大、澳大利亚等国都是产铀国。

铀矿井内积累的大量的氡排入环境,排量因矿山规模不同而有差异。我国一个正在生产的中等铀矿山每天要排入环境 10^{10} Bq 的氡。

在水冶过程中,²³⁸U与²³⁰Th,²²⁶Ra分离,95%的²³⁰Th和99%的²²⁶Ra进入尾矿堆,于是尾矿堆便成了人工氡气源。尾矿的特点一是产量多,二是占地面积大。到1977年美国17个在役的水冶厂共有尾矿 $1.15\times10^8\text{ t}$,占地 $8.1\times10^8\text{ m}^2$;已停产的23个水冶厂有尾矿 $2.3\times10^7\text{ t}$,

占地 $4.05 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。不加覆盖的尾矿堆氡的析出率是土壤的 $2 \sim 3000$ 倍,表 1-3 是美国尾矿堆氡的析出率。如此大的波动是由各尾矿堆中的 ^{226}Ra 的含量不同,气象条件的变化以及覆盖情况的差异引起的。

尾矿堆上空气中氡的浓度明显增高,在其周围 1km 内天然本底将有所增加。

估计全世界的铀矿山和水冶厂每年释放到大气中的氡为 $1 \times 10^{19} \text{ Bq}$,这是一个不可忽略的数字。使用中的尾矿堆可利用水作覆盖,废弃的尾矿堆要加土进行永久性覆盖。一层 60cm 的水可使氡的析出率降到 10% , 1m 厚的土层可使尾的析出率降到 1% , 6m 厚的土层可使矿堆附近氡气降到本底水平。因为表层土壤会流失,需要定期修理和加厚。

表 1-3 美国一些尾矿堆氡析出率

研究方式	方法	析出率范围/ (原子 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	作者(时间)
在若干个尾矿堆上作了几次测量	累积收集	20~387	Bernherdt 等人(1975 年)
在一个尾矿堆上调查了 1 年	箱式	29~323	Cauntess(1977 年)
着重研究一个尾矿堆并在另外两个尾矿堆上进行间断测量	累积收集	65~1843	Marpleand Clements(1977 年)
在许多尾矿堆上作了几次测量	箱式	2~2820	Ford Bacen 等人(1976 年)

5. 煤的燃烧

煤是工业和居民生活中广泛使用的化石燃料,每年各国要烧掉大量的煤。一个普通的取暖锅炉(20t)每年要烧掉 6000t 煤,一个中型的火力发电厂每年要烧 30 万吨煤。煤中的铀含量平均为 $1.0 \times 10^{-4} \%$,灰量以 10% 计,则灰中的铀含量便被浓缩到 $1.0 \times 10^{-3} \%$ 。有铀必然有镭,煤灰也就成了一种人工氡气源。估计全世界由于烧煤每年释放到大气中的氡约为 $1 \times 10^{13} \text{ Bq}$ 。

煤灰的产量是惊人的,而且随意堆放,与尾矿堆相比,具有更大危害性:①尾矿堆被人重视而加以覆盖,远离居民点,而煤灰无人过问,分散在居民中间;②尾矿堆中的放射性物质是以 ^{230}Th 的半衰期($8 \times 10^4 \text{ a}$)衰减的,而煤灰堆中的放射性物质是以 ^{238}U 的半衰期($4.5 \times 10^9 \text{ a}$)衰减的,比尾矿堆要大 5 个数量级,也就是说煤灰几乎是永不消失的氡源。

6. 磷酸盐工业

磷酸盐矿石中的铀含量高,尤其以海生磷酸盐矿石为最高。摩洛哥、俄罗斯、美国和中国都大量生产磷酸盐矿石,美国此类矿石的生产量约占全世界总产量的 40% ,而其中 80% 又集中产在佛罗里达。美国磷酸盐矿石中的铀含量为 $8 \times 10^{-4} \% \sim 4 \times 10^{-2} \%$,平均为 $8.0 \times 10^{-3} \%$,1973 年生产矿石 1.27 亿吨,含铀 1.0 万吨,可供 60 座反应堆使用一年。

磷酸盐的 80% 作为磷肥而施撒在土地上,施磷肥的土地其氡的析出率不亚于尾矿堆,原因是土壤中富集了较高浓度的 ^{226}Ra 。美国 Belgan Agricultural 研究中心在试验田里施撒磷肥(P_2O_5),11 年间在两块地里分别施磷肥 $0.0343\text{kg}/\text{m}^2$ 和 $0.1366\text{kg}/\text{m}^2$,结果使 $0 \sim 20\text{cm}$ 深的土层中 ^{226}Ra 的平均比活度达到 $32.2\text{Bq}/\text{kg}$,比正常土地增加了 28% 。

磷酸盐工业的副产品石膏通常作为建筑材料,无疑会增加室内的氡浓度。估计在全世界由于磷酸盐工业每年释放到大气中的氡为 $1 \times 10^{18} \text{ Bq}$ 。

7. 天然气

20 世纪初,人们知道天然气中含有放射性物质,并测定了其中的氡浓度。天然气中氡浓度差异很大,大致在 $(5.6 \sim 37) \times 10^4 \text{ Bq/m}^3$ 。不同城市天然气中氡浓度不同。估计每年由于天然气的燃料向大气中释放约 $1 \times 10^{14} \text{ Bq}$ 的氡。与烧煤相比,烧天然气更容易增加室内的氡浓度。

8. 建筑物的释放

由于建筑材料中都含有一定量的 ^{226}Ra , 墙壁、地板、天花板内产生的氡有一部分释放到室内空气中。一般室内空气中的氡浓度比环境中要高一个数量级,在通风和扩散的作用下室内的氡便进入环境。1990 年,全世界有标准房间(室内表面积为 350 m^2 、体积为 200 m^3) 1×10^9 个,每年释放到环境中的氡约 $1 \times 10^{16} \text{ Bq}$ 。

二、室内空气中氡的来源

室内的氡浓度高于室外,其主要来源有以下几个方面:

1. 环境

室外大气中的氡浓度随着空气流动而进入室内,使室内空气中氡浓度增高。

2. 地基土壤

建筑物周围和地基土壤中的氡可以通过扩散或渗透进入室内,进入室内的通路可以是地面裂隙以及穿过地面的各种管线周围缝隙。

(1) 扩散。假如地基土壤上面有一层地板(水泥或三合土),则地板表面氡析出率为

$$R_T = \frac{R}{\cosh \frac{L_C}{L_{Rn, \text{slab}}} + \frac{F_{\text{soil}} L}{F_{\text{slab}} L} \sinh \frac{L_C}{L_{Rn, \text{slab}}}} \quad (1-1)$$

式中, R_T 为地板表面氡析出率, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$; R 为土壤表面氡析出率, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; L_C 为地板厚度, m ; $L_{Rn, \text{soil}}$ 为土壤中氡扩散长度, m ; F_{soil} 为土壤孔隙度; F_{slab} 为地板孔隙度。

由此导致的室内氡进入率为

$$U_T = 3600 R_T S / V \quad (1-2)$$

式中, U_T 为氡进入率, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$; S 为居室地板面积, m^2 ; V 为居室容积, m^3 。

(2) 渗流。由气象参数变化产生的压力梯度引起的渗流作用自然受到气象条件的影响,因此渗流作用引起的氡进入量是变化的。假设土壤空气进入室内的只占空气交换率的 0.1%,每小时进入室内的土壤空气为 0.045 m^3 ,则由此引起的室内氡进入率为

$$U_C = C_0 \beta \lambda_v \quad (1-3)$$

式中, U_C 为氡进入率, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$; C_0 为土壤空气中氡放射性浓度, $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$; λ_v 为室内换气速率, h^{-1} ; β 为进入室内的土壤气体交换律的份额。

3. 建筑材料

任何房屋都是用各种建筑材料建成的。因为建材中含有 ^{226}Ra , 生成的氡便进入室内,进入室内氡量取决于建材中 ^{226}Ra 的含量和墙壁表面的处理情况。一般情况下,墙壁积累的氡有 10% 进入室内。墙壁表面氡析出率为

$$R = \lambda_{Rn} \rho_b C_{b,Rn} F_r L_{Rn} \tanh \frac{L_b}{L_{Rn}} \quad (1-4)$$

式中, R 为墙表面氡析出率, $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; λ_{Rn} 为氡衰变常数, $2.1 \times 10^{-6} s^{-1}$; ρ_b 为建材密度, $kg \cdot m^{-3}$; $C_{b,Rn}$ 为建材中 ^{226}Ra 比活度, $Bq \cdot kg^{-1}$; F_r 为射气系数; L_{Rn} 为氡在建材中扩散长度, m ; L_b 为建材的半厚度, m 。

若墙各处氡析出率不同, 则建材氡的进入率为

$$U_b = \frac{3}{V} \frac{600}{\lambda_v} \sum_i R_i S_i \quad (1-5)$$

式中, U_b 为室内来自建材的氡进入率, $Bq \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$; R_i 为第 i 块室壁氡析出率, $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; S_i 为第 i 块室壁面积, m^2 。

建筑氡的析出率取决于其中 ^{226}Ra 含量、孔隙度、水分及压力, 还取决于墙边表面的处理情况。

4. 用水

在做饭、洗衣和淋浴时, 水中的氡便释放到室内的空气中, 若水中氡浓度达到 $10^4 Bq \cdot m^{-3}$ 时, 便是室内的重要氡源。水中氡的释放量与温度和时间有关, 如图 1-2 所示。室温 $15^\circ C$ 时水中氡减少 40%, 也就是说有 60% 的氡已进入室内空气中。当然也与用水的情况有关。水中氡对室内空气中氡浓度的贡献为

$$C_{a,R} = \frac{C_{w,R}}{24 \lambda_v V} \sum_{i=1}^N l_i w_i \quad (1-6)$$

式中, $C_{a,R}$ 为室内空气中氡浓度, $Bq \cdot m^{-3}$; $C_{w,R}$ 为水中的氡浓度, $Bq \cdot m^{-3}$; λ_v 为通风率, h^{-1} ; V 为房间的体积, m^3 ; l_i 为每种用途氡释放到空气中的分数; w_i 为各种用途的用水量, m^3 。

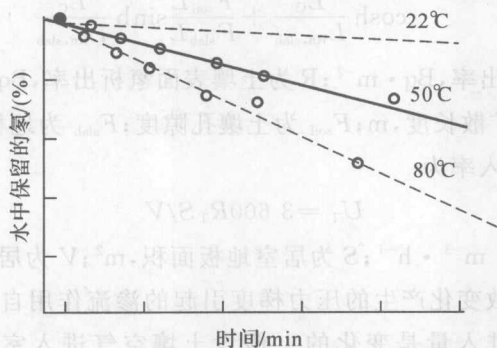


图 1-2 不同温度下水中氡随时间的损失

一般水中的氡浓度很高, 不同水中的氡浓度列表于 1-4。

表 1-4 不同水中氡浓度

不同来源的水	$C_{Rn} / (Bq \cdot m^{-3})$
矿泉及深井水	$3.7 \times 10^5 \sim 3.7 \times 10^6$
地面水	$3.7 \times 10^3 \sim 3.7 \times 10^4$
雨水	$3.7 \times 10^4 \sim 3.7 \times 10^6$

5. 天然气燃烧

在烧天然气和石油液化气时,由于没有烟囱,其中的氡全部释放到室内。天然气中氡浓度大致在 $5.6 \times 10^4 \sim 37 \times 10^4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内,因输送和储存原因氡要衰变一部分。不同城市天然气中氡浓度不同,估计每年由于天然气的燃烧向大气释放 $1 \times 10^{14} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 的氡。与烧煤相比,烧天然气更容易增加室内的氡浓度。

第二节 氡的基本性质

一、化学性质

氡的原子序数是 86,是周期表中第六周期的零族元素,属惰性气体族(He,Ne,Ar,Kr,Xe,Rn)的最后一个元素,也是气体中最重的一个元素。氡同位素的原子不带电荷,分子是单原子的。

氡是镭核衰变的中间产物,有四个同位素,其中²²²Rn 和²¹⁸Rn 是铀系衰变的中间产物,而²¹⁹Rn(Ac——锕射气)和²²⁰Rn(Th——钍射气)分别是锕系和钍系中铀同位素的衰变产物。

氡进一步衰变还可产生若干代子体,以²²²Rn 为例,其衰变可产生²¹⁸Po,²¹⁴Pb,²¹⁴Bi,²¹⁴Po 等短寿命子体,如表 1-5 所示。

表 1-5 氡的短寿命子体

核素符号	名称	老符号	半衰期	核衰变类型
²¹⁸ ₈₄ Po	镭 A	RaA	3.05min	α
²¹⁴ ₉₂ Pb	镭 B	RaB	26.8min	β
²¹⁴ ₈₃ Bi	镭 C	RaC	19.7min	β
²¹⁴ ₈₄ Po	镭 C'	RaC'	$1.64 \times 10^{-4} \text{ s}$	α

氡的电子构型为 6s²6p⁶。氡不能离解为离子,是个典型的亲气元素,一般呈气体形式存在。氡的主要化学参数如表 1-6 所示。

表 1-6 氡的化学参数表

元素	原子序数	相对原子质量	原子体积 cm ³ /g·原子	原子容积 g/L	熔点/℃	沸点/℃	电子构型	电负性
Rn	86	222		9.73	-71	-61.8	6s ² 6p ⁶	

地表丰度	地球化学电价	原子半径 10 ⁻¹⁰ m	共价半径 10 ⁻¹⁰ m	离子半径 10 ⁻¹⁰ m	电离势/eV	还原电位/V	离子电位/V
7×10 ⁻²	0				10.746		

1936 年以前,人们认为,氡是化学性质不活泼的惰性气体,因为未能观察到氡进入化合物的任何标志。1936 年,B. A. 尼基京获得了氡的化合物 $Rn \cdot 6H_2O$ 。

必须指出,在低于 0°C 时,各种气体能与水形成结晶水化合物,成分为 $X \cdot 6H_2O$ 的络合物。对于不同的气体,这些化合物的稳定性不同,而且它们的结合能和相应的离解压力取决于水与气体分子间范德瓦力的强度,即取决于分子的极化程度。包括氡在内的惰性气体不能形成具有离子键和原子键的化合物,不能形成盐、氢化物和通常的分子。但是,还有一类化合物,即络合物,其中分子间的连接取决于范德瓦力。它们有固定的成分,在反应物质之间可观察到化学变化关系,而且这些化合物的结合能不大。B. A. 尼基京获得的分子的氡结晶水化合物是比较不稳定的。他指出,在可能形成络合物方面,氡在惰性气体中占有最先地位。

二、物理性质

在温度为 -65°C 、压力为 $101\,325\text{ Pa}$ 下,氡转化为液态。氡转化为固态的温度约为 -113°C ,熔点为 -71°C ,沸点为 -61.8°C 。在 0°C 和 $101\,325\text{ Pa}$ 下,气态氡的密度为 $9.727 \times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$,液态氡的密度为 5.7 g/cm^3 。

液态氡起初是无色透明的,然后由于衰变产物逐渐变浑,它能使容器的玻璃壁发绿色荧光。固态氡不透明,能发出明亮的浅蓝色光。

铀射气的沸点为 -65°C 。在大气压 $101\,325\text{ Pa}$ 和温度为 -143°C 时,固态铀射气相当快地升华。氡的可见、紫外和红外光谱都研究得很好。只能观测到新生氡的纯光谱,因为氡及其子体在进行核衰变时,氡相当快地形成,其光谱叠加在氡的光谱之上。大致经过一个月后,氡的光谱消失。氡具有特征性的电发光谱,在可见、紫外和红外区有 227 条光谱线,如表 1-7~表 1-9 所示。

表 1-7 可见光区段内氡的主要谱线

3 664.8	3 981.68	4 307.76	4 625.48	5 888.6
3 753.6	4 018.00	4 349.60	4 644.18	5 944.7
3 957.15	4 017.75	4 459.25	4 680.83	5 977.4
3 971.67	4 203.23	4 510.20	5 582.4	6 309.0
			5 715.9	

* 波长单位为 10^{-10} m ,表 1-8, 1-9 同此。

表 1-8 紫外线区内氡的主要谱线

3 626.5	3 106.7	3 010.8	2 842.1
3 612.8	3 068.9	3 006.8	2 838.5
3 312.8	3 064.6	2 892.7	
3 114.6	3 045.2	2 887.2	

表 1-9 红外线区段氡的主要谱线

7 055.42	7 470.89	8 099.51	9 327.02
7 268.11	7 483.13	8 270.96	
7 419.04	7 746.64	8 520.95	
7 450.00	7 809.82	8 675.83	

氡的扩散是由于热运动,气体分子沿浓度减少方向位移的结果。氡的扩散一般用扩散系数 D 来描述,它在数值上等于当浓度梯度为一个单位时,单位时间内通过单位面积的氡气量,因而也可称它为扩散速度。它的量纲是 cm^2/s 。

除了扩散系数外,还用扩散长度 l 来描述氡气的扩散作用,其表达式为

$$l = \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \quad (1-7)$$

式中, D 为扩散系数; λ 为衰变常数。

扩散长度(l) 是表示当氡气浓度减少到 $1/e$ 时,离氡气源的距离,它反映了扩散距离减弱的特性。

氡的扩散系数在岩石中可从 $7 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 变到 $5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。而在空气中则比水中高四个数量级。氡的扩散长度(l) 在疏松沉积物中为 $1 \sim 2 \text{ m}$, 钍射气为 $1 \sim 2 \text{ cm}$, 而铀射气就更小了。

扩散系数的大小主要取决于孔隙度、透水性、湿度、结构和扩散时的温度。

在几种介质中射气的扩散系数和扩散长度如表 1-10~表 1-12 所示。氡在空气中的扩散系数为 $0.105 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 而在水中为 $0.066 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 1-10 射气在不同介质中的扩散系数和扩散长度

扩散介质	扩散系数 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	扩散长度/cm		
		Rn	Th	Ac
空气	0.1	218	2.8	0.75
水	10^{-3}	2.18	0.028	0.007 5
砂子(孔隙度 40%)	$(4.5 \sim 7.0) \times 10^{-2}$	146~183	1.88~2.35	0.5~0.63
疏松沉积物(孔隙度 20%)	$(2.0 \sim 2.5) \times 10^{-2}$	102~129	1.24~1.66	0.34~0.44
花岗闪长岩之残积物	5×10^{-3}	50	0.65	0.08
致密未蚀变的花岗闪长岩	5×10^{-4}	15.7	0.26	0.027

表 1-11 不同条件下的扩散系数

岩石特征	氦同位素	扩散系数 $10^{-2} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	测定方法	测定者
在填坑时捣实的黏土质砂土	氦	2.6	按长圆柱内氦的分布	A. Г. 格拉马柯夫 H. M. 里亚特柯夫斯基
在填坑时未经捣实的黏土质砂土	氦	3.3		
干石英砂	氦	6.5		
砂质黏土(土壤)	铜射气	3.5	按铜射气流	Б. И. 巴兰诺夫 Е. Г. 格拉切夫
砂质黏土(土壤)	钍射气	3.5	按钍射气流	Б. И. 巴兰诺夫 Е. Г. 格拉切夫
石英砂(湿度为 10.4%)	钍射气	3.7	按钍射气流	A. Г. 格拉马柯夫
石美砂(温度为 15.2%)		1.0		Б. И. 斯特罗
在天然条件下微潮的坡积层(在夏季)	氦	7.0	按氦浓度随深度的分布	Г. В. 果尔什科夫 Е. Г. 格拉切夫
天然条件下,破碎花岗闪长岩(微湿的)	氦	0.5	按氦浓度随深度的分布	Б. И. 巴兰诺夫 Г. В. 果尔什科夫
致密的未蚀变的花岗闪长岩(干的)			按氦浓度随深度的分布	Е. Г. 格拉切夫 Б. И. 巴兰诺夫
壤土(天然产状下)	氦	$0.0n(n \text{ 为整数})$	比较在深 0.5m 及 1.0m 的氦浓度	Г. В. 果尔什科夫 Е. Г. 格拉切夫
季节性缟状土(天然产状)	氦	1.0~3.0	按氦浓度随深度的分布 按氦浓度随深度的分布	Б. И. 巴兰诺夫 Б. Б. 米林
残积-坡积碎屑沉积物	氦	0.65~0.75	按圆柱体内氦分布	И. Ф. 波普列琴斯琴
河沙(孔隙度为 43%,湿度为 0.5%)	氦	4.5	按圆柱体内氦分布	И. Ф. 波普列琴斯琴
白黏土(耐火的,湿度为 4.5%,孔隙度为 59.3%)	氦	1.17~1.23	按圆柱体内氦分布	И. Ф. 波普列琴斯琴
砂质黏土(湿度为 5.7%,孔隙度为 10.8%)	氦	1.53		Н. И. 穆希琴柯
	氦		H. И. 穆希琴柯	
	氦	1.09		H. И. 穆希琴柯