

张 哲

氦的析出与排氦通风

原子能出版社



内 容 提 要

本书较系统地论述了氡在射气介质（包括土壤、岩石、建筑材料等）中的运移和穿过介质表面逸入大气的析出，特别指出了气体渗流对氡析出的影响，并结合国内外的若干实例作了说明。为了明确这一主题的实际意义，加写了氡的积累、氡子体的积累和排氡通风。

本书可供矿井防氡、环境保护研究人员，高等院校采矿专业、环境保护专业师生，中等专业学校采矿专业教师及各类矿山通风与安全防护人员参考。

氡的析出与排氡通风

张 哲

原子能出版社出版

（北京 2108 信箱）

重庆印制第一厂印刷

（枇杷山后街 87 号）

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $7 \frac{1}{2}$ · 字数 160 千字

1982 年 9 月第一版 · 1982 年 9 月第一次印刷

印数 001—1350 · 统一书号：15175·408

定价：0.90

前 言

随着生产和科技事业的迅速发展，氦气防护问题已经超出了铀矿山的范围，成为改善地下矿山空气条件和保护人类环境的一个普遍关心的问题。经验证明，实际采取的防氦措施能否收到预期的效果，在很大程度上取决于它是否符合当地的氦析出规律。符合了，就可收到事半功倍的效果，反之，则可能事倍功半，收效甚微。

关于氦析出规律的论述在铀矿防护、矿井通风、环境保护、建筑材料监测等有关文献中虽都有涉及，但属凤毛麟角，不成系统，至今尚未见到系统的论述。尤其对渗流对氦析出的影响论述更少。

本书的提纲曾在1977年冶金工业部盘古山通风会议上刻印散发，征求过一些同志的意见。初稿曾作为冶金工业部排氦通风学习班的讲义，1978年夏在个旧讲了近20天。1979年初对初稿又做了一些修改。这次虽然付印了，错误和不足之处肯定还会有，这是由我的水平不高所致，希望同志们予以指正。

昆明工学院讲师赵梓成同志，冶金工业部武汉安全技术研究所工程师赵鹏同志，昆明冶金工业学校老师周洵远同志，二机部第四设计研究院工程师李冶同志对本书的写作给予了很大的支持。湖南第六研究所王生德、于慧玉二位工程师提供了许多极其宝贵的资料并对原稿提出了许多宝贵意见，张启

宇、朱思明二位工程师也为初稿提了不少宝贵意见。作者谨在此表示衷心的感谢。

作者特别感谢二机部工程师朱志祥同志，感谢他在百忙中为本书做了全面的审阅，不仅指正了某些错误，而且为提高本书的质量提出了有见地的意见。

作为一个初学者，能够得到这样多的关怀、支持和帮助，不仅是一种荣幸，也是一种激励和鞭策。如果这本书能对读者有什么帮助，那也只能算做集体智慧的结晶。

作者

绪 论

矿井大气中的氡及其子体对人的伤害是所有辐射伤害中历史最悠久的一种，矿工遭受这些放射性物质的伤害已经几百年了^[1-4]。

提起矿井大气中的氡及其子体，人们自然会问：矿井大气中的氡是从哪里来的？它是怎样跑到矿井大气中去的？是什么原因使矿井大气中氡及其子体的浓度比地面高？怎样才能减少跑到井下大气中的氡的数量？如此等等。所有这些都是从事氡析出规律研究的人员应当回答的问题。氡析出规律的研究是发展矿井防氡技术的一个重要方面。

第二次世界大战以前，对中欧矿山进行研究的人曾认为，高放射性的矿井水是井下空气中氡的主要来源。后来，在少水或无水的矿井中也发现了高浓度的氡，经过研究，证实了铀矿体的暴露表面是氡的主要来源^[8]。事实上，不仅铀矿体表面能析出氡，土壤表面，普通的岩石表面以及建筑材料表面也都能析出一定量的氡，特别是破碎的岩石有更大的析出氡的能力。我们把所有能够析出氡的介质统称射气介质。

从氡析出研究所包括的内容来看，它在矿井防氡技术中占有重要地位。但是，氡的迁移和活动规律的研究并不是在矿井防氡技术这个领域中发展起来的，而是在铀矿床的放射性物理勘探中发展起来的。造成这种情况的原因之一，人们对矿井防氡的重要性经历了一段较长的认识过程。

人们对氡及其子体危害的认识，一般认为应从本世纪三十年代在德国南部和捷克斯洛伐克的波希米亚地区的矿井中测得高浓度的氡算起。在这些矿井工作的矿工中，肺癌发病率很高，十九世纪即已提出了这方面的报告^[1]。不过，在相当长的一段时间里，人们对氡及其子体是否是导致矿工中肺癌发病率高的主要原因存在怀疑。这一方面是由于氡及其子体致癌有一个很长的潜伏期，另一方面，矿井大气成分复杂，氡及其子体往往和其它有害物如砷、重金属尘等混合在一起，扰乱了人们的视线。当时，人们的注意力集中到如何采得尽可能多的矿石，多回收镭和铀。原子能的军事应用使铀矿开发具有更重大的意义，怎样才能迅速而准确地找到大型铀矿床、扩大铀的资源成为当务之急。放射性物探技术迅速发展，氡的迁移和活动规律的研究也得到了迅速发展^[6-8]。而矿井防氡技术的研究却仍然处于积累资料的缓慢发展阶段。到了六十年代，大规模的铀矿开发已近20年，人们初步认识到了铀矿开采与加工过程中的辐射防护技术落后于核反应堆和同位素应用的辐射防护的状况亟需改进。六十年代末期和七十年代初期，人们对氡及其子体危害的严重性认识得更加明确，一系列情况的变化对矿井防氡技术——其中包括氡析出规律研究提出了较为迫切的要求。这些变化是：

1. 最大允许标准降低了，剂量控制也严格了。例如，苏联的《辐射安全标准-69》(HPB-69)规定井下空气中氡的短寿命子体的年平均允许浓度为 3×10^{-11} 居里/升^[9]，美国专门为铀矿制定的防护法规规定矿工在一年内接受的氡子体的累积照射不得超过4个“工作水平月”^[10]。怎样才能经济而有效地达到这些法规的要求成了铀矿山继续发展所面临

的重大问题^[11]。

2. 埋藏较浅的铀矿体越采越少, 采矿深度逐年增加, 通风越来越困难, 对通风的要求却越来越高, 造成通风成本成倍增高^[12, 13]。

3. 人类生活环境中氡及其子体对人类健康的影响引起了人们的极大关切^[14-16]。

依靠对矿井防氡技术的泛泛了解显然无法解决上述变化所提出的问题。不深入研究氡的析出规律, 很难圆满解决铀矿发展中所面临的辐射防护问题以及非铀矿山和人类环境中的氡问题。正是在这种情况下, 对氡析出规律和影响因素的研究才逐渐发展起来。目前, 氡析出规律的研究在下述几个方面比较活跃。

1. 射气介质表面氡析出率的测定技术。为提高测量的精确度, 局部静态法受到重视, 不仅在测量的装置上有了许多改进, 而且在测量的计算公式研究方面也有发展。除了常用的空盒式积累箱以外^[17], 还研究了装有吸附材料——活性炭的积累箱^[18], 装有搅拌风机的积累箱^[19], 直接测量氡析出率的装置^[20]等等。在测量和计算过程中注意了氡向射气介质内部返回扩散的影响^[19, 21, 22]。

2. 通风压力和大气压力的变化对氡析出的影响。这项研究很引人注意, 因为它指出了减少井下通风空间氡析出量的可能。目前, 这种影响已被揭示出来^[23, 24], 但要实际应用还有一些问题要解决。自动连续测氡装置的研制成功^[25]对研究影响氡析出因素有重大意义。

3. 氡在各种介质中迁移规律的研究和基本参数的测定。这是氡析出的基础研究, 不仅研究了射气介质中铀的含

量、样品块度大小、应力荷载等对氡析出的影响^[26],而且还测定了一些介质中氡浓度的分布和扩散系数^[24,27],明确地指出了多孔射气介质中气体渗流对氡传播的巨大影响。随着对氡的覆盖技术的重视^[28,29],开始仔细地研究氡在有机材料中的扩散传播^[30]。

4. 生产矿山氡的析出。这项研究是与改善矿山防护状况直接联系在一起的。它包括:各生产工序中的氡析出^[26,31],不同通风条件下井下氡浓度的变化,以及采空区对井下空气的污染^[32,33]。

总之,近十多年来,有关氡析出的各方面研究都取得了进展。了解井下氡的析出规律,控制矿井中氡的析出,保护铀矿工人的健康与安全,保证铀矿开采工业的顺利发展,这固然是氡析出规律研究的重要目的,但其实际意义比这更深远,更广泛。从目前了解的情况看来,氡不仅铀矿里有,非铀矿山井下空气中也都有氡。有些矿山,情况比铀矿山更严重^[3,28,34]。氡析出规律的研究和当前存在的问题相比,仍然是个薄弱环节。放射性物探在射气传播方面所获得的成就对矿井防氡技术很有意义,进一步发展射气理论,把它和矿井防氡结合起来,必将加速氡析出研究的发展。然而,仅仅依靠放射性物探的射气理论远远不能满足矿井防氡的需要。射气介质中气体渗流对氡析出的巨大影响要求我们更仔细地研究射气介质中氡的扩散——渗流迁移规律。以为照抄那一方面的理论就可以解决氡析出的想法是不符合实际的。只有吸取各有关学科的长处,总结矿井防氡的成就,逐步建立完整的矿井防氡理论,矿山井下和人类环境中的氡及其子体问题才能得到较好的解决。

目 录

绪 论	1
第一章 氦及射气介质的基本性质	1
第一节 天然衰变系和氦的产生	1
第二节 氦及其子体	11
第三节 射气系数和扩散系数	23
第二章 射气介质表面的氦析出	27
第一节 氦在射气介质中的传播	27
第二节 半无限大介质表面的氦析出	38
第三节 圆柱形空间和圆柱形射气介质的氦析出	60
第四节 无限延展有限厚射气介质表面的氦析出	66
第五节 球形射气介质表面的氦析出	71
第三章 破碎介质的氦析出	80
第一节 破碎介质中氦的传播过程	80
第二节 半无限大条件下破碎介质表面的氦析出	85
第三节 渗流对氦析出的影响	90
第四节 留矿法矿房氦析出的实验结果	95
第四章 射气介质中的气体渗流	100
第一节 射气介质中渗流的分类	100
第二节 半无限大射气介质外部气压的突然变动造成的不稳定 渗流	104
第三节 爆破对氦析出的影响	114
第四节 大气压力的波动对半无限大介质表面氦析出的影 响	118

第五章	氦的积累	122
第一节	氦积累的一般方程和计算模型	123
第二节	封闭空间中氦的积累	128
第三节	稳定通风状态下, 巷道型通风空间风流中氦浓度的增长	132
第四节	硐室型通风空间中的氦浓度	135
第六章	氦子体的积累	138
第一节	静止的纯氦中氦子体的积累	138
第二节	硐室型通风空间, 稳定通风状态下的氦子体 α 潜能	144
第三节	均匀析出的巷道型通风空间, 稳定通风状态下氦子体 α 潜能的生长	149
第七章	氦析出率的测定方法	155
第一节	测定方法的分类	155
第二节	全巷动态法	156
第三节	局部静态法	161
第八章	排氦通风	171
第一节	排氦通风的特点	171
第二节	合理通风方式的选择	176
第三节	排氦风量计算方法	188
第四节	排氦通风的管理	205
参考文献		214
附录	附录 1 几种岩矿石的射气系数	218
	附录 2 岩石的渗透系数	220
	附录 3 氦在几种介质中的扩散系数	222
	附录 4 岩石的孔隙率	222
	附录 5 空气的物理系数	224
	附录 6 主要矿岩的渗滤特性	225

第一章 氡及射气介质的基本性质

射气是氡、氡和氡这三种天然放射性气体的总称。这三种气体的原子序数相同，在元素周期表中都处于氡的位置上，故氡和氡都是氡的同位素。为了区分这三种放射性气体，在把它们都称做氡时，要分别注明它们各自的核子数，把氡称做氡-222，把氡称做氡-220，把氡称做氡-219。以后便可看到，在矿山放射性防护工作中最有意义的是氡-222，因此，本书所说的射气指的就是氡-222，或直称之为氡。

这三种放射性气体的寿命都不长。如果不是有三个寿命长得可以和地球的年龄相比的核素作为它们各自的母体核素的话，它们早就因放射性衰变而从地球上消失了。这些母体核素可以存在于各种介质中。岩石、土壤、建筑材料等是含有这些母体核素的主要介质。射气就在这些介质中产生，并在它们衰变成另一种核素之前在介质中运动和传播。在我们研究矿井中氡的析出规律时，把这些介质统称为射气介质。

第一节 天然衰变系和氡的产生

自然界天然存在着许多种放射性核素，看起来好象很复杂，但在经过仔细的研究以后，发现其中有许多放射性核素乃是某种放射性核素顺序衰变的中间产物。它们的衰变顺序严格地按照一定的规律排定，构成了具有固定衰变关系的一

系列放射性核素，我们称它为天然衰变系。

一、三个天然衰变系

目前，在自然界找到的天然衰变系主要有三个：铀系、钍系和锕系。铀系的第一代核素是铀-238，钍系的第一代核素是钍-232，锕系的第一代核素是铀-235。这三种核素的放射特征参数列于表 1。

表 1 铀-238、钍-232、铀-235的放射特征

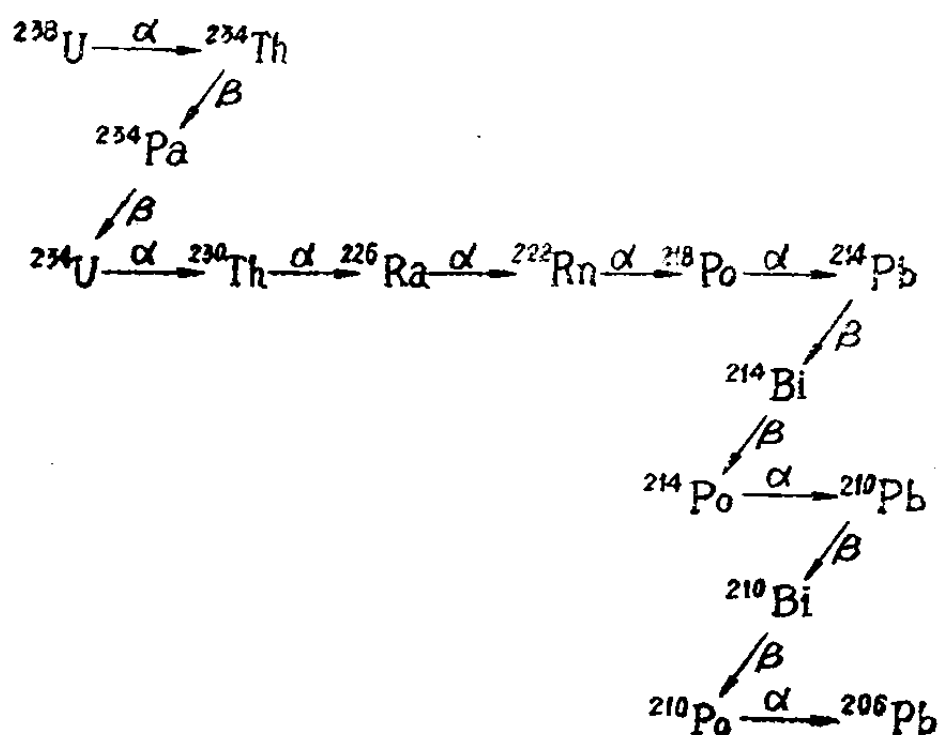
核素名称	化学符号	原子序数	质量数	半衰期,年	衰变类型	射线能量 兆电子伏
铀-238	U	92	238	4.51×10^9	α	4.196
钍-232	Th	90	232	1.4×10^{10}	α	4.012
铀-235	U	92	235	7.1×10^8	α	4.598

由表 1 所列数值可以看出，这三种核素的半衰期都很长，与一代人的寿命相比，完全可以把它们的数量看作不变的。这就是我们在自然界能够找到它们的各代衰变产物的原因。

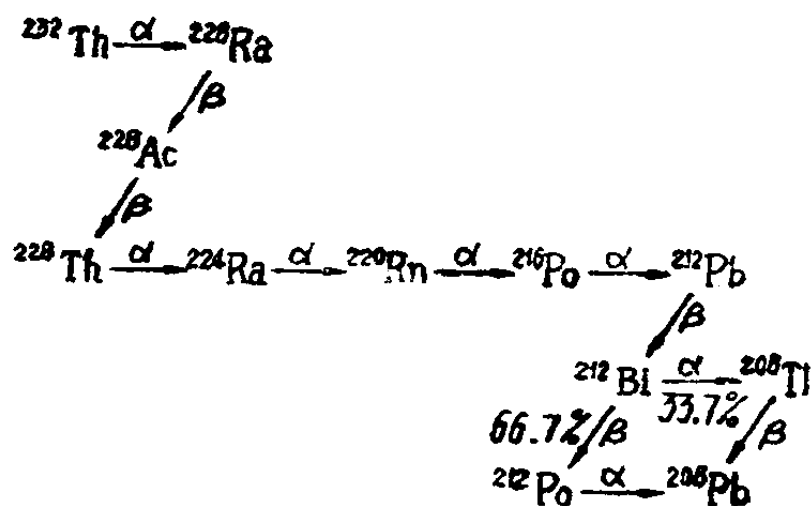
为了说明氡的产生，首先让我们看一下这三个天然衰变系。在图 1、图 2 和图 3 中分别给出了铀系、钍系和锕系的衰变简图，指出了各系的主要组成核素和它们之间的衰变关系。

这三个天然衰变系有一个共同点，这便是都有一个在常温常压下以气体形式存在的放射性核素，铀系是氡-222，钍系是氡-220，锕系是氡-219。这三种射气的放射特征参数列于表 2。

由表 2 所列数值看来，三种射气的最大差别在于它们的



Z 90 89 88 87 86 85 84 83 82 81



半衰期极不一致。氡-222的半衰期最长，氡-219的半衰期最短，氡-220则介于二者之间，但更接近于氡-219。

二、铀系各核素的衰变关系

氡-222是铀-238的一系列衰变产物之一，从这个意义上讲，只有介质中含有铀-238，其中才可能有氡-222。这就是常说的“有铀就有氡”。从铀系衰变简图可知，氡-222是由镭-226直接衰变而来的，严格地说，“有镭就有氡”才是准确的。那么，铀、镭、氡等等铀系核素之间的关系怎样呢？

由放射性衰变的基本规律可知，放射性核素的原子核因衰变而减少的数可用下式表示

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad (1-1)$$

式中 N —— t 时刻的原子核数；

λ ——该放射性核数的衰变常数。

衰变常数和半衰期之间具有如下关系

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}} \doteq \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}} \quad (1-2)$$

衰变发生后，原子核的性质发生了变化，由一种核素的原子核变成了另一种核素的原子核。当几种放射性核素具有连续的衰变关系——构成了衰变系时，母体核素因放射性衰变而损失的原子核数，就是子体核素所得到的原子核数。以铀系为例，如果用数字作足码来标明各代核素的原子核数和衰变常数，那么，第一代核素——铀-238的原子核数的变化即为

$$\Delta N_1 = -\lambda_1 N_1 \Delta t \quad (1-3)$$

因为第一代核素因放射性衰变而损失的原子核数就是第二代核素所得到的原子核数，再考虑到第二代核素的放射性衰变所造成的损失，所以第二代核素原子核数的变化即为

$$\Delta N_2 = -\lambda_2 N_2 \Delta t + \lambda_1 N_1 \Delta t \quad (1-4)$$

依此类推，不难写出第*i*代核素的原子核数的变化

$$\Delta N_i = -\lambda_i N_i \Delta t + \lambda_{i-1} N_{i-1} \Delta t \quad (1-5)$$

前面已经指出，铀-238的半衰期长达45.1亿年，当我们所考虑的时间间隔比它短得多时，可以把它看成是数量不变的，即 $N_1 = \text{常数}$ 。因而，它的原子核的衰变速率也就是一个常数，式(1-2)就可以改写成

$$\frac{\Delta N_1}{\Delta t} = -\lambda_1 N_1 = \text{常数} \quad (1-6)$$

式(1-6)表明，第一代核素——铀-238向第二代核素供应原子核的速率近似为一常数。铀-238的半衰期比铀系各核素都长得多，第二代核素的衰变速度就比铀-238快得多，故不论开始时第二代核素有多少原子核，在经过了足够长的时间以后，都必然会出现从第一代核素得到的原子核数等于损失掉的原子核数的平衡状态，即

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 \quad (1-7)$$

代入式(1-4)，显然 $\frac{\Delta N_2}{\Delta t} = 0$ ，即第二代核素的原子核数达到不增不减的稳定状态，第二代核素向第三代核素供应原子核的速率 $\lambda_2 N_2 = \text{常数}$ 。

由于有半衰期很长的第一代核素做后盾，按同样的推断方法，可知第三代核素也必然会达到与第二代核素平衡的状态，即

$$\lambda_3 N_3 = \lambda_2 N_2 \quad (1-8)$$

依此类推，可得到第*i*代子体核素达到平衡时的情况

$$\lambda_i N_i = \lambda_{i-1} N_{i-1} \quad (1-9)$$

只要时间足够长，整个衰变系中各代核素都将达到平衡状

态，这时

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \cdots = \lambda_i N_i \quad (1-10)$$

众所周知，衰变常数 λ 与原子核数 N 的乘积即是该种核素的衰变率，也就是放射性强度。因此可把式 (1-10) 的意义详述如下：

因为铀系第一代核素的半衰期极长，故可把它的放射性强度视为常数。在经过足够长的时间以后，铀系各核素将先后达到放射性平衡状态，这时，它们的放射性强度都相等。

应当指出的是，铀系各核素的放射性强度相等，丝毫不意味着它们的质量也相等。不过放射性核素的质量与其放射性强度之间有固定的换算关系。换算关系式如下^[36]。

$$M = 8.9 \times 10^{-14} AT_{\frac{1}{2}} I \quad (T_{\frac{1}{2}} \text{以秒为单位}) \quad (1-11)$$

$$M = 5.3 \times 10^{-12} AT_{\frac{1}{2}} I \quad (T_{\frac{1}{2}} \text{以分为单位}) \quad (1-12)$$

$$M = 3.2 \times 10^{-10} AT_{\frac{1}{2}} I \quad (T_{\frac{1}{2}} \text{以时为单位}) \quad (1-13)$$

$$M = 7.7 \times 10^{-9} AT_{\frac{1}{2}} I \quad (T_{\frac{1}{2}} \text{以天为单位}) \quad (1-14)$$

$$M = 2.8 \times 10^{-6} AT_{\frac{1}{2}} I \quad (T_{\frac{1}{2}} \text{以年为单位}) \quad (1-15)$$

这里 M ——放射性核素的质量，克；

A ——放射性核素的原子量，amu；

I ——核素的放射性强度，居里；

$T_{\frac{1}{2}}$ ——放射性核素的半衰期。

变换上述各式，即可得到计算一克放射性核素的放射性强度的公式^[36]，

$$I = 1.13 \times 10^{13} / AT_{\frac{1}{2}} \quad (T_{\frac{1}{2}} \text{以秒为单位}) \quad (1-16)$$

$$I = 1.88 \times 10^{11} / AT_{\frac{1}{2}} \quad (T_{\frac{1}{2}} \text{以分为单位}) \quad (1-17)$$

$$I = 3.10 \times 10^9 / AT_{\frac{1}{2}} \quad (T_{\frac{1}{2}} \text{以时为单位}) \quad (1-18)$$

$$I = 1.30 \times 10^8 / AT_{\frac{1}{2}} \quad (T_{\frac{1}{2}} \text{以天为单位}) \quad (1-19)$$