

YOU KUANG KAN TAN KAI CAI
ZHONG DE FU SHE AN QUAN

铀矿勘探开采中的辐射安全

[苏] Л. Д. 萨尔特科夫 等著

原子能出版社

内 容 简 介

本书探讨了铀矿勘探开采中的辐射安全问题。内容包括：铀矿的辐射危害因素；电离辐射的生物效应；剂量监测方法和监测仪表以及铀矿辐射监测的实施和组织管理等问题。书中着重讨论了铀矿生产条件下的辐射安全问题。

本书可供铀矿及其他与铀共生的有色金属矿的剂量监测人员、辐射安全技术人员，高等学校有关专业师生以及科学工作者参考。

Радиационная безопасность при разведке
и добыче урановых руд
Л. Д. Салтыков, И. Л. Шалаев, Ю. А. Лебедев,
Л. В. Горбунина

铀矿勘探开采中的辐射安全

张启宇 王生德 王西文 译

王 生 德 校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

*

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 $6\frac{1}{8}$ · 字数 135 千字

1980 年 5 月第一版 · 1980 年 5 月第一次印刷

印数 001—1500 · 定价：0.77 元

统一书号：15175 · 175

目 录

引 言	(1)
第一章 辐射安全问题	(3)
一、矿山企业辐射监测的任务	(3)
二、剂量学中所采用的物理量及测量单位	(6)
第二章 辐射危害因素	(10)
一、氡及其衰变产物	(10)
二、长寿命放射性核素的气溶胶	(16)
三、矿石的 γ 及 β 辐射	(21)
四、放射性表面污染	(25)
五、外部环境的污染	(27)
六、人工辐射源	(29)
第三章 辐射安全标准	(31)
一、天然放射性源	(31)
二、辐射安全标准总则	(33)
三、内照射	(37)
四、氡及其衰变产物	(60)
五、放射性表面污染	(76)
第四章 剂量监测方法及仪器	(80)
一、放射性气体浓度的测量	(80)
二、氡衰变产物及矿井粉尘浓度的测量	(86)
三、外照射监测	(97)
第五章 辐射监测的实施和组织管理	(105)
一、氡及其衰变产物	(105)
二、外照射	(110)

三、长寿命放射性核素的气溶胶	(113)
四、放射性表面污染	(118)
五、实验室的辐射监测	(122)
六、企业外部环境的放射性污染	(124)
七、辐射监测的组织管理	(128)
第六章 矿山生产条件下辐射安全的保障	(140)
一、铀矿通风计算	(140)
二、降低矿井大气放射性污染的措施	(168)
三、降低矿井大气放射性污染方法的经济评价	(175)
参考文献	(182)
附录 俄文缩写对照表	(191)

引 言

现在，从事铀矿普查、勘探、开采以及矿石加工的专业人员大大地增加了。这些专业人员不仅应对铀矿床开采过程中所特有的主要危害有所了解，而且要知道为了使矿工劳动条件正常化可能采取的措施。

在铀矿中，高浓度的天然放射性物质（气溶胶和气体）以及同一般矿山所具有的那些有害因素结合在一起的外照射，有可能不断地作用于人的机体。这是铀矿山不同于许多其他矿山企业的特点之一。

目前，由于国内外已进行了大量的综合研究工作，不仅已评价过铀矿山的劳动卫生条件和研究了影响放射性污染的因素，而且在铀矿开采的辐射安全工作中也积累了许多经验。

本书详尽地论述了有关放射性矿石普查、勘探、开采和矿石初加工时主要的辐射安全问题以及辐射监测的任务。

应当指出，不只是铀矿山才有辐射安全问题。在开采铅、钨、萤石、铁及其它有用矿产的矿井空气中，也出现过高浓度的氡及其衰变产物。

В.И. 巴兰诺夫和Л. В. 戈尔布希娜所著《铀矿山安全问题》（莫斯科，原子能出版社，1962年）是已出版的研究这方面问题唯一的一本书。自那以后，不但在辐射安全方面积累了很多经验，而且辐射监测的某些基本原则和任务也有了变化，例如，在辐射安全规程(HPБ-69)⁴⁵中，放射性污染标准的原则改变了，规程本身也已修订等等。

在辐射安全规程 HPБ-76 中，修订了 HPБ-69 中的许多条款，引进了容许水平和工作监测水平以及容许浓度和工作监测浓度等概念，规定了建筑材料中天然放射性核素的含量和经卫生处理后皮肤表面污染的容许水平。确定了三类关键器官。以前属第四类的关键器官归入了第三类，甲状腺由第三类划入第二类。因此，工作场所和工作服的表面污染容许水平降低了一半，而皮肤和工作内衣的容许污染水平降低了五分之四。 α 射线的品质因数由 10 增至 20，并对容许水平和容许浓度也作了相应的改变。

由于在本书付印时，HPБ-76 尚未出版，故本书仍按 HPБ-69 采用放射性核素的基本概念、定义、术语和规范规定的容许值。

作者们在写本书时，利用了他们收集到的国内外的基本文献和定期刊物。本书第一章由 И. Л. 沙拉也夫 和 Л. В. 戈尔布希娜撰写，第二、五章由 Л. Д. 萨尔特可夫和 И. Л. 沙拉也夫撰写，第三章由 И. Л. 沙拉也夫撰写，第四章由 Ю. А. 列别捷夫撰写，第六章由萨尔特可夫撰写。作者知道，本书难免有不少缺点，希读者批评。

第一章 辐射安全问题

一、矿山企业辐射监测的任务

自苏联铀矿山开采开始，苏联的医生和科学工作者，在研究铀矿开采，矿石加工中的辐射状况和制订监督及改进工作条件的整套措施和要求方面，投入了很大的力量^{24,28,62,79,86}。A. B. 贝霍夫斯基、H. E. 尼基福罗娃、И. Л. 沙拉也夫、Л. Д. 萨尔特可夫、B. Д. 尼可拉也夫、O. C. 安得烈叶夫、A. M. 布雷金娜、B. Д. 库契连柯等人在五十年代的主要工作，就是沿着这个方向展开的。地球物理学的成就对成功地解决所提出的课题有很大的推动作用，在B. И. 巴兰诺夫、B. Л. 沙什金、Ю. П. 布拉舍维奇等的著作中都能找到这方面的反映。嗣后，B. И. 霍尔明、A. B. 戈尔布希娜、Ю. Т. 卡皮坦诺夫、H. И. 契斯诺可夫、Ю. A. 列别捷夫、K. П. 马尔可夫、H. B. 利波夫、K. H. 斯塔西、H. П. 卡尔塔舍夫、Г. Ф. 舒姆可夫、B. Г. 热内赫、Л. С. 鲁泽尔、A. H. 科尔尼可夫等的工作，更扩大了铀矿辐射防护方面的专业队伍和研究内容。

可以毫不夸张地说，在所取得的成果方面（铀矿通风计算，矿井大气放射性污染监测，综合防氡措施等），苏维埃科学在世界上是领先的。但是，应当指出，尽管取得了这些成就，而对铀矿山保证辐射安全方面的许多原则性的重大问

题还远未搞清。属于这方面的问题有：氡进入矿井空气和矿井空气受氡污染的真实规律；氡的短寿命衰变产物的空气分散体系的物理-化学及辐射性质；辐射及生产有害因素对矿工综合效应的统计、评价和标准的制定；在矿工整个工作期间（以前的）机体内氡短寿命衰变产物总摄入量的生物学评价方法等。辐射监测，或者是过去所谓的剂量监测或卫生-剂量监测，乃是保证辐射安全的重要措施之一^[58]。

辐射监测的基本任务可归纳如下：

- 测定工作区及其邻近区域辐射危害因素的水平；
- 测定外照射剂量和工作人员机体内放射性物质的摄入量及滞留量；
- 根据容许标准评价辐射环境；
- 寻找使辐射危害升高的主要来源并对其评价；
- 统计各种辐射危害因素对工作人员综合作用的程度，并向有关人员和组织（卫生监督部门、医疗单位等）提供资料；
- 监测放射性废物及外部环境的放射性污染，评价放射性因素对企业周围居民的作用。

同时，辐射监测任务还包括：搞清事故原因及对其加以预防，监测放射性表面污染的去污质量；对放射性物质和致电离辐射源以及放射性废物的储存作辐射安全评价；在生产条件下，试验和采用新的辐射监测方法等。实际上，还有一些非放射性有害因素的监测任务也包括在辐射监测部门的职责中：如含尘量，噪音，振动，有毒物质对空气的污染等^[4,12,92]。

当然，辐射监测任务应根据工作特点和辐射危害因素来具体确定^[4,10,92]。譬如，铀矿普查和勘探的主要辐射危害

是与标定仪器、接触富矿样品及该样品的放射性测量和放射化学分析、辐射源的保管以及和有射气的制剂接触有关。因之，监测任务应包括：外照射剂量评价（ γ 辐射，与富矿样品接触时对皮肤的照射）；对放射性气体氡及其短寿命衰变产物以及对铀及其长寿命衰变产物气溶胶摄入量的评价；工作表面、工作服及皮肤的放射性表面污染监测；放射性物质及辐射源保管中的监测工作；放射性废物的监测等。当外照射水平较低，空气中放射性物质浓度较低时，只需对工作场所的辐射状况定期监测，而不必进行个人剂量监测了。

在铀矿开采（及矿床地下勘探）时，氡的短寿命衰变产物对巷道空气的污染有很重要的意义。因而，氡短寿命衰变产物的个人剂量监测就成为辐射监测的主要任务。但是， γ 外照射，含大量铀及其子体钍（ ^{230}Th ）， ^{226}Ra ， $\text{RaD} (^{210}\text{Pb})$ 及 ^{210}Po 的矿尘对空气的污染，在某些情况下氡本身对矿井大气的污染，也可能具有一定的意义（特别是高品位的铀矿石）。因此，在一定条件下，外照射个人剂量的监测，长寿命放射性气溶胶的摄入量以及氡的监测，可能是铀矿石开采中（和地下勘探）辐射监测的重要组成部分。在任何情况下，至少对下列因素应定期监测，亦即：测定工作场所的 γ 射线剂量率，氡及长寿命 α 气溶胶的浓度。此外，辐射监测任务还可能包括：寻找和评价矿山巷道中氡及其衰变产物的来源；监测卫生生活间，工作服，和与富矿石接触的工作人员的皮肤放射性表面污染；监测放射性废物和外部环境的放射性污染；评价矿山巷道防氡措施的效果；在物探仪标定、矿石分析、标准源保管中，定期地监测辐射安全状况；监测运输工具的污染等。

铀矿石初加工中（筛分，破碎，选矿），辐射监测的任

务与上面所述的大致相同；不同点在于此时主要的辐射危害因素可能是长寿命的气溶胶（当有扬尘的流程或产尘的设备时）对空气的放射性污染和对工作人员的 γ 照射。通常氦的短寿命衰变产物对厂房内空气的污染监测（尤其是对机体中这些产物摄入量的个人剂量监测）意义不大。寻找氦析出源的任务，相应地就被类似的寻找产尘源的任务代替了。

最后应着重指出，监测任何一种辐射危害因素的必要性及其工作量，首先应根据它在观察期内同容许剂量或同容许摄入量之比来确定。若外照射剂量或工作区空气中的放射性核素浓度很低，则可以不进行这类监测或者将其工作量减到最小程度。关于辐射监测的详细组织和工作方法将在三、四章中讨论。

二、剂量学中所采用的物理量及测量单位

国际辐射单位与测量委员会（ICRU）不止一次地修订过剂量单位。现在在剂量测量工作中采用的是国际单位制（ГОСТ-8848-63）和广泛使用的制外单位^[15,27,29,30]（见表 1.1）。

放射性强度是放射性物质在单位时间内衰变的原子数，即物质的衰变速度。放射性强度的单位为衰变/秒（贝柯勒尔）和制外单位居里。在液体和气体中，放射性物质的浓度单位是 1 居里/升 = 3.7×10^{10} 衰变/秒 $\times$ 升 = 220×10^{10} 衰变/分 $\cdot$ 升。对氦来说，它的单位是 1 爱曼 = 1.0×10^{-10} 居里/升 = 220 衰变/分 $\cdot$ 升。放射性强度为 1 居里的物质质量等于 $8.86 \times 10^{-14} \times AT$ ，克；式中 A —相对原子量， T —半衰期。

表 1. 1 剂量测量单位

量	符 号	测量单位		测 量 单 位 之 间的 相 互 关 系
		国际单位制	制外单位	
放射性强度	C	衰变/秒	居 里	1 居里 = 3.7×10^{10} 衰变/秒 秒 = 220×10^{10} 衰变/分
射线强度 (能量通量密度)	I	瓦特/米 ²	尔格/厘米 ² 秒	1 尔格/厘米 ² 秒 = 10^{-3} 瓦特/米 ²
粒子 (或 γ 量子) 通量密度 吸收剂量	Φ	粒子/米·秒	粒子/厘米 ² 秒	
吸收剂量	$D_{\text{吸收}}$	焦耳/千克	1 拉德 = 100 尔格/克	1 拉德 = 10^{-2} 焦耳/千克
γ 射线及 X 射线的照射剂量	$\Gamma_{\text{照射}}$	库仑/千克	伦琴	1 伦琴 $\approx 2.58 \times 10^{-4}$ 库仑/千克
吸收剂量率	$P_{\text{吸收}}$	瓦特/千克	拉德/秒	1 拉德/秒 = 10^{-2} 瓦特/千克
照射剂量率*	$\Gamma_{\text{照射}}$	安培/千克	伦琴/秒	1 伦琴/秒 = 2.58×10^{-4} 安培/千克
射线能量传递	F	焦耳/米 ²	尔格/厘米 ²	—

* ICRP 称为照射量率。——译者注

1 克放射性物质的放射性强度等于：
 $1.13 \times 10^{18} / AT$ ，居里。

定向辐射强度是单位时间内通过垂直于射线方向单位面积上的射线能量。

粒子或 γ 量子通量密度 Φ 是单位时间内通过单位面积的粒子或 γ 量子数。若粒子或 γ 量子的能量为 E ，则辐射强

度同量子或粒子通量密度的关系为 $I = \Phi E$ 。

照射剂量或吸收剂量是评价电离辐射对物质作用的主要物理量。吸收剂量是单位质量的物质所吸收的辐射能量。如表 1.1 中所示，任何物质中的辐射吸收剂量的单位为：焦耳/千克（戈瑞），制外单位是拉德。1 克物质吸收 100 尔格*任何辐射的能量叫 1 拉德。

按电离效应来表征 γ 或 X 射线的剂量，叫做所谓的 γ 和 X 射线的照射剂量。它表示在单位质量的纯净干空气中，转化为带电粒子动能的这两种射线的能量。 γ 和 X 射线的照射剂量单位为库仑/千克（见表 1.1）和伦琴（R）。当测定的能量不大于 0.5 毫微焦耳（ ~ 3 兆电子伏）时，ГОСТ 8843-63 允许采用上述单位。为得到 1 伦的照射剂量，必须使 1 立方厘米（或 1 克）的空气电离所耗的能量相应为 0.114 尔格/厘米³ 或 87.7 尔格/克（ ~ 88 尔格/克）。0.11 尔格/厘米³ 和 88 尔格/克这两个值叫做伦琴的能量当量值。在空气中，1 伦 γ 和 X 射线的照射剂量相当于 0.88 拉德的吸收剂量。

在实际的剂量工作中，经常不是测量剂量，而是测量照射剂量率。单位时间的吸收（照射）剂量叫做吸收（照射）剂量率。

辐射吸收剂量率的单位为瓦/千克，制外单位是拉德/秒（拉德/小时等等）。射线的照射剂量率的单位是安培/千克，制外单位是伦琴/秒（伦琴/小时，微伦/小时等等）。

无初始过滤时，在距强度为 1 毫居里，各向同性的 γ 辐射点源 1 米处所造成的照射剂量率 $P_{\text{照射}}$ 称为某核素的 γ 常数： $K_{\gamma} = P_{\text{照射}} \times R^2 / C$ ，伦琴·厘米²/小时·毫居里，式中 $P_{\text{照射}}$

* 原文误为 10 尔格。

——照射剂量率，伦琴/小时； R ——距离，厘米； C ——放射性强度，毫居里。取镭的 γ 常数值 $K_{\gamma Ra} = 840$ 微伦 $\times$ 米²/毫居 $\times$ 小时作为跟其他 γ 辐射源相比较的基准。

为了评价各种致电离辐射对人的生物作用，建议采用 $D_{\text{当量}}$ 值——混合电离辐射的剂量当量。

$D_{\text{当量}}$ 的计算公式是： $D_{\text{当量}} = \sum D_{i\text{吸收}} \times KK_i \times KP_i$ ，式中 $D_{i\text{吸收}}$ ——每一种辐射的吸收剂量； KK_i ——与这种辐射相应的品质因数，它决定了这种电离辐射对人体长期照射的生物效应和这种辐射的 LET 之间的关系； KP_i ——剂量分布系数，它考虑到人体内放射性物质分布的不均匀性。

剂量当量 $D_{\text{当量}}$ 考虑了各种电离辐射生物效应的不一致性。

在计算亲骨性核素（除 ²²⁶Ra 外）的最大容许摄入量（ПДП）时，若计算 α 和 β 照射剂量，则取 $KP = 5$ ，若计算 γ 辐射，则取 KP 为 1。

表 1. 2 列出了最大容许剂量当量率 $D_{\text{当量}}$ 同吸收剂量率以及 KK （不考虑 KP ）间的比例关系。

表1.2 容许剂量率与 KK 的比值 (KP = 1)

射线种类	容 许 剂 量 率		$KK = D_{\text{当量}}/D$ 生物当量伦/拉德
	生物当量伦/年	拉德/年	
γ, β 射线	5	5	1
α , 质子	5	0.5	10
热中子	5	1.67	3
能量大于 500 千电子伏的中子	5	0.5	10

第二章 辐射危害因素

在放射性矿石的勘探、开采和初加工过程中,矿工的机体都受到电离辐射作用,既有内照射(矿井大气中有放射性元素),也有外照射(岩石和矿石的 γ 和 β 辐射)。矿井空气中的放射性元素可能是气态的和固态的。在铀、钍和镭的每一放射系中,衰变时都产生一个气态核素,即氡射气 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 、钍射气 $^{220}_{86}\text{Th}$ 和镭射气 $^{219}_{86}\text{Ra}$ 。聚集于岩石和矿石孔隙中的这些气体,从巷道壁和崩落矿石表面析入矿井空气中。从辐射危害的角度来看,最重要的是氡。由于氡的半衰期为3.82天,故它能从其产生地点扩散到很远的地方,并能在矿井空气中聚集到很高的浓度。半衰期为54.5秒和3.92秒的钍射气和镭射气在矿井空气中不会达到很高的浓度,因而通常可忽略不计。

矿井空气中的其它放射性物质,有的是在采矿过程中引起的(矿尘中的U、Ra等元素),而另一些则与进入矿井空气中的氡的衰变有关(RaA和RaB等)(图2.1)。

一、氡及其衰变产物

氡 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 是惰性气体,难溶于水,易溶于有机溶剂(表2.1和2.2)。

温度对氡的溶解系数 k_{Rn} 有影响,例如水的溶解系数,按以下规律变化: $k_{\text{Rn}} = 0.1057 + 0.405 \exp(-0.0502T)$ 。

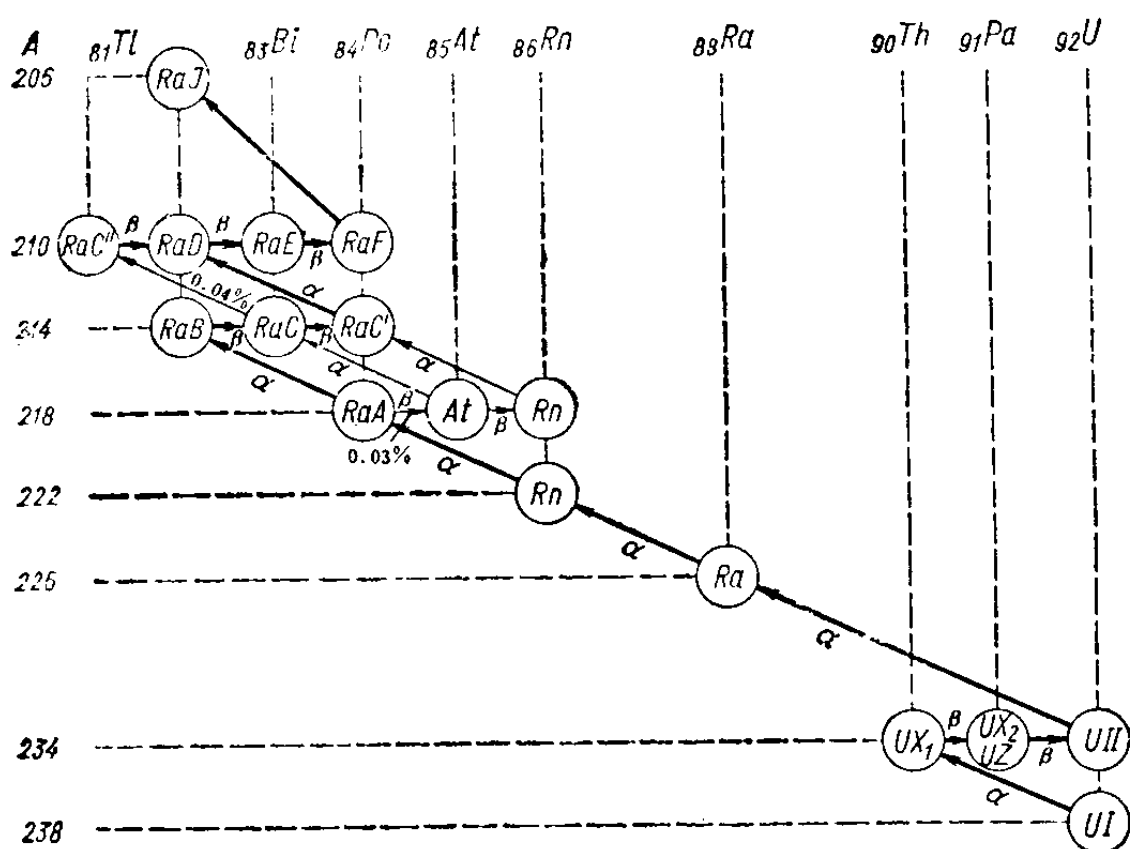


图 2.1 氡及其衰变产物的形成图

k_{Rn} 还与水的矿化度有关，并随矿化度的增加而减少。

在常温条件下固体（玻璃、金属）表面不易吸附氡，而在低温时氡则冷凝。碳是一种优良的吸附剂。当 $T = -65^{\circ}\text{C}$ 时氡变成液态（只有当浓度高、气液相达到平衡时才可能）。

表2.1 在常压条件下氡的溶解系数 K_{Rn}

溶 剂	18°C	0°C	溶 剂	18°C	0°C
水	0.25	0.51	汽油	13.00	—
酒精	6.17	8.28	氯仿	15.08	20.50
丙酮	6.30	7.99	二硫化碳	23.14	33.40
石蜡油	9.20	12.60	橄榄油	29.00	—
煤油	10.00	—			

表2.2 氦在生物介质中的溶解度^[77]

介 质	k_{Ra}
37°C的 血清	0.17
人体中的血液（在正常条件下）	0.29
人体中的血液（在外界温度为40.4—41°C条件下）	0.74
人体的脂肪组织	0.85

在大气中氦主要（99.9%以上）以自由原子形式存在，不与气溶胶相结合。当温度为 0°C 和压力为 760 毫米汞柱时，气态氦的密度为 0.009727 克/厘米³。6.5 微克氦(1 居里)占据的体积为 0.66 立方毫米。当 1 居里氦的 α 辐射全部被利用时，可产生 0.917×10^{-3} 安培饱和电流；而若与包括 RaC' 在内的衰变产物处于平衡时，在电离室内可产生出 2.07×10^{-3} 安培饱和电流。

氦从镭的积累按下式进行：

$$N_{Rn} = \frac{\lambda_{Ra} N_{Ra}}{\lambda_{Rn} - \lambda_{Ra}} [\exp(-\lambda_{Ra} t) - \exp(-\lambda_{Rn} t)], \quad (2.1)$$

式中： N_{Rn} —— 氦原子数；
 N_{Ra} —— 原始的镭原子数；
 $\lambda_{Rn}, \lambda_{Ra}$ —— 氦和镭的衰变常数；
 t —— 氦的积累时间。

由于 $\lambda_{Ra} \ll \lambda_{Rn}$ ，而氦量用居里表示，镭量用克表示，故氦的积累量可由下式算出：

$$C_{Rn} = C_{Ra} [1 - \exp(-\lambda_{Rn} t)]. \quad (2.2)$$

与 1 克镭平衡的氦量为 6.46×10^{-6} 克，而与 1 克铀平衡

的氦量为 2.16×10^{-12} 克。

氡的短寿命衰变产物有 $\text{RaA} (^{218}_{84}\text{Po})$, $\text{RaB} (^{214}_{82}\text{Pb})$, $\text{RaC} (^{214}_{83}\text{Bi})$ 和 $\text{RaC}' (^{214}_{84}\text{Po})$ 。在该组中通常不计 $\text{RaC}'' (^{210}_{81}\text{Tl})$, 因从 RaC 衰变成 RaC'' 的几率很小。

RaA 原子以反冲原子形式直接从 Rn 原子衰变而来。它们获得的初速是 α 粒子速度的 2%。在标准密度的空气中, 反冲原子的射程不超过 0.1 毫米。与 1 克镭平衡的 RaA 有 3.52×10^{-9} 克, 而与 1 克铀平衡的 RaA 有 1.18×10^{-15} 克。 RaA 溶于水、碱、酸和有机溶剂。

RaB 原子是 RaA 的反冲原子, 由于 RaA 衰变而约获得 α 粒子能量的 2%。如以 β 粒子和 γ 射线所引起的电离程度来衡量, 3.04×10^{-9} 毫克的 RaB 相当于 ~ 0.01 毫克镭。与 1 克镭平衡的 RaB 为 3.04×10^{-8} 克, 而与 1 克铀平衡的 RaB 为 1.02×10^{-4} 克。

镭 C 总是伴随其本身的两个短寿命产物 RaC' 和 RaC'' 一齐存在。与 1 克 Ra 平衡的 RaC 有 2.23×10^{-8} 克, 而与 1 克 U 平衡的 RaC 有 0.75×10^{-14} 克。与 1 克 Ra 平衡的 RaC' 和 RaC'' 为 2.84×10^{-15} 和 1.47×10^{-9} 克, 而与 1 克 U 平衡的 RaC' 和 RaC'' 则为 1.04×10^{-21} 和 1.97×10^{-19} 克。

从图 2.1 中看出, 氡的短寿命衰变产物中有 α -辐射体 (RaA , RaC'), β -辐射体 (RaB , RaC) 和 γ -辐射体 (RaB , RaC)。在形成后的某段时间里, 衰变产物能以自由原子或带正电荷的离子形式存在。产生电荷的机理, 至今研究尚不充分^[10,49,74]。氡的衰变产物易为各种表面或气溶胶颗粒所吸附, 并以两种形式存在于大气中: a) 以具有较大活动性 (扩散系数等于 0.05 厘米²/秒) 的离子态 (《自由》原子) 形式存在; b) 以散落在气溶胶颗粒上的原子形式存