

核礦—2006

铀矿山通風防护汇编

中国科学院原子核科学委员会
文献编辑室编辑

U5A6 TL7/19

內 容 簡 介

本文集共包括八篇文章。有四篇文章介绍了测定井下氡及其子体产物浓度和氡气析出率的各种方法；各种滤料捕集氡子体的效率并给出确定矿井需要通风量的有关数据。其他几篇文章叙述了在铀矿内采取的各种控制粉尘的防护办法和在医学监督方面采取的措施及取得的经验。本文集可供从事铀矿山通风防护的工程技术人员参考。

本文集译自“Radiological Health and Safety in mining milling of nuclear of materials”，由王盛展、陆国荣、张荷芬、彭译干等译。

注意：本書內部发行。

目 录

一、控制氡及其子体的鈾矿通风·····	1 页
二、南非鈾矿中的氡及其子体浓度测量的经验·····	14 页
三、空气中氡子体的计算方法·····	29 页
四、井下氡及其子体浓度的测量·····	43 页
五、日本鈾矿山中放射性气体和粉尘测定及其 防护的研究·····	57 页
六、鈾矿开采中尚未解决的一些问题·····	79 页
七、法国鈾矿矿工所实行的医务监督·····	85 页
八、南非一个鈾矿的卫生监督经验·····	92 页

控制氡及其子体的鈾矿通风

R. L. HARRIS, R. E. BALES

引 言

矿工们受氡气(Rn^{222})及其放射性子体的内照射,是所有地下开采的鈾矿中一个共同性的问题。由于吸入含氡空气,肺组织所受到的剂量,主要是来自 α 衰变,即氡的子体。因此,在美国一般采用以 α 潜能值表示氡子体的空气浓度,作为估价这些内照射的参数。 α 潜能以兆电子伏为单位,它是子体全部衰变到铅 210 时所释放的总能量。衡量照射和计算的标准是“工作水平”。所谓一个工作水平,就是每升空气中氡子体的 α 潜能为 1.3×10^5 兆电子伏⁽¹⁾。这相当于各为100微微居里的RaA、RaB、RaC经过RaC'全部衰变到RaD时所释放的总能量。本文中列举的氡子体浓度,均用这一工作水平的倍数表示。它们是用库斯内兹(KUSNETZ)提出的方法测定的⁽²⁾。

表 1 氡及其子体的衰变性质

元 素		粒子种类	粒子的能量 (兆电子伏)	衰 变 常 数 (分 ⁻¹)
氡	Rn^{222}	α	5.5	1.26×10^{-4}
RaA	Po^{218}	α	6.0	0.227
RaB	Pb^{214}	β	0.65 (最大)	0.0259
RaC	Bi^{214}	β	3.15 (最大)	0.0352
RaC'	Po^{214}	α	7.68	2.54×10^5
RaD	Pb^{210}	β	0.025 (最大)	6×10^{-8}

本文中将用到的氡及其子体的衰变性质列于表 1 中

通风风量的计算

每个矿山都有其特殊的控制问题。人体遭受氡子体及 γ 射线照射的程度是随矿体暴露面积及其品位的增加而增加。供给每一工作面适量的未受污染的新鲜空气，就能极有效地减少悬浮于空气中的氡子体的照射。这是由于氡子体被通风风流稀释和排走。同时，通风稀释能改变氡与其子体的平衡比。本文将简述所使用的通风风量的计算方法，并提出一个简化的方法来估算它们。

如果氡子体的减少仅由于其本身的衰变和被通风所排除，并且它们与其母体的比率处于稳定状态，则可用下式根据母体氡的浓度来计算其子体的浓度⁽⁹⁾：

$$C_i = \left[\frac{\lambda_2 \lambda_3 \cdots \lambda_i}{(\lambda_2 + Q/V)(\lambda_3 + Q/V) \cdots (\lambda_i + Q/V)} \right] \quad (1)$$

式中 C_i = 氡衰变系列中第 i 个元素的浓度，放射性/单位体积，

C_1 = 氡的浓度，放射性/单位体积，

λ_i = 氡衰变系列中第 i 个元素的衰变常数，
分⁻¹，

Q = 供给通风空间不含氡空气的通风速率，

V = 通风空间的体积。

氡气浓度、氡气析出速率、通风速率及通风时间之间的关系用下式表示⁽⁴⁾：

$$C_{1t} = \frac{R}{\lambda V + Q} + \left[C_{10} - \frac{R}{\lambda V + Q} \right] e^{-t(\lambda + Q/V)} \quad (2)$$

式中 R = 通风空间氦气析出速率, 放射性/单位时间,

t = 以通风速率 Q 开始通风后的时间,

C_{1t} = 在时间 t 时的氦气浓度, 放射性/单位体积,

C_{10} = 时间为 0 时的氦气浓度, 放射性/单位体积,

λ = 氦的衰变常数, 分^{-1} 。

济伏格劳和埃伊尔⁽⁸⁾用推导上述式(2)相似的方法, 导出了一系列方程式。这些方程式描述在通风的情况下, 但尚未达到稳定状态时各氦子体的浓度。当各控制参数为已知数时, 利用那些方程式就能算出氦的任一个子体理论上的放射性浓度。每个浓度乘以相应的能量系数, 并把其结果总加起来, 即得到在该条件下单位体积空气中氦子体的理论 α 潜能值。这种计算主要只有研究方面的意义而很少在矿井通风的实际计算中应用, 因为, 正象那些作者指出的那样, “在实用的通风速率的情况下, 实际上经过很短的时间就达到了稳定状态”⁽⁹⁾。

研究通风计算时, 我们实际上最感兴趣的是要得到一种计算方法, 它能根据某一已知状态的参数据, 来确定达到另一所希状态时所需的通风风量。在大多数情况下, 只需考虑稳定状态下的通风情况。当通风时间很长, 或比值 Q/V 很大, 以致 $e^{-t(\lambda+Q/V)}$ 的数值趋近于零时, 式(2)便具有简单的形式⁽⁴⁾:

$$C_{Rn} \cong R/\lambda V Q. \quad (3)$$

当通风速率与通风空间的体积之比 Q/V 约为 0.01 或更大, 等式(3)中的 λV 项可以忽略时, 因而等式进一步简化为:

$$C_{Rn} \cong R/Q \quad (4)$$

联立(1)、(4)式，就能计算出在稳定通风状态下氡子体理论上的浓度或它们在单位体积空气中的 α 潜能值。

从式(1)可以导出，当氡子体的减少仅由于其本身的衰变和被通风排除时，在稳定状态下，对于任一每分钟空气交换次数 Q/V 值，氡气浓度与其各子体衰变到 RaD 时所释放的 α 潜能之间的理论比值是一个常数。对于各种不同的 Q/V 值，用式(1)计算出来的这一比值列于表 2，并绘于图 1 中。

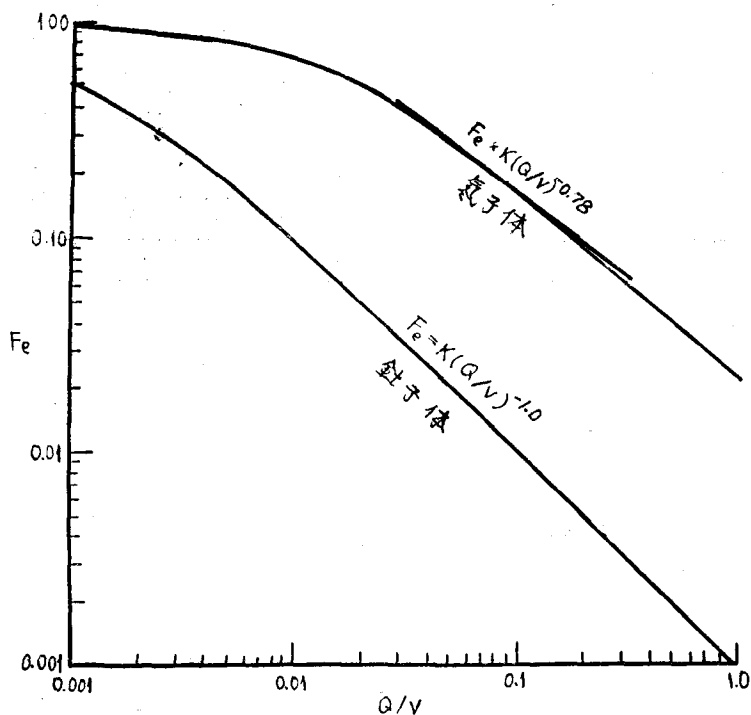


图 1 为平衡时 α 潜能的份数， Fe ，与有效通风速率， Q/V 每分钟空气交换次数的关系

表 2 不同通风速率时氦与其子体间的关系

通 风 速 率	氦浓度为每升 1 微微居里时，其 子体每升的微微居里数				氦浓度为每升 1 微微居里时，氦 子体的 α 潜能(兆电子伏/升)				氦子体的 α 潜能为各子体 与氦平衡时 α 潜能的份数 Fe	
	氦	RaA		RaB	RaC	RaA	RaB	RaC		总 值
0.000	1.00	1.00	1.00	1.00	123	660	486	1280	1.00	
0.001	1.00	0.995	0.95	0.93	133	630	452	1215	0.95	
0.003	1.00	0.977	0.88	0.82	131	580	398	1101	0.866	
0.01	1.00	0.96	0.69	0.54	129	456	262	847	0.661	
0.03	1.00	0.88	0.41	0.22	118	268	107	493	0.385	
0.10	1.00	0.69	0.14	0.037	93	94	18	205	0.161	
0.30	1.00	0.43	0.034	0.0036	57	23	1.8	82	0.064	
1.00	1.00	0.185	0.0046	0.00016	25	3	0.08	28	0.022	

霍勒德⁽¹⁾等利用图 1 的曲线和上述各方程中列举的关系，提出了一种使氡子体保持在一个工作水平所需通风风量的预算方法。这时只要知道比工作水平高某个倍数时的条件，同时，假定氡子体的减少仅由于其本身的衰变和被通风所排除。这一方法需要知道测得的氡子体的浓度(兆电子伏/升)、被通风空间的体积和相应的通风速率。其解答可根据他们发表在上述文献中的曲线获得。

利用图 1 的曲线，可以得出一个简单的关系式来估算将氡子体浓度由某一现有水平降低到另一所希水平时所需的通风风量。这时只要知道现有条件下的通风速率，并且这个通风速率是在实用的每分钟空气交换次数为 0.03 到 0.3 的范围内。关系式

$$Fe \cong K(Q/V)^{-0.78} \quad (5)$$

能满意地表示每分钟空气交换次数在 0.03 至 0.3 范围内图 1 中的曲线。象霍勒德等⁽¹⁾所下的定义那样，同样从表二也可看出，Fe 表示处在该特定通风条件下的氡子体衰变到 RaD 所释放的 α 潜能，与假定在沒有通风的情况下，与同一浓度的氡达到平衡时的氡子体衰变到 RaD 时所释放的 α 潜能之比。当子体的减少仅由于其本身的衰变和被通风所排除时，在稳定状态下，以 α 潜能表示的子体的大气浓度与母体氡的浓度及 Fe 成正比：

$$C_{dtrs} \propto C_{Rn} Fe_0 \quad (6)$$

Q/V 比 λ_{Rn} 大时处于稳定状态，等式(4)为

$$C_{Rn} \cong R/Q \quad (4)$$

联立(4)、(5)、(6)式，得：

$$Q_{d1} r_{s2} \cong K' (R/Q_1) (Q/V)^{-0.78} \quad 0.08 < Q/V < 0.30 \quad (7)$$

式中子体的浓度可用能量单位或工作水平表示。氡气析出速率不变，但通风速率不同的两种稳定状态下的氡子体浓度可以进行比较：（子体的浓度以 WL 表示， WL 表示为工作水平若干倍的能量浓度。）

$$\begin{aligned} \frac{WL_1}{WL_2} &\cong \frac{K' (R/Q_1) (Q/V)^{-0.78}}{K' (R/Q_2) (Q_2/V)^{-0.78}} = \frac{Q_2}{Q_1} \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^{-0.78} \\ &= \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{-1.78} \end{aligned} \quad (8)$$

$$Q_2 \cong Q_1 \left(\frac{WL_1}{WL_2} \right)^{0.56} \quad 0.0 < Q/V < 0.30 \quad (9)$$

这样，当每分钟空气交换次数 Q/V 在 0.03 至 0.30 的范围内，且氡气析出速率不变时，将氡子体的浓度从稳定状态下的 WL_1 工作水平，降低到一个工作水平所需的通风风量 Q_2 ，可以近似地等于原有通风速率 Q_1 与相应的子体浓度 WL_1 的 0.56 次方之乘积。当每分钟空气交换次数 Q/V 在 0.03 至 0.30 的范围内时，用这种方法算出的 Q_2 值，与并不假定式 (3) 中的 λV 项可以忽略，或图 1 的 $\log Fe$ 和 $\log(Q/V)$ 是直线关系时所计算出的 Q_2 的真实值相差在 $\pm 5\%$ 的范围内。后一种计算方法仅仅假定是处于稳定状态和氡气析出速率不变。每分钟空气交换次数 Q/V 在 0.03 至 1.00 的范围内时，用式 (9) 估算的 Q_2 值比其真实值低 5% 或高 10%。而 Q/V 在 0.01 至 1.00 之间时，则其估值可能低达 20% 或高达 10%。

当原有的有效通风速率大于每分钟约 0.30 次空气交换时，图 1 的曲线可近似地用下式表示：

$$Fe \cong K(Q/V)^{-0.49} \quad (10)$$

在这种情况下，可用关系式

$$Q_2 \cong Q_1 (WL_1/WL_2)^{0.52} \quad (11)$$

来估算所需通风风量。当有效通风速率小于每分钟 0.03 次空气交换时，图 1 曲线的斜率变化极快，以致不可能用一个简单的指数式来表示这段曲线，也不可能在允许的精度范围内得出 Q_2 值。

布伦恰德和霍勒德曾探讨了通风对降低钍子体 α 潜能的效果⁽⁵⁾。他们给出了钍子体平衡百分率与每分钟空气交换次数的关系曲线，并指出：“用通风来排除工作区空气中的钍子体，要比排除氡子体有效得多”。钍子体平衡时 α 潜能的份数(Fe)与每分钟空气交换次数的关系曲线⁽⁶⁾也绘于图 1 中以便和氡子体的曲线进行比较。通风对排除钍子体放射性更为有效是非常明显的，例如，每分钟空气交换次数为 0.01 时，剩下的钍子体仅为平衡时钍子体 α 潜能的 $\frac{1}{10}$ ，而氡子体的则为 $\frac{1}{2}$ 。通风对排除钍子体更为有效，主要是由于钍子体 $ThB(Pb^{212})$ 有较长的半衰期(10.6 小时)。

当有效通风速率大于每分钟 0.005 次空气交换时，图 1 中的钍子体曲线可非常近似地以下述关系式表示：

$$Fe \cong K(Q/V)^{-1} \quad (12)$$

用推导式(8)同样的方法，可以获得对钍子体的下述关系式：

$$\frac{WL_1}{WL_2} \cong \frac{\lambda_{Th} V Q_2 + Q_2^2}{\lambda_{Th} V Q_1 + Q_1^2} \quad (13)$$

式中 λ_{Th} 为钍气的衰变常数。在描述稳定状态下钍子体的方程式中， $\lambda_{Th} V$ 一项不可忽略，因为它的数值和合理的通风

速率 Q 值是完全可以相比的。这个关系式不象对氡子体的式(9)那样有一个简单的解来估算 Q_2 值。但是， Q_2 可用二项式关系来估算：

$$Q_2 \cong \frac{-\lambda_{T_h} V + \sqrt{(\lambda_{T_h} V)^2 + 4(WL_1/WL_2)(\lambda_{T_h} V Q_1 + Q_1^2)}}{2} \quad (14)$$

通风试验的结果

在导出方程式(9)时，曾假说：

(1) 有效通风速率在每分钟空气交换约为 0.03 至 0.3 的范围内；

(2) 被通风空间的氡气析出速率不变；

(3) 用于通风的风量 Q_1 、 Q_2 没有被氡及其子体污染；

(4) 氡及其子体的减少仅由于其本身的衰变和被通风所排除，它们之间的比值处于稳定状态；

(5) 样品的结果准确地表示通风空间中剩余的氡子体与供给的通风风流完全均匀混合。

在实际情况下，上述某个或几个条件并不是经常能满足的。在这种情况下，可以预料到，氡子体浓度或供给的通风风量的观测值与计算值之间不会完全一致。

表 3 中列举了多个矿井中在机械通风改变前后所测得的数据。结果表明，用本文中提出的方法估算所需通风风量经常不够准确，其偏差甚至能达到很大的数值。根据这些数据，用通常使用的方法⁽¹⁾来计算 Q_2 值，也得到了同样的结果。表三中第二、第三列是通风改变前测得的结果，第四、第五列是通风改变后测得的结果，第六列的数值是根据第二、三、四列中的观察值计算得出的结果。观察值与计算值之比值列于第七列内。

表3 观测和计算的通风结果的比较

试验 编号	观 测 值			计 算 值		备 注
	WL ₁	Q ₁ 呎 ³ /分	WL ₂	Q ₂ 呎 ³ /分	Q ₂ * Q ₂ 之比	
1	2	3	4	5	6	7
1	1.32	520	1.42	660	500	1.32
2	1.51	150	1.12	180	180	1.00
3	2.7	125	0.65	360	280	1.29
4	4.5	17000	3.3	23000	20000	1.15
5	5.5	24000	3.1	21000	33000	0.64
6	5.5	24000	9.6	21000	17500	1.20
7	5.7	3600	3.4	14500	4800	3.0
8	5.8	210	2.7	410	325	1.26
9	7.8	11000	3.1	21000	18400	1.14
10	7.8	11000	9.6	21000	9800	2.15
11	7.8	11000	5.5	24000	13400	1.8
12	80	750	8.0	4400	2700	1.62
13	410	100	1.9	2000	2000	1.00

Q/V=0.4; 新鲜空气由风筒输送。
 Q/V=0.1; 新鲜空气由风筒输送。
 Q/V=0.14

与试验6同一地点

与试验5同一地点

小矿井

Q/V=0.016; 见文中叙述

与试验10同一地点

与试验9同一地点

见文中叙述

采准工作

* Q₂按下式计算: $Q_2 = Q_1 (WL_1/WL_2)^{0.56}$, 其中 WL₁, WL₂ 为量测值。

如果考虑到试验条件本身具有很多变化因素，同时，后一次测定可能是在前一次测定以后几天才进行的，那么试验编号 2、4、6、9 和 13 的观测值与计算值可认为是较相符合的。

在编号 1 和 10 的试验中，看来，进入工作区的氦气析出速率在通风改变后的测定中，比通风改变前测定时要大，因为子体的浓度在第二组数据中比第一组的高，尽管后来的通风速率比前次的要大。试验编号 5 中，氦气析出速率大概是变小了，因为氦子体的浓度随通风速率的减小而降低。可以预计到，氦气析出速率是随大气压的变化、矿体暴露面积的变化及流经通风空间的含氦水流的变化而改变。加大通风速率也可能引起氦气析出有某些增加。

试验编号 8 的通风速率太低，以致其有效通风速率落在推导式(9)时所规定的每分钟空气交换次数的范围之外。如果来考察一下图 1 的氦子体曲线，选定其有效通风速率与这一试验大致相当处的曲线斜率，则表三中第七列计算的比值将在 1.11 左右。

试验编号 12 特别有趣。通风改变后，发现供给此回采工作面的 4400 呎³/分风量本身就含有 2.7 倍于工作水平的氦子体。这是由于从此回采工作面中有大约 1500 呎³/分八倍于工作水平的空气发生了循环。这样，供给此工作面的通风风量只相当于 2900 呎³/分未被污染的空气。这和表三中第六列的 2700 呎³/分的计算值很相近。这样，表三中第七列校正后的数值应该是 1.07。

表三中所列举的观测值与计算值之间的偏差，在某些实例中能得到解释，而在另一些中则不能。可以认为，不能得到解释的那些偏差，在很大程度上是由于氦气析出速率的变

化、通风风流被污染和氡子体与通风风流没有充分混合所致。

結 語

本文评述了控制铀矿井中氡子体所需通风风量的计算方法，并提出了一个简单的指数式

$$Q_2 \approx Q_1 (WL_1 / WL_2)^{0.56}$$

作为在知道原有通风速率及当时的氡子体浓度情况下来计算所需通风风量的方法。

通风改变后的观测值与计算值常不一致。文中简单地讨论了出现这些偏差的原因，并引用了一些数据来说明其中的某些偏差。

討 論

J. 普腊德耳：从你的试验是否可以得出这样的结论，即从巷道壁析出的氡气进入通风网路时不会有强烈的聚积，或者说，是否有未被通风的“死”区特别是在独头巷道的末端？

R. L. 巴耳斯：从任一氡源析出的氡气进入通风风流后，都将由于其衰变而增加通风风流中的氡子体含量。可以计算使氡及其子体浓度更低时所需增加的通风风量。但是，如果增加后的通风把原来没有通风的独头巷道中的含氡空气带出来的话，那么，通风风流中氡子体的实际浓度将比用本计算方法预算的要高。事实上，氡气析出速率或通风空间体积估算得不准，将给计算带来偏差。密闭不用的或独头的采区能减少进入通风风流的氡气量。

D. A. 霍勒德：我想补充一下，测定通风风流的氡及其子体浓度，能发现矿井空气的污染源。跟踪通过某一采区的一部分空气的运动，是一个很重要的方法。在重要的地点，如回采工作面入风口、回风口或其他可能有氡气进入矿井大气的地方，测定氡及其子体的浓度和通风风量，就能发现空气在什么地方被污染了，因而能计算出通风风量所需的调整。

参 考 文 献

- [1] HOLADAY, D. A., RUSHING, D. E., COLEMAN, R. D., WOOLRICH, P. F., KUSNETZ, H. L. and BALE, W. F., Control of Radon and Daughters in Uranium Mines and Calculations on Biologic Effects Public Health Service Publication No. 494. US Govt. Printing Office (1957).
- [2] KUSNETZ, H. L., Radon Daughters in Mine Atmospheres—A Field Method for Determining Concentrations. Amer. ind. Hyg. Assoc. Quarterly 17(1956)85.
- [3] TSIVOGLU, E. C. and AYER, H. E., Ventilation of Uranium Mines. AMA Arch ind. Hyg. and Occup. Med. 10 (1954)363.
- [4] TSIVOGLU, E. C. and AYER, H. E., Emanation of Radon in Uranium Mines and Control by Ventilation. AMA Arch. ind. Hyg. and Occup. Med. 8(1953) 125.
- [5] BLANCHARD, R. L. and HOLADAY, D. A., Evaluation of Radiation Hazards Created by Thoron and Thoron Daughters, Amer. ind. Hyg. Assoc. J. 21(1960) 201.
- [6] SOMAYAJI, K. S., Evaluation of the Ventilation Rate from the Decay of Filter-Paper Air Samples of Thoron or Radon Daughters, Hlth Phys. 6(1961) 136.

南非鈾矿中氡及其子体浓度测量的經驗

S. R. RABSON R. S. J. du TOIT

C. J. VERWEY

引 言

南非于 1952 年开始生产鈾。1957~1961 年间达到了最高产量；每年生产约六千吨氧化鈾。在这一时期，大部分鈾是由 55 个已经开采多年的大金矿中的 22 个矿山来生产的。鈾与黄金共生于一矿石中，在提取黄金时，附帶将鈾回收。

在鈾生产的过程中将注意力集中在开采鈾矿石时可能发生的放射性危害上。由于这种矿石的鈾含量很低，因此，曾预计大概不会出现直接的外辐射危害。但是，其他地区开采鈾矿石的经验表明，如果有放射性危害存在，则其危害是由于氡及其子体在矿井空气中的聚积所致。

本文概述了 1959~1961 年在南非鈾矿中进行的调查。调查的目的是估价在这些矿井中氡气的性质及其范围。完成这一工作中，充分利用了很多在美国和加拿大已有的经验^(1,2)。

矿 井 概 况

矿体(典型的回采工作面见图 1)

含黄金和鈾的石英矿脉存在于边界分明的层状矿床或高石英含量的砾石中。这些矿体由地表一直延伸到深部，其倾