

# 理想条件下氡及其子体垂直运移实验数据分析

谭延亮<sup>1)†</sup> 肖德涛<sup>1)</sup> 赵桂芝<sup>1)</sup>

1) 南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001)

2) 衡阳师范学院物电系, 衡阳 421008)

(2008 年 1 月 6 日收到, 2008 年 1 月 19 日收到修改稿)

对氡及其子体的长距离运移实验数据进行了分析, 发现利用氡氡团簇解释氡的快速向上运移,  $\alpha$  粒子的数量远远不够. 如果假定氡有很强的从空气中吸附氡气的的能力, 从而获取足够的氡组成氡氡团簇垂直运移, 则又与相关实验中加入有氡气后氡及其子体向上、向下运移概率与自然状态相同的结论矛盾. 提出氡氡团簇可能不是氡具有快速向上运移能力的主要原因, 氡的快速向上运移能力可能另有更深层次的原因, 有待进一步深入研究.

关键词: 氡, 垂直运移, 氡氡团簇

PACC: 2390, 3120, 3120C

## 1. 引 言

氡( $^{222}\text{Rn}$ )及其子体均为放射性元素, 比空气重得多, 其半衰期为 3.8235 d, 但在地层中其运移距离远远超出扩散作用的数米范围. 人们相继提出了许多氡气运移假说, 并且通过实验和数值模拟进行了验证和检验. 这些运移机理概括起来主要有扩散对流、孔隙流体运移、应力应变、温度压力、接力传递等作用<sup>[1]</sup>. 贾文懿、乐仁昌等<sup>[2-7]</sup>近几年研究氡迁移的内因机理. 尽管氡及其子体密度很大, 但在理想空气中却具有明显向上运移的能力, 他们认为这是由氡固有的性质决定的, 氡及其子体和母体多为  $\alpha$  辐射体, 它们放出的  $\alpha$  粒子减速后成为氦核, 氦核能与氡及其子体形成复合团簇, 当其复合团簇浮力大于重力时, 团簇便会自行上升, 成为氡及其子体向上运移的内因. 在此理论上他们建立氡运移理论方程, 并对运移方程进行了验证. 本文对贾文懿、乐仁昌的相关实验数据进行了分析, 发现利用氡氡团簇解释氡的快速向上运移,  $\alpha$  粒子数量远远不够. 如果假定氡有很强的从空气中吸附氡气的的能力, 从而获取足够的氡组成氡氡团簇垂直运移, 则又与相关实验中加入有氡气后氡及其子体向上、向下运移概率与自然状态相同的结论矛盾. 提出氡氡团簇可能不是氡具有快速向上运移能力的主要原因, 氡的快速向上运移能力可能另有更深层次的原因, 有待进一步深入研究.

## 2. 理想条件下氡及其子体运移实验及运移方程<sup>[7-9]</sup>

文献 8]设计了一系列精巧的实验对理想条件下氡及其子体运移规律进行研究, 实验装置如图 1 所示. 利用活性炭吸附氡后, 可以通过探测氡衰变子体放出的  $\gamma$  射线来计算和研究吸附器所在位置的氡浓度. 吸附器  $\gamma$  计数与氡浓度成线性关系, 但直线不经过零点, 这是因为镭衰变后产生的氡气迁移到吸附器需要一段时间, 氡气在装置中的分布不均匀造成的.

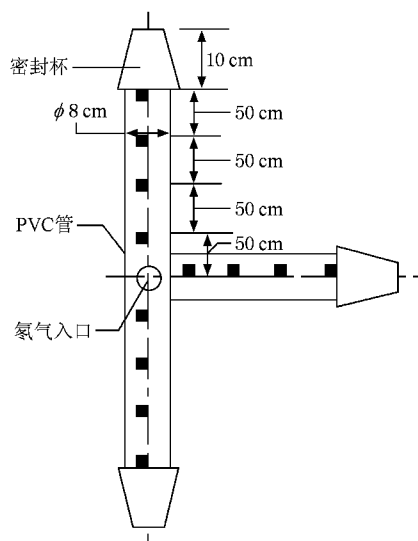


图 1 氡及其子体运移实验装置示意图

† E-mail: hytyl@163.com

文献 7 推导出了氦及其子体向上、向下运移的微分方程

$$\frac{dN}{dt} = k \frac{d^2 N}{dx^2} - \frac{d(N \times \bar{v})}{dx} - \lambda N, \quad (1)$$

式中  $x$  为某位置点离氦源的距离;  $N$  为离氦源  $x$  处的氦气浓度;  $\lambda$  为氦的衰变常数 ( $2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ );  $k$  为氦在空气中的扩散系数,  $\bar{v}$  为团簇上浮或重力下沉运移的平均速度。

由于氦气团簇的运动速度都能很快(毫微秒级以下)达到极大值<sup>[10]</sup>, 因此(1)式中的平均速度  $\bar{v}$  只与团簇的大小有关, 而与时间  $t$  和距离  $x$  无关。当运移趋于稳定时, 氦气浓度不随时间改变, 即  $\frac{dN}{dt} =$

0, 则(1)式变为<sup>[7]</sup>

$$k \frac{d^2 N}{dx^2} = \bar{v} \frac{dN}{dx} - \lambda N. \quad (2)$$

氦及其子体向上、向下运移以氦气团簇的运移为主, 扩散运移可以忽略不计(2)式可变换为<sup>[7]</sup>

$$\bar{v} \frac{dN}{dx} = \lambda N. \quad (3)$$

解(3)式并将边界条件  $N|_{x=0} = N_0$  代入得

$$N = N_0 e^{-\frac{\lambda}{\bar{v}} x}. \quad (4)$$

文献 7 用(4)式对实验曲线进行拟合, 可以得到各种条件下, 氦及其子体的平均运移速度, 如表 1<sup>[7]</sup>所示。

表 1 氦及其子体向上、向下平均运移速度

PVC 管长/cm	200				400					
积累时间/d	4		7		4		7		19	
运移方向	向上	向下	向上	向下	向上	向下	向上	向下	向上	向下
运移速度(矿石源) $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	4.28	3.44	16.13	7.49	5.24	3.96	3.81	4.88		
运移速度(镭源) $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	4.19	2.44	6.99	4.19	3.96	2.76	5.38	3.75	9.12	4.99

文献 8 的表 5—23 还提供了按氦源类型, 分别得到氦及其子体向上、向下及水平方向运移量所占百分比的平均值, 见表 2<sup>[8]</sup>。

表 2 氦及其子体向上向下及水平方向运移量所占总运移量百分比平均值

氦源类型	向上方向	向下方向	水平方向
沥青铀矿石/%	52.2	36.5	11.3
液体镭源/%	49.4	34.2	16.4

由表 1、表 2 可以清楚地看到氦及其子体有很强的向上运移能力。贾文懿、乐仁昌认为氦及其子体和母体多为  $\alpha$  辐射体, 它们放出的  $\alpha$  粒子减速后成为氦核后能与氦及其子体形成氦气团簇, 当氦气团簇浮力大于重力时, 团簇便会自行上升, 成为氦及其子体向上运移的内因。

### 3. 氦气团簇垂直运移所需的最少 $\alpha$ 粒子数量估算方法及相关假设

从简化分析出发提出如下使氦及其子体向上运移最大化的极端假设:

1) 铀矿石或镭源衰变后产生的所有氦核全部被氦吸附组成团簇进行运移;

2) 氦气团簇的平均原子数为  $m$ , 其中一部分含

氦核少的向下运移, 一部分含氦核多的向上运移;

3) 氦气团簇垂直方向运移不考虑扩散作用的影响, 氦气团簇在重力的作用下向下运移, 氦气团簇在浮力的作用下向上运移;

4) 氦衰变后的子体继续衰变产生的氦核即时返回到实验装置中部与氦组成团簇, 分别向上、向下运移;

5) 假如  $m_1$  个氦与  $m_2$  个氦核结合成团簇后, 其体积为  $(m_1 + m_2)$  个原子的体积;

6) 氦气团簇衰变过程中其本身已吸附的氦核不再释放出来;

7) 假设水平运移的氦原子没有吸附氦核。

氦气团簇的运动速度为<sup>[10]</sup>

$$v = \pm \frac{2C_c(\rho - \rho') \times r^2}{9\eta} g [1 - e^{-(9\eta/2\rho \times r^2)t}], \quad (5)$$

式中  $C_c$  为滑动修正系数, 与氦气团簇或气溶胶的大小有关;  $g$  为重力加速度;  $r$  为球形氦气团簇的半径;  $\eta$  为空气的黏滞系数;  $\rho$  为氦气团簇的密度;  $\rho'$  为空气的密度。

氦气团簇在很短的时间内就会达到其极限运动速度<sup>[10]</sup>

$$v = \pm \frac{2C_c(\rho - \rho') \times r^2}{9\eta} g. \quad (6)$$

由假设 2) 可知上升的氦气团簇的平均原子数

$m$  有

$$m = n_{\text{Rn}} + n_{\text{He}}, \quad (7)$$

$n_{\text{Rn}}, n_{\text{He}}$  为上升的氡氦团簇中氡原子、氦核数量.

下降的氡氦团簇的平均原子数  $m$  有

$$m = n'_{\text{Rn}} + n'_{\text{He}}, \quad (8)$$

$n'_{\text{Rn}}, n'_{\text{He}}$  为下降的氡氦团簇中氡原子、氦核数量.

要使氡氦团簇向上运移,其密度必须小于空气密度.在  $20^\circ\text{C}$  和 1 个标准大气压下,空气密度为  $1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ,氡气密度为  $9.902 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ,氦气密度为  $1.784 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ .要使氡气与氦气混合气体密度大于空气密度,  $1 \text{ cm}^3$  氡气必须与  $7.724 \text{ cm}^3$  的氦气混合.假如一个氡原子与一个氦核结合成团簇后,其体积为 2 倍的体积,则一个氡原子必须与 7.724 个以上的氦核结合成团簇,才能向上运移<sup>[10,11]</sup>.

由假设 5 和(6)式可得

$$\frac{\bar{v}_{\text{上}}}{\bar{v}_{\text{下}}} = \frac{\rho_{\text{上}} - \rho'}{\rho_{\text{下}} - \rho'} = \frac{n_{\text{Rn}} \times \rho_{\text{Rn}} + n_{\text{He}} \times \rho_{\text{He}} - m \times \rho'}{n'_{\text{Rn}} \times \rho_{\text{Rn}} + n'_{\text{He}} \times \rho_{\text{He}} - m \times \rho'}, \quad (9)$$

$\bar{v}_{\text{上}}, \bar{v}_{\text{下}}$  为氡氦团簇向上、向下运移的平均速度(向上运移速度为正,向下运移速度为负).

将(7)(8)式代入(9)式得

$$\frac{\bar{v}_{\text{上}}}{\bar{v}_{\text{下}}} = \frac{\rho_{\text{上}} - \rho'}{\rho_{\text{下}} - \rho'} = \frac{m(\rho_{\text{Rn}} - \rho') - n_{\text{He}}(\rho_{\text{Rn}} - \rho_{\text{He}})}{m(\rho_{\text{Rn}} - \rho') - n'_{\text{He}}(\rho_{\text{Rn}} - \rho_{\text{He}})}. \quad (10)$$

由  $\rho_{\text{上}} - \rho' < 0$ , 可得

$$1 > \frac{n_{\text{He}}}{m} > \frac{(\rho_{\text{Rn}} - \rho')}{(\rho_{\text{Rn}} - \rho_{\text{He}})}. \quad (11)$$

由  $\rho_{\text{下}} - \rho' > 0$ , 可得

$$0 < \frac{n'_{\text{He}}}{m} < \frac{(\rho_{\text{Rn}} - \rho')}{(\rho_{\text{Rn}} - \rho_{\text{He}})}. \quad (12)$$

将(10)式整理得

$$m(\rho_{\text{Rn}} - \rho') \left( 1 - \frac{\bar{v}_{\text{上}}}{\bar{v}_{\text{下}}} \right) = n_{\text{He}}(\rho_{\text{Rn}} - \rho_{\text{He}}) - n'_{\text{He}}(\rho_{\text{Rn}} - \rho_{\text{He}}) \times \frac{\bar{v}_{\text{上}}}{\bar{v}_{\text{下}}}. \quad (13)$$

(13)式可化简为

$$n_{\text{He}} = n'_{\text{He}} \times \frac{\bar{v}_{\text{上}}}{\bar{v}_{\text{下}}} + m \frac{(\rho_{\text{Rn}} - \rho')}{(\rho_{\text{Rn}} - \rho_{\text{He}})} \left( 1 - \frac{\bar{v}_{\text{上}}}{\bar{v}_{\text{下}}} \right). \quad (14)$$

(14)式整理得

$$n_{\text{He}} = Ln'_{\text{He}} + mP(1 - L), \quad (15)$$

式中

$$L = \frac{\bar{v}_{\text{上}}}{\bar{v}_{\text{下}}} < 0, \quad (16)$$

$$P = \frac{(\rho_{\text{Rn}} - \rho')}{(\rho_{\text{Rn}} - \rho_{\text{He}})}.$$

由于氦核的稀缺性,下面计算达到相应的上升、下降速度比值,需要最少的氦核数(此处氡氦团簇的向上、向下运移速度不一定与实际情况符合,但是此处估算出在特定的向上、向下运移速度比的限制条件下,平均每个氡原子需要吸附的最少氦核数,求得的是极小值,实际数据应该更大一些).

由假设 7)水平运移的氡原子没有吸附氦核,若上升、下降、水平运移的氡原子数占氡原子总数之比分别为  $K_1, K_2, K_3$ ; 上升、下降、水平运移平均原子数为  $m$  的氡氦团簇的数量为  $d_1, d_2, d_3$ , 有

$$K_1 = \frac{d_1 n_{\text{Rn}}}{d_1 n_{\text{Rn}} + d_2 n'_{\text{Rn}} + d_3 m}, \quad (17)$$

$$K_2 = \frac{d_2 n'_{\text{Rn}}}{d_1 n_{\text{Rn}} + d_2 n'_{\text{Rn}} + d_3 m}, \quad (18)$$

$$K_3 = \frac{d_3 m}{d_1 n_{\text{Rn}} + d_2 n'_{\text{Rn}} + d_3 m}. \quad (19)$$

则平均每个氡原子需要吸附的氦核数  $Q$  为

$$Q = \frac{d_1 n_{\text{He}} + d_2 n'_{\text{He}}}{d_1 n_{\text{Rn}} + d_2 n'_{\text{Rn}} + d_3 m}. \quad (20)$$

(20)式除以(17)式得到

$$\frac{Q}{K_1} = \frac{d_1 n_{\text{He}} + d_2 n'_{\text{He}}}{d_1 n_{\text{Rn}}} = \frac{n_{\text{He}}}{n_{\text{Rn}}} + \frac{d_2 n'_{\text{He}}}{d_1 n_{\text{Rn}}}. \quad (21)$$

(17)式除以(18)式得到

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{K_1 n'_{\text{Rn}}}{K_2 n_{\text{Rn}}}. \quad (22)$$

将(22)式代入(21)式得到

$$Q = K_1 \frac{n_{\text{He}}}{n_{\text{Rn}}} + K_2 \frac{n'_{\text{He}}}{n'_{\text{Rn}}} = K_1 \frac{n_{\text{He}}}{m - n_{\text{He}}} + K_2 \frac{n'_{\text{He}}}{m - n'_{\text{He}}} = K_1 \frac{\frac{n_{\text{He}}}{m}}{1 - \frac{n_{\text{He}}}{m}} + K_2 \frac{\frac{n'_{\text{He}}}{m}}{1 - \frac{n'_{\text{He}}}{m}}. \quad (23)$$

将(15)式代入(23)式得

$$Q = K_1 \frac{L \frac{n'_{\text{He}}}{m} + P(1-L)}{1 - \left[ \frac{Ln'_{\text{He}}}{m} + P(1-L) \right]} + K_2 \frac{\frac{n'_{\text{He}}}{m}}{1 - \frac{n'_{\text{He}}}{m}} \quad (24)$$

将(24)式两边对 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 求导得

$$\frac{dQ}{d \frac{n'_{\text{He}}}{m}} = K_1 \frac{L}{\left\{ 1 - \left[ \frac{Ln'_{\text{He}}}{m} + P(1-L) \right] \right\}^2} + K_2 \frac{1}{\left( 1 - \frac{n'_{\text{He}}}{m} \right)^2} \quad (25)$$

将(15)式两边除以 $m$ 然后依据(11)式得到

$$P < \frac{n_{\text{He}}}{m} = \frac{Ln'_{\text{He}}}{m} + P(1-L) < 1 \quad (26)$$

由于 $L < 0$ ,将(26)式整理为

$$P > \frac{n'_{\text{He}}}{m} > \frac{1-P}{L} + P \quad (27)$$

根据(27)式可得到 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 的取值范围,在 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 的取

值范围内存在 $\frac{dQ}{d \frac{n'_{\text{He}}}{m}} = 0$ ,则将该 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 取值代入(24)

式可求得平均每个氦原子最少需要吸附的氦核数 $Q$ ;在 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 的取值范围内不存在 $\frac{dQ}{d \frac{n'_{\text{He}}}{m}} = 0$ ,若 $\frac{dQ}{d \frac{n'_{\text{He}}}{m}} > 0$ ,在 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 的取值范围内取 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 极小值,将该 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 取值代入(24)式可求得平均每个氦原子最少需要吸附的氦核数 $Q$ ;若 $\frac{dQ}{d \frac{n'_{\text{He}}}{m}} < 0$ ,在 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 的取值范围内取 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 极大值,将该 $\frac{n'_{\text{He}}}{m}$ 取值代入(24)式可求得平均每个氦原子最少需要吸附的氦核数 $Q$ .

## 4. 实验数据分析

### 4.1. 对 2600 cm PVC 管内吸附器 $\gamma$ 计数原始数据计算

文献[9]的表1可以得到具有参考价值的2600 cm PVC管内吸附器 $\gamma$ 计数原始数据,见表3(氦源为铀矿石、时间为15 d).

表3 氦及其子体在上下各1300 cm PVC管中运移实验数据

位置/cm	50	100	150	200	300	400	600	900	1300
源上方 $N_{\text{总实}}$	14288	12665	11706	9112	8378	5813	2370	1402	520
源下方 $N_{\text{总实}}$	12535	11140	9838	7640	9041	7360	4869	3809	4763

注: $N_{\text{总实}}$ 表示扣除本底后经实测修正公式修正后的总计数.

将表3的氦及其子体长距离运移实验数据按(4)式进行非线性数据拟合可得到氦及其子体运移15 d后,向上( $x > 0$ )运移方程为

$$N_1 = 15946.04302 \times e^{-0.00232x} \quad (28)$$

向下( $x < 0$ )运移方程为

$$N_2 = 13085.82857 \times e^{0.00173x} \quad (29)$$

由(4)(28)式可推导出氦氡团簇向上运移平均速度为

$$\bar{v}_{\text{上}} = 9.05 \times 10^{-4} \text{ cm/s} \quad (30)$$

由(4)(29)式可推导出氦氡团簇向下运移平均速度为

$$\bar{v}_{\text{下}} = -1.21 \times 10^{-3} \text{ cm/s} \quad (31)$$

$$K = \frac{\int_0^{1300} N_1 dy}{\int_{-1300}^0 N_2 dy} = 0.966 \quad (32)$$

即上升的氦原子与下降的氦原子之比为0.966,也就是说 $K_1 = 49\%$ 氦向上运移; $K_2 = 51\%$ 氦向下运移.根据(16)式可得 $L = -0.748$ , $P = 0.8854$ .

将相关参数代入(27)式得

$$0.8854 > \frac{n'_{\text{He}}}{m} > 0.7322.$$

由 $\frac{dQ}{d \frac{n'_{\text{He}}}{m}} = 0$ ,解得 $\frac{n'_{\text{He}}}{m} = 0.87446$ ,将其代入(24)式

解得 $Q = 7.67$ .即平均每个氦原子最少需要吸附7.67个氦核.

### 4.2. 对表1、表2的数据结果计算

表1提供了氦氡团簇向上、向下平均运移速度,表2提供了氦及其子体向上、向下及水平方向运移量所占总运移量百分比平均值,这样就可以将两个

表的数据合并去求得平均每个氦原子最少需要吸附

氦核数量  $Q$ . 计算中发现在  $\frac{n'_{He}}{m}$  的取值范围内  $\frac{dQ}{d\frac{n'_{He}}{m}}$

$< 0$ , 取  $\frac{n'_{He}}{m}$  极大值 0.8854, 代入(24)式求得平均每个氦原子最少需要吸附的氦核数  $Q$ . 计算结果见表 4, 表 4 中最后一行数据来自 4.1 节.

表 4 平均每个氦原子最少需要吸附的氦核数量

源	PVC 管长/cm	积累时间/d	向上运移量/%	向下运移量/%	向上、向下运移速度比	$\frac{n'_{He}}{m}$	每个氦原子吸附的最少氦核数 $Q$
沥青铀矿石	200	4	52.2	36.5	-1.244	0.8854	6.85
沥青铀矿石	200	7	52.2	36.5	-2.154	0.8854	6.85
沥青铀矿石	400	4	52.2	36.5	-1.323	0.8854	6.85
沥青铀矿石	400	7	52.2	36.5	-0.781	0.8854	6.85
液体镭源	200	4	49.4	34.2	-1.717	0.8854	6.46
液体镭源	200	7	49.4	34.2	-1.668	0.8854	6.46
液体镭源	400	4	49.4	34.2	-1.435	0.8854	6.46
液体镭源	400	7	49.4	34.2	-1.435	0.8854	6.46
液体镭源	400	19	49.4	34.2	-1.828	0.8854	6.46
沥青铀矿石	2600	15	49	51	-0.748	0.8744	7.67

### 4.3. 对计算数据分析

由图 2 所示的  $^{238}\text{U}$  衰变图可知, 铀矿石中  $^{238}\text{U}$  衰变到  $^{226}\text{Ra}$  经过长期衰变已达到长期平衡, 其活度相等. 对于铀矿石源, 实验装置内每秒释放出氦核数量与氦原子数量之比小于等于 7; 对于镭源, 实验装置内每秒释放出氦核数量与氦原子数量之比小于等于 4. 使用镭作为氦源, 每秒释放出氦核数量与氦原子数量之比最大值为 4; 使用铀矿石作为氦源, 每秒释放出氦核数量与氦原子数量之比最大值为 7, 而且在衰变到氦之前的氦核大部分在矿石内部, 即每秒释放出氦核数量与氦原子数量之比的最大值比 4 略大. 这样从简化分析出发使用了使氦及其子体向上运移最大化的极端假设, 发现以氦氦团簇解释氦快速向上运移现象的内在矛盾——氦核数量不够.

如果假定氦有很强的从空气中吸附氦气的的能力, 从而获取足够的氦组成氦氦团簇垂直运移, 则又

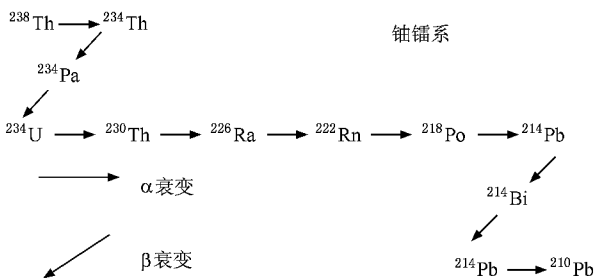


图 2  $^{238}\text{U}$  放射性衰变系列

与文献 [8] 中相关实验结果矛盾. 文献 [8] 的表 6—9 提供了加入氦气后的运移数据, 见表 5<sup>[8]</sup>. 加有氦气后氦及其子体向上、向下运移概率与自然状态相同.

表 5 在不同状态下, 氦及其子体向上、向下运移概率

装置状态	向上运移概率/%	向下运移概率/%
自然状态	50	50
加有电子( $^{90}\text{Sr}$ $\beta$ 源)时	48	52
加有氦核( $^{241}\text{Am}$ $\alpha$ 源分散放置)时	52	48
加有氦气( $^{241}\text{Am}$ $\alpha$ 源集中置于底部)时	50	50
加干燥剂状态	54	46
加有干燥剂和氦核( $^{241}\text{Am}$ $\alpha$ 源分散)时	58	42

## 5. 结 论

对氦及其子体的长距离运移实验数据进行了分析, 发现利用氦氦团簇解释氦的快速向上运移, 氦核的数量不够. 如果假定氦有很强的从空气中吸附氦气的的能力, 从而获取足够的氦组成氦氦团簇垂直运移, 则又与相关实验中加有氦气后氦及其子体向上、向下运移概率与自然状态相同的结论矛盾. 其实对氦测量的传统方法——双滤膜法、闪烁法都需要采用滤膜滤除氦子体, 如果氦以氦氦团簇的形式在空气中运移, 则双滤膜法、闪烁法测量氦浓度应该将会严重偏低, 但一直没有相关文献及实验发现该问题. 由此可

见 氡氦团簇可能不是氡的快速向上运移的主要原因 , 可能另有更深层次的原因 , 有待进一步深入研究 .

- [ 1 ] Cao L L , Wang Z L , Liu Y W 2005 *Journal of Seismological Research* **28** 302 [ in Chinese ] 曹玲玲、王宗礼、刘耀炜 2005 地震研究 **28** 302 ]
- [ 2 ] Jia W Y , Fang F , Zhou R S , Ma Y J , Qiu Y D , Hou X S , Wu Y P , Zu X L , Wang X Q 1999 *Journal of Chengdu University of Technology* **26** 171 [ in Chinese ] 贾文懿、方 方、周蓉生、马英杰、邱元德、侯新生、吴允平、祖秀兰、王小琴 1999 成都理工大学学报 **26** 171 ]
- [ 3 ] Jia W Y , Fang F , Zhou R S , Ma Y J , Qiu Y D , Hou X S , Wu Y P , Zu X L , Wang X Q 2000 *Nuclear Techniques* **23** 179 [ in Chinese ] 贾文懿、方 方、周蓉生、马英杰、邱元德、侯新生、吴允平、祖秀兰、王小琴 2002 核技术 **23** 179 ]
- [ 4 ] Jia W Y , Fang F , Zhou R S , Ma Y J , Le R C , Wang X Q 2002 *Journal of Chengdu University of Technology* **29** 61 [ in Chinese ] 贾文懿、方 方、周蓉生、马英杰、乐仁昌、王小琴 2002 成都理工大学学报 **29** 61 ]
- [ 5 ] Le R C , Jia W Y , Wu Y P 2002 *Radiation Protection* **22** 175 [ in Chinese ] 乐仁昌、贾文懿、吴允平 2002 辐射防护 **22** 175 ]
- [ 6 ] Jia W Y , Fang F , Zhou R S , Ma Y J , Le R C , Wang X Q 2002 *Journal of Chengdu University of Technology* **29** 561 [ in Chinese ] 贾文懿、方 方、周蓉生、马英杰、乐仁昌、王小琴 2002 成都理工大学学报 **29** 561 ]
- [ 7 ] Le R C , Jia W Y , Wu Y P 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2457 [ in Chinese ] 乐仁昌、贾文懿、吴允平 2003 物理学报 **52** 2457 ]
- [ 8 ] Le R C 2001 *Ph. D. Thesis* ( Chengdu University of Technology ) p. 10 [ in Chinese ] 乐仁昌 2001 博士学位论文 ( 成都理工大学 ) 10 ]
- [ 9 ] Le R C , Jia W Y , He Z J 2006 *Journal of Chengdu University of Technology* **33** 536 [ in Chinese ] 乐仁昌、贾文懿、何志杰 2006 成都理工大学学报 **33** 536 ]
- [ 10 ] Le R C , Lin G Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4113 [ in Chinese ] 乐仁昌、林刚勇 2005 物理学报 **54** 4113 ]
- [ 11 ] Le R C , Wang X Q 2006 *Nuclear Science and Techniques* **17** 92

## Analysis of the experiment data of vertical migration of radon and its daughters under ideal conditions

Tan Yan-Liang<sup>1,2)†</sup> Xiao De-Tao<sup>1)</sup> Zhao Gui-Zhi<sup>1)</sup>

1) *School of Nuclear Science & Technology , University of South China , Hengyang 421001 , China* )

2) *Department of Physics and Electronics , Hengyang Normal University , Hengyang 421008 , China* )

( Received 6 January 2008 ; revised manuscript received 19 January 2008 )

### Abstract

We analyzed the vertical long distance migration experiment data of radon and its daughters , and found that the number of  $\alpha$  particles is insufficient to explain the fast upward migration of radon by helium- radon clustering . If assume that radon has very strong ability to adsorb the helium from the air to form helium-radon clusters for vertical migration , then there is an inconsistency between the tentative and that experimental conclusion , that the upward and downward migration probability of radon and its daughters in natural state is equal to that when helium gas is added . So we propose that helium- radon clustering may not be the main reason of radon and its daughters' fast upward migration . There may be other more complex reasons . The phenomenon needs further research .

**Keywords** : radon , vertical migration , helium-radon cluster

**PACC** : 2390 , 3120 , 3120C