

# 用人体毛发硫快速估算快中子剂量

林志凯 陈金娣

(卫生部工业卫生实验所,北京 100088)

用人体毛发硫测定核事故中工作人员所受外照射快中子剂量是一种快速直接测量法。由于人体毛发中含有硫元素,而且相对恒定(每克毛发相对含量平均为 44.8mg)因此,在外照射事故中,通过测定 $^{32}\text{S}(\text{n}, \text{p})^{32}\text{P}$ 反应产生的纯 $\beta$ 放射性,可以确定人体所受的快中子照射剂量。

## 1 快中子吸收剂量的计算

能量在 2.5MeV ( $^{32}\text{S}$  的反应阈能)以上的快中子吸收剂量  $D$  由下式计算:

$$D = F D_0 \quad (\text{Gy}) \quad (1)$$

式中,  $F$  由毛发中的 $^{32}\text{S}$ 元素所测定的快中子注量 ( $\text{n}/\text{cm}^2$ );  $D_0$  能量为 2.5MeV 以上的快中子注量—吸收剂量转换因子 ( $3.83 \times 10^{-11} \text{Gy}/\text{n}/\text{cm}^2$ )<sup>[1]</sup>。

硫阈以上的快中子注量  $F$  由下式计算:

$$F = \frac{A_0 \cdot W}{\sigma \cdot S \cdot N \cdot \lambda} \quad (\text{n}/\text{cm}^2) \quad (2)$$

式中,  $A_0$  在时间  $t=0$  时刻每克毛发样品的 $\beta$ 活度 (Bq);  $W$ :  $^{32}\text{S}$  的克原子量 (32g);  $\sigma$ :  $^{32}\text{S}$  的快中子有效活化截面 ( $3 \times 10^{-25} \text{cm}^2/\text{原子}$ );  $S$  每克毛发样品的硫含量 (0.045克)<sup>[2]</sup>;  $N$ : 阿佛伽德罗常数 ( $6.02 \times 10^{23}$  原子);  $\lambda$ :  $^{32}\text{P}$  的衰变常数 ( $3.38 \times 10^{-5}/\text{分}$ )。

在  $t=0$  时刻每克毛发样品的 $\beta$ 活度  $A_0$  由下式给出:

$$A_0 = \frac{n \cdot e^{\lambda t}}{\eta \cdot m} \quad \text{Bq/g} \quad (3)$$

式中,  $n$   $t$  时刻样品的计数率 (计数/分);  $e^{\lambda t}$ : 衰变校正参数;  $\eta$   $\beta$  射线测量装置的探测效率;  $m$  毛发样品的质量 (克)。

将上述各项参数代入 (1) 式, 则快中子吸收剂量  $D$  为:

$$D = 4.46 \times 10^{-3} \times \frac{n \cdot e^{\lambda t}}{\eta \cdot m} \quad (\text{Gy}) \quad (4)$$

由此可知, 测定了仪器的探测效率, 毛发样品的质量  $m$ ,  $t$  时刻样品的计数率  $n$ , 即可

以方便地估算出核事故中人体毛发部位所受的快中子照射剂量。

## 2 $\beta$ 射线测量装置探测效率的刻度

该装置由 1 台 FH-408 自动定标器和 FJ-367 通用闪烁探头组成, 闪烁体为 ST-402 ( $\varnothing 60 \text{mm} \times 0.5 \text{mm}$ ) 薄塑料闪烁体。为减少本底, 将探头屏蔽于内层厚为 1mm 的铝衬, 中间厚为 25mm 的铅, 外层厚为 10mm 钢的铅室中。

为了保证测定 $\beta$ 射线的准确性, 用由中国计量科学研究院提供的 $^{32}\text{P}$ 标准溶液, 采用化学分析方法制备成薄 $^{32}\text{P}$ 标准样品来刻度 $\beta$ 测量装置的探测效率。其刻度方法概述如下。

### 2.1 $^{32}\text{P}$ 标准样品的制备

2.1.1 用移液管准确量取 8ml 磷载体, 置于 100ml 烧杯中, 然后定量滴入 $^{32}\text{P}$ 标准溶液

2.1.2 向溶液中滴加 50ml 镁混合剂, 然后滴加 35 滴浓氢氧化铵, 搅拌均匀, 最后追加 20ml 浓氢氧化铵, 静置 4 小时, 并不时搅拌

2.1.3  $^{32}\text{P}$  标准溶液中的 $^{32}\text{P}$  以磷酸铵镁的形式被载带下来, 最后用 50mm 的漏斗将沉淀抽滤到定性滤纸上, 平衡 1 小时, 称重, 并计算化学产额

### 2.2 $\beta$ 测量装置探测效率的刻度

探测效率由下式计算:

$$\eta = n \cdot e^{\lambda t} / A_0 \cdot Y \quad (5)$$

式中,  $n$   $t$  时刻样品的计数率 (计数/分),  $e^{\lambda t}$ : 衰变校正参数,  $A_0$  加入的 $^{32}\text{P}$  标准溶液的活度 (Bq),  $Y$ : 放射性回收率

经实验测定, 该 $\beta$ 测量装置测定 $^{32}\text{P}$  射线的探测效率为 33.7%。

## 3 实验方法

### 3.1 毛发样品的清洗

收集到的毛发样品会受到一定程度的污染, 因此, 必须进行清洗。为此, 根据 IAEA/WHO 推荐的方法, 采用蒸馏水十无水乙醇

洗涤法清洗毛发样品 然后将样品剪成 1~2mm 长备用

3.2 毛发样品的照射和测量

3.2.1 毛发样品的照射

将毛发样品以 0.5克为间隔称重,然后将毛发样品用铝箔包好,在原子能科学研究院重水反应堆照射. 用 99.99% 的高纯硫粉监测 2.5MeV 硫阈以上能量的快中子积分注量. 由高纯硫给出的快中子积分注量为  $4.44 \times 10^{14}$  中子 /cm<sup>2</sup>.

3.2.2 毛发样品的测量

测量时,分别将 6份样品分装于样品盘中,样品量分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0克,将样品平铺均匀后,上面复盖一层半透明玻璃纸压实,即可直接置于  $\beta$  测量装置下测 <sup>32</sup>P 的  $\beta$  活度. 样品盘直径为 46mm 最终测量结果归一到每克毛发样品的活度

4 测量结果与讨论

4.1 测量结果

为了使测量结果具有可比性和可靠性,在用直接测量法测定快中子照射剂量时,同时运用放射化学分离法分析了四份毛发样品,其结果一并示于附表中.

附表 头发硫快中子吸收剂量测定结果

分析方法	样品号	快中子积分注量 ( $\times 10^{14}$ 中子 /cm <sup>2</sup> )	吸收剂量 ( $\times 10^4$ Gy)
直接测量法	1	4.73	1.81
	2	4.75	1.82
	3	4.74	1.81
	4	4.69	1.80
	5	4.73	1.81
	6	4.80	1.84
平均值		4.74 $\pm$ 0.035	1.82 $\pm$ 0.014
放射化学分离法	7	4.44	1.70
	8	4.68	1.79
	9	4.44	1.70
	10	4.40	1.69
平均值		4.49 $\pm$ 0.128	1.72 $\pm$ 0.047

由附表中的结果可以看出,直接测量法与放化分离法的测量结果符合较好,偏差仅为 5.8%.

直接测量法其样品盘中发样的重量与计数率的关系实验表明,样品在超过 1.5克之后,自吸收效应的影响明显增大. 因此,应用直接测法时发样重量为 1克左右为宜.

4.2  $\beta$  测量装置的快中子剂量探测限

在一定的测量时间内,测量装置的灵敏度由它的本底计数率 Nb 和探测效率  $\eta$  决定. 一般取本底计数率标准误差的三倍定为装置的最小放射性活度探测限  $A_{min}$  置信水平为 99.7%

$$A_{min} = \frac{3}{\eta} \sqrt{Nb/t} \quad (6)$$

据此,确定出用人体毛发来测定快中子的最小可探测剂量下限为  $2.0 \times 10^{-1}$  Gy

4.3 讨论

通过两种方法的实验比较,可以看出,直接测量法能够给出令人满意的结果. 该方法具有简便、快速、省时的优点. 但是测量结果比放化分离法高 5.8%,其原因可能是由于毛发中含有一定量的 Na 元素,钠元素经热中子照射后,生成 <sup>23</sup>Na (n,  $\gamma$ ) <sup>24</sup>N 反应放出 1.39MeV 的  $\beta$  射线,其能量与 <sup>32</sup>P 的  $\beta$  粒子能量接近,使测量结果偏高.

参考文献

1 Petersen D. F. et al. Estimation of fast neutron doses in man by <sup>32</sup>S (n, p) <sup>32</sup>P reaction in body hair. Health Phys, 1961, 6 1.

2 Hankins Dale. E. Direct counting of hair samples for <sup>32</sup>P activation. Health phys. 1969, 17 740.

(1996年 6月 24日收稿)