

# 铀浓缩设施工作场所空气中 UF<sub>6</sub> 浓度限值的确定

## Determination of UF<sub>6</sub> concentration limit in workplace air of uranium enrichment facilities

姜霞, 杨雪, 杨凯

(中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006)

**摘要:** 从辐射和化学危害角度分别计算铀浓缩设施工作场所空气中 UF<sub>6</sub> 的导出空气浓度, 以指导企业对工作场所空气中铀气溶胶浓度进行合理控制。结果显示, 长期慢性吸入 UF<sub>6</sub> (<8.5%) 和天然铀的工作场所, 空气中 UF<sub>6</sub> 浓度控制在 40 μg/m<sup>3</sup> 以内时, 可以满足辐射危害和化学危害控制的要求。长期慢性吸入 UF<sub>6</sub> (>8.5%) 的工作场所, 空气中 UF<sub>6</sub> 浓度限值以辐射危害导出限值来控制, 应控制在 5 μg/m<sup>3</sup> 以内。

**关键词:** 铀浓缩; 辐射危害; 化学危害; 工作场所空气容许浓度

中图分类号: R144 文献标识码: B

文章编号: 1002-221X(2017)05-0384-02

DOI:10.13631/j.cnki.zgggyx.2017.05.024

迄今为止, 核工业进行大规模生产的铀同位素分离方法是离心分离法, 离心法是以 UF<sub>6</sub> 作为工作气体。铀的 3 种主

要放射性同位素都是 α 核素, 职业接触可造成内照射危害, 其关心的物理量是剂量; 同时铀又具有化学毒性, 靶器官主要为肾脏<sup>[1]</sup>, 其关心的物理量是肾铀含量。离心法的工作人员职业接触 UF<sub>6</sub> 以吸入为主。UF<sub>6</sub> 吸入体内, 既产生辐射危害, 也产生化学危害, 其轻重程度随<sup>235</sup>U 富集度而异。

《铀加工与燃料制造设施辐射防护规定》(EJ 1056—2005) 从辐射危害的角度提出了铀化合物工作场所导出空气浓度 (DAC)。还需要由化学危害阈值来推算工作场所 UF<sub>6</sub> 急、慢性暴露时的空气质量浓度 (C<sub>m</sub>) 限值, 二者综合考虑确定适用于铀浓缩设施的工作场所空气铀气溶胶浓度限值。

### 1 资料与方法

#### 1.1 资料

不同富集度 UF<sub>6</sub> 的比活度见表 1。

表 1 不同丰度 UF<sub>6</sub> 和金属铀的比活度<sup>[2]</sup>

MBq/g

| 标称浓度<br>(重量%) | 同位素富集度 (原子%)     |                  |                  | UF <sub>6</sub> 比活度 | 金属铀比活度 |
|---------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|--------|
|               | <sup>235</sup> U | <sup>234</sup> U | <sup>238</sup> U |                     |        |
| 90            | 90.110           | 1.070            | 8.820            | 1.703               | 2.528  |
| 5.0           | 5.061            | 0.054            | 94.885           | 0.0936              | 0.138  |
| 4.0           | 4.049            | 0.042            | 95.909           | 0.0747              | 0.110  |
| 3.0           | 3.037            | 0.031            | 96.932           | 0.0573              | 0.0848 |
| 0.711         | 0.720            | 0.005 4          | 99.2746          | 0.0170              | 0.0252 |

### 1.2 方法

1.2.1 用个人年剂量限值推算工作场所导出空气铀气溶胶浓度<sup>[3]</sup> 《铀加工与燃料制造设施辐射防护规定》(EJ 1056—2005) 中按照年个人有效剂量限值 (20 mSv) 导出年摄入量限值 (ALI, Bq), 并根据 ALI 导出工作场所空气活度浓度限值 (DAC, Bq/m<sup>3</sup>), 进而得出工作场所空气质量浓度限值 (C<sub>m</sub>, μg/m<sup>3</sup>)。

$$ALI = 20 \text{ mSv} / e_{inh}$$

$$DAC = ALI / (B_r \times t)$$

$$C_m = DAC / C_a$$

式中, ALI—年摄入量限值, Bq;  $e_{inh}$ —吸入的待积有效剂量系数; 根据《职业性内照射个人监测规范》(GBZ129—2002) 中 4.3.4 和《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002) 附表 3 的规定, 气溶胶粒子活度中值空气动力学直径假定为 5 μm 时, 其同位素<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U、<sup>238</sup>U 的待积有效剂量系数分别为  $6.4 \times 10^{-4}$ 、 $6.0 \times 10^{-4}$  和  $5.8 \times 10^{-4}$  mSv/Bq; B<sub>r</sub>—呼吸率, 根据《两种粒度放射性气溶胶年摄入量限值》

(GBZ/T154—2006), 按每日上班时间内 2.5 h 坐位工作、呼吸率 0.54 m<sup>3</sup>/h 和 5.5 h 轻度体力劳动、呼吸率 1.5 m<sup>3</sup>/h 计算, 8 h B<sub>r</sub> 平均值取 1.2 m<sup>3</sup>/h, 不考虑佩戴口罩; t—接触时间, 急性吸入取实际的接触时间, 慢性吸入取 2 000 h/年, 按照每周 5 个工作日, 每年 50 个工作周计算; C<sub>a</sub>—金属铀的比活度, 为恒定值, Bq/gU; C<sub>m</sub>—推算的工作场所金属铀的质量浓度限值, μg/m<sup>3</sup>。

1.2.2 采用化学危害导出工作场所空气铀气溶胶浓度限值 该限值采用两种导出方法: (1) 采用内照射剂量估算软件 INDO—2000<sup>[4]</sup> 计算的不同终身限制受照期间的无铀化学危害效应, 导出铀气溶胶浓度限值。(2) 按照 DOE 经验公式计算, 在慢性吸入 F 类铀化合物情况下, 工作场所铀气溶胶浓度大致恒定。DOE (2009) 假定对于持续暴露于一定空气铀气溶胶浓度的工作环境, 当每日肾脏铀吸收速率等于排泄率时, 达到最大肾铀含量。吸入的铀进入肾的速率 (K) 和排出铀的速率 (R) 近似由下列公式计算<sup>[5]</sup>:

$$K = B_r \times C_m \times f_b \times f_k$$

式中, K 为肾脏铀吸收速率, mg/d; C<sub>m</sub> 为工作场所空气铀气溶胶浓度, mg/m<sup>3</sup>;  $f_b$  为铀吸收入血的分数, 对于 F 类铀

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2017-03-165

作者简介: 姜霞 (1982—), 女, 助理研究员, 从事职业卫生评价工作。

化合物取 0.62;  $f_k$  为铀经血液进入肾脏的分数, 对于 F 类铀化合物取 0.085。

$$R = \lambda \times K_b$$

式中,  $R$  为肾脏铀排泄速率, mg/d;  $\lambda$  为速率常数, 取 0.099 每天;  $K_b$  为肾脏中铀含量, mg; 当  $K=R$  时, 即  $B_r \times C_m \times f_b \times f_k = \lambda \times K_b$ , 则  $C_m = (\lambda \times K_b) / (B_r \times f_b \times f_k)$

## 2 结果

### 2.1 采用辐射危害导出工作场所空气铀气溶胶浓度限值

在正常工况下, 铀浓缩工作人员以慢性吸入铀气溶胶为

主。《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002) 规定的工作人员职业照射年平均有效剂量限值为 20 mSv, 因此, 假定每年吸入 (F 类) 铀气溶胶的待积有效剂量按 20 mSv 限制, 则慢性吸入铀气溶胶工作场所导出浓度限值的计算结果见表 2。

由表 2 可见, 对于不同<sup>235</sup>U 浓缩度的铀气溶胶, 随着其浓缩度的增加, DAC 基本不变, 而导出空气质量浓度随着<sup>235</sup>U 富集度的增加而降低。对于 90%<sup>235</sup>U 的浓缩铀, 其工作场所空气铀气溶胶浓度  $C_m$  约为 0.005 mgU/m<sup>3</sup>。

表 2 辐射危害的导出铀气溶胶浓度限值

| 标称浓度<br>(重量%) | 金属铀<br>比活度 (Bq/gU)   | 年摄入量                 |                      | 铀气溶胶浓度导出限值               |                             |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------|
|               |                      | 总活度 (Bq)             | 质量 (mg)              | DAC (Bq/m <sup>3</sup> ) | $C_m$ (mgU/m <sup>3</sup> ) |
| 90            | 2.53×10 <sup>6</sup> | 3.13×10 <sup>4</sup> | 1.24×10              | 1.30×10                  | 5.16×10 <sup>-3</sup>       |
| 50            | 9.82×10 <sup>5</sup> | 3.13×10 <sup>4</sup> | 3.19×10              | 1.31×10                  | 1.33×10 <sup>-2</sup>       |
| 20            | 4.24×10 <sup>5</sup> | 3.14×10 <sup>4</sup> | 7.40×10              | 1.31×10                  | 3.09×10 <sup>-2</sup>       |
| 8.5           | 2.34×10 <sup>5</sup> | 3.14×10 <sup>4</sup> | 1.34×10 <sup>2</sup> | 1.31×10                  | 5.60×10 <sup>-2</sup>       |
| 5.0           | 1.38×10 <sup>5</sup> | 3.15×10 <sup>4</sup> | 2.29×10 <sup>2</sup> | 1.31×10                  | 9.53×10 <sup>-2</sup>       |
| 0.711         | 2.52×10 <sup>4</sup> | 3.28×10 <sup>4</sup> | 1.30×10 <sup>3</sup> | 1.37×10                  | 5.42×10 <sup>-1</sup>       |

### 2.2 采用化学危害导出工作场所空气铀气溶胶浓度限值

铀无化学危害效应的肾铀含量为 1 μg/g<sup>[6]</sup>, 假定肾的质量为 310 g, 则无化学危害效应的肾铀含量为 310 μg; 美国 DOE 标准 (2009)<sup>[5]</sup> 规定铀无化学危害效应的肾铀含量为 1.1 μg/g。假定肾的质量为 310 g, 则无化学危害效应的肾铀含量为 0.341 mg。

采用内照射剂量估算软件 INDO—2000 得出慢性 (连续均匀) 吸入 UF<sub>6</sub>, AMAD 为 1 μm 和 5 μm, 呼吸率 1.2 m<sup>3</sup>/h, 每年工作时间 2 000 h, 不同终身限制受照期间的无铀化学危害效应 (肾铀含量取 0.341 mg/g) 的导出铀气溶胶浓度限值, 见表 3。

表 3 无铀化学危害效应的导出铀气溶胶浓度限值 mg/m<sup>3</sup>

| 限制受照期间 |        | 导出铀气溶胶浓度限值 |      |
|--------|--------|------------|------|
| 年      | 天      | 1 μm       | 5 μm |
| 1      | 365    | 0.08       | 0.07 |
| 2      | 730    | 0.08       | 0.06 |
| 3      | 1 096  | 0.07       | 0.06 |
| 4      | 1 461  | 0.06       | 0.06 |
| 5      | 1 826  | 0.06       | 0.05 |
| 6      | 2 191  | 0.06       | 0.05 |
| 7      | 2 557  | 0.06       | 0.05 |
| 8      | 2 922  | 0.05       | 0.05 |
| 9      | 3 287  | 0.05       | 0.05 |
| 10     | 3 652  | 0.05       | 0.04 |
| 20     | 7 305  | 0.05       | 0.04 |
| 30     | 10 957 | 0.04       | 0.04 |
| 40     | 14 610 | 0.04       | 0.04 |
| 50     | 18 262 | 0.04       | 0.04 |

按照 DOE 经验公式, 推算导致无铀化学危害效应时的 F 类铀化合物  $C_m$  为 6.67×10<sup>-2</sup> mg/m<sup>3</sup>。综上, 长期慢性 (连续均匀) 吸入 UF<sub>6</sub>, 无铀化学危害效应的导出铀气溶胶浓度限值宜定为 0.04 mg/m<sup>3</sup>。该值与美国 DOE 标准 (2009) 规定的 0.05 mg/m<sup>3</sup> 接近。

## 3 结论

比较表 3 与表 2 的导出铀气溶胶浓度限值也可看出, 对于工作人员可能长期慢性吸入 F 类低浓缩铀 (<8.5%) 和天然铀的工作场所, 其铀气溶胶浓度的限值应采用由铀化学危害确定的限值。UF<sub>6</sub> 浓度控制在 40 μg/m<sup>3</sup> 以内时, 可以满足辐射危害和化学危害控制的要求。长期慢性吸入 UF<sub>6</sub> (>8.5%) 的工作场所, UF<sub>6</sub> 浓度限值以辐射危害导出限值来控制, 应控制在 5 μg/m<sup>3</sup> 以内。

## 参考文献:

- [1] 孙世荃, 尤占云, 刘胜恩, 等. 铀化合物中毒的病理学研究 [J]. 核防护, 1976, 2 (3): 48-54.
- [2] 李德平, 潘自强. 辐射防护手册 (第三分册) [M]. 北京: 原子能出版社, 1990: 229.
- [3] 王秀琴, 刘占旗, 姜霞, 等. 对工作场所 F 类铀化合物空气浓度限值的推导探讨 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2015, 35 (4): 290-293.
- [4] 陈宝维, 安永峰, 马如维, 等. 与 1990 年 ICRP 推荐接轨的内照射剂量估算方法研究及其软件的开发 [J]. 核动力工程, 2004, 25 (5): 470-474.
- [5] U. S. Department of Energy. Guide of Good Practices for Occupational Radiological Protection in Uranium Facilities [R]. DOE-STD-1136-2009. Washington: U. S. Department of Energy, 2009.
- [6] 刘树铮, 孙世荃. 铀毒理学 [M]. 北京: 原子能出版社, 1995: 317.

注: INDO—2000 软件遵循 ICRP 第 56、66、67、68、69、71、78 等一系列出版物的模型和参数, 尽管 ICRP 103 号出版物中对组织权重因子做了一些修改, 但《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002) 中的参数尚未进行修正, 因此, 该软件仍使用 GB 18871—2002 提供的参数进行计算