

氚气流发生器饱和系数测定

程 瑛, 李星垣, 洪永侠, 刘献忠, 漆明森

(核工业西南放射性计量站, 四川 成都 610005)

摘要: 简述了用称重法对氚气流发生器饱和系数的测定, 给出了不同流速等条件下失水量的修正及饱和系数的测量结果, 并对测量结果不确定度进行了评定。

关键词: 氚气流发生器; 鼓泡器; 饱和系数; 不确定度

中图分类号: TL814 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2008)03-0262-04

Determination of Saturated Coefficient of Tritiated Water Vapour Generator System

CHENG Ying, LI Xing-yuan, HONG Yong-xia, LIU Xian-zhong, QI Ming-sen
(South-West Radioactive Metrology Department of Nuclear Industry, Chengdu 610005, China)

Abstract: Saturated coefficient is an important parameter for tritiated water vapour generator. The paper describes the determination of saturated coefficient by measuring different mass before and after bubbling. The result under different velocities of bubbling was given, and the uncertainty of the result was evaluated.

Key words: tritiated water vapour generator system; bubble; saturated coefficient; uncertainty

利用鼓泡法原理研制的氚气流发生器所产生的饱和氚气流的活度浓度与诸多因素有关, 其中, 饱和系数是最重要的影响因素。饱和系数的大小主要决定于鼓泡器结构和鼓泡时空气的流速和温度^[1]。对于已设计加工好的鼓泡器, 其结构已确定, 因此, 在一定温度下影响饱和系数的主要因素是空气流速。本工作测定同温、不同空气流速下的饱和系数, 为优化鼓泡器结构设计、选择最佳鼓泡条件提供依据。

1 氚气流发生器系统

图 1 为氚气流发生器系统框图。该系统包

括空气过滤器和干燥器、流量控制器、温度和压力传感器、恒温器和鼓泡器、回收器和冷凝器、真空泵等。

当恒定空气流通过鼓泡器鼓泡时, 在适当控制流速及温度等条件下, 鼓泡器产生的氚气流活度浓度按式(1)计算:

$$C_{\text{气}} = SFY_t a_0 \left(1 - \frac{SY_t V}{m_0}\right)^{F-1} \quad (1)$$

式中: S 为鼓泡器饱和系数; F 为氚水同位素分馏系数; Y_t 为一定温度下单位体积空气中饱和含水量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; a_0 为鼓泡前氚水比活度, $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$; m_0 为鼓泡前氚水质量, g ; V 为鼓入鼓

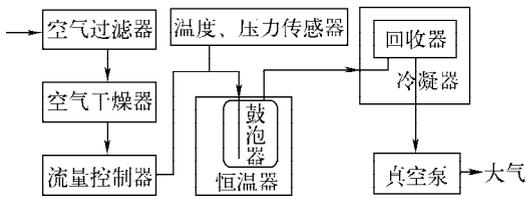


图1 氚气流发生器系统框图

Fig.1 Sketch of tritiated water vapour generator system

$$V = \frac{p_0 V_0 T_1}{p_1 T_0} \quad (4)$$

式中: p_0 为标准状态时大气压, 101 325 Pa; T_0 为标准状态时温度, 273. 15 K (0 °C); V_0 为质量流量控制器累积流量 (标准状态时的空气体积), L; T_1 为鼓泡器内空气温度, K; p_1 为鼓泡器内空气压力, Pa。

3.3 鼓泡器内温度的平衡时间及失水量修正

鼓泡起始时, 空气流使鼓泡器温度失去平衡, 当流速不变时, 恒温器将自动调节其温度使其在一定时间内达到平衡。在平衡前的这段时间内, 鼓泡器单位时间内的失水量将发生变化, 应对该时间间隔内鼓泡器的失水量进行修正。

设累积流量为 V , 温度平衡所需时间为 t_0 , 在 t_0 时间内所对应的累积流量为 V_0 , 平衡温度下空气饱和含水量为 Y_t 。若等间隔 n 次测量鼓泡器温度, 在 $t_i (i=1, 2, \dots, n)$ 时间内所对应的累积流量为 V_i , 对应的空气饱和含水量为 Y_i , 则鼓泡器失水量的修正值为:

$$Q = Y_t V_0 - \sum_{i=1}^n Y_i V_i \quad (5)$$

在温度平衡过程中, 由于是等间隔测量鼓泡器温度, 则有:

$$Q = Y_t V_0 - V_0 \sum_{i=1}^n Y_i / n \quad (6)$$

修正量相对值为:

$$\frac{Q}{Y_t V} = \frac{V_0}{V} \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{Y_t} \right) \quad (7)$$

从上式可看出, 累积流量越大, 鼓泡器失水量的相对修正值越小。为此, 实验测定了抽气时间为 4 h、不同空气流速下鼓泡器温度的平衡时间, 结果列于表 1。

根据表 1 结果, 按式(7)计算鼓泡器失水量的修正值, 结果列于表 2。

3.4 鼓泡器失水量的测量

鼓泡器失水量, 即式(2)中的 $m_1 - m_2$, 用称重法测量。本工作用感量为 10 mg 的天平进行称量。在鼓泡器的取水与称量过程中, 采取适当措施以防止水的损失和两次称量条件的不一致性。鼓泡器内空气温度 T_1 由温度传感器测定, 空气压力 p_1 由压力传感器测定。

泡器的空气总体积, m^3 。

从式(1)可看出, 饱和系数的测量及其不确定度直接关系到氚气流活度浓度的大小及准确性。

2 饱和系数测定方法

饱和系数是反映鼓泡过程中气、液两相交换程度的量, 即鼓泡器失水质量与鼓泡器内空气应带走饱和水质量之比。鼓泡器失水质量通过称量鼓泡前后鼓泡器质量得到, 鼓入鼓泡器内空气应带走水质量可由鼓入空气体积与对应温度下饱和含水量相乘得到。饱和系数则为:

$$S = \frac{m_1 - m_2}{V Y_t} \quad (2)$$

式中: m_1 为鼓泡前鼓泡器内氚水质量, g; m_2 为鼓泡后鼓泡器内氚水质量, g。

从上式可看出, 准确测定饱和系数 S 必须保证以下条件: 1) 进入鼓泡器的空气应干净、干燥, 所携带的水分可忽略; 2) 鼓泡过程中必须保证温度恒定; 3) 空气流量稳定可调。

3 饱和系数的测定

3.1 空气中饱和含水量计算

一定温度下, 空气中饱和含水量 Y_t 可按式(3)计算:

$$Y_t = 4.85 \times 10^{\frac{6.9t}{230+t}} \quad (3)$$

式中: t 为空气温度。

Y_t 值也可由文献[2]查得。温度在 -10 ~ 40 °C 内时, 按式(3)计算的 Y_t 与从文献[2]查得的结果间的相对偏差在 0.3% 以内。

3.2 鼓入鼓泡器的空气体积测量

鼓入鼓泡器的空气体积用质量流量控制器测量, 并经温度和压力修正, 按式(4)计算, 有:

表1 鼓泡器温度的平衡时间测量结果
Table 1 Measured results
of bubble temperature equilibrium time

温度/℃	不同空气流速(L·min ⁻¹)下 鼓泡器温度的平衡时间/min			
	2.7	3.4	4.2	5.1
0	9.934	9.931	9.930	9.936
2	9.212	9.659	9.001	9.038
4	6.927	9.460	9.927	9.933
6	6.593	9.757	9.930	9.934
8	5.971	9.887	9.930	9.936
10	5.854	9.933	9.929	9.936
12	7.940	9.931	9.930	9.936
14	9.910	9.933	9.930	9.936
16	9.931	9.935	9.930	9.936

表2 抽气4 h、不同空气流速下失水量的修正值
Table 2 Corrected value of lost water
with different air flowing velocities in four hours

流速/(L·min ⁻¹)	失水质量/g	相对修正值/%
2.7	0.09	1.1
3.4	0.03	0.3
4.2	<0.01	可忽略
5.1	<0.01	可忽略

3.5 饱和系数测定结果

在鼓泡器恒定温度为10℃、环境温度为15℃下测定了不同空气流速下的饱和系数。结果列于表3。

表3 氚气流发生器的饱和系数测量结果
Table 3 Saturated coefficient
of tritiated water vapour generator system

流速/ (L·min ⁻¹)	鼓泡前氚 水质量/g	鼓泡后氚 水质量/g	鼓泡器 失水质量/g	饱和系数
2.0	590.58	585.48	5.1	1.0
2.7	590.99	584.08	6.91	1.0
3.4	566.32	557.96	8.36	0.988
4.2	561.88	551.73	10.15	0.983
5.1	551.23	538.86	12.37	0.949

从表3可看出,饱和系数与气体流速有关,流速越小,饱和系数越大。本系统所设计加工

的鼓泡器,在流速小于4.0 L·min⁻¹时,饱和系数接近1。

4 饱和系数测量结果的不确定度评定

4.1 数学模型

根据式(2)和(4),得到饱和系数的数学模型为:

$$S = \frac{p_1 T_0 (m_1 - m_2)}{p_0 V_0 T_1 Y_t} \quad (8)$$

影响饱和系数测量结果的不确定度分量有: p_0 、 T_0 、 V_0 、 p_1 、 T_1 、 Y_t 、 m_1 、 m_2 及失水量修正等参数引入的不确定度。

4.2 饱和系数测量不确定度评定

4.2.1 标准状态下空气压力引入的不确定度 $u(p_0)$ 标准状态时空气压力为101 325 Pa,该值是目前各类学科广泛采用的标准值,对测量结果引入的不确定度可忽略。

4.2.2 标准状态下温度引入的不确定度 $u(T_0)$ 标准状态下,温度为273.15 K,该值也是目前各类学科广泛采用的标准值,对测量结果引入的不确定度可忽略。

4.2.3 质量流量控制器测量空气体积引入的不确定度 $u(V_0)$ 检定证书给出质量流量控制器的测量误差极限为0.8%,采用B类评定,其半宽度为0.8%,按均匀分布计算,质量流量控制器测量空气体积引入的不确定度为:

$$u(V_0) = \frac{0.008}{\sqrt{3}} = 0.46\%$$

4.2.4 压力测量引入的不确定度 $u(p_1)$ 检定证书给出了压力传感器的示值误差为0.2%,采用B类评定,其半宽度为0.2%,按均匀分布计算,则压力测量引入的不确定度为:

$$u(p_1) = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.12\%$$

4.2.5 温度测量引入的不确定度 $u(T_1)$ 温度传感器测量精度为 ± 0.15 K,鼓泡时的温度约为283 K,按均匀分布计算,该精度对温度测量引入的不确定度为:

$$u(T_1) = \frac{0.15/\sqrt{3}}{283} = 0.03\%$$

4.2.6 单位体积空气中饱和含水量引入的不确定度 $u(Y_t)$ 单位体积空气中饱和含水量是按式(3)计算出来的,估计其不确定度小于

0.3%,即:

$$u(Y_t) = 0.3\%$$

4.2.7 鼓泡器温度的平衡失水量修正引入的不确定度 $u(Y_t V)$ 鼓泡器温度的平衡时间最长需 16 min,失水量修正最大相对值为 1.1%,修正量不确定度估计不大于 1%,则对饱和系数引入的不确定度为:

$$u(Y_t V) = 0.011 \times 0.01 = 0.01\%$$

4.2.8 天平称量引入的不确定度 $u(m)$ 采用量程为 1 000 g,感量为 10 mg 的天平称量鼓泡器,检定证书给出了该天平的误差极限为 0.04 g,而鼓泡器质量约 450 g,按 B 类评定,则鼓泡器质量称量引入的不确定度按均匀分布计算为:

$$u(m) = (0.04/\sqrt{3})/450 = 0.006\%$$

4.3 饱和系数测量结果合成不确定度

根据以上评定结果,各项不确定度分量互不相关,则饱和系数测量结果合成不确定

度为:

$$u(S) = [u^2(V_0) + u^2(p_1) + u^2(T_1) + u^2(Y_t) + u^2(Y_t V) + u^2(m)]^{1/2} = 0.56\%$$

5 结论

通过对饱和系数的测定,得到了氟气流发生器在流速小于 $4.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的饱和系数接近 1,测量结果合成不确定度为 0.56%。该结果表明,氟气流发生器所鼓出的氟气流达到饱和,而且稳定,可用于标准氟气流的制备。

感谢杨怀远研究员的指导。

参考文献:

- [1] 赵亚民. 氟化水蒸气的鼓泡法制备和鼓泡法取样的研究[J]. 辐射防护, 1980(6): 32, 39-43.
- [2] 张向宇. 实用化学手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.