

鈾水系統安全質量的簡易估算法

黃 祖 洽

本文介紹了一種估算鈾水系統(或鈾與其它含氫介質的均勻混合系統)的“安全質量”,即不會產生臨界安全事故的 U^{235} 質量的簡易方法。在這個方法中,利用了帶全水反射層的球形鈾水系統的最小臨界質量的實驗數據和最佳的 N_H/N_S 比值。估算中採用了反應堆理論的單羣模型。文末簡略地討論了方法的可靠程度,並就兩個例子說明了方法的應用。

一、鈾水系統的臨界事故和安全質量

加濃鈾和水(或其它含氫物質,下同)的均勻混合系統中,由於氫具有良好的慢化性能,臨界質量較小,比較容易產生自持鏈式反應。自持鏈式反應如果不是在所預期的時間和地點出現,就會造成臨界事故。在臨界事故中,鏈式反應的進行失去控制,所產生的能量和輻射會破壞附近的設備和裝置,以及使缺乏屏蔽的人員受到意外的傷害。因此,對於任何可能形成加濃鈾和水的均勻混合系統的容器或場所,都要特別注意避免臨界事故的產生。

避免臨界事故產生的方法之一(也是最基本的方法)是控制可能進入容器的 U^{235} 的質量。原來,對於形狀、大小和周圍反射情況固定的容器,以及加濃度一定的鈾,存在着一個 U^{235} 的最小臨界質量 M_c^1 。當容器中的 U^{235} 質量小於 M_c^1 時,不管其中存在多少水,都不可能達到臨界。只有當 U^{235} 量等於 M_c^1 ,而且水鈾的混合比(主要起作用的是氫原子數和 U^{235} 原子數之比 N_H/N_S)最適當時,容器中才能產生自持鏈式反應。因此,只要能確保進入容器的 U^{235} 質量小於相應的最小臨界質量 M_c^1 ,臨界事故的發生便可避免。不過,由於 M_c^1 的實驗值只能在一定誤差範圍內決定,同時考慮到實際可能出現的錯誤操作,所以一般規定可以安全地放入某一容器的安全質量 M_s^1 ,等於 M_c^1 除以某一大于 1 的安全因子 s ,即

$$M_s^1 = \frac{1}{s} M_c^1. \quad (1)$$

安全因子 s 之值的具體選取隨所碰到的條件不同而異。當不存在錯誤操作(例如,將兩份裂变物質投入同一容器)的可能性時, s 只需比 1 大百分之几十(一般取為 1.3)就夠了。可是,如果存在錯誤操作(例如投入雙份裂变物質)的可能性, s 就需要大于 2 了(例如,取為 2.3)。

表 1 中列出了帶有全水反射層的球形 UO_2F_2 水溶液系統的最小臨界質量的實驗值 M_c^1 ,作為鈾加濃度 C_s 的函數^[1]。由於缺乏相應臨界體積 V_c 的實驗值,我們將假定:最小臨界質量出現在氫原子與 U^{235} 原子數之比 $\frac{N_H}{N_S} = 475$ 左右,和加濃度 C_s 的關係不大(詳細的理論計算結果表明,當 C_s 從 100% 降到 2% 時,最小臨界質量系統的 $\frac{N_H}{N_S}$ 值約從 450 上升到 500 左右)。

與此相應,每單位體積中 U^{235} 的質量為 $\frac{M_c^1}{V_c} = 55 \times 10^{-3}$ 千克/升左右(從 58×10^{-3} 降到 52×10^{-3} 千克/升)。表 1 中所列的 V_c 值,便是從 M_c^1 的實驗值和內插的 $\frac{M_c^1}{V_c}$ 值算出的

(由於 $\frac{M_c^1}{V_c}$ 值隨 C_s 變化不大,可用綫性內插)。

從 V_c 可以按下式算出相應系統的幾何參數 B_0^1 :

$$B_0^2 = \left(\frac{\pi}{R_c + \Delta_0} \right)^2, \quad R_c = \left(\frac{3V_c}{4\pi} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

式中

$$\Delta_0 = 6 \text{ 厘米} \quad (3)$$

是全水反射层的有效增厚; R_c 为与 V_c 相应的临界半径。

表1 带全水反射层的球形 UO_2F_2 水溶液系统的最小临界质量和有关的其它参数

C_s , %	2	5	10	20	50	93.5
M_c^3 , 千克	5.15	1.85	1.32	1.07	0.885	0.805
V_c , 升	98.7	35.5	25.1	20.1	15.9	13.9
$B_0^2 \times 10^3 \text{ 厘米}^{-2}$	0.819	1.42	1.69	1.88	2.11	2.26
k_0	1.268	1.465	1.553	1.615	1.691	1.739

表1中最后一列 k_0 , 是最小临界质量系统的增殖系数。它是通过单群理论模型中的临界条件[见下节中(9)式]由几何参数 B_0^2 和中子在系统中的徙动面积 M_0^2 定出的:

$$k_0 = 1 + B_0^2 M_0^2. \quad (4)$$

徙动面积 M_0^2 由慢化面积 τ_0 和扩散面积 L_0^2 合成: $M_0^2 = \tau_0 + L_0^2$ 。慢化面积几乎完全由水决定。我们取 $\tau_0 = 31.4 \text{ 厘米}^2$ 。扩散面积由下式给出:

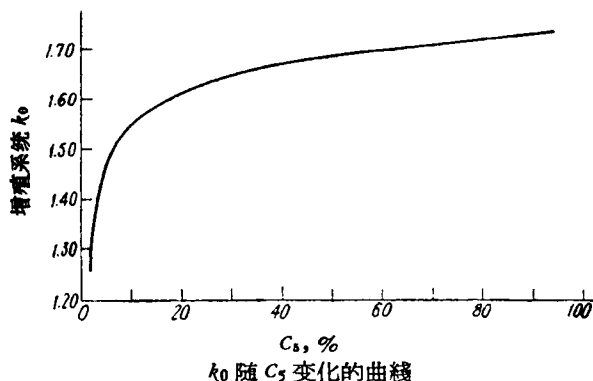
$$L_0^2 = L_s^2 \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{s5} + \frac{1-C_s}{C_s} \sigma_{s8}}{\frac{N_H}{N_s} \times \frac{1}{2} \sigma_{a8}}} = \frac{7.40}{69.4 + \frac{1-C_s}{C_s} \times 2.75}, \quad (5)$$

$$1 + \frac{\frac{N_H}{N_s} \times \frac{1}{2} \sigma_{a8}}{\frac{N_H}{N_s} \times 0.332}$$

式中 σ_{s5} , σ_{s8} 和 σ_{a8} 分别为 U^{235} , U^{238} 和水的吸收截面。实际上, 由于 $L_0^2 \ll \tau_0$, 而且 L_0^2 随 C_s 的变化很小, 所以在计算中, 为简单起见, 可以不管 C_s 是多少, 一律取 $M_0^2 \approx 31.4 + 1.3 = 32.7 \text{ 厘米}^2$ 。

为应用方便起见, 绘出了 k_0 随 C_s 变化的曲线, 如下图所示。另外, 下面再一次给出了 M_0^2 和 $\frac{N_H}{N_s}$ 及 $\frac{M_c^3}{V_c}$ 的内插式:

$$\left. \begin{aligned} M_0^2 &= 32.7 \text{ 厘米}^2, \\ \frac{N_H}{N_s} &= 500 - 53C_s, \\ \frac{M_c^3}{V_c} &= (52 + 6.4C_s) \times 10^{-3} \text{ 千克/升.} \end{aligned} \right\} \quad (I)$$



二、安全質量的簡易估算法

根据(I)式和图 1 中的曲線,利用反应堆理論中的单羣模型,可以簡易地估算出掺有各种杂質的、不同形状和尺寸的鈾水均匀混合系統的最小临界質量 M_c^2 。估算时,我們作如下假定:

(1) 杂質大体上是均匀分布在系統內的。对固体杂質的情形,要求其厚度远小于一个吸收中子的平均自由程,否則便要考慮所謂“自屏”效应;另外,在空間分布上也要大致均匀,否則便要對它的吸收加以不同的“权重”;

(2) 杂質对中子的吸收远小于系統中鈾对中子的吸收。

首先讓我們写出在任一系統中产生自持鏈式反应所必需的、普遍的临界条件:

$$B_{\text{H}}^2 = B_{\text{H}}^2, \quad (6)$$

这里系統的几何参数 B_{H}^2 是由下列边值問題所决定的本征值:

$$\left. \begin{aligned} (\nabla^2 + B^2)\varphi &= 0, \text{ 在系統內;} \\ \varphi &= 0, \text{ 在系統的有效边界处.} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

可見, B_{H}^2 仅由系統的几何形状和尺寸(由于反射层的影响,这里所說尺寸应指有效尺寸,即几何尺寸与反射层增厚 Δ 之和)决定。表 2 列有几种常見几何形状的系統的 B_{H}^2 值。

表 2 B_{H}^2 和几何形状及尺寸的关系

几何形状	球 体 (半 径 R)	圓 柱 体 (半 径 R , 高 H)	长 方 体 (边 长 a, b, c)
B_{H}^2	$\left(\frac{2.405}{R + \Delta}\right)^2$	$\left(\frac{2.405}{R + \Delta}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H + 2\Delta}\right)^2$	$\left(\frac{\pi}{a + 2\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b + 2\Delta}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c + 2\Delta}\right)^2$

材料参数 B_{H}^2 由系統中所含材料的核性能和密度决定。在单羣中子理論中有

$$B_{\text{H}}^2 = \frac{k - 1}{M^2}, \quad (8)$$

式中 k 是系統的增殖系数; M^2 是中子在系統中的徙动面积。将(8)式和(6)式結合,可写出临界状态下系統的 B_{H}^2 和 k, M^2 的关系:

$$B_{\text{H}}^2 = \frac{k - 1}{M^2}, \text{ 或 } k = 1 + B_{\text{H}}^2 M^2. \quad (9)$$

下面計算給定系統的 k 和 M^2 : 在鈾水均匀系統中对增殖系数 k 的影响,一般是由引入系統中的对中子有吸收本領的材料,象由于种种目的而引入的鋼、鉄、銅、鎳或其它材料等。設平均每单位体积的水溶液混有 v_i 体积的第 i 种材料,考慮到我們上面所作的假設(1),系統的增殖因素便很容易估算出来:

$$k = k_0 \frac{1}{1 + \sum_i q_i}, \quad (10)$$

式中 k_0 是系統不含杂質时所具有的增殖系数; q_i 是第 i 种材料对中子的吸收与水溶液对中子的吸收之比(見图 1):

$$q_i = \frac{v_i N_i \sigma_{ai}}{N_{\text{H}} \cdot \frac{1}{2} \sigma_{a\text{H}} + N_{\text{S}} \sigma_{a\text{S}} + N_{\text{O}} \sigma_{a\text{O}}}, \quad (11)$$

这里 σ_{ai} 是第 i 种材料的核吸收截面; N_i 是第 i 种材料单独存在的正常状态下每单位体积中的原子核数; $N_{\text{H}}, N_{\text{S}}, N_{\text{O}}$ 却是給定系統水溶液每单位体积中 $\text{H}, \text{U}^{235}, \text{U}^{238}$ 的原子数。

加入材料对铀水系统中徙动面积 M^2 的影响有二项:

一项是对慢化面积 τ 的影响。由于所加入材料的慢化能力比起水来几乎都可以略去不计,所以加入后就等于减小了水溶液的“假密度”(从中子的慢化来说,等于在水溶液中引进了许多空隙),从而使慢化面积变大:

$$\tau \simeq \tau_0 \left(1 + 2 \sum_i v_i \right)^{1),} \quad (12)$$

$\tau_0 = 31.4$ 厘米²。

另一项影响是对扩散面积 L^2 的。吸收强的材料使 L^2 变小,而吸收弱(和铀水溶液相比,如铝)的材料则使 L^2 变大。一般有

$$L^2 \simeq L_0^2 \frac{1 + \sum_i v_i}{1 + \sum_i q_i}, \quad (13)$$

上式的分子是 $1 + \sum_i v_i$, 而不是 $1 + 2 \sum_i v_i$, 因为加入的材料的散射平均自由程和铀水溶液的相差不多,所以从热中子散射来看,不能当作空隙。

实际上,由于 $L^2 \ll \tau$, 所以修正(13)式并不重要。为简便起见,我们直接用下列公式:

$$M^2 \simeq M_0^2 \left(1 + 2 \sum_i v_i \right) = 32.7 \left(1 + 2 \sum_i v_i \right) \text{厘米}^2 \quad (14)$$

来估算各种材料加入后铀水系统的徙动面积。这样,虽然对 L^2 的估计偏高了(特别是对吸收强的材料),但考虑到 L^2 在 M^2 中只占百分之几,而且 L^2 的偏高还被 τ 的偏低(由于略去“大炮效应”)所抵消,所以直接应用(14)式来估算 M^2 还是可以的。

从(10)和(14)式得出所考虑的铀水系统的 k 和 M^2 后,再由(9)式定出 B_0^2 就可以通过表 2 中所列关系式定出对于给定几何形状的系统临界尺寸了。设 V_c 是从临界尺寸算出的、铀水溶液的临界体积。由于我们的计算是从相应于最小临界质量的比值 $\frac{M_c^2}{V_c}$ 出发的,所以这样定出的临界尺寸应当和系统的最小临界质量相应,至少在外加材料对吸收和慢化的贡献远小于铀和水的贡献时(当 $\sum_i q_i \ll 1$, $\sum_i v_i \ll 1$ 时)是这样的[见假设(1),(2)]。通常这个条件是可以满足的。于是,系统的最小临界质量可以马上按下式定出:

$$M_c^2 = \frac{M_c^2}{V_c} V_c. \quad (15)$$

在决定 V_c 的时候,虽然系统不一定带有全水反射层,但若系统周围有可能浸水或出现含氢介质(包括人体),那末为了安全起见,还应当把表 2 所列各个关系式中的 Δ 取为 $\Delta_0 = 6$ 厘米。实际上,即使系统周围根本不可能出现全水反射层的情况,我们也仍将 Δ 取为 $\Delta_0 = 6$ 厘米来进行计算(因为所根据表 1 中的数据都是带全水反射层的),但在取安全因子时却可根据具体情况减小一些。

总结起来,以上估算方法的精神是:

(1) 利用带全水反射层的球形铀水系统的最小临界质量和 $\frac{N_H}{N_S}$ 的已知数据来消去单群理论中临界条件的误差;

1) 略去了使 τ 更大的“大炮效应”(参看文献[2])。

(2) 改变 k , M^2 来計及雜質的影响;

(3) 从临界 B_{lc}^2 之值, 通过不同关系式来算出不同几何形状的鈾水系統的临界尺寸, 从而算出它的最小临界質量值。

这三条中, 前二条是从实验数据和反应堆理論的基本观念出发的, 第三条則是在文献[3]中得到过实验验证的。因此都是比較可靠的。

三、实 例

例 1: 求一带全水反射层的圆柱形容器 ($R = 12.7$ 厘米) 中 UO_2F_2 水溶液的最小临界質量 M_c^3 (設 $C_s = 0.90$)。

此例中沒有外加的吸收物質, 因此只需考虑几何效应。从图 1 及 (I) 式可知, 相应于 $C_s = 0.90$, 对最小临界質量的鈾水系統有

$$k_0 = 1.735, M_0^2 = 32.7 \text{ 厘米}^2, \frac{M_c^3}{V_c} = 57.8 \times 10^{-3} \text{ 千克/升}.$$

由 k_0 及 M_0^2 得系統在临界时的

$$B_{lc}^2 = \frac{1.735 - 1}{32.7} = 2.245 \times 10^{-2} \text{ 厘米}^{-2}.$$

于是由表 2 中的相应关系式 ($R = 12.7$ 厘米, $\Delta = 6$ 厘米)

$$\left(\frac{2.405}{18.7}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H + 12}\right)^2 = 2.245 \times 10^{-2},$$

給出系統的临界高度 $H_c = 28.8$ 厘米, 及其相应的临界体积为

$$V_c = \pi R^2 H_c = 14.6 \text{ 升},$$

而最小临界質量为

$$M_c^3 = 57.8 \times 10^{-3} \times 14.6 = 0.845 \text{ 千克}.$$

这結果和文献[3]中图 1 的相应結果是相符的。

例 2: 設有只可能带部分水反射层的圆柱形容器, 其直径为 50 厘米, 其中有不銹鋼質的攪拌器和支架等物, 折合到圆柱每单位高度 (厘米) 上有鋼 100 厘米³。后者成分的百分比 (按体积算) 为: Fe——70%, Cr——18%, Ni——10%, Mn——2%。若鋼的分布满足均匀化条件, 求此容器中可以用水溶液形式处理的、加浓度为 50% 的 U^{235} 量。

先求最小临界質量 (仍按全水反射层計算)。从图 1 及 (I) 式可知, $C_s = 50\%$ 时,

$$k_0 = 1.691, M_0^2 = 32.7 \text{ 厘米}^2, \frac{M_c^3}{V_c} = 55.2 \times 10^{-3} \text{ 千克/升}, \frac{N_H}{N_s} = 474.$$

从所給数据可知, 掺杂在每立方厘米溶液中的各种物質的体积为 (单位为厘米³):

$$v_{Fe} = 3.75 \times 10^{-2}, v_{Cr} = 0.96 \times 10^{-2}, v_{Ni} = 0.54 \times 10^{-2}, v_{Mn} = 0.1 \times 10^{-2}.$$

利用 $N_{Fe} \sigma_{aFe} = 0.215$, $N_{Cr} \sigma_{aCr} = 0.238$, $N_{Ni} \sigma_{aNi} = 0.420$, $N_{Mn} \sigma_{aMn} = 1.04$ 及 $\frac{N_H}{2} \sigma_{sk} = 0.0222$ (以上各数据的单位均为厘米⁻¹) 等数据, 由公式 (11), (10) 及 (14) 可求得 k 和 M^2 :

$$k = 1.691 \times \frac{1}{1 + 0.131} = 1.495,$$

$$M^2 = 32.7 \times 1.107 = 36.2 \text{ 厘米}^2,$$

所以

$$B_{lc}^2 = \frac{0.495}{36.2} = 1.366 \times 10^{-2} \text{ 厘米}^{-2}.$$

而临界高度

$$H_c = \frac{10\pi}{0.875} - 12 = 35.9 - 12 = 23.9 \text{ 厘米};$$

临界体积为

$$\pi R^2 H_c = 47 \text{ 升}, \quad V_c = 47 \times \frac{1}{1.053} \text{ 升};$$

最小临界质量为

$$M_c^s = 55.2 \times 10^{-3} \times 47 \times \frac{1}{1.053} = 2.47 \text{ 千克}.$$

由于上述计算是对全水反射层情况作的, 而按所给条件, 容器只可能带部分水反射层, 所以可取较小的安全因子, 例如取 $s = 1.1$, 则安全质量为

$$M_s^s = \frac{2.47}{1.1} = 2.24 \text{ 千克}.$$

合铀的总质量为 4.48 千克.

参 考 文 献

- [1] Nuclear Safety Guide, TID-7016 (1961).
- [2] A. Д. 加拉宁, 热中子核反应堆理论, 第 112 页, 科学出版社, 1958 年.
- [3] A. D. Callihan, W. Morfitt and J. T. Thomas, Proc. 1st Inter. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1955, P/843, vol. 5, p. 145.

(编辑部收稿日期 1964 年 8 月 21 日)

