

核燃料与核材料作业

课程作业

1. 第一次作业

估算一个百万千瓦的压水反应堆每年需要的核燃料质量 (UO_2 , 假设其中 ^{235}U 丰度 5%, 乏燃料中 ^{235}U 丰度 1%):

考虑一年发电量为 $3.1536 \cdot 10^{16} \text{ J}$, 取热效率 33%, 需要能量 $9.56 \cdot 10^{16} \text{ J}$.

假设每次 ^{235}U 裂变释放能量约 $E_f = 200 \text{ MeV}$. 将其换算为焦耳:

$$E = 200 \times 10^6 \times 1.602 \cdot 10^{-19} = 3.204 \cdot 10^{-11} \text{ J} \quad (1)$$

则一年内需要的裂变次数为 $N \approx 2.98 \cdot 10^{27}$.

单个 ^{235}U 原子质量约为 $3.90 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$.

因此一年裂变掉的 ^{235}U 质量为 1.16t.

题设给出新燃料中 ^{235}U 丰度为 5%, 乏燃料中为 1%, 即需要的质量为 $\frac{1.16\text{t}}{0.04} \approx 29.0\text{t}$.

最终换成 UO_2 的摩尔质量:

$$M = 1.134M_U \approx 33.0\text{t} \quad (2)$$

2. 第二次作业

2.1. 1

已知六氟化铀在空气中与水蒸气发生水解反应:



若产物完全为无水 UO_2F_2 , 则固体质量为: $m = 2.84 \times 308 \approx 875 \text{ g}$

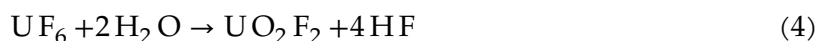
但是题目中说明六氟化铀暴露在空气中缓慢和水蒸气反应, 所得固体产物往往会吸附水分, 也可能形成不同水合程度的固体, 因此其组成不是唯一确定的.

若按无水产物计, 其理论质量约为 875g.

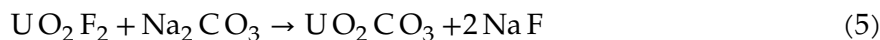
若将固体产物加热到, 认为其中的吸附水和结晶水基本除去, 最终剩余固体近似为无水 UO_2F_2 , 剩余固体质量为 875g.

2.2. 2

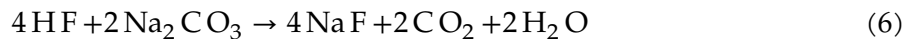
先发生水解反应:



其中生成的 UO_2F_2 还要继续与碳酸钠反应:



同时 HF 被碳酸钠中和:



因而总反应可写为



若题设 UF_6 质量为 500 g, 则 $n_{\text{UF}_6} = \frac{500}{352} \approx 1.42 \text{ mol}$

所需碳酸钠的物质的量为

$$n_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 3n_{\text{UF}_6} \approx 4.26 \text{ mol} \quad (8)$$

故至少需要 $m = 4.26 \times 106 \approx 452 \text{ g}$

所以至少需要 452 g 的 Na_2CO_3 .

3. 第三次作业

对于扩散膜, 为保证孔内气体流动属于分子流, 需要满足克努森数判据 $K_n = \frac{\lambda}{L} > 10$

因此膜孔的最大等效孔径应满足 $L < \frac{\lambda}{10}$

其中分子的平均自由程为 $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$

对理想气体, 有 $n = \frac{P}{k_B T}$

故可得 $\lambda = k_B \frac{T}{\sqrt{2}\pi d^2 P}$

下面取室温 $T = 298\text{K}$, 膜前压强为 100 mmHg.

3.1. 分离铀同位素时的最大孔径 L_0

分离铀同位素时, 考虑气体为 UF_6 .

查得 UF_6 的等效分子直径可取 $d_{\text{UF}_6} \approx 5.5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

于是其平均自由程为

$$\lambda_{\text{UF}_6} = k_B \frac{T}{\sqrt{2}\pi d^2 P} \quad (9)$$

即 $\lambda_{\text{UF}_6} \approx 0.23 \mu\text{m}$

为了保证 $K_n > 10$, 最大孔径应满足

$$L_0 = \frac{\lambda_{\text{UF}_6}}{10} \approx 2.3 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 23 \text{ nm} \quad (10)$$

3.2. 以氢气为介质分离时的孔径 L

若采用氢气作为介质, 则取氢气分子直径为 $d_{\text{H}_2} \approx 2.89 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

即 $\lambda_{\text{H}_2} \approx 0.832 \mu\text{m}$

因此相应的最大孔径为

$$L = \frac{\lambda_{\text{H}_2}}{10} \approx 8.3 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 83 \text{ nm} \quad (11)$$

4. 第四次作业

4.1. 2

已知转子半径 $a = 0.06 \text{ m}$, 高度 $h = 0.48 \text{ m}$, 侧壁线速度 $v = 600 \text{ m s}^{-1}$, 侧壁压强 $p(a) = 100 \text{ Torr} = 13300 \text{ Pa}$, 温度 $T = 300 \text{ K}$.

取工作气体为 UF_6 , 其摩尔质量为 $M = 0.352 \text{ kg mol}^{-1}$

角速度为 $\omega = \frac{v}{a} = \frac{600}{0.06} = 1.0 \cdot 10^4 \text{ rad s}^{-1}$

气体在径向平衡时满足 $\nabla \cdot \left(\frac{p}{r}\right) = \rho \omega^2 r$

又因为理想气体有 $\rho = \frac{Mp}{RT}$

所以 $\frac{dp}{p} = \left(M \frac{\omega^2}{RT}\right) r dr$

由此积分得压强分布 $p(r) = p(a) \exp\left[-M\omega^2 \frac{a^2 - r^2}{2RT}\right]$

离心机内部总滞留量按物质的量计算为 $n = \int_V \frac{p}{RT} dV$

采用圆柱坐标 $dV = 2\pi r h dr$, 则 $n = \frac{2\pi h}{RT} \int_0^a p(r) r dr$

代入上式并积分可得

$$n = \frac{2\pi h p(a)}{M\omega^2} \left[1 - \exp\left(-M\omega^2 \frac{a^2}{2RT}\right) \right] \quad (12)$$

先计算指数项:

$$M\omega^2 \frac{a^2}{2RT} = 0.352 \times (10^4)^2 \times \frac{(0.06)^2}{2 \times 8.314 \times 300} \approx 25.4 \quad (13)$$

因而 $\exp(-25.4) \ll 1$, 可近似取 $n \approx \frac{2\pi h p(a)}{M\omega^2}$

代入数值:

$$n \approx \frac{2\pi \times 0.48 \times 13300}{0.352 \times 10^8} \approx 1.14 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \quad (14)$$

若换算成质量, 则

$$m = nM \approx 1.14 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \times 352 \text{ g mol}^{-1} \approx 0.40 \text{ g} \quad (15)$$

故离心机内部滞留量约为 $1.14 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$, 对应 UF_6 质量约为 0.40 g .

4.2. 3

离心机直径并不是做得越大越好.

离心分离的关键因素主要是转子的圆周速度 $v = \omega r$. 在材料强度一定时, 转子所允许的最大应力有限, 因而允许的圆周速度也有限. 这说明即使继续增大直径, 也不能无限提高分离能力.

同时, 直径过大还会带来一些工程上的问题, 例如:

1. 转子质量增大, 启动和维持高速旋转更加困难.
2. 振动和临界转速问题更加突出, 机械稳定性变差.
3. 制造精度要求更高, 成本上升.
4. 内部滞留量增加, 调节和控制不够灵活.

因此, 离心机直径需要在分离性能, 材料强度, 机械稳定性和制造成本之间进行折中优化, 而不是越大越好.

4.3. 4

题图所示轴向环流中, 靠近转轴处气流向上, 靠近侧壁处气流向下.

在气体离心机中, 重组分趋向于靠近侧壁, 轻组分趋向于靠近转轴. 因而图中的环流会把靠近转轴的轻组分带向上端, 而把靠近侧壁的重组分带向下端.

所以上端应为精料端, 下端应为贫料端.

故答案为: A, 上端.

5. 第五次作业

5.1. 1

已知供料丰度 $x_f = 0.711\% = 0.00711$, 产品丰度 $x_p = 5\% = 0.05$, 贫料丰度 $x_w = 0.2\% = 0.002$, 供料流量为 1000 t a^{-1} 的 UF_6 .

分离功与物料衡算均应按金属铀质量计, 因此先将六氟化铀流量折算为金属铀流量: $F = 1000 \times \frac{238}{352} \approx 676.2 \text{ t a}^{-1}$

这里 F 表示以金属铀计的供料流量.

物料平衡与 ^{235}U 平衡为

$$\begin{aligned} F &= P + W \\ Fx_f &= Px_p + Wx_w \end{aligned} \quad (16)$$

故产品流量与贫料流量分别为

$$P = F \frac{x_f - x_w}{x_p - x_w} \quad (17)$$

$$W = F - P$$

代入数值得

$$P = 676.2 \times \frac{0.00711 - 0.002}{0.05 - 0.002} \approx 71.99 \text{ t a}^{-1} \quad (18)$$

$$W = 676.2 - 71.99 = 604.21 \text{ t a}^{-1}$$

分离功采用价值函数 $V(x) = (1 - 2x) \ln\left(\frac{1-x}{x}\right)$

并有 $S = PV(x_p) + WV(x_w) - FV(x_f)$

计算得

$$V(0.05) \approx 2.650$$

$$V(0.002) \approx 6.188 \quad (19)$$

$$V(0.00711) \approx 4.869$$

于是

$$\begin{aligned} S &\approx 71.99 \times 2.650 + 604.21 \times 6.188 - 676.2 \times 4.869 \\ &\approx 637.13 \end{aligned} \quad (20)$$

故该厂的分离功率约为 637 tSWU/a.

5.2. 2

设级联分离功能力为 $S = 5.0 \times 10^5$

其中 S 的单位取 kgSWU/a, 即 500 tSWU/a.

仍取天然铀供料, 即 $x_f = 0.00711$, 贫料丰度 $x_w = 0.002$. 若产品丰度为 x_p , 则单位产品所需分离功为

$$s(x_p) = V(x_p) + \left(\frac{x_p - x_f}{x_f - x_w}\right)V(x_w) - \left(\frac{x_p - x_w}{x_f - x_w}\right)V(x_f) \quad (21)$$

于是每年产品质量为 $P(x_p) = \frac{S}{s(x_p)}$

这里 P 以金属铀计. 当 S 取 kgSWU/a, $s(x_p)$ 取 kgSWU/kgU 时, P 的单位为 kgU/a.

下面给出若干典型丰度下的结果:

产品丰度	单位产品分离功 $s(x_p)$ / kgSWU/kgU	产品质量 P / tU/a
3%	4.306	116.10

产品丰度	单位产品分离功 $s(x_p)$ / kgSWU/kgU	产品质量 P / tU/a
4%	6.544	76.41
5%	8.851	56.49
6%	11.203	44.63

可见,随产品丰度升高,单位产品所需分离功增大,因而在级联总分离功固定时,产品质量单调下降.

因此其变化曲线可写为 $P(x_p) = \frac{S}{s(x_p)}$

5.3. 3

按最近公开数据,我国运行核电装机约为 63.73 GWe.

IAEA PRIS 显示,中国在建核电机组共 35 台,在建总净装机容量为 37.686 GWe.

故总装机容量可近似取为 101.416 GWe.

现取核燃料产品丰度 $x_p = 4\% = 0.04$, 贫料丰度 $x_w = 0.002$, 天然铀供料丰度 $x_f = 0.00711$.

对于 1 kg 金属铀产品,其供料需求为

$$\frac{F}{P} = \frac{x_p - x_w}{x_f - x_w} = \frac{0.04 - 0.002}{0.00711 - 0.002} \approx 7.436 \quad (22)$$

其单位产品分离功为

$$s = V(0.04) + \left(\frac{0.04 - 0.00711}{0.00711 - 0.002} \right) V(0.002) - \left(\frac{0.04 - 0.002}{0.00711 - 0.002} \right) V(0.00711) \quad (23)$$

即 $s \approx 6.544$

这里 s 的单位为 kgSWU/kgU.

下面估算 1 GWe 核电机组每年所需低浓铀产品量. 取热效率约 33%, 则 1 GWe 对应热功率约 3.03 GWth. 若取典型卸料燃耗约 45 GWd/tU, 则每年需要产品量约为

$$P_1 = \frac{3.03 \times 365}{45} \approx 24.58 \quad (24)$$

这里 P_1 的单位为 tU/(GWe*a).

因此,对应我国当前运行在建总装机的年分离功需求约为

$$S_{\text{tot}} = 101.416 \times 160.84 \approx 1.63 \times 10^4 \quad (25)$$

即年分离功需求约为 1.63e4 tSWU/a.