

反应堆热工水力:

一、反应堆热源及分布:

1. 裂变的分配: {
 (瞬发): 裂变碎片动能、裂变中子动能、瞬发 γ 射线的。
 (缓发): 裂变产物 β 、 γ 衰变的
 过剩中子: (n, γ) 反应。

2. 堆芯功率分布:

① 单位体积释热率 $q_V = F_a E_f N \sigma_f \Phi$ (MeV/cm³·s) $\frac{1}{G(R_f)}$

② 堆芯内 ϕ 分布/功率分布: $\phi(r, z) = \phi(0, 0) J_0 \left(\frac{2.405 r}{R_e} \right) \cos \left(\frac{\pi z}{Z_e} \right)$
 经向: J_0
 轴向: $\cos$
 $R_e = R + aR$ $Z_e = Z + aZ$ 均匀圆柱裸堆
 $q_V(r, z) = q_{Vmax} J_0 \left(\frac{2.405 r}{R_e} \right) \cos \left(\frac{\pi z}{Z_e} \right)$
 $\downarrow$
 $n \times \phi_{0,0}$ 计算的 q_V .

③ 影响功率分布的因素:

- i) 燃料装载 (均匀/分区装载)
- ii) 控制棒 (展平径向功率, 不利于展平轴向功率)
- iii) 水隙及空泡
- iv) 结构及材料
- v) 反射层 vi) 燃料自屏蔽效应.

④ 单根燃料棒释热: $q_m(r) = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} q_V(r, z) A_u dz = \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} A_u q_{V0}(r) \cos \left(\frac{\pi z}{H_e} \right) dz$
 $= q_{V0}(r) \frac{2A_u H_e}{\pi} \sin \left(\frac{\pi H}{2H_e} \right)$
 $\rightarrow$ 只是 r 的函数: 仅与在堆芯中位置有关.

⑤ 堆芯其他部分释热:

- i) 控制棒: 吸收堆芯 γ 射线 + 材料发生 (n, α) 和 (n, γ) 反应.
- ii) 慢化剂: 吸收慢化中子的量 + 吸收裂变产物放出 β 射线、 γ 射线.
- iii) 堆芯结构材料: 堆内 + 堆外 吸收 γ 射线、与中子相互作用.

二. 反应堆传热计算(稳态):

1. 导热: 常物性导热微分方程: $\nabla^2 T + \frac{q_v}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$

2. 单相对流传热:

① 单相强迫对流:

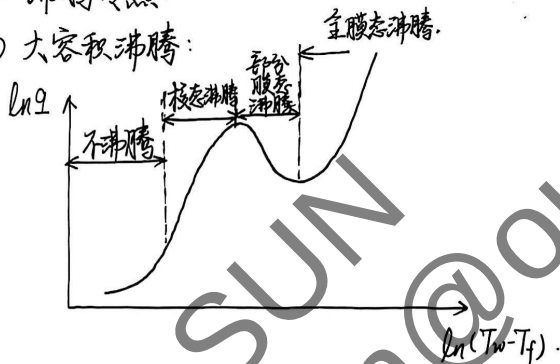


- i) 圆管内湍流: (D-B公式) $Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr^n = \frac{hd}{\lambda}$
- ii) 水纵向流过平行棒束: $Nu_f = C Re_f^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}}$ $\left\{ \begin{array}{l} 1.1 \leq \frac{P}{D} \leq 1.3: \\ C = 0.042 \frac{P}{D} - 0.024. \end{array} \right.$
- iii) 层流传热: $\left\{ \begin{array}{l} \text{恒热流: } Nu_f = 4.364; \\ \text{恒壁温: } Nu_f = 3.657; \\ \text{自然对流: } Nu_f = 0.15 Re_f^{0.33} Pr_f^{0.43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25} Gr^{-0.1} \end{array} \right.$

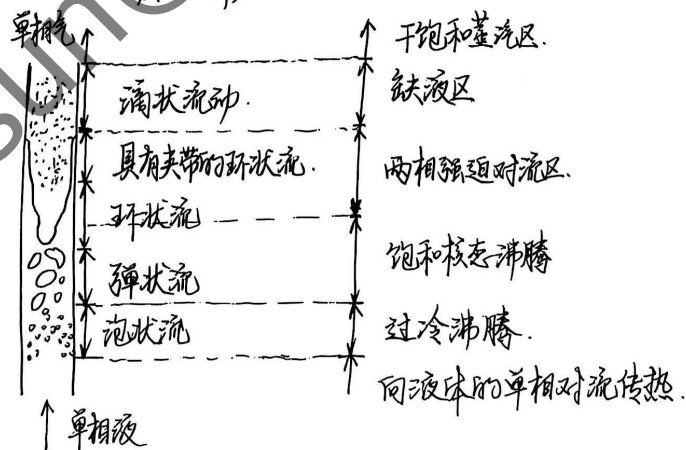
② 自然对流传热: $Nu = C(GrPr)^n$
 $\rightarrow$ 定性 $T_m = \frac{T_m + T_f}{2}$

3. 沸腾传热:

① 大容积沸腾:



② 流动沸腾:

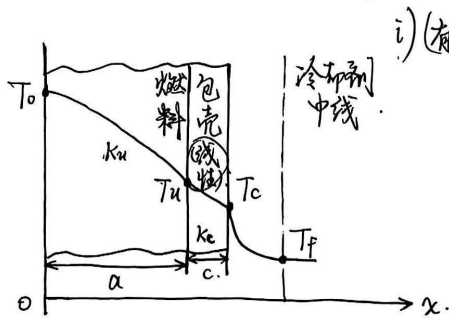


4. 燃料元件径向传热计算:

① 板状燃料元件传热:

i) 厚度远小于高度和长度 $\Rightarrow$ 一维导热问题.

假设 {
ii) 芯块内 q_V 不变
iii) 包壳和冷却剂不释热



i) (有内热源稳态): $\nabla^2 T + \frac{q_V}{k_u} = 0$

$$\Rightarrow \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{q_V}{k_u} = 0$$

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = 0$$

$$T \Big|_{x=0} = T_0$$

$$\Rightarrow T(x) = T_0 - \frac{q_V}{2k_u} x^2 \quad \rightarrow \text{燃料元件内温度分布}$$

$$\Rightarrow \text{芯块两侧释热量: } Q' = 2k_u A \frac{T_0 - T_u}{a};$$

燃料芯块能量守恒关系:

$$Q = q_V \pi r^2 dl = q_V 2\pi r dl = q_l dl$$

$$Q' = 2Q \text{ (单侧)}$$

ii) (无内热源稳态) $\nabla^2 T = 0 \Rightarrow \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (a \leq x \leq a+c)$

$$T \Big|_{x=a} = T_u$$

$$T \Big|_{x=a+c} = T_c$$

包壳内温度分布

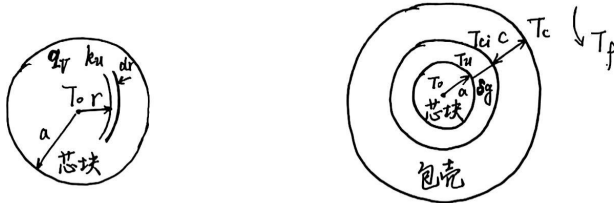
$$\Rightarrow T(x) = T_u - \frac{x-a}{c} (T_u - T_c)$$

$$\Rightarrow \text{包壳两侧释热量 } Q' = \frac{T_u - T_c}{\frac{a}{k_u A} + \frac{c}{k_c A}};$$

iii) (燃料元件对冷却剂释热): $T_c - T_f = \frac{Q}{hA}$

⑤ 棒状燃料元件传热计算:

- 假设:
- i) 半径 $\ll$ 高度 $\Rightarrow$ 一维导热问题.
 - ii) 忽略中子通量的自屏效应和周向分布不均匀性.
 - iii) 包壳气隙和冷却剂不释热 + 常物性假设.



i) 芯块内:
$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{q_v}{k_u} = 0 \\ \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=0} = 0 \\ T|_{r=0} = T_0 \end{cases} \Rightarrow \boxed{T(r) = T_0 - \frac{q_v}{4k_u} r^2} \quad (0 \leq r \leq a)$$

$$\Rightarrow \underline{q_l = \frac{\Delta Q}{\Delta x} = 4\pi k_u (T_0 - T_u)}$$

ii) 气隙内:
$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \\ T|_{r=a} = T_u \\ T|_{r=a+cg} = T_{ci} \end{cases} \Rightarrow \boxed{T(r) = T_u - \frac{T_u - T_{ci}}{\ln(1 + \frac{cg}{a})} \ln\left(\frac{r}{a}\right)} \quad (a \leq r \leq a+cg)$$

iii) 包壳内: (与气隙同理)
$$\Rightarrow \boxed{T(r) = T_{ci} - \frac{T_{ci} - T_c}{\ln(1 + \frac{c}{a+cg})} \ln\left(\frac{r}{a+cg}\right)}$$

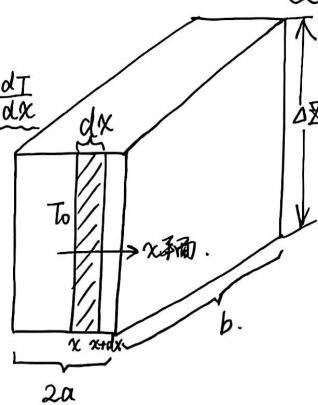
iv) 包壳外表面对冷却剂传热:

$$q_l = \frac{T_0 - T_f}{\frac{1}{4\pi k_u} + \frac{\ln(D_o/D_u)}{2\pi k_g} + \frac{\ln(D_o/D_{ci})}{2\pi k_c} + \frac{1}{\pi D_o h}}$$

如5. 积分热导率: 考虑 k_u 随温度的变化 $\Rightarrow$ 简化计算: $\int k_u(T) dT$ — T 关系, 查找 k_u 值
(k_u 对 T 呈非线性). (由 $q, T_1 \Rightarrow T_2$)

① 平板形燃料芯块:

x 平面导出的热量:

$$\begin{cases} \text{傅里叶定律: } Q_1 = -k_u A \frac{dT}{dx} = -k_u b \Delta x \frac{dT}{dx} \\ \text{释热率: } Q_2 = q_v b \Delta x \cdot x \\ \text{能量守恒: } -k_u dT = q_v x dx \end{cases}$$


$$\Rightarrow \int_{T_0}^{T(x)} -k_u dT = \int_0^x q_v x dx = \frac{q_v}{2} x^2$$

$q_v = \frac{q_l}{2ab}$
 $x = a$ 时 $\Rightarrow \int_{T_0}^{T_u} -k_u dT = \int_{T_u}^{T_0} k_u dT = \int_0^{T_0} k_u dT - \int_0^{T_u} k_u dT = \left(\frac{\alpha}{4b} q_l \right) \text{ (W/m)}$

② 圆柱形芯块:

$$Q = -k_u \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi r \Delta x = q_v \pi r^2 \Delta x$$

$$\Rightarrow \int_0^{T_0} k_u dT - \int_0^{T_u} k_u dT = \left(\frac{q_l}{4\pi} \right)$$



6. 间隙热阻的计算: $\left\{ \begin{array}{l} \text{模型法} / \text{气隙导热模型 (低燃耗下芯块无变形或形变小)} \\ \text{接触导热模型 (深燃耗下包壳与芯块相接触)} \end{array} \right.$
 间隙导热经验数值: $h' = 5678 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$.

6. 燃料元件和冷却剂轴向温度分布:

① 冷却剂温度 T_f 轴向分布: $(-\frac{Z}{2} \leq Z \leq \frac{Z}{2})$.

取 dZ 微元段: $MC_p dT_f = q_l(r, Z) dZ = \underline{q_l(r, 0) \cos(\frac{\pi Z}{Z_e}) dZ}$

$$\Rightarrow \text{积分: } \int_{T_{f.in}}^{T_f(Z)} MC_p dT_f = q_l(r, 0) \int_{-\frac{Z}{2}}^{\frac{Z}{2}} \cos(\frac{\pi Z}{Z_e}) dZ$$

$$\Rightarrow T_f(Z) = \left[T_{f.in} + \frac{q_l(r, 0) Z_e}{\pi MC_p} \left(\sin(\frac{\pi Z}{Z_e}) + \sin(\frac{\pi Z}{2Z_e}) \right) \right];$$

一般忽略外推长度 $Z_e \approx Z$;
 $Z = \frac{Z}{2} \Rightarrow T_{f.out}$

② 包壳内外表面温度 T_{ci}, T_{cc} :

由 $T_f(Z)$ 和牛顿冷却公式: $T_{cc} = T_f(Z) + \frac{q_l(r, Z)}{\pi D_c h}$

$q_l(r, 0) \cos(\frac{\pi Z}{Z_e})$

由传热学恒值: $T_{ci} - T_c = \frac{q_l \cdot \ln(D_o/D_i)}{2\pi k_c}$

分布表现为正弦叠加余弦, 受 $T_f(Z)$ 和 $q_l(r, Z)$ 影响, 最高点偏向下游.

③ 芯块表面温度 T_u 和中心温度 T_o :

$$T_u - T_c = \frac{q_l \cdot \ln(D_o/D_u)}{2\pi k_g}$$

$$T_o - T_u = \frac{q_l}{4\pi k_u}$$

* 求温度最高点/极值 $\Rightarrow$ 求导.

8. 热屏蔽冷却: (板状元件推导)

$$q_{v,s}(x) = q_{v,s}(0) \omega e^{-\lambda x}$$

$$\begin{cases} \frac{d^2 T}{dx^2} = -\frac{1}{k_s} q_{v,s}(x) \\ T|_{x=0/L} = T_i/T_o \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T(x) = T_i + (T_o - T_i) \frac{x}{L} + \frac{q_{v,s}(0)}{k_s \lambda^2} \left[(e^{-\lambda x} - 1) \frac{x}{L} - e^{-\lambda x} \right] \\ x_{max} = -\frac{1}{\lambda} \ln \left[(T_i - T_o) \frac{k_s \lambda}{q_{v,s}(0)} + \frac{1 - e^{-\lambda L}}{\lambda L} \right] \end{cases}$$

ω 取解为 $\omega=1$ 时 γ 指数衰减 (中子)

三、反应堆稳态工况水力计算:

- 计算冷却剂流动压降
- 确定自然循环能力
- 分析系统流动不稳定性.

1. 单相流动压降:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \Delta P_f + \Delta P_{el} + \Delta P_c + \Delta P_a.$$

$$\left(f \frac{1}{D_e} \frac{\rho u^2}{2} \right) \left(\int_{z_1}^{z_2} \rho g \sin \theta dz \right) \left(\xi \frac{\rho u^2}{2} \right)$$

$$(f_l = \frac{64}{Re}; f_t = 0.3164 Re^{-0.25}).$$

$$\int_{u_1}^{u_2} \rho u du = G(u_2 - u_1) = G^2(u_2 - u_1)$$

2. 两相流动压降: Φ_L^2 / Φ_{g0}^2 ;

3. 自然循环: $\left\{ \begin{array}{l} \text{闭合回路} \\ \text{重力作用} \\ \text{流体密度差 (hot/cold).} \end{array} \right.$

$\Rightarrow$ 条件: $\left\{ \begin{array}{l} \text{重力场内} \\ \text{热阱在上, 热源在下 (高度差)} \\ \text{流体存在密度差.} \end{array} \right.$

$\Rightarrow$ 循环中断: 回路阻力过大, 冷、热流体密度差太小, 堆芯产生蒸汽, SG二次侧冷却能力太强

$$\textcircled{1} \Rightarrow \frac{\Delta P_{D.N}}{\text{驱动压头}} = \frac{\Delta P_{up}}{\text{上升段阻力}} + \frac{\Delta P_{down}}{\text{下降段阻力}} \Rightarrow \Delta P_e = \Delta P_{D.N} - \Delta P_{up}$$

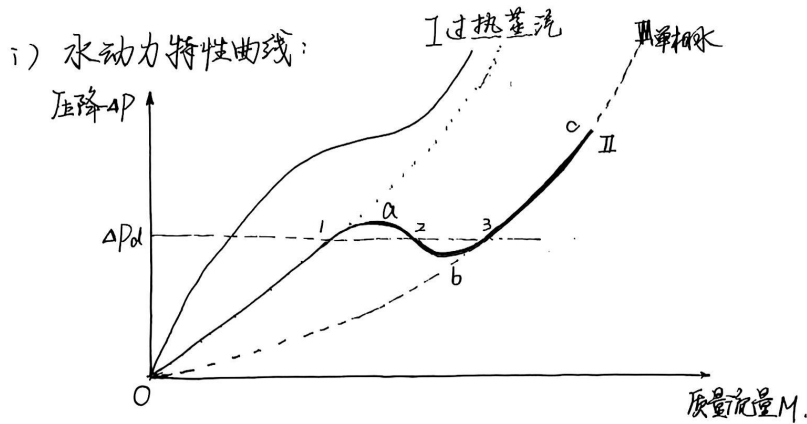
$$-\sum_i \Delta P_{el,i} = \sum_i (\Delta P_f + \Delta P_c)$$

$$\Rightarrow \Delta P_{D.N} = \frac{C_{PR} M^2}{2\rho} \quad (\text{均相流}).$$

② 确定流量: 差分法 + 图解法.

4. 两相流动不稳定性: 恒振幅或变振幅的流动振荡及非周期性流量漂移.

① 流量漂移 (Ledinegg 不稳定性): 受扰动后流量漂移至另一值



考虑一个定热流密度的沸腾通道:

- 单相段: $M \downarrow \Rightarrow \Delta P \downarrow$
- 沸腾段:
 - $M \downarrow \Rightarrow \Delta P \downarrow$
 - 沸腾两相流/膨胀 $\Rightarrow u \uparrow \Rightarrow \Delta P \uparrow$

$\Rightarrow$ 曲线 I: 单相段因素占主导.

$\Rightarrow$ 对于一个驱动压头 ΔP_d , 可能对应 1, 2, 3 多种流量 (II).

$\Rightarrow M_2$ 不稳定, 可能会漂移至稳定值 M_1, M_3 ;

ii) 稳定性准则:

$\frac{\partial(\Delta P_t)}{\partial M} > 0$: 稳定 (oa/bc 段)

$\frac{\partial(\Delta P_t)}{\partial M} < 0$: 不稳定 (ab 段)

一般情况 (存在泵驱动):

- $\frac{\partial(\Delta P_t)}{\partial M} > \frac{\partial(\Delta P_d)}{\partial M}$: 稳定
- $\frac{\partial(\Delta P_t)}{\partial M} < \frac{\partial(\Delta P_d)}{\partial M}$: 不稳定

eg. $M \uparrow$ 时, 驱动压头下降更多, 有利于流体减速, $M \downarrow$ (负反馈).

iii) 防止水动力不稳定性:

避免运行在 $\frac{\partial(\Delta P_t)}{\partial M} < 0$ 区间.

使水动力特性曲线趋于稳定, 消除负斜率区

$\Rightarrow$ 通道进口加装节流件, 增大进口局部阻;

选取合理系统参数 (压力越高, 两相比容差越小, 系统越稳定)

四、堆芯稳态热工分析：

- 任务：设计安全经济可靠的堆芯输热系统。
目的：稳态、变工况、事故工况下确保反应堆安全。

1. 热工设计准则：⇒ (设计堆芯及冷却剂系统时，保证反应堆的安全可靠运行，针对不同堆型预先规定的热工设计必须遵守的要求)

⇒ 压水堆设计准则：
(7条)

- i) 燃料元件芯块内最高温度低于其相应包壳下熔点；
- ii) 燃料元件外表面不允许发生沸腾临界：

$$DNBR = \frac{q_{DNB,c}(\text{设计值})}{q(\text{实际})} \Rightarrow MDNBR$$

(等于1时表面沸腾临界，设计要求大于某定值)
- iii) 堆芯冷却正常，事故时的排除余热；
- iv) 堆芯内无两相流动不稳定性；
- v) 堆芯出口处无整体沸腾；(一般设计取15℃过冷度)
- vi) 一定置信度下，堆芯冷却剂流量介于最小与最大设计值之间；
- vii) 燃料元件包壳的外表面温度低于某限值。

2. 热管因子和热点因子：

表征热工参数不均匀性。

- 核因素： $\frac{\text{名义值}}{\text{平均}} \rightarrow$ 名义最大值，由于工程因素导致偏差。
 工程因素： $\frac{\text{最大值}}{\text{名义值}}$ ；
 热因子： $\frac{\text{最大值}}{\text{平均值}}$ ；
 衡量热工参数最大值

- ① 核热管：积分功率输出最大的冷却剂通道；
 核热点：堆芯中某一燃料元件表面热流密度最大的点；

局部特性。

② 核热管因子、核热点因子：

热流密度核热点因子 $F_q^N = \frac{q_{max}}{\bar{q}}$ 又考虑核因素 $F_q^N = \frac{q_{n,max}}{\bar{q}}$ ；
 焓升核热管因子 $F_{\Delta H}^N = \frac{\Delta H_{max}}{\Delta \bar{H}}$ 等价于 $F_{\Delta H}^N = \frac{\Delta H_{n,max}}{\Delta \bar{H}}$ ；

③ 工程热管因子、工程热点因子:

$$\begin{cases} F_q^E = \frac{q_{h,max}}{q_{n,max}}; \\ F_{\Delta H}^E = \frac{\Delta H_{h,max}}{\Delta H_{n,max}}; \end{cases}$$

$$\Rightarrow \boxed{F_q = F_q^N \cdot F_q^E; \quad F_{\Delta h} = F_{\Delta H}^N \cdot F_{\Delta H}^E}$$

④ 热管、热点:

- / 热管: 堆芯内具有最大焓升的冷却剂通道;
- \ 热点: 燃料元件上限制堆芯功率输出的局部点;

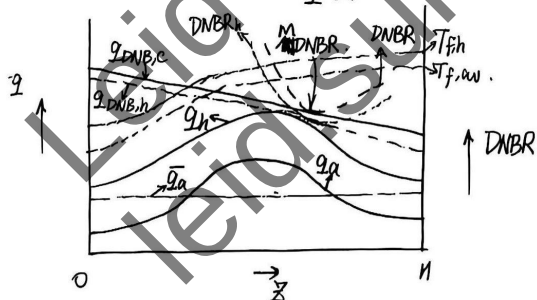
3. 临界热流密度关系式:

① W-3公式: ($x_e \leq 0.15$, 反之使用 W-2 公式)

修正: $\begin{cases} \text{轴向热流密度非均匀分布的修正.} \\ \text{冷壁效应的修正.} \\ \text{定径架的修正.} \end{cases}$

② 最小临界热流密度比 MDNBR 曲线 (Z 方向):

$$DNBR(Z) = \frac{q_{DNB,c}(Z)}{q(Z)}$$



(热通道 h + 平均通道 av/c).