

- 核反应堆物理大作业
 - 1. 问题描述
 - 2. 研究对象
 - 3. 堆芯及反射层
 - 3.1 燃料
 - 3.2 冷却剂
 - 3.3 慢化剂
 - 3.4 反射层
 - 4. 物性参数
 - 4.1 堆芯及反射层物性
 - 4.2 均匀化处理
 - 4.2.1 燃料
 - 4.2.2 冷却剂
 - 4.2.3 慢化剂
 - 4.2.4 均匀化宏观截面
 - 4.2.5 反射层宏观截面
 - 5. 数学模型及方程求解
 - 5.1 裸堆模型
 - 5.2 无限厚反射层堆模型
 - 6. 结果分析
 - 7. 参考文献
 - 8. 附录

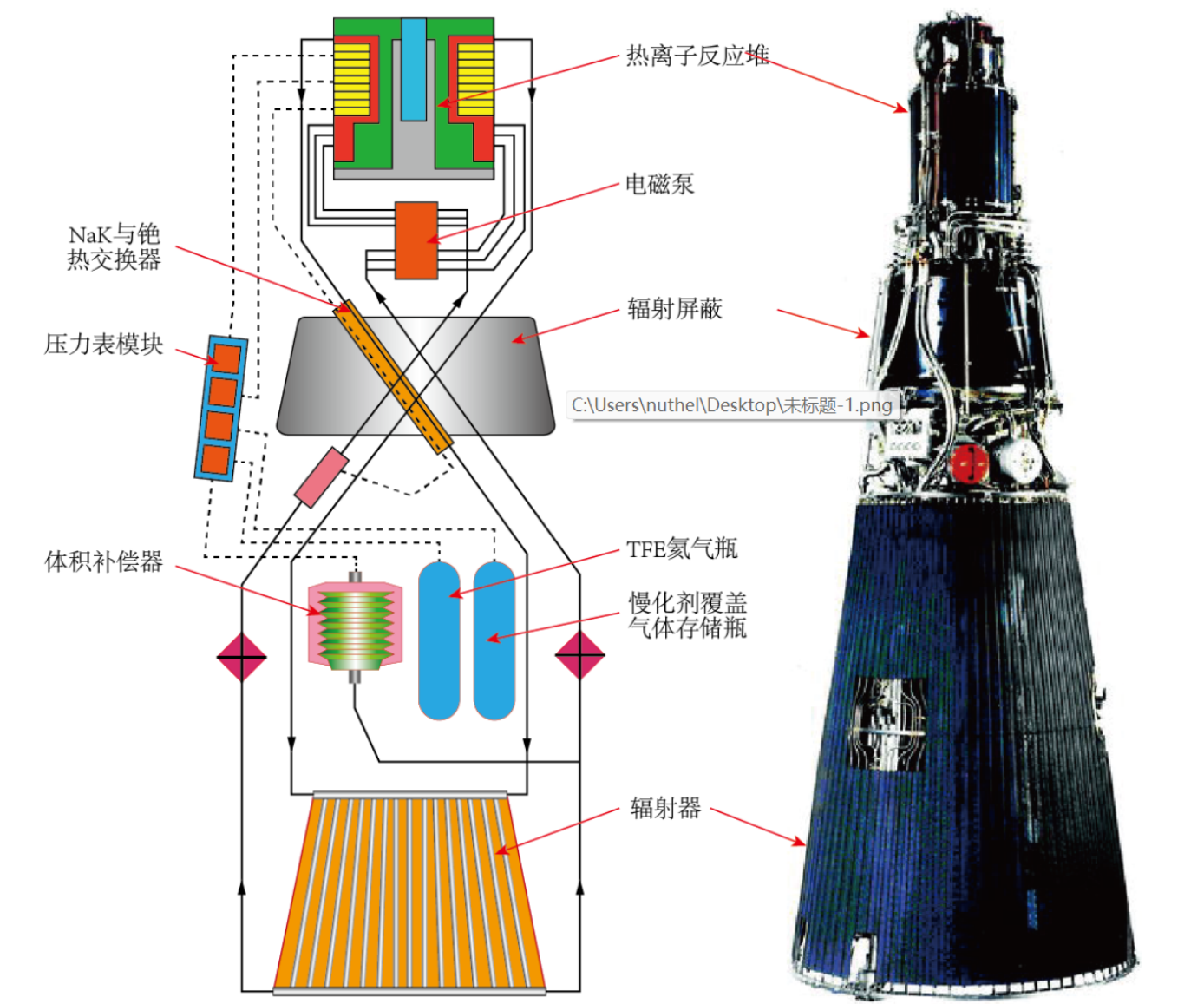
核反应堆物理大作业

1. 问题描述

选定反应堆的堆芯材料及反射层材料，假设堆芯和反射层区域材料均匀混合。基于单群扩散理论，分别计算裸堆及堆芯外层包裹无限厚度反射层条件下的临界直径，并比较两种条件下的中子通量密度分布。要求给出设计过程中的详细计算分析步骤及依据。

2. 研究对象

热离子反应堆电源在空间核动力研究中占有举足轻重的地位，是目前空间堆开发中技术最为成熟的一类，本文选取TOPAZ-II系统作为研究对象。

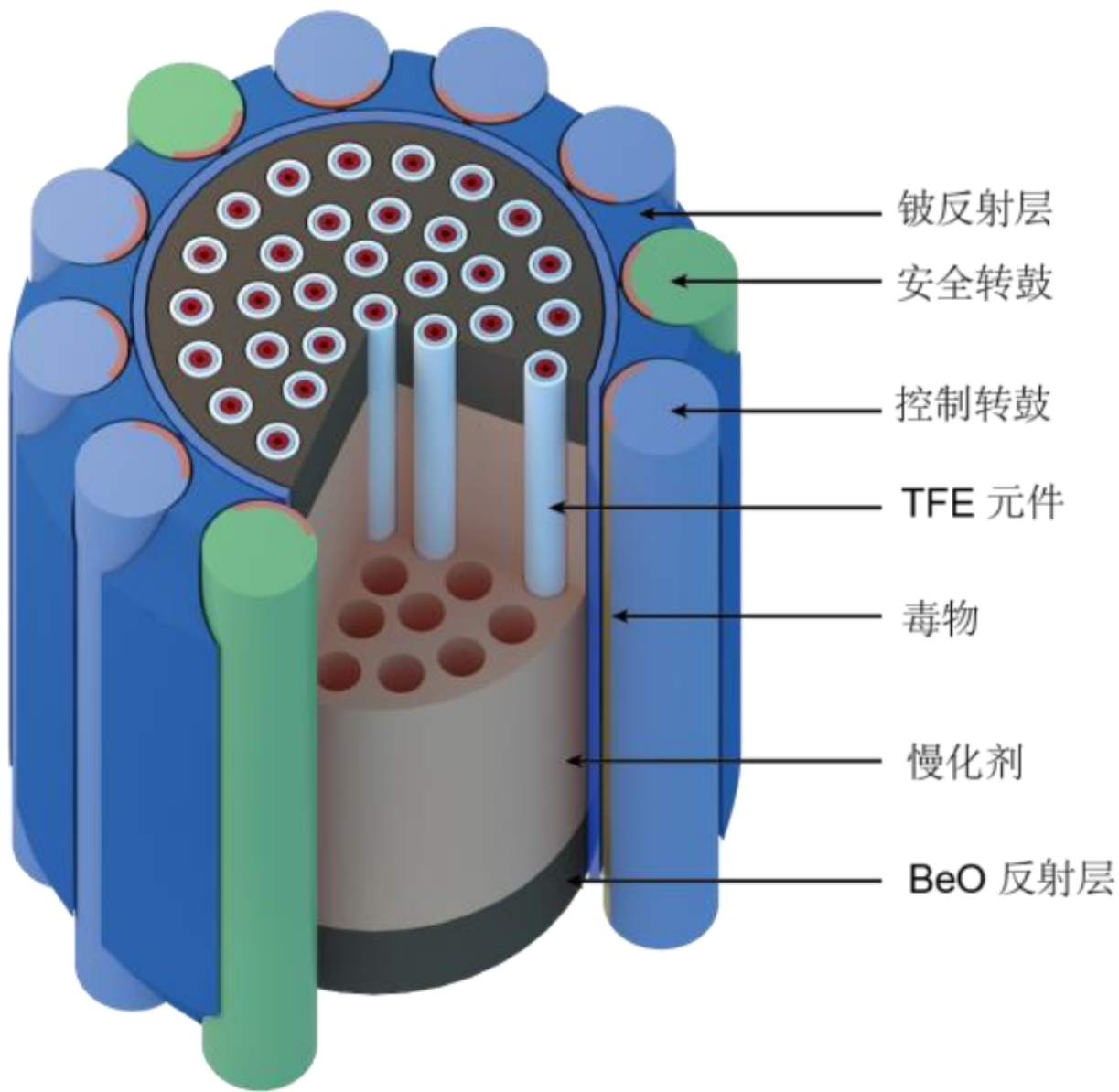


上图给出了该系统的概貌及结构示意图。反应堆分系统主要包括热离子燃料元件、氢化锆慢化剂、冷却剂环管、控制转鼓及其驱动机构、氧化铍反射层、支撑结构等，是TOPAZ-II系统的核心部分，集核燃料裂变产能与发电于一体；冷却剂回路主要由堆芯出口冷却剂管道、堆芯入口冷却剂管道、直流电磁泵、体积补偿器、辐射器等组成。

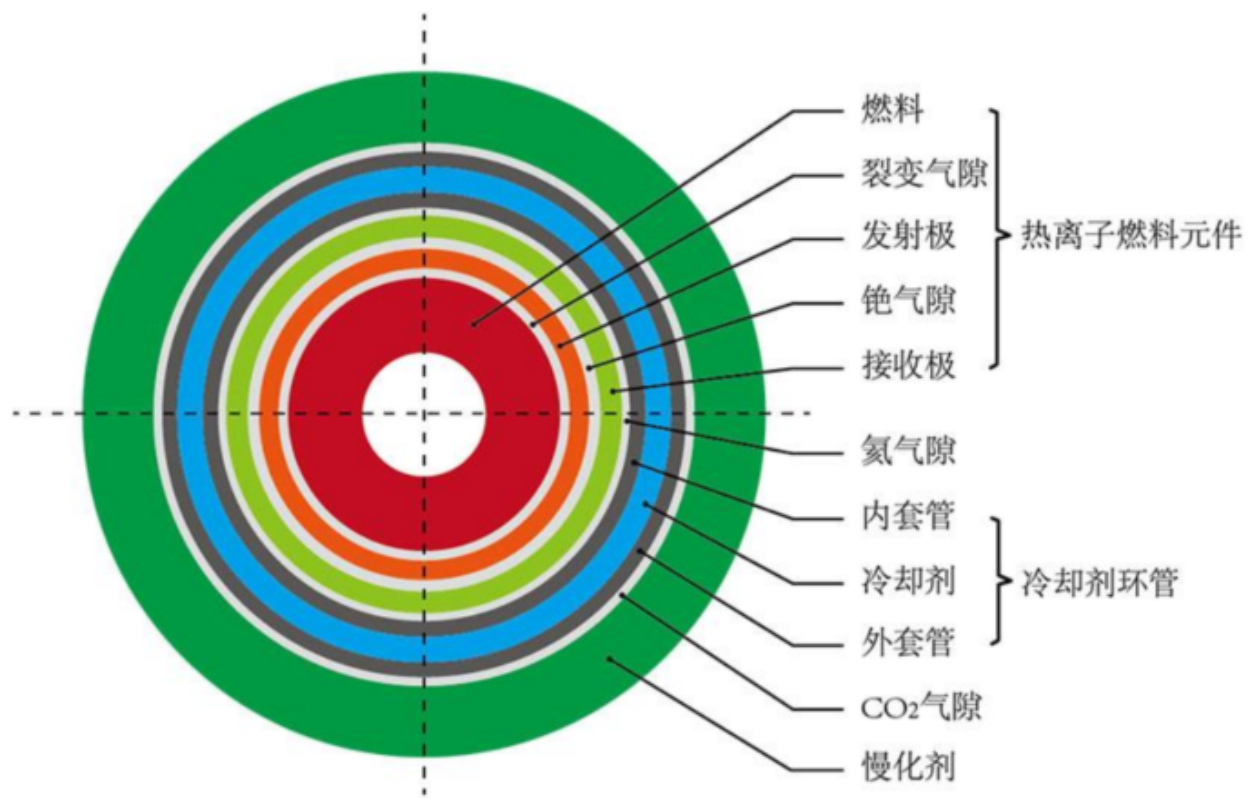
3. 堆芯及反射层

TOPAZ-II反应堆是一个小型的氢化锆慢化热中子反应堆，其结构如下图所示。反应堆堆芯由37根热离子燃料元件、冷却剂、慢化剂和堆内构件等组成。热离子燃料元件同心地排列成四圈，各圈燃料元件的数量分别为：1、6、12、18，除位于中心的燃料元件外，其它各圈燃料元件的布置半径分别为：37mm、67mm、105mm。37根燃料元件分别插入37个环形冷却剂通道的不锈钢内套管中，内套管放置在慢化剂不锈钢外套管的孔道

内。内、外套管构成环形冷却剂流道。环形冷却剂通道长485mm，外半径12.95mm，内半径12.25mm，冷却剂从0.7mm的环形通道中流过堆芯，将热离子燃料元件中没有转化为电能的废热排出堆芯。慢化剂位于反应堆堆芯容器的筒体内，37对同轴的双层管子同心排列成四圈放在慢化剂圆盘的孔中。



热离子燃料元件TFE结构如下图

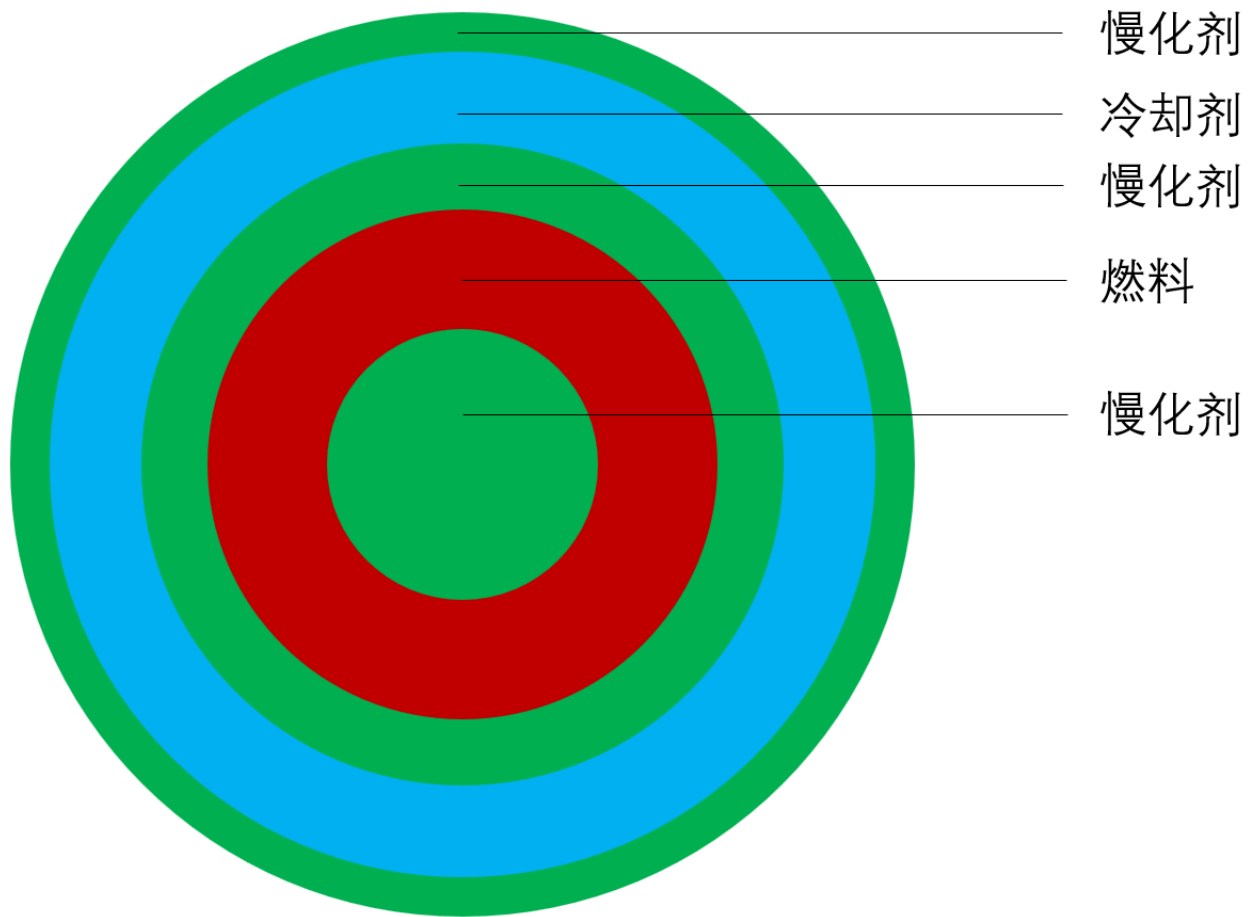


TFE的材料与几何参数如下：

结构	材料	内外半径 mm
燃料	UO_2	4.0/8.5
发射极	多晶钼铌合金（钨涂层）	9.65/9.8
接收极	多晶钼合金	10.3/11.85
冷却剂内套管	不锈钢	11.9/12.25
冷却剂	钠钾-78	12.25/12.95
冷却剂外套管	不锈钢	12.95/13.3
CO ₂ 气隙	CO_2	13.3/13.75

为方便处理，对实际模型进行简化，将堆芯除了燃料与冷却剂外的结构均视为慢化剂处理，由此得到简化后的空间堆模型。

简化后的热离子燃料元件TFE结构如下图



堆芯截面的直径为260mm，由此可以计算燃料、冷却剂、慢化剂的相对含量，进而均匀化处理堆芯。

3.1 燃料

UO_2 具有熔点高，化学惰性，与冷却剂、锆包壳相容性好等优点，TOPAZ-II的燃料选用 UO_2 ，燃料富集度96%，在TFE截面中，燃料的形状是内外半径分别为4.0mm，8.5mm，堆芯含有37根热离子燃料元件，因此可以计算得：

$$\frac{V_{UO_2}}{V_{total}} = \frac{37\pi(r_2^2 - r_1^2)}{\pi d_{total}^2/4} \approx 12.32\%$$

3.2 冷却剂

钠钾合金具有热物性、低凝固温度和加工工艺成熟的优点，是空间核反应堆技术中使用较为广泛的一类金属冷却剂。TOPAZ-II采用配比为22%钠和78%钾的钠钾合金作为冷却剂，在TFE截面中，冷却剂通道的形状是内外半径分别为12.25mm，12.95mm，堆芯含有37根热离子燃料元件，因此可以计算得：

$$\frac{V_{Na-K}}{V_{total}} = \frac{37\pi(r_2^2 - r_1^2)}{\pi d_{total}^2/4} \approx 3.86\%$$

3.3 慢化剂

选择慢化剂需要考虑中子性能，即要求慢化能力好，中子吸收截面尽可能小， 有较大的慢化比。TOPAZ-II选用氢化锆作慢化剂。在近似处理中，堆芯内除燃料与冷却剂全部视为慢化剂，因此有：

$$\Sigma \frac{V_i}{V_{total}} = 100\%$$

$$\frac{V_{ZrH_2}}{V_{total}} = 100\% - (\frac{V_{Na-K}}{V_{total}} + \frac{V_{UO_2}}{V_{total}}) \approx 83.82\%$$

3.4 反射层

*BeO*工作温度高，并且反射能力强于石墨，还有导热性能好，热膨胀系数小，抗高温氧化性能好等优点，TOPAZ-II选用铍作为反射层。

本文在无限厚反射层堆模型中作简化处理，视为在裸堆圆柱体侧面包裹径向无限厚的*BeO*作为反射层。

4. 物性参数

4.1 堆芯及反射层物性

核素的热中子(中子能量为0.0253eV)吸收、裂变、散射截面如下：

核素	σ_a/b	σ_f/b	σ_s/b	ν
U-235	680.9	583.5	14.4	2.416
U-238	2.70	-	8.9	-
O-16	2.7E-4	-	3.76	-
Na-23	0.530	-	3.2	-
K-39	2.10	-	1.5	-

核素	σ_a/b	σ_f/b	σ_s/b	ν
Zr-91	0.185	-	6.4	-
H-1	0.332	-	38	-
Be-9	0.0092	-	6.14	-

燃料，冷却剂，慢化剂，反射层密度如下：

结构	材料	密度/(g/cm ³)
燃料	UO_2	10.42
冷却剂	NaK-78	0.847
慢化剂	ZrH_2	5.6
反射层	BeO	3.025

4.2 均匀化处理

4.2.1 燃料

使用 c 来表示氧化铀中U-235与铀元素的原子数量之比：

$$\frac{235 \times c}{235 \times c + 238 \times (1 - c)} = \epsilon$$

代入 $\epsilon = 96\%$ 可以得到

$$c = 0.9604841$$

因而 UO_2 的原子量为

$$M_{UO_2} = 235c + 238(1 - c) + 2 \times 15.999 = 267.1165$$

单位体积内 UO_2 的分子数为

$$N_{UO_2} = \frac{\rho_{UO_2} N_0}{M_{UO_2}} = 2.3484 \times 10^{28} m^{-3}$$

由此可知

$$N_{U-235} = cN_{UO_2} = 2.2556 \times 10^{28} m^{-3}$$

$$N_{U-238} = (1 - c)N_{UO_2} = 0.0928 \times 10^{28} m^{-3}$$

$$N_O = 2N_{UO_2} = 4.6968 \times 10^{28} m^{-3}$$

可得富集度96%的二氧化铀的宏观吸收截面为

$$\begin{aligned}\Sigma_{a,UO_2} &= \Sigma N_i \sigma_{a,i} \\ \Sigma_{a,UO_2} &= 1536.0899 m^{-1}\end{aligned}$$

宏观裂变截面为

$$\begin{aligned}\Sigma_{f,UO_2} &= N_{f,U-235} \sigma_{f,U-235} \\ \Sigma_{f,UO_2} &= 1316.1426 m^{-1}\end{aligned}$$

宏观散射截面为

$$\begin{aligned}\Sigma_{s,UO_2} &= \Sigma N_i \sigma_{s,i} \\ \Sigma_{s,UO_2} &= 50.9665 m^{-1}\end{aligned}$$

4.2.2 冷却剂

冷却剂NaK-78合金中，K的质量分数为78%，Na的质量分数为22%

单位体积内Na的原子数为

$$N_{Na} = \frac{0.22 \rho_{NaK-78} N_0}{M_{Na}} = 8.1017 \times 10^{28} m^{-3}$$

单位体积内K的原子数为

$$N_K = \frac{0.78 \rho_{NaK-78} N_0}{M_K} = 16.9400 \times 10^{28} m^{-3}$$

可得NaK-78的宏观吸收截面为

$$\begin{aligned}\Sigma_{a,NaK-78} &= N_{Na} \sigma_{a,Na} + N_K \sigma_{a,K} \\ \Sigma_{a,NaK-78} &= 39.8679 m^{-1}\end{aligned}$$

宏观散射截面为

$$\begin{aligned}\Sigma_{s,NaK-78} &= N_{Na} \sigma_{s,Na} + N_K \sigma_{s,K} \\ \Sigma_{s,NaK-78} &= 51.3354 m^{-1}\end{aligned}$$

4.2.3 慢化剂

单位体积内的ZrH₂分子数为

$$N_{ZrH_2} = \frac{\rho_{ZrH_2} N_0}{M_{ZrH_2}} = 3.6164 \times 10^{28} m^{-3}$$

可得 ZrH_2 的宏观吸收截面为

$$\begin{aligned}\Sigma_{a,ZrH_2} &= N_{ZrH_2} \sigma_{a,Zr} + 2N_{ZrH_2} \sigma_{a,H} \\ \Sigma_{a,ZrH_2} &= 3.0703 m^{-1}\end{aligned}$$

宏观散射截面为

$$\begin{aligned}\Sigma_{s,ZrH_2} &= N_{ZrH_2} \sigma_{s,Zr} + 2N_{ZrH_2} \sigma_{s,H} \\ \Sigma_{s,ZrH_2} &= 297.9914 m^{-1}\end{aligned}$$

4.2.4 均匀化宏观截面

堆芯的均匀化宏观吸收截面如下

$$\Sigma_{a,c} = \frac{V_{UO_2}}{V_{total}} \Sigma_{a,UO_2} + \frac{V_{NaK-78}}{V_{total}} \Sigma_{a,NaK-78} + \frac{V_{ZrH_2}}{V_{total}} \Sigma_{a,ZrH_2} = 193.3587 m^{-1}$$

堆芯的均匀化宏观裂变截面如下

$$\Sigma_{f,c} = \frac{V_{UO_2}}{V_{total}} \Sigma_{f,UO_2} = 162.1487 m^{-1}$$

堆芯的均匀化宏观散射截面如下

$$\Sigma_{s,c} = \frac{V_{UO_2}}{V_{total}} \Sigma_{s,UO_2} + \frac{V_{NaK-78}}{V_{total}} \Sigma_{s,NaK-78} + \frac{V_{ZrH_2}}{V_{total}} \Sigma_{s,ZrH_2} = 258.0370 m^{-1}$$

此外还可以得到

平均散射角余弦

$$\bar{\mu}_0 = \frac{2}{3A} = \frac{2}{3 \times \frac{\sum N_i M_i}{\sum N_i}} = 0.00728$$

吸收平均自由程

$$\lambda_{a,c} = \frac{1}{\Sigma_{a,c}} = 0.005172 m$$

裂变平均自由程

$$\lambda_{f,c} = \frac{1}{\Sigma_{f,c}} = 0.006167 m$$

散射平均自由程

$$\lambda_{s,c} = \frac{1}{\Sigma_{s,c}} = 0.003875m$$

输运平均自由程

$$\lambda_{tr,c} = \frac{\lambda_{s,c}}{1 - \bar{\mu}_0} = 0.003903m$$

堆芯扩散系数

$$D_c = \frac{\lambda_{tr,c}}{3} = 0.001301m$$

扩散长度

$$L_c^2 = \frac{\lambda_{a,c}\lambda_{tr,c}}{3} = 6.729 \times 10^{-6}m^2$$

徙动长度，取 $\tau = 40 \times 10^{-4}m^2$

$$M^2 = L_c^2 + \tau = 0.00040673m^2$$

4.2.5 反射层宏观截面

查附录可知

$$1 - \bar{\mu}_0 = 0.939$$

$$\Sigma_{a,BeO} = 7.3 \times 10^{-2}m^{-1}$$

$$\Sigma_{s,BeO} = 50.1m^{-1}$$

$$\Sigma_{t,BeO} = 50.173m^{-1}$$

吸收平均自由程

$$\lambda_{a,r} = \frac{1}{\Sigma_{a,r}} = 13.6986m$$

散射平均自由程

$$\lambda_{s,r} = \frac{1}{\Sigma_{s,r}} = 0.01996m$$

输运平均自由程

$$\lambda_{tr,r} = \frac{\lambda_{s,r}}{1 - \bar{\mu}_0} = 0.02126m$$

热扩散系数

$$D_r = \frac{\lambda_{tr,r}}{3} = 0.007086m$$

扩散长度

$$L_r^2 = \frac{\lambda_{a,r}\lambda_{tr,r}}{3} = 0.09706m^2$$

5. 数学模型及方程求解

5.1 裸堆模型

含时的反应堆单群中子扩散方程如下

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi(\vec{r}, t)}{\partial t} = D \nabla^2 \phi(\vec{r}, t) - \Sigma_a \phi(\vec{r}, t) + k_\infty \Sigma_a \phi(\vec{r}, t) + S_0(\vec{r}, t)$$

针对具体问题，稳态时方程可以简化为波动方程

$$\nabla^2 \phi(\vec{r}) + B_g^2 \phi(\vec{r}) = 0$$

其中， B_g 满足

$$\frac{k_\infty}{1 + M^2 B_g^2} = 1$$

将梯度算子展开，可以得到空间堆稳态情况下的中子通量密度方程

$$\frac{\partial^2 \phi(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi(r, z)}{\partial z^2} + B_g^2 \phi(r, z) = 0$$

通过分离变量法，将方程写为

$$\phi(r, z) = \psi(r)Z(z)$$

可以求解得到

$$\psi(r) = AJ_0(B_r r)$$

$$B_r = \frac{2.405}{R}$$

$$Z(z) = F \cos B_z z$$

$$B_z = \frac{\pi}{H}$$

圆柱体裸堆的几何曲率为

$$B_g^2 = B_r^2 + B_z^2 = \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$$

其中， B_r 称为径向几何曲率， B_z 称为轴向几何曲率。

因而有限高圆柱裸堆的中子通量密度的分布形式为

$$\phi(r, z) = C J_0(B_r r) \cos(B_z z)$$

其中

$$C = \frac{3.64P}{V E_f \Sigma_f}$$

5.2 无限厚反射层堆模型

6. 结果分析

7. 参考文献

8. 附录
