

球床氟盐冷却高温堆中 ${}^6\text{Li}$ 摩尔浓度对冷却剂温度反应性系数影响的研究

孙建友^{1,3} 邹 杨^{1,2} 严 睿¹ 朱贵凤¹ 李光超¹ 陈 亮^{1,3} 李东仓³ 徐洪杰^{1,2}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院核辐射与核能技术重点实验室 上海 201800)

3 (兰州大学 核科学与技术学院 兰州 730000)

摘要 球床氟盐冷却高温反应堆作为第四代反应堆, 选用 $2\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 做冷却剂。 $2\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 中含有微观吸收截面很大 ${}^6\text{Li}$ 核素, 其摩尔含量会对冷却剂的温度反应性系数造成影响, 因此研究 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量对冷却剂温度反应性系数的影响十分必要。本文以无限球床为计算模型, 利用 SCALE6 (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) 对不同 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量的冷却剂温度反应性系数进行研究。分析结果表明, 当冷却剂中 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量占 Li 元素总量的 0.005% 时, 冷却剂中 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 的宏观吸收截面大致相当; 随着 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量的增大, 冷却剂的温度反应性系数由负向正转变, 并逐渐增大; 基于四因子公式的分析表明, 引起冷却剂的温度反应性系数由负变正的主要因素为热中子利用系数的变化。

关键词 无限球床, ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量, 宏观吸收截面, 四因子, 温度反应性系数

中图分类号 TL326

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.090605

2001–2003 年期间, 美国橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory, ORNL)、桑地亚国家实验室 (Sandia National Laboratory, SNL) 和加利福尼亚大学伯克利分校 (University of California, Berkeley, UCB) 共同发展了先进高温堆 (AHTR) 的概念。2006–2008 年期间, 这个团队 (主要是 UCB) 对球床先进高温堆 (Pebble Bed Advanced High Temperature Reactor, PB-AHTR) 进行了设计^[1]。先进高温堆的核心特点主要有: (1) 使用氟盐进行冷却; (2) 使用包覆颗粒燃料。由于继承了熔盐堆 (氟盐冷却) 和高温气冷堆 (包覆燃料颗粒) 等反应堆的众多优点和技术基础, 评估认为氟盐冷却高温反应堆具有良好的经济性、安全性、可持续性和防核扩散性, 其商业化在当前技术基础条件下具有极高的可行性^[2–4]。

$2\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 由于其高比热容、低粘度、较低的中子吸收性能和较好的慢化能力^[5]等特点, 在众多候选的氟盐中脱颖而出, 被认为是球床氟盐冷却高温堆的首选冷却剂。 $2\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 的组成元素之一 Li 元素的天然同位素中主要含有 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 核素, 其中

${}^6\text{Li}$ 核素的中子微观吸收截面较大, 属于中子毒物, 因此需要严格控制 $2\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 盐中 ${}^6\text{Li}$ 的含量。研究发现, 冷却剂中 ${}^6\text{Li}$ 的摩尔浓度对冷却剂温度反应性系数的影响显著, 冷却剂的温度反应性系数随 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量的增大由负向正转变, 并逐渐增大。本文利用 SCALE6 (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) 程序对球床氟盐冷却高温堆冷却剂 $2\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 中 ${}^6\text{Li}$ 摩尔浓度对冷却剂温度反应性系数的影响进行了定量研究。

1 程序介绍和计算模型

1.1 程序介绍

SCALE6 程序系统是由美国橡树岭国家实验室开发并维护的许可评估标准化计算机分析程序包, 主要用于核反应堆物理计算、临界安全分析和辐射屏蔽计算分析等方面^[6]。它是一个模块化的程序系统, 系统中控制模块顺序调用各模块完成特定的任务。整个 SCALE 系统包含了数据库、截面处理程序、辐射输运程序及燃料燃耗和活化分析等功能,

中国科学院战略性先导科技项目 (No.XDA0201002)、上海市科学技术委员会项目 (No.11JC1414900)、国家重点基础研究发展计划 (No.2010CB934501) 和国家自然科学基金 (No.11005148) 资助

第一作者: 孙建友, 男, 1984 年出生, 2009 年毕业于青岛科技大学, 现为兰州大学在读硕士研究生, 研究方向为反应堆物理计算

通讯作者: 徐洪杰, E-mail: xuhj@sinap.ac.cn

收稿日期: 2014-02-19 修回日期: 2014-04-23

这些功能以模块形式用于反应堆的临界计算和屏蔽分析等。SCALE 程序中包含数个独立的多群截面库, 用来进行反应堆临界安全分析。通用中子反应截面库包括 238-ENDF/B-V 和 44-ENDF/B-V 中子库, 本计算采用的是 238-ENDF/B-V 中子库。

KENO V.a 3-D 蒙特卡罗临界计算机模块是 SCALE 的主要的临界安全分析工具, 是用于确定有效增值因数(k_{eff})的 3-D (三维) 多群蒙特卡罗程序。其中包含的建立模型的基本几何体包括长方体、圆柱体、球体、半球体以及数组。GENWGTS 和 GWAS 可以生成 KENO 的权重库, KMART (KENO Module for Activity-Reaction Rate Tabulation) 是 KENO V.a 中的用于生成核素活性表和权重谱的后处理程序^[7]。K5TOK6 和 C5TOC6 是两个比较实用的程序, 这两个程序可以独立地把 KENOV.a 和 CSAS 的输入文件转变成 KENO-VI 和 CSAS6 的输入文件。AWL、MAL 和 WGT 以 ASCII 和二进制码的形式分别转换成 AMPX 的工作格式库、KENO 的反照率库和 KENO 的权重库。LSULIB 以 ASCII 和二进制码的形式转换成 CENTRM 的点截面库。

1.2 计算模型

为了使本工作对球床氟盐冷却高温堆有普遍意义, 本文以无限球床模型作为研究基础, 以全反射边界条件的单栅元晶胞作为计算模型, 燃料球的体积填充率为 65%。研究采用的燃料球为含有包覆燃料颗粒的球形燃料元件, 燃料球以及包覆颗粒 (Tristructural-isotropic Particle, TRISO) 的结构如图 1 所示^[8]。计算中使用的相关数据有: 燃料球内的 TRISO 随机分散在密度为 $1.73 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的石墨基质内, TRISO 的体积填充率为 7.5%, 燃料中 ^{235}U 富集度为 17.08%; 表 1 是燃料球的具体参数。2LiF-BeF₂ 的熔点是 459 °C、沸点是 1 430 °C, 密度为 $2.280-0.0004884\times T \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3[9]}$ 。本文选取 2LiF-BeF₂ 中 ^6Li 摩尔含量分别为: 0.003%、0.005%、0.007%、0.01%、0.015%、0.02%、0.026%、0.03%、0.04%、0.05% 进行研究; 计算采用粒子数为 100 000, 循环代数为 200, k_{∞} 能达到的精确度为 ± 0.00015 。

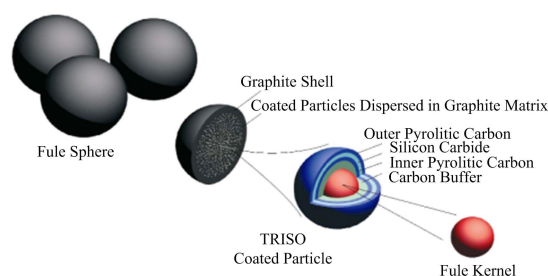


图 1 燃料球和 TRISO 的结构图^[8]
Fig.1 Pebbles and TRISO fuel particle design^[8].

表 1 Pebble 的参数
Table 1 Parameters of pebble.

燃料球 Pebble	材料 Materials	半径 Radius / cm	密度 Density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
内核 Kernel	UO ₂	2.5×10^{-2}	10.5
碳缓冲层 Carbon buffer	C	3.45×10^{-2}	1.05
内部解碳层 Inner pyrolytic carbon	C	3.85×10^{-2}	1.90
碳化硅层 SiC	SiC	4.2×10^{-2}	3.18
外部解碳层 Outer carbon	C	4.6×10^{-2}	1.90
球壳 Pebble shell	C	2.5 (内径) 3.0 (外径) Inside diameter) Outer diameter)	1.73

2 结果与讨论

2.1 ^6Li 摩尔含量对冷却剂宏观吸收截面的影响及冷却剂中 ^6Li 摩尔含量的选择

研究表明, 冷却剂温度反应性系数主要受其吸收能力的影响, 而 2LiF-BeF₂ 的吸收能力主要受 ^6Li 摩尔含量的影响, 研究 ^6Li 摩尔含量对 2LiF-BeF₂ 宏观吸收截面的影响, 对冷却剂温度反应性系数的研究至关重要。

图 2 是 ^6Li 摩尔含量与 2LiF-BeF₂ 宏观吸收截面的关系, 可以看出, 2LiF-BeF₂ 的宏观吸收截面随 ^6Li 摩尔含量增大。

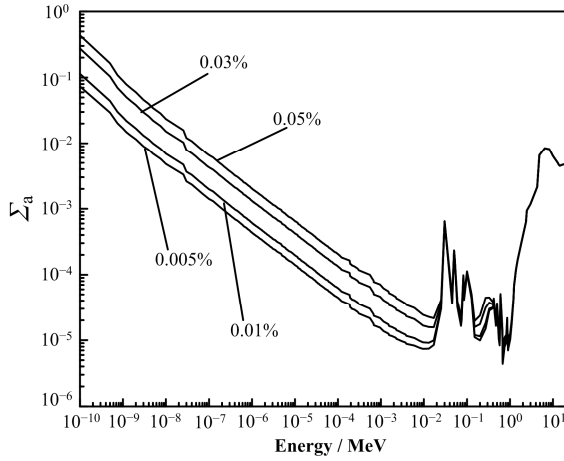


图2 2LiF-BeF₂ 的宏观吸收截面
Fig.2 Macroscopic neutron absorption cross section of 2LiF-BeF₂.

图3是 ^6Li 、 ^7Li 、Be和F的微观吸收截面，可以看出， ^6Li 的微观吸收截面比 ^7Li 的微观吸收截面大4个数量级，比Be和F的微观吸收截面大5个数量级，可见 ^6Li 是2LiF-BeF₂中需要重点考虑的中子吸收核素，其摩尔含量必须严格控制。

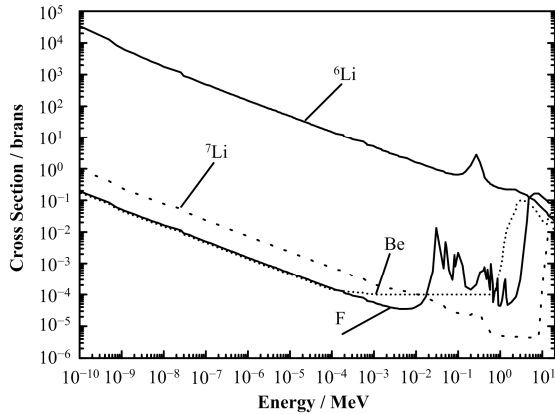


图3 四种核素的微观吸收截面
Fig.3 Microscopic thermal neutron absorption cross section of ^6Li , ^7Li , Be and F.

由于 ^6Li 比 ^7Li 的微观吸收截面大的多，研究Li元素的两种核素不同摩尔比的宏观吸收截面的关系对冷却剂很重要。研究表明，2LiF-BeF₂中 ^6Li 的摩尔含量为0.005%时， ^6Li 与 ^7Li 的宏观吸收截面几乎相同，如图4所示。 ^6Li 的摩尔含量大于0.005%时， ^6Li 是影响冷却剂中子吸收能力的主要核素； ^6Li 的摩尔含量小于0.005%时， ^7Li 是影响冷却剂中子吸收能力的主要核素，所以把 ^6Li 摩尔含量降低到0.005%以下意义不大，一般认为将 ^6Li 的摩尔含量控制在宏观中子吸收能力与 ^7Li 相当时最合适。

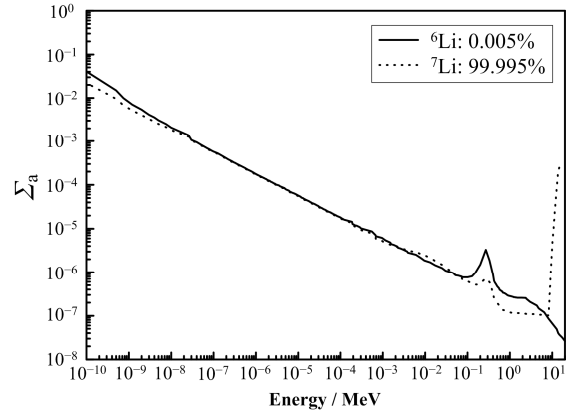


图4 ^6Li 与 ^7Li 的宏观吸收截面
Fig.4 Macroscopic thermal neutron absorption cross section of ^6Li and ^7Li .

2.2 冷却剂温度反应性系数

球床氟盐冷却高温堆的冷却剂温度变化导致的效应主要有两方面：一是温度升高引起冷却剂密度减小所带来的密度效应；二是冷却剂组成核素的微观截面的温度效应。第一种效应又分为密度变化导致的冷却剂吸收能力和慢化能力的变化两种分支效应；第二种效应是截面的多普勒效应。以下利用四因子公式对不同 ^6Li 摩尔含量的冷却剂温度反应性系数进行研究，分析影响冷却剂温度反应性系数的关键因素。

k_∞ 是无限增殖因数，它是快中子增殖因数 ε 、逃脱共振俘获概率 p 、有效裂变中子数 η 和热中子利用系数 f 共同作用的结果，分析冷却剂中 ^6Li 摩尔含量对温度反应性系数的影响，关键是对四因子的分析。四因子公式如式(1)所示：

$$k_\infty = \varepsilon p \eta f \quad (1)$$

四个因子的求解公式如式(2) - (5)^[10-11]所示：

$$\varepsilon = \frac{\gamma \Sigma_{f,1} \Phi_1 + \gamma \Sigma_{f,2} \Phi_2}{\gamma \Sigma_{f,2} \Phi_2} \quad (2)$$

$$p = \frac{\Sigma_{a,2} \Phi_2}{\Sigma_{a,1} \Phi_1 + \Sigma_{a,2} \Phi_2} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\gamma \Sigma_{f,2} \Phi_2}{\Sigma_a \Phi_2} \quad (4)$$

$$f = \frac{\Sigma_a \Phi_2}{\Sigma_{a,2} \Phi_2} \quad (5)$$

式中， $\Sigma_{f,1}$ 是快中子裂变截面； $\Sigma_{f,2}$ 是热中子裂变截面； $\Sigma_{a,1}$ 是快中子吸收截面； $\Sigma_{a,2}$ 是热中子吸收截面； Φ_1 是快中子通量； Φ_2 是热中子通量； γ 是每次裂变

的中子份额; Σ_f 是燃料核热中子裂变截面; Σ_a 是燃料热中子吸收截面。热区分群为 0–0.625 eV, 快中子区分群 0.625 eV–10 MeV。

式(6)是温度反应性系数的求解公式:

$$\alpha_T = \frac{\frac{1}{k_\infty^{T_1}} - \frac{1}{k_\infty^{T_2}}}{T_2 - T_1} = \frac{k_\infty^{T_2} - k_\infty^{T_1}}{(T_2 - T_1)k_\infty^{T_1}k_\infty^{T_2}} \quad (6)$$

式中, $k_\infty^{T_1}$ 和 $k_\infty^{T_2}$ 分别是温度 T_1 和 T_2 对应的无限增殖因数, 且 $T_2 = T_1 + \Delta T$, $k_\infty^{T_2} = k_\infty^{T_1} + \Delta k$ 。

对上述公式中的相关要素进行数学近似处理, 得出温度反应性系数的表达式如式(7)所示:

$$\Delta k = k_\infty^{T_2} - k_\infty^{T_1} = (\varepsilon + \Delta\varepsilon)(p + \Delta p)(\eta + \Delta\eta)(f + \Delta f) - \varepsilon p \eta f \gg \varepsilon p \eta \Delta f + \varepsilon p f \Delta \eta + \varepsilon \eta f \Delta p + p \eta f \Delta \varepsilon \quad (7)$$

定义 $A = \varepsilon p \eta$, $B = \varepsilon p f$, $C = \varepsilon \eta f$, $D = p \eta f$, 其中 A 、 B 、 C 、 D 为常数, 此时:

$$\alpha_T = \frac{k_\infty^{T_2} - k_\infty^{T_1}}{\Delta T k_\infty^{T_1} k_\infty^{T_2}} \approx \frac{\Delta k}{\Delta T k_\infty^2} = \frac{A \Delta f + B \Delta \eta + C \Delta p + D \Delta \varepsilon}{\Delta T k_\infty^2} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 冷却剂温度反应性系数可以近似分解为式(8)右边分子中的四个子项的加和, 对四个子项进行分析, 得出 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量对冷却剂温度反应性系数影响的关键因素。

表 2 是冷却剂温度为 880 K 和 980 K 时, 不同 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量对应的四因子和 k_∞ 值。 ${}^6\text{Li}$ 的摩尔含量

越大, 冷却剂的吸收作用越大, 导致 f 减小, 所以 k_∞ 随 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量的增大而减小。表 3 是冷却剂温度从 $T_1=880\text{ K}$ 增加到 $T_2=980\text{ K}$, $\Delta T=100\text{ K}$ 变化范围内, 冷却剂密度和截面的总效应以及截面效应对四因子的影响。从表 3 可以看出, 随着 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量变大, 截面效应对四因子的影响很小, 四因子的变化主要是由密度效应引起, 这说明密度效应是影响冷却剂温度反应性系数的主要因素; 四个因子的变化值 $\Delta\varepsilon$ 、 Δp 、 $\Delta\eta$ 、 Δf 随 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量的变化情况中可以看出, Δf 随 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量的变化最大。

如表 4 所示, 当冷却剂温度升高时, 密度减小, 冷却剂排出, 导致其中子吸收能力减小和燃料中子吸收份额增大, 所以 f 增大, $\Delta f > 0$; 由于 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量对冷却剂吸收作用的影响较大, 冷却剂中 ${}^6\text{Li}$ 的摩尔含量越大, 冷却剂排出效应对其吸收能力的影响越大, 所以 Δf 随 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量增大。

从表 5 可以看出, Δf 和 $\Delta\varepsilon$ 对冷却剂温度反应性系数有正贡献, $\Delta\eta$ 和 Δp 对冷却剂温度反应性系数有负贡献; Δf 项对冷却剂的温度反应性系数影响较大, 其他三项影响不大; 当 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量为 0.003% 时, Δf 对冷却剂温度反应性系数的贡献所占比例较小, 此时冷却剂的温度反应性系数为负值; 随着 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量的增大, Δf 项对冷却剂温度反应性系数的贡献所占比例增大, 此时冷却剂的温度反应性系数由负值变为正值, 并逐渐增大。由此得出结论: ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量对 Δf 的影响是其影响冷却剂温度反应性系数的主要原因, 并且 Δf 随 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量增大, 导致冷却剂的温度反应性系数随 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量的增大由负值变为正值, 并逐渐增大。

表 2 冷却剂中 ${}^6\text{Li}$ 摩尔含量对四因子和无限增殖因数的影响
Table 2 Four factors and k_∞ as a function of the mole content of ${}^6\text{Li}$ of $2\text{LiF}-\text{BeF}_2$.

${}^6\text{Li} / \text{mol} \%$	ε / K		p / K		η / K		f / K		k / K	
	880	980	880	980	880	980	880	980	880	980
0.003	1.166 3	1.167 8	0.669 77	0.668 14	2.030 4	2.029 8	0.930 06	0.931 39	1.475 2	1.475 1
0.005	1.168 2	1.169 6	0.668 95	0.667 30	2.030 4	2.029 7	0.920 69	0.922 25	1.460 8	1.460 9
0.007	1.170 0	1.171 3	0.668 09	0.666 60	2.030 3	2.029 7	0.911 53	0.913 29	1.446 7	1.447 4
0.010	1.172 8	1.174 1	0.666 96	0.665 35	2.030 3	2.029 7	0.898 09	0.900 17	1.426 3	1.427 2
0.015	1.177 3	1.178 5	0.664 99	0.663 54	2.030 2	2.029 6	0.876 59	0.879 16	1.393 3	1.395 3
0.020	1.181 9	1.183 1	0.663 10	0.661 79	2.030 1	2.029 5	0.856 14	0.859 14	1.362 1	1.365 1
0.026	1.187 4	1.188 5	0.660 74	0.659 50	2.030 0	2.029 4	0.832 87	0.836 30	1.326 5	1.330 2
0.030	1.191 2	1.192 1	0.659 23	0.657 90	2.029 9	2.029 3	0.818 06	0.821 78	1.304 0	1.307 9
0.040	1.200 4	1.201 3	0.655 56	0.654 16	2.029 7	2.029 1	0.783 32	0.787 62	1.251 2	1.255 9
0.050	1.209 8	1.210 4	0.651 60	0.650 37	2.029 6	2.029 0	0.751 46	0.756 27	1.202 3	1.208 0

表 3 温度对四个因子的影响
Table 3 Four factors as a function of temperature.

^6Li / mol %	$\Delta\epsilon$		Δp		$\Delta\eta$		Δf	
	总效应	截面效应	总效应	截面效应	总效应	截面效应	总效应	截面效应
	Total effect	Cross-section effect	Total effect	Cross-section effect	Total effect	Cross-section effect	Total effect	Cross-section effect
0.003	0.001 4	0.000 5	-0.001 6	-0.000 3	-0.000 6	-0.000 6	0.001 3	0.000 1
0.005	0.001 4	0.000 4	-0.001 6	-0.000 2	-0.000 6	-0.000 6	0.001 6	0.000 1
0.007	0.001 3	0.000 4	-0.001 5	-0.000 2	-0.000 6	-0.000 6	0.001 8	0.000 1
0.010	0.001 3	0.000 4	-0.001 6	-0.000 4	-0.000 6	-0.000 6	0.002 1	0.000 2
0.015	0.001 2	0.000 5	-0.001 5	-0.000 2	-0.000 6	-0.000 6	0.002 6	0.000 2
0.020	0.001 2	0.000 5	-0.001 3	-0.000 3	-0.000 6	-0.000 6	0.003 0	0.000 3
0.026	0.001 0	0.000 5	-0.001 2	-0.000 2	-0.000 6	-0.000 6	0.003 4	0.000 3
0.030	0.000 9	0.000 4	-0.001 3	-0.000 3	-0.000 6	-0.000 6	0.003 7	0.000 3
0.040	0.000 9	0.000 5	-0.001 4	-0.000 3	-0.000 6	-0.000 6	0.004 3	0.000 4
0.050	0.000 6	0.000 5	-0.001 2	-0.000 2	-0.000 6	-0.000 6	0.004 8	0.000 4

表 4 温度冷却剂、燃料的热中子吸收份额的变化和燃料的热中子裂变份额的影响
Table 4 Thermal absorption fraction of coolant and fuel and thermal fission of fuel as a function of temperature.

^6Li / mol %	冷却剂热吸收份额的变化 Thermal absorbed fraction of coolant / %	燃料热吸收份额的变化 Thermal absorbed fraction of fuel / %	燃料热中子裂变份额 的变化 Thermal fission fraction / %	热中子总吸收份额的变化 Total thermal absorbed fraction / %
0.003	-0.13	0.13	-0.11	-0.16
0.005	-0.16	0.16	-0.10	-0.16
0.007	-0.18	0.18	-0.09	-0.15
0.01	-0.21	0.21	-0.09	-0.16
0.015	-0.26	0.26	-0.09	-0.15
0.02	-0.30	0.30	-0.08	-0.13
0.026	-0.35	0.34	-0.07	-0.12
0.03	-0.38	0.37	-0.07	-0.13
0.04	-0.44	0.43	-0.06	-0.14
0.05	-0.49	0.48	-0.04	-0.12

表 5 Δf 、 $\Delta\eta$ 、 Δp 和 $\Delta\epsilon$ 对温度反应性系数的影响
Table 5 Coolant temperature reactivity coefficient as a function of Δf , $\Delta\eta$, Δp and $\Delta\epsilon$.

^6Li / mol %	$\frac{A\Delta f}{\Delta Tk_\infty^2} / 10^{-5}$	$\frac{B\Delta\eta}{\Delta Tk_\infty^2} / 10^{-6}$	$\frac{C\Delta p}{\Delta Tk_\infty^2} / 10^{-5}$	$\frac{D\Delta\epsilon}{\Delta Tk_\infty^2} / 10^{-6}$	$\alpha_T / \text{pcm}\cdot\text{K}^{-1}$
0.003	0.967 1	-2.136	-1.646	8.416	-0.051 0
0.005	1.158 0	-2.139	-1.681	8.013	0.065 1
0.007	1.338 0	-2.134	-1.537	7.539	0.341 8
0.01	1.628 0	-2.084	-1.687	7.473	0.480 4
0.015	2.103 0	-2.207	-1.565	7.440	1.061 4
0.02	2.571 0	-2.181	-1.449	7.145	1.618 4
0.026	3.110 0	-2.240	-1.415	6.578	2.128 2
0.03	3.487 0	-2.231	-1.543	6.107	2.331 2
0.04	4.385 0	-2.272	-1.704	5.690	3.023 2
0.05	5.314 0	-2.309	-1.577	4.293	3.934 9

^6Li 摩尔含量为 0.005% 时, 并非所有球床氟盐冷却高温堆冷却剂温度反应性系数都是正值。球床氟盐冷却高温堆冷却剂温度反应性系数除了与 ^6Li 摩尔浓度有关外, 还与堆芯中子泄漏有关。本文以全反射边界条件的单栅元晶胞作为计算模型时, 相当于堆芯体积无限大的球床氟盐冷却高温堆, 堆芯无中子泄漏。堆芯体积无限大与堆芯体积有限大的球床氟盐冷却高温堆相比, ^6Li 摩尔浓度相同时, 冷却剂温度反应性系数的值并不相同, 冷却剂温度反应性系数随体积的变化趋势尚需研究。

3 结语

球床氟盐冷却高温堆的冷却剂 2LiF-BeF_2 中 ^6Li 核素具有较大的微观吸收截面, 推荐 ^6Li 和 ^7Li 宏观吸收截面相当时的富集度最佳, 此时 ^6Li 摩尔含量约为 0.005%。

温度对热中子利用系数 f 的影响是引起无限球床氟盐冷却高温反应堆冷却剂温度反应性系数变化的主要原因: 冷却剂温度升高时, 随 ^6Li 摩尔含量的增加, Δf 增大, 导致冷却剂的温度反应性系数从负反馈变为正反馈, 并且随着 ^6Li 摩尔含量增大。

本文研究了 ^6Li 摩尔含量对于冷却剂温度反应性系数的影响, 实际反应堆中影响冷却剂温度反应性系数的因素众多, 比如: 堆芯中子泄漏率、可燃毒物的添加等, 因此后续需要从各方面对于冷却剂温度反应性系数进行综合研究。

参考文献

- 1 Forsberg C W, Peterson P F, Kochendarfer R A, *et al.* Design options for the advanced high-temperature reactor[R]. Paper 8026 in Proceedings of ICAPP 2008, Anaheim, California, USA, June 8 2008: 122008
- 2 Ingersoll D T, Forsberg C W, Ott L J, *et al.* Status of preconceptual design of the advanced high-temperature reactor[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 2004
- 3 Ball S J, Forsberg C W. Advanced high temperature reactor (AHTR) loss-of-forced-circulation accidents[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 2004
- 4 Williams D F, Toth L M, Clarno K T, *et al.* Assessment of candidate molten salt coolants for the advanced high-temperature reactor (AHTR)[R]. ORNL/TM-2006/12, USA: Oak Ridge National Laboratory, 2006
- 5 de Zwaan S J. The liquid salt pebble bed reactor-A new high-temperature nuclear reactor[D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 2005
- 6 Busch R D, Bowman S M. A modular code system for performing standardized computer analyses for licensing evaluation[R]. ORNL/TM-2005/135, USA: Oak Ridge National Laboratory, 2005
- 7 Petrie L M, Hollenbach D F, Williams M L, *et al.* Miscellaneous SCALE utility modules[R]. ORNL/TM-2005/39, USA: Oak Ridge National Laboratory, 2005
- 8 Fratoni M. Development and applications of methodologies for the neutronic design of the pebble bed advanced high temperature reactor (PB-AHTR)[D]. USA: University of California, Berkeley, 2008
- 9 Williams D F, Toth L M, Clarno K T, *et al.* Assessment of candidate molten salt coolants for the advanced high-temperature reactor(AHTR)[R]. ORNL/TM-2006/12, USA: Oak Ridge National Laboratory, 2006
- 10 谢仲生, 吴宏春, 张少泓. 核反应堆物理分析[M]. 西安交通大学出版社, 原子能出版社, 2011
XIE Zhongsheng, WU Hongchun, ZHANG Shaohong. Analysis of nuclear reactor physics[M]. Xi'an Jiaotong University Press, Atomic Energy Press, 2011
- 11 Cheuk Wah Lau, Christophe Demazière, Henrik Nylén, *et al.* Improvement of LWR thermal margins by introducing thorium[J]. Progress in Nuclear Energy, 2012, **61**: 48-56

Analysis of the coolant reactivity coefficients of FHRs with ^6Li contents of coolant

SUN Jianyou^{1,3} ZOU Yang^{1,2} YAN Rui¹ ZHU Guifeng¹ LI Guangchao¹
CHEN Liang^{1,3} LI Dongcang³ XU Hongjie^{1,2}

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

²(Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

³(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract Background: The ^6Li in the coolant 2LiF-BeF_2 of Fluoride-Salt-Cooled High Temperature Reactors, one type of generation IV, has a large microscopic thermal neutron absorption cross section. **Purpose:** The impact of ^6Li concentration on the coolant temperature reactivity coefficient of Fluoride-Salt-Cooled High Temperature Reactors is reached. **Methods:** The coolant temperature reactivity coefficient was performed for Fluoride-Salt-Cooled High Temperature Reactors with different ^6Li molar compositions of 2LiF-BeF_2 as coolants by using the computer codes KENO in SCALE6 (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation). **Results:** The neutron absorptive capability of ^6Li in the coolant equals to that of ^7Li when the ^6Li mole content is 0.005%. The results are given that the coolant temperature reactivity coefficient is changing from negative value to positive value with increasing of the ^6Li molar compositions of 2LiF-BeF_2 . **Conclusion:** Based on the analysis of the four factor formula, it can be concluded that the change of the thermal utilization coefficient mainly accounts for the increase of coolant temperature coefficient of reactivity.

Key words Infinite bed, ^6Li molar compositions, Macroscopic absorption cross section Σ_a , Four factors, Coolant temperature reactivity coefficient

CLC TL326