

基于蒙特卡罗方法的 TMSR-LF1 功能孔道合金套管的辐照损伤模拟与分析

刘亚芬, 于世和, 严 睿, 周 波, 邹 杨, 蔡翔舟

(中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘 要: 2 MW 液态燃料钍基熔盐实验堆(thorium molten salt reactor-liquid fuel, TMSR-LF1)功能孔道中用于隔离燃料盐的合金套管有 7 根位于堆中央石墨构件内,受到中子辐照强,辐照损伤大。针对该问题,基于 NJOY-2016 加工的多群原子离位截面,采用蒙特卡罗程序 MCNP 对 TMSR-LF1 中央石墨构件中的合金套管的中子辐照损伤进行了研究,分析了石墨构件中栅元和中心孔道套管的中子注量率分布特点,并根据结果进行了能反应中子辐照损伤量的原子离位数率 R_{DPA} 和嬗变 He 产生率的详细计算。计算结果表明,TMSR-LF1 堆芯功能套管中 R_{DPA} 最大值在中心套管的中心平面处,225°方向,为 $3.0 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$,嬗变 He 产生率最大值同样发生在中心套管,为 $2.43 \times 10^{-7} \text{ appm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1 \text{ appm} = 1 \times 10^6$)。研究结论对 TMSR-LF1 设计和堆芯优化具有重要的实际意义。

关键词: TMSR-LF1; 辐照损伤; 中子注量率; 原子离位数率; 嬗变 He 产生率

中图分类号: TL329; O411 **文献标志码:** A **DOI:** 10.12061/j.issn.2095-6223.2023.010601

Radiation Damage Simulation and Analysis of TMSR-LF1 Functional Channel Alloy Sleeves Based on Monte Carlo Method

LIU Yafen, YU Shihe, YAN Rui, ZHOU Bo, ZOU Yang, CAI Xiangzhou

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

Abstract: 2 MW thorium molten salt reactor-liquid fuel (TMSR-LF1) contains 7 alloy sleeves for isolating fuel salt in the functional channels. Functional channels are located in the graphite components of the core and suffering strong neutron radiation, leading to the greater radiation damage. In this paper, the radiation damage for the alloy sleeves is calculated and analyzed by MCNP based on the multi-group atom dissociation cross sections processed by NJOY-2016. The characteristics of neutron fluence rate distribution in the cells and sleeve of the central channel in the central graphite component of the core are analyzed. Displacement per atom rate (R_{DPA}) and transmutation helium production rate are calculated in detail in the 7 alloy sleeves according to the fluence rate distribution results. The

收稿日期: 2022-09-16; 修回日期: 2023-01-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项基金资助项目(XDA02010000); 中国科学院前沿科学重点研究基金资助项目(QYZDY-SSW-JSC016)

作者简介: 刘亚芬(1986—),女,湖南益阳人,副研究员,博士,主要从事反应堆物理计算研究。

E-mail: liuyafen@sinap.ac.cn

calculation results show that the maximum value of R_{DPA} in TMSR-LF1 core functional sleeve is $3.0 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, at the central plane of the central sleeve, in the direction of 225° . The maximum value of transmutation He generation rate is $2.43 \times 10^{-7} \text{ appm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1 \text{ appm} = 1 \times 10^6$), and it also occurs in the center alloy sleeve. The research conclusion has important practical significance for TMSR-LF1 design and core optimization.

Keywords: TMSR-LF1; radiation damage; neutron fluence rate; displacement per atom rate; transmutation helium production rate

反应堆中的结构材料在服役过程中受到长期的中子辐照,产生辐照损伤。辐照使得原子发生移位,留下一个空位,而移位原子则滞留在晶格格位之间成为间隙原子。形成的间隙原子和空位对被成为弗伦克尔缺陷,对固体的辐照有着主要作用。弗伦克尔缺陷的产生和辐照损伤的其他后果决定了辐照的物理效应,并随着应力的应用,也决定了辐照的机械效应^[1-2]。此外,中子辐照产生嬗变 He 导致合金材料脆化,是造成合金材料老化的主要机制。反应堆的安全运行需要在所有设备整个生命周期内确保其完整性,而中子辐射引起的结构材料脆化对反应堆的安全造成了威胁^[3]。

熔盐堆是采用熔融盐混合燃料循环、以石墨为慢化剂产生裂变能量的第四代反应堆,其最主要的特点是液态裂变燃料和载热剂为一体,将自身产生的裂变热传导出堆芯^[4-5]。熔盐堆的燃料盐和结构材料直接接触,导致结构材料处的中子辐照更强,引起的材料辐照损伤更严重^[6]。2 MW 液态燃料钍基熔盐实验堆(thorium molten salt reactor-liquid fuel, TMSR-LF1)是中国科学院于 2011 年启动的“未来先进核裂变能—钍基熔盐堆核能系统”战略性先导科技专项^[7]中拟定建设的熔盐堆,堆芯主要是由打有燃料盐孔道的石墨构件组装而成。TMSR-LF1 堆芯中设有 11 个合金功能孔道,用于控制棒升降、中子源放入与取出、燃料盐装卸及实验测量等,通道中设有合金套管用来将燃料盐与功能构件隔离。

本文主要计算和分析 TMSR-LF1 堆芯功能孔道中合金套管由中子辐照所造成的原子离位损伤,表现为原子离位数(displacement per atom, DPA)率 R_{DPA} 和嬗变 He 产生率(gas-helium production rate, GPR)。首先,基于 ENDF/B-VII.1 评价数据库,利用 NJOY-2016 截面加工程序得到镍基哈氏 N 合金(Hastelloy-N)和 316 型不锈钢(SS-316)两种材料的多群原子离位截面;其次,利用蒙特卡罗程序 MCNP 建立 TMSR-LF1 堆芯模型,得到套管栅元的中子注量率分布;最后,计算了合金套管的原子离

位数率和嬗变 He 产生率,并根据中子注量率分布的特征,选取中子注量率较大的套管进行详细的计算,分析得到最大的原子离位数率值以及相应区域。模拟和分析结果对于 TMSR-LF1 及后续熔盐堆的堆芯设计和优化具有参考和指导意义。

1 计算模型及方法

1.1 TMSR-LF1 堆芯

TMSR-LF1 的整个堆芯置于反应堆主容器内,由上至下主要包括上石墨层、上腔室、上支撑板、堆芯活性区、下支撑板、下腔室和下石墨层等,图 1 为 TMSR-LF1 堆芯布局示意图^[8]。

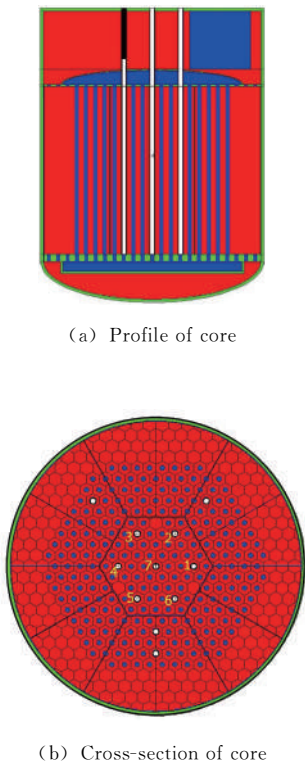


图 1 TMSR-LF1 堆芯示意图

Fig.1 Schematic diagram of TMSR-LF1

室温下,堆芯直径约为 237 cm,高度约为 320 cm。堆芯活性区位于上、下支撑板之间,由打有孔道的石墨构件组装而成,径向分为中央 1 个等边六棱柱石墨构件和周边 12 个扇形石墨构件;轴向各分为 5 层,采用石墨键定位。石墨构件上开有燃料盐孔道和功能孔道,其中,燃料盐孔道有 244 个,流道直径为 4 cm,流道中心距为 10 cm;功能孔道有 11 个,图 1(b)中 1 至 7 号孔道位于中央石墨构件中,其余位于外围扇形构件中。堆芯活性区直径约为 230 cm,高度约为 180 cm。

堆芯运行时燃料盐成分为 ${}^7\text{LiF}$ (65.00%), BeF_2 (28.34%), ZrF_4 (4.72%), UF_4 (1.55%)。裂变燃料为 ${}^{235}\text{U}$,富集度为 19.75%, ${}^7\text{Li}$ 丰度为 99.95%。640 °C 时,燃料盐密度为 $2.345\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。慢化剂石墨密度为 $1.785\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,平均线性热膨胀系数为 $3.49\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ 。燃料盐入口温度为 630 °C,出口温度为 650 °C。

1.2 计算方法

本文主要采用蒙特卡罗程序 MCNP 对 TMSR-LF1 中心石墨构件中的合金套管的中子辐照损伤进行模拟与分析。MCNP 是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory, LANL) 开发的基于蒙特卡罗方法的大型、通用多功能 3 维多粒子输运程序,可用于计算中子、光子、电子及耦合输运问题,也可用于计算临界系统 (包括次临界系统和超临界系统) 的临界本征值,在核能、辐照屏蔽、剂量学和辐射生物学领域都有广泛的应用^[8]。计算所采用的多群原子离位截面是基于评价数据库 ENDF/B-VII.1,用 NJOY-2016 截面加工程序得到^[9-10]。此外,镍基哈氏 N 合金的辐照损伤效应分析的特殊性在于,由 ${}^{58}\text{Ni}(\text{n}, \gamma)$ 反应产生的 ${}^{59}\text{Ni}$ 在热中子区域具有很高的 (n, α) 反应截面,对 DPA 和嬗变 He 产生率的贡献需加以考虑^[9]。

DPA 是一个积分参数,反映了材料响应 (位移原子) 和辐照材料的中子注量率 (大小和能谱) 等信息。原子离位数率 R_{DPA} 定义为每单位体积的原子离位数 R 除以材料的原子密度 N , 表示为

$$R_{\text{DPA}} = \frac{R}{N} = \int_{E_d/\Delta}^{E_{\text{max}}} \sigma_{\text{dis}}(E_i) \varphi(E_i) dE_i \quad (1)$$

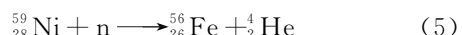
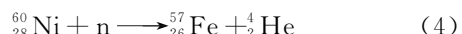
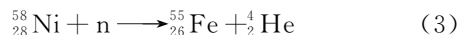
其中: $\sigma_{\text{dis}}(E_i)$ 为中子能量为 E_i 时对应的原子离位截面; $\varphi(E_i)$ 为中子注量率; E_{max} 为中子能量的最大值; E_d 为引起材料原子离位的能量阈值; Δ 为质量

因子。根据 ENDF/B-VII.1 评价数据库得到能量小于 100 MeV 的损伤能量截面 $\sigma_{\text{damage}}(E_i)$, 则原子离位截面 $\sigma_{\text{dis}}(E_i)$ 可表示为

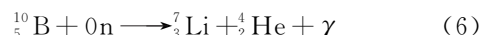
$$\sigma_{\text{dis}}(E_i) = \frac{\beta}{2E_d} \sigma_{\text{damage}}(E_i) \quad (2)$$

其中, β 为原子的离位效率,计算时取为 $0.8^{[1]}$ 。本文主要考虑可用做 TMSR-LF1 合金套管 Hastelloy-N 合金和不锈钢 SS-316 两种材料,其中,Hastelloy-N 曾用于熔盐堆实验 (molten salt reactor experiment, MSRE)^[5]。计算时,采用 NJOY-2016 程序将取自 ENDF/B-VII.1 评价数据库的合金的损伤能量截面按 TMSR-LF1 能谱特性离散成 86 群,得到 86 群原子离位截面后与 MCNP 计算得到的 86 群中子注量率进行卷积,便可求出原子离位数率^[11]。另外,为考虑由 ${}^{58}\text{Ni}(\text{n}, \gamma)$ 反应产生的 ${}^{59}\text{Ni}$ 对辐照损伤的影响,采用基于 MCNP 和燃料程序 ORIGEN2 的耦合程序 MOBAT 来实现 ${}^{59}\text{Ni}$ 核素的产生量的计算^[12]。

Hastelloy-N 合金中嬗变 He 主要由 Ni 的 (n, α) 反应产生,天然 Ni 中含 68% 的 ${}^{58}\text{Ni}$ 和 26% 的 ${}^{60}\text{Ni}$, ${}^{58}\text{Ni}(\text{n}, \gamma)$ 反应产生的 ${}^{59}\text{Ni}$ 通过 (n, α) 反应也能产生 He,表示为



此外,合金中的 ${}^{10}\text{B}$ 也是嬗变 He 的来源,表示为



本文在考虑 ${}^{10}\text{B}$ 的嬗变 He 产生率时,合金中 ${}^{10}\text{B}$ 的原子分数设置为 3×10^{-5} 。基于 ENDF/B-VII.1 评价数据库,利用 NJOY-2016 加工核数据,再利用 MOBAT 计算嬗变 He 产生率,表示为

$$G_{\text{PR}} = \int_0^{E_{\text{max}}} \sigma_{(\text{n}, \alpha)}(E_i) \varphi(E_i) dE_i \quad (7)$$

计算时,燃料和慢化剂石墨棒温度均为 640 °C,计算在 TMSR-LF1 满功率下进行,考虑 300 个等效满功率天 (effective full power days, EFPDs)。

2 计算结果与讨论

2.1 86 群原子离位截面

本文主要考虑可用做套管的 Hastelloy-N 合金及不锈钢 SS-316 两种材料,其中,Hastelloy-N 合金的材料组分如表 1 所列。合金中 P,S,C 等元素的质量分数很小,将忽略它们在中子辐照下的影响。得到 Hastelloy-N 合金及不锈钢 SS-316 的 86 群原子离位截面,如图 2 所示。由图 2 可见,两种材料的多群原子离位截面差别较小,其中,SS-316 合金原子离位截面仅在超热区(0.03~0.2 MeV)略大于 Hastelloy-N 合金原子离位截面。

表 1 Hastelloy-N 合金的材料组分

Tab. 1 Composition of material Hastelloy-N

Element	$w/10^{-2}$	Element	$w/10^{-2}$
Ni	Main components	Mn	≥ 1.0
Mo	15~18	Si	≥ 1.0
Cr	6~8	Cu	≥ 0.35
Fe	≥ 5	B	≥ 0.01
C	0.04~0.08	W	≥ 0.5
Ti+Al	≥ 0.5	P	≥ 0.015
S	≥ 0.02	Co	≥ 0.2

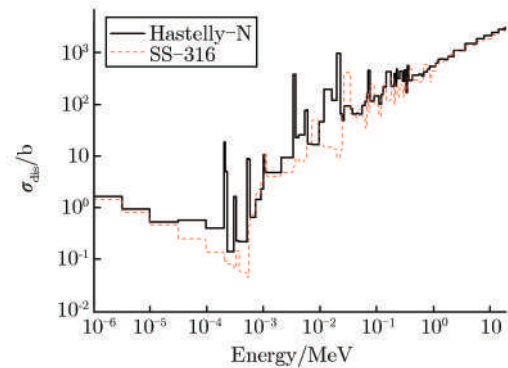


图 2 Hastelloy-N 合金及不锈钢 SS-316 的 86 群原子离位截面

Fig. 2 Comparison of displacement cross-section in 86 groups for Hastelloy-N and SS-316

2.2 中子注量率

本文仅考虑 TMSR-LF1 堆芯中央等边六棱柱石墨构件中功能孔道套管的辐照损伤情况。计算得到 TMSR-LF1 堆芯中央等边六棱柱石墨构件中六边形燃料-石墨栅元的中子注量率径向分布,如图 3 所示。其中,坐标以中心栅元圆心为原点,颜色深浅

代表中子注量率大小,栅元上的数字代表中子注量率的值(单位为 $10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。由图 3 可见,堆芯中央等边六棱柱石墨构件中,中子注量率随离中心原点距离增加而减小,最大的燃料-石墨栅元位于中心功能孔道(图 1(b)所示 7 号孔道)的 120° 方向邻近栅元,最大中子注量率为 $1.52 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。除用做安装栅元箍紧装置的 3 个栅元(图 3 中白色栅元)外,中子注量率最小的栅元对应图 1(b)中 7 个功能孔道栅元。中心功能孔道栅元中子注量率为 $1.023 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,周边 6 个均匀分布的功能孔道(图 1(b)中 1~6 号孔道)栅元中,中子注量率最大的为 1 号孔道栅元,为 $0.981 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

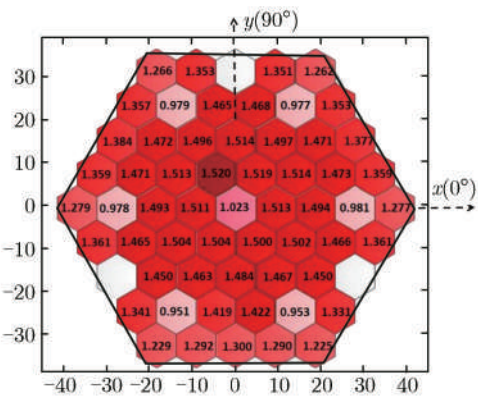
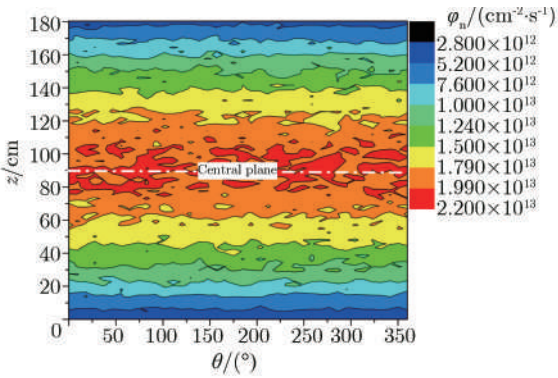


图 3 六棱柱石墨构件中六边形燃料-石墨栅元的中子注量率分布

Fig. 3 Neutron fluence rate distribution of fuel-graphite cell in hexagon graphite component

考虑到中子注量率的大小及栅元的对称分布,本文仅给出了 7 号孔道和 1 号孔道中 Hastelloy-N 合金套管(以该材料为代表)中子注量率的 θ - z 2 维分布,如图 4 所示。



(a) No. 7 functional channel

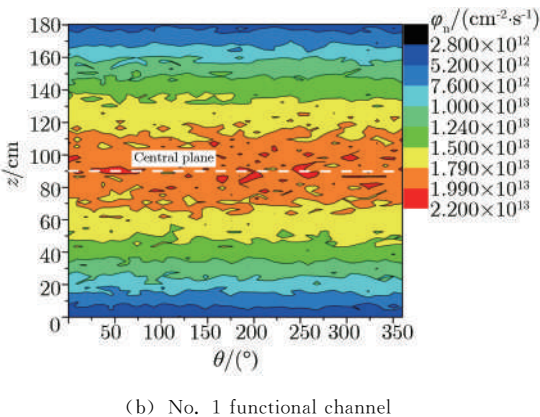


图 4 7 号孔道和 1 号孔道中 Hastelloy-N 合金套管中子注量率的 θ - z 2 维分布

Fig. 4 Neutron fluence rate θ - z distribution of Hastelloy-N tube in No. 7 and No. 1 functional channel

由图 4 可见,两个孔道套管的轴向(z 向)中子注量率分布都呈现出明显对称的特征;中心平面中子注量率最大,最大超过 $2.0\times10^{13}\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;底部和顶部平面中子注量率最小,小于 $5.0\times10^{12}\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;两个孔道套管的 θ 向中子注量率分布显示,中子注量率在 θ 向上的变化不大,仅 1 号孔道套管在 150° 和 240° 两个方向中子注量率稍微有所增加,这是由于这两个方向上排列的栅元均为燃料栅元且数量比其他方向多。

2.3 R_{DPA} 计算结果与分析

TMSR-LF1 中央六棱柱石墨构件中六边形燃料-石墨栅元呈对称分布,使套管的中子注量率除 7 号中心孔道较大外,其他 6 个孔道相差无几。由图 2 可见,超热区和快区的原子离位截面要远大于热区。计算得到中心套管所受到的中子辐照中,超热中子($0.001\sim0.1\text{ MeV}$)和快中子($>0.1\text{ MeV}$)份额为 89%,周边 1 号至 6 号套管的平均超热中子和快中子份额为 88%。1~7 号孔道的原子离位数率如表 2 所列。由表 2 可知,以 Hastelloy-N 合金套管为例,7 号中心套管 R_{DPA} 值达 $2.03\times10^{-9}\text{ s}^{-1}$,比其周边 1 号到 6 号套管 R_{DPA} 的平均值($1.96\times10^{-9}\text{ s}^{-1}$)大约 3.4%,而 7 号中心套管中子注量率比 1 号到 6 号套管大约 4.9%,可见影响 R_{DPA} 大小的主要是中子注量率。由表 2 还可知,TMSR-LF1 堆芯中 R_{DPA} 最大值在 7 号中心套管,对应 300 EFPDs, DPA 约为 0.05。本文对辐照 300 EFPDs 后, DPA 随 θ 的变化关系(即径向分布)分析仅考虑该套管。

表 2 1~7 号孔道套管的原子离位数率
Tab. 2 R_{DPA} for No. 1 to No. 7 functional channel tube
Unit: 10^{-9} s^{-1}

Channel	Material	
	Hastelloy-N	SS-316
No. 1	1.98	1.45
No. 2	1.98	1.45
No. 3	1.99	1.44
No. 4	1.91	1.42
No. 5	1.93	1.42
No. 6	1.99	1.45
No. 7	2.03	1.53

由上述分析已知影响原子离位数率 R_{DPA} 大小的主要是中子注量率,且由图 4(a)可见,中子注量率最大处位于中心平面 $z=90\text{ cm}$ 处。图 5 为 7 号中心套管 $z=90\text{ cm}$ 中心平面处辐照 300 EFPDs 后的 DPA 随 θ 的变化关系。由图 5 可见, DPA 最大处位于 $\theta=225^\circ$ 附近,采用 Hastelloy-N 合金, DPA 达到 0.08,这是由于该方向对应燃料栅元数量多,燃料体积份额较大。此外, DPA 随 θ 的变化关系呈现出明显的 60° 或 30° 间距波动,这也反映了堆芯燃料栅元的排布特征。

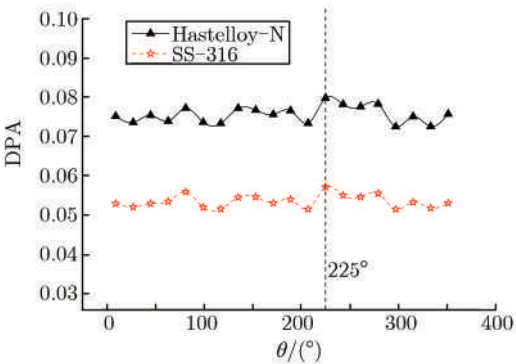


图 5 7 号中心套管 $z=90\text{ cm}$ 中心平面处辐照 300 EFPDs 后的 DPA 随 θ 的变化关系

Fig. 5 DPA of No. 7 functional channel tube vs. θ at $z=90\text{ cm}$ plane after 300 EFPDs irradiation

图 6 为 ^{58}Ni 和 ^{59}Ni 的损伤能量截面和在中心套管中的含量对比。由图 6(a)可见,在热中子区, ^{59}Ni 的原子离位截面比 ^{58}Ni 大了约 10^3 倍,但在快中子区,二者的差别不大。因此,初步认为当 ^{59}Ni 的生成量小于 ^{58}Ni 的 10^{-3} 时,可不予考虑 ^{59}Ni 对辐照损伤产生的影响。由图 6(a) 计算得到, 7 号中心

Hastelloy-N 合金套管⁵⁹Ni 的产生率为 $3.0 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,辐照 300 EFPDs 后,⁵⁹Ni 的生成量约为 7.6 mg,如图 6(b)所示。

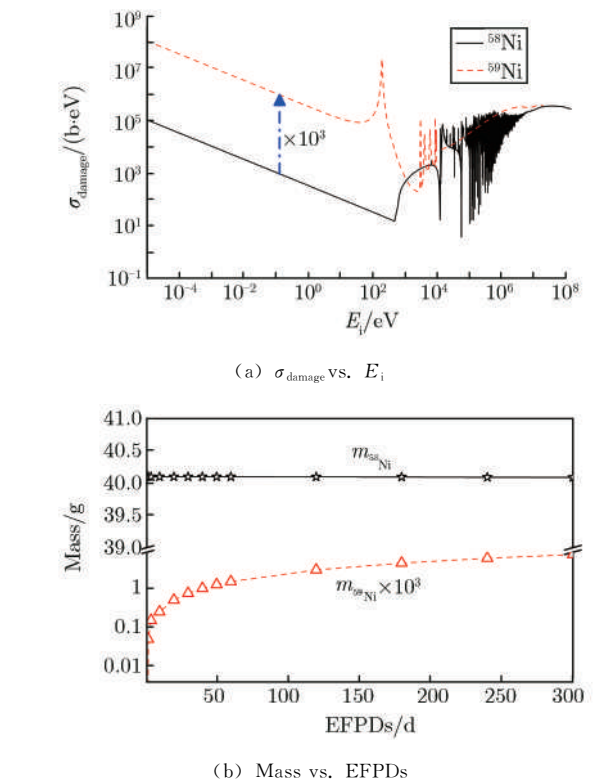


图 6 ⁵⁸Ni 和 ⁵⁹Ni 的损伤能量截面和在中心套管中的含量对比
Fig. 6 Damage energy section and content comparison of ⁵⁸Ni and ⁵⁹Ni in the center sleeve

2.4 嬗变 He 产生率计算结果与分析

嬗变 He 的产生主要针对 Ni 和 ¹⁰B,因而计算仅考虑 Hastelloy-N 合金材料。计算得到 1~7 号孔道的 G_{PR} 分别为 2.38×10^{-9} , 2.37×10^{-9} , 2.39×10^{-9} , 2.31×10^{-9} , 2.36×10^{-9} , 2.37×10^{-9} , $2.43 \times 10^{-9} \text{ appm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中,7 号中心套管的 G_{PR} 值最大,比周边 1 号到 6 号套管平均值 ($2.36 \times 10^{-9} \text{ appm} \cdot \text{s}^{-1}$) 大约 3.0%。认为和原子离位率一样,影响嬗变 He 产生率大小的主要是中子注量率。

3 总结

基于 NJOY-2016 加工的多群原子离位截面采用 MCNP 对 TMSR-LF1 的堆芯功能孔道中的合金套管的 R_{DPA} 和嬗变 He 产生率进行了模拟和分析。此外,利用耦合程序 MOBAT 考虑了⁵⁸Ni 受辐照后生成⁵⁹Ni 的量,以及⁵⁹Ni 对辐照损伤的影响。主要

得到以下结论:

- (1) TMSR-LF1 堆芯功能套管中 R_{DPA} 最大值在中心套管的中心平面处, R_{DPA} 随 θ 角度的变化差别不大,但呈现明显的 60°或 30°间距波动,最大值出现在 225°方向,为 $3.0 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$,反映了堆芯燃料栅元的排布特征。辐照 300 EFPDs 后中心 Hastelloy-N 合金套管⁵⁹Ni 的生成量约为 7.6 mg,小于⁵⁸Ni 的 10^{-3} ,其对辐照损伤的影响可以忽略。
- (2) Hastelloy-N 合金套管的嬗变 He 产生率的最大值发生在中心套管,为 $2.43 \times 10^{-7} \text{ appm} \cdot \text{s}^{-1}$,要比周围 6 个套管的嬗变 He 产生率的平均值大了约 3.0%。和原子离位率一样,影响嬗变 He 产生率大小的主要是合金套管处的中子注量率。
- (3) 单项分析 SS-316 同 Hastelloy-N 两种材料的 R_{DPA} ,差别较小,约为 20%,两种材料的抗辐照性能均能满足熔盐堆的使用要求,但在考虑 TMSR-LF1 套管选材时还应综合考虑材料的其他服役特性,如耐氟盐腐蚀性和耐高温特性等。

材料的 DPA 和嬗变 He 的产生是反应堆中结构材料在辐照环境下使用寿命的一项重要参考依据。本文关于 TMSR-LF1 功能孔道合金套管的 DPA 数率及嬗变 He 产生率的计算对于其设计和堆芯优化具有重要的实际意义,对于后续熔盐堆的研究也具备一定参考价值。

参考文献

[1] 郁金南. 材料辐照效应[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 154 - 195. (YU Jin-nan. Material Radiation Effect [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 154 - 195.)
[2] YIN W, LIANG T J, YU Q Z, et al. Radiation damage/activity calculation for CSNS target station[J]. Journal of Nuclear Materials, 2010, 398(1-3): 100 - 103.
[3] WAS G S. Fundamentals of Radiation Materials Science- Metals and Alloys[R]. Berlin: Springer, 2007.
[4] 秋德正, 张大林, 苏光辉, 等. 新概念熔盐堆的固有安全性及相关关键问题研究[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(S1): 64 - 75. (QIU Sui-zheng, ZHANG Da-lin, SU Guang-hui, et al. Research on inherent safety and relative key issues of a molten salt reactor [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(S1): 64 - 75.)
[5] HAUBENREICH P N, ENGEL J R. Experience with the molten-salt reactor experiment[J]. Nuclear Applications and Technology, 1970, 8(2): 118 - 136.
[6] 刘亚芬, 梅龙伟, 蔡翔舟, 等. 熔盐实验堆 MSRE 堆芯罐和反应堆容器辐照损伤计算与分析[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(S1): 459 - 463. (LIU Ya-fen, MEI Long-wei, CAI

- Xiang-zhou, et al. Calculation and analysis of DPA Rate in core can and reactor vessel of molten salt reactor experiment [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(S1): 459 – 463.)
- [7] 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能—TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 366 – 374. (JIANG Mian-heng, XU Hong-jie, DAI Zhi-min. Advanced fission program-TMSR nuclear energy system [J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 366 – 374.)
- [8] MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5: Volume II User's Guide [M]. New Mexico: LANL, 1994.
- [9] BROWN D. Release of the ENDF/B-VII.1 Evaluated Nuclear Data File[M]. Transactions of the American Nuclear Society, 2012: 107.
- [10] MACFARLANE R E. NJOY 99/2001: New capabilities in data processing[C]//American Nuclear Society 12th Biennial RPSD Topical Meeting. Santa Fe, NM, 2002.
- [11] PIÑERA I, CRUZ C M, ABREU Y, et al. Monte Carlo assisted classical method for the calculation of dpa distributions in solids materials [C]//IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Nuclear Science Symposium. Dresden, Germany, 2008: 2 557 – 2 560.
- [12] 朱贵凤. 氟盐冷却球床高温堆钍利用研究[D]. 中国科学院研究生院(上海应用物理研究所), 2015. (ZHU Gui-feng. Investigation on thorium used in pebble-bed fluoride salt-cooled pebble bed [D]. Knowledge Management System of Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, 2015.)
-
- 上接第 010503-15 页
- [15] 谢霖桑, 吴伟, 朱湘琴. 分布式负载平行板有界波电磁脉冲模拟外泄场的规律分析[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(5): 055002. (XIE Lin-shen, WU Wei, ZHU Xiang-qin. Regularity analysis of leakage-field from vertically polarized bounded wave electromagnetic pulse simulator with distributed load[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(5): 055002.)
- [16] 孙凤杰, 罗学金, 李小伟, 等. 基于时域有限差分法的亚纳秒有界波模拟器数值模拟及分析[J]. 电子工程师, 2008, 34(7): 34 – 37. (SUN Feng-jie, LUO Xue-jin, LI Xiao-wei, et al. Numerical analysis and design for subnanosecond EMP simulator based on finite difference-time domain method [J]. Electronic Engineer, 2008, 34(7): 34 – 37.)
- [17] 孙凤杰, 罗学金, 李小伟, 等. 亚纳秒前沿有界波模拟器传输线设计的理论分析与实验[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(5): 811 – 814. (SUN Feng-jie, LUO Xue-jin, LI Xiao-wei, et al. Theoretical analysis and experimental verification on design of transmission line for subnanosecond risetime EMP simulator [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(5): 811 – 814.)
- [18] MAZUC A. Technical challenges for E3 test facilities meeting new MIL-STD requirements//2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI). Washington, DC, 2017: 1 – 23.
- [19] Vertical electromagnetic pulse (VEMP) testing: Test Operations Procedure (TOP) 1-2-622[R]. 2009.
- [20] PACHECO P. Parallel Programming with MPI [M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufman, 1997.
- [21] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 3 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011: 239 – 244. (GE De-biao, YAN Yu-bo. Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves[M]. 3rd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2011: 239 – 244.)
- [22] GEDNEY S D. An anisotropic PML absorbing media for FDTD simulation of fields in lossy dispersive media [J]. Electromagnetics, 1996, 16(4): 399 – 415.
- [23] 李云伟, 王泽忠, 刘峰. 有界波电磁脉冲模拟器参数对传播模式的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 54 – 57. (LI Yun-wei, WANG Ze-zhong, LIU Feng. Influence of parameters of boundary electromagnetic pulse simulator on transmitting mode [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 54 – 57.)
- [24] Electromagnetic compatibility-Part 2: Environment-Section 9: Description of HEMP environment-radiated disturbance-basic EMC publication: IEC61000-2-9 [S]. 1996.
- [25] Testing and measurement techniques-test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances: IEC61000-4-25[S]. 2001.
- [26] Testing and measurement techniques; high-altitude electromagnetic impulse HEMP simulator compendium: IEC61000-4-32[S]. 2002.
- [27] 王建国, 牛胜利, 张殿辉, 等. 高空核爆炸效应参数手册[M]. 北京: 原子能出版社, 2010. (WANG Jian-guo, NIU Sheng-li, ZHANG Dian-hui, et al. Parameter Handbook of High Altitude Nuclear Detonation Effect[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010.)