

在线产氚辐照装置物理参数模拟

窦海峰, 李润东, 冷 军

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在线产氚回路对我国氚增殖模块(TBM)增殖剂候选材料的考核、氚增殖剂材料的在线释放规律研究具有重要意义, 辐照装置是在线产氚回路的关键部件。本工作采用 MCNP 程序模拟在线产氚辐照装置在堆内辐照时的物理参数, 计算结果如下: 自屏因子为 0.430, 等效反应截面为 $1.09 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$, 每日产量为 $2.8 \times 10^{10} \text{ Bq}$, 总发热功率为 8.2 kW。模拟计算结果为该装置的设计提供了必需的数据支持。

关键词: 在线产氚回路; 辐照装置; 产氚反应率; 释热

中图分类号: TL329.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)04-0443-04

Simulation of Physical Parameter for In-Pipe Tritium Breeder

DOU Hai-feng, LI Run-dong, LENG Jun

(China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-211, Mianyang 621900, China)

Abstract: It is necessary to build in-pipe tritium breeder in our country in order to assess breeder material of tritium breeder module (TBM) and to find the release law of tritium. The irradiation vessel is one of the key components of TBM. The physical parameters about in-pipe tritium breeder were simulated with MCNP code. The values of the self-shielding factor, equivalent cross-section, daily production of tritium and total heating power are separately 0.435, $1.09 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$, $2.8 \times 10^{10} \text{ Bq}$ and 8.2 kW. And they would provide necessary data for designing the irradiation vessel.

Key words: in-pipe tritium breeder; irradiation vessel; producing tritium rate; heating

在研究堆内建立在线产氚实验回路, 是检验氚增殖材料的辐照性能、氚提取工艺等是否满足氚增殖模块(TBM)设计要求的重要技术途径。国际上从 20 世纪 80 年代开始对一系列氚增殖材料性能进行研究, 为其 TBM 设计提供大量实验数据^[1-3]。我国在 20 世纪 90 年代建立了 1 条在线产氚演示回路, 目前, 该回路已随反应堆退役^[4]。为满足我国 TBM 氚增殖材

料研究需要, 拟建立 1 条先进的在线产氚实验回路, 为我国 TBM 设计提供必要参数。

堆内辐照装置是在线产氚实验回路中极其重要的部分, 是氚增殖材料在中子场中辐照和释氚的场所, 因此, 辐照装置设计直接决定了在线产氚实验回路的实际性能。在辐照装置的设计中, 主要涉及辐照条件下装置内的中子注量率分布、产氚反应率分布和释热分布 3 个技术

参数,本工作模拟计算这些参数随装置结构尺寸的变化规律。

1 模拟原理

目前,国际上氚增殖剂材料普遍采用含锂材料,产氚核反应为:



在热中子反应堆堆内产氚条件下, ${}^7\text{Li}$ 反应截面很小,氚主要是 ${}^6\text{Li}$ 和热中子反应产生的。

考虑到辐照装置的结构和堆内辐照环境比较复杂,采用 MCNP 程序^[5] 进行模拟计算,其主要优点如下。

1) 几何描述方便、灵活,适应性强,可处理三维复杂几何系统的输运问题。通过 MCNP 可对物理模型在几何上进行非常精确的描述而不采取任何近似,因此,极大地减小了由于建模而引入的误差。

2) 功能强大,可计算多种物理量。MCNP 可计算包括点注量率、界面上的粒子流及注量率、体积上的注量率及能量沉积等物理量。通过选择适当的反应号,可给出各反应(如 (n, γ) , (n, f) , $(n, 2n)$ 等)的反应率。可给出按空间、时间、能量的谱(分布)和联合分布,粒子流还可按照空间角度抽样。

3) 截面库丰富并精细。它配备的截面数据覆盖了所有常用的核素和同位素,并可根据需要选用点截面方式或多群截面方式。

2 辐照装置

辐照装置结构如图 1 所示。辐照装置在整体上采用 3 层结构,各部件和工艺管线选用 316L 不锈钢材料。外层和中间层之间为间隙

气体,中间层和内壁之间为装填产氚陶瓷微球的辐照室,最内层为载气管线和加热器。

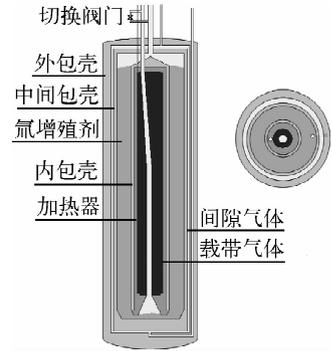


图 1 在线产氚辐照装置示意图

Fig. 1 Scheme of in-pipe tritium breeder

3 模拟计算

3.1 氚增殖剂材料厚度分析

氚增殖材料为天然锂的正硅酸盐,它的装填厚度决定了装置的产氚效率。由于 ${}^6\text{Li}$ 具有很大的热中子反应截面,在氚增殖剂内部,热中子注量率下降很快,因此,存在一较优的装填厚度。为了选择氚增殖剂材料层合适的厚度,分析了产氚量随氚增殖剂材料厚度变化的关系。为简化计算,假定入射到辐照装置的中子注量率在竖直方向上为余弦分布,计算了氚增殖剂层不同厚度条件下的宏观截面、屏蔽因子(定义为栅元体内平均中子注量率与栅元表面平均中子注量率之比)和产氚量,结果示于图 2。

由图 2a 可见,随着氚增殖剂材料层厚度的增加,宏观截面和屏蔽因子均呈下降趋势。在氚增殖剂材料层厚度达到 1 cm 后宏观截面变化趋缓,到达 2 cm 后宏观截面基本稳定,产额

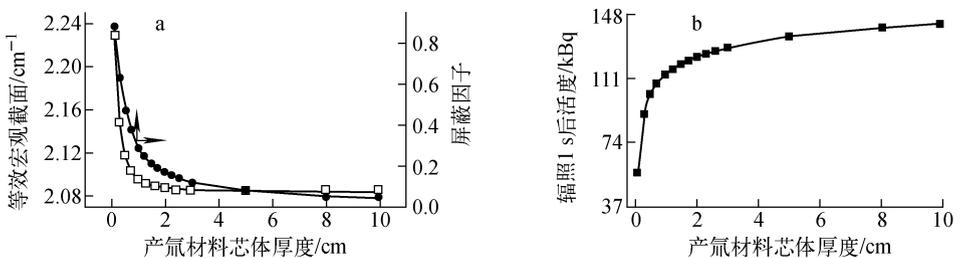


图 2 等效宏观截面及屏蔽因子(a)和辐照后活度(b)与氚增殖剂材料厚度的关系

Fig. 2 Equivalent macro-cross-section, shielding ratio (a) and activity (b) vs. tritium breeder thickness

与中子源强成线性关系。图 2b 显示,氚增殖剂材料层厚度小于 1 cm 时,随着厚度的增加,辐照后活度(产额)上升很快,之后随厚度增加,活度上升趋势变缓,最后趋于稳定,说明源中子基本都与辐照材料发生反应,即氚增殖剂材料层厚度对源中子的吸收利用率影响已很小,产额仅与中子源强有关。

综上所述,结合实际情况,堆芯内辐照位置初步定于反射层处,考虑到反应堆上的孔道尺寸,初步设定氚增殖剂材料层厚度为 1.2 cm。

3.2 计算模型

在氚增殖剂材料厚度确定后,建立了辐照装置在堆内辐照状态下的计算模型,以获得装置内

部的中子注量率、产氚率和发热率分布。堆芯组件按照设计实际尺寸进行建模,堆芯外围加入约 30 cm 厚的轻水反射层(反射层理论计算和国际反应堆计算经验均表明 30 cm 厚的轻水代替堆芯外围轻水池在很高程度上与实验数据吻合),辐照装置置于堆芯 D 孔道(图 3)位置。

基本输入数据包括:氚增殖剂为天然锂的正硅酸盐,辐照组件为多层圆柱体结构,由内到外分别是半径 13 mm 的氦气腔、2 mm 厚不锈钢、12 mm 厚氚增殖剂、2 mm 厚不锈钢、3 mm 氦气腔、4 mm 厚不锈钢,高度 600 mm,两端初步定为铝端头,辐照装置中心与反应堆中心处于同一水平面。计算模型如图 3 所示。

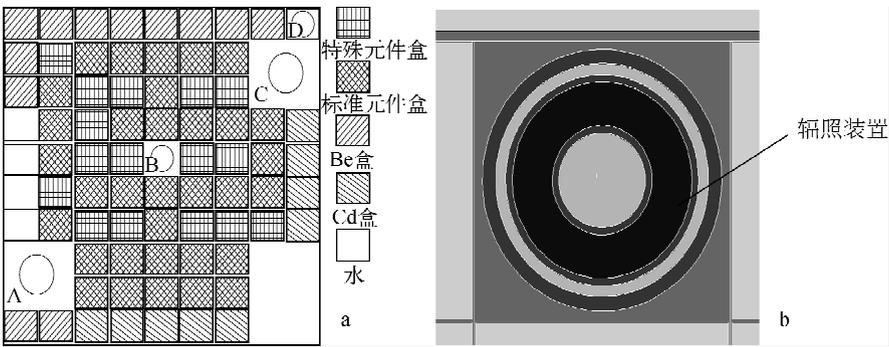


图 3 反应堆堆芯(a)及辐照装置横截面(b)

Fig. 3 Cross section of core (a) and irradiation vessel (b)

3.3 计算结果分析

根据上述计算模型,获得辐照装置竖直方向上的中子注量率分布如图 4 所示。图 4 中,能量在 10^{-8} MeV 以下的中子注量率单独标注,此能量区间的栅元平均中子注量率记数卡 F4 计算结果的统计误差为 7.8%。其他能量区间的计算结果统计误差均小于 3%。

由于产氚反应在中子低能区截面较大,所以,需着重关注产氚反应截面较大的低能区域的中子注量率分布。从图 4 可见,低能的两个能区($0 \sim 10^{-8}$ MeV 和 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ MeV)在氚增殖剂材料上、下两端注量率有明显的上升趋势,这是由于两端轻水慢化效果明显所致,这也导致组件两端部分能谱相对较软,产氚量较大,产生的反应热量较高。

图 5 示出氚增殖剂材料各分段产生热量的分布(栅元平均能量沉积记数卡 F6 记数的统

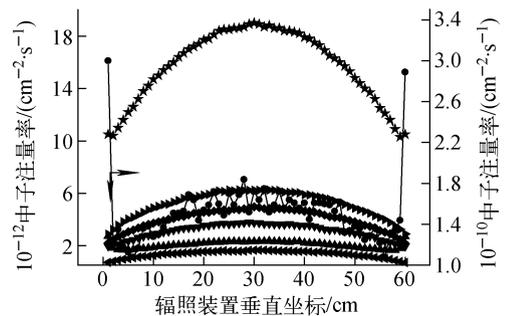


图 4 辐照组件轴向中子注量率分布

Fig. 4 Distributions of neutron fluence rate along irradiation vessel axes

- ▲ — $10^{-8} \sim 10^{-6}$ MeV; ▼ — $10^{-6} \sim 10^{-4}$ MeV;
- ◆ — $10^{-4} \sim 10^{-2}$ MeV; ◀ — $10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2}$ MeV;
- ▶ — $5 \times 10^{-2} \sim 14$ MeV; ★ — $0 \sim 14$ MeV;
- — $0 \sim 10^{-8}$ MeV

计误差为 1%~2%)。由图 5 可见,因两端能谱较软,产氚反应截面较大导致两端产生热量

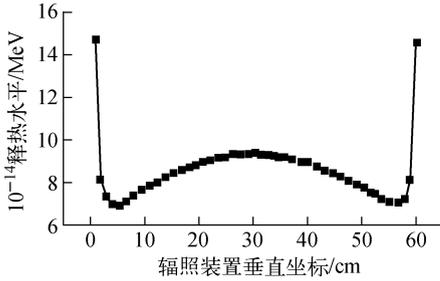


图5 辐照组件轴向产热分布

Fig. 5 Distribution of heat along irradiation vessel axes

较高;中间能谱变化较少,反应产生热量主要由中子注量率决定,所以存在一缓慢的凸起效应。

图6示出辐照组件轴向反应率分布。由图6可见,对产氚反应贡献最大的是0.01~1 eV能区的热中子,由于燃料组件两端能谱较软,0.01~1 eV能区的热中子数量较多,因此发生

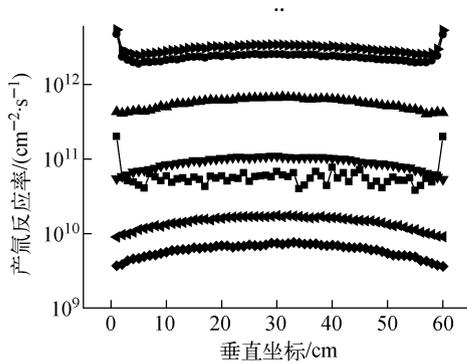
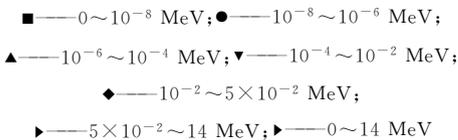


图6 辐照组件轴向反应率分布

Fig. 6 Distributions of reactivity rate along irradiation vessel axes



的产氚反应较多,释放的热量也较大。能量在0.01 eV以下中子的产氚反应截面虽比0.01~1 eV能区中子的截面高1个量级,但由于这部分中子注量率低约2个量级(图4),所以产氚贡献相对低1个量级左右。

模拟计算结果为:自屏因子,0.430;等效反应截面,1.09×10⁻²² cm²;每日产量,2.8×10¹⁰ Bq;总的发热功率,8.2 kW。平均宏观截面为0.299 cm⁻¹,1 s产量为3.245×10⁵ Bq。

4 结论

本工作分析了氚增殖剂材料厚度和能谱对氚产额、等效截面及屏蔽因子的影响,结合计算结果与辐照孔道参数综合考虑,推荐氚增殖剂的装填厚度为1.2 cm。通过模拟计算获得了在堆内辐照环境下该装置内部的中子注量率分布、产氚反应率分布和释热分布,提供了在现有设计条件下的一些基本参数,这些数据将为辐照装置的工程设计和优化及辐照过程中的安全分析提供数据支持。

参考文献:

- [1] TSUCHIYA K, HOSHINO T, KAWAMURA H. Development of advanced tritium breeders and neutron multipliers for Demo solid breeder blankets[J]. Nucl Fusion, 2007, 47: 1 300-1 306.
- [2] CHEN M, HUANG Q, ZHENG S L. Activation analysis of tritium breeder materials in the FDS-II fusion power reactor[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82: 2 641-2 646.
- [3] HAYASHI K, NAKAGAWA T, ONOSE S. Design and trial fabrication of a dismantling apparatus for irradiation capsules of solid tritium breeder materials[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 386-388: 1 083-1 086.
- [4] 沈文德,曹小华. 混合堆产氚演示回路及其氚释放实验[J]. 核动力工程,1994,6:555-562. SHEN Wende, CAO Xiaohua. In-pile tritium demonstration apparatus for hybrid reactor in China and its tritium release experiments[J]. Nuclear Power Engineering, 1994, 6: 555-562 (in Chinese).
- [5] BRIESMEISTER J F. MCNPTM — A Monte Carlo N-particle transport code, Version 4B Manual, LA-12625-M[R]. USA: LANL, 1997.