

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0034-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0034

# 聚变裂变混合堆燃耗计算及燃料成本分析

祖铁军, 吴宏春, 郑友琦, 曹良志

西安交通大学核科学与技术学院, 西安, 710049

**摘要:** 基于轻水冷却的压力管式混合堆, 采用压水堆卸载的乏燃料以及天然铀氧化物陶瓷燃料, 建立混合堆包层的换料方案, 详细计算了包层中子学性能随燃耗的变化情况, 计算结果表明, 包层在维持 3000 MW 热功率输出的同时, 可以保证氚自持 (氚增殖比  $TBR > 1.20$ ), 而每 5 a 仅需向包层添加 80 t 左右的重金属燃料。基于建立的平衡循环计算了包层采用不同燃料时的单位发电燃料成本。结果表明, 采用乏燃料和天然铀时的单位发电燃料成本分别为  $1.82 \times 10^{-3}$ 、 $1.35 \times 10^{-3}$   $\$/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

**关键词:** 聚变裂变混合堆; 平衡循环; 单位发电燃料成本

**中图分类号:** TP46 **文献标志码:** A

## Burnup Calculations and Fuel Cycle Economics Analysis of Fusion-Fission Hybrid Reactor

Zu Tiejun, Wu Hongchun, Zheng Youqi, Cao Liangzhi

School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, 710049, China

**Abstract:** Based on the light water cooled pressure tube blanket, the refueling strategies have been established using the spent nuclear fuel discharged from pressurized water reactor and natural uranium oxide, and detailed burnup calculations have been carried out. The numerical results show that only about 80 tonnes of spent nuclear fuel or natural uranium are needed every 1500 EFPD (Equivalent Full Power Day) with a 3000 MWth output and tritium self-sufficiency ( $TBR > 1.20$ ). Based on the equilibrium fuel cycle, the fuel costs of electricity of the blanket using different fuel are calculated, and the results are  $1.82 \times 10^{-3}$   $\$/(\text{kW} \cdot \text{h})$  for the case of spent nuclear fuel, and  $1.35 \times 10^{-3}$   $\$/(\text{kW} \cdot \text{h})$  for the case of using natural uranium, respectively.

**Key words:** Fusion-fission hybrid reactor, Equilibrium fuel cycle, Fuel cost of electricity

### 0 前言

混合堆由聚变中子源和次临界包层组成, 在外中子源的驱动下, 包层内很容易实现持续的链式裂变反应, 因此, 包层的燃料循环设计具有很强的随意性, 从普通压水堆 (PWR) 卸载的乏燃料、天然铀燃料等易裂变核素含量低的燃料都可以在包层内使用。

本研究基于轻水冷却的压力管式混合堆<sup>[1-2]</sup>, 直接采用压水堆卸载的乏燃料以及天然铀氧化物陶瓷燃料, 分别建立包层的换料方案, 计算了包

层的外源增殖系数  $K_s$ 、能量放大倍数  $M$  以及氚增殖比  $TBR$  等中子学参数随燃耗的变化; 研究包层的物质流, 并计算包层采用 PWR 卸载的乏燃料以及天然铀氧化物陶瓷燃料时包层的单位发电燃料成本。

### 1 包层换料方案

#### 1.1 压力管式混合堆

压力管式混合堆<sup>[1-2]</sup>采用国际热核实验堆 (ITER) 尺寸的 tokamak 作为聚变中子源, 包层采

收稿日期: 2014-04-08; 修回日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (91126005); 长江学者和创新团队发展计划 (IRT1280)

作者简介: 祖铁军 (1983—), 男, 讲师, 现主要从事核反应堆物理计算研究

用压力管式的燃料组件，冷却剂采用高压轻水，燃料采用 PWR 卸载的乏燃料或天然铀氧化物，采用  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  进行氚增殖，其中  $^6\text{Li}$  的富集度为 90%。

包层设计中要实现以下中子学性能：包层维持 3000 MW 热功率输出；包层对驱动的聚变功率的需求要小于 ITER 的平均功率（500 MW），因此，当包层功率为 3000 MW 时，要求包层的能量放大倍数大于 6；换料周期内  $\text{TBR} > 1.20$ ，以实现氚自持；本文采用的氧化物陶瓷燃料能承受的最大卸料燃耗深度~60  $\text{GW}\cdot\text{d}/\text{t}(\text{U})$ 。

### 1.2 计算工具

本文计算采用西安交通大学研制的混合堆中子学计算软件系统 NAPTH<sup>[3-4]</sup>，该软件系统采用两步法的计算流程。数据库采用基于 ENDF/B-VII.0 制作的 SHEM-361 能群结构的数据库<sup>[5]</sup>。组件计算由 DRAGON4 程序完成，组件计算后，根据组件的能谱分布，将 SHEM-361 群的细群截面归并为 17 群的少群结构<sup>[4]</sup>，以详细描述聚变中子在包层的输运过程。堆芯输运计算采用 MCNP 程序的多群功能完成。

### 1.3 采用 PWR 乏燃料作为核燃料的循环策略

PWR 乏燃料包层采用由外向内 3 批换料的设计：一个燃料循环结束后，将最靠近等离子体区的燃料卸出包层，其余 2 排燃料依次向内移动一层，将新的燃料放置在包层的最外层进入下一个循环；然后每个循环都按此方法换料。为了增加包层燃料的卸料燃耗，每个换料循环的长度设置为 5a[按 1500 有效满功率率（EFPD）计算]，因此，每批燃料在包层内停留的时间为 15 a。

按以上换料策略，包层在第 3 循环进入平衡循环。达到平衡循环后， $K_s$ 、 $M$  和 TBR 的计算结果见表 1。5 a 内包层  $M$  的最小值为 19.0，TBR 的最小值为 1.37，满足设计目标。

表 1 采用 PWR 乏燃料时平衡循环内  $K_s$ 、 $M$ 、TBR 随时间的变化

Table 1 Values of  $K_s$ ,  $M$ , TBR as a Function of Time at Equilibrium Cycle when Using PWR Spent Nuclear fuel

时间/EFPD	$K_s$	$M$	TBR
0	0.8503	27.1	1.74
300	0.8286	22.9	1.53
600	0.8227	21.9	1.48
900	0.8173	20.9	1.44
1200	0.8130	20.2	1.40
1500	0.8084	19.5	1.37

表 2 给出了每批燃料在包层经历 3 个循环后重金属质量的变化情况，每批燃料的初始质量为 79.8 t，在包层经历 3 个循环后达到的卸料燃耗为 56.4  $\text{GW}\cdot\text{d}/\text{t}(\text{U})$ ，接近陶瓷氧化物燃料所能承受的最大燃耗深度。

表 2 采用 PWR 乏燃料时每批燃料中重核素的质量变化  
Table 2 Mass Changes of Heavy Metal for Each Batch of Fuel when Using Spent Nuclear Fuel

核素种类	初始质量/t	最终质量/t	质量变化/t
$^{234}\text{U}$	$1.68 \times 10^{-4}$	$3.88 \times 10^{-3}$	$3.71 \times 10^{-3}$
$^{235}\text{U}$	$7.10 \times 10^{-1}$	$1.57 \times 10^{-1}$	$-5.53 \times 10^{-1}$
$^{236}\text{U}$	$3.12 \times 10^{-1}$	$3.23 \times 10^{-1}$	$1.10 \times 10^{-2}$
$^{238}\text{U}$	$7.80 \times 10^1$	$7.43 \times 10^1$	$-3.70 \times 10^0$
$^{239}\text{Pu}$	$5.10 \times 10^{-1}$	$7.91 \times 10^{-1}$	$2.81 \times 10^{-1}$
$^{240}\text{Pu}$	$1.94 \times 10^{-1}$	$3.29 \times 10^{-1}$	$1.35 \times 10^{-1}$
$^{241}\text{Pu}$	$1.24 \times 10^{-1}$	$2.17 \times 10^{-1}$	$9.30 \times 10^{-2}$
总次锕系核素 (MA)	$0.51 \times 10^{-2}$	$2.56 \times 10^{-1}$	$2.05 \times 10^{-1}$
总 Pu	$8.83 \times 10^{-1}$	$1.57 \times 10^0$	$6.87 \times 10^{-1}$
总易裂变核素	$1.34 \times 10^0$	$1.17 \times 10^0$	$-1.70 \times 10^{-1}$
总质量	$7.98 \times 10^1$	$7.65 \times 10^1$	$-3.30 \times 10^0$

### 1.4 采用天然铀氧化物陶瓷作为核燃料的循环策略

采用天然铀氧化物陶瓷燃料的循环策略为：初始循环 3 排燃料组件，最靠近聚变中子源的组件为天然铀燃料组件，靠近等离子体区能谱较硬，有利于燃料内易裂变核素的增殖；外围两层组件为轻水堆（LWR）乏燃料“点火”组件。经过 5 a 的燃耗，卸出最外层的组件，其余 2 层组件依次向外移动一层，将新的天然铀燃料组件仍装载到最内层。每个循环按上述方法换料，最终实现平衡循环。

按以上循环策略，包层从第 3 个循环初始装载的 LWR 乏燃料组件全部卸出包层以后，进入平衡循环。表 3 给出了达到平衡循环后每个循环内  $K_s$ 、 $M$  和 TBR 随时间的变化情况。在平衡循环内  $M$  的最小值为 15.7， $\text{TBR} > 1.19$ ，满足设计要求。表 4 给出了每批燃料经过 3 个循环后各类核素的质量变化情况。

### 1.5 物质流

在包层中直接使用 LWR 卸载的乏燃料，燃料的生产可以借鉴韩国设计的 DUPIC (Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors) 循环中燃料的加工方法<sup>[6]</sup>。DUPIC 循环中燃料的加工方法

表3 采用天然铀氧化物时平衡循环内  $K_s$ 、 $M$ 、TBR 随时间的变化

Table 3 Values of  $K_s$ ,  $M$ , TBR as a Function of Time at Equilibrium Cycle when Using Natural Uranium Oxide

时间/EFPD	$K_s$	$M$	TBR
0	0.763	15.7	1.19
300	0.766	15.8	1.19
600	0.774	16.1	1.22
900	0.779	16.3	1.24
1200	0.782	16.4	1.24
1500	0.784	16.4	1.25

表4 采用天然铀氧化物燃料时每批燃料中重核素的质量变化

Table 4 Mass Changes of Heavy Metal Foreach Batch of Fuel when Using Natural Uranium Fuel

核素种类	初始的质量/t	最终质量/t	质量变化/t
$^{234}\text{U}$	0.0	$2.37 \times 10^{-3}$	$2.37 \times 10^{-3}$
$^{235}\text{U}$	$5.69 \times 10^{-1}$	$5.91 \times 10^{-2}$	$-5.10 \times 10^{-1}$
$^{236}\text{U}$	0.0	$7.31 \times 10^{-2}$	$7.31 \times 10^{-2}$
$^{238}\text{U}$	$7.92 \times 10^1$	$7.51 \times 10^1$	$-4.10 \times 10^0$
$^{239}\text{Pu}$	0.0	$6.20 \times 10^{-1}$	$6.20 \times 10^{-1}$
$^{240}\text{Pu}$	0.0	$2.76 \times 10^{-1}$	$2.76 \times 10^{-1}$
总 MA	0.0	$1.57 \times 10^{-1}$	$1.57 \times 10^{-1}$
总 Pu	0.0	$1.21 \times 10^0$	$1.21 \times 10^0$
总易裂变核素	$5.69 \times 10^{-1}$	$8.41 \times 10^{-1}$	$2.72 \times 10^{-1}$
总质量	$7.97 \times 10^1$	$7.66 \times 10^1$	$-3.10 \times 10^0$

为氧化还原热-机械加工方法 (OREOX)，处理过程中物质的损失率假设为 0.1%。

根据 1.3 节介绍的换料方案，可以建立包层的物质流如图 1 所示。



图1 采用PWR乏燃料时的物质流

Fig. 1 Mass Flow of Blanket Using PWR Spent Nuclear Fuel

天然铀氧化物陶瓷燃料的生产可以直接使用目前成熟的氧化物陶瓷燃料的生产过程，不需要易裂变核素  $^{235}\text{U}$  的富集过程。燃料加工的环节包括铀矿石购买、转化、燃料加工等过程，每个过程的损失率设置为 0.1%。

根据 1.4 节介绍的换料方案，可以建立包层的物质流如图 2 所示。

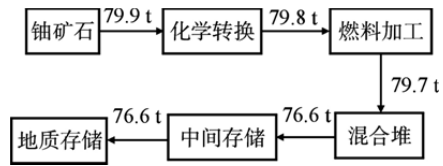


图2 采用天然铀燃料时的物质流

Fig. 2 Mass Flow of Blanket Using Natural Uranium

## 2 燃料成本分析

采用平衡循环方法研究以上 2 种循环策略的单位发电燃料成本[FCOE，即核电厂循环产生 1 kW·h 的电量所花费的燃料成本，单位为  $10^{-3}\$/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ]。根据定义，单位发电燃料成本的表达式为：

$$\text{FCOE} = \frac{\text{总的燃料成本}}{\text{总发电量}} \quad (1)$$

由此可以看出，FCOE 主要受总发电量和总的燃料成本 2 个方面因素的影响。

### 2.1 总发电量的计算

每批燃料在包层内发出的电量为：

$$E_e = 24000 \times B_u \times M_1 \times \varepsilon \quad (2)$$

式中， $E_e$  为每批燃料发出的总电量， $\text{kW}\cdot\text{h}$ ； $B_u$  为每批燃料的卸料燃耗， $\text{MW}\cdot\text{d}/\text{kg}(\text{HM})$ ； $M_1$  为每批燃料的质量， $\text{kg}$ ； $\varepsilon$  为热效率，采用压水冷却时热效率取 0.33；24000 表示 1  $\text{MW}\cdot\text{d}$  等于 24000  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

### 2.2 总的燃料成本计算

总的燃料成本由 2 个方面的因素决定：物质流中各环节重金属的总质量；各处理环节的单价。各处理环节单价采用的数据主要来源于文献[7-8]，将以上介绍的 2 种燃料循环策略中涉及到的各环节的单价汇总于表 5。

在计算各种循环每批燃料的成本时，还应考

表5 燃料循环各环节的单价及处理时间

Table 5 Price of Individual for Fuel Cycle Component and Processing Time

项目	单价/ $\$/\text{kg}^{-1}(\text{HM})$	提前或滞后时间/月
天然铀	198	-24
化学转换	9.5	-18
燃料加工	$\text{UO}_2$ 燃料	250
	OREOX 过程	675
临时存储	$\text{UO}_2$ 燃料	125
	混合氧化物 (MOX) 燃料	218
	地址处置	528

虑到燃料的处理、生产、储存等过程并不是在同一时间发生的，因此，在计算燃料成本时应考虑资金的折现率，将核燃料装入包层的时间设置为 0 时刻，其他环节提前或滞后的时间见表 5。

在包层每批燃料总成本的计算式为：

$$C = \frac{M_i P_i}{(1+r)^{t_i}} \quad (3)$$

式中， $C$  为循环燃料总成本； $M_i$  为物质流中第  $i$  步处理重核素的质量； $P_i$  为物质流第  $i$  步的单价； $r$  为折现率，取 5%/a。

### 2.3 单位燃料发电成本的计算

根据式 (1) 计算得到在包层直接使用 LWR 卸载乏燃料时的 FCOE 为  $1.82 \times 10^{-3}$  \$(/kW·h)；使用天然铀氧化物陶瓷燃料时 FCOE= $1.35 \times 10^{-3}$  \$(/kW·h)。由于天然铀没有放射性，其燃料的转化和加工费用相对较低，因此，在包层使用天然铀氧化物陶瓷燃料时 FCOE 比使用 PWR 乏燃料低，不过随着铀资源价格的增加，在水冷包层使用天然铀并没有太大的经济优势。在包层直接使用 LWR 卸载的乏燃料由于不涉及复杂的重核素分离过程，燃料的生产成本较低，所以包层的 FCOE 也相对较低。

## 3 结束语

基于高压轻水冷却的压力管式混合堆，直接采用 PWR 卸载的乏燃料、天然铀氧化物陶瓷燃料设计的包层的燃料循环策略。通过设计的换料

循环，在维持 3000 MW 热功率输出与氦自持 (TBR>1.20) 的情况下，每 5 a 包层仅需要添加 80 t 左右的 LWR 乏燃料或天然铀，降低了对铀资源的需求，而对聚变功率的要求在 ITER 的设计范围之内。采用 PWR 乏燃料和天然铀氧化物为燃料时，包层的单位发电燃料成本分别为  $1.82 \times 10^{-3}$ 、 $1.35 \times 10^{-3}$  \$(/kW·h)。

参考文献：

- [1] Wu H C, Zu T J, Qiu S Z, et al. A fusion-fission hybrid reactor with water-cooled pressure tube blanket for energy production[J]. Progress in Nuclear Energy, 2013, 64:1-7.
- [2] Zu T J, Wu H C, Zheng Y Q, et al. Burnup calculations of light water-cooled pressure tube blanket for a fusion-fission hybrid reactor[J]. Fusion Engineering and Design, 2014, 89: 793-799.
- [3] Zu T J, Wu H C, Zheng Y Q, et al. NAPTH: Neutronics analysis code system for the fusion-fission hybrid reactor with pressure tube type blanket[J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88: 170-176.
- [4] 祖铁军, 吴宏春, 郑友琦, 等. 聚变裂变混合堆中子学分析软件开发[J]. 核动力工程, 2013, 34(5): 12-15.
- [5] 祖铁军. 聚变驱动次临界能源堆中子学计算方法与概念设计研究[D]. 西安: 西安交通大学博士学位论文, 2013.
- [6] 谢仲生, Boczar P. CANDU堆先进燃料循环的展望[J]. 核动力工程, 1999, 20(6):560-565.
- [7] OECD/NEA, Advanced nuclear fuel cycles and radioactive waste management[R]. NO.5990, 2006.
- [8] Shorshire D E, Williams K A, Boore W B, et al. Advanced fuel cycle cost basis[R]. Idaho National Laboratory, INL/EXT-07-12107, 2007.

(责任编辑：马 蓉)