

不同燃料循环方案的可持续性分析与经济性分析^{*}

丁文杰, 黄 欢, 戴 涛, 郭海兵

(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: 基于核燃料循环政策技术的成熟度,选取了一次通过循环方案(OTC)、单次复用循环方案(TTC)、快堆闭式循环方案(FRC)及混合堆闭式循环方案(HRC)四种典型的核燃料循环方案进行分析。采用平衡物质流模型对不同燃料循环方案的可持续性进行研究,基于平准化电力成本计算方法对不同方案的燃料成本和乏燃料处置成本进行分析。研究表明:闭式燃料循环可极大减少核废料产生;燃料可自持的 FRC 方案及 HRC 方案可使用贫铀做燃料而不消耗天然铀;仅考虑燃料成本和乏燃料处置成本时,HRC 方案的经济性最高而 TTC 方案的经济性最差。

关键词: 燃料循环; 平衡物质流; 可持续性; 平准化电力成本; 经济性

中图分类号: TL249 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201931.190013

Sustainability and economy analysis of different fuel cycle options

Ding Wenjie, Huang Huan, Dai Tao, Guo Haibing

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on the technology maturity, four typical nuclear fuel cycle options, namely, OTC, TTC, FRC and HRC, were selected for analysis. The sustainability of different fuel cycle options was studied using the balanced mass flow model, and the fuel cost and spent fuel disposal cost of different options were evaluated based on levelized cost of electricity calculation method. The results show that closed fuel cycle can greatly reduce the production of nuclear waste. And the FRC option with fuel self-supporting as well as the HRC option can use depleted uranium without consuming natural uranium. Besides, the HRC option is the most economical while the TTC option is the worst, considering only fuel cost and spent fuel disposal cost.

Key words: fuel cycle; balanced mass flow; sustainability; levelized cost of electricity; economy

PACS: 28.41.Vx; 28.50.-k; 28.41.-i

自工业革命以来,传统化石燃料的大规模应用,排出的温室气体逐年积累,能源领域的二氧化碳排放占整个温室气体排放的比重非常大,引发严重的全球变暖问题^[1]。核能作为一种低碳能源,在我国未来能源向低碳方向的转型过程中将有着巨大的发展前景。目前不同国家选择的核燃料循环处理方式不同,但究竟孰优孰劣在学术界一直存在争论:J. Deutch^[2]和 M. Bunn 等^[3]的研究结果都倾向于支持“开式热堆一次通过”战略;而 T. Suzuki^[4]、OECD/NEA^[5]和徐铄^[6]的研究小组则认为“闭式循环”战略更值得研究和关注。我国关于核燃料循环的政策一直是采用闭式循环,经过长期的探索和研究,核燃料循环方案发展至今已有六七种之多^[7]。考虑到我国国情以及技术成熟性,本文选取了四种典型的核燃料循环方案,采用平衡物质流模型对不同方案的可持续性进行分析,基于平准化电力成本对燃料循环过程的经济性进行评价。

1 四种核燃料循环方案概述

为充分利用铀资源、实现核能可持续发展,乏燃料的回收再利用问题倍受核学界关注。我国的核燃料循环政策是闭式循环,目前比较成熟又适合我国国情的方案有:一次通过方案、单次复用方案、快堆闭式循环方案及混合堆闭式循环方案四种^[7-9]。

一次通过方案(OTC)也叫直接处置方案(以下简称 OTC 方案)。目前大部分国家的反应堆都采用这种燃

^{*} 收稿日期:2019-01-15; 修订日期:2019-02-24
基金项目:国家自然科学基金项目(L172400024);中国工程院咨询项目
作者简介:丁文杰(1990—),男,硕士,助理研究员,主要从事反应堆热工水力研究;dwjcaep@163.com。

料循环方案。该方案的优点是流程简单、无核扩散危险、风险小等。它的主要不足之处在于铀资源利用率低、核废物毒性和量大等。

单次复用方案也称为部分再循环方案和二次通过循环方案(TTC)(以下简称 TTC 方案)。除了 UOX 燃料,反应堆也可以装载 MOX 燃料。UO₂ 乏燃料经短暂的冷却后被送往回收工厂,对铀和钚进行提取回收(通常 UO₂ 乏燃料中 U 的质量分数为 99%)。回收得到的钚将被制成 MOX 燃料,送往反应堆重新用于发电。在 TTC 方案中,钚只循环利用一次,即不对 MOX 乏燃料进行回收利用。

快堆闭式循环方案(FRC)也叫(Pu+MA)完全再循环方案(以下简称 FRC 方案)。该方案的特点是分离回收乏燃料中的超铀元素(TRU),制造快堆燃料,在快堆中“反应”卸出的乏燃料再次被回收分离出超铀元素(TRU),重新制造快堆燃料,循环使用。

混合堆闭式循环方案(HRC)(以下简称 HRC 方案)中,利用热核聚变产生的大量中子驱动次临界裂变堆而释放能量,热核聚变提供强中子源,次临界裂变包层承担主要的放能任务^[10]。该包层采用天然铀或轻水堆乏燃料的锆合金为裂变燃料、轻水作冷却剂、Li₄SiO₄为氚增殖剂,后处理以干法为主且不用分离铀和钚^[11]。

2 不同燃料循环方案的可持续性分析

2.1 平衡物质流建模

为比较不同燃料循环方案的可持续性,采用平衡物质流模型对各方案的核资源利用率及放射性核废料产出量展开分析。不同的循环方案对应有不同的物质流计算模型,其计算公式也不尽相同^[7]。以 OTC 方案为例(见图 1):OTC 方案不需要计算循环后端的物料,UO₂ 组件装进热能谱轻水冷却反应堆中,经过几年辐照后,再卸出反应堆,进行“冷却贮存”后,转运到暂存库或最终贮藏库。

图 1 中每年反应堆的装料量 M 可通过其热功率、容量因子等参数计算获得。根据物质流计算示意图,已知 M 后可利用公式(1)算出反应堆的天然铀年需求量等参数

$$M_{\text{nat}} = F \frac{1}{r_{\text{use}}} = P \frac{X_p - X_t}{X_{\text{nat}} - X_t} \frac{1}{r_{\text{use}}} = M \frac{X_p - X_t}{X_{\text{nat}} - X_t} \frac{1}{r_{\text{use}}} \quad (1)$$

式中: M_{nat} 表示反应堆天然铀年需求量; F, P 分别表示铀浓缩过程的进料量与出料量; r_{use} 表示浓缩、转化和核燃料制造等过程铀的利用率,取值为 99.9%; X_p, X_t 与 X_{nat} 分别表示浓缩铀、贫铀与天然铀中²³⁵U 的浓度。

根据铀浓缩过程的进出料量可直接获得贫化铀产生量,进一步利用公式(2)可计算铀浓缩过程的分离功

$$S = P(2X_p - 1) \ln \left(\frac{X_p}{1 - X_p} \right) + T(2X_t - 1) \ln \left(\frac{X_t}{1 - X_t} \right) - F(2X_{\text{nat}} - 1) \ln \left(\frac{X_{\text{nat}}}{1 - X_{\text{nat}}} \right) \quad (2)$$

式中: S 表示分离功; T 表示贫化铀产生量。

在 TTC 方案中,对 UOX 乏燃料中的 U 和 Pu 进行回收利用,分别制成回收 UOX 和 MOX 燃料重新被反应堆辐照。轻水反应堆使用 MOX 燃料时很少数的堆完全使用 MOX 燃料作为装料,而多数堆是搭配使用 MOX 燃料组件和 UO₂ 燃料组件。本研究采用 G. De Roo 等^[12]使用的模拟数据将轻水反应堆堆芯 MOX 燃料的重量比设定为 30%。

在 FRC 方案中,根据快堆的转化比(CR)不同,可分为 $CR < 1.0$ 与 $CR \geq 1.0$ 两种情形:当 $CR < 1.0$ 时,快堆产生的 TRU 无法实现自持,快堆装料需依赖轻水堆的乏燃料,并假设 TRU(即 MA+Pu)完全利用;当 $CR \geq 1.0$ 时,快堆产生的 TRU 足以维持自持,此时 FRC 方案中仅有快堆而不再需要轻水堆的参与。

在 HRC 方案中,将混合堆卸出的乏燃料去除裂变碎片,再添加贫化铀,重新制作成燃料元件。燃料后处理采用简单干法,后处理温度取 1400 °C,去除乏燃料中沸点在 1400 °C 以下的裂变产物(Se, Kr, Rb, Cd, Sr, Sb, Te, I, Xe, Cs 等元素的各种同位素)^[11]。

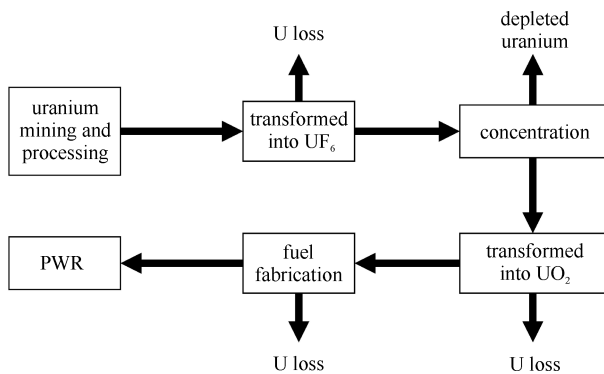


Fig. 1 Schematic diagram of mass flow calculation in the OTC option

图 1 OTC 方案物质流计算示意图

2.2 反应堆的换料参数

在进行燃料循环的平衡物料分析时,需了解各种堆型的基本参数、燃料成分及其比例和燃料循环前端、后端的物料基本计算公式。本研究共对四种核燃料循环模式进行分析,涉及到的反应堆包括三类:轻水堆、快堆以及混合堆。

在实际情况中,轻水反应堆规模各有不同,而且不同的燃料管理要求下,燃料循环方式也可能有所不同。为简易起见,以一座 1 000 MWe 的轻水反应堆为参照模型,并且只假定一套燃料循环的参数。本文的燃料规格数据直接按照 Hoffman^[13] 的研究报告数据设定,见表 1。

表 1 轻水反应堆装料质量流
Table 1 Light water reactor loading mass flow

nuclide	mass flow/(MTHM • GWe ⁻¹ • a ⁻¹)					
	PWR UO ₂		PWR MOX/UO ₂			
	load	after cooling	load		after cooling	
			MOX	UO ₂	MOX	UO ₂
HM	19.5	18.494	5.719	13.667	5.425	12.964
U(²³⁵ U)	19.500(0.825)	18.244(0.150)	5.22	13.667	5.041	12.788
Pu	0	0.225	0.491	0	0.343	0.157
MA	0	0.025	0.008	0	0.04	0.02
TRU	0	0.25	0.499	0	0.383	0.177
FP	0	1.006	0	0	0.293	0.703

目前我国尚未建成示范快堆,本文参考国际先进液态金属反应堆(ALMR)设计参数^[14-15]。研究过程中设定了不同的增殖比,包括供求平衡情况(CR=1.0)、不产生裂变材料的情况(CR=0.0)、以及介于二者之间的情况 CR=0.75 和 CR=0.5,然后将其特征按比例放大,用于模拟反应堆发电量 1 000 MWe 的情况。快堆装料质量流如表 2 所示。

表 2 快堆装料质量流
Table 2 Fast reactor loading mass flow

nuclide	mass flow/(MTHM • GWe ⁻¹ • a ⁻¹)									
	fast breeder reactor		fast burner reactor							
	CR=1.23		CR=0		CR=0.5		CR=0.75		CR=1	
	load	after cooling	load	after cooling	load	after cooling	load	after cooling	load	after cooling
HM	14.84	14.01	2.78	1.906	6.194	5.324	8.203	7.327	11.19	10.34
TRU	1.287	1.507	2.741	1.866	2.064	1.667	1.74	1.575	1.552	1.571
U	13.52	12.47	0.039	0.04	4.13	3.647	6.463	5.752	9.64	8.763
FP	0	0.831	0	0.874	0	0.87	0	0.876	0	0.857
Pu	1.287	1.507	—	—	—	—	—	—	—	—

本文裂变包层设计参数采用师学明^[11]论文中的数据:混合堆中次临界包层的初始装料为 996 t 的天然铀,换料周期为 5 年。换料方案如下:将混合堆卸出的乏燃料去除裂变碎片,再添加 5 t 贫化铀,重新制作成燃料元件,循环使用。

2.3 计算结果分析

将上述相关数据代入公式(1)中展开计算,可获得不同方案的天然铀消耗量、贫铀产生量以及核废物产生量(见图 2,图 3)。图 2 中,OTC 方案天然铀的消耗量为 168.9 t • GWe⁻¹ • a⁻¹,而 TTC 方案天然铀的消耗量为 128.6 t • GWe⁻¹ • a⁻¹,比 OTC 方案节约 23.8%的天然

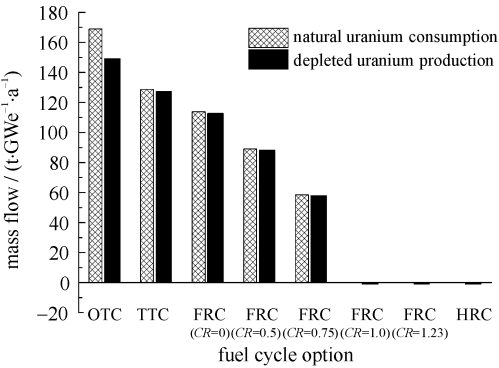


Fig. 2 Natural uranium demand and depleted uranium production

图 2 天然铀需求量与贫铀产生量

铀。FRC 方案天然铀的消耗量受增殖比 CR 的影响:当 $CR<1$ 时, CR 越大, 循环方案消耗的天然铀越少, 且 FRC 方案的天然铀消耗量始终低于 OTC 方案; 当 $CR\geq 1$ 时, FRC 方案不需要轻水堆的参与, 燃料循环过程中非但不消耗天然铀还将消耗贫铀。HRC 方案平均每年消耗 1 t 的贫铀, 同样不消耗天然铀。

图 3 给出了不同方案的核废物产生量, 可看出: 使用闭式燃料循环方案极大地减少了核废物总量。TTC 方案核废物的产生量为 $3.22\text{ t}\cdot\text{GWe}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 仅为 OTC 方案的 16.5%。但由于 TTC 方案中 MOX 燃料不再回收使用, 导致其核废物产生量仍明显高于其它闭式燃料循环。FRC 方案的核废物产生量几乎不受增殖比影响, 且与 HRC 方案相差无几, 为 $1.0\text{ t}\cdot\text{GWe}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

3 不同燃料循环方案的经济性分析

3.1 经济性分析方法及单元价格参数

为评价不同燃料循环方案的经济性, 参考 MIT 研究报告^[16]中给出的平准化电力成本(LCOE)计算方法进行估算

$$P_E = \frac{\sum_t \frac{(F_t + I_t + M_t + D_t)}{(1+r)^t}}{\sum_t \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

(3)

式中: E_t 为第 t 年的发电量; P_E 表示电价; F_t 为第 t 年的燃料成本; I_t 为第 t 年的投资成本; M_t 为第 t 年的运行及维修成本; D_t 为第 t 年的乏燃料处置费; r 为折现率; t 表示产品卖出或费用产生年数。

目前我国尚无商业运行的快堆与混合堆, 相应的投资成本及运行维修成本仍存在较大不确定性, 故本研究中不考虑这两部分的成本, 仅对前端燃料与乏燃料处置两部分成本进行分析。燃料循环过程中各单元价格的准确性是保证经济性分析结果具有可信性的基础。这些单元价格的选取较为复杂且随时间波动, 通过对 MIT, OECD/NEA 等机构发表的报告^[5,12,16-17]进行调研与总结, 获得了燃料循环过程中的单元价格(见表 3、表 4), 在一定程度上提高了研究结果的可信性和准确性。

表 3 前端燃料单元的价格
Table 3 Price of units of front-end fuel

unit	reference value/(\$ · kgHM ⁻¹)
natural uranium	100
depleted uranium	10
conversion	10 ^a
concentration	140 ^b
UOX fabrication	258 ^c
MOX fabrication	2 400
fabrication of fast reactor fuel	2 400
fabrication of hybrid reactor fuel	30 ^d

Notes:
a: The conversion price of recycled uranium is about 300% of that of the natural uranium;
b: The enrichment price of recycled uranium is about 110% of that of the natural uranium;
c: The manufacturing price of REPUOX fuel is about 107% of that of the natural uranium ;
d: The fuel for the hybrid reactor is a plate structure and requires no fine processing, so the manufacturing cost is low, but there was no mature technology. Referring to the conversion process of recycled uranium, the manufacturing cost of the hybrid reactor fuel was set to 30 \$ · kgHM⁻¹.

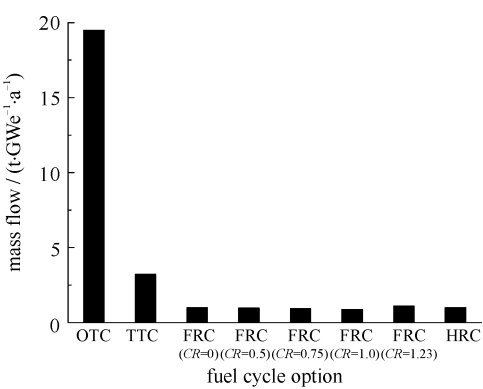


Fig. 3 Production of nuclear waste
图 3 核废物产生量

表 4 燃料处置单元的价格
Table 4 Price of units of fuel disposal

unit	reference value/(\$ · kgHM ⁻¹)
UOX temporary storage	200
MOX temporary storage	200
UOX spent fuel disposal	412
MOX spent fuel disposal	3 130
UOX HLW	190
fast reactor HLW	280
UOX reprocess	1 600
fast reactor fuel reprocess	3 200
simple dry processing	120 ^a

Notes:
a: The cost of fuel temporary cooling and storage was included in the cost of fuel reprocessing. The hybrid reactor fuel was reprocessed every five years by the simple dry process, to remove the fission products of spent fuel using the decay heat. The process was simple and required little cost, but there was no mature technology. Referring to the price of dry storage in EPRI, the price of simple dry process was set to 120 \$ · kgHM⁻¹

3.2 不同燃料循环的经济性评价

为保证不同堆型间具有可比性,反应堆利用系数均取 85%,运行时间设为 40 a。将表 4、表 5 中的单元价格参数以及表 3 的质量流数据代入到公式(4)中,可计算出燃料循环过程中每一个环节的成本

$$C_i = M_i P_i (1 + r)^{-T_i}$$
 (4)

式中: C_i 表示燃料循环中 i 单元考虑折现率后的成本; M_i 为 i 单元的质量流; P_i 表示 i 单元的价格; r 为折现率,参考 MIT 研究数据,取 7.6%; T_i 为单元对应发电的提前或滞后时间。

将燃料前端及后处理单元的成本累加,代入公式(3)中,可获得不同燃料循环方案的平准化电力成本(见图 4)。可以看出:相比于 OTC 方案,TTC 方案虽没有明显降低天然铀的消耗量,但 UOX 乏燃料的回收及 MOX 燃料的加工却极大地增加了电力成本,导致 TTC 方案平准化电力成本较 OTC 方案高出 16.0%,且明显高于其它闭式循环方案。FRC 方案的经济性与快堆增殖比 CR 有关, CR 越大则快堆换料量越大,燃料加工成本越高;而另一方面,当 $CR < 1$ 时,FRC 方案需要轻水堆的参与,且 CR 越小则轻水堆的发电占比越高,天然铀、铀转化及浓缩的成本占比越高。故 FRC 方案存在最优解,即 $CR = 1$,此时快堆刚好维持自持,不需要轻水堆的参与,且燃料加工成本较低,经济性最佳,平准化电力成本为 OTC 方案的 78.0%。HRC 方案装料量大且换料过程需对所有燃料做后处理,燃料临时储存及冷却的成本要显著高于其它方案,但 HRC 方案采用板状燃料、简便干法后处理,极大地节约了燃料加工与回收的成本,故 HRC 方案的平准化电力成本仅为 OTC 方案的 47.7%,远低于其它方案。

4 结 论

选取了四种典型的核燃料循环方案,采用平衡物质流模型对不同方案的可持续性进行分析,采用平准化电力成本计算方法对不同方案的经济性(仅考虑燃料成本和乏燃料处置成本)进行分析,得出以下结论:(1)相比于 OTC 方案,闭式燃料循环可极大地较少核废料的产生;(2)TTC 方案核废料产生量仅为 OTC 方案的 16.5%,但天然铀的消耗量依旧很大,仅比 OTC 方案减少了 $40.2 \text{ t} \cdot \text{GWe}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;TTC 方案的经济性低于其它方案,平准化电力成本较 OTC 方案高出 16.0%;(3)FRC 方案的天然铀消耗量及经济性均受快堆增殖比 CR 影响,当 $CR = 1$ 时,快堆燃料足以自持,此时 FRC 方案仅消耗贫铀,且经济性优于其它 FRC 方案,平准化

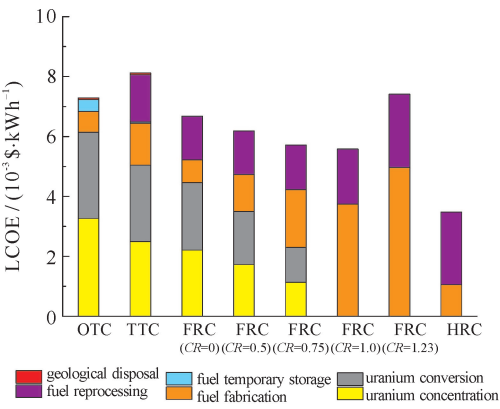


Fig. 4 Levelized cost of electricity in different cycle options
图 4 不同循环方案的平准化电力成本

电力成本仅为 OTC 方案的 78.0%;(4)HRC 方案仅消耗贫铀,且经济性最高,平准化电力成本仅为 OTC 方案的 47.7%。

参考文献:

- [1] 张小峰, 张斌. 我国中长期能源碳排放情景展望[J]. 中国能源, 2016, 38(2):38-42. (Zhang Xiaofeng, Zhang Bin. China's long-term energy carbon emission outlook. Energy of China, 2016, 38(2):38-42)
- [2] Deutch J, Driscoll M, Gray P E, et al. The future of nuclear power: An interdisciplinary MIT study[R]. 0-615-12420-8, 2003.
- [3] Bunn M, Holdren J P, Fetter S, et al. The economics of reprocessing versus direct disposal of spent nuclear fuel[J]. Nuclear Technology, 2005, 150(3): 209-230.
- [4] Suzuki T. The fast reactor and its fuel cycle developments in Japan: Can Japan unlock its development path? [J]. Science and Global Security, 2009, 17(1): 68-76.
- [5] OECD/NEA. The economics of the nuclear fuel cycle[R]. 1990066X, 1994.
- [6] 徐铼. 快堆和我国核能的可持续发展[J]. 现代电力, 2006, 2(5):106-110. (Xu Mi. The sustainable development of fast reactor and nuclear energy in China. Modern Electric Power, 2006, 2(5):106-110)
- [7] 张建平, 王琳. 我国两种核燃料循环方案的经济分析与评价[J]. 中外能源, 2015, 20(6):35-41. (Zhang Jianping, Wang lin. Economic analysis and evaluation of two nuclear fuel cycle options in China. Sino-Global Energy, 2015, 20(6):35-41)
- [8] 刘国明, 邵增. 混合能源堆裂变包层核燃料成本分析[J]. 核科学与工程, 2017, 37(1):154-160. (Liu Guoming, Shao Zeng. Fuel cost analysis for fission layer of fusion-fission hybrid reactor for energy. Nuclear Science and Engineering, 2017, 37(1):154-160)
- [9] 丁晓明. 从不同燃料循环模式分析快堆燃料循环的经济性[J]. 中国核电, 2014, 7(2):160-167. (Ding Xiaoming. Economic analysis of fast reactor fuel cycle with different modes. China Nuclear Power, 2014, 7(2):160-167)
- [10] 彭先觉, 王真. Z 箍缩驱动聚变-裂变混合能源堆总体概念研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 090201. (Peng Xianjue, Wang Zhen. Conceptual research on Z-pinch driven fusion-fission hybrid reactor. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 090201)
- [11] 师学明. 聚变裂变混合能源堆包层中子学概念研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010. (Shi Xueming. Study on the neutrons concept of the fusion-fission hybrid reactor blanket. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010)
- [12] De Roo G. Economics of nuclear fuel cycles : Option valuation and neutronics simulation of mixed oxide fuels[R]. MIT-635981218, 2009.
- [13] Hoffman E A, Hill R N, Taiwo T A. Advanced LWR multi-recycle concepts[J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2005, 93 (13): 363-364.
- [14] Quinn J E, Magee P M, Thompson M L, et al. ALMR fuel cycle flexibility[C]//Proceedings of the American Power Conference. 1993, 55 (2): 1079-1084.
- [15] Hoffman E A, Yang W S, Hill R N. Preliminary core design studies for the advanced burner reactor over a wide range of conversion ratios [R]. ANL-AFCI-177, 2008.
- [16] MIT. The future of the nuclear fuel cycle[R]. 978-0-9828008-4-3, 2011.
- [17] Hamel J. An economic analysis of select fuel cycles using the steady-state analysis model for advanced fuel cycles schemes (SMAFS)[R]. EPRI-1015387, 2007.