

## 聚变驱动次临界堆经济性分析

黄德所, 吴宜灿, 储德林, 胡丽琴

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**利用自主开发的聚变系统分析软件 SYSCODE 对聚变驱动次临界堆的经济性进行了计算和分析。首先,对典型的环径比(标准环径比)设计方案,从堆芯几何参数、物理及工程参数等两个方面分析它们与成本的关系,然后,详细分析低、标准、高环径比三套候选设计方案的经济性与中子学参数的关系。研究发现,其经济性主要取决于包层中子学参数,另外,其经济性与几何、物理及工程参数的关系在一定条件下有别于纯聚变系统。

**关键词:**聚变;次临界堆;经济学;成本分析

**中图分类号:**TM623;F062.4 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-0918(2004)02-0184-09

### Economic analysis of the fusion-driven subcritical system

HUANG De-suo, WU Yi-can, CHU De-lin, HU Li-qin

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei of Anhui Prov. 230031 China)

**Abstract:** The economic performance of the Fusion-Driven Subcritical system (FDS) is discussed. At first, as an example, the impacts of parameters, such as plasma aspect-ratio, elongation, normalized beta, on-axis toroidal field and the blanket energy-gain are analyzed on the costs of the typical case (moderate aspect-ratio) of FDS. Then, the economic characteristics of the 3 possible scenarios of FDS are estimated with respect to the neutronics parameters. The results calculated with the SYSCODE developed by the FDS team show that the cost of electricity of Scenario-1 (low aspect-ratio) and Scenario-2 (moderate aspect-ratio) of FDS is cheaper than that of pure fusion power plant at the same plant size (1 GW<sub>e</sub>). The cost of electricity of the FDS power plant depends heavily on the functions of blanket and the blanket energy-gain.

**Key words:** fusion; subcritical; economics; cost analysis

收稿日期:2004-04-05;修回日期:2004-05-16

基金项目:国家自然科学基金(10175068);中科院知识创新工程项目资助

作者简介:黄德所(1963—),男,安徽人,博士生,副教授,1984年毕业于安徽师范大学数学系,1991年复旦大学获硕士学位,从事核技术经济学研究

## 0 引言

早期完成概念设计的聚变-裂变混合堆根据其用途可分为两类,一类是聚变-裂变混合堆共生发电系统,由混合堆生产裂变燃料供其共生系统的裂变燃烧堆(Fission converter)发电;另一类是可以直接发电的混合堆<sup>[1~3]</sup>。最近几年 FDS 课题组又提出了具有多功能包层聚变中子源驱动次临界堆(Fusion-Driven Sub-critical System)的概念,并完成了该系统的框架概念设计 FDS-I<sup>[4~12]</sup>。FDS-I 堆不仅可以解决裂变电站面临的燃料短缺、裂变废料处理与公众安全等问题,而且在较低参数水平上可以实现聚变能的早期应用。

一般来说,评价核电站经济性的指标通常是电站全寿期平准化发电成本(levelized cost of electricity),简称发电成本(COE)。COE 越低,则表明其经济性越好,商业竞争性也越强。对磁约束纯聚变堆,通常情况下,COE 作为聚变堆芯重量、尺寸大小、电站规模(净电功率)与年运行成本等的函数。对于仅作为生产核燃料与发电用途的早期混合堆的 COE,还包含裂变燃料项的费用。

FDS-I 堆是具有可生产供裂变电站用的核燃料、“燃烧”裂变电站乏燃料中的高放射核废料、增殖能量以供热和发电及生产用以维持堆芯聚变反应所需的氘等四种功能的特殊混合堆系统。鉴于这些特性,其经济性还应取决于其增殖核燃料能力、嬗变核废料能力与包层能量增益因子  $Q_b$  ( $Q_b$  意义见下文,由中子学参数确定)等因素。本文从投资成本与发电成本的角度来分析 FDS-I 堆的经济性。FDS-I 增殖的氘与钚,部分用于聚变反应与嬗变废料的自持燃烧,部分用作裂变电站的燃料或者用于国防目的,这些方面所带来的附加效益在文中没有被考虑。另外,尽管 FDS-I 的增殖核燃料与处理核废料能力所带来的社会效益可能十分显著,但文中也暂不考虑,这是进一步研究的目标。文中假设这些方面的效益与裂变燃料费用相抵。

以 FDS-I 成本计算模型为基础,利用自主开发的系统分析程序 SYSCODE,以典型设计

方案为例,首先从 FDS-I 堆芯几何参数、物理及工程参数等两个方面分析它们对 FDS-I 成本的影响,然后分析 FDS-I 的三套候选设计方案的成本与中子学参数的关系,最后对 FDS-I 设计提出一些建议。

## 1 成本计算模型

本节简要介绍 FDS-I 堆的成本计算模型。FDS-I 成本主要是指发电成本、总投资成本、年运行成本等三项。

发电成本 COE 的单位通常采用美厘/(kW·h)(1 美厘等于千分之一美元)。COE 取决于电站总投资成本、年运行成本以及固定费用率、物价浮动率、电站规模与电站有效率因子等因素,COE 与这些因素的关系采用文献[13]中的模型。

总投资成本是直接成本、间接成本与金融成本的总和。由于 FDS-I 采用多功能包层,其结构、作用与定义都有别于纯聚变堆包层,FDS-I 的直接成本计算模型同文献[13],其与纯聚变电站的直接成本计算的区别主要在于 FPC(Fusion Power Core)中的反应堆大厅内设备(主要是包层)的费用计算。

包层费用计算模型:将包层分为内包层(低环径比方案中无内包层)与外包层,内包层分为四个区:第一壁、氘增殖区、反射层/结构层与真空室;外包层分为五个区:第一壁、重金属区(暂未计核废料处理功能带来的费用,也不考虑处理核废料带来的效益)、裂变产物区、结构层与真空室。它们的费用由各区体积、所含各种材料的体积份额、密度与单位成本(参数值参见表 1)所确定。FDS-I 包层费用的计算中假设氘与钚仅用于自持,故未考虑裂变燃料费用。氘自持可以通过在包层中安排适当的氘增殖剂来实现。如果仅仅利用聚变源中子来处理核废料,系统对废料的处理能力难以提高,因此加入中子增殖能力很强的裂变材料钚来增殖中子,这样可以使  $K_{eff}$  (系统的有效增殖因子)增加。为了不增加对燃料需求的压力,可利用自然界矿藏非常丰富的铀来增殖钚,使得为提高系统能力而消耗的钚可以全部来源于系统本身,达到燃料供需平衡,实现钚燃料自持。

另外磁体中极向场线圈(PFC)费用计算模型不同于文献[14](过于简化,且不符合实际),而取决于PFC位置及截面尺寸(或电流与线圈的电流密度)、密度与单位成本等;纵场线圈(TFC)的费用由其线圈体积、结构体积、密度与单位成本等确定。其他部件的费用计算模型同参考文献[15]。

间接成本与金融成本按它们占直接成本的固定比例计算。

年运行成本(百万美元/a)含年燃料费用(C<sub>F</sub>)、年运营与维护费用(C<sub>O&M</sub>)、年定期部件更换费用(C<sub>SCR</sub>)、年净化与退役费用(C<sub>D&D</sub>)、年

研发费用(C<sub>R&D</sub>)等,其计算模型参考文献[16]。模型中所用参数意义与数值见表2。

COE计算模型中的净电功率的计算与一般纯聚变电站情况类似。由于FDS-I堆芯聚变功率设计水平约为150~200 MW,系统产生的热功率主要来自于嬗变包层中的裂变反应,堆芯聚变反应产生的中子源,通过包层嬗变核废料与生产核燃料而发生裂变反应,从而达到能量增益,包层能量增益定义为<sup>[14]</sup>

$$Q_b = \frac{E_{fission}}{E_{fissive}} \cdot \frac{K_{eff}}{\nu(1-K_{eff})} \quad (1)$$

表1 FDS-I堆参考尺寸及材料

Table 1 Parameters of Blanket

分区	径向厚度/cm	材料及体积份额/%					
		RAFM 钢	W	C	B <sub>4</sub> C	Pb <sub>17</sub> Li	
等离子体	1	等离子体	100				
及第一壁	2	刮削层	15	5.0			
	3	第一壁	3				
内侧	4/6	氚增殖区	12/11				100/100
	5/7	壁	2/2	50/50			
	8	反射区	10		100		
	9	结构层	10	10			
	10	真空屏蔽	16	50			
	11	真空室壁	14	25	12.5	12.5	10
	12	真空	8				
	13	纵场线圈	62				
	14	真空	7				
	15	极向场线圈	40				
	16	真空	88/viod				
外侧	1/3/5/7	重金属区	10/10/10/10				90.5/90.5/90/90
	2/4/6/8/10	壁	2/2/2/2/2	50/50/50/50/50			
	9/11/13	裂变产物区	6/6/6		80/80/80		
	14	结构层	12	10			
	15	真空室屏蔽	35	50			
	16	真空室壁	25	25	12.5	12.5	10
	17	真空	12				
	18	纵场线圈	84				

注:TFC密度7 500 kg/m<sup>3</sup>,价格50.91 \$/kg;PFC密度7 500 kg/m<sup>3</sup>,价格82.919 \$/kg;其他材料单位成本与密度参考文献[15]。

表 2 经济学计算参数  
Table 2 Economics parameters

参数名	参数值	参数名	参数值
成本计算参考年	1992	中子流量限 $F_{wm}/(MW \cdot a \cdot m^{-2})$	10
建设期/a	6 a	厂有效率 $p_f$	0.75
电站寿命 $T_{life}$	40 a	废物处理与退役费用率 $f_{DD}$	0.2
间接成本因子 $f_{IND}$	0.929 5	废物处理与退役费用的支出率 $F_{CRDD}$	0.001 7
建设期利率(现值/不变美元)( $f_{IDC}/f_{IDC0}$ )	0.561 4/0.165 1	研发费用率 $f_{RD}$	0.0
物价上浮率(现值/不变美元) <sup>1)</sup> ( $f_{ESC}/f_{ESCO}$ )	5.0/0.0 (%/a)	研发固定支出率 $F_{CRRD}$	0.001 7
摊销率(现值/不变)( $F_{CR}/F_{CR0}$ )	0.163 7/0.086	备件费用率(账号 21~26)	0.02
运营与维护费用率 $f_{OM}$	0.04/a		

1)假设等于通货膨胀率

式中： $E_{fission}$ 为重金属核每次裂变释放的能量，约为 200 MeV； $E_{fusion}$ 为聚变中子的能量，约为 14.06 MeV； $\nu$ 为每次裂变产生的平均中子数，一般为 2~4。整个 FDS-I 堆的能量增益(总热功率与辅助加热功率之比) $Q_t = Q_p M$ ，其中  $Q_p$ 为聚变堆芯功率增益(聚变功率与辅助加热功率之比)， $M = 0.8Q_b + 0.2$ 。净电功率的计算可用以下简化公式描述：

包层生产的总热量：

$$P_{TH} = Q_p M P_{AUX} = M P_F \quad (2)$$

$$\text{总发电功率: } P_{ET} = \eta_{TH} P_{TH} \quad (3)$$

$$\text{净电功率: } P_E = P_{ET} (1 - 1/Q_E) \quad (4)$$

$$\text{其中: } 1/Q_E = f_{AUX} + 1/(\eta_{HTG} \eta_{TH} Q_p M)$$

式中： $P_{AUX}$ 为辅助加热功率； $P_F$ 为聚变功率； $Q_E$ 为工程能量获益； $\eta_{TH}$ 为热-电转换效率； $\eta_{HTG}$ 为输入堆芯功率的转化效率； $f_{AUX}$ 为维持 BOP 的电功率占总电功率  $P_{ET}$  的份额<sup>[16]</sup>。

## 2 成本分析

为适应 FDS-I 经济性分析的需求，并为其优化设计提供必要的分析工具，我们发展了聚变系统分析软件 SYSCODE。SYSCODE 是既适用于纯聚变电站也适用于聚变-裂变混合堆(如 FDS-I)优化设计的程序系统，该系统由四大功能模块构成：零维堆芯参数优化计算模块，

工程参数优化计算模块，成本分析计算模块与财务分析模块。为说明此程序系统的有效性，以 ARIES-AT<sup>[15,17,18]</sup>为算例对此程序进行了验证。ARIES-AT 是由美国加州大学 ARIES 课题组设计的先进商用纯聚变演示电站，它以先进托卡马克物理与技术为设计基础，其设计参数见参考文献[17]。我们将利用 SYSCODE 计算 ARIES-AT 的结果与参考文献[19]中的数据进行比较，吻合很好(见表 3)。在此基础上，利用该程序对 FDS-I 三套候选方案(低、标准与高环径比)(计算中聚变功率取 150 MW，净电功率为 1 000 MW，对应  $Q_b = 15.35$ )的成本(表 3 中的间接成本中含金融成本)进行了计算，结果见表 3 中间栏，右栏结果来自参考文献[18]。电站规模为电功率 1 GW 时，FDS-I 的低环径比与标准环径比方案的发电成本比 ARIES-AT 分别约低 34%、20%，高环径比方案则比 ARIES-AT 约高 21%；总投资成本比 ARIES-AT 分别约低 30%、15%，高环径比方案则比 ARIES-AT 约高 30%，但 FDS-I 对物理与工程参数水平的总体要求比 ARIES-AT 电站及 ITER-FEAT<sup>[19]</sup>要低，特别是高环径比方案中对归一化比压  $\beta_N$  的要求更低，是现有试验水平可达到的，低、标准环径比方案对  $\beta_N$  的要求是近期试验水平可达到的。

表 3 SYSCODE 成本计算结果及比较表(成本单位:百万美元)  
Table 3 Cost calculated with SYSCODE(M \$ )

参数名与符号	FDS- I			ARIES-AT	ARIES-AT
	低 A	标准 A	高 A		
	SYSCODE 计算模型输入参数				参考文献[18]
大半径 R/m	1.4	4	6	5.2	5.2
环径比 A	1.4	4	6	4	4
三角变形因子 $\delta$	0.6	0.4	0.6	0.842	0.84
归一化比压 $\beta_N/\%$	4.04	5.443	2.73	5.128	5.454
等离子体电流 $I_P/MA$	24.187 9	5.7	4.723 5	12.817	12.817
轴上纵场 $B_T T$	2.5	5.2	8.6	5.856	5.856
体积平均电子密度 $\langle n \rangle /10^{20}$	1.6	1.1	1.6	2.146	2.146
聚变功率 $P_F/MW$	150	150	150	1 654	1 759
净电功率 $P_E/MW$	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
账号名与账号	成本计算结果				参考文献[18]
地与地权 C20	10.4	10.4	10.4	10.4	10.59
建筑物与场地 C21	269.94	328.51	454.54	366.99	335.50
反应堆厂设备(RPE)C22	507.86	687.10	1294.74	908.82	900.28
透平厂设备(TPE)C23	210.67	210.70	210.89	210.68	243.03
电气厂设备(EPE)C24	120.22	120.23	120.29	120.22	110.32
其他厂用设备(MPE)C25	55.98	55.63	56.00	55.96	50.14
排热系统 C26	23.11	23.11	23.12	22.88	23.32
特殊材料 <sup>1)</sup> C27	25.60	57.44	100.28	54.94	83.77
直接成本 TDC	1 223.78	1 493.12	2 270.26	1 750.89	1 756.95
间接成本 TIDC	1 137.48	1 388.16	2 110.20	1 627.44	1 633.00
总投资成本 TCC	2 361.22	2 881.62	4 380.46	3 378.32	3 389.95
COE(Constant dollar 美厘/(kW · h)	43.06	52.16	79.04	65.51	63.53

1)SYSCODE 中含  $P_b L_b$ (体积为在包层中的体积的 5 倍)与初始氙装料费用

下面从总投资成本 TCC(Total Capital Cost)与发电成本 COE 两个方面,分别研究 FDS- I 的经济性与一些典型参数如环径比 A 及拉长比  $\kappa$ 、归一化比压  $\beta_N$  及环向磁场  $B_T$ 、每次裂变产生的平均中子数  $\nu$  及系统的有效增殖因子  $K_{eff}$  等参数的关系。由式(1)知包层的能量增益  $Q_b$  是  $\nu$  及  $K_{eff}$  的函数,在分析过程中先考虑成本与  $Q_b$  的关系。将 COE 与 TCC 看作参数 R(大半径)、A、 $\kappa$ 、 $\delta$ (三角变形因子)、 $I_P$ (等离子体电流)、 $\beta_N$ 、 $B_T$  与  $Q_b$  的函数,即:

$$COE = COE(R, A, \kappa, \delta, I_P, \beta_N, B, Q_b) \quad (5)$$

$$TCC = TCC(R, A, \kappa, \delta, I_P, \beta_N, B, Q_b) \quad (6)$$

让其中的一个或两个参数变化,其余的保持不变,分析 COE、TCC 与它们的关系。以表 3 中 FDS- I 的标准环径比方案参数为基础,讨论 COE、TCC 与 A 及  $\kappa$ 、 $\beta_N$  及  $B_T$ 、 $Q_b$  的关系。

### 2.1 环径比 A 与拉长比 $\kappa$ 对成本的影响分析

下面就 FDS- I,利用 SYSCODE 计算分析 A 及  $\kappa$  的变化对 FDS- I 成本的影响,分析中假设净电功率  $P_E$  为定值(设为 1 000 MW)。

式(5)、(6)中的参数  $R$ 、 $\delta$ 、 $I_p$ 、 $\beta_N$ 、 $B$  作为输入变量。设  $A$  及  $\kappa$  的变化范围分别为  $2 \sim 6$ 、 $1.5 \sim 3$ ，图 1 是利用 SYSCODE 的计算结果绘制出的 COE、TCC 与  $A$  及  $\kappa$  的等值线图。结果表明，若固定  $\kappa$ ，则 COE 与 TCC 随环径比  $A$  的增加都在减小。 $A$  的增加，导致大、小半径  $R$  与  $a$  都减小，最终引起 COE 与 TCC 的下降。在高  $A$  区 ( $5 \sim 6$ )，COE 与 TCC 对  $A$  的敏感性不如中等  $A$  区 ( $2 \sim 5$ ) 的强。若固定  $A$ ，则  $\kappa$  的增加引起装置垂直方向的尺寸增大，从而导致 COE 与 TCC 的上升，但升幅很小。

FDS-I 堆的辅助加热功率为 50 MW，等离子聚变增益  $Q_p$  在  $2 \sim 3$  左右，要求聚变功率

在  $150 \sim 200$  MW、中子壁负载在  $0.5 \text{ MW/m}^2$  左右。考虑等离子体聚变增益与中子壁负载的限制， $A$  的选取范围宜为  $4 \sim 5$ ， $\kappa$  的范围宜为  $1.65 \sim 2.0$ ，此时对于 1 GW 净电功率规模的 FDS-I，其 COE 在  $52.7$  美厘/(kW·h) 以下，TCC 不超过 29.1 亿美元。

### 2.2 归一化比压 $\beta_N$ 、环向磁场 $B_T$ 对成本的影响分析

COE、TCC 与  $\beta_N$  及  $B_T$  的关系计算结果如图 2 所示 ( $P_E$  仍设为 1 000 MW)。COE 几乎不取决于  $\beta_N$  的值，TCC 则与其无关； $B_T$  的变化对 COE 与 TCC 的影响也不大。

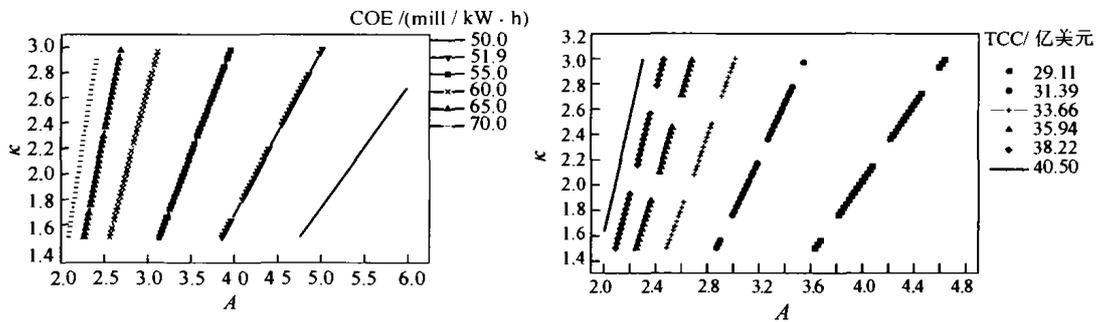


图 1 COE、TCC 与  $A$  及  $\kappa$  的关系图  
Fig. 1 COE、TCC as a function of  $A$  and  $\kappa$

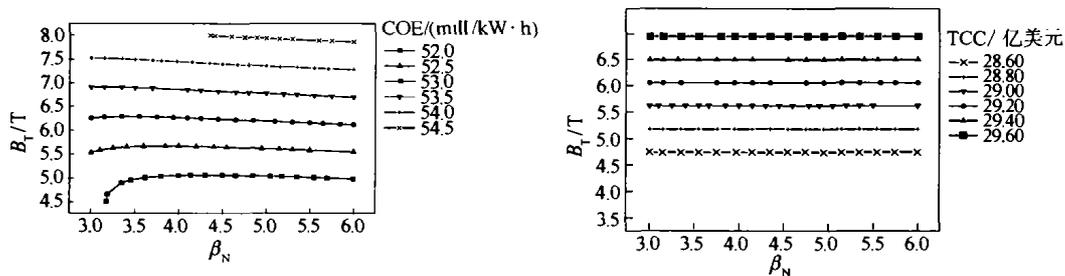


图 2 COE、TCC 与  $\beta_N$  及  $B_T$  的关系图  
Fig. 2 COE、TCC as a function of  $\beta_N$  and  $B_T$

对于纯聚变电站，其净电功率主要取决于聚变功率（一般在 1 000 MW 以上），通过改善  $\beta_N$  与  $B_T$  的值可以获得很高的聚变功率，从而得到高的净电功率，降低了 COE（但 TCC 升

高）。而对于 FDS-I，其聚变堆芯产生的聚变功率（对文中给定  $\beta_N$ 、 $B_T$  的范围，小于 300 MW）较小，改善  $\beta_N$  与  $B_T$  的值虽然也可以提高聚变功率，但幅度不大，所以净电功率主要取决

于  $Q_b$ 。 $Q_b$  的值,由  $\nu$  及  $K_{eff}$  的值确定,文中已经假定不考虑由于系统的增殖核燃料与处理核废料能力而产生的经济性,所以对于固定的  $B_T, \beta_N$  的变化不影响 TCC,对 COE 的影响也不明显;对于固定的  $\beta_N, B_T$  增加,虽增加了 TFC 的费用,但 TFC 费用只占 TCC 的 3%,所以  $B_T$  的变化对 TCC 与 COE 的影响都不大。在这种情况下, $\beta_N$  与  $B_T$  的设计值可以根据设计目标与目前或近期可达到的物理与技术水平来选择。

### 2.3 中子学参数对成本的影响分析

就 FDS-I 而言,聚变功率一定的条件下(设为 150 MW),由式(1)~(4)可知,电站规模  $P_E$  则完全取决于包层能量增益因子  $Q_b$ 。而

$Q_b$  由每次裂变产生的平均中子数  $\nu$  与系统的有效增殖因子  $K_{eff}$  确定。放入包层的裂变材料决定着  $\nu$  的值, $K_{eff}$  的值由裂变材料的种类及其份额所确定。 $K_{eff}$  是反应中子学能力的重要参数,它决定着包层中子增殖能力。由式(1)表示的  $Q_b$  与  $K_{eff}$  及  $\nu$  的关系,首先分析 COE、TCC 与  $Q_b$  关系。用 SYSCODE 计算 FDS-I 三套候选方案的  $P_E$ 、COE、TCC 随  $Q_b$  变化关系结果如图 3 所示。表 4 则给出几个典型的  $\nu$ (等于 2、2.5、3、3.5、4) 与  $P_E$  的值所对应的  $K_{eff}$ 、 $Q_b$ 、TCC 与 COE。从图 3 与表 4 可以看出,固定  $\nu$ ,  $K_{eff}$  增加,电功率  $P_{ET}$  与净电功率  $P_E$  也增加, TCC 增加;另一方面,净电功率  $P_E$  增加,COE 减小。

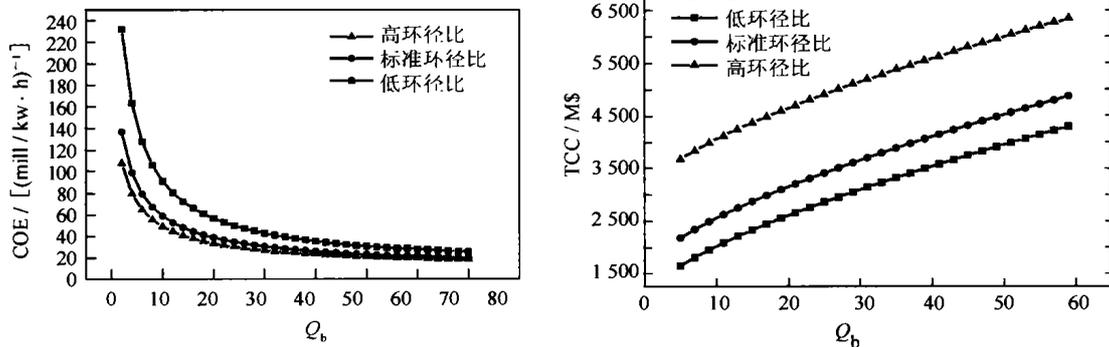


图 3 COE、TCC 与  $Q_b$  的关系图  
Fig. 3 COE、TCC as a function of  $Q_b$

对于低环径比方案,只要  $Q_b$  不小于 8.1, COE 就不会超过 ARIES-AT,  $Q_b$  大于 30 时, COE 不到 ARIES-AT 的 1/2。从 COE 与 TCC 两项指标来看,  $Q_b$  的值宜为 40 左右,此时 TCC 约为 35.6 亿美元,与 ARIES-AT 的相当, COE 约为 23.9 美厘/(kW·h),仅为 ARIES-AT 的 36%, 电站规模约为 2.7 GW 电功率;对于标准环径比方案,要获得较低 TCC 与 COE,  $Q_b$  的值宜为 30 左右,此时 TCC 约为 36.4 亿美元,与 ARIES-AT 的相当, COE 约为 32.6 美厘/(kW·h),约为 ARIES-AT 的 50%, 电站规模约为 2.0 GW 电功率;对于高环径比方案的  $Q_b$  值不宜大,约为 20,此时 TCC 约

为 46.4 亿美元,比 ARIES-AT 高约 38%, COE 约为 63.3 美厘/(kW·h),与 ARIES-AT 的相当,电站规模约为 1.3 GW 电功率。

另外,  $Q_b$  的值低于 2 时, COE 太大(至少 317 美厘/(kW·h),没有商用价值;  $Q_b$  的值高于 80 时,尽管 COE 很小(至多 23 美厘/(kW·h),但 TCC 太大(至少 50 亿美元),投资风险大,另一方面,包层功率密度大大超过设计水平,在设计中应不考虑此情况。

### 3 结束语

由上分析可知,电站电功率规模一定的条件下, FDS-I 堆的总投资成本与发电成本随环

表 4 中子学参数与净电功率、成本关系

Table 4 The relationship between costs, net-electricity and neutronic parameters

$P_E/\text{MW}$		500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000
对应的 $Q_b$ 值		8.1	15.35	22.6	29.85	37.12	44.35	51.45	58.7
低 A	TCC/M\$	1 895	2 361	2 756	3 112	3 215	3746	4 032	4 313
	COE/[mill · (kW · h) <sup>-1</sup> ]	66	40	33	28	27	23	21	20
	与 ARISE-AT 的 COE 之比/%	100	61	51	43	41	34	32	30
标准 A	TCC/M\$	2 415	2 881	3 276	3631	3 960	4268	4 555	4 836
	COE/[mill · (kW · h) <sup>-1</sup> ]	88	52	39	33	28	26	23	22
	与 ARISE-AT 的 COE 之比/%	134	80	60	50	43	39	36	33
高 A	TCC/M\$	3 914	4 380	4 758	5132	5 459	5766	6 053	6 334
	COE/[mill · (kW · h) <sup>-1</sup> ]	141	79	58	46	39	35	31	29
	与 ARISE-AT 的 COE 之比/%	216	120	89	70	60	53	48	44
$K_{\text{eff}}$ 设计值	$\nu=2.0$	0.53	0.68	0.76	0.81	0.84	0.86	0.88	0.90
	$\nu=2.5$	0.59	0.73	0.80	0.84	0.87	0.89	0.90	0.91
	$\nu=3.0$	0.63	0.76	0.83	0.86	0.89	0.90	0.92	0.93
	$\nu=3.5$	0.67	0.79	0.85	0.88	0.90	0.92	0.93	0.94

径比的增加而减小,随拉长比的增加而增加,但增幅不明显。COE 对归一化比压  $\beta_N$  的敏感性非常弱,几乎与  $\beta_N$  的变化没有关系,之所以 COE 有微弱的变化,是因为年运行成本因  $\beta_N$  增加,导致中子壁负载增加而微弱上升,  $\beta_N$  的变化不影响总投资成本。

同等规模的 FDS-I 对聚变堆芯的要求比纯聚变堆对堆芯要求低得多,接近现有或近期可达到聚变实验装置的水平。FDS-I 低环径比与标准环径比方案总投资成本、发电成本都比先进商用纯聚变电站低得多,电站规模为 1 GW 电功率时,总投资成本比 ARIES-AT 分别约低 30%、15%,发电成本比 ARIES-AT 分别约低 34%、20%,有很强的商业竞争性。若考虑由嬗变核废料带来的效益,则其商用前景将更加诱人。

聚变功率确定后, TCC 与 COE 完全取决于包层能量增益因子  $Q_b$ 。  $Q_b$  越高,净电功率越大, TCC 越高, COE 越低。但对于 FDS 双冷嬗变包层,若  $Q_b$  太高,包层功率密度过大。为满足 FDS-I 双冷嬗变包层热工水力学参数设计要求<sup>[12]</sup>,  $Q_b$  的值不超过 50。  $Q_b$  的值决定于包层中每次裂变产生的平均中子数  $\nu$  与系统的

中子增殖有效因子  $K_{\text{eff}}$ 。在嬗变包层设计过程中,一方面要考虑 FDS-I 堆的经济性,即 TCC 与 COE 都不宜过高,其经济性要接近同等功率的商用裂变电站;另一方面更要兼顾包层的嬗变核废料的能力。上述计算表明:

1) 对于低环径比方案,  $Q_b$  的值宜为 40 左右,此时 TCC 约为 36 亿美元,与 ARIES-AT 的相当, COE 约为 24 美厘/(kW · h),仅为 ARIES-AT 的 37%,电站规模约为 2.7 GW 电功率。

2) 对于标准环径比方案,  $Q_b$  的值宜为 30 左右,此时 TCC 约为 36 亿美元,与 ARIES-AT 的相当, COE 约为 33 美厘/(kW · h),仅为 ARIES-AT 的 50%,电站规模约为 2.0 GW 电功率。

3) 对于高环径比方案的  $Q_b$  值不宜大,约为 20,此时 TCC 约为 46 亿美元,比 ARIES-AT 约高 38%, COE 约为 63 美厘/(kW · h),与 ARIES-AT 的相当,电站规模约为 1.3 GW 电功率,要想获得低的 COE,只有增加  $Q_b$  值,但要以更大的 TCC 为代价。

FDS-I 的成本计算比较复杂,因为处理核废料的经济效益目前难以用货币形式表示,在 SYSCODE 中没有考虑该项费用,此项费用将

在以后的分析中考虑,其他项费用的账号与计算模型采用目前通用的模式。

### 参考文献:

- [1] Berwald DH, et al. An economics method for symbiotic fusion-fission electricity generation system[J]. Nuclear Technology/Fusion, 1981, 1: 128.
- [2] Hatayama A, et al. Basic requirements for a 1000-MW (electric) Class Tokamak Fusion-Fission Hybrid Reactor and Its Blanket Concept[J]. Fusion Technol, 1994, 26: 27.
- [3] Yican Wu, Progress in fusion-driven hybrid system studies in China[J]. Fusion Eng Design, 2002, 63~64.
- [4] 吴宜灿,等. 聚变驱动次临界堆概念设计研究[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1): 72~80
- [5] Wu YC, et al. The Fusion-Driven Hybrid System And Its Material Selection[J]. Nucl Materi, 2002, 307~311 (2): 1629~1636.
- [6] 储德林,等. 聚变驱动次临界堆聚变堆芯参数设计与分析[J]. 2004,核科学与工程, 24(1): 81~86.
- [7] Zheng Shan-liang, et al. Neutronics Optimization of LiPb-He Dual-cooled Fuel Breeding Blanket for the FDS [J]. Plasma Physics and Technology, 2002, 4(4).
- [8] Qunying Huang, et al. Study of Irradiation Effects in China Low Activation Martensitic steel CLAM[C]. The 11th Inter. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-11), Kyoto, Japan, 2003, 10.
- [9] 柯严,等. 聚变驱动次临界堆双冷嬗变包层结构设计与分析[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1): 87~92.
- [10] 郑善良,等. 聚变驱动次临界堆双冷嬗变包层中子学参数设计与分析[J]. 核科学与工程, 2004, 24(2): 165.
- [11] 黄群英,等. 聚变堆低活化马氏体钢发展综述[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1): 56~64.
- [12] 汪卫华,等. 聚变驱动次临界堆 FDS 双冷嬗变包层热工水力学参数设计与分析[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1): 93~96.
- [13] 黄德所,等. 聚变电站中工程能量增益与质量功率密度对发电成本的影响[J]. 核科学与工程, 2004, 24(2): 153.
- [14] Sheffield J, et al. Cost Assessment of A Generic Magnetic Fusion Reactor[J]. Fusion Technol, 1986, 9: 199.
- [15] Bathke CG, et al. Systems studies[Z].
- [16] KRAKOWSKI RA. Simplified Fusion Power Plant Costing; A General Prognosis and Call For 'New Think' [J]. Fusion Technol, 1995, 27: 135.
- [17] Raffraya AR, et al. Advanced power core system for the ARIES-AT. power plant. <http://www-ferp.ucsd.edu/LIB/REPORT/ARIES-AT/FINAL/aat-4-fpc.pdf>.
- [18] ARIES SYSTEM-ARIES-AT[Z], [www-ferp.ucsd.edu/miller/index3.shtml](http://www-ferp.ucsd.edu/miller/index3.shtml).
- [19] ITER-FEAT - Outline Design Report, Report by the ITER Director [Z]. ITER Meeting, Tokyo, January 2000. [http://fire.pppl.gov/ODR\\_IC\\_final.pdf](http://fire.pppl.gov/ODR_IC_final.pdf).
- [20] Galambos JD, et al. Commercial Tokamak Reactor Potential With Advanced Tokamak Operation[J]. Nuclear Fusion, 1995, 35: 551.