

聚变 - 裂变能源混合堆可行性及在我国核能发展中作用的分析

刘成安, 师学明

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

[摘要] 简要论述了核能在我国能源发展战略中的地位及聚变 - 裂变混合堆在核能持续发展中的重要作用。对以不久的将来即可实现的 ITER 聚变装置作驱动堆芯、天然铀水冷裂变系统作包层的混合堆做了细致的分析。这种混合堆型可以实现 GW_e 级净电功率输出, 年造钚 1 656 kg, 支持 2.68 个同功率压水堆电站对易裂变燃料的需要。初步的经济评估说明, 混合堆电的成本是同功率压水堆电成本的 1.67 倍; 而在不计燃料成本的情况下, 混合堆与压水堆组合系统电的成本是同功率压水堆电成本的 1.18 倍。考虑到一般压水堆需消耗大量的天然铀, 加上铀浓缩成本, 混合堆与压水堆组合系统电的成本, 与压水堆电的成本是可以相比拟的。

[关键词] 混合堆; 聚变堆芯; 裂变包层; 易裂变核; 可转换核

[中图分类号] TL64.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)03-0024-05

1 前言

我国人口众多, 国民经济持续高速发展, 相应的对能源的需求也必将会以较快速度增长。现在我国能源消耗仍处于较低的水平, 2006 年我国一次能源消耗量仅为 24.6×10^8 t 标煤, 人均消耗量为 1.9 t 标煤, 只有发达国家的 1/6 左右。估计到 2020 年, 我国的能源消耗将达 $26 \times 10^8 \sim 27 \times 10^8$ t 标煤 ($7.6 \times 10^{19} \sim 7.9 \times 10^{19}$ J)。现有的石油和天然气等燃料也只能维持 30 ~ 40 年(见表 1)。煤储量丰富, 可用数百年, 但其对环境的污染却是严重的问题, 它的利用包含着很大的风险。水能、太阳能、风能也只能起辅助能源的作用。而核能则是一种相对干净, 具有巨大开发潜力的能源。我国自 1991 年秦山一期 300 MW 压水堆并网发电以来, 已积累了 80 堆年核电反应堆运行的经验。我国核科技力量雄厚, 并有一定的资源基础, 核能可望成为我国能源结构中重要的组成部分。

现在作为能源的动力堆是以消耗 ^{235}U 为燃料的

热中子堆, ^{235}U 在天然铀中仅含 0.71%。功率 1 GW_e 的核电站, 1 年要消耗 800 kg 左右的 ^{235}U 。其寿期按 35 a 计, 在寿期内要消耗 28 t ^{235}U , 相当于 5 600 t 天然铀(在铀浓缩时还有 0.2% 残留在尾料中)。我国政府已决定 2020 年将运行核电 40 GW_e, 在建 18 GW_e。58 GW_e 核电共需天然铀 32.5×10^4 t。预计 2050 年需运行核电站 240 GW_e^[1], 共需天然铀 1.34×10^6 t, 我国的铀储量缺口是很大的。如此看来, 要用以消耗 ^{235}U 为主的堆型的核电来满足我国长远对核电的需求是不可能的, 因此应尽快开发以 ^{238}U 或 ^{232}Th 为燃料的增殖堆是非常必要且急需的。

表 1 中国能源资源

Table 1 Energy sources in China

燃料类型	储量
煤/t	1.9×10^{11}
石油/t	3.3×10^9
天然气/m ³	4.3×10^{13}
天然铀/t	5.0×10^5
含 ^{235}U /t	3 500

快增殖堆和聚变 - 裂变混合堆都可实现大幅度

[收稿日期] 2010-04-20

[作者简介] 刘成安(1936—), 男, 河南潢川县人, 研究员, 研究方向为核科学技术; E-mail: liu_chengan@iapcm.ac.cn

提高铀、钍资源利用率的目的。快增殖堆是一种高功率密度的堆型,具有一定增殖(转化)核燃料的能力。虽然快增殖堆已发展了近半个世纪,但其经济性、安全性,特别是核燃料的增殖能力,至今仍存在许多问题,有待进一步进行科学研究加以解决。鉴于近年来聚变技术,无论是磁约束聚变,还是惯性约束聚变都取得了长足的进步,中国对 MCF (magnetic confined fusion, 磁约束聚变) 和 ICF (inertial confinement fusion, 惯性约束聚变) 都给予了大力支持,这不仅对纯聚变,而且对今后的能源布局都将产生深远的影响。聚变系统是贫能、富中子的系统,每产生 1 MeV 能量,释放 4.5×10^{-2} 个中子;而裂变是富能、贫中子系统,每产生 1 MeV 能量,仅释放 7×10^{-3} 个中子,相差近 7 倍。聚变与裂变相耦合系统则是一种高效释放核能的系统。

现在已具有了利用聚变产生的高能中子驱动核裂变的现实可能性。聚变中子通过裂变包层使聚变能的能量得以放大的同时,还可利用其多中子的特性由可转换核生产易裂变核燃料,以支持技术成熟、经济性好的轻水堆生产核动力,混合堆还可嬗变处理或利用裂变堆产生的核废料。可见,混合堆不仅可促进向聚变能源过渡,而且可支持裂变能源的持续发展。

2 聚变驱动堆芯及其现实可能性

按照等离子体的约束原理可将聚变分为磁约束聚变与惯性约束聚变两种。

1) 磁约束聚变:处于高温状态下的聚变燃料,在很高的动压强作用下会迅速膨胀,为维持聚变反应所需的等离子体密度,必须将聚变物质等离子体加以约束。由于带电粒子在磁场中趋于沿磁力线运动,利用特殊设计的磁场位形,可将高温等离子体稳定地约束在一个真空容器中。利用这一原理实现的受控核聚变,称之为磁约束聚变。

经过长时间的谈判,2005 年决定在法国的 Cadarache,由日本、欧洲、俄罗斯、美国、中国、韩国、印度共同建一磁约束热核聚变试验堆(international thermonuclear experimental reactor, ITER),其主要参数如下^[2]:大半径 $R = 6.2 \text{ m}$;等离子体小半径 $a = 2.0 \text{ m}$;拉长比 $k = 1.85$;环向磁场 $B_t = 5.3 \text{ T}$;等离子体电流 $I_p = 15 \text{ MA}$;辅助加热和电流驱动功率 $P_{\text{heat}} = 73 \text{ MW}$;平均电子密度 $\bar{n}_e = 1.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$;平均离子温度 $T_i = 8.9 \text{ keV}$;峰值聚变功

率 $\hat{P}_{\text{fusion}} = 500 \text{ MW}$;聚变增益 $Q = \frac{\hat{P}_{\text{fusion}}}{P_{\text{heat}}} \geq 5$ (稳态运行)。

该装置预计 10 年建成。主要目标是实现 $Q \geq 10$,维持连续燃烧时间 400 s,用欧姆变压器感应驱动等离子体,产生和维持 $Q \geq 5$ 的稳态非感应驱动燃烧的等离子体,即用波或高能粒子来驱动电流的等离子体。这个目标的实现,即可证实 MCF 的科学可行性和初步的工程可行性。它的技术指标即可满足作为混合堆聚变驱动堆芯的要求。

2) 惯性约束聚变:ICF 是利用外源来驱动氘氚靶丸,压缩、加热聚变核材料,使之发生聚变反应,依赖物质的惯性延长聚变反应的时间,释放能量。利用这一原理实现的受控核聚变,称之为惯性约束聚变。

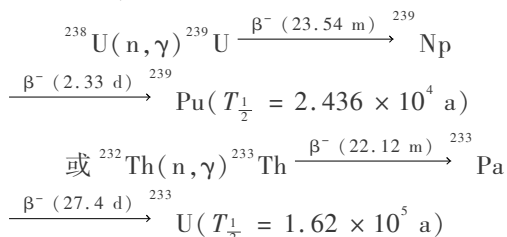
美国的国家点火装置 NIF 于 2010—2011 年点火,设计的点火靶丸增益 G (聚变放能与输入激光能量之比)为 20 左右。NIF 电能转化为激光能的效率只有 0.75%。计划于 2020 年建一个激光惯性约束聚变装置(laser inertial fusion engine, LIFE),争取实现聚变能源演示。激光能量 1.4 MJ, $G = 25 \sim 30$,每秒打 10 ~ 15 发,实现聚变功率为 300 ~ 500 MW^[3]。

Z 箍缩 ICF 也制定了 2035 年左右实现聚变演示的计划。

混合堆设计结果表明,在不远的将来即可实现的聚变装置,作为混合堆聚变驱动器的堆芯,其技术参数已可满足建造百万千瓦级混合堆电站的要求。

3 混合堆裂变包层及其设计的举例

裂变包层的功能主要有 3 点:a. 聚变产生的高能中子与包层中的易裂变材料或可转换材料发生裂变反应,释放能量。包层还可设计为处理核废料,将核废料中长寿的放射性同位素嬗变为短寿命的同位素,其中的超铀同位素还可作为包层的核燃料产生能量;b. 富余的中子与 ^{238}U 或 ^{232}Th 通过



反应过程,产生易裂变核材料 ^{239}Pu 或 ^{233}U ;c. 中子与锂反应产生聚变堆芯所需的氚。

现以 ITER 聚变参数作混合堆驱动源为例,对

混合堆可能达到的水平做了分析。

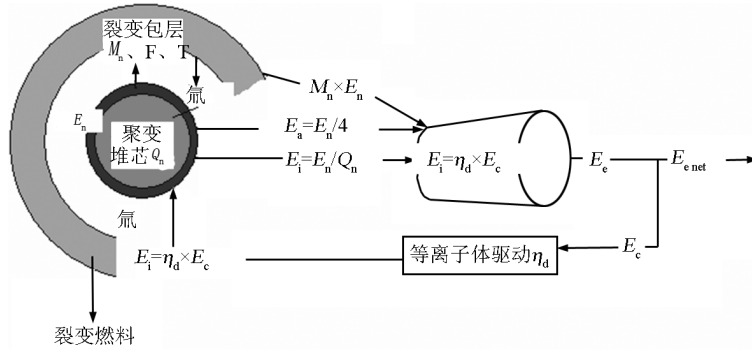


图1 聚变裂变混合堆的能量循环

Fig. 1 Energy flow diagram of a fusion-fission hybrid

主要参数如下:

1) 堆芯参数: Q_n 为聚变中子能量与加热等离子体入射能量之比 E_n/E_i ; E_n 为聚变中子能量; E_i 为加热等离子体入射能量, $E_i = E_c \times \eta_d$; E_c 为用于加热等离子体的电能; η_d 为电能加热等离子体的效率; E_a 为聚变产物 α 粒子携带的能量。

2) 包层的特征参数: M_n 包层中聚变中子能量放大倍数 $[14.1 + E_i(C + S)]/14.1$; C 为进入包层的一个中子引起可转换核的裂变数; S 为进入包层的一个中子引起可裂变核的裂变数。

聚变堆芯参数: 辅助加热和电流驱动功率 $P_{heat} = 73 \text{ MW}$, $Q = 5.5$, 取聚变功率 $P_{fusion} = 400 \text{ MW}$, 由此得聚变中子功率为 $P_n = \frac{4}{5} P_{fusion} = 320 \text{ MW}$ 。等离子体驱动效率 $\eta_d = 0.65$, 得到加热等离子体消耗的电功率 $P_i = \frac{P_{heat}}{\eta_d} = \frac{73 \text{ MW}}{0.65} = 112.3 \text{ MW}$ 。

包层设计主要取决于易裂变材料 (^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{233}U)、可转换材料 (^{238}U 、 ^{232}Th)、结构材料及影响中子谱的慢化剂、载热剂材料等的成分、结构和布局。现以天然铀为燃料、水作慢化剂载热剂、锂为造氚材料, 设计能源兼生产钚的混合堆包层为例, 来阐明混合堆的设计和特性。

为维持聚变堆芯氚消耗的需要, 堆芯消耗一个氚, 包层产生的氚要略多于 1, 包层设计的参数如下^[4]: 每个聚变中子在包层中与锂反应的造氚数 $T = 1.15$; 每个聚变中子在包层中与可转换核反应引起的裂变 $C = 0.6$, 每个聚变中子在包层中与易裂变核反应引起的裂变数 $S = 0.035$; 每个聚变中子在包层中通过 $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 中子增殖数 ε ; 每个聚变中子在包层中的寄生俘获和泄漏数 P , 取 $\varepsilon - P = 0$ 。

33; 每次裂变放能 $E_f = 200 \text{ MeV}$; 可转换核每次裂变平均产生的中子数 $\hat{\nu} = 3.9$; 易裂变核每次裂变平均产生的中子数 $\nu = 2.9$; 易裂变核的俘获与裂变之比 $\alpha = 0.72$; 热能转化为电能的效率 $\eta_{t-e} = 0.33$; 包层对堆芯的覆盖率 $\Delta\Omega = 0.75$ 。

由上述参数算出每个聚变中子在包层中的造钚数:

$$F = (1 - T) + (\varepsilon - P) + C(\hat{\nu} - 1) + S[\nu - 2(1 + \alpha)] = 2.163$$

聚变中子能量在包层中的倍增: $M_n = \frac{1}{14.1} [14.1 + E_i(C + S)] = 10$; 这个值与我们在包层中子学设计计算中得的结果是一致的。

考虑到包层对堆芯的覆盖率 $\Delta\Omega = 0.75$ 的因素。每个聚变中子在包层中的实际造钚数应为 $F_{net} = \Delta\Omega [F + (\frac{\Delta\Omega - 1}{\Delta\Omega})T] = 1.335$, 假定混合堆运行时间负载因子 $\eta_c = 0.7$, 则 $1 \text{ MW} \cdot \text{a}$ 中子能量为 14.1 MeV 的聚变中子数为: $N_n = 0.97726 \times 10^{25} \text{ n/a}$; 包层中每年净产生的钚量: $M_{Pu} = 3.8763 F_{net} P_n \text{ kg/a} = 1656 \text{ kg/a}$ 。

系统的净输出总热功率:

$$P_{heat}^{tot} = \left\{ \frac{1}{Q} + \frac{1}{4} + \frac{1}{14.1} \cdot [14.1 + E_i(C + S)] \right\} P_n = 3294 \text{ MW}_t$$

输出总电功率:

$$P_{e,c}^{tot} = \left\{ \frac{1}{Q} + \frac{1}{4} + \frac{1}{14.1} \cdot [14.1 + E_i(C + S)] \right\} P_n \eta_{t-e} = 1087.2 \text{ MW}_e$$

净输出总电功率:

$$P_{e,net} = \left\{ \frac{1}{Q} + \frac{1}{4} + \frac{1}{14.1} \cdot$$

$$[14.1 + E_f(C + S)] \{ P_n \eta_{t-e} - \frac{P_n}{\eta_d Q} =$$

998 MW。

可见以 ITER 聚变系统作堆芯,驱动以天然铀为燃料、水为载热剂的包层,在维持氦自持的情况下可能达到 GW_e 级电功率输出,同时年产钷 1 656 kg。

4 混合堆与轻水堆组合能源系统

如上所述,ITER 驱动的天然铀包层混合堆,在输出 GW_e 级电功率的同时还可转化出 1 656 kg 钷。如果将这些钷用于技术成熟、经济性好的压水堆,可支持几个电功率 GW_e 级的压水堆电站呢? 1 GW_e 电功率需 3 GW_t 热功率,不难算出热功率 3 GW_t 的轻水堆,相当于每年消耗约 1 000 kg 易裂变燃料。由于易裂变核裂变释放出的中子可使堆中部分可转换核(如 ²³⁸U) 转换成易裂变核,它在堆中补充了对易裂变燃料的消耗。对轻水堆,转换比 $C = 0.6 \sim 0.8$ 。初始易裂变核装料 m_0 消耗以后,从可转换核产生 $m_0 C$ 个易裂变核,这 $m_0 C$ 个核的消耗,又产生 $m_0 C^2$ 个易裂变核,经一个完全循环链,转换核材料利用的总量为:

$$m_{tot} = m_0 C + m_0 C^2 + m_0 C^3 + \dots = \frac{m_0 C}{1 - C}$$

如果维持 3 GW_t 热功率,年消耗易裂变燃料 1 000 kg,则由 $m_0 + \frac{m_0 C}{1 - C} = 1 000 \text{ kg}$ 可得每年消耗外加易裂变燃料量为 $m_0 = 1 000(1 - C) \text{ kg}$ 。如取堆外年供料量 590 kg^[5],混合堆年产的钷 1 656 kg 可维持 1 656/590 kg = 2.8 个电功率 GW_e 级电站对易裂变燃料的需要。即该混合堆组合系统共可产生电功率 3.8 GW_e 电力。

5 天然铀混合堆组合系统经济性初估

混合堆的经济性评估是很困难的,因为它涉及多种不定因素。阿贡国家实验室的科学家提出了一个合理的评估方法^[6]。因为一种堆型核电站的主要的成本是其排热、载热系统的成本,排热、载热系统成本与其热功率成正比。

根据上述原则,混合堆包层与功率成比例的成本,加上与聚变功率成比例的成本,可得出混合堆的成本。即混合堆成本为 $X_{f-h} = B + \lambda F$ 。 B 为快增殖堆成本; F 为聚变功率份额; λ 为聚变系统成本。

从混合堆包层将热载出较困难,但水冷包层与钠冷快增殖堆相比排热不会更难。假定其与钠冷快增殖堆排热成本相当,设压水堆电站的成本为 1,则

根据较早的估计取 $B = 1.5$,聚变系统成本 $\lambda = 2.5$,在笔者的模型中包层功率占混合堆热功率 3 000 MW 的 5/6,聚变功率占 1/6,则混合堆成本 $X_f = 1.5 \times \frac{5}{6} + 2.5 \times \frac{1}{6} = 1.67$ 。

由此可将混合堆与压水堆组合系统电站与普通压水堆电站的成本做一粗略、定性的比较。一座混合堆支持 2.8 座压水堆,则混合堆组合系统功率成本是压水堆的 $\frac{1.67 + 2.8}{3.8} = 1.18$ 倍。这里没有计

及燃料的成本,混合堆的燃料成本很低,可以忽略,而 3.8 个电功率 GW_e 级压水堆电站,其寿期按 35 a 计,需 20 000 t 以上天然铀,另加铀浓缩费用,使混合堆组合系统成本可与压水堆成本相比拟。

核燃料的价格可以帮助确定设计混合堆的类型,设计以生产可裂变材料为主的堆,还是以生产电为主的堆。在混合堆成本较高的情况下,应考虑设计以核材料生产为主的堆,降低混合堆成本高的影响,反之应设计为以生产电能为为主的混合堆。

6 结语

贫能量富中子的热核聚变与贫中子富能量的裂变相耦合,是一种高效释放能量的系统。以 ITER 作热核聚变驱动堆芯,水冷天然铀裂变系统作包层的混合堆,可以实现 GW_e 级净电功率输出,年造钷 1 656 kg,维持 1 656/590 kg = 2.8 个电功率 GW_e 级压水堆电站对易裂变燃料的需要。初步的经济分析表明,同功率的混合堆成本是压水堆的 1.67 倍,混合堆与压水堆组合系统的成本是压水堆成本的 1.18 倍。计及核燃料的成本,混合堆的成本与压水堆的成本相当,它在支持裂变能源持续发展,促进裂变能源向聚变能源过渡中具有重要的作用。

参考文献

- [1] 徐 銖. 我国快堆发展战略目标研究[J]. 核科学与工程, 2008, 28(1): 21 - 22.
- [2] 冯开明. 可控核聚变与 ITER 计划[J]. 现代电力, 2006, 23(5): 82 - 88.
- [3] Lawrence Livermore National Laboratory [EB/OL]. <https://lrsers.llnl.gov>
- [4] Barrett B J. The fusion - fission hybrid as an alternative to the fast breeder reactor [R]. US: LA - 8503 - MS UC - 80, September, 1980: 6 - 18.
- [5] 连培生. 原子能工业[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [6] Hans A Bethe. The fusion hybrid[J/OL]. Physics Today, 1979 (5): 49 - 51.

The role of fusion-fission hybrid reactor in development of China nuclear energy resources

Liu Cheng'an, Shi Xueming

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

[**Abstract**] The strategic position of the nuclear energy in the development of China energy resources and the important role of the fusion-fission hybrid reactors in the sustained development of nuclear energy resources are analyzed. The hybrid reactor with ITER fusion device as driving reactor core which could be realized in near future and water-cooled natural uranium fission system as blanked is discussed. With hybrid reactor the 1 GW_e net electrical power output and yearly fissile fuel production 1 656 kg that could meet need of 2. 68 PWR (pressurized water reactors) for fissile fuel could be attained. A rough economic estimation predict that capital cost of hybrid reactor is 1. 67 times as large as capital cost of same power PWR without including the cost of nuclear fuel; the electrical cost of combined system of hybrid reactor and PWR is 1. 18 times of electrical cost of same power PWR. Considering cost of fissile fuel that PWR consume, the electricity cost of combined system of hybrid reactor and PWR could be competitive with PWR electricity cost.

[**Key words**] hybrid reactor; fusion reactor core; fission blanked; fissile nucleus; fissionable nucleus

(上接 18 页)

New concept of design for high concrete face rockfill dams

Li Nenghui

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

[**Abstract**] Based on analysis of experimental design for concrete face rockfill dams and its imperfection, a new design concept of high concrete face rockfill dams which includes stability safety design, seepage safety design and deformation safety design in accordance with different topographical and geological condition and construction materials was put forward here. Moreover, the importance of deformation harmonization principle was emphasized. The principle and main points of stability safety design, seepage safety design and deformation safety design was also presented here.

[**Key words**] concrete face rockfill dam; design concept; stability safety; seepage safety; deformation safety