

# 核能与聚变裂变混合能源堆

彭先觉 师学明<sup>†</sup>

(北京应用物理与计算数学研究所计算物理实验室 北京 100088)

**摘要** 未来 20 年将是核能发展的一个关键时期. 2035 年左右, 快堆有望投入商用; 磁约束聚变、激光聚变、Z 箍缩聚变也都有演示堆计划. 聚变演示堆存在纯聚变与聚变裂变混合能源堆两种可能, 而后者可降低聚变功率, 缓解高能中子对材料的辐照损伤. 另外, 氘氚聚变供能时间有限. 文章介绍了混合能源堆的概念. 能源堆可充分利用铀资源, 且后处理不涉及铀钚分离, 有很好的防扩散性能. 裂变堆、聚变堆、能源堆共同发展, 可望使核能在不太长的时间内获得大规模应用, 并可为人类提供千年以上的能源供应.

**关键词** 快堆, 聚变, 裂变, 演示堆, 聚变裂变混合能源堆

## Nuclear energy and fusion-fission hybrid reactor for pure energy production

PENG Xian-Jue SHI Xue-Ming<sup>†</sup>

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

**Abstract** The next two decades are very critical for nuclear energy development. The commercial fast reactor may be in use around 2035; it is also possible that magnetically confined fusion, laser fusion and z-pinch fusion will be demonstrated at that time. A fusion demonstration reactor can be a pure fusion or a fusion-fission hybrid. The latter can lower the fusion power and mitigate the radiation damage of high energy neutrons to materials. On the other hand, the supply of deuterium and tritium as fuel for fusion can only last a few hundred years. We describe here a hybrid for pure energy use which can make full use of uranium and is proliferation resistant, as no separation of uranium and plutonium is needed in post-processing. The union of fission, fusion, and a pure energy hybrid can contribute to the large scale use of nuclear energy in the near future, and supply mankind for more than a thousand years.

**Keywords** fast reactor, fusion, fission, demonstration reactor, fusion-fission hybrid for pure energy production

### 1 引言

核能包括裂变能和聚变能. 裂变能以铀或者钚为燃料, 聚变能以氘氚或氘氦为燃料. 现在的商用反应堆都是以铀为燃料的热中子反应堆, 它只能利用 1%—2% 的铀资源, 其供能时间远少于化石燃料. 如果能充分利用铀资源, 并适时开发钚资源, 则裂变能可以供人类使用几千年<sup>[1]</sup>.

聚变能的开发非常困难, 据乐观估计, 2050 年左右人类可以实现氘氚聚变商业发电. 氚要由锂(主

要是锂的同位素<sup>6</sup>Li, 丰度为 7.5%) 来生产, 陆地上锂的储量<sup>[2]</sup> 只能供人类几百年. 海水中的锂极为丰富, 可惜含量太低, 目前无法加以利用.

纯的氘氚聚变不受资源限制, 但其实现难度极大. 目前看来, 核爆发电<sup>[3]</sup> 是一种技术上最现实的氘氚聚变利用方式. 它依靠裂变来点燃氘氚聚变反应, 聚变放能可占总能量 90%, 裂变只占 10%, 反应所需的核材料可以由核爆本身来生产, 因此这种方式可供人类使用几万年. 不过, 这种方式在政治上面临

2009-09-07 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: sxm\_shi@iapcm.ac.cn

极大阻力,目前,公众心理上也很难接受。

显然,开发聚变能和充分发挥裂变能的潜力是核能可持续发展的关键.聚变裂变混合能源是解决这一问题的可能途径.随着国际热核实验反应堆<sup>[4]</sup>(简称 ITER)的动工和 Z 箍缩装置<sup>[5]</sup>取得的进展,美国国家点火装置<sup>[6]</sup>(简称 NIF)的建成,聚变裂变混合能源重新受到科技界的关注.一方面,科学家认识到纯聚变带来高能中子对材料的辐照损伤非常严重,需要用混合堆的方式加以缓解;另一方面,随着人们对清洁能源和核废物嬗变的需求越来越迫切,混合堆的一些优点被重新挖掘出来。

## 2 裂变能源的发展趋势

经过几十年的发展,核能作为一种干净能源开始被越来越多的国家所认可.中国、印度等国家都制定了雄心勃勃的核能发展计划.为了进一步提高核电的经济性和安全性,提高资源利用率,减少放射性废物,增强防核扩散性能,美国牵头倡导第四代核反应堆计划<sup>[7]</sup>,简称 G-IV 计划. G-IV 计划推荐了 6 种候选堆型,其中 3 种属于快堆,而另一种超临界水堆也可设计成快堆.从核能的可持续发展来看,发展快堆是必由之路。

发展快堆原则上可以将铀的利用率提高到 60% 左右,从而大大延长核能的供能时间.但是燃料增殖与防核扩散要求是一对矛盾,采用闭式燃料循环可以降低核扩散的风险.基于防核扩散的考虑,快堆要想作为一种燃料增殖堆来发展是不利的,因为快堆的燃料循环涉及铀的浓缩和铀钚的化学分离,这两个过程都有潜在的核材料扩散危险。

从历史发展来看,快堆研究的初衷是为了增殖核燃料,但是现在,在以氧化物为燃料的快堆上实现的增殖比远低于理论预期.现在的许多快堆设计方案<sup>[8]</sup>都不再追求燃料的增殖,而是保持增殖比为 1,或者考虑嬗变超铀元素.快堆能否走增殖堆的道路,取决于政治、技术、能源形势等方面的制约.从技术观点上看,金属燃料的快堆最有希望实现高增殖比<sup>[9]</sup>,结合干法后处理,可能会实现较短的燃料倍增时间.如果不走高增殖的道路,未来快堆的规模将完全取决于热堆发展规模,核能也难以长期在能源结构中占较大比例。

开发钍资源也可以缓解核燃料资源短缺问题.对钍铀循环而言,采用熔盐燃料的热中子堆要比固体燃料的快中子堆更有利<sup>[10]</sup>.这是因为二者的增殖

比很接近,但熔盐堆易裂变燃料初装量少,且原则上可以通过在线后处理去除裂变产物.熔盐堆的几何适应性好,在具有复杂构型的聚变裂变混合堆中有独特优势.钍铀循环需要建立一套全新的工业体系,需要巨大的前期投入.鉴于熔盐堆也被列入了 G-IV 计划,而我国的钍资源又比较丰富,现在是到了考虑启动钍铀循环的时机了!

## 3 聚变能源展望

实现受控聚变能源的商用是几代人的梦想,人类已经为此奋斗了 50 年,估计再过 50 年有望实现这个目标.聚变能源放射性远远小于裂变,因此被称为“干净能源”.氘氚聚变更被称为永久能源,因为它不受资源的制约.然而我们必须清醒地认识到,近期内我们只能实现氘氘聚变,而这只能维持几百年的能源供应.还需看到,就聚变能的利用本身而言,实现受控聚变和聚变能的商用是完全不同的两个概念.商用要解决长时间运行中的材料问题和与此相关的复杂工程问题。

按照等离子体的约束原理,可将聚变分为磁约束聚变(简称 MCF)与惯性约束聚变(简称 ICF)两种. MCF 用特殊的加热方法将氘氚燃料加热到聚变温度,利用特殊设计的磁场位形将这种高温等离子体稳定地约束在一个真空容器中,使放能反应能够长期维持下去. ICF 利用一个外源来驱动氘氘靶丸内爆,依赖物质惯性压缩、加热热核燃料,使之发生热核反应,释放能量.商用 MCF 将是准稳态或者连续运行的,而 ICF 只能以脉冲方式运行。

MCF 中目前进展最快的是 Tokamak 装置,标志性的事件是 ITER 开始建造. ITER 将力争 2018 年获得首次等离子体,之后运转 10 年. ITER 峰值聚变功率是 500MW,主要目的是:产生能量增益  $Q$  大于 10、维持时间大于 400s 的燃烧等离子体;产生和维持  $Q$  大于 5 的稳态燃烧等离子体;检验主要聚变堆技术;完成堆部件实验.如果这个目标实现,聚变的科学可行性与初步工程可行性就得到了证实. ITER 出中子实验时间有限,面向等离子体材料以及堆内结构材料的辐照损伤问题不太严重.例如, ITER 仅要求第一壁的高能中子的辐照损伤不超过 3dpa,而未来聚变堆需要满足 150—200dpa.为了研发新的材料,另一个规模宏大的国际聚变材料辐照装置 IFMIF 也正在筹建之中.如果 ITER 进展顺利,将在 2035 年左右建成磁约束聚变商业演示堆

(DEMO)。

ICF的进展是与1990年代后高功率强激光技术和Z箍缩技术的发展分不开的。目前最大的激光器是美国2009年才建成的NIF<sup>[6]</sup>,目标是2010年实现点火。NIF设计的点火靶丸增益 $G$ 为20左右。这里 $G$ 的含义是聚变释放的能量与输入激光能量之比。由于NIF电能转化为激光能的效率只有0.75%,所以实际上系统输出的能量远小于输入能量。最近,Livermore实验室提出了一个“大胆”的激光惯性聚变能概念,简称LIFE<sup>[6]</sup>。它计划在2020年左右建成一个LIFE中试厂,用于激光和材料测试,在2030年左右建成商业示范堆。这个计划似乎是在和ITER和Z箍缩展开竞赛,争取抢先一步实现聚变能源的演示。LIFE(见图1)实际上是一个聚变裂变混合堆:其激光能量1.4MJ, $G=25-30$ ,每秒打10—15发,聚变功率为300—500MW,裂变包层能量放大 $M=4-10$ 倍,最后实现系统总功率2000—3000MW。据分析,一个典型的3000MW纯聚变电站需要激光能量3MJ, $G=70$ ,每秒打15发。混合堆的概念实际上降低了对激光功率和靶增益的要求。当然,在相同的激光功率和靶增益的指标下,采用混合堆也可以降低运行频率。LIFE的设计依赖于激光能量转换效率10%以上、高重复频率且能长时间稳定运行的新型二级管泵浦激光器,要求精密的换靶技术,还要求成熟的熔盐冷却技术。对上述三个方面,Livermore都还没有把握能实现。

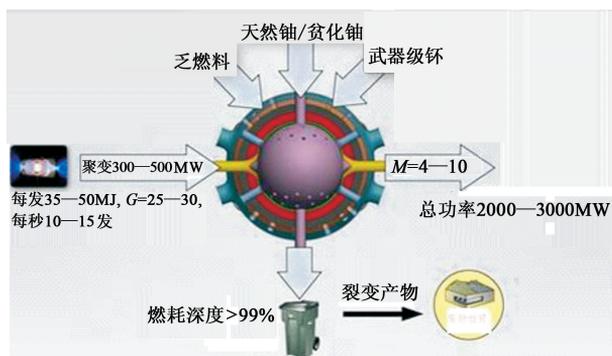


图1 LIFE原理示意图(激光能量通过靶丸聚变放大 $G$ 倍,再通过裂变包层放大 $M$ 倍,裂变包层可用天然铀/贫化铀/乏燃料/武器级钚等为燃料,做成类似高温气冷堆的TRISO小球,用FLiBe熔盐实现产氦并带走热量,包层初装量40吨,设想连续运行40年,将所有燃料全部裂变,然后集中处理)

Z箍缩驱动的ICF进展也非常值得关注。它实际上是用大功率脉冲电流通过金属套筒(或金属丝阵)时形成强电磁内爆并产生大量X射线作为驱动源的。Sandia曾在Z装置上用20MA电流产生脉宽

5ns、功率200TW、总能量约2MJ的X射线(他们认为,作为能源应用,需要驱动器电流大于70MA),能量转换效率为15%。高的X射线转换效率对开发能源是至关重要的,前已叙述,激光ICF最大的一个问题就是电能转化为激光能的效率太低。另外Z箍缩驱动器的造价要比ICF驱动器或者磁约束聚变低。Z箍缩ICF使用的靶丸较大,聚变产额高。Sandia也设计了惯性聚变能源装置(见图2)<sup>[11]</sup>。靶丸每次爆炸可放出3GJ的能量,计划每10s爆炸一次,相当于聚变功率300MW。他们计划在12个腔室内依次引爆靶丸,实现1000MW的电功率输出。要实现上述目标,必须解决好以下3个问题:(1)加速器的设计,要求电流60—100MA,重复频率0.1Hz,且要能长时间稳定运行;(2)高产额聚变靶设计,实现高效率能量转换,单发释能大于2GJ;(3)爆室及换靶机构设计,实现换靶、氦循环和有效的热交换。实际上,如果采用混合堆的概念,实现10倍的裂变包层能量放大,则只需要用一个腔室即可,这就大大简化了工程设计。



图2 Sandia设计的Z箍缩惯性(纯)聚变能源示范堆

从前面的介绍可以看到,托克马克MCF、激光ICF、Z箍缩ICF都制定了2035年左右实现聚变演示的计划,每种方案都有迫切需要解决的问题。另外需注意到,仿星器、球环等MCF类装置以及重粒子驱动等ICF装置都有可能加入到未来的聚变商业堆竞争中来。未来20年必将是各种概念激烈竞争的关键时期。

#### 4 聚变裂变混合能源堆

通过前面的介绍我们已经看到,混合堆的概念实际上可以降低对聚变功率的要求,这就降低了第一壁的高能中子负载,极大减轻了对材料的要求,有可能使得聚变能的利用提前。这一点早在聚变研究初期就被科学家认识到了。

氘氚聚变放出的是能量为 14.1MeV 的高能中子,这种能量的高能中子可以引起<sup>238</sup>U 等可裂变材料的裂变、(n,2n)、(n,3n)等反应.因此科学家首先想到的是在包层内放置大量天然铀、钍或者贫化铀,利用可转换材料的裂变,实现能量放大和易裂变材料生产.这种类型的混合堆简称增殖堆<sup>[12]</sup>.增殖堆的研究在 1980 年代非常活跃.它的主要特点是:包层使用可裂变材料,用液态金属/气冷/熔盐等冷却方式,生产的易裂变燃料进行铀钚分离后供热堆或者快堆使用.有一种采用抑制裂变设计的增殖堆,可以实现一个循环将天然铀转化为 3%左右低浓铀,直接供压水堆使用.上世纪 80 年代末至 90 年代中期,中国商用混合堆<sup>[13]</sup>就采取了这种思路.该设计聚变功率为 2000MW,使用大量的铍来增殖中子.这种概念在聚变商用实现后也许能发挥作用.

1980 年代后期,美国出于不扩散的考虑,停止了增殖堆的研究.回过头来看,液态金属/气冷/熔盐等冷却方式目前还不够成熟,用于混合堆难度很大.另外,混合堆的增殖能力是和聚变功率直接相关的.在系统总功率一定的情况下,包层内能量放大倍数越高,聚变功率越低,生产核燃料越少;反之,能量放大倍数越低,聚变功率越高,生产核燃料越多.显然,在聚变发展的不同阶段,增殖堆的设计要求是不同的.

从 1990 年代开始,美国的混合堆研究开始转向乏燃料的处理.传统上将热堆的乏燃料叫做核废物.从中子学的观点来看,乏燃料中的<sup>239</sup>Pu 和<sup>241</sup>Pu 是很好的易裂变材料,<sup>240</sup>Pu、镎、镅、锔等元素在高能区都可以发生直接裂变.因此,利用高能中子来进行嬗变超铀元素是有吸引力的. Sandia 的 In-Zinerator<sup>[14]</sup>,Georgia 理工学院提出的 SABR<sup>[15]</sup>(见图 3)以及中国科学院等离子体物理研究所设计的 FDS<sup>[16]</sup>系列混合堆都属于这类.由于包层内放了大量超铀元素,这种包层的能量放大倍数在几十以上,其能量主要是裂变放出的,要求的聚变功率只有几十 MW,可是它有一个特点就是超铀元素(主要是钚)的装量在 40 吨左右,比快堆所需的钚还多 10 倍左右.从技术上说,如果用 40 吨钚建成 10 座快堆,其嬗变能力不见得比混合堆差,发电量也高 10 倍,而在工程的实现上要容易得多.美国有 100 多座核电站,积累了大量乏燃料,这种研究是有现实意义的.对于我国这样核电刚起步的国家,发展这种堆型的需求有限.

从前面的分析可以看出,传统的混合堆研究陷

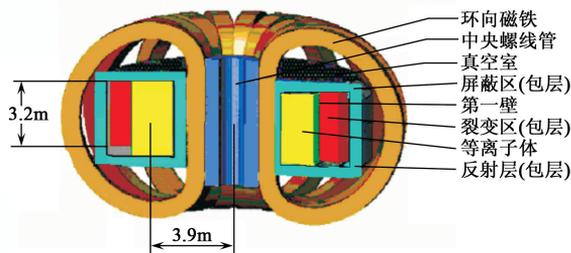


图 3 Georgia 理工学院的 SABR 示意图(这是典型的 MCF 嬗变堆设计,聚变功率 50—500MW,超铀元素装量 36 吨,系统输出功率 3000MW)

入了一个困境.增殖堆有不扩散的制约,嬗变堆则面临超铀元素装量巨大的困难.从中国全面掌握 ITER 相关技术到纯聚变堆商用至少还有几十年的时间.在此期间,如何让聚变技术为能源发展作出贡献是一个需要认真思考的问题.

作者所在的研究小组在分析传统增殖堆概念的基础上,经过比较多种燃料与冷却剂的组合方案,提出了以 U-10Zr 合金为燃料,用轻水冷却,以供应能源为目的的混合堆概念,简称混合能源堆.能源堆的核燃料可用天然铀或压水堆乏燃料,后期也可用能源堆自身的乏燃料与贫化铀.这种堆型生产的核燃料只供自身使用,燃料后处理只需去除吸收截面大的裂变产物,而不涉及铀钚的分离,且后处理可采用简单干法处理和湿法处理相结合的方法进行(若从天然铀核燃料开始,也不需要铀浓缩).混合能源堆的防核扩散功能优于增殖堆,可以缓解国际社会对核扩散的担忧,有利于扩大能源规模.

混合能源堆概念立足于近期可预期达到的聚变功率(即 ITER 预期达到的聚变功率 300—500MW 左右).另外,U-Zr 合金可参考美国在 U-Pu-Zr 合金方面的工作,轻水冷却方式可以借鉴压水堆的成熟技术,因而混合能源堆具有较好的技术基础.

我们的初步研究结果表明,混合能源堆如用天然铀启动,包层能量放大倍数在 10 左右;如果以压水堆乏燃料启动,能量放大倍数在 15 左右.这两种方式均可有效地降低聚变中子源强度,实现氘的自持.这种系统运行期间的功率波动小,燃料初装量较大,考虑到同功率下,燃耗深度较浅,为提高经济性可采用 3—5 年的换料周期,并采用简单干法为主的后处理方式.首炉可用天然铀,后期可用能源堆的乏燃料与贫化铀组合,扩大堆的规模.能源堆可使聚变技术提前服务人类,同时实现持续燃烧 U-238 的目的,而且可较少受资源的约束,对核能的可持续发展有非常重要的意义.

## 5 结束语

未来 20 年将是核能发展的一个关键时期. 在第四代反应堆计划中, 磁约束聚变演示堆计划、激光聚变演示堆 LIFE 计划、Z 箍缩聚变演示 IFE 计划都将时间定在了 2035 年前后. 中国对 MCF 和 ICF 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影响. 我们应该抓住这一有利机会, 尽早开展混合能源堆的工作, 争取聚变能的早日利用, 积极探索开发核能的新途径. 混合能源堆可能是一种比较现实的选择, 我们希望通过本文能引起对这一问题的讨论.

## 参考文献

- [1] Wallace Manheimr. *Journal of Fusion Energy*, 2006, 25(3): 121
- [2] US Geological Survey, *Mineral Commdity Summaries*, January 2008
- [3] 彭先觉, 刘成安, 陈银亮等. 中国工程科学, 2008, 10(1): 39 [Peng X J, Liu C A, Chen Y L *et al.* *Engineering Sciences*, 2008, 10(1): 39(in Chinese)]
- [4] 冯开明. 现代电力, 2006, 23(5): 82 [Feng K M. *Modern Electric Power*, 2006, 23(5): 82 (in Chinese)]
- [5] 彭先觉, 华欣生. 中国工程科学, 2008, 10(1): 47 [Peng X J, Hua X S. *Engineering Sciences*, 2008, 10(1): 47 (in Chinese)]
- [6] <https://lasers.llnl.gov>
- [7] <http://www.world-nuclear.org/info/inf7d7.html>
- [8] Masakazu I *et al.* *Nuclear engineering an technology*, 2007, 39(3): 171
- [9] 徐鍊. 中国工程科学, 2008, 10(1): 70 [Xu M. *Engineering Sciences*, 2008, 10(1): 70(in Chinese)]
- [10] Sylvain D *et al.* *Europhysics News*, 2007, 38(2): 24
- [11] Olson C. *Research progress of Z-Pinch inertial fusion energy IFE. 15th Conf. High Power Particle Beams*. Vilamoura, 2004
- [12] Ralph W Moir. *Journal of Fusion Energy*, 1982, 2(4): 351
- [13] 冯开明, 黄锦华, 盛光昭. 核科学与工程, 1995, 15(2): 149 [Feng K M, Huang J H, Sheng G Z. *Nuclear Science and Engineering*, 1995, 15(2): 149(in Chinese)]
- [14] *Fusion Transmutation of Waste: Design and Analysis of the In-Zinerator Concept*. Sandia Report: SAND2006-6590
- [15] Stacey W M *et al.* *A TRU-Zr metal fuel, sodium cooled, fast subcritical advanced burner reactor*. Georgia Institute of technology, Atlanta, GA 30332-0425, May, 2007
- [16] 郑善良, 吴宜灿, 高纯静等. 核科学与工程, 2004, 24(2): 164 [Zheng S L, Wu Y C, Gao C J *et al.* *Nuclear Science and Engineering*, 2004, 24(2): 164(in Chinese)]