

核物理

热核的稳定性和动力学效应

葛凌霄

(中科院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 本文对中能重离子碰撞中热核的形成过程和稳定性作了评述,特别讨论了动力学效应和中间质量碎片的平衡和非平衡特征.

关键词 热核, 稳定性, 动力学效应, 中间质量碎片, 平衡和非平衡.

1 复合核和热核

目前,热核的形成和衰变是国际各核物理实验室一个共同重要的研究方向.热核指的是一个具有高温(一般认为 $T > 3\text{MeV}$)的自束缚系统,这个系统应是热平衡的.我们从低能复合核反应已了解部分热核的知识,但核子一核碰撞所形成的复合核温度低.30年代,N. Bohr 首先提出了复合核理论,并由 Weisskopf Ewing、Hauser 和 Fashbach 等人作了发展,并成功地解释了低温复合核.复合核模型的基本物理图像是:

(1)复合核形成过程:炮靶形成复合核,核子一核子发生多次碰撞,交换能量,使之能量平均交给每个核子,达到统计平衡.形成的复合核的激发能 $E^* = E_{cm} + Q_{vv}$,轰击能量愈高激发能愈大.

(2)复合核衰变过程:由于激发能和统计涨落的存在,造成粒子或集团发射.

(3)不管多么复杂的形成过程,一旦形成处于平衡态的复合核,就忘记其形成历史,其衰变方式仅与复合核状态(E^*, J, π)有关,与形成过程无关.

重离子碰撞,特别是中能重离子碰撞的研究已经发现:可以形成具有更高温度的热核.而且还发现:由中能重离子碰撞所形成的热核区别于传统的复合核,这不仅在于它具

有更高的激发能和更大的角动量,而且还在乎它形成和衰变阶段的动力学效应.在这种条件下,复合核理论的很多概念显得并不合适和成立,主要表现在:

(1)由于轰击能量较高,相互作用时间同核内核子的弛豫时间可比拟,非平衡发射和非平衡裂变变得重要.

(2)不可能把复合核形成几率和衰变性质退耦合,必须自动引入入射道动力学作用和非平衡过程作用.

(3)由于温度升高,不能再象低能复合核那样,假设不同衰变道有相同寿命,迫切需要确定两碰撞离子形成复合核,达到一定温度的平衡状态所需时间.

(4)热平衡时,多高温度下热核还可以自束缚?迫切需要知道,极大激发能和入射道动力学性质和核内部性质的关系.

(5)在动力学条件下,一个核相对于压缩、转动和形变等的稳定性极限是什么?

这就要求人们去认识极端温度和压力条件下原子核的性质.而中能重离子束流提供了一个很好的工具.低能重离子碰撞已发现了前平衡发射的重要性以及衰变道与入射道的关联,但它们的影响并不显得十分重要,距原子核断裂条件还很远.而高能核子一核碰撞,也不是一个理想的工具.因此,就入射重离子能量而言,热核的探索应着重于中低能

过渡区.

2 非平衡过程

平衡前或预复合核发射粒子的事实,人们早已知道了. 炮弹被俘获之后所形成的复合核,要经过多次碰撞后,才能达到热平衡. 我们并不清楚多少次碰撞对于热平衡是必须的,可以期望,在直接反应和复合核反应两种极端情况下的中间状态事件,就是说,经过相对少数碰撞后,使一部分能量逃逸出去,这就造成了观察结果同统计模型预言的差异. 前平衡发射随入射能量的升高愈来愈重要,这在于单粒子自由度达到平衡时间和相互作用时间与能量有很大关系^[1],如果相互作用时间远远大于单粒子自由度弛豫时间,而单粒子自由度达到平衡远在集体自由度达到平衡之前,前平衡发射几率就小一些,这相当于低能范围,但当单粒子自由度弛豫时间和相互作用时间差不多,或长一些时,前平衡发射几率增大,这恰是中能时的情况.

有一种观点认为,把线性动量转移由完全变为不完全归因于前平衡粒子带走了动量,计算结果和实验有较好一致^[2].

3 热核能量储藏和动力学效应

从 80 年代中期开始,实验注意到下面的事实,由非完全线性动量转移的测量发现,对 Ar+Au 等在 44MeV/u 入射能量时,非完全融合消失^[3],测出的非完全融合截面随入射能量增加逐渐下降,并用粗糙方法总结了融合消失时,单粒子激发能和融合质量的关系^[4](图 1, 黑圆点相应于不再观测到裂变碎片或重余核,其他符号表示还可观测到非完全融合,虚线把两个范围分开), ϵ^* 是融合系统质量减小的函数: 对轻系统大约是(5~6)MeV,而对于重系统是 3MeV. 虽然,提取的结果有很大的不确定性,但是,它给了一个存在着极

大激发能的信息. 这和实验观察的每核子最大转移量($\sim 175\text{MeV}/c$)相一致,非全融合的激发能和转移量成正比关系.

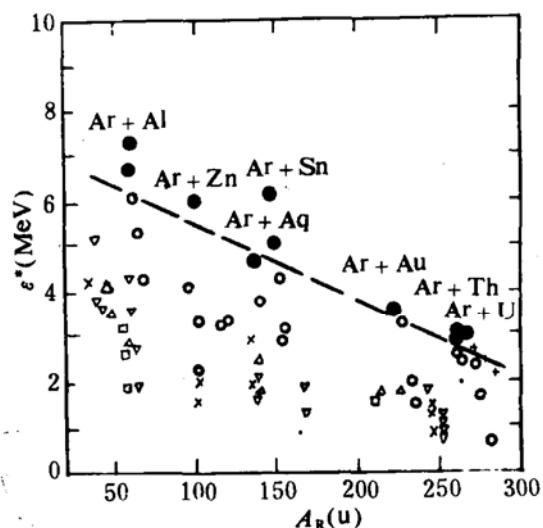


图 1 单核子激发能和融合质量关系(看文中说明)

按照朴素的观点,如果每核子激发能和它的结合能(约 7~8MeV)相一致时,这个核就不稳定. 然而,实验结果却是小于结合能,是不是所产生的非全融合核的非平衡现象占优势和参加者范围趋于零呢? 是不是参加者范围所获取的激发能如此之大,以至于平均场已经不可能维持所形成复合核的凝聚呢? 目前,动力学观点给出较一致的看法,激发核稳定性存在着一个阈效应.

暂不谈理论计算,实验已经给出了不少有关动力学限制的证据. 能量储藏强烈依赖于系统的非对称性,即依赖于入射的炮靶组合. 同样在 30MeV/u 入射能量时,用从 Ne 到 Kr 的弹核轰击非常重的靶(Ar、Th、U)发现^[5],随着炮弹质量的增加,单粒子激发能也增加(Ne 引起的反应为 1.8MeV/u,而 Kr 引起的反应为 4.5MeV/u),这反应出激发能的大小并不完全取决于核系统的内部性质,在热核产生机制中,碰撞的动力学效应是十分重要的. 观察 30MeV/u 入射能量时的 Ar+Au、Kr+Au 和 Pb+Au 三个反应系统,用 4π 中子探测器测量中子多重性 M_n ,并与各个系

统的中子过剩 ($N - Z$) 加以比较,发现对于 $\text{Pb} + \text{Au}$ 系统 $M_s/(N - Z)$ 是 100%,这意味着,所有带电产物必须有接近 1 的 N/Z 值,提供了会断裂成相当轻的碎片的证据. 比较这三个系统就可发现,30MeV/u 入射能量就会使 $\text{Pb} + \text{Au}$ 碎裂,而对 $\text{Kr} + \text{Au}$ 和 $\text{Ar} + \text{Au}$,则不可能碎裂. 由此可见,对称系统碎裂的入射能较低.

4 碰撞动力学图像

由于入射道和衰变道的退耦合,中能区重离子碰撞需要研究动力学过程,描述这一过程较为理想的理论是 BUU^[6]、QMD^[7] 和流体动力学方法^[8]. 从目前来看三种方法基本上是等价的,它们可以给出相似的两个重离

子碰撞的基本物理图像,以及随入射道参数(能量,对称性和碰撞参数)的变化关系.

两核在给定能量下,互相逼近而重叠,形成一个较高于正常密度 ρ_0 的复合体系,这个系统的部分动能转化为体系的压缩能,使得核子间发生激烈碰撞,最后导致粒子和小集团的发射. 当然,对于周边碰撞,两核重叠区域较小,而碰撞并不象中心碰撞那样激烈. 高温复合体系膨胀,压缩能转化为热能等其他形式,膨胀过程中发射粒子和集团,如复合系统趋于平衡,并保持一定时间,就形成所谓“热核”. 在周边碰撞时复合体系断裂成两碎块或多碎块. 当入射能量很高时,复合体系膨胀很快,此时密度降至 $0.5 \rho_0$ 以下,从而导致体系的碎裂.

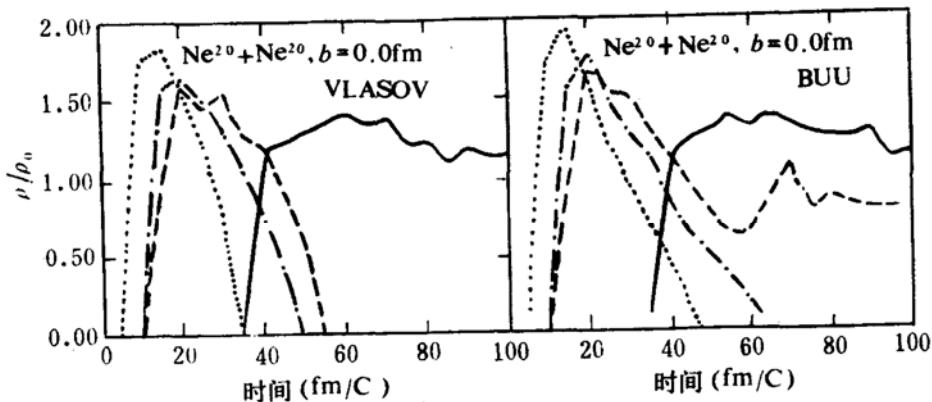


图 2 用 VLASOV 和 BUU 计算的中心重叠区极大密度随时间演化
— 5MeV/u --- 40MeV/u -·- 60MeV/u ... 150MeV/u

BUU 理论计算的 $\text{Ne} + \text{Ne}$ 系统极大密度随时间演化,可由图 2 看出^[9]. 在 (5~40) MeV/u 能区,整个碰撞过程发生密度重叠,重叠区极大密度都在较小于正常核密度附近振荡,这显示了全融合和非全融合过程,而 (60~150) MeV/u 似乎有相同的特征,但 60MeV/u 时重叠区持续时间较长 (40 fm/c),但 100MeV/u 和 150MeV/u 其持续时间分别为 25 fm/c 和 15 fm/c,极大密度就下降至 $0.5 \rho_0$ 以下,这表示了碎裂的特征. 中能重离

子碰撞动力学过程是一个复杂的过程. 其复杂性表现在不同反应机制的混合与竞争,特别是非全融合和碎裂的竞争. 图 3 给出了用 QMD 方法计算的质量分布随能量的演化. 可以看出在低能范围,碎片质量分布由一个重碎片和少数核子组成,随着入射能量的增加,重碎片分布移动到较轻的部分,核子和小集团数目增多,这意味着从全融合向非全融合的变化. 当能量为 30MeV/u 时,估计 75% 的线性动量转移至融合核,而能量为 10MeV/u

时,线性动量转移 95%. 当入射能量为 50MeV/u 时,碎片质量分布十分复杂,除了一块 ≈ 60 的大集团外,还有 $A=20$ 附近的中间质量碎片. 而入射能量达到 100MeV/u 时,看到完全的碎裂. 中能重离子碰撞的复杂

性,还表现在除核子和小集团发射外,还有中间质量碎片的发射. 可以说,中间质量碎片的产生是中能重离子碰撞的一个重要特色,探测它们的来源对判断热核有着重要的意义.

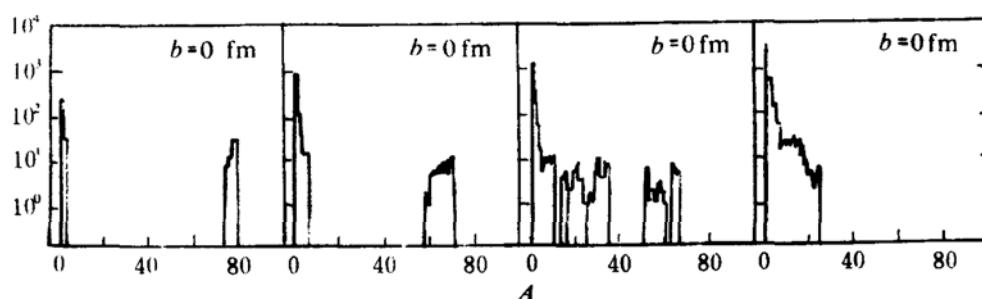


图 3 用 QMD 计算 Ca+Ca 系统在入射能量分别为 10、30、50 和 100MeV/u 的碎片质量分布(从左到右)

5 液一气相变和力学不稳定性

近年来,从理论和实验两方面对热核物质性质的探索作了大量的工作. 静态(平衡时)状态方程的计算,预言了液一气相变的存在.

通常可用核力的模拟得到核物质状态方程. 由于核力是由长程吸引部分和短程排斥部分组成,因此,状态方程类似于 Van der Waals 形状. 有限核状态方程;可以在核物质基础上考虑库仑和表面力的贡献. 在压力 P 和密度 ρ 的相图中^[11],等温线由两个区域组成,低温高密度区域对应于液相,高温低密度区域对应于气相,液相和气相之间有一混合区域. 温度升高时,共存线变短,趋于零时,达到临界点,不同模型得到的液气相变的临界温度大约为 12~20MeV,临界密度为 $0.5\rho_0$. 对有限核,似乎临界温度要比核物质低一点.

状态方程同分析原子核的稳定性相关,一种不稳定性自然是液气相变. 在温度低于 T_c 、密度大于 ρ_c 时,还存在着另一种不稳定性,叫 spinodal 区域,此区域内不可压缩系数 $K < 0$,这意味着体元内压强增大,体积继续增大,按热力学观点, $K < 0$ 称为力学不稳定

性. Spinodal 区域,密度涨落变化大,当初始压缩大时,系统会进入力学不稳定区,如系统在此区域内保持足够长时间,就会断裂.

重离子碰撞是一个动力学过程,目前还不了解中间质量碎片同 spinodal 范围的关系. 研究中间质量碎片的激发函数、质量谱以及它随时间和能量的演化是很需要的.

根据液一气相变的预言,Fisher 的小液滴理论^[14]预言了在临界点附近,碎片质量分布满足指数定理(A_f^{-1}),这个结论似乎适合高能反应,对于 100MeV/u 的 Ca+Ca 反应,QMD 预言的碎片质量分布偏离于指数定理^[6].

6 热核的动力学不稳定性

动力学效应反映了碰撞系统的入射道性质. 在一定的轰击能量下,核子在平均场下传播,会发生种种现象,如压缩、膨胀、形变和转动等等. 不稳定性来源于平均场涨落,即密度的涨落,Spinodal 区域的力学不稳定性指出了小密度区域涨落的加强. 当然,这种涨落和轰击能量或激发能有紧密的关系. Boal 等人用动力学方法作了一种粗糙的计算^[10],来研

究涨落的增长是否会导致核的碎裂。图2已给出了在重叠区密度变化在小于60MeV/u时可形成一个热化了的核，而大于这个能量，系统就变得不稳定，中心密度指数衰减。按照统计理论，涨落可由密度的二次矩来表示： $\sigma^2 = \langle \rho^2 \rangle - \langle \rho \rangle^2$ ，图4给出了Boal计算的涨落大小和平均密度。从图中可看出，最初，不论多大激发能，所有系统都跟随相同轨道，然后，在一定的密度下，低激发能轨道从共同轨道分叉，使得涨落不再增加，走一个猪尾巴的路径，这是一个已经达到热化态的信息，而大的激发能下的系统连续膨胀，涨落以指数形式增加，可估计时间常数大约为(15~20)fm/c，这时系统会破裂。因此，在低激发能时涨落增长并不一定导致核的碎裂，涨落变很大时，才可能导致原子核断裂。

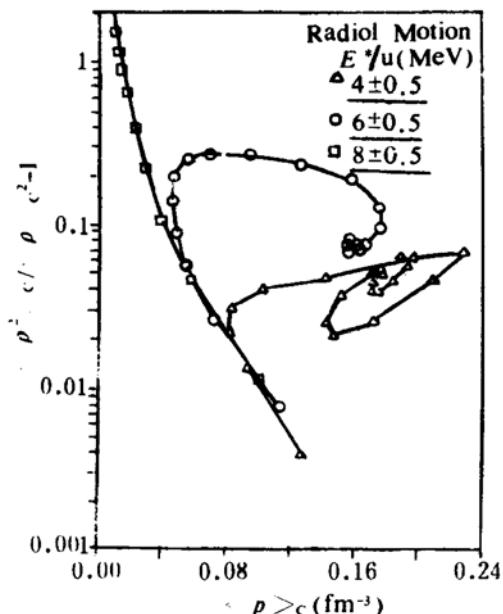


图4 平均密度的二次矩和平均密度关系

原子核是有压缩效应的，尽管人们对压缩系数的大小还有争议，但重离子碰撞发生压缩的预言已由实验所证实。用Vlasov动力学来模拟重离子碰撞^[11]，发现初始压缩愈大，膨胀就愈快，如果初始压缩为5.7ρ₀，40个核子的原子核碎裂时间发生在12.5fm/c

~25fm/c之间，初始压缩为4.4ρ₀，碎裂时间发生在(25~37.5)fm/c之间。(如果假定初始原子核温度愈高，也膨胀的愈快)。比较热激发和压缩，对于核的破裂而言，压缩要比热激发更有效。萨本豪等人^[12]用QMD方法，并用聚合模型判断碎片，他们把碎片最大质量小于A/2的事件认为是碎裂事件，分别在温度、压缩、转动和几何扰动四种不同初始条件下，讨论原子核的不稳定性。对¹⁹⁷Au温度小于8MeV基本上是稳定的，估计临界温度T_c~10MeV，临界压缩能(ϵ_c^*)_c=4.5MeV，临界角动量为450h。当然，在重离子碰撞中，所形成热和可压缩的系统，两者互相干涉，不可能独立，似乎转动不容易使核碎裂。

7 热平衡

用温度概念标志热核，就意味着内部自由度的弛豫和热平衡的达到。一个很困难的问题是如何判断碰撞系统能不能达到平衡？如果达到平衡，那么达到具有一定温度的热平衡态的时间尺度又如何？核物理中，我们经常使用平衡、局域平衡和趋向平衡的概念来处理和解释实验现象。平衡的典型例子是复合核，它可用统计模型很好描述，蒸发粒子谱是Maxwell类型的分布，并没有显示出哪一种粒子带有特别大的能量，对于发射中子，它的能量平均值 $\langle E_n \rangle = 2T$ ，而温度T可从能谱得到。蒸发粒子角分布是各向同性的，这说明各个方向发射粒子的几率是相同的。显然，同Maxwell能谱和各向同性角分布的偏离，就是非平衡的贡献。非平衡发射的粒子主要是高能粒子，主要发射几率在朝前方向。典型的趋向于平衡的例子是低能重离子深部非弹性反应，所有宏观观测量都表现出是一个弛豫过程。目前，局域平衡的实验特征似乎不多，但有不少模型，从局域平衡出发，解释了一些实验现象。

从热力学和非平衡热力学观点来讲，熵

是判断平衡和趋向平衡的非常重要的量,孤立平衡系统的熵一定是极大,趋于平衡系统熵的变化为 $d s / d t > 0$,即熵增加。从碰撞动力学观点来讲,平均场涨落是核不稳定产生的原因之一,因此可用碰撞系统密度和其二次矩以及动量矩随时间的发展反映系统的平衡,这已在前面做过叙述。

综上所述,用什么方法判断系统在动力学过程中达到平衡呢?现有以下判据:

(1)从发射中子的平均能量随时间演化看,如在某一时刻后基本上是常数, $\langle E_n \rangle = 2T$,发射中子角分布由非各向同性变为各向同性;

(2)重叠区密度在膨胀阶段围绕 ρ_0 振荡;

(3)涨落不致于使系统永远膨胀(密度二次矩):

(4)四极动量矩即 $\langle Q_{zz} \rangle = \langle 2P_z^2 - P_x^2 - P_y^2 \rangle$ 围绕 0 振荡;

(5)粒子—粒子碰撞数达到饱和;

(6)激发能趋于饱和;

(7)平均场再一次达到吸引占优势;

(8)熵达到最大值并趋于饱和。

8 中间质量碎片(IMF)的产生

中间质量碎片发射是不是由热核衰变产生的,对热核来讲,辨别它是至关重要的。目前,IMF 考虑两个来源:(1)多次碎裂;(2)从中间平衡源来的跟随衰变、蒸发和裂变。第一种起源于动力学过程中增长的不稳定性,它可由某一平衡时间的碎片结构来反映,第二种起源于统计退激发阶段,它也可以由达到平衡一段时间后的碎片结构反映,两种起源的分辨,一个重要的判断是 IMF 发射的时间尺度。正如本文第四节所指出:中心核—核碰撞产生的最后状态随能量变化很大,可以说是从单个碎片激发道或两个碎片激发道发展至核系统的完全破碎为轻粒子和 IMF。应当

指出破碎发生在很短的时间尺度,大约为 $\tau \sim 100 \text{ fm/c}$,跟随两体破碎,已有全融合衰变的模型来预言,会有不同的时间尺度,实验估计裂变时间尺度 $\tau_f \sim 1660 \text{ fm/c}$,蒸发中子的时间尺度 τ_{ev} 明显和温度相关,温度低时, τ_{ev} 很长;当 $T > 5 \text{ MeV}$, τ_{ev} 仅为 45 fm/c ,似乎谈不上平衡蒸发了。80 年代开始的两粒子关联函数测量,希望提供碰撞过程的时空知识。

IMF 的两种来源,实际上没有矛盾,碎片产生的实际描述应包括这两种图像,问题是,两种起源随能量如何变化呢?在确定的入射能时,哪一种图像占优势?碎片产生的模型很多,但基本上可以归于动力学模型和统计模型。有一种动力学和统计两阶段耦合后计算单峰的产生截面方法^[13],它应用 BUU 方法计算在某一所谓平衡时间的最初集团分布,然后采用跟随两体衰变处理了退激发阶段(GEMINI 程序)。对于 $34.4 \text{ MeV/u Kr + Al}$ 碰撞,BUU 计算初分布仅出现类弹、类靶和融合峰,未能描述中间质量碎片,而用 BUU + GEMINI 的计算结果符合实验结果。由此,可把 IMF 的产生简单理解为激发初始源的跟随衰变。如果中间质量碎片发射十分早,那就是说,系统热平衡还未达到,由第七节提供的方法确定平衡时间,QMD 计算了在这个平衡时间的质量分布和达到平衡一段时间后的质量分布似乎也可以提供一个 IMF 来源的判断信息。

参 考 文 献

- 葛凌霄,刘建业,王顺金.高能物理与核物理,1989,13: 245
- Ge Lingxiao, Zhang Fengshou. Chinese Journal of Nucl. Phys., 1990,12: 207
- Conjeaad M, et al. Phys. Lett., 1985,B159: 244
- Leray S. J. Phys., 1986,C4: 275
- Jiang D X, et al. Nucl. Phys., 1989,A503: 560,
Crema E, et al. Phys. Lett., 1991,258: 266,
Fatyga M, et al. Phys. Rev. Lett., 1985,55: 1376,
Piasecki E, et al. Phys. Rev. Lett., 1991,66: 1291

-
- 6 Bertsch G F, et al. Phys. Reports, 1988, 160 : 189
 7 Achelin J. Phys. Reports, 1991, 202 : 1
 8 Stocker H, et al. Phys. Reports, 1986, 137 : 277
 9 张丰收, 葛凌霄等. 高能物理与核物理, 1990, 14 : 561
 10 Boal H, et al. Phys. Rev., 1990, C42 : R502
 11 葛凌霄, 曾祥华等, 高能物理与核物理, 1990, 14 : 278
 12 Paula L De, et al. Phys. Lett., 1991, B258 : 251
 13 Adorno A, et al. Nucl. Phys., 1991, A529 : 565
 14 Fisher M E. Physics, 1967, 3 : 225

Stability and Dynamic Effect of Hot Nucleus

Ge Lingxiao

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Abstract The formation process and stability of hot nucleus produced in heavy ion collision(HIC) at intermediate energy range have been reviewed. The dynamical effect and equilibrium and non-equilibrium characteristics of intermediate mass fragments(IMF) are especially discussed.

Key Words hot nucleus, stability, dynamic effect, IMF, equilibrium and non-equilibrium.

混合堆的初步概念设计已告完成

聚变裂变混合堆是利用核聚变反应产生的中子, 生产裂变核燃料的反应堆。一座聚变裂变混合堆除生产聚变材料维持自身的聚变反应外, 还可生产满足近十座同等功率的裂变核电站的燃料供给, 因此被誉为“廿一世纪一种先进、经济和高速生产裂变核燃料的工厂”。混合堆的概念设计研究, 对于我国应用聚变能和发展裂变核电事业具有重要的战略意义。

核工业西南物理研究院在“七·五”期间对国家高技术计划新能源领域中的研究项目——聚变裂变混合堆概念设计研究方面取得重大成果。该院研究设计的〈托卡马克工程试验混合堆(TETB—Ⅱ)〉主要包括聚变堆芯和裂变包层等部分, 在聚变堆芯外的裂变包层中加进转换材料, 利用聚变

产生的大量中子, 在裂变包层中增殖裂变燃料。设计能力为年产裂变燃料 100 kg。初步概念设计已经完成, 在评审会上专家们认为堆结构设计协调, 具有较低的锂冷却剂磁流体动力学压降和有把握的等离子体定标律。从设计的一些特点, 分析计算深入的程度和设计的完整性看, 达到了较高的水平。美苏等外国同行专家均给予了较高的评价, 赞扬工作做得很细, 共同合作很有意义。

今后将开展混合堆详细的概念设计, 为下一步对混合堆的工程设计奠定坚实的基础, 确保在 2015 年前后完成设计、建造任务。目前, 联合设计的各项准备工作正在紧张进行中。

(兰州大学 洪忠悌供稿)