

重离子惯性聚变的研究^{*}

杨治虎 景成祥

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

王灵霞

(兰州医学院 兰州 730000)

摘要 本文描述了重离子惯性聚变的研究现状和用于重离子惯性聚变的重离子加速器。

关键词 重离子, 惯性聚变, 加速器。

1 前言

重离子惯性聚变的研究是当前热核聚变研究的前沿课题,对于研制和利用重离子加速器、寻找新的能源和开展等离子体物理学的研究等都有重要的现实意义。

随着现代社会的发展和物质生活水平的日益提高,人口的分布密度也急剧增加,对能源的需求量年增长已达到(6~7)%,能源紧张已成为困扰经济发展的严重问题之一。解决这一问题的的重要途径就是设法开发新能源:聚变能。就我国来说,人口众多和经济发展不平衡,能源之缺更应引起国人的高度重视。因此,开发利用聚变能,既是相当迫切又是非常突出的实际问题。聚变能是一种取之不尽、用之不竭(燃料可从海水中提取)的最方便、最干净和最完整及最经济的理想能源,同时,通过重离子惯性聚变的研究还可以推动其它学科的发展。

2 重离子惯性聚变的研究现状

近年来,欧洲共同体国家为了使热核聚变受控研究获得成功,几乎将全部有关热核聚变研究的精力集中于热核聚变方面,并投入了大量的人力和物力,利用磁约束技术进行重离子惯性聚变的研究。德国政府资助的重离子惯性聚变基础研究的工程于1979年就开始了其探

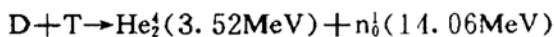
索性研究,起初,主要致力于HIBALL系统的可行性研究,以及加速器、靶丸和高亮度光源等关键设备的研究。美国科学院曾在1986年的惯性约束核聚变研究计划中认为:需要5年的时间(1991年前)可以完成他们的计划,后来由于LLNL的NOVA工作进展顺利,提前三年完成了此项计划,从而促使美国能源部加速发展室内微型聚变装置的决心。美国设计的室内微型聚变装置叫实验室微型氢弹,其特点是,将总重量为10mg的氘氚靶丸压缩,使其直径减少到原直径的1/30~1/40,密度约200g/cm³,相当于原密度的1000倍,温度提高到约5000万度,输入能量为10MJ,输出能量为1000MJ,相当于1/4t的TNT,这样就基本形成了受控核聚变。前苏联的这类研究已获突破性进展。现在,日本正在从事类似的研究工作。我国的一些研究单位,在惯性聚变的研究过程中,已建造了磁约束装置和惯性约束聚变装置,为逐步开展这一领域的研究工作奠定了良好的基础,且可跟踪发达国家进行工作。

3 惯性约束聚变

氢的同位素有氢、氘和氚三种,氘和氚聚合会产生 α 粒子和中子,同时释放出17.6MeV的动能,用D、T、n、He和H⁺等实现核反应的有:

* 甘肃省自然科学基金资助课题

本文1993年8月15日收到。



两粒子以相当高速度聚合在一起产生非常高能量,但要获此能量并非是件容易之事.目前,世界上几乎所有发达国家都在研究和探索获得这种能量的办法,重离子惯性聚变的研究就是探索获得这一能量的主要途径之一.何为重离子惯性约束聚变?简单地说,就是利用加速器产生的重离子束将装有氘氚混合燃料的靶丸驱动压缩,使其在密度增加的同时,粒子的温度也随之增加,当靶丸被压缩到一定的密度和热核燃烧所需的高温时,便发生热核爆炸,释放出聚变能.惯性约束聚变涉及直径为 10mm 的靶丸中所含几毫克重的混合物约束.在这种混合物约束情况下,通过烧蚀(ablation)方法,把靶丸中的氘氚混合物加热且压缩到点火条件(能量由激光或重离子束提供),这时爆炸的惯性力使得压缩靶丸聚合的时间长达几个毫微秒,这个时间足以使燃料充分燃烧.点火温度约为 5~10keV 时,为满足劳逊判据 $\rho R > 3g/cm^3$,必须达到极高压压缩水平.这里 ρ 是燃料密度, R 是点火时燃丸半径.获得聚变能,最基本的条件是高温和满足劳逊判据.高温条件是指等离子体的离子和电子温度超过某个特定值时,核聚变反应释放出

的能量就大于等离子体场中由韧致辐射而消耗的能量.对于氘-氚系统,这个温度为 $5 \times 10^7 K$.换言之,劳逊判据,是指 $n\tau \geq 10^{14} cm^{-3}s$ 的一种表达形式.其中 n 是等离子体中单位体积的粒子数, τ 是等离子体在这个温度下的约束时间, $10^{14} cm^{-3}s$ 是相对氘-氚反应而言.它的物理过程是指等离子体必须在足够高密度条件下约束很长的时间,以保证在此时间内发生氘核和氚核相互作用,从而引发聚变反应.根据劳逊判据, n 与 τ 的乘积等于或大于 $10^{14} cm^{-3}s$ 时,才能保证得失相当,即核聚变反应释放出的能量应等于或大于驱动器所提供的能量.通常,惯性约束聚变燃烧的时间 τ 很短,约 $2 \times 10^{-10}s$,这就意味着粒子密度 n 越大越好,为此就需要高压.若 n 值越大,燃烧进行得就越快,充分燃烧的时间也就越短,最后释放的能量也就大于激光或离子束消耗的能量.目前,惯性约束聚变的研究涉及到靶丸、驱动器和动力厂三方面的内容.

靶丸的爆炸研究是惯性约束聚变研究的最原型的问题之一.德国的 R. Bock 认为,惯性约束聚变的动力厂应由驱动器、反应堆腔(包括常规电气装置)和靶丸厂组成.与磁约束相比较,惯性约束的最大优点是把驱动器和反应堆腔分开.德国 GSI 对重离子惯性约束聚变的研究,主要集中于反应堆和驱动器方面.1980 年开始了 HIBALL 系统的研究,1985 年首次论证商业化重离子驱动动力厂的可能性.这一研究系统地阐述了惯性约束聚变研究中的一些关键问题^[1],设想的研究是将一些染料靶丸注入到直径(9m) × 高(10m)的反应堆中,利用多重重离子进行爆聚反应.反应堆室的第一层壁用 PbLi 易熔混合物制成,此外在制作冷却剂增殖反应堆时,也用到这种混合物.这种混合物的优点在于:蒸发强度相当低、有利于离子束射入和迅速循环聚焦,其特点是 PbLi 通过一系列多孔 SiC 管沿壁流动.氘的增值率为 1.25,由于氘在 PbLi 液体中的低溶解度,使得其在覆盖层中的贮存量不足 100g.

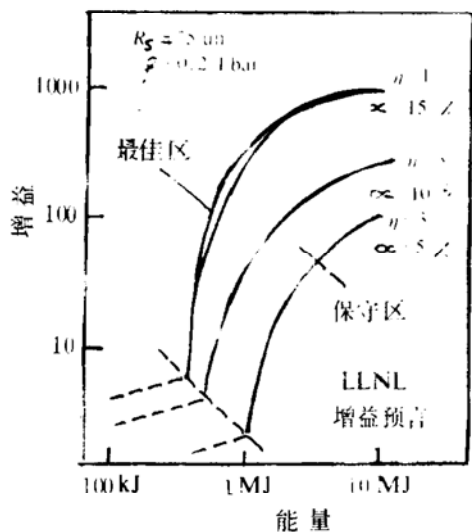


图 1 靶丸增益与沉积能量的变化关系^[1]

实现高温高压,必需具有驱动器装置.迄今为止,科学家们认为有四种驱动器可供选择,它

们是钨玻璃激光驱动器、 K_2F 激光驱动器、轻离子束驱动器和重离子驱动器. 根据不同驱动器的定性评估^[2], 认为重离子加速器是众多驱动器的优先选择物. 选择重离子加速器提供的重离子束为驱动器, 是由于它具有效率高、在靶上的能量沉积行为较为简单和不会对靶中心热核材料产生预热及产生超热电子等优点, 且相对于重复率和束-靶耦合来讲, 有非常好的性质. 对于惯性约束聚变, 一台效率高的驱动器是首当其冲的. 例如, 点燃的靶丸功率增为 100 时, 若用 5% 的驱动效率, 大约就有 60% 的能量可进行循环; 而 25% 的驱动效率, 则大约只有 10% 的能量进行循环. 由此可见, 驱动器效率越高则循环能量越低. 在重离子惯性约束聚变研究中, 西欧中心为实现点火和有限燃烧, 5MJ 的重离子脉冲释放到充有氙和氙的靶丸中, 这时的靶丸爆炸动态所需的时间为 $10 \sim 20 \mu s$, 脉冲功率为 $250 \sim 500 TW$. 图 1 显示了靶丸增益情况. 对于重离子束而言, 脉冲功率是重离子动能和束流强度的乘积. 由于靶丸的离子(最重的离子为 $10 GeV$)把动能限制到约 $50 MeV/u$, 重离子脉冲的流强必需达到 $25 \sim 10 kA$. 如果获得 5MJ 的脉冲和 100 的靶丸增益, 则单脉冲的输出能量将是 500MJ. 假定脉冲率为每秒 20 个脉冲, 那么就可得到 10GW 的热功率(约 3GW 的电输出). 对其它问题的研究, 如束-丸相互作用、脉冲成形、等离子体区域变短和靶丸设计等, 文献上讨论的较多, 这里不再描述.

4 重离子加速器

这里所讨论的重离子加速器, 主要是为了满足前面叙述的重离子惯性约束聚变研究的需要. 从目前研究的现状来看, 以重离子束为驱动器, 前途无限. 几年前, 美国伯克利大学和前西德协作攻关, 虽然理论上有很大突破, 但进展不大, 近几年的工作比较成熟, 尤其是欧洲共同体在此方面的研究较为突出. 目前, 用于惯性约束聚变的加速器大体有两类, 即美国、法国、欧洲共同体和日本等发达国家已着手研究的感应直线加速器和射频直线加速器.

4.1 感应直线加速器

十年前, 美国就在劳伦斯伯克利实验室进行了重离子感应直线加速器的研制工作^[4]. 研究的基本思路是注入高强度的长束流团, 当每个束流团经过感应加速区域时, 便可放大束流. 此时, 脉冲从注入时的 $20 \mu s$ 压缩到靶上的 $10 \mu s$, 流强从安培级增加到千安培. 这种加速过程中的一个重要突破就是把单一高强度的束流分成若干个小的平行束, 而每一平行束分别在同样的加速结构内聚焦. 由于束流发射度较小, 所以这一构思有利于改进束流聚焦. 设想的最新驱动器在注入时, 以 64 条平行束开始, 随后随着空间电荷力减弱与最后的 16 条束结合. 对于 Bi^{3+} 离子束, 加速器的全长约 5km (见图 2).

最近, 有人在劳伦斯伯克利实验室进行了 4 条多重束的原型实验, 尽管加速器的前端设备

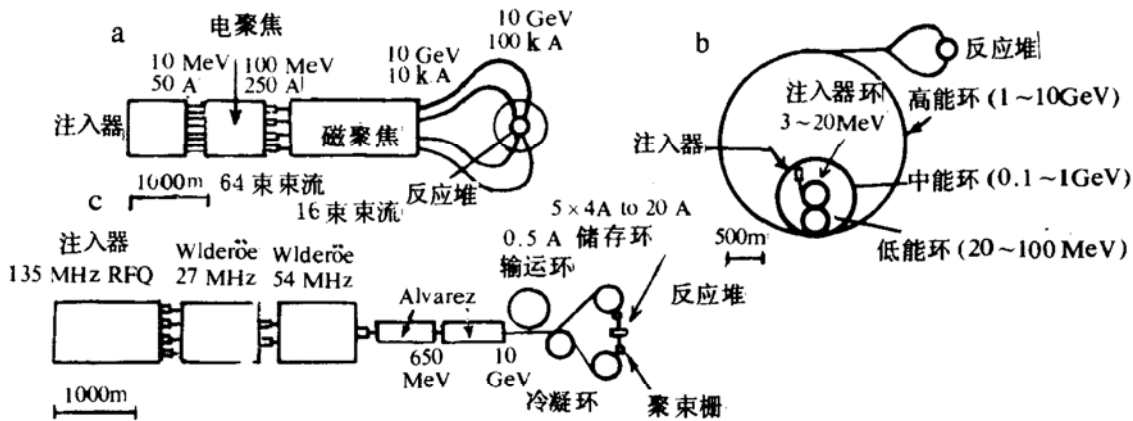


图 2 用于重离子惯性聚变的重离子加速器 a) 感应直线加速器, b) 循环感应直线加速器, c) 射频直线加速器储存环

受到限制,但实验对解决许多关键的问题还是有意义的,因为前端和初始脉冲的形成,意味着对最关键问题的解决.一台感应直线加速器系统的实验性研究已着手进行,研究的内容包括起支配束流的空间电荷、束流的结合与偏转、脉冲的压缩与成形及束流聚焦等.

4.2 射频(RF)直线加速器

射频直线加速器或储存环的设想,看起来要比感应直线加速器更为方便,因为几乎所有的加速参数和束流控制器件是否正常都可从操作设备上得知.但是,在操作过程中,对起支配作用的空间电荷状态和非相对论束流动力学,仍存在问题,如何处理各种不稳定性(一般为纵向不稳定性)、束流传输、发射度增大和流强损失等,还有待进一步解决.

B. Badger^[1] 等人为解决束流的纵向不稳定性,和确立一些主要的研究课题承担了 HIBALL 的理论研究任务,在美国、前苏联和日本等国也进行类似的实验性研究.在 HIBALL 系统中,5km 的射频直线加速器利用 RFQ、Wideröe 和 Alvarez 加速结构以恒定流强进行加速.由于空间电荷的限制,离子电荷态选为 1+.通常,用铍束,因它是单同位素.当然,也可选别的重元素.

纵观重离子惯性约束聚变研究状况,可以看出德国在此领域已取得突破性进展,并积累

了一定的实验经验,如 GSI 的环型系统和注入反应堆等问题,许多结果已被美国、法国和日本所采用.目前,他们已着手在 1990 年建造的 SIS/ESR 同步加速器上进行一些实验性研究工作,如束流的纵向不稳定性、多圈积累中的电荷稀释(dilution)和离子间的电荷交换等.

由此可见,重离子加速器是惯性约束聚变研究的最后理想的驱动器,大有发展前途.HIBALL 系统的研究表明,用加速器驱动聚变反应堆,无论在理论上,还是在实验技术上都是可行的,经济上也是可接受的.

5 重离子惯性约束聚变的应用

重离子惯性约束聚变可做模拟核爆炸,进行各种效应试验,也可用于电子学和器材等的加固工作,为人类提供新能源.在基础方面,可用于高温高压试验、天体物理、原子物理和其它学科的研究.

参 考 文 献

- 1 Badger B, et al. HIBALL KFK Report, 1981, 3202; HIBALL 11 : idem, 1989, 3840
- 2 Hogan W J. LLNL Reprot UCRL, 1986, 50021~86
- 3 Bock R. Europhys New, 1992, 23
- 4 Reiserr, et al. Proc Conf. on Heavy ion inertial Fusion, Washington DC, Eds (Alp. New York NY), 1986

Research on Inertial Fusion of Heavy Ions

Yang Zhihu Jing Chengxiang

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

Wang Lingxia

(Lanzhou Medical College, Lanzhou 730000)

Abstract The present researching status and the heavy ion accelerators used for inertial fusion of heavy ions are decribed in the paper.

Key Words Heavy ions, inertial fusion, accelerator.