

受控核聚变两大途径的对比与结合*

谭宝林

(核工业西南物理研究院 成都 610041)

摘要 目前人们探索受控核聚变主要是从两个方向着手:磁约束受控核聚变和惯性约束受控核聚变,但目前还无法判定到底哪一种途径更为可取.文章首先对这两种途径进行分析对比,指出各自的特点和困难,在此基础上提出了一种结构相对简单、成本相对较低的三轴六极磁镜系统设想,希望能将磁约束和惯性约束结合起来,以实现受控核聚变反应.

关键词 磁约束受控核聚变,惯性约束受控核聚变

COMPARISON AND COMBINATION OF MCF AND ICF

TAN Bao-Lin

(Southwestern Institute of Physics, Cooperation of National Nuclear Industry, Chengdu 610041, China)

Abstract Current research on controlled nuclear fusion concentrates mainly on magnetic confinement fusion (MCF) and inertial confinement fusion (ICF). So far it has not been determined which will be better operationally. This article analyses both MCF and ICF, points out their difficulties, and presents a new idea for the 3-axial 6-polar magnetic mirror system, which may turn out to be cheaper and simpler. With it, we may be able to combine MCF with ICF to achieve our target of controlled nuclear fusion.

Key words magnetic confinement fusion, inertial confinement fusion

1 引言

受控核聚变问题是当代物理学研究的前沿性课题.由于聚变反应的燃料极其丰富,海水中的氘足够人类使用数十亿年,聚变反应又是一种非常洁净的反应过程,与环境之间具有非常好的相容性,因而人类要走向未来,在未来要实现与环境与自然的可持续性地协调发展,就不得不研究受控核聚变.开发聚变能源,是一个无法绕开、必须面对的课题.另一方面,受控核聚变研究又是一个非常困难的课题,其难度不亚于当初的“两弹”,因为对于D(氘)聚变反应来说,只有在温度 10^8K 以上,离子密度 $n_i \geq 10^{20}\text{m}^{-3}$ 的条件下,将等离子体进行稳定约束,才能发生核聚变反应.而这个条件实际上是非常苛刻的,为了达到这个条件,人们设计了许多种方案,经过近五十年的探索研究,逐步形成了两类主要的试验途径,即磁约束受控核聚变(magnetic confinement fusion, MCF)和惯性约束受控核聚变(inertial confinement fusion, ICF).人们在这两个方向都作了大量的研究工作,取得了许多成果,在一步步地朝最后目标迈进.然而,

我们目前还无法知道到底哪一种途径能真正实现最后的商业运行.因为无论是MCF还是ICF,离真正的经济利用都还有相当长的一段距离,还有许多问题要解决.在这里我们首先讨论一下MCF和ICF的特点及各自目前还存在的困难,然后再探讨一下二者的结合问题.笔者认为,如果将MCF和ICF结合起来,也许能克服原来各自的某些缺点和困难,甚至可能会产生一些意想不到的效果.

2 MCF和ICF基本原理及其优缺点对比

首先,我们来看看MCF,即磁约束方式.所谓磁约束受控核聚变,就是利用一定的强磁场将高温等离子体进行约束和压缩,使之达到劳森判据(即受控核聚变条件),实现聚变反应.为此人们先后设计了诸如磁镜装置、仿星器、箍缩装置以及在以上装置的基础上发展起来的托卡马克装置.目前托卡马克装置基本上已经成为MCF研究的主流装置,所取得的成果最接近于聚变点火条件.但是,即使在托卡马克

* 2001-04-18收到初稿,2001-06-14修回

上也还存在着许多问题,这主要表现在以下几个方面(1)托卡马克装置结构复杂,造价昂贵.由于有复杂的各种磁路系统,以及苛刻的工作条件,托卡马克装置结构庞大,成本极高,例如 ITER 装置,按最初的设计方案造价高达 100 亿美元以上,即使按后来的改进方案,其造价仍然在 50 亿美元以上.(2)由于在强磁场中高温等离子体表现出各种宏观和微观不稳定性,如何实现稳态运行仍然是托卡马克装置面临的重大难题.(3)由于托卡马克是一个封闭性的装置,如何实现反应堆从加料到加热、反应、传热、除灰的连续运行也是一个极大的困难.

为了克服以上困难,人们又提出了惯性约束概念,即 ICF,这是利用高功率的激光束或粒子束均匀照射用聚变材料制成的微型靶丸,在极短的时间内迅速加热压缩聚变材料使之达到极高的温度和密度,在其分散远离以前达到聚变反应条件,引起核聚变反应.ICF 的特点是驱动器和反应器是分离的,因而相对来说结构较为简单,不需要庞大的磁路系统,系统的工作条件也相对宽松一些.不过,ICF 也有许多困难要克服(1)ICF 的约束时间仅为 10^{-9} s 左右,因而必须把等离子体加热到 $T_i \geq 10\text{keV}$,离子密度压缩到 $n_i \geq 10^{32}\text{m}^{-3}$ 的高温高密状态,这个密度相当于原来的 1000 倍,这时等离子体内部的压强约为 10^{12} 个大气压,这就对驱动器和靶丸提出了极高的要求,而目前的激光器还很难达到这个条件.(2)对于 ICF 来说如何实现反应的连续运行以及传热、除灰等仍然困难极大.

3 三轴六极磁镜系统——MCF 和 ICF 的结合途径

那么有没有办法将 MCF 和 ICF 结合起来呢?我认为这是可能的.我们知道,磁约束装置可分为开端装置和闭端装置两大类,其中托卡马克装置便是一种闭端装置.对于开端装置,目前人们已经很少再研究了,其主要原因是开端系统都存在着逃逸问题.例如磁镜装置便是一种开端系统,利用它来约束等离子体时,总会有一部分带电粒子从装置的端口逃逸出去.设磁镜中的最大磁感应强度为 B_{\max} ,最小磁感应强度为 B_{\min} ,则磁镜比为 $R = \frac{B_{\max}}{B_{\min}}$,带电粒子的临界入射角为 $\theta_c = \arcsin(R^{-\frac{1}{2}})$.初始入射角小于 θ_c 的粒子都有可能从装置的端口逃逸出去,粒子逃逸的几率大约为 $p = \frac{1}{\sqrt{2R}}$,可见 R 越大,逃逸几率越

小.然而我们要约束能量在 10keV 以上的带电粒子,就必须保证装置中 B_{\min} 具有一定的强度,同时对 B_{\max} 的提高也会受到实际条件的限制,因而在这种单一的磁镜系统中逃逸问题是不可避免的.其实开端系统也存在着许多优点,如结构简单,操作方便,加料、维护、诊断和控制等方面都比闭路系统方便得多.如果设想让三组磁镜六组线圈沿笛卡儿坐标系的三个互相垂直的坐标轴与原点等距离地排列,从而构成一个多磁镜的空间组合系统,我们可称之为三轴六极磁镜系统.三组磁镜拥有共同的大致呈球形的中部弱磁场区域,而在六组线圈附近则形成六个强磁场区域,可称之为系统的六个磁极.在一组磁镜中,小于临界入射角的带电粒子的运动方向与磁镜对称轴之间的夹角必然大于与之垂直的另一组磁镜的临界入射角,也就是说,在一组磁镜中的逃逸粒子将被与之垂直的另一组磁镜约束,三组磁镜相互作用,就像六组线圈形成六面镜子,任一带电粒子只要运动到此都会发生反射,可保证将进入该装置的带电粒子全部约束在装置内部,从而也就避免了逃逸问题.

下面我们来看看磁场位形.图 1 为单轴磁镜系统的磁场位形示意图,这也就是我们通常说的磁镜装置的示意图,从图 1 可见,在简单磁镜装置的中部弱磁场区域,磁力线的弯曲方向是凹向中心区域的.如果用这种装置来约束等离子体,则磁力线凹向等离子体,从磁流体力学有关原理我们知道,这种约束是不稳定的.

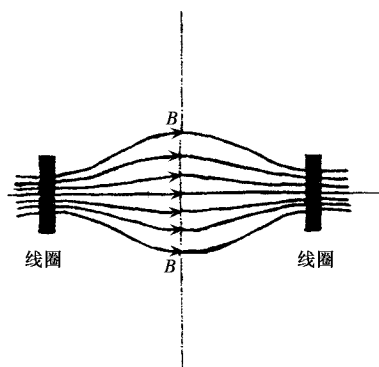


图 1 单轴磁镜系统的磁场位形示意图

图 2 为平面上两组互相垂直磁镜叠加的磁场位形示意图.在这种系统中,只要选择合适的磁镜比,仍然可以保证系统的中部区域为弱磁场区域,而且从该平面上看,磁力线的弯曲方向为凸向中心区域.不过很明显,在垂直于该平面的方向上磁力线仍然是凹向中心区域的,也就是说这种系统中的磁场位

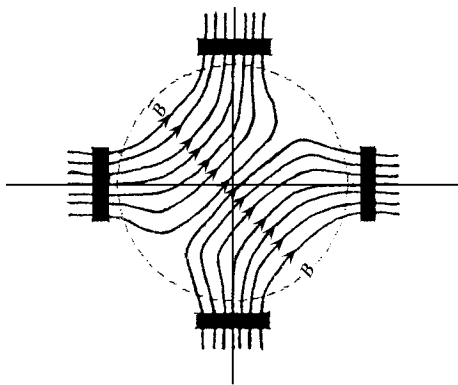


图2 平面上两组互相垂直磁镜叠加的磁场位形示意图

形是一个马鞍型的,约束等离子体时虽然在 XY 平面上是相对稳定的,但是在垂直于 XY 平面方向上仍然是不稳定的。

图3为三轴六极磁镜系统的磁场位形示意图。同样,只要选择合适的磁镜比,我们仍然可以保证系统的中部区域为弱磁场区。与在简单磁镜系统和平面上的双轴正交磁镜系统中的情形不一样,在这里磁力线均凸向中部弱磁场区域,如果等离子体被约束在这里,将处于一个稳定的平衡状态。而且,从电磁学有关原理我们知道,带电粒子在磁场中绕磁力线作回旋运动时相当于一个磁矩,会受到一个力的作用,该力的大小为 $F = \mu \cdot \nabla B$,方向指向弱磁场区域。这样在三轴六极磁镜系统中,带电粒子不论在什么地方都会受到一个方向大致指向坐标原点(即装置的中心区域)的力的作用。这种作用有利于带电粒子的约束,如果用这种系统来约束等离子体,会具有许多优点,例如(1)相对于托卡马装置来说,这种三轴六极磁镜系统结构简单,成本也低得多。(2)加料、诊断、操作、维护相对较容易,我们完全可以考虑从各线圈中心开设加料孔和观察窗,加入燃料并了解反应进行情况。(3)由于线圈位于系统的六个极上,

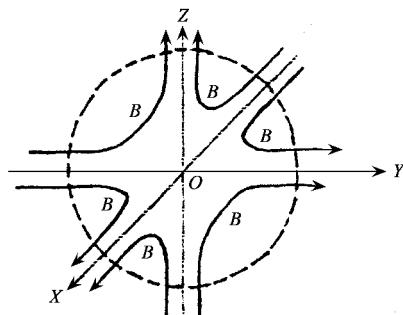


图3 三轴六极磁镜系统的磁场位形示意图

当然,上述三轴六极磁镜系统还只是一种初步设想,合理与否,是否可行,尚待进一步理论分析和实践的证明。

参 考 文 献

- [1] 潘传红.核科学与工程,2000,20(3):244[Pan C H. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2000,20(3):244 (in Chinese)]
- [2] 张杰.物理,1999,28(3):142[Zhang J. Wuli(Physics),1999,28(3):142 (in Chinese)]
- [3] 朱士尧.核聚变原理.合肥:中国科学技术大学出版社,1992.第6章[Zhu S Y. Principles of the Controlled Fusion. Hefei: University of Sciences and Technology of China Press,1992. Chapter 6 (in Chinese)]
- [4] 杜世刚.等离子体物理.北京:原子能出版社,1998.第2章,第5章[Du S G. Plasma Physics. Beijing:Atomic Energy Press,1998. Chapter 2 and 5 (in Chinese)]

2002年第4期《物理》主要内容

研究快讯

纳米隧道结的量子电容现象(王兵等)。

评 述

高温超导微波器件在移动通信中的应用(何豫生)。

知识和进展

SOI新结构——SOI研究的新动向(谢欣云等)；

一种新型 SOI - SiGe - OI 材料研究进展(安正华等)；

微机械生化传感器的发展(于晓梅)。

物理学和高新技术

压电陶瓷超声马达(褚祥诚等)。

实验技术

激光散射及光电子技术对液晶物性的测试(屠美)；

纳米氢氧化镍粒子微乳液/反相胶团法制备与表征(严少平)。