

受控核聚变研究进展

朱士尧

(中国科学技术大学近代物理系)

受控核聚变研究的宗旨是为人类探索理想的新能源。这是当代举世瞩目的重大科研项目之一。许多国家都投入了相当大的人力和物力。本文简要地评述该领域内近年来的重要进展。

一、磁约束系统的研究进展

磁约束系统采用具有特殊位形的磁场将高温等离子体约束在一定区域内。具体的实验装置有许多类型。目前看来进展比较快的主要是托卡马克装置、仿星器、磁镜和反场箍缩装置。

1. 托卡马克装置

这是一种环形无极放电型装置，它是由流过环形真空室中的电流来对等离子体进行加热和约束的。这类装置的最大特点是采用了纵向强磁场，成功地抑制了等离子体宏观不稳定性。六十年代后期，托卡马克装置取得令人鼓舞的进展，此后，世界各国都很重视^[1,2]。在七十年代建造了一大批这种类型的装置。最近几年，几个大型的托卡马克装置先后建成，投入运行，取得了很好的实验结果，这些进展主要表现在以下几个方面：

(1) 等离子体加热方面

托卡马克依靠欧姆加热具有一定的限度。随着温度升高，等离子体电阻率显著下降。为了将等离子体加热到“点火”温度，必须采用二次加热手段。近年来的实验结果表明，中性束注入、高频电磁波等二次加热手段是行之有效的。

(a) 中性束注入加热 这种方法就是将高能中性粒子束注入到托卡马克等离子体中，通过相互作用，将高能中性粒子的能量转交给等离子体。从七十年代初就开始用这种方法进行实验。当时所用的注入功率仅几十个 kW，现在已提高到几个 MW。近年来在美国橡树岭的 ORMAK 和 ISXB 托卡马克中，在英国的 DITE 和法国的 TFR 装置中都进行了中性束注入实验。尤其是 1978 年夏季，在目前运行中仍是最大的托卡马克——美国普林斯顿的 PLT 装置上采用 4 路 2.8MW 的强流中性束注入加热，离子温度超过了六千万度^[2,3]，后来又上升到七千五百万度。这是目前最好的实验结果。这对于从事和关心核聚变研究的人来说确实是令人鼓舞的。美国准备在带有极向偏流器的大型装置 PDX 上进行功率达 6MW 的更大规模的中性束注入实验；在双流器 Doublet III 上也打算进行大功率中性束注入实验^[4]。

(b) 离子回旋共振加热 (ICRH) 等离子体中存在各种波动过程。如果外加电磁波跟等离子体中部分粒子发生共振的话，等离子体将获得能量而提高温度。1979 年 9 月，在英国举行的第七届欧洲受控核聚变和等离子体物理国际会议上，美国和法国等发表了在 ICRH 方面取得的最新实验结果^[4]，美国在 PLT 装置上采用功率为 350kW 频率为 25MHz 的高频电磁波进行加热实验。用单根天线耦合到含有少量 H^+ 和 $^3He^{++}$ 的氦等离子体中。这些 H^+ 和 $^3He^{++}$ 离子从波中获得能量，平均达 10keV，它们的能量分布是非麦克斯韦型的，具有 80keV 的高能尾巴。这些高能粒子再经过碰撞，可以

提高整个等离子体的温度,用这种方法使离子温度从 0.6keV 上升至 1.2keV。下一步 PLT 装置打算进行频率为 43MHz 功率达几个 MW 的多根天线同时耦合的大规模 ICRH 加热。法国的 TFR 装置也进行了 ICRH 加热。所用的频率为 60MHz,功率为 250kW。在氦等离子体中也掺入了部分 H⁺。实验结果离子温度提高了 150eV,平均每 kW 功率提高离子温度 0.7 eV。日本在 DIVA 装置上采用 200kW 的 ICRH 加热,离子温度提高了 250eV,平均每 kW 输入功率离子温度提高 2eV。并在实验中发现氦等离子体中 H⁺ 的含量最佳值为 5—10%。

(c) 电子迴旋共振加热 (ECRH) 前几年苏联在 TM-3 上进行过 ECRH 加热实验。最近又在大型托卡马克装置 T-10 上进行了电子迴旋共振加热实验^[4]。所用高频波的频率为 85 GHz (这是二次谐频),功率为 120kW。对高温等离子体的软 X 射线测量结果表明,电子温度大约提高了 200eV。

(d) 混杂波加热 日本在 JFT-2 和 JIPPT-2 装置上分别进行了低混杂波加热实验^[4],功率为 200kW。实验结果表明,每 kW 输入功率离子温度提高 1eV。

此外,近来有人提出采用强流电子束对托卡马克等离子体进行加热的方案^[5]。估计注入时技术上困难较大。

(2) 提高等离子体密度

在托卡马克中,对于一定范围的纵场 B_z 和电流 I_p 来说,等离子体密度存在一个上限。如果密度太高,等离子体就会产生破裂不稳定性。就目前托卡马克的规模, B_z 一般大约为几十个 kG, I_p 为几百个 kA,等离子体密度一般为 $n \leq 5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。可是在 1976 年,美国在强磁场托卡马克装置 Alcator-A 上采用中途脉冲充气的办法,实现了高密度运行^[6,7]。在 85kG 的强磁场下,密度超过了 10^{15}cm^{-3} ,约束时间为 $\tau_E = 20 \text{ms}$, $n\tau_E = 2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}$,并且发现能量约束时间 τ_E 随等离子体密度增加而增加,定标关系为 $\tau_E = 1.7q^{1/2} \bar{n}_{14} \text{ms}$,式中 q 为安全因子,

$$\bar{n}_{14} = \frac{n}{10^{14} \text{cm}^{-3}}$$

由此可得 $n\tau_E \propto n^2$ 。说明提高密度对达到点火条件是十分有利的。这是目前为止最好的参数。这对于关心和从事核聚变研究的人来说同样是令人鼓舞的。我们看到,在 PLT 装置上, $T_i = 6 \text{keV}$,在 Alcator-A 装置上, $n\tau_E = 2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}$ 。这是近年来核聚变研究进展中最重要的标志。说明离“点火”目标已相差不多。当然,点火时必须要求在同一个装置上同时实现这两个条件。

(3) 低 q 稳定运行

为了获得稳定的等离子体位形,必须满足克鲁斯卡耳-沙夫拉诺夫稳定性判据:

$$q = \frac{B_z}{B_\theta} \cdot \frac{a}{R} > \frac{2}{2 - \beta}$$

式中 B_z 为纵向磁场, B_θ 为角向磁场, a 为等离子体半径, R 为放电室大环半径, β 为等离子体压强 p 与磁压强 $\frac{B^2}{8\pi}$ 之比, q 称为安全因子。

为了使托卡马克等离子体宏观位形稳定,一般取 $q \geq 2.5 \sim 4$ 。对于一个装置来说, a 和 R 是确定的。为了保证 q 值在安全范围内,要提高等离子体电流,必须增加纵场 B_z ,这就必然要增加投资。近年来在不少托卡马克装置上研究了安全因子 q 的极小值问题。这对于未来的托卡马克反应堆节省投资,变得更为经济些,无疑是有利的。在最近建成并投入运行的苏联大型托卡马克装置 T-10 上进行了低 q 运行的研究。实验结果表明^[4],当 $q(a) = 1.6$ 时,放电仍然是稳定的。在低 q 放电时,轻杂质占优势,大约有 50% 的输入功率被辐射掉。在 T-11 装置上也进行了低 q 放电实验,有效原子序数 $Z_{\text{eff}} = 1$ 。实验结果表明,当 $q(a) = 1.2 \sim 1.4$ 时,等离子体约束得非常差。日本在 DIVA 托卡马克装置上也进行了极低 q 放电实验^[4]。采用的办法是上升的等离子体电流跟充气相结合。 $q(a)$ 的极小值为 0.85。当 $q(a) < 2$ 时,等离子体仍没有明显的破裂。不过当 $q(a) < 1.3$ 时,等离子体整体约束就很差了,跟 T-11 装

置的结果是一致的。

(4) 一些新建(或改建)的大型托卡马克装置投入运行^[4]

带有极向偏流器的美国 PDX 大型托卡马克装置目前已开始运行, 放电参数已达到额定值, 纵场 $B_\phi = 25\text{kG}$, 等离子体电流 $I_p = 500\text{kA}$, 平均电子密度 $\bar{n}_e = 2 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, 电子温度 $T_e(0) = 1.4\text{keV}$, 离子温度 $T_i(0) = 0.6\text{keV}$, 能量约束时间 $\tau_E = 30\text{ms}$. 不久将加上偏流器, 并采用 6MW 的中性束注入加热. 预期那时有可能得到更好的参数. 另一个大型新装置美国通用原子公司的 Doublet III 也已建成, 其目的主要是研究非圆截面的等离子体稳定位形. 参数为 $R = 140\text{cm}$, $a = 90\text{cm}$, $b = 270\text{cm}$, (a, b 分别为类似于椭圆截面的两个轴), 纵场 $B_\phi = 26\text{kG}$, 等离子体电流已达到 1.5MA, 电子温度 $T_e(0) = 1\text{keV}$, $q(0) \approx 1$, 能量约束时间 $\tau_E = 10 \sim 30\text{ms}$. 还有一个最近投入运行的新装置就是 Alcator-C. 它的规模比成功地进行高密度运行的 Alcator-A 还要大些. 设计参数为 $R = 64\text{cm}$, $a = 17\text{cm}$, $B_\phi < 120\text{kG}$, $I_p \leq 1\text{MA}$. 目前已达到 $B_\phi = 60\text{kG}$, $I_p = 500\text{kA}$. 初步实验结果发现, 能量约束时间 τ_E 并没有随密度的升高而延长. 这一点跟 Alcator-A 上的定标定律不一致. 据分析认为这可能是由于 Alcator-C 目前运行尚未达到最佳状态, 放电不够清洁所引起的.

此外, 有几个规模更大的、大半径 R 为 3m 左右、小半径 r 为 1~2m 的托卡马克装置, 包括美国的 TFTR, 日本的 JT-60 和欧洲联营的 JET 装置都在建造之中.

2. 仿星器装置

仿星器装置是从五十年代初就开始进行实验研究的一种环形装置. 它的磁场具有螺旋变换, 也是低 β 运行, 这跟托卡马克装置很相似. 两者的主要区别在于, 仿星器中具有螺旋变换的磁场是由绕在等离子体容器外的螺旋绕组产生的. 而托卡马克中则是由外加纵向强磁场跟等离子体自身电流产生的角向磁场相迭加而

成. 由于五十年代和六十年代仿星器的实验结果不好, 进展迟缓, 曾一度不受重视. 美国从六十年代末基本上停止了仿星器的研究. 而英国、西德、苏联和日本等一直坚持了下来. 在七十年代中期, 在 CLEO, WVII, L-2 等大型仿星器装置上取得了较好的实验结果. 这些装置都采用了欧姆加热的方式运行. 在电流为 6~35kA、磁场为 12~35kG 的条件下, 获得电子温度 $T_e = 200 \sim 900\text{eV}$, 离子温度 $T_i = 100 \sim 500\text{eV}$, 密度为 $n = 5 \times 10^{12} \sim 6 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, 能量约束时间 $\tau_E = 1 \sim 10\text{ms}$. 由于这些成果再加上这类装置本身具有可以稳态运行的潜在优点, 因而再度引起了人们的重视. 1979 年 9 月, 在英国召开的第九次欧洲受控核聚变和等离子体物理会议上, 苏联、英国和西德等国报告了在仿星器装置上取得的最新研究成果^[4].

英国卡拉姆实验室近年来在 CLEO 仿星器上进行了低电流欧姆加热实验, 发现这种情况下等离子体约束得很好, 没有出现磁流体不稳定性. 典型参数如下: $B_\phi = 18\text{kG}$, $I_p = 7\text{kA}$, $\bar{n}_e = 2 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, $T_e = 140\text{eV}$, $T_i = 150\text{eV}$. 相应的能量约束时间为 5ms, 欧姆加热的输入功率为 12—15kW.

西德的 WVIIA 是个大型仿星器, 大半径 R 为 200cm, 螺旋绕组 $l = 2$, 旋转变换角是可以连续调节的. 在磁场为 40kG 时, 旋转变换角的范围是 0~0.23; 在 20kG 时, 旋转变换角从 0~1. 它采用高频预电离的方法获得等离子体. 它和 CLEO 仿星器上的实验结果都发现等离子体的温度分布和密度分布比托卡马克装置上进行实验所得到的温度和密度分布要平坦得多. 这意味着仿星器比规模相同的托卡马克具有较高的能量密度. 最近它在旋转变换角为 0.14, $I_p = 20\text{kA}$, $B_\phi = 35\text{kG}$ 的条件下进行实验, 结果发现能量约束时间开始时象 Alcator 定标律那样随密度 n 增加而增加, 但是, 后来约束时间就减少了. 在实验中还发现, CLEO 装置上约束时间开始下降时的密度对应于托卡马克中等离子体开始破裂时的密度. 在该仿星器上还成功地进行了中性束注入实验. 所用的注

入功率为 450kW, 粒子能量为 30keV, 吸收效率为 30%, 并没有引起杂质的增加. 发现等离子体电流越小, 注入效果越好. 低电流运行时还避免了 $m = 2$ 的内部破裂. 计划中还准备将注入功率提高到 1MW.

目前尚有一些大型仿星器装置正在建造中. 日本京都大学正在建造一个大半径 $R = 220\text{cm}$ 的大装置, 叫做 Helitron-E 装置. 螺旋线圈产生的环向磁场 $B_\phi = 20\text{kG}$. 澳大利亚建造一个组件式的大型仿星器装置. 它由 8 个具有 $l = 3$ 螺旋绕组的独立部件组成. 大半径 $R = 200\text{cm}$, 小半径 $a = 20\text{cm}$, 环向磁场 $B_\phi = 40\text{kG}$.

3. 磁镜装置

磁镜装置属于开端系统. 它采用中部弱两端强的磁场位形来约束等离子体. 它的优点是结构简单, β 值高, 能稳态运行, 安装维修亦比较方便, 因而将来如果能建成磁镜型聚变反应堆就可能比较经济实用. 主要缺点是磁力线在装置内是不闭合的, 粒子的终端损失比较严重. 前几年在磁镜装置中建立等离子体的稳定约束方面取得了重要进展. 1976 年在美国劳伦斯利弗莫尔实验室的 2XIIB 磁镜装置上离子温度达到 13keV, 密度已达到 $2 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$, 并且在采用中性注入时并没有引起等离子体的不稳定性. 因此对磁镜装置来说, 急需解决的主要问题是想办法减少终端损失, 延长等离子体的约束时间. 为此从两个方面来考虑. 一方面将终端损失的能量进行再循环, 另一方面采用复杂的磁场形态在磁镜端部形成“塞子”予以堵漏, 减少终端损失. 基于这个思想, 前几年提出了反向场磁镜、串列磁镜、环链磁镜等新概念.

美、苏、英、法、日等国都在开展磁镜装置的研究. 其中美国投入的力量最大. 目前美国正在开展反向场磁镜和串列磁镜装置的研究, 而重点集中在串列磁镜方面. 反向场磁镜就是采用某种方法使磁镜的磁力线闭合, 从而使等离子体不能沿着磁力线从终端逃逸掉. 在 2XIIB 上采用中性注入的方法使磁场方向反转, 勉强

获得成功. 在新的实验方案中, 将采用低温等离子体来实现磁场方向反转. 所谓串列磁镜, 就是在一个长的中间磁镜室(或螺旋管)两端连接短的端部磁镜, 在端部磁镜中建立起高温高密度的“堵塞”等离子体, 利用静电约束来克服终端损失. 美国劳伦斯利弗莫尔实验室的大型串列磁镜已投入运行^[4]. 中部的螺旋管长 5 米, 中心磁场 2kG, 两端有两个场强为 10kG 的端部磁镜, 每个端部磁镜都用 5MW 的中性束注入加热. 目前的注入功率大约是额定值的三分之一. 螺旋管中的等离子体密度为 10^{11}cm^{-3} , 离子温度为 100eV. 在端部磁镜中离子平均能量为 10keV, 加热束流持续时间为 25ms. 实验中出现的令人鼓舞的迹象是减少了由电子热导引起的损失. 从发展趋势来看, 串列磁镜有可能成为可以与托卡马克相竞争的很有前途的一种磁约束装置.

4. 反向场箍缩装置

反向场箍缩 (Reversed Field Pinch) 是英国卡拉姆实验室 1965 年在泽塔 (Zeta) 装置的放电实验中偶然发现的一种磁场位形. 后来采用程序控制外回路电流的办法来建立这种磁场位形. 它的特点是环向磁场 B_ϕ 在等离子体柱外面附近反向. 因而磁剪切大, 可以在 $q < 1$ 的情况下达到稳定平衡. 一批新的反场箍缩装置正在建造之中. 其中 ETA-BETA II 已于 1979 年建成投入运行^[4]. 该装置大半径为 130cm, 小半径为 25cm, 实验中测得环向磁场 3kG, 环向电流 210kA, 电流的衰减时间为 1.5ms. 当反场箍缩型等离子体形成时, 观察到了温度从 40eV 增加到将近 100eV, dI/dt 的波动明显减少, 约束情况也得到改善. 反向场箍缩也是目前较受重视的磁约束装置之一.

二、惯性约束系统的研究进展

惯性约束的基本原理, 就是采用某种方法使微量氘氚聚变物质在它们由于本身的惯性而来不及飞散的时间内突然加热到发生核聚变所

需要的高温。目前正在探索、研究的惯性约束系统,包括激光核聚变、相对论性强流电子束核聚变和强流离子束核聚变(包括轻离子束和重离子束)。由于惯性约束系统跟磁约束系统相比,避免了复杂的强磁场结构,因而很有吸引力。尽管这方面的研究工作开展得较晚,十多年来已取得不少进展,日益受到重视。

1. 激光核聚变

六十年代,激光技术的迅速发展为核聚变研究开辟了新的领域——激光核聚变。七十年代初开展了较大规模的激光核聚变研究,近年来取得了较大进展。投入力量最大的是美国。劳伦斯利弗莫尔实验室主要研究钨玻璃为工作介质的功率激光系统。1977年建成了 Argus 装置,其输出功率为 $3 \times 10^{11} \text{W}$, 能量为 2kJ, 测得离子温度 $T_i = 8 \text{keV}$, 中子产额为 10^9 。1978年建成了大型的激光核聚变装置 SHIVA^[4]。该装置高 6m, 长 90m, 共有 20 路激光束, 功率达到 $2.6 \times 10^{13} \text{W}$, 输出能量达到 10^4J 。用如此强大的多路激光束照射氘氚靶球, 观察到了大约 100 倍液体密度的压缩, 中子产额为 3×10^{10} 。这是目前激光核聚变研究中的最高水平。他们计划在 1982 年建成一台规模更大的钨玻璃激光核聚变装置 NOVA^[4], 功率将达到 $2 \times 10^{14} \text{W}$, 输出能量为 100kJ。洛斯·阿拉莫斯实验室主要从事以 CO_2 为工作介质的激光核聚变研究工作。其激光功率已接近钨玻璃激光达到的水平。

苏联也有两台大型激光核聚变装置 Kalmar 和 Delfin^[4], 其中 Kalmar 有 9 路激光束, 能量为 200J。Delfin 装置规模很大, 共有 216 路激光束, 总能量为 10kJ, 脉冲宽度为 0.1~10ns。目前正在运行的 Delfin 装置有 54 路激光束, 能量为 500J, 脉冲宽度为 1.5~5ns。日本也正在建造一台大型的激光核聚变装置。

2. 相对论性强流电子束核聚变

这是核聚变研究中开展得较晚的一个新领域。它跟激光核聚变的原理基本相似。两者相

比, 它的优点是从电能转换成电子束能量的效率高, 制造大功率的电子束装置技术上相对来说比较简单, 因而日益受到重视。它的缺点是除了电子束的聚焦和传输比较困难之外, 主要的困难还在于电子束打靶时, 靶丸受到韧致辐射预热而难以压缩。按照经典的库仑碰撞理论, 相对论电子束与靶中的电子和离子的碰撞几率是很小的, 也就是说电子束在靶中的能量沉积是很弱的。令人鼓舞的是, 至今已有实验表明强流相对论电子束与靶粒子相互作用的能量沉积要比经典理论的计算值大 1~2 个数量级。相对论性电子束主要通过脉冲电子加速器来产生。美国、苏联、日本等国在七十年代建成了几台大型脉冲电子加速器, 目前运行的最大的是美国的 Proto 2 装置, 电压为 1.5MV, 电流为 6000kA, 脉冲宽度为 24ns, 总能量为 216kJ, 功率为 $9 \times 10^{12} \text{W}$ 。还有几台更大的强流电子束发生装置正在建造之中^[6]。美国桑迪亚实验室正在建造两台大功率电子束发生装置 EBFA-1 和 EBFA-2。其中 EBFA-1 计划 1980 年建成, 电压为 2MV, 传给负载的净能量为 1MJ。它由 36 个组件组成。该装置的第一个组件已在 1979 年进行了试验。EBFA-2 装置预计在 1983—1984 年建成。设计功率为 10^{14}W 。苏联也计划在库尔恰托夫研究所建造更大型的强流电子束发生器 Angara-5, 设计能量为 5MJ。预计该装置将于 1983—1984 年全部建成。

3. 重离子束核聚变

用重离子束压缩和加热靶球实现核聚变, 这是近几年才提出来的一种新方案。它的基本原理是从重离子加速器中引出微妙量级的高能重离子束, 分别注入到贮存环中, 然后从贮存环中同时引出毫微秒脉宽的重离子束, 打到靶球上, 实现压缩和加热。这种方案的优点是: 离子在靶球外壳上的散射小, 没有韧致辐射, 能量沉积大, 所以要求离子束的总功率相对来说要小一些。缺点是离子束的引出和传输困难, 造价昂贵。据估计, 目前的加速器技术是有可能产生适合聚变需要的重离子束的, 只是成本比

较高。美国阿贡实验室计划在1984年进行重离子束核聚变演示实验^[1]。在这基础上再开始研究能量得失相当的实验。

4. 轻离子束打靶

在1979年7月召开的强流电子束和强流离子束第三次国际专题讨论会上,采用轻离子束打靶实现惯性约束的方法受到了重视^[2]。这一方面是因为强流离子束的产生和聚焦方面取得了明显进展,另一方面,采用这种方法束流和靶之间的能量吸收效率要比激光聚变高得多。美国海军科学实验室和桑迪亚实验室报告了他们的研究进展。在轻离子束的焦点处,电流密度已达到 $200\text{kA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。他们正在改进聚焦技术,使靶上电流密度有可能达到 $10^7\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。在法国利梅尔(Limeil)实验室已获得了流强为1.2MA、能量为300keV的强流氖离子束,这对于惯性约束聚变是很有吸引力的。不过它的困难是束流发散角比较大。

三、聚变反应堆工艺研究

由于在各种类型核聚变实验装置上不断取得令人鼓舞的实验结果,以及高温等离子体物理学的进展,增强了人们对于将来建成聚变反应堆以实现受控核聚变动力的信心。从1970年左右就开始了聚变反应堆的有关研究。各国投入聚变堆工程技术研究的人力、财力逐年增加,并已召开了多次国际性的聚变反应堆工艺讨论会。目前聚变堆的研究工作基本上从两个方面进行。一方面是以当前几种有前途的主要实验装置为基础,进行聚变堆的概念设计。现在已提出了托卡马克聚变堆、磁镜聚变堆、激光聚变堆等不同类型的许多种概念设计方案,包括堆的系统设计,堆的启动、控制,燃料注入,废料排出等问题。另一方面的研究工作是跟堆的类型无关的一些共同问题,包括堆芯等离子体参数的选择,等离子体与壁的相互作用,第一壁材料的辐照损伤,杂质的控制,氚的增殖循环等问

题。在这些方面都已做了大量工作。目前,一台工程试验装置(ETF)已成为美国核聚变政策的中心事件。ETF是以氘氚为燃料的托卡马克型点火装置^[4]。它的大半径 $R=5\text{m}$,小半径为 $(1.2/1.9)\text{m}$, $\langle\beta\rangle\sim 7\%$,燃烧时间大于100sec,第一壁的热负荷大于 $1\text{MW}/\text{m}^2$ 。1979年12月,在国际原子能委员会的主持下由美国、苏联、日本和西欧联营四个代表团共同开始设计一个大型的国际聚变装置INTOR,大半径为5.2m,小半径为1.6m。

四、结束语

受控核聚变研究是人类开发自然的一次攻坚战,尽管在实现核聚变动力这一目标之前还必须解决包括理论、实验和工程技术几方面在内的一系列难题,但目前为止并未发现前进道路上有不可逾越的障碍。根据国际聚变研究机构估计^[3],在八十年代有可能实现热核“点火”。到下个世纪初,有希望用核聚变动力弥补那时将出现的能源短缺。从下个世纪二十年代开始,核聚变动力将在整个能源构成中占据越来越重要的地位。

参 考 文 献

- [1] L. A. Artsimovich, *Nucl. Fusion* 12-2(1972), 215.
- [2] J. M. Rawls et al., DOE/ER-0034, (1979), 2.
- [3] H. Eubank et al., in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 7th Int. Conf. Innsbruck, 1978)*, Vol. 1, IAEA, Vienna, (1979), 167.
- [4] R. J. Bickerton, *Nucl. Fusion*, 20-1(1980), 105.
- [5] J. Benford et al., in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 6th Int. Conf. Berchtesgaden, 1976)*, Vol. 2, IAEA, Vienna, (1977), 543.
- [6] E. Appgar et al., in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 6th Int. Conf. Berchtesgaden, 1976)*, Vol. 1, IAEA, Vienna, (1977), 247.
- [7] M. Gaudreau et al., *Phys. Rev. Lett.*, 39-20 (1977), 1266.
- [8] D. D. Ryutov, *Nucl. Fusion*, 19-12(1979), 1685.
- [9] IFRC, *Nucl. Fusion*, 18-1(1978), 137.