

HT-7 超导托卡马克最新实验进展*

李建刚 谢纪康

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 HT-7 超导托卡马克在过去的一年中取得较大进展:高参数放电时间长度接近 4s,总加热功率超过 1 MW,在低杂波全波驱动、电流爬升、离子回旋共振加热、双波协同效应、射频壁处理、低环电压启动等方面都取得可喜的结果。

关键词 超导托卡马克,低杂波,离子回旋共振加热

LATEST ACHIEVEMENTS OF HT-7 SUPERCONDUCTING TOKAMAK

LI Jian-Gang XIE Ji-Kang

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract Significant progress has been achieved on the HT-7 superconducting tokamak over the past year. The pulse length of the high performance plasma is almost 4s. The total heating power exceeds 1 MW. Experiments have been carried out with encouraging results on the full wave current drive and plasma current ramp-up by low hybrid waves (LHW), high power ion cyclotron resonant heating (ICRH), synergy between LHW and ICRH, RF conditioning and low voltage start-up.

Key words superconducting tokamak, low hybrid waves, ion cyclotron resonant heating

聚变是一种战略能源,是 21 世纪的换代能源。与当代的能源相比,它是清洁的,是与环境相容的。因此它将作为一种洁净、安全和几乎用之不竭的新能源而得到迅速的发展。

可控聚变能的研究分两种途径:一是惯性约束。它是利用超高强度的激光在极短的时间内辐照靶板来产生聚变;二是磁约束。它是利用强磁场可以很好地约束带电粒子的特性,构造一个特殊的磁容器,在其中将聚变材料加热至数亿度高温,实现聚变反应,建成聚变反应堆。而在磁约束中,托卡马克环形器位形的研究则大大领先于其他途径。20 世纪下半叶,聚变能的开发取得了重大的进展,特别是在磁约束聚变装置托卡马克上取得了突破性的进展:等离子体温度已达 4.4 亿度;脉冲聚变输出功率超过 16 MW;表征输出功率与输入功率之比的 Q 值已超过 1.25。所有这些成就都表明,在这类装置上产生聚变能的科学可行性已被证实。

将超导技术成功地应用于托卡马克上,使磁约束位形的连续稳态运行成为现实。因此,超导托卡马克上“稳态先进运行模式”成为当今世界磁约束聚变研究的前沿。20 世纪 90 年代,我国科学家继俄、法、

日之后又建成世界上第 4 个超导托卡马克 HT-7 装置。经过 3 年的工程调试和运行,HT-7 运行参数均达到工程设计指标,并全面开展围绕准稳态、长脉冲为核心的物理实验。2000 年 1 月开始的高参数长脉冲实验,标志着我国磁约束核聚变研究的综合实力和科学技术达到了国际水平。本文着重介绍在过去一年中 HT-7 的实验主要进展。

1 HT-7 装置简介

HT-7 超导托卡马克由装置主机、低温系统、极向场电源及控制系统、内外真空系统、电机系统、磁体及技术诊断、总控系统、计算机采集及数据处理、低杂波电流驱动、离子回旋共振加热、电子回旋加热、等离子体诊断以及水冷等多系统组成。HT-7 超导托卡马克建成于 1994 年底。它的设计参数为:大半径 $R=1.22\text{ m}$,小半径 0.3 m ,磁场强度 2.5 T ,等离

* 国家自然科学基金委员会重点基金(批准号:19789502,19885502,19789501)和面上基金(批准号:9885005)资助项目
2000-10-18 收到初稿,2001-01-10 修回

子电流 250kA, 等离子体密度 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 电子温度 $T_e = 1.0 \text{ keV}$, 离子温度 $T_i = 0.5 \text{ keV}$, 等离子体存在时间为 3—5s. HT-7 装置示意图见本期封面. 经过几年的运行和实验, 获得的等离子体最高参数分别为: 等离子体电流 260kA; 电子温度 1.5keV; 离子温度接近 1keV; 等离子体密度 $6.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$; 等离子体存在时间超过 10s. 已经成功地将大于 800kW 的低杂波和 330kW 的离子回旋波注入等离子体, 总加热功率超过 1MW. 用于测量等离子体宏观和微观参数诊断系统已经超过 30 项, 其中包括快扫描电子回旋辐射测量、Thomson 激光散射仪及能给出高分辨时空分布的探测阵列系统等.

HT-7 超导托卡马克的主要研究方向是研究在稳态等离子体条件下先进托卡马克运行的物理和相关技术. 围绕这一主题, 在过去的几年中, 成功地进行了内容丰富的实验, 如低杂波驱动电流^[1-3]、离子回旋共振加热^[4-6]、运行区实验、电流快上升、误差场、等离子体与壁相互作用、弹丸注入、反剪切、玛非、多变量反馈控制、电流调制抑制 MHD 以及高密度实验.

2 HT-7 实验最新进展

2.1 低杂波驱动电流实验

对未来磁约束聚变堆而言, 连续稳定的高参数运行是必不可少的. 利用低混杂波驱动电流并维持其稳态运行, 是近年来托卡马克研究的重要方向之一. HT-7 低杂波系统由 12 只磁控管组成. 单管输出功率为 120kW, 频率为 2.45GHz, 配备有快速调相系统, 能够在小于 1ms 的时间内改变低杂波的发射谱分布. 利用低杂波成功地进行全波驱动实验, 即全部的等离子体电流为低杂波所维持. 等离子体电流为 70kA, 密度为 $(0.5-0.8) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 低杂波功率为 200kW. 在低杂波投入后, 等离子体环电压迅速降至为零, 这时的等离子体的磁通 ψ_s 保持不变, 一直维持接近 4s 钟时间.

利用低杂波驱动电流的慢上升也是一项相当重要的实验. 在低杂波投入之前, 等离子体电流 I_p 为 150kA, 线平均密度为 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 等离子体中心电子和离子温度分别为 700eV 和 400eV. 在低杂波投入后, 利用反馈控制, 使环电压保持不变, 即维持在加波前的 1.5V 上. 这时等离子体电流在低杂波的作用下, 从 150kA 经过 220ms 到达平顶 230kA, 净增加 80kA. 与此同时, 通过增加冲气, 将等离子体密度控

制在 $1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. 等离子体电子温度也增至 1keV, 达到较高时参数.

2.2 射频壁处理实验

对磁约束聚变装置而言, 一个干净的壁状况是获得高品质等离子体的必要条件. 常规的对第一壁进行有效清洗的方法是直流气体辉光放电. 但对超导装置来说, 由于存在高强度的磁场, 直流辉光放电清洗技术不再适用. 如若继续使用该技术, 必须花大量时间对磁体充放电, 使磁场为零, 这样又加速了磁体的老化过程, 因此新的技术必须发展.

几年来, 在 HT-7 超导托卡马克上发展起来一整套全新的壁处理技术, 即射频壁处理技术^[7]. 它是针对未来超导聚变堆而发展起来的先进技术, 包括对第一壁杂质的清洗、氢及再循环控制、硼化和磁化等多项内容.

利用离子回旋波能十分有效地产生射频等离子体. 与辉光放电等离子体相比, 射频等离子体的密度要高 5—10 倍, 离子温度高达 1—2keV, 是辉光等离子体离子温度的 3 个量级. 因此它对第一壁的轰击能量和密度都要高很多倍, 从而可以高效快速地清除吸附在第一壁表面杂质粒子. 工作气体分别是氩和氦. 射频氩等离子体对除氢和再循环控制特别有效, 而氦射频等离子体对杂质的去除则更加快捷. 3 年的实验结果表明, 利用射频技术, 对氢的清除率是辉光清洗的 20 倍, 而对水和一氧化碳等杂质的清除率则比辉光放电高出两个量级以上.

将装置充上硅烷或碳硼烷气体, 就可以利用射频等离子体进行第一壁镀膜, 即射频硼化和射频硅化. 硼化或硅化的工艺差别不大, 但所充的工作气体和处理过程大不一样. 硼化处理包括预清洗、硼化和除氢三个过程, 大约需要 4h. 而硅化则十分简单, 无需预清洗和除氢处理, 仅需要 1h. 两种壁处理都能大大改善等离子体的性能, 立刻获得高品质等离子体放电. 硼化后, 器壁上吸附大量的氢, 因而返流特别大, 等离子体密度要经过数十次放电才能可控. 而硅化后的器壁返流特别低, 等离子体密度控制十分容易. 每次硼化所得的硼膜厚度为 250nm, 而硅膜厚度仅为 60nm 左右. 硼膜的寿命要比硅膜长 4 倍左右, 即硅膜的寿命为 400 次放电, 而硼膜的寿命为 1500 次放电. 与常规辉光放电镀膜相比, 射频镀膜的均匀性、沾滞性、硬度以及寿命都得到很大的提高.

2.3 离子伯恩斯坦波加热实验

离子伯恩斯坦波作为一种静电波能够有效地对

等离子体进行加热,特别是对未来聚变堆高参数等离子体有特别好的可近性,能够有效地传播至堆芯并将其加热.离子伯恩斯坦波处于离子回旋频段,波的发射频率为 24—30 MHz,发射功率为 300 kW.波通过从低场区入射的 T 型天线馈入,直接激发成离子伯恩斯坦波.由于天线在等离子体放电过程中直接面向等离子体,天线产生的高强度电磁场会将天线处的气体击穿,产生杂质辐射.馈入功率越大,杂质问题越严重.

经过硼化、传输馈线充气等一系列改进后,本轮实验实际大于 300 kW 的满功率注入,从工程技术上前进了一大步.等离子体电子温度从 420 eV 增至 970 eV,电子密度从 $1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 上升到 $2.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$.软 X 射线辐射表明,等离子体能量大大增加,粒子约束也得到了很好的改善.

2.4 双波联合实验

全部利用波对等离子体加热和驱动是 HT-7 超导托卡马克有别于国外同类型装置的特色之一.在高功率密度条件下,由于天线在高功率负荷下产生的杂质会大大降低等离子体的约束行为,因此兆瓦级波加热一直是一个较难的研究课题.高功率长脉冲一直是 HT-7 超导托卡马克所追求的目标.HT-7 已经实现总加热功率超过 1 MW 的高参数放电.等离子体电流为 150 kA,欧姆加热功率为 320 kW,离子回旋的注入功率为 200 kW,低杂波的注入功率为 500 kW.辅助加热功率是欧姆功率的两倍以上.等离子体参数也有较大的提高,密度增加了两倍,电子温度超过 1 keV.

通过有效的硼化和氦清洗并合理地注入低杂波和离子伯恩斯坦波,可以使等离子体约束达到一个更高的状态.在低杂波和离子伯恩斯坦波相互作用的时段内,等离子体环电压突然从 2 V 降低到 1 V 左右.环电压的降低表明,低杂波的驱动效率增加,即在更低的环电压下驱动出同样的电流.与此同时,等离子体密度增加了 1 倍,而 H_α 辐射却有明显的下降,表明等离子体粒子约束行为大大得到改善.由于离子伯恩斯坦波的作用,电子温度也有了增加.在单离子伯恩斯坦波注入时段,电子温度从 0.7 keV 增至 1.0 keV.在低杂波和 IBW 的共同作用下,电子温度继续升高至 1.5 keV.因此在加波时间区间,无论是等离子体的约束性能和驱动及加热效率都有较大的提高.

2.5 低环压启动实验

成功地实现低环电压启动,也是 HT-7 实验的

一重大进展.低环电压启动对未来超导托卡马克聚变堆来说意义重大.HT-7 装置由于存在较高的杂散场,因而一般欧姆放电的击穿电压在 20 V 以上.同时电流上升率在起始阶段很难低于 1 MA/s.作为下一代全超导托卡马克,国家“九五”重大科学工程“HT-7U”装置的先行实验,我们分别利用低杂波和离子回旋波进行预电离和加热,成功将击穿电压降至 6 V 以下,起始段的电流上升率下降至 0.5 MA/s.随后,又利用两支波的不同特性,将离子回旋波主要用作预电离,降低击穿环电压;将低杂波主要用于电流的启动,并将两支波同时作用于等离子体电流建立的起始段,离子回旋注入功率 100 kW,低杂波注入功率 200 kW.从而使击穿电压进一步降低至 4.5 V,电流的上升率小于 0.22 MA/s,完全达到 HT-7U 的设计指标,从而大大降低超导极向场在电流快速变化的起始段引发失超的可能性.

2.6 长脉冲实验

高参数稳态运行是磁约束托卡马克位形建堆的必要条件.目前几乎世界上所有托卡马克都是脉冲运行.仅法国的 TORE SUPRA 超导装置实现了高参数两分钟放电.其他放电长度超过 5 s 的装置为数很少.高参数长脉冲放电是工程技术、物理及诊断多方面的综合标志,难度也较大.HT-7 实验围绕这一目标也做了大量的工作,2000 年初开始的实验在这一方面有较大的进展,取得了可喜的成果.

首先,我们成功地将多变量控制和软件解耦技术运用于等离子体的反馈控制之中,使得等离子体电流和位形的精确控制得以实现.其次,在低杂波驱动、射频加热、射频壁处理和等离子体与壁相互作用方面的进展为长脉冲放电打下了坚实的基础.在等离子体电流为 70 kA,弦平均密度为 $0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、电子温度为 400 eV 条件下,放电时间接近 7 s.在放电后期 5.5 s 开始,由于等离子体对限制器的过大的热负荷,造成限制器过热而出气,返流急剧增大,使密度难以控制,最后造成放电中止.

图 1 为高参数长脉冲放电.装置经过硼化处理达到非常好的壁状态,即杂质含量极低.在此条件下,提高等离子体电流至 100 kA,密度为 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$.多脉冲汤姆孙(Thomson)散射分布、ECE 以及软 X 射线能谱三种诊断的测量都表明中心电子密度超过 1.0 keV,实现了高温等离子体放电,放电长度接近 4 s.

虽然 HT-7 实验取得一些进展^[8-12],4 s 高参数放电距稳态运行尚有较大的距离.这依然是摆在全

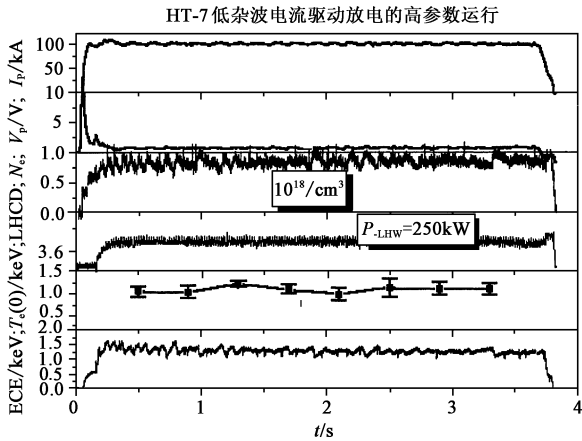


图1 高参长脉冲放电

世界聚变科学家面前的难题. HT-7 新的水冷石墨限制器, 1 MW低杂波天馈系统和1 MW射频加热系

布基球的超导临界温度已经达到 52 K

自1990年能用简单的方法大量制备出由60个碳原子构成的“布基球” C_{60} 之后,出现了研究布基球 C_{60} 的热潮.次年报道了发现掺入碱金属原子的 C_{60} 晶体具有超导性,其临界超导温度不超过33 K,而且随掺杂剂而变.在掺有碱金属原子的 C_{60} 晶体中,碱金属原子把电子让与 C_{60} 的晶格.但是,人们预期空穴掺杂的布基球具有甚至更高的临界温度,虽然直到现在,还没有人能够加入掺杂剂来把电子从 C_{60} 分子拉走,由此得到空穴掺杂的布基球.

去年,美国Bell实验室的研究人员进行了制备空穴掺杂的布基球的尝试.他们直接把空穴注入 C_{60} 晶体的顶层中,在这个层内不加入任何离子.他们发现,由此得到的空穴掺杂的材料确实具有更高的临界温度, $T_c = 52 K$.此外,他们还连续地从负到正改变掺杂剂量,以探索 C_{60} 的行为.他们的实验方法有助于弄清布基球为什么具有超导性的机制.其实验方法是根据场效应晶体管(FET)设计的,实验安排简述如下.

在 C_{60} 晶体的顶面上置放两个电极,用以测量电阻率. C_{60} 晶体的顶面和这两个电极都用氧化铝介质层盖住,再在氧化铝介质层上置放一个门电极.如果加在门电极上的电压是负的,则空穴便被吸引到 C_{60} 晶体的顶层;如果加在门电极上的电压是正的,则电子便被吸引到 C_{60} 晶体的顶层.通过改变门电压的大小和极性,就可改变 C_{60} 晶体顶层内电荷的密度和符号.

Bell实验室的研究人员发现,当掺杂剂量达到每个 C_{60} 分子有3.0至3.5个空穴时,临界温度达到最大值52 K.当门电压变为正时,电子注入到 C_{60} 晶体的顶层内,达到每个分子有3个电子时,也观察到一个临界温度的峰值,不过只有11 K. Bell实验室的这些

统正在建设和实验之中.随着这些新系统的建成,更高参数的长脉冲放电会继续进行.

参考文献

- [1] Kuang G L *et al.* Chin. Phys. Lett., 1998, 15 : 435
- [2] Kuang G *et al.* Fusion Technology, 1999, 36 : 212
- [3] Kuang G L *et al.* Nucl. Fusion, 1999, 39 : 1769
- [4] Zhao Y P *et al.* Chin. Phys. Lett., 1997, 14 : 916
- [5] Yang X K *et al.* Fusion Engineer Design, 1998, 39 : 129
- [6] Ye W W. Chin. Phys. Lett., 1999, 16 : 273
- [7] Li J *et al.* Nucl. Fusion, 1999, 39 : 973
- [8] Yang Y *et al.* Nucl. Fusion, 1999, 39 : 1871
- [9] Gao X *et al.* Plasma Phys. Control. Fusion, 1999, 41 : 1349
- [10] Zhang S Y *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2000, 71 : 2058
- [11] Gao X *et al.* J. Nucl. Mater., 2000, 279 : 330
- [12] Li J *et al.* Plasma Phys. Control. Fusion, 2000, 42 : 135

电子掺杂实验结果与化学掺杂的 C_{60} 块状样品(也就是原子加到晶格的样品)测量结果是相符的.这些结果表明,最有利于超导性的结构是每个分子具有3个电子或 $A_3 C_{60}$ 的结果,其中A是碱金属原子. Bell实验室的研究人员还通过改变门电压(称此法为“门掺杂”),研究了掺杂剂量从-4.5变到+4.5时掺杂剂量与临界温度的关系.结果表明,掺杂剂量低于1.7和高于4.5时,空穴掺杂材料仍然是超导性的,虽然临界温度很低.但是,对于电子注入的材料,超导范围很小,只介于每个分子有2.5至3.6个电子之间.利用这种“门掺杂”方法,研究掺杂剂量与临界温度的关系变得非常容易.假如用化学掺杂法来研究掺杂剂量与临界温度的关系,则对每一个掺杂剂量就要做一个样品,这样就必需要做很多样品,才能仔细测出掺杂剂量与临界温度的关系.但是,化学掺杂法功不可没,它是对门掺杂方法的补充,因为用化学掺杂法制备的样品,可以用来测量超导性与晶格间距之间的关系.

用较大的原子来对 C_{60} 晶体掺杂, C_{60} 晶体的晶格能被扩大.较宽的晶格间距可使相邻分子的电子带之间的重迭减少,并使带宽变窄.超导体的临界温度是与带宽成反比的.因此,掺杂原子越大,临界温度也会越高.现在有人想把空穴掺杂的 C_{60} 的晶格扩大,以获得更高的临界温度.在电子掺杂情形,晶格间距为14.6 Å的门掺杂样品的临界温度 $T_c = 11 K$,而晶格间距为14.56 Å的 $Rb_2 CsC_{60}$ 的临界温度 T_c 上升到了33 K.如果能将间隙原子掺入,使得空穴掺杂的 C_{60} 的晶格扩大到相同大小,则其临界温度 T_c 估计可达到100 K以上.

[中国科学院物理研究所 李银安 摘自 Barbara Goss Levi. Physics Today, 2001(1) : 15]