

# 受控热核聚变实验研究装置 ——中国环流器新一号(HL-1M)\*

邓希文 严建成 袁保山 谈满秋 秦运文 任俱前 焦伯良 李贵清 王树锦  
(核工业西南物理研究院 成都 610041)

**摘要** 描述了用于受控热核聚变实验研究的中国环流器新一号(HL-1M)装置和初步物理实验结果.

**关键词** 核聚变, 环流器(托卡马克)

## THE HL-1M EXPERIMENTAL THERMONUCLEAR FUSION DEVICE

Deng Xiwen Yan Jiancheng Yuan Baoshan Tan Manqiu  
Qin Yunwen Ren Juqian Jiao Bailiang Li Guiqing Wang Shujin  
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

**Abstract** A device for experimental research on controlled thermonuclear fusion—the HL-1M, a modification of the HL-1M tokamak—is described and its preliminary experimental results are summarized.

**Key words** nuclear fusion, tokamak

中国环流器新一号(HL-1M)是用于受控热核聚变实验研究的中型托卡马克装置,是在环流器一号(HL-1)的基础上改建而成的,其主要物理目标是研究高功率辅助加热、低杂波电流驱动和弹丸注入加料,研究在这些条件下的高温等离子体性质<sup>[1]</sup>.

托卡马克装置类似变压器,原边是极向磁场线圈中的欧姆线圈,副边是环形容器中的等离子体环(图1).但是,围绕环形容器的环向磁场线圈是它不可缺少的组成部分,而欧姆线圈甚至可以去掉.并且,在极向磁场线圈中,还有垂直场线圈(它可以建立控制等离子体平衡位置的垂直于环形容器中平面的磁场)和成形场线圈(它起形成给定约束磁场位形的作用)等等.一种极向场线圈可能具有多种功能.托卡马克装置的变压器可以是有铁芯的,也可以是空芯的;环形容器小截面可以是圆形的,也可以是

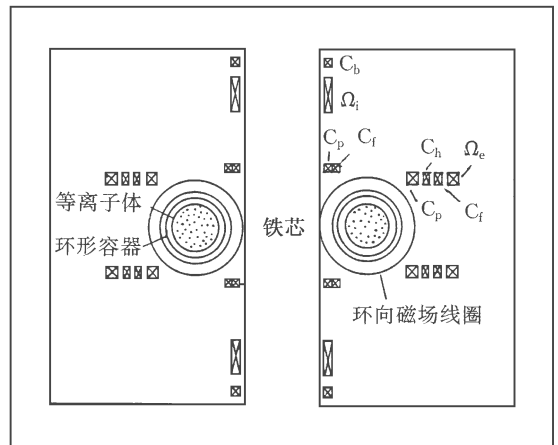


图1 托卡马克示意图  
(未加说明的符号表示极向磁场线圈)

非圆形的.

原 HL-1 装置是有铁芯的圆截面托卡马

\* 1998-07-17 收到初稿,1999-01-08 修回

克装置. 在环形容器和环向场线圈之间, 有厚度为 5cm 的铜壳, 其作用是改善等离子体的平衡. 但是, 铜壳限制着环形容器的小截面半径, 也就限制着等离子体小半径、等离子体参数诊断窗口和电磁波及中性粒子束注入窗口的尺寸和数量. 较大半径的等离子体, 可以荷载较大的电流, 约束性能随之提高. 加热等离子体的高能中性粒子束沿垂直于环向磁场的方向注入时, 等离子体小截面直径应该显著大于中性粒子束的衰减长度. 加热等离子体或驱动电流的电磁波的发射天线, 需要大尺寸窗口. 等离子体参数诊断系统, 需要大量窗口. 在具有空间分辨能力的诊断方法中, 多数需要大尺寸窗口. 因此, 去掉铜壳, 用精良的磁场位形和反馈平衡系统约束等离子体, 以实现 HL-1M 的物理目标, 是改建 HL-1 装置主机的设计思想.

HL-1M 装置有多组极向场线圈 (见图 1), 它们是: 偏磁线圈  $C_b$  (用于倍增铁芯磁通变化伏秒数)、内欧姆线圈  $\Omega_i$ 、外欧姆线圈  $\Omega_e$ 、垂直场线圈  $C_p$ 、反馈垂直场线圈  $C_r$  和水平场线圈  $C_h$  (用于补偿水平杂散场). 装置主要设计参数为: 环形容器大半径  $R=102\text{cm}$ , 小半径  $b=32\text{cm}$ , 孔栏半径  $a_L=26\text{cm}$  (使等离子体不直接触及环形容器壁), 环向磁场  $B_T=3.5\text{T}$ , 等离子体电流  $I_p=350\text{kA}$ . 工作气体主要是氢和氦.

托卡马克装置的研制是一项规模大、结构复杂、加工及装配精度要求高、技术先进的电物理工程项目. 去掉起平衡、稳定作用的铜壳, 把温度高达几千万度的等离子体约束在环形容器中. 为此, 磁场位形设计必须十分精良; 环向磁场的杂散横向分量应小于  $10^{-3} B_T$ ; 极向磁场和变压器铁芯建立的磁场位形的边界封闭磁面应接近孔栏, 并对垂直场的适度调节不敏感. HL-1M 的磁场位形设计<sup>[2]</sup>和极向场线圈研制<sup>1)</sup>满足了这些要求. 优化配置的极向场系统和反馈平衡场系统, 使等离子体平衡位置的偏离被控制在几毫米以内.

环形容器的器壁虽然有孔栏和保护环, 但仍受到高能粒子和热辐射轰击, 被分解吸附出来的大量杂质污染等离子体, 有时甚至使装置

不能正常放电. 送工作气体之前, 环形容器本底真空达到  $10^{-5}\text{Pa}$  量级, 是正常放电的基本条件. 因此, 环形容器必须是超高真空容器. 原 HL-1 装置的铜壳同时起着外真空室的作用, 减轻了对环形容器 (内真空室) 真空密封的要求. 去掉铜壳, 室内增设石墨孔栏和石墨热屏蔽板等第一壁材料 (覆盖面达环形容器表面积的 5%), 同时窗口从 23 个增加到 54 个, 并扩大尺寸, 这些都大大增加了处于强脉冲冲击状态下的大容积超高真空室的机械结构和真空密封的困难. 我们采用多种办法解决了这些困难<sup>[3,4]</sup>.

除装置主机之外, HL-1M 工程还有真空抽气、电源及控制、无感电流驱动、辅助加热、等离子体诊断和数据采集与处理等分系统. 多功能组合抽气系统主要包括 3 台 F-250 涡轮分子泵、1 台低温冷凝泵和 1 台离子溅射泵, 具有很强的抽除  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{C}_n\text{H}_m$  的能力, 总有效抽速为  $1.5\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . 供电系统充分利用飞轮发电机组将大容量脉冲负载与工业电网隔离的特性, 全部冲击性负载均由飞轮发电机组供电, 即其中一台 80MW 飞轮机组给环向场线圈与辅助加热系统的高压电源供电, 另一台给所有极向场线圈供电. 具有四象限运行特征、带有闭环调节器反馈控制系统的晶闸管变流器, 用于等离子体位移控制系统. 同时, 还采用微机可编程控制器及采集器来完成时序控制、逻辑控制及有关闭环调节和参数采集与处理的控制, 大大提高了装置运行的安全性与可靠性. 低杂波电流驱动功率为 1MW (波频率 2.45GHz). 辅助加热包括 1MW 中性粒子束 (能量 20-40keV)、1MW 离子回旋频段 (频率 30-45MHz) 和 0.5MW 电子回旋频段 (频率为 37.5 和 75GHz) 加热. 加料与排灰系统具有一次可注入 8 发弹丸 (尺寸为  $\phi 1\times 1\text{mm}$  或  $\phi 1.4\times 1.4\text{mm}$ , 速度为  $0.6-1\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 的多发弹丸发射系统及抽气孔栏. 诊断系统由 20 多项诊断组成, 包括所有常规诊断和主要参数的时空分辨诊断. 数

1) 谈满秋, 李广生, 单亚农等, 研究报告, 核工业西南物理研究院, 成都, 1995 年

据采集与处理系统由 VAX 机、微机和 CAMAC 系统组成,采集能力在 20MB 以上,记录和存档数据为 5—6MB.采集与实时处理系统可使 4MB 数据的采集与图形显示在 30s 内完成.

HL-1M 装置经过一年的技术论证和几项重大工艺试验,主机于 1993 年初投产,1994 年 10 月 6 日安装完毕,于 10 月 7 日开始按方案进行工程总体联调<sup>[5]</sup>.首次抽真空运行,装置本底压强为  $5.6 \times 10^{-6}$  Pa,总漏放率为  $2.2 \times 10^{-6}$  Pa·m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup><sup>[6]</sup>,表明可以进行一系列的壁处理放电,然后进行托卡马克放电.随着电源等分系统的联合调试,环向磁场很快在  $B_T = 2.6$ T 下运行,获得  $I_p = 322$ kA 的等离子体.外欧姆线圈使伏秒数从 HL-1 装置的 1.75V·s 上升到 1.85V·s.最长放电延续时间  $\tau = 1040$ ms,超过设计指标.调试放电进展见图 2.

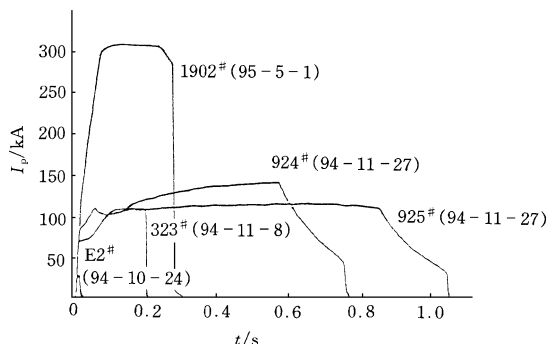


图 2 HL-1M 放电调试进展

1994 年至 1995 年调试阶段的物理实验结果分析表明<sup>[7]</sup>,HL-1M 装置设计精良,实现了典型的平衡、稳定的托卡马克放电,获得线平均电子密度  $\bar{n}_e \approx 3 \times 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>,中心电子温度  $T_e(0) > 1$ keV,中心离子温度  $T_i(0) > 0.5$ keV 和能量约束时间  $\tau_E \approx 10$ ms 的等离子体.容易得到安全因子  $q(a) = aB_T / RB_p(a) \approx 2.5$  的稳定放电,是 HL-1M 装置的特点之一( $a$  是等离子体小半径,  $B_p(a) = 2I_p / ca$  是电流在等离子体边界建立的极向磁场).只有在  $q(a)$  足够大的情况下,环向磁场才能抑制等离子体的磁流体动力学不稳定性.建立环向磁场需要消耗能量,因此,在给定环向磁场情况下,期望得

到尽量大的、形成约束磁场位形和加热等离子体的电流,即低  $q(a)$  稳定放电.

1995 年后,装置进入物理实验阶段,取得很好成果<sup>[8]</sup>.

低杂波工程系统的输出功率达到 850kW,脉冲宽度 1s (超过设计值)<sup>[9]</sup>.注入低杂波 337kW,驱动了 113kA 电流,占等离子体电流的 81%.在等离子体电子平均密度  $3.8 \times 10^{12}$  cm<sup>-3</sup>、电流 70kA 的条件下,注入 200kW 的低杂波,初步发现了波向变压器原边输入能量的充电效应.在注入低杂波的放电阶段,等离子体宏观不稳定性及边缘参数扰动受到抑制,粒子约束出现得到改善的迹象.并且,在一定条件下,低杂波引起大量超热离子.

1998 年,首次进行了高能中性(氢)粒子注入,即获成功.在一次注入功率 320kW (粒子能量为 20keV,脉冲宽度为 150ms),到达准稳态后,中心区域离子温度从 400keV 上升到 631keV,没有发现电子加热现象.等离子体中心电子温度为 1.2keV (平均温度约 0.6keV),高能中性粒子主要加热离子,但为什么不加热电子,仍在分析中.在高能中性粒子束注入阶段,欧姆加热仍然存在.并且,中性粒子束注入总伴随着电子密度上升,观察到的离子加热现象属综合性的,中性粒子束的作用也在分析中.

弹丸注入是将来聚变堆的加料方法.固体弹丸进入高温等离子体,其表层在等离子体电子的轰击下很快消融成中性粒子云.一方面,中性粒子通过电离和电荷交换等变成离子之后,受磁场和带电粒子间库仑力的作用,运动规律发生变化;托卡马克磁场位形把离子约束在一个个的磁面上.另一方面,消融中性粒子云使电子轰击弹丸表面的能量通量大大衰减,延缓了弹丸的消融过程.正是消融中性粒子云的这个性质,使弹丸得以运动到聚变等离子体的灼热心部,起到加料作用.在 HL-1M 装置上进行了一次放电注入多发弹丸的实验研究<sup>[10]</sup>.在一定条件下,弹丸注入使电子密度分布变陡,等离子体能量约束得到改善<sup>[11]</sup>.

在中、小实验装置上,分子束注入也可能成

为一种加料手段. 实验结果表明<sup>[12]</sup>, 分子束注入也可以改善等离子体的约束性能<sup>[11]</sup>.

几年来, 在 HL-1M 上还做了多方面的实验工作, 例如真空室壁的硼化、硅化和锂涂覆处理<sup>[13,14]</sup>, 激光吹入杂质的输运实验<sup>[15]</sup>, 软 X 射线的锯齿和模行为<sup>[16]</sup>等等.

中国环流器新一号 (HL-1M) 的正常运行, 为受控核聚变实验研究提供了很好的装置条件, 几年来不断取得新成果; 而且在建造装置过程中发展的新技术, 对促进我国的科技进步和工业技术改造起到了很好的作用. 例如加工真空室采用的低温固熔处理技术, 降低了 316 不锈钢的导磁率, 为厂家制造大型电物理设备简化了工艺过程, 降低了加工成本. 加工真空室研究成功的不同材料的薄壁波纹管与厚壁硬段的焊接技术, 为厂家承接难度大的类似加工储备了技术. 在供电系统中创造成功的大型电机励磁控制技术, 可用于中小型电厂的电机励磁控制. 高真空等技术及其在供电技术中创造的精密数字控制技术, 可用于工业控制, 现已为东方电机股份有限公司研制成功容积为  $22\text{m}^3$  的大型卧式真空退火炉, 用于长江三峡和黄河李家峡两大水利工程中大型水轮发电机转子线圈的退火. 大功率低杂波 ( $2.45\text{GHz}$ ,  $1\text{MW}$ ) 系统中的相关技术, 已用于大功率工业微波炉系统的研制 ( $10-100\text{kW}$ ), 可用于工艺陶瓷的烧制及木材、粮食干燥等方面, 也为军用大功率微波器件的研制建立了很好的技术基础. HL-1M 的位移反馈控制技术, 可应用到其他无导体壳

的聚变实验装置.

## 参 考 文 献

- [1] 邓希文, 严建成, 袁保山等. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊): 1-8
- [2] 袁保山, 杨开玲, 漆婉梨等. 核聚变与等离子体物理, 1996, 16(3): 32-37
- [3] 李贵清. 机械技术动态, 1994, (3-4): 1-3
- [4] 张映林, 孙林, 张年满等. 核聚变与等离子体物理, 1997, 17(4): 31-35
- [5] 谈满秋. 核聚变与等离子体物理, 1997, 17(2): 1-8
- [6] 严东海, 孙守祁, 许正华等. 核聚变与等离子体物理, 1997, 17(2): 57-60
- [7] 秦运文, 王恩耀, 严建成等. 核聚变与等离子体物理, 1997, 17(1): 18-26
- [8] HL-1M Team (Presented by Wang Enyao). 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊): 9-19
- [9] 刘永, 李晓东, 饶军等. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊): 43-49
- [10] 肖正贵, 孙文哲, 刘德权等. 真空与低温, 1997, 3(1): 12-18
- [11] 崔正英, 刘莉, 杨青巍等. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊): 62-66
- [12] Yao Lianghua, Tang Nianyi, Cui Zhengying *et al.* Nucl. Fus., 1998, 38: 631-638
- [13] 严东海, 王恩耀, 王志文等. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊): 51-55
- [14] 张年满, 王恩耀, 王明旭等. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊): 67-72
- [15] 冯兴亚, 汪占河, 陈键等. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊): 56-60
- [16] 郭干城, 刘仪, 钟云泽等. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊): 39-42

(上接第 322 页)

**致谢** 何治安、付羿、吴平桂、何蕾同学参加了实验工作, 李龙土院士、桂治轮教授、熊家炯教授、岳振星副教授、汤子康博士、罗莹博士等提出了宝贵意见, 在此一并表示感谢.

## 参 考 文 献

- [1] Kundu T K, Chakravorty D. Appl. Phys. Lett., 1995, 66: 3576-3578
- [2] Zhou Ji, Li Longtu, Gui Zhilun *et al.* Ferroelectrics, 1997, 196, 405-408
- [3] 周济, 李龙土, 桂治轮等. 科学通报, 1997, 42: 557-558
- [4] 周济, 李龙土, 桂治轮. 中国专利, CN1171633A, 1998