

# HL-2A 装置中的电子回旋波电流驱动\*

彭晓炜<sup>1,2</sup>, 龚学余<sup>1</sup>, 刘文艳<sup>1</sup>

(1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001;  
2. 清华大学工程物理系, 北京 100084)

**摘要:** 通过将相对论 Fokker-Planck 方程与波迹方程联合求解, 对 HL-2A 装置中的电子回旋波电流驱动进行了数值模拟, 研究了在 HL-2A 单零偏滤器条件下, 中平面弱场侧发射的电子回旋波寻常波电流驱动。结果表明, HL-2A 中的电子回旋波电流驱动效率较低并且受温度影响较为明显。

**关键词:** HL-2A; 电子回旋波; 电流驱动

中图分类号: O53 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2010)03-0052-04

## Electron Cyclotron Current Drive in HL-2A Tokamak

PENG Xiaowei<sup>1,2</sup>, GONG Xueyu<sup>1</sup>, LIU Wenyan<sup>1</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;  
2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A numerical simulation of electron cyclotron current drive in HL-2A tokamak is performed with the relativistic Fokker-Planck equation incorporated into a ray tracing code. With the single-null divertor configuration on the HL-2A tokamak, the current drive for the ordinary electron cyclotron wave, injected from the low field side, are analyzed. Numerical results show that current drive efficiency is low and can be affected dramatically by the change of temperature in HL-2A.

**Key words:** HL-2A; electron cyclotron wave; current drive

电子回旋波电流驱动(ECCD)是一种非常有吸引力的电流驱动方法,其主要的优点是波功率能传播到等离子体的中心,有潜力提供在芯部和近磁轴区域足够的电流驱动能力,可用于等离子体运行状态的优化和不稳定性控制<sup>[1-2]</sup>。电子回旋波系统对于现在的装置和下一步装置都具有许多吸引人的技术特性。最主要的优点是,电子回旋波能从真空有效的传入等离子体内,这是其它射频波不可比的。电子回旋波可以以很窄的波束传播,发射器不必很靠近等离子体,这使发射波导可以与等离子体有一定距离,波的耦合可以不受等离子体边界条件的限制,不要求对等离子体边缘进行控制,并且没有杂质问题产生。由于电子回旋波的波长非常短,

即使小的天线也能产生适度的衍射,可以使 EC 波保持窄的波束宽度,以支持高定域沉积的需要。近年来,由于长脉冲、高功率的回旋管源的显著发展<sup>[3-5]</sup>,更加拓宽了这一技术在托卡马克上的使用。

中国环流器二号 A(HL-2A)装置于 2002 年底建设完成。HL-2A 是我国第一个具有先进偏滤器位形的非圆截面的托卡马克核聚变实验研究装置,其主要目标是开展高参数等离子体条件下的改善约束实验,并利用其独特的大体积封闭偏滤器结构,开展核聚变领域许多前沿物理课题以及相关工程技术的研究,为我国下一步聚变堆研究与发展提供技术基础。

\* 收稿日期: 2009-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10475039, 10775066); 高等学校博士点学科专项科研基金资助项目(20094324120003)。

作者简介: 彭晓炜(1978年生),男,讲师,博士; E-mail: xw.peng@yahoo.com.cn

HL-2A 装置的电子回旋系统目前有两支工作频率为 68 GHz 的回旋管, 电子回旋波采用基频 O 模加热, 天线在弱场侧, 靠近中平面。极向和环向发射角变化范围为  $0^\circ - 30^\circ$ , 受几何关系(等离子体小半径和发射点的位置)的约束, 极向角被限制在  $0^\circ - 24^\circ$  以内<sup>[6-7]</sup>。

目前, HL-2A 装置开展了电子回旋波加热方面的实验和理论研究, 在今后计划开展电子回旋波电流驱动方面的实验研究。关于 HL-2A 装置中电子回旋波电流驱动的情况如何, 是一个有待研究的问题, 目前还没有见到这方面的报道。本文采用将相对论 Fokker-Planck 方程与波迹方程联合求解的方法, 对 HL-2A 装置中的电子回旋波电流驱动进行数值模拟。

## 1 物理模型

在有射频波作用的情况下, 描述等离子体中电子分布函数动态过程的 Fokker-Planck 方程, 可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} - \sum_s C(f_e, f_s) + \nabla \cdot S_\omega + \frac{q_e E}{m_e} \cdot \nabla f_e = 0 \quad (1)$$

其中,  $f_e$  是电子分布函数,  $q_e$  和  $m_e$  分别表示电子电量和质量,  $C(f_a, f_b)$  表示粒子  $a$  与粒子  $b$  相互作用的碰撞项,  $\sum_s C(f_e, f_s)$  表示等离子体中所有粒子的碰撞项之和,  $s$  可以是电子、离子;  $S_\omega$  为波感应准线性通量,  $E$  为电场。

因为等离子体中碰撞主要由小角度散射, 所以碰撞项可表示成流量的散度:

$$C(f_a, f_b) = -\nabla \cdot S_c^{a/b}$$

则方程 (1) 可表示为:

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + \nabla \cdot S = 0 \quad (2)$$

其中

$$S = S_c^{a/b} + S_\omega + S_e \quad (3)$$

这里  $S_c$ 、 $S_\omega$  和  $S_e$  分别为碰撞通量、波感应通量和电场感应通量。流量  $S$  可以表示为两项, 扩散通量项  $-D \cdot \nabla f_e$  和摩擦通量项  $F f_e$ 。所以对  $S_i$  ( $i = c, \omega, e$ ) 可以写成两项之和:

$$S_i = -D \cdot \nabla f_e + F f_e \quad (4)$$

对波感应项只有扩散, 故  $F_\omega = 0$ ; 对直流电场项只考虑摩擦力, 故  $F_e = q_e E / m_e$ ,  $D_e = 0$ 。

托卡马克磁场中捕获粒子在香蕉轨道中来回运动, 对粒子分布产生一定影响, 于是采用反弹平均

Fokker-Planck 方程 (5)

$$\frac{\partial \lambda f_e}{\partial t} + \nabla \cdot \lambda S = 0 \quad (5)$$

来描述粒子运动<sup>[9]</sup>。其中  $S$  是总平均通量,  $\lambda$  是在一个反弹周期内, 电子在香蕉轨道中所走的路程。在以麦克斯韦速率分布为本底分布的等离子体中, 对 Fokker-Planck 中的碰撞项进行勒让德多项式近似展开, 在动量空间坐标  $(p_0, \theta)$  下, 则方程 (5) 可以表示为:

$$\frac{\partial p_0^2 f_e}{\partial t} + \frac{\partial p_0^2 S_{p_0}}{\partial p_0} - \frac{p_0}{\lambda} \frac{\partial}{\partial \mu_0} (\lambda \sqrt{1 - \mu_0^2} S_{\mu_0}) = p_0^2 I_0(f_0, f_1, \mu_0) \quad (6)$$

其中  $\mu_0 = \cos \theta$ , 其它各量的具体表示参见文献 [9], 该方程是一个积分微分方程, 选用九点差分方法对其进行求解。求解方程 (6) 之后, 驱动电流密度和波功率沉积可由下面两式计算:

$$J = -en_e c \beta_{th} \int \frac{p_{\parallel}}{\gamma} f(p_0, \mu_0) 2\pi p_0^2 dp_0 d\mu_0$$

$$P_d = n_e m_e c^2 \beta_{th} \int \frac{1}{\gamma} p_0 \cdot S_{\omega} f(p_0, \mu_0) 2\pi p_0^2 dp_0 d\mu_0$$

电子回旋波在等离子体中的传播轨迹由局部色散方程  $D_0(r, k, \omega) = 0$  决定, 采用程函近似方法, 追踪波在等离子体中的传播, 详见文献 [10]。

## 2 计算结果及分析

将 Fokker-Planck 方程与波迹方程联合求解, 沿波迹计算每点上的驱动电流密度和功率沉积。HL-2A 装置的参数为:  $R_0 = 1.64$  m,  $a = 0.45$  m,  $I_p = 300$  kA,  $B_{\varphi 0} = 2.4$  T。HL-2A 装置的主要运行模式是单零偏滤器位形<sup>[11]</sup>, 其内部磁面可以用位移圆加接近零点处局部变形来描述<sup>[12]</sup>。对波束来说, 一般情况下其轨迹与中平面的偏离不大, 局部变形的影响可以忽略<sup>[13]</sup>。在这里我们假定等离子体磁面结构呈同心圆分布, 温度和密度分布取如下形式:

$$n_e = n_{e0} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]$$

$$T_e = T_{e0} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]$$

$$T_i = T_{i0} \left[ 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right]$$

电子回旋波波功率取  $P = 0.5$  MW, 等离子体密度取:  $n_{e0} = 2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 等离子体温度取:  $T_{e0} = 1.1$  keV,  $T_{i0} = 0.65$  keV。

图 1 给出了大环向发射角度  $\varphi = 15^\circ$  ( $N_{\parallel} =$

0.258 8) 时, HL-2A 装置中的波功率沉积分布与驱动电流密度分布。这种情况下电子回旋波驱动

的电流大小为 3.3 kA, 电流驱动效率比较低, 大约为  $1.35 \times 10^{-3} \text{ A}/(\text{W} \cdot \text{m}^2)$ 。

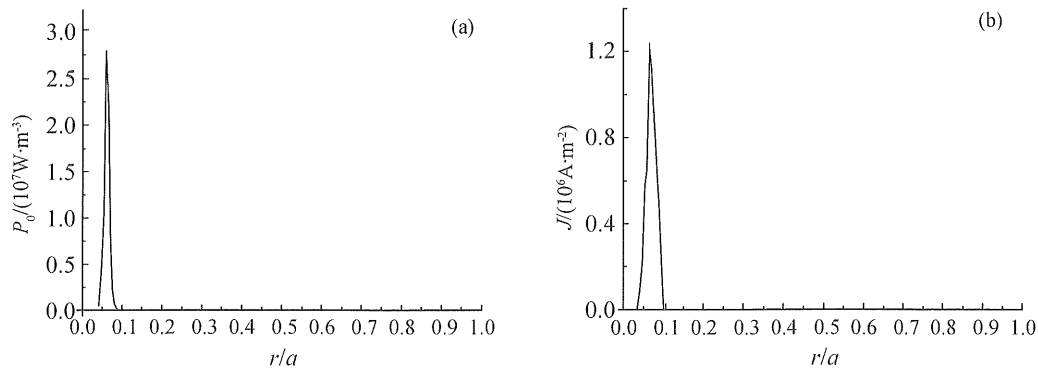


图 1 HL-2A 装置中波功率沉积分布 (a) 与驱动电流密度分布 (b)

Fig. 1 Wave deposition profiles (a) and driven current profiles (b) in HL-2A

图 2 给出了大环向发射角度  $\varphi = 15^\circ$  ( $N_{\parallel} = 0.258 8$ ) 时, HL-2A 装置中不同等离子体温度下的波功率沉积分布与驱动电流密度分布, 包括  $T_{e0} = 1.1 \text{ keV}$ ,  $T_{i0} = 0.65 \text{ keV}$ ;  $T_{e0} = 2.0 \text{ keV}$ ,  $T_{i0} = 1.8 \text{ keV}$ ;  $T_{e0} = 3.0 \text{ keV}$ ,  $T_{i0} = 2.8 \text{ keV}$ 。其中,  $T_{e0} = 2.0 \text{ keV}$  时的驱动电流大小为 11.6 kA, 电流驱动效率为  $4.76 \times 10^{-3} \text{ A}/(\text{W} \cdot \text{m}^2)$ ;  $T_{e0} = 3.0 \text{ keV}$  时的驱动电流大小为 20.2 kA, 电流驱动效率为  $8.28 \times 10^{-3} \text{ A}/(\text{W} \cdot \text{m}^2)$ 。不同于聚变堆级条件下, 在一

定的温度变化范围内, 电子回旋波的波功率沉积和驱动电流密度对温度的依赖并不明显。在 HL-2A 装置参数下, 随着温度的升高, 波功率沉积剖面会有明显的变宽并向等离子体边缘方向偏移, 功率沉积的峰值有明显的减小。随着温度的升高, 驱动电流剖面也会有明显的变宽并向等离子体边缘方向偏移, 而驱动电流密度的峰值却会有明显的变大。随着温度的升高, 电流驱动效率会有所提高, 但总体上 HL-2A 装置中的电子回旋波电流驱动效率较低。

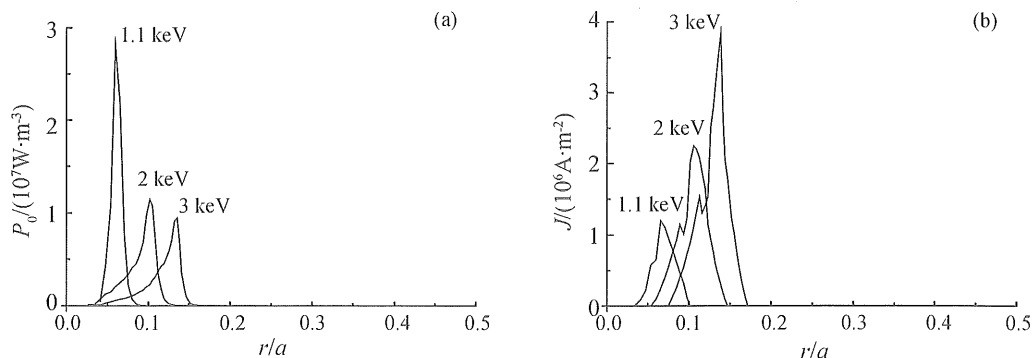


图 2 HL-2A 装置不同电子温度下的波功率沉积分布 (a) 与驱动电流密度分布 (b)

Fig. 2 Wave deposition profiles (a) and driven current profiles (b) with different electron temperature in HL-2A

### 3 结 论

本文将相对论 Fokker-Planck 方程与波迹方程联合求解, 对 HL-2A 装置中的电子回旋波电流驱动进行了模拟。结果表明, 在 HL-2A 装置参数下, 随着温度的升高, 波功率沉积剖面会有明显的变宽并向等离子体边缘方向偏移, 功率沉积的峰值

有明显的减小。随着温度的升高, 驱动电流剖面也会有明显的变宽并向等离子体边缘方向偏移, 而驱动电流密度的峰值却会有明显的变大。随着温度的升高, 电流驱动效率会有所提高, 但总体上 HL-2A 装置中的电子回旋波电流驱动效率较低。

(下转第 60 页)

- [6] SAVA G, BERGAMO A, ZORZET S, et al. Influence of chemical stability on the activity of the antimetastasis ruthenium compound NAMI-A [J]. *Eur J Cancer*, 2002, 38: 427 - 435.
- [7] BOUMA M, NUIJEN B, JANSEN M T, et al. A kinetic study of the chemical stability of the antimetastatic ruthenium complex NAMI-A [J]. *Int J Pharm*, 2002, 248: 239 - 246.
- [8] FORESMAN J B, FRISCH A E. Exploring chemistry with electronic structure methods [M]. 2nd ed. Pittsburgh, PA: Gaussian Inc, 1996: 6.
- [9] CHEN J C, CHEN L M, LISO S Y, et al. A theoretical study on the hydrolysis process of the antimetastatic ruthenium(III) complex NAMI-A [J]. *J Phys Chem B*, 2007, 111: 7862 - 7869.
- [10] BEŠKER N, COLETTI C, MARRONE A, et al. Aquation of the ruthenium-based anticancer drug NAMI-A: a density functional study [J]. *J Phys Chem B Lett*, 2008, 112: 3871 - 3875.
- [11] PAVELKA M, FATIMA M, LUCAS A, et al. On the hydrolysis mechanism of the second-generation anticancer drug carboplatin [J]. *Chem Eur J*, 2007, 13: 10108 - 10116.
- [12] BARONE V, COSSI M. Quantum calculation of molecular energies and energy gradients in solution by a conductor solvent model [J]. *J Phys Chem A*, 1998, 102: 1995 - 2001.
- [13] CHEN J C, CHEN L M, LIAO S Y, et al. The hydrolysis process of the anticancer complex [ImH] [trans-RuCl<sub>4</sub>(Im)<sub>2</sub>]: a theoretical study [J]. *Dalton Trans*, 2007, 32: 3507 - 3515.
- [14] EHLERS A W, BÖHME M, DAPPRICH S, et al. A set of f-polarization functions for pseudo-potential basis sets of the transition metals Sc-Cu, Y-Ag and La-Au [J]. *Chem Phys Lett*, 1993, 208: 111 - 114.
- [15] FRISCH M J, TRUCKS G W, SCHLEGEL H B, et al. Gaussian 03 revision D. 1 [M]. Wallingford, CT: Gaussian Inc, 2005.
- [16] KHALAILA I, BERGAMO A, BUSSY F, et al. The role of cisplatin and NAMI-A plasma-protein interactions in relation to combination therapy [J]. *Int J Oncol*, 2006, 29: 261 - 268.
- [17] BRABEC V, NOVÁKOVÁO, DNA binding mode of ruthenium complexes and relationship to tumor cell toxicity [J]. *Drug Resist Updates*, 2006, 9: 111 - 122.

(上接第 54 页)

#### 参考文献:

- [1] KIRNEVA N A. Recent developments in electron cyclotron current drive [J]. *Plasma Phys Control Fusion*, 2001, 43 (12A): A195 - A206.
- [2] PRATER R. Heating and current drive by electron cyclotron waves [J]. *Phys of Plasma*, 2004, 5 (11): 2349 - 2376.
- [3] ROBINSON D C, COX M, LLOYD B, et al. Progress with heating and current drive technologies [J]. *Fusion Eng And Des*, 1999, 46 (2): 355 - 370.
- [4] THUMM M. MW gyrotron development for fusion plasma applications [J]. *Plasma Phys Controlled Fusion*, 2003, 45 (12A): A143 - A161.
- [5] THUMM M. Development of output windows for high-power long-pulse gyrotrons and EC wave applications [J]. *Int J Infrared Millim Waves*, 1998, 19 (1): 3 - 14.
- [6] 宋绍栋, 刘永, 张锦华, 等. HL-2A 装置 ECRH 波迹和功率沉积计算 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2007, 27 (2): 123 - 126.
- [7] ZHOU J, LIU Y. Design of the electron cyclotron resonance heating transmission system for HL-2A [J]. *Plasma Sci and Tech* 2004, 6 (2): 2189 - 2193.
- [8] KARNEY C F F. Fokker-Planck and quasilinear codes [J]. *Computer Physics Report*, 1986, 4: 183 - 244.
- [9] SIMONETTO A, SHOUCRI M, FARINA D, et al. A numerical code for the solution of the relativistic bounce-averaged Fokker-Planck equation [R]. Milano Italy, IFP-CNR Internal Report, FP 00/08, 2000.
- [10] 龚学余, 彭晓炜, 谢安平, 等. 托卡马克等离子体不同运行模式下的电子回旋波电流驱动 [J]. *物理学报*, 2006, 55 (3): 1307 - 1314.
- [11] 石秉仁, 石迎天, 袁保山. HL-2A 单偏滤器的位形特征 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2005, 25 (2): 81 - 86.
- [12] 石秉仁, 曲文孝, 李芳著. 欧姆驱动托卡马克平衡位形的确定 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2006, 26 (1): 1 - 7.
- [13] 石秉仁, 石迎天. HL-2A 装置电子回旋共振加热波迹和功率沉积剖面的分析计算 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2007, 27 (1): 1 - 6.