

35-60

第17卷 第1期

核聚变与等离子体物理

Vol. 17, No. 1

1997年 3月

Nuclear Fusion and Plasma Physics

March 1997

## 托卡马克边界等离子体数值模拟

陈一平 邱励俭

TL612

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

TL631, 24

① 本文用数值模拟法, 通过数值求解二维多流体等离子体输运方程, 来模拟托卡马克边界等离子体输运过程和输运特性。模拟结果显示边界层区域等离子体参数的分布特性, 尤其能显示第一壁和偏滤器靶板附近等离子体参量的分布特性。模拟计算的结果, 对托卡马克偏滤器和第一壁的设计有重要意义。

关键词 边界层 数值模拟 偏滤器

托卡马克/等离子体

## 1 前言

托卡马克边界层等离子体与芯等离子体在特性上和输运规律上有很大差别。边界等离子体作为芯等离子体与外界的过渡区, 其发生的过程更加复杂。一方面, 边界等离子体与芯等离子体不断发生能量和粒子的交换; 另一方面, 边界等离子体与第一壁发生相互作用, 所产生的杂质参与边界等离子体的输运。另外, 边界等离子体行为还影响到托卡马克抽气行为。在磁场位形和几何结构上, 边界等离子体有一定的特殊性, 所用的研究方法更加复杂。

目前, 聚变研究已经进入堆设计阶段, 边界等离子体的研究已经成为国际聚变界的热点。其研究目的, 一方面是为了为芯等离子体优化边界条件; 另一方面是为了控制等离子体杂质, 提高抽气或排灰效率, 合理设计第一壁和偏滤器靶板部件。在世界一些大型托卡马克实验装置上, 对边界等离子体进行了专门研究, 但由于边界层结构复杂以及受诊断水平的限制, 目前的实验数据还非常有限。而且, 目前托卡马克与聚变堆或混合堆的条件和结构还相差较远, 目前的实验数据未必能用于反应堆的设计, 如反应堆偏滤器靶板上所达到的等离子体能流就远大于当前托卡马克偏滤器靶板上的能流。

为满足聚变堆或混合堆设计需要, 人们在实验研究的同时, 日益重视边界等离子体理论与数值模拟研究。目前已发展了一些大型模拟程序, 如 B2、PLANET、EDGE2D/U、UEDA 等<sup>[1]</sup>。这些模拟程序较成功地模拟了聚变堆或混合堆托卡马克边界层等离子体运动特性, 对于指导托卡马克第一壁或偏滤器设计具有现实意义。

本文以聚变-裂变混合堆为例, 用合适的模拟程序<sup>[2]</sup>, 通过数值求解二维多流体等离子体输运方程, 来模拟托卡马克边界等离子体输运特性, 并显示托卡马克第一壁与偏滤器靶板附近等离子体参量分布, 用以指导托卡马克第一壁和偏滤器的分析和设计。

## 2 物理模型与系统方程

托卡马克边界等离子体模型的基本假设包括<sup>[2]</sup>:

- (1) 等离子体呈电中性并自由流动;
- (2) 等离子体可包括电子和多种离子, 每种离子受 Navier-Stokes 系统方程支配;
- (3) 等离子体中各种粒子之间通过电离、复合、相互间的摩擦和电、热相互作用以及温度平衡而发生耦合。

描述托卡马克边界等离子体的系统方程有:

连续性方程:

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\sqrt{g}}{h_x} n_a u_a \right) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\sqrt{g}}{h_y} n_a v_a \right) = S_n^a$$

动量平衡方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (m_a n_a u_{1a}) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\sqrt{g}}{h_x} m_a n_a u_a u_{1a} - \frac{\sqrt{g}}{h_x^2} \eta_x^a \frac{\partial u_{1a}}{\partial x} \right) \\ & + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\sqrt{g}}{h_y} m_a n_a v_a u_{1a} - \frac{\sqrt{g}}{h_y^2} \eta_y^a \frac{\partial u_{1a}}{\partial y} \right) \\ & = \frac{B_0}{B} \frac{1}{h_x} \left[ -\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{Z_a n_a}{n_e} \frac{\partial p_e}{\partial x} + c_e \left( \frac{Z_a}{Z_{\text{eff}}} - 1 \right) Z_a n_a \frac{\partial T_e}{\partial x} \right. \\ & \left. + c_i \left( \frac{Z_a}{Z_{\text{eff}}} - 1 \right) Z_a n_a \frac{\partial T_i}{\partial x} \right] + \sum_{b=1}^N F_{ab} + S_{\text{ma}1} \end{aligned}$$

扩散方程:

$$v_a = -\frac{D_n^a}{h_y} \frac{\partial}{\partial y} (\ln n_a) - \frac{D_p^a}{h_y} \frac{\partial}{\partial y} (\ln p_a)$$

电子能量平衡方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} n_e T_e \right) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\sqrt{g}}{h_x} \frac{5}{2} n_e u_e T_e - \frac{\sqrt{g}}{h_x^2} \kappa_x^e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) \\ & + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\sqrt{g}}{h_y} \frac{5}{2} n_e v_e T_e - \frac{\sqrt{g}}{h_y^2} \kappa_y^e \frac{\partial T_e}{\partial y} \right) \\ & = \frac{u_e}{h_x} \frac{\partial p_e}{\partial x} + \frac{v_e}{h_y} \frac{\partial p_e}{\partial y} - K(T_e - T_i) + S_E \end{aligned}$$

离子能量平衡方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{3}{2} n_i T_i + \sum_a \frac{1}{2} \rho_a u_{1a}^2 \right) \\ & + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\sqrt{g}}{h_x} \left( \sum_a \frac{5}{2} n_a u_a T_i + \sum_a \frac{1}{2} m_a n_a u_a u_{1a}^2 \right) \right. \\ & \left. - \frac{\sqrt{g}}{h_x^2} \left( \kappa_x^i \frac{\partial T_i}{\partial x} + \sum_a \frac{1}{2} \eta_x^a \frac{\partial u_{1a}^2}{\partial x} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\sqrt{g}}{h_y} \left( \sum_a \frac{5}{2} n_a v_a T_i + \sum_a \frac{1}{2} m_a n_a v_a u_{i_a}^2 \right) \right. \\
 & \quad \left. - \frac{\sqrt{g}}{h_y^2} \left( \kappa_y \frac{\partial T_i}{\partial y} + \sum_a \frac{1}{2} \eta_y \frac{\partial u_{i_a}^2}{\partial y} \right) \right] \\
 & = - \frac{u_a}{h_x} \frac{\partial p_e}{\partial x} - \frac{v_a}{h_y} \frac{\partial p_e}{\partial y} + K(T_e - T_i) + S_E
 \end{aligned}$$

在上述方程中,  $a$  表示第  $a$  种离子, 设共有  $N$  种离子, 则有  $1 \leq a \leq N$ .  $x, y$  分别表示极向和径向坐标;  $\sqrt{g}, h_x, h_y$  是度规系数;  $B_\theta, B$  为极向场和总磁场;  $Z_a, m_a$  是离子电荷数和离子质量;  $\eta_x, \eta_y$  是极向和径向粘滞系数;  $F_{ab}$  是  $b$  种离子对  $a$  种离子的摩擦力;  $c_e, c_i$  是电子和离子的热力学系数;  $D_n^a, D_p^a$  是扩散系数;  $\kappa_x^a, \kappa_y^a$  为热导系数;  $K$  是能量均分系数;  $S_n^a, S_{m_i}^a$  是离子体积源项和动量源项;  $S_E^e, S_E^i$  是电子体积源项和离子体积源项。如有  $N$  种离子存在, 则这些离子可以有不同的速度, 但有共同的温度。这时, 方程中其它辅助量可由下式表达:

$$n_i = \sum_a n_a \quad n_e = \sum_a Z_a n_a \quad \rho_a = m_a n_a \quad p_a = n_a T_i \quad p_e = n_e T_e \quad u_a = \left( \frac{B_\theta}{B} \right) u_{i_a}$$

$$u_e = \left( \sum_a Z_a n_a u_a \right) / n_e$$

$$v_e = \left( \sum_a Z_a n_a v_a \right) / n_e$$

$$Z_{eff} = \left( \sum_a Z_a^2 n_a \right) / \left( \sum_a Z_a n_a \right)$$

### 3 数值模拟结果

对于双零位形托卡马克装置, 模拟的边界层区域如图 1 所示。图 1 同时给出部分边界条件。对于单零位形的托卡马克, 图 1 所示的模拟区域, 必须进行适当扩充。

以聚变-裂变混合堆为例(单零位形, 其部分参数和边界等离子体参数如表 1 所示), 用合适的模拟程序<sup>[2]</sup>, 通过数值求解上述方程, 可模拟得出混合堆托卡马克第一壁和偏滤器靶板附近等离子体参数分布特性, 如图 2 所示。

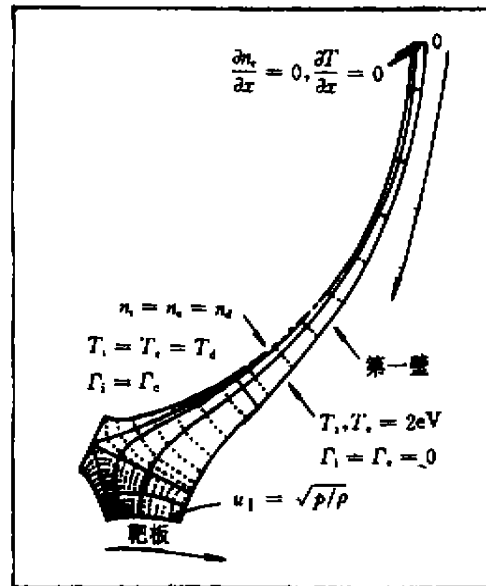


图 1 模拟边界层区域

传输系数, 径向扩散系数  $D = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ; 径向热导率  $\chi_e = 3, 3.5, 4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\chi_i = 1, 1, 2, 1.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

表 1 混合堆等离子体部分参数

平均密度	平均温度	边界密度	边界温度	大半径	小半径	拉长比
$n_i / \text{m}^3$	$T_i / \text{keV}$	$n_d / \text{m}^{-3}$	$T_d / \text{eV}$	$R / \text{m}$	$a / \text{m}$	$k$
$1.0 \times 10^{20}$	10.0	$5.0 \times 10^{19}$	400.0	4.0	1.0	1.8

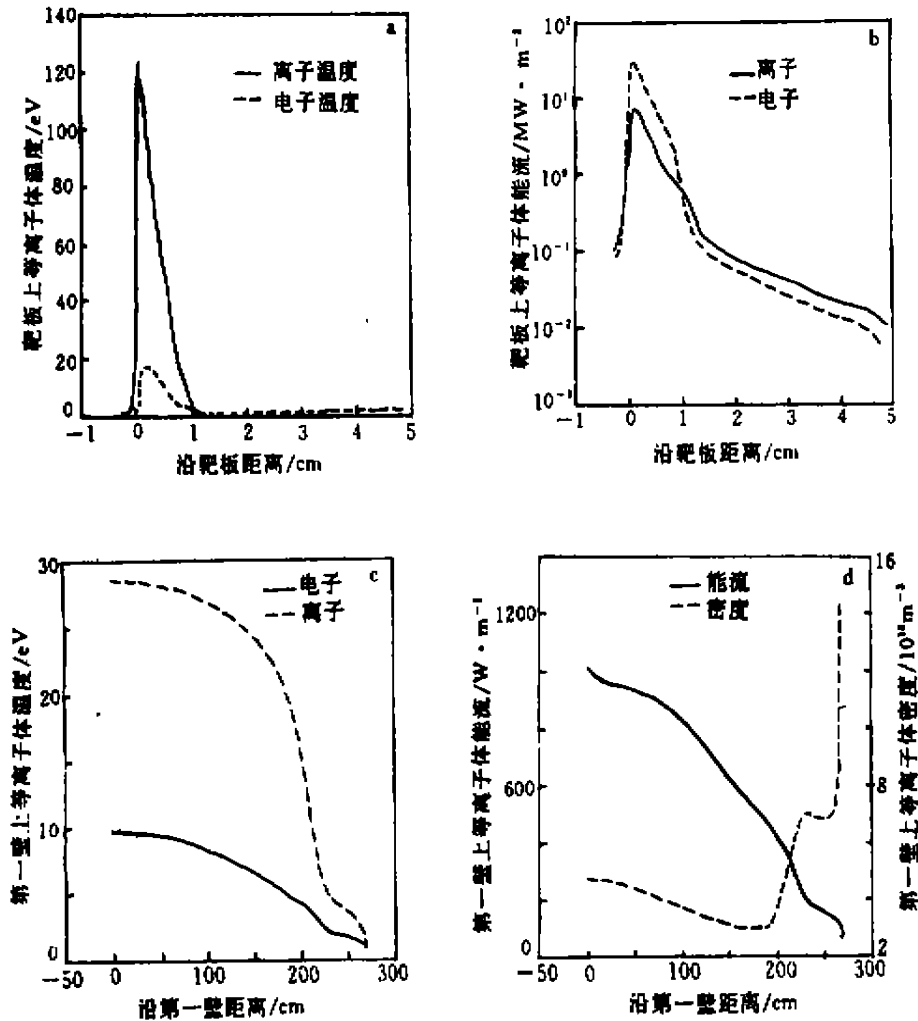


图 2 混合堆偏滤器靶板和第一壁附近等离子体参数分布特性

从图 2 可以看出,混合堆偏滤器靶板上有较高的温度和较大的能流峰值。为减少靶板上的能流,可采取向偏滤器室充入中性冷气体的办法。当气体充入后,偏滤器室内的再循环过程增加,主要是增加了电荷交换、电离、辐射、复合等过程,从而增大了偏滤器室内等离子体的能量损失,使到达靶板的能量降低。当充入能量为  $0.1 \text{ eV}$ ,流量为  $2 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的中性氦气体时,模拟计算所得到的混合堆偏滤器靶板附近的有关等离子体参量如图 3 所示。根据图 2 与图 3 所示的结果,把混合堆偏滤器区充气与否的主要差异列于表 2。

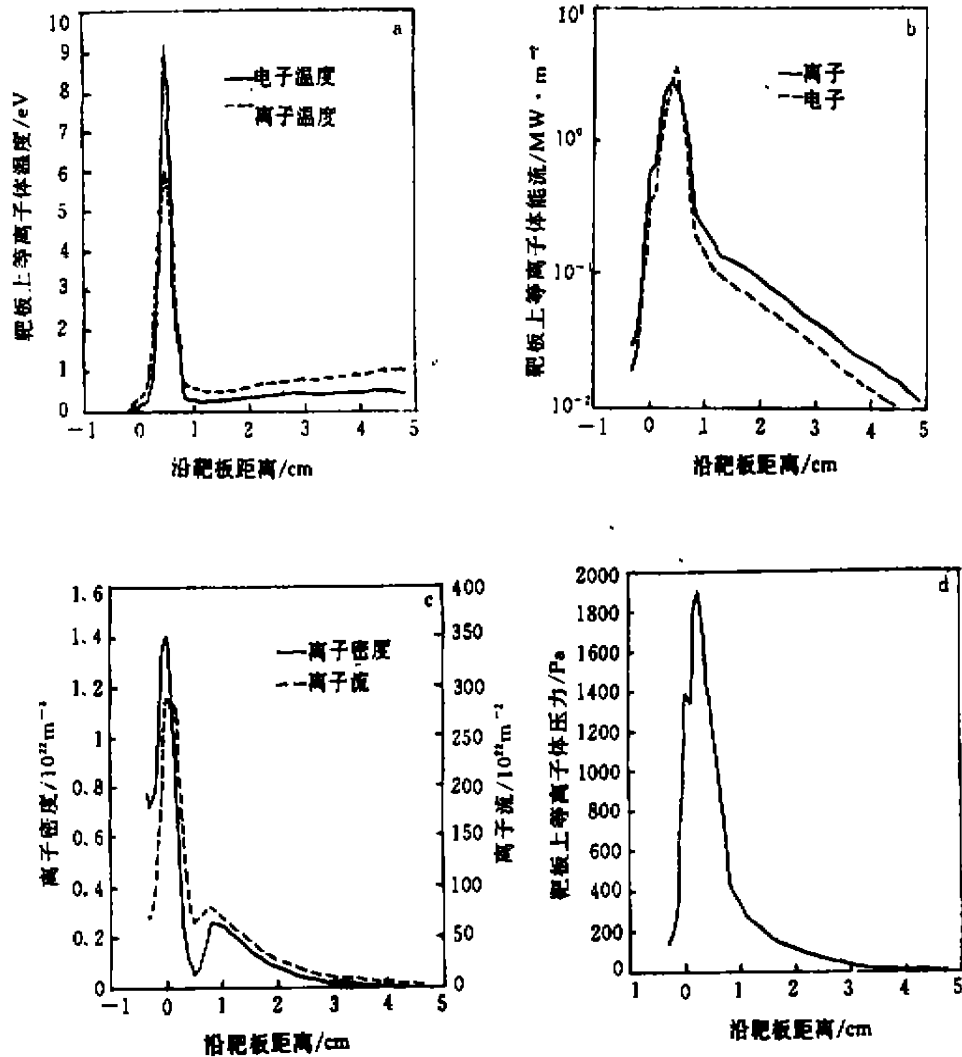


图3 混合堆充气偏滤器靶板附近等离子体参数分布特性

表2 混合堆偏滤器区充气与否靶板附近等离子体参量的主要差异

	离子温度 峰值/eV	电子温度 峰值/eV	离子能流峰 值/MW·m <sup>-2</sup>	电子能流峰 值/MW·m <sup>-2</sup>	离子密度 峰值/m <sup>-3</sup>	压力 峰值/Pa
充气	6.017	9.245	2.815	3.731	1.409×10 <sup>22</sup>	1909
不充气	16.96	124.1	7.256	31.690	8.448×10 <sup>20</sup>	2710

从图2、图3和表2可以看出,充气偏滤器靶板附近的能流和温度显著降低,这对确保混合堆偏滤器靶板的稳定和安全运行有重大意义。

#### 4 讨论

边界等离子体是托卡马克等离子体的重要组成部分,其行为直接影响芯等离子体性质。为维持芯等离子体的良好运行方式,提高托卡马克抽气或排灰效率,必须对边界等离子体进行认真研究。另外,研究边界等离子体,对第一壁和偏滤器设计有重要意义。在边界等离子体研究中,数值模拟方法占有重要地位。在实验数据还十分有限的情况下,边界等离子体数值模拟方法对于聚变堆或混合堆的设计具有特殊意义。

在边界等离子体数值模拟方法中,求解二维多流体等离子体输运方程是行之有效的办法。使用这种方法,可进一步将边界等离子体模拟程序与芯等离子体模拟程序进行衔接,从而可以对整个托卡马克等离子体进行全面模拟。

感谢肖炳甲同志在程序调试方面的帮助。

#### 参考文献

- 1 ITER Director. Detail of the ITER Outline Design Report (The ITER Machine). 10-12 January, 1994.
- 2 Braams B J. A Multi-Fluid Code for Simulation of the Edge Plasma in Tokamak. EUR-FU/XX-80/87/68, 1987.

(编辑部 1995 年 5 月 9 日收稿)  
(1996 年 8 月 23 日收到修改稿)

### NUMERICAL SIMULATION OF THE EDGE PLASMA OF TOKAMAK

CHEN Yiping QIU Lijian

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031)

#### ABSTRACT

This paper describes the transport process and transport property of plasma in the edge layer of tokamak by solving the two-dimensional and multi-fluid plasma transport equations using a suitable code. The simulation result shows the plasma parameter distributions in the edge layer, especially near the first wall and the divertor target plate. The simulation result can play an important role in the design of the divertor and first wall of a tokamak.

**Key words** Edge layer Numerical simulation Divertor