

文章编号: 1006-3080 (2004)05-0584-04

## HT-7 托卡马克等离子体电子热扩散系数与 等离子体参数的关系

张先梅<sup>1\*</sup>, 万宝年<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学物理系, 上海 200237; 2. 中科院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 研究了 HT-7 托卡马克装置欧姆放电情况下电子热扩散系数  $\chi_e$  的空间分布以及它与等离子体参数如等离子体中心弦平均密度、等离子体电流的关系。 $\chi_e$  沿等离子体小半径的分布是逐渐增大, 中心最低。 $\chi_e$  在等离子体 1/2 小半径处的数值随等离子体的中心弦平均密度增大而降低, 随等离子体电流的增大而增大。且硼化后的值比硅化后的值稍小一些。 $\chi_e$  比 NTOR 定标小很多, 但与欧姆放电情况下的 Merezkin 定标以及 Coppel Mazzucato 定标数值差不多。

**关键词:** 电子热扩散系数; 等离子体参数; HT-7 托卡马克

中图分类号: O53

文献标识码: A

## Relationship Between Electron Thermal Diffusivity and Plasma Parameters on the HT-7 Tokamak

ZHANG Xian-mei<sup>1\*</sup>, WAN Bao-nian<sup>2</sup>

(1. Department of Physics ECUST, Shanghai 200237, China;

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

**Abstract:** Electron heat diffusivity  $\chi_e$  profile on the HT-7 Tokamak was estimated in the ohmically heated plasma, and the relationship between  $\chi_e$  and plasma parameters such as central line-averaged electron density and plasma current was studied in this article.  $\chi_e$  increases along with the plasma minor radius. It increases with plasma current, but it decreases with increasing central line-averaged electron density.  $\chi_e$  after boronization is slightly lower than that after siliconization. It is significantly lower than NTOR scaling, but it is somewhat close to the magnitude of Merezkin scaling, and Coppel Mazzucato scaling for the ohmically-heated plasma.

**Key words:** electron thermal diffusivity; plasma parameters; HT-7 tokamak

作为一种能源的核聚变反应堆不仅要求等离子体的温度必须高到使离子能克服彼此的库仑力而相互碰撞发生聚变反应, 并且要求从等离子体发生聚变反应中释放的能量必须大于用以产生和维持高温等离子体所需的能量。为了实现受控核聚变, 必须将一定密度的等离子体约束足够长时间。由于高温等离子体中聚变反应释放能量的同时还存在多种能量

损失机制, 从而影响了约束, 输运与约束息息相关。反常输运是实现托卡马克聚变的一个主要障碍, 对它的解释是对托卡马克物理理论的最重要挑战之一。为理解其机理, 尽管已经提出了很多理论和经验的输运模型, 但尚不够了解引起反常输运的物理机制。了解这些反常输运的物理机制, 寻找输运品质好的约束位形, 一直是磁约束聚变理论和实验研究的中心课题。输运分析工作方向可归纳为三类: (1) 最简单的方法是积累实验数据, 通过大量实验数据研究全局等离子体参数如内能  $w$ , 等离子体能量约束

收稿日期: 2003-10-27

作者简介: 张先梅 (1972-), 女, 安徽合肥人, 博士, 研究方向: 等离子体物理。

时间  $\tau_e$  等, 其目的是为了得到  $W$  和  $\tau_e$  与等离子体电流  $I_p$  等的关系和定标<sup>[1-4]</sup>。这些定标在误差范围内对托卡马克的设计和探索是有用的。研究  $\chi_e$  的定标需要大量的实验数据, 且在探索某种参数与  $\chi_e$  的关系时, 需要在其他参数严格保持不变的情况下才行, 这看似简单的问题却比较复杂。通常情况下, 一些装置只能给出  $\chi_e$  随部分等离子体参数的关系<sup>[5]</sup>。(2) 分析等离子体参数与局部输运参数如粒子、能量输运系数 ( $D_e, \chi_e, \chi_i$ ) 的关系。(3) 利用各种假设的输运理论模型确定的  $D_e, \chi_e, \chi_i$  来拟合实验上测量的等离子体密度和温度等参数。

本文对电子热扩散系数作了较为详细的研究。首先计算了 HT-7 托卡马克等离子体中  $\chi_e$  的空间分布, 然后给出  $\chi_e$  与等离子体密度、等离子体电流的关系, 并与几个典型欧姆放电情况下的定标作比较, 从而更进一步了解 HT-7 装置的热输运水平, 对实验起指导作用, 例如在实验时如何协调各参数关系得到好的高温等离子体约束。对选择好的欧姆放电本底来进行更深层次的实验提供依据。

### 1 实验装置与方法

HT-7 超导托卡马克大半径  $R$  为 122 cm, 小半径  $a$  为 27.5~28.5 cm。电子温度  $T_e$  由快速 ECE 测量, 测量结果与汤姆逊散射及软 X 射线能谱测得的较吻合。电子密度  $n_e$  由 5 道远红外 HCN 激光干涉仪测量。离子温度  $T_i$  由 10 道中性粒子能谱仪测得。等离子体总的辐射损失由 16 道辐射量热 (Bolometer) 测量。有效电荷数  $Z_{eff}$  由 4 道韧致辐射测量结果计算得到。杂质由几套光学系统监测: 10 道可见光学系统 (VIS1~10) 监测 C 线, 1 道 O 线监测系统和一套真空紫外系统 (UV 2) 用来监测 OV 线<sup>[6]</sup>。

### 2 HT-7 装置电子热扩散系数空间分布的计算

在托卡马克等离子体中, 电子的功率平衡方程为<sup>[7]</sup>:

$$P_{OH} - P_{rad} - P_{cond} - P_{conv} - P_{ei} = 0 \quad (1)$$

其中:  $P_{OH}$  为欧姆加热功率,  $P_{OH} = \eta^2 J^2 = \frac{V_1}{2\pi R} \cdot \eta^2$  为经典或新经典电阻率,  $J$  为电流密度,  $V_1$  为实验测量的等离子体环电压,  $R$  为等离子体大半径,  $P_{rad}$

为等离子体总辐射损失的能量, 由 Bolometer 测量得到。  $P_{conv}$  为电子的热对流损失,  $P_{conv} = \frac{3}{2} T_e \Gamma_e$ , 其中  $\Gamma_e$  为电子通量。

$$\Gamma_e = -D_e \frac{\partial n_e}{\partial r} - n_e v_{in} \quad (2)$$

$D_e, v_{in}$  分别为反常电子扩散系数和对流速度,  $r$  为等离子体小半径变量,  $0 \leq r \leq a$ 。  $P_{ei}$  为电子单位时间内由于与离子碰撞而转移给离子的能量,  $P_{ei} = 3(m_e m_i) \cdot n_e v_{ei} (T_e - T_i)$ 。其中,  $m_e, m_i$  分别为电子和离子的质量,  $v_{ei}$  为电子、离子碰撞频率。在式 (1) 中, 通过实验数据知道了  $P_{OH}, P_{rad}, P_{conv}$  和  $P_{ei}$ , 便可求得电子热传导损失  $P_{cond} = -n_e \chi_e \frac{\partial T_e}{\partial r}$ , 由此进一步便可求得电子热扩散系数  $\chi_e$ 。选择典型一炮: 34258#, 其放电波形如图 1 所示。电子的中心弦平均密度为  $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , 托卡马克纵向磁场为 1.83 T。

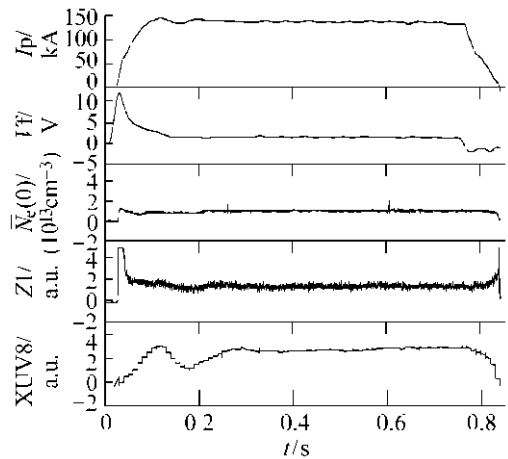


图 1 HT-7 装置典型放电波形

Fig 1 Typical shot wave on the HT-7 tokamak  
 $I_p$  - Plasma current;  $V_f$  - Loop voltage;  $N_e(0)$  - Electron central line-averaged density;  $Z1$  - Bremsstrahlung emission from central channel;  $XUV8$  - The central vertical chord of the bolometer

处理数据时, 对每一炮放电我们选择的都是等离子体参数如等离子体电流、环电压、等离子体弦平均密度、等离子体位移、韧致辐射、总辐射等信号处于平顶段, 从而计算出某一时刻的  $\chi_e$ , 可以认为就是该炮稳态的能量平衡分析得到的电子热扩散系数。图 2 为 34258# 炮平顶段不同时刻点计算的  $\chi_e$ , 可以看出在这段时间内  $\chi_e$  的数值大小以及空间分布变化并不大。  $\chi_e$  沿等离子体小半径逐渐增大。对于每组不同参数情况下我们均做了近十几炮的计算, 在相同参数情况下,  $\chi_e$  变化不大。

### 3 $\chi_e$ 与等离子体参数的关系

#### 3.1 $\chi_e$ 与等离子体密度的关系

选择等离子体电流 140 kA, 纵场为 1.8 T, 等离子体中心弦平均密度 ( $\bar{N}_e(0)$ ) 不相同的一系列放电炮号。计算出各炮的  $\chi_e$  的分布, 其 1/2 小半径 ( $a/2$ ) 处的值与等离子体密度的关系如图 3 所示。从图 3 可以看出, 电子热扩散系数随  $\bar{N}_e(0)$  的增大而降低。说明在所研究的密度范围内的稳态放电, 随  $\bar{N}_e(0)$  的增大, HT-7 装置的约束变好。

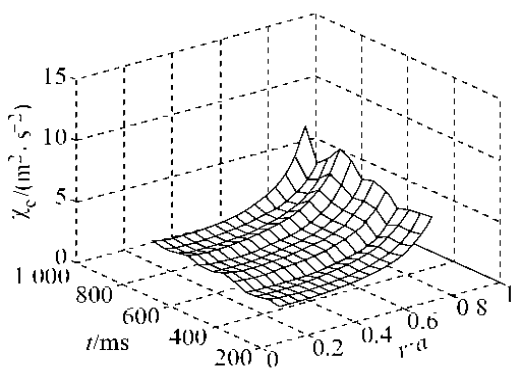


图 2 34258# 炮等离子体放电平顶段不同时刻点计算出的  $\chi_e$  空间分布

Fig 2  $\chi_e$  profiles at some moments  $t$  in 34258# steady-state discharge

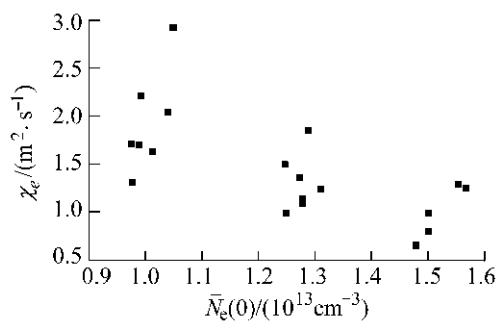


图 3  $\chi_e(a/2)$  与等离子体中心弦平均密度的关系

Fig 3 Correlation between electron thermal diffusivity at  $a/2$  and the electron central line-averaged density

$I_p = 140 \text{ kA}; B_t = 1.84 \text{ T}$

#### 3.2 $\chi_e$ 与等离子体电流的关系

选择  $\bar{N}_e(0)$  为  $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , 纵场为 1.84 T 情况下不同等离子体电流的放电, 计算  $a/2$  处  $\chi_e$  的值, 它与等离子体电流的关系如图 4 所示。其中同时给出了在硅化后和硼化后电子热扩散系数与等离子体电流的关系。从图 4 可以看出, 随等离子体电流的增大,  $\chi_e$  呈增大趋势。且硼化后的值比硅化后的值

要小一些。

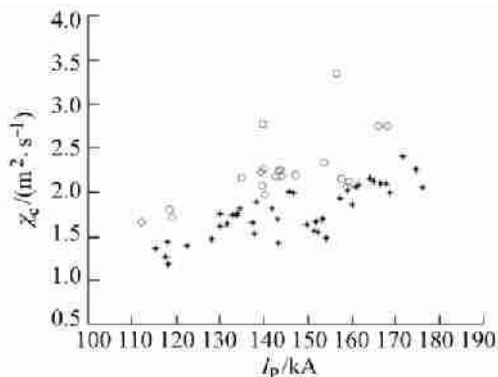


图 4 HT-7 装置电子热扩散系数 ( $a/2$  处) 与等离子体电流的关系

Fig 4 Electron diffusivity (at  $a/2 = 0.5$ ) versus plasma current

$\bar{N}_e(0) = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}; B_t = 1.84 \text{ T}$

- After siliconization; \* - After boronization

由于实验条件的限制, 实验数据不足以用来定标电子热扩散系数。为了考察 HT-7 装置  $\chi_e$  的水平, 下面选择几种典型的欧姆放电下的  $\chi_e$  的定标律, 根据 HT-7 的参数算出它们在  $a/2$  处的  $\chi_e$  值, 把它们与用能量平衡分析得到的  $\chi_e$  实验值作比较, 结果如图 5 所示。选择的定标律分别为 NTOR 定标<sup>[8]</sup>, 比较权威的欧姆放电的 Merezkin 定标<sup>[9]</sup>以及 Coppi Mazzucato 定标<sup>[10]</sup>。

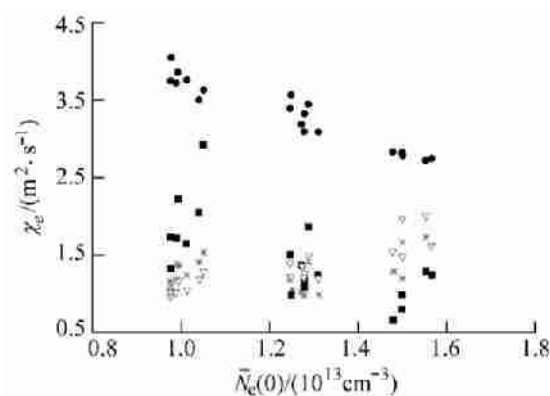


图 5 HT-7 装置上电子热扩散系数  $\chi_e$  与几种欧姆放电时的电子热扩散系数定标律的比较

Fig 5 Comparison between  $\chi_e$  on the HT-7 Tokamak and some typical scalings for ohmic discharge

— Power balance; ○ — NTOR scaling;

\* — Merezkin Scaling; ● — Coppi Mazzucato scaling

从图 5 可以看出, HT-7 装置上的电子热扩散系数数值大小显然不符合 NTOR 定标, 但两者的趋势接近, 所以 NTOR 定标中的常数在 HT-7 装置上不能取  $5 \times 10^{17}$ , 而应小一些。而另外两种定标

数值大小与 HT-7 装置上  $\chi$  值差不多, 尤其当密度为  $1.2 \times 10^{13} \sim 1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时, 数值最接近。

## 4 结 论

(1) 从稳态的能量平衡分析得到了 HT-7 装置上  $\chi$  分布, 中心最低, 边界较大, 另外由于边界的等离子体参数的测量误差较大, 所以边界的  $\chi_e$  绝对值误差也较大, 但趋势总是沿等离子体小半径逐渐增大的, 这在计算很多炮放电的实验数据均得到同样的结果。

(2)  $\chi$  在等离子体  $a/2$  处的数值随等离子体的中心弦平均密度增大而降低, 这说明在研究的密度范围内密度越大约束越好。因此在辅助加热或弹丸加料等实验时, 可以根据需要, 选择约束好的参数来放电, 即提供理想的欧姆放电本底。另外  $\chi_e$  随等离子体电流的增大而增大, 且硼化后的值比硅化后的值稍小一些。

(3) HT-7 装置上的电子热扩散系数数值比 NTOR 定标值小, 但两者的趋势很接近, 与欧姆放电情况下的 Merezkin 定标以及 Coppi Mazzuca 定标数值大小差不多。由于在计算  $\chi$  值时电子密度和温度都在变, 从而两定标结果仅与密度的关系在图中无法直接看出。这也说明 HT-7 装置上的  $\chi$  值比这两个定标更依赖于密度的变化, 而随温度的变化没有这两个定标明显。要想在 HT-7 装置上得到电子热扩散系数的定标律, 还需要积累更多的数据

来完成。

## 参考文献

- [1] Becker G. Empirical scaling law for the effective heat diffusivity in ELM Y H mode plasmas[J]. Nucl Fusion, 1996, 36: 527-530
- [2] Erba M. Validation of a new mixed bohm gyro-bohm model for electron and ion heat transport against the ITER, Tore Supra and start database discharges[J]. Nucl Fusion, 1998, 38: 1 013-1 022
- [3] Bak P. Physics of L and H mode confinement in JET [J]. Nucl Fusion, 1996, 36: 321-333
- [4] Ejima S. Scaling of energy confinement with minor radius, current and density in D<sub>o</sub> ohmically heated plasmas[J]. Nucl Fusion, 1982, 22: 1 627-1 648
- [5] Hirayama T. Ion temperature profile simulation of JT-60 and TFTR plasmas with ion temperature gradient mode transport models[J]. Nucl Fusion, 1994, 34: 703-727.
- [6] Zhang XM. Electron heat diffusivity in the HT-7 Tokamak with Si-coating wall [J]. Chin Phys Lett, 2001, 18(8): 1 090-1 091
- [7] John Wesson. Tokamak [M]. Oxford: Clarendon Press, 1997. 187.
- [8] Airoshi Shirai. Transport in D<sub>o</sub>-D[R]. Naka: Japan Atomic Energy Research Institute, 1994.
- [9] Liewer P C. Measurements of microturbulence in tokamaks and comparisons with theories of turbulence and anomalous transport[J]. Nucl Fusion, 1985, 25: 543-621
- [10] Gruber O. Scaling of plasma transport in ohmically heated tokamak [J]. Nucl Fusion, 1982, 22: 1 349-1 356.

下期发表论文摘要预报

## 氢氧焰燃烧合成纳米 SnO<sub>2</sub> TiO<sub>2</sub> 复合颗粒的形貌与结构

杨宏昀, 康力, 李春忠

(华东理工大学超细材料制备与应用教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 利用预混合氢氧焰燃烧合成了形态和结构不同的 SnO<sub>2</sub> TiO<sub>2</sub> 复合纳米颗粒, 颗粒呈多面体结构, 形貌介于球形和立方方形之间, 复合颗粒由同为四方晶系的 SnO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 组成, 在 SnO<sub>2</sub> TiO<sub>2</sub> 复合颗粒中存在 Sn-O-Ti 键, 没有出现相分离现象。复合颗粒表面的 S<sub>n</sub> Ti<sub>i</sub> 比大于复合颗粒内部的 S<sub>n</sub> Ti<sub>i</sub> 比, 而且复合颗粒内部 S<sub>n</sub> Ti<sub>i</sub> 接近理论值。