

用电子迴旋共振加热抑制托卡马克中的撕裂模

汪茂泉 詹如娟

(中国科学院等离子体物理研究所)

1985年12月16日收到

提 要

利用电子迴旋共振加热的定域性,改善等离子体电流分布,从而改善撕裂模的稳定条件,只要电子迴旋共振加热的吸收区能覆盖住撕裂模的共振层,就有很好的稳定效应;而不一定要求电子迴旋共振面与撕裂模的共振面重合,在迴旋加热期间,撕裂模被有效地抑制住。

一、引 言

事实证明,抑制 $m = 2/n = 1$ 的撕裂模,是延长托卡马克放电时间的有效方法。改善撕裂层的电流分布是稳定撕裂模的关键。如果电子迴旋共振的共振面与撕裂模的共振面重合或接近,由于电子迴旋加热具有很强的局域性,在共振面附近造成波功率的局部沉积,温度升高,使电阻降低,电流升高,等价于在原来的电流上叠加一个附加电流,达到改善局部电流分布的目的。

入射波功率的吸收与垂直折射率有关,因此,必须在与人射波相交的各个磁面处解色散方程。假定等离子体的密度分布满足可近性条件, $q = 2$ 的共振面就是入射波的电子迴旋共振面,用分层的平板模型,密度、温度随磁场而变,磁场由 $x = R - R_1$ 表示成

$$B(x) = B_1 R_1 / (R_1 + X).$$

其中 B_1, R_1 是共振面处的磁场和大半径。

由垂直折射率的虚部,计算出吸收功率以后,代入输运方程,求出温度、电阻等的自洽变化,再由磁流体方程求解撕裂模的发展。

二、理论模型

1. 电子迴旋加热功率的计算

电子迴旋加热的特征宽度 $\Delta = N_{\parallel} \left(\frac{T}{mc^2} \right)^{1/2} \cdot R^{(1)}$, 其中 N_{\parallel} 是平行折射率, $N_{\parallel} = \frac{c}{\omega} k_{\parallel}$, 对于温度 $T = 1\text{keV}$, $N_{\parallel} = 0.5$, $R = 1\text{m}$ 的托卡马克, $\Delta = 2.2\text{cm}$. 对于 HT-6

这样的小装置,特征宽度 $\sim 0.4\text{cm}$, 这说明波的能量主要在共振面附近吸收.

一个平面单色波,频率为 ω , 从内侧或外侧以定角(与 z 方向夹角)入射,垂直折射系数 $N_{\perp} = \frac{c}{\omega} k_{\perp}$, 由下列色散方程决定^[2]:

$$\begin{aligned} & [\varepsilon_{xx}(1 - \chi_{zz}) + \chi_{zz}(\chi_{zz} + 2N_{\parallel}) + N_{\parallel}^2 \chi_{zz}] N_{\perp}^4 - \{\varepsilon_{xy}^2(1 - \chi_{zz}) + (\varepsilon_{xx} - N_{\parallel}^2) \\ & \cdot [(\varepsilon_{xx} - N_{\parallel}^2)(1 - \chi_{zz}) + \varepsilon_{zz} + \chi_{zz}^2 + (N_{\parallel} + \chi_{zz})^2] \\ & - 2i\varepsilon_{xy}\chi_{zz}(N_{\parallel} + \chi_{zz})\} N_{\perp}^2 + \varepsilon_{zz}[(\varepsilon_{xx} - N_{\parallel}^2)^2 + \varepsilon_{xy}] = 0. \end{aligned}$$

其中

$$\varepsilon_{xx} = 1 + \frac{1}{2} X \zeta_0(z_1 - z_{-1}),$$

$$\varepsilon_{xy} = -\frac{1}{2} i X \zeta_0(z_1 - z_{-1}),$$

$$\varepsilon_{zz} = 1 - X,$$

$$\chi_{zz} = \frac{1}{2} \frac{X}{Y} \frac{V_t}{c} \zeta_0(1 + \zeta_1 z_1),$$

$$\chi_{zz} = \frac{1}{2} \frac{X}{Y^2} \left(\frac{V_t}{c}\right)^2 \zeta_0 \zeta_1 (1 + \zeta_1 z_1),$$

$$\zeta_m = \frac{c}{N_{\parallel} V_t} (1 - mY), \quad m = 0, 1, -1,$$

$$z_m = z(\zeta_m) = \left[-2 \int_0^{\zeta_m} \exp(t^2) dt + i\pi^{1/2} \right] \exp(-\zeta_m^2),$$

$$X = \omega_{pe}^2 / \omega^2, \quad Y = \omega_c / \omega,$$

$$\omega_c = eB / m_e c, \quad \omega_{pe}^2 = 4\pi n e^2 / m_e.$$

存在正常模和反常模两种模式,由上述色散方程的根决定,利用解色散方程求出垂直折射率的虚部, $\text{Im}N_{\perp}^2$, 可以计算电子的吸收功率^[3],

$$Q_{if} = \frac{P_{if}}{4\pi^2 \rho R_0} \left[\frac{2\omega}{c} \text{Im}(N_{\perp}^2) \cdot \exp\left(-\frac{2\omega}{c} \left| \int_r^a \text{Im}(N_{\perp}^2) dr' \right| \right) \right].$$

$P = 0$, X 分别代表正常模和反常模.

2. 基本方程

我们采用较简化的模型,忽略粒子输运,忽略不同粒子间的能量交换,忽略辐射损失,假定吸收功率全部沉积在热电子中,得到一维输运方程

$$\frac{3}{2} n \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rq) = jE + Q_{if}.$$

其中 $q = -k \frac{\partial T}{\partial r}$, k 是热导系数, $E = i\omega\eta_0$ 是环电压,上式已经假定 $\nabla_{\parallel} \cdot T = 0$, 即沿磁力线无温度梯度.

温度 $T(r)$ 可以写成

$$T(r) = T_0(r) + T_1(r, t) + T_M(r, t) \cos m\theta.$$

其中 $T_0(r)$ 是平衡温度,相应地,电阻 $\eta(r)$ 也写成

$$\eta(r) = \eta_0(r) + \eta_1(r, t) + \eta_m(r, t) \cos m\theta.$$

同样, 电流 $i(r)$ 亦可写成

$$i(r) = i_0(r) + i_1(r, t) + i_m(r, t) \cos m\theta.$$

为了使 $\eta = T^{-\frac{1}{2}}$, 将温度以 $T_0(0)$ 归一化, 磁流体方程组的归一化仍像通常做的那样, 即长度用 a , ϕ 用 $B_0 a$, 电流用 $B_0/\mu_0 a$, 时间以 $\tau_R = \mu_0 a^2/\eta(0)$ 等等, 归一化了的输运方程和磁流体方程写成

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T = \chi_{\perp} \nabla_{\perp}^2 T + \hat{\theta}_{\text{eff}} + \hat{E}_q j,$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \phi = \eta j - E,$$

$$\frac{dU}{dt} = -s^2 \mathbf{B} \cdot \nabla j.$$

其中,

$$\chi_{\perp} = \frac{2}{3n} \frac{\mu_0}{\eta_0(0)} k_{\perp}, \quad \hat{\theta}_{\text{eff}} = \frac{2}{3n} \frac{\tau_R}{T_0(0)} Q_{\text{eff}}$$

$$\hat{E}_q = E q' = \eta_0 j_0 q' \quad q' = \frac{2}{3n} \frac{B_0^2}{T_0(0) \mu_0}.$$

式中的其它符号代表习惯上常用的意义。

三、计算结果

波的频率为 $f = 35\text{GHz}$, 由外侧入射, 共振面 $B_r = 2\pi f c m_e/e$ 可能在外侧(低场边), 也可能在内侧(高场边), 视中心磁场强度而定, 两者差别不大. 我们假定在低场边, 由于微波功率的脉冲时间 $\geq 20\text{ms}$, 与 HT-6 装置的放电时间相当, 我们把微波功率的脉冲加热当成稳定的功率输入.

为了抑制 $m = 2/n = 1$ 的模, 我们假定 $q = 2$ 的磁面也是迴旋共振磁面, 以后我

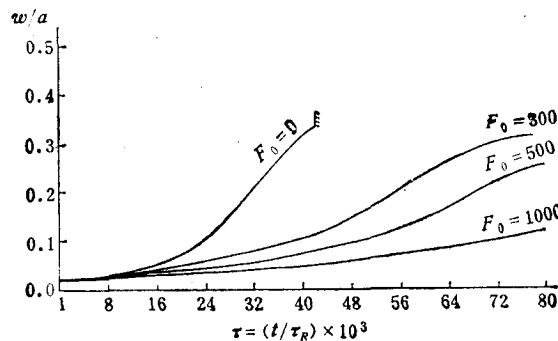


图1 岛宽随时间变化

$$F_0 = \frac{2}{3n} \frac{\tau_r}{T_0(0)} \frac{P_{\text{eff}}}{4\pi^2 \rho R} \frac{2\omega}{c}$$

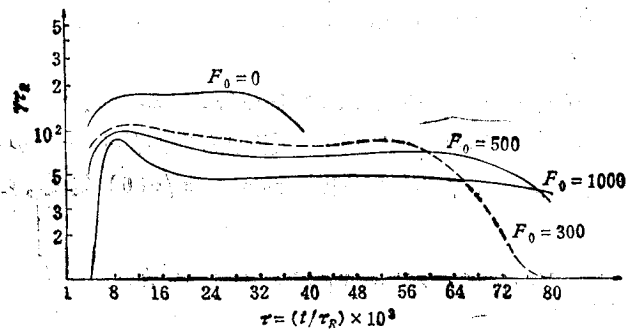


图2 增长率随时间变化

 F_0 同图1

们会看到,两个磁面不一定必须完全重合。

我们用不同的入射功率分别计算了 $m=2/n=1$ 模式的增长情况,共同的特点是,不管入射功率多大,都有显著的控制撕裂模增长的效果。只是小功率入射,只能在能量吸收随时间积累到一定程度时才发挥作用。换句话说,功率小,见效慢,功率大,见效快(见图1)。因此,我们没有发现入射功率的上下限,功率越大,效果越好,若功率非常之大,使吸收层形成一个超高温层,可能就没有撕裂模了,这不是我们现在所用的模型所能解释得了的。

在微波加热期间,撕裂模被抑制在很小的幅度,增长率也大幅度下降(见图2),这说明在微波加热的整个过程,不必担心撕裂模的危害。

四、讨 论

从上面我们看到,电子回旋共振加热,除了它的加热功能以外,还能很好地抑制撕裂

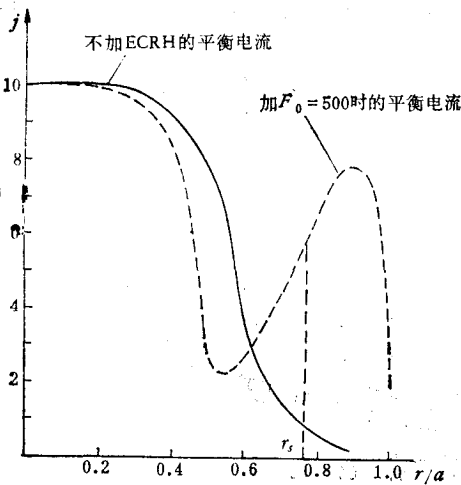


图3 微波加热引起的电流变化

 F_0 同图1

模。电子回旋共振加热之所以能够抑制撕裂模,是因为它改变了等离子体截面上的电流分布,入射波在共振层附近被吸收以后,温度升高,热传导的作用使高温层不断扩大,截面温度分布的变化,引起电阻分布的变化,最后影响电流分布的变化。图3和图4分别表示某一时刻电流和温度的分布。在等离子体截面外侧,电流与温度显著升高,外侧电流与温度升高,主要是吸收入射能量,同时有一部分能量是从内侧转移而来,在共振面内侧的某些地方,电流和温度略有降低。

电流分布的这种变化,对抑制撕裂模十分有利,因为入射的能量不断在共振面处被吸收,随着时间的推移,共振层及其外侧的电流和温度不断升高,在等离子体内部, $q=2$

的共振面不复存在(图5),托卡马克处在低 $q (< 2)$ 状态下运行,因而已经发展起来的

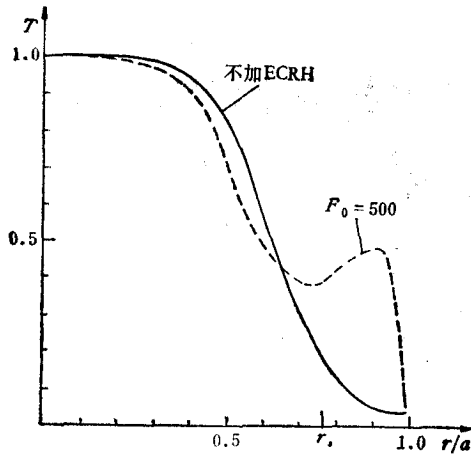


图4 微波加热引起的温度变化
 F_0 同图1

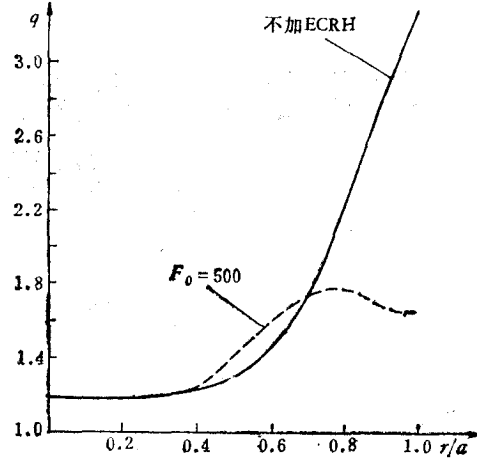


图5 微波加热引起的安全因子分布变化
 F_0 同图1

$m=2/n=1$ 的模式停止增长或衰减。

另外,我们还发现撕裂模的共振面与电子回旋共振面不必一定重合,只要相当接近即可。因为波的吸收层 Δ 是厘米量级,而撕裂层的宽度是百分之一或千分之一厘米量级,只要两个共振面适当靠近,波的吸收层能覆盖住撕裂层就行。这一点很重要,因为两个共振面重合,在技术上难以达到。上述的证明大大放宽实验条件。

参 考 文 献

- [1] Owen Eldridge *et al.*, ORNL/TM-6052.
- [2] I. Fidone *et al.*, *Phys. Fluids*, 21(1978), 645.
- [3] V. Chan *et al.*, *Nuclear Fusion*, 22(1982), 272.

SUPPRESSING THE TEARING MODES IN TOKAMAK BY ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE HEATING

Wang Mao-quan Zhan Ru-juan
 (Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei)

ABSTRACT

Using the localization of electron cyclotron resonance heating, the profile of plasma current is improved so that the conditions of stabilities of tearing modes are also improved. As long as the absorbed region of electron cyclotron resonance heating covers the resonance layer of tearing modes, the effect of stabilizing is very good. It is not necessary to require that electron cyclotron resonance surface must coincide with that of tearing mode strictly. In the period of electron cyclotron heating, the tearing mode is suppressed effectively.