

杂质效应对电子回旋波电流驱动的影响研究

杨光¹ 钟翊君¹ 龚学余¹ 黄千红¹ 郑平卫² 王占辉³

1(南华大学核科学技术学院 衡阳 421001)

2(南华大学资源环境与安全工程学院 衡阳 421001)

3(核工业西南物理研究院聚变科学所 成都 610000)

摘要 本文基于OMFIT(One Modeling Framework for Integrated Tasks)平台,结合中国环流器二号M(HL-2M)托卡马克装置参数,自洽耦合等离子体平衡、外部辅助加热和电流驱动、输运等物理过程,考虑杂质浓度变化引起的等离子体密度、温度等输运量变化,以及引起的等离子体磁面中心Shafranov位移变化,从理论上进行杂质浓度变化对电子回旋波(Electron Cyclotron Wave, ECW)沉积位置和驱动电流效率的影响研究。研究表明,考虑杂质对等离子体的影响时,随着杂质浓度的增加,ECW沉积径向位置先向等离子体芯部移动然后向边缘移动,电流驱动效率先增加后减小。不考虑杂质对等离子体影响时,ECW沉积位置基本不变,电流驱动效率降低。

关键词 杂质输运, 电子回旋波, HL-2M, OMFIT

中图分类号 TL61^{·2}

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120201

Effect of impurity effect on the electron cyclotron current drive

YANG Guang¹ ZHONG Yijun¹ GONG Xueyu¹ HUANG Qianhong¹
ZHENG Pingwei² WANG Zhanhui³

1(Department of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

2(Department of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

3(Institute of Fusion Sciences, Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610000, China)

Abstract [Background] In recent years, electron cyclotron wave (ECW) heating and current drive (ECCD) have been widely used in tokamak discharge experiments. The inevitable presence of impurity particles in the tokamak plasma affects the ECCD through radiation energy, inhibition of turbulent transport, and change the collision rate. Changes in plasma density, temperature and other transport quantities caused by the change of impurity concentration, induce the changes of Shafranov displacement at the center of magnetic surface of the plasma. [Purpose] This study aims to investigate the influence of impurity concentration changes on the ECW deposition position and current drive efficiency theoretically with consideration of all above related variations. [Methods] The

国家磁约束核聚变能发展研究专项(No.2018YFE0303102, No.2018YFE0309101)、国家自然科学基金(No.12075114)、湖南省自然科学基金(No.2021JJ50090, No.2021JJ50095, No.2022JJ50157)、湖南省教育厅科学研究一般项目(No.21C0309)资助

第一作者: 杨光, 男, 1997年出生, 2020年毕业于上海电机学院, 现为硕士研究生, 研究领域为核聚变与等离子体物理

通信作者: 钟翊君, E-mail: zhongyijun152@126.com; 龚学余, E-mail: gongxueyu@126.com

收稿日期: 2022-07-16, 修回日期: 2022-10-09

Supported by the National MCF Energy R&D Program (No. 2018YFE0303102, No. 2018YFE0309101), National Natural Science Foundation of China (No. 12075114), the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2021JJ50090, No. 2021JJ50095, No. 2022JJ50157), General Project of Scientific Research of Hunan Provincial Education Department (No. 21C0309)

First author: YANG Guang, male, born in 1997, graduated from Shanghai DianJi University in 2020, master student, focusing on nuclear fusion and plasma physics

Corresponding author: ZHONG Yijun, E-mail: zhongyijun152@126.com; GONG Xueyu, E-mail: gongxueyu@126.com

Received date: 2022-07-16, revised date: 2022-10-09

One Modeling Framework for Integrated Tasks (OMFIT) platform was used to conduct integrated simulation study of the effect of impurity effect on ECW heating and current drive. The HL-2M Tokamak device parameters were combined with self-consistent coupled plasma equilibrium, external auxiliary heating and current drive, transport and other physical processes for simulation computation with the carbon ions as the unique impurity ions. **[Results]** The simulation results show that when the influence of impurities on the plasma is considered, with the increase of the impurity concentration, the radial position of the ECW deposition first moves to the plasma core and then moves to the edge, and the current drive efficiency first increases and then decreases. Due to the competition between the radiation effect and the dilution effect of the impurity-plasma interaction, the radiation loss power basically increases linearly with the increase of Z_{eff} , while the dilution effect suppresses the turbulence and improve the confinement, but the stabilization effect slows down with the increase of Z_{eff} . **[Conclusions]** When the influence of impurities on the plasma is not considered, the deposition position of ECW is basically unchanged, and the current drive efficiency decreases. Results of this study have guiding significance for electron cyclotron current drive (ECCD) to control the plasma current profile and control the instability of magnetic fluid.

Key words Impurity transport, Electron cyclotron wave, HL-2M, OMFIT

电子回旋波(Electron Cyclotron Wave, ECW)加热和电流驱动(Heating & Current Drive, H&CD)具有能传播到等离子体芯部、局域化程度高、易于控制、波的耦合不受等离子体边界条件限制等特点,在磁约束装置上得到广泛应用,也逐步发展为等离子体控制的主要手段和方法之一^[1-4]。托卡马克等离子体中不可避免地与壁相互作用产生杂质,并且为了控制等离子体,经常人为注入杂质,在不同的实验过程中,有效电荷数 Z_{eff} 有不同的值。在 ASDEX-Upgrade^[5]、DIII-D^[6]和 JT-60U^[7]等进行的杂质注入实验上都观察到了杂质对约束的改善。另一方面,过高的杂质含量所带来的辐射功率损失使等离子体的能量约束水平降低,严重的还会导致等离子体从高约束运行模式退回到低约束运行模式甚至破裂。近年来,实验上发现了ECW可以抑制杂质聚芯等^[4,8],因此很有必要进行 Z_{eff} 对电子回旋波电流驱动(Electron Cyclotron Current Drive, ECCD)影响的研究。

Fisch发现杂质浓度可以改变电子-离子的碰撞频率,导致Fisch-Boozer机制占优势时,ECCD的电流驱动效率随有效电荷 Z_{eff} 的增加而降低^[9]。Zheng^[10]在 Z_{eff} 对于Ohkawa机制占优势的ECW电流驱动效率影响的研究中,也发现了同样的现象。这些研究中,都采用固定的等离子体平衡和动力学剖面。然而, Z_{eff} 的改变会引起等离子体辐射的改变以及输运系数等的变化^[11-12],影响等离子体的平衡和动力学剖面分布。考虑这些影响后, Z_{eff} 对于ECW沉积位置和电流驱动效率的影响如何是一个值得研究的问题。因此,本文将基于集成模拟平台,自洽耦合等离子体平衡、等离子体辐射、电子离子输运等物理过程,考虑 Z_{eff} 变化引起的等离子体密度、温度等

输运量变化,以及引起的等离子体平衡变化,从理论上进行杂质对ECW沉积位置和驱动电流效率影响的研究,并提供有价值的模拟结果。

1 物理模型和工作流

OMFIT^[13]是目前国际上最为成熟、最为全面的集成模拟平台,集成了多个等离子体物理计算程序,涵盖输运、辅助加热和电流驱动、电流演化、平衡、不稳定性分析等物理过程。本研究工作基于OMFIT集成模拟平台开展研究。

1.1 电子回旋波电流驱动

基于OMFIT集成模拟平台,通过ONETWO调用TORAY程序^[14]对ECW与等离子体相互作用产生的驱动电流和能量源项进行计算。ECCD的计算中采用的Liu-liu模型,考虑了电子俘获效应、多普勒频移和相对论效应,考虑了Fisch-Boozer^[1]和Ohkawa^[9]两种驱动电流机制。

ECW与等离子体相互作用的冷等离子体共振层位置位于:

$$\omega = n\omega_e \quad (1)$$

通常,多普勒频移和相对论效应会影响ECW的沉积位置,会在冷等离子体共振层附近被吸收。考虑这两种影响时,ECW的 n 次谐波共振条件可表示为^[1]:

$$\omega = \frac{n\omega_e}{\gamma} + k_{\parallel}v_{\parallel} \quad (2)$$

式中: ω 为波频率, $\omega_e = eB/m_e$ 为电子回旋频率, e 为电子电荷, B 为磁场强度, m_e 为电子质量; $\gamma = 1/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ 为相对论因子, v 是电子速度, c 是光速; $k_{\parallel}v_{\parallel}$ 为多普勒效应项。

满足共振条件的电子与电子回旋波发生回旋共振相互作用,共振电子速度增加产生驱动电流,可表示为:

$$j_{rf} = -e \int d\Gamma f_1 v_{\parallel} \quad (3)$$

式中: $d\Gamma$ 表示速度空间的体积元; f_1 表示扰动分布函数; v_{\parallel} 为电子平行于磁场方向的速度分量;满足线性化的Fokker-Planck方程:

$$v_{\parallel} \hat{b} \nabla f_1 - C_c^1 = S_{rf}(S_m) \quad (4)$$

式中: C_c^1 表示线性化的库仑碰撞算子; $\hat{b} = \vec{B}/B$ 为磁场方向; S_{rf} 表示速度空间中射频诱导的准线性算子。我们用相对论动力学来描述电子的运动:

$$C_c^1 f_1 = [v_{ei}(u) + v_D(u)] L f_1 + \frac{1}{u^2} \frac{d}{du} u^2 \lambda_z(u) f_1 \quad (5)$$

式中: L 为投掷角散射项; u 表示单位质量的动量; $\gamma = \sqrt{1 + (u/c)^2}$; Z_{eff} 表示有效电荷数; $v_{ei}(u)$ 、 $v_D(u)$ 分别表示由于电子-离子和电子-电子碰撞的速度引起的投掷角散射率,右边最后一项表示由于电子-电子碰撞引起的缓变影响。

$$v_{ei}(u) = Z_{eff} v_{e0} \left(\frac{u_c}{u} \right)^3 \quad (6)$$

$$v_D(u) = v_{e0} \gamma \left(\frac{u_c}{u} \right)^3 \quad (7)$$

$$\lambda_z(u) = v_{e0} u_c \gamma^2 \left(\frac{u_c}{u} \right)^2 \quad (8)$$

该研究中考虑的杂质离子为碳,主等离子体为氦等离子体。为了研究杂质浓度对ECCD的影响,我们通过改变 Z_{eff} 的大小来表征杂质浓度的变化,作为初步工作,研究中杂质密度分布类比于电子密度分布。

1.2 OMFIT程序流

程序流程主要由4种物理模块组成,其中:EPED^[15]模块用来计算台基区参数、ONETWO^[16]模块用来计算各种源项和通过求解带有时间偏导数的法拉第方程进行电流演化、EFIT^[17]模块用来计算平衡、TGYRO^[18]模块用来计算输运。具体的程序流程如图1所示。

根据0维的全局参数,给定 Z_{eff} 的值,构建一个合理的芯部动力学剖面,并给定一个初始的平衡文件gfile进行初始化,初始化之后进入迭代流程。

1)由ONETWO调用辅助加热计算程序计算各类源项,并保持等离子体动力学剖面不变,使用ONETWO演化电流。由于研究中包含中性束注入(Neutral Beam Injection, NBI)和ECW两种加热方式,因此调用NUBEAM程序来计算NBI产生的粒子

源、动量源、能量源项和驱动电流。TORAY程序计算ECW产生的能量源项和驱动电流。

2)把ONETWO计算得到的压强梯度 P' 分布剖面和极向电流梯度 FF 分布剖面传递给EFIT,由EFIT求解Grad-shafranov方程进行平衡计算,得到新的等离子体动力学分布和电流分布下的等离子体平衡。

3)采用EPED演化台基,获得台基区宽度和高度,并形成密度温度台基剖面。

4)将1)中得到的源项和2)中得到的等离子体平衡交给剖面演化程序TGYRO,通过输运通量与目标通量匹配平衡的方法,计算芯部区域的等离子体动力学剖面,如电子密度、电子和离子温度。将3)得到的台基剖面与TGYRO计算得到的芯部等离子体剖面相结合,得到整个等离子体动力学剖面。

5)基于更新后的剖面 and 平衡,重新循环进行第1)~4)步的操作,直到迭代 N 个循环后,等离子体剖面计算达到收敛,最终得到一个稳态的解。

达到稳态后,再次调用TORAY程序,计算得到ECW波迹及ECCD剖面分布和大小。

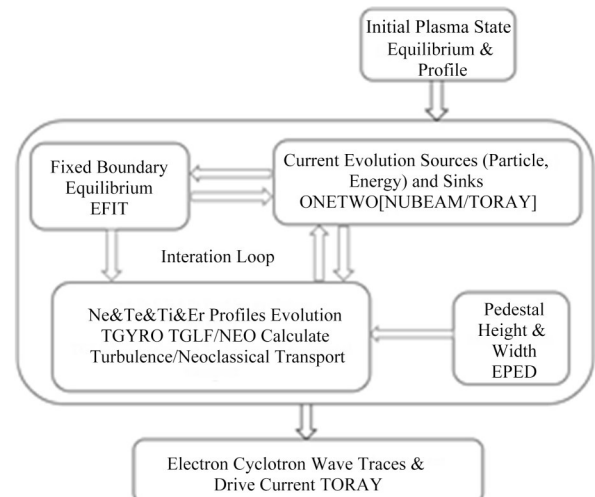


图1 OMFIT集成模拟程序流程图
Fig.1 The integrated simulation workflow with OMFIT

2 模拟结果和分析讨论

HL-2M装置是核工业西南物理研究院的中型托卡马克装置,大半径 $R=1.78$ m、小半径 $a=0.65$ m、最大环向磁场 B_t 可达3 T、最大等离子体电流 I_p 可达3 MA。设计有8 MW的ECW注入系统,上发射器($R=2\ 379$ mm, $Z=865$ mm)由两组1 MW回旋管组成,可进行双频调节,频率为105 GHz/140 GHz,赤道发射器($R=3\ 020$ mm, $Z=60$ mm)由6组1 MW的回旋管组成。NBI辅助系统由三条中性束线组成,每条束线均采用4套80 keV的离子源组成,束线额

定注入功率均为5 MW,其中两束同向注入,一束反向注入。

本次模拟基于HL-2M参数进行研究,模拟中保持等离子体电流 I_p 为1.2 MA, R_0 处的环向磁场为1.88 T不变,杂质离子仅考虑为碳离子,有效电荷数 Z_{eff} 设置为2。为了获得芯部平坦的安全因子 q 剖面,选用4 MW中性束正向水平注入,能量为80 keV。两束频率为105 GHz ECW从赤道发射器发射,一束功率为3 MW,用于驱动归一化半径为0.35处的电流,其环向角为 193° ,极向角为 78° ,该位置处的电子回旋波主要用于延长平坦 q 分布。另一束功率为

0.05 MW,用于驱动磁轴处的电流,其环向角为 197° ,极向角为 93° ,主要用于使磁轴处的安全因子 $q_0 > 1$ 。

不考虑杂质浓度变化引起的等离子体动力学剖面和平稳变化,采用TORAY程序计算不同 Z_{eff} 时的电子回旋波电流驱动,模拟结果如图2所示。从图2可以看出,随着 Z_{eff} 的增加,驱动电流位置不变,电流驱动效率减小。这是由于 Z_{eff} 增加,电子-离子的碰撞频率增加,电子在速度空间中投掷角散射增强。投掷角散射效应是由电子在速度空间中的分布函数恢复到麦克斯韦分布引起的。

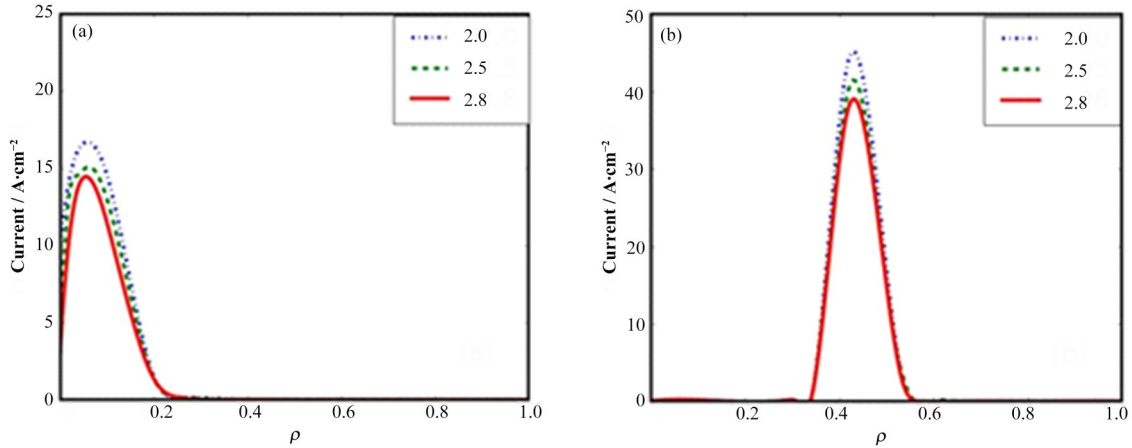


图2 不考虑 Z_{eff} 改变对于等离子体性能影响时,不同 Z_{eff} 作用下的电子回旋波电流驱动
Fig.2 Electron cyclotron current drive with different Z_{eff} without considering the effect of Z_{eff} changes on plasma performance

下述考虑 Z_{eff} 改变对于等离子体性能的影响,采用图1所示程序流计算不同 Z_{eff} 情况下的电子回旋波电流驱动。首先,模拟不同 Z_{eff} 情况下的等离子体稳态参数,然后再计算稳态下的电子回旋波电流驱动,这个过程中自洽考虑了杂质浓度变化以及电子回旋

波与等离子体相互作用本身对于等离子体参数的影响。图3给出了不同 Z_{eff} 情况下的等离子体密度和温度剖面,以及等离子体磁平衡位型。表1给出了不同 Z_{eff} 情况下的等离子体参数。

表1 不同 Z_{eff} 情况下的等离子体参数
Table 1 Plasma parameters for different Z_{eff} cases

有效电荷数 Effective charge number Z_{eff}	归一化比压 Normalized toroidal beta β_N	安全因子 Safety factor q_{95}/q_0	自举/欧姆电 流份额 fractions of bootstrap current and ohmic current $f_{\text{bs}}/f_{\text{ohm}}/\%$	电子回旋波驱动电 流 Electron cyclotron drive current $I_{\text{ec1}}/I_{\text{ec2}}/\text{kA}$	芯部电子/离子温度 The core electron and core ion temperature $T_{\text{e0}}/T_{\text{i0}}/\text{keV}$	芯部电子密度 The core electron density $n_{\text{e0}}/10^{19}\text{m}^{-3}$	储能 Thermal stored energy W_{th}/MJ	辐射损失功率 Radiation loss power P_{rad}/MW	Shafranov位移 Shafranov displacement
2.0	2.49	5.36/1.00	40.75/38.08	97.43/3.06	6.40/6.73	4.79	0.92	0.575	0.087
2.3	2.62	5.53/1.26	44.00/34.00	97.95/3.16	7.02/7.91	4.74	0.98	0.716	0.095
2.5	3.04	5.66/1.05	53.25/23.42	127.42/3.62	7.36/10.07	4.58	1.16	0.835	0.113
2.6	2.978	5.84/1.25	51.17/24.83	118.29/3.49	7.03/9.31	4.89	1.13	0.846	0.109
2.8	2.85	5.51/1.49	48.25/30.33	113.82/3.12	7.01/9.18	4.62	1.07	0.939	0.103

从表1可以看出,随着 Z_{eff} 的增加,辐射损失增加,等离子体储能、归一化比压先增加后减小,芯部电子/离子温度先增加后减小。这是由于 Z_{eff} 的增加

一方面增加等离子体辐射导致等离子体约束变差,另一方面随着 Z_{eff} 的增加,杂质对于主离子的稀释作用增强,导致能量输运通量降低,储能增加,具体对

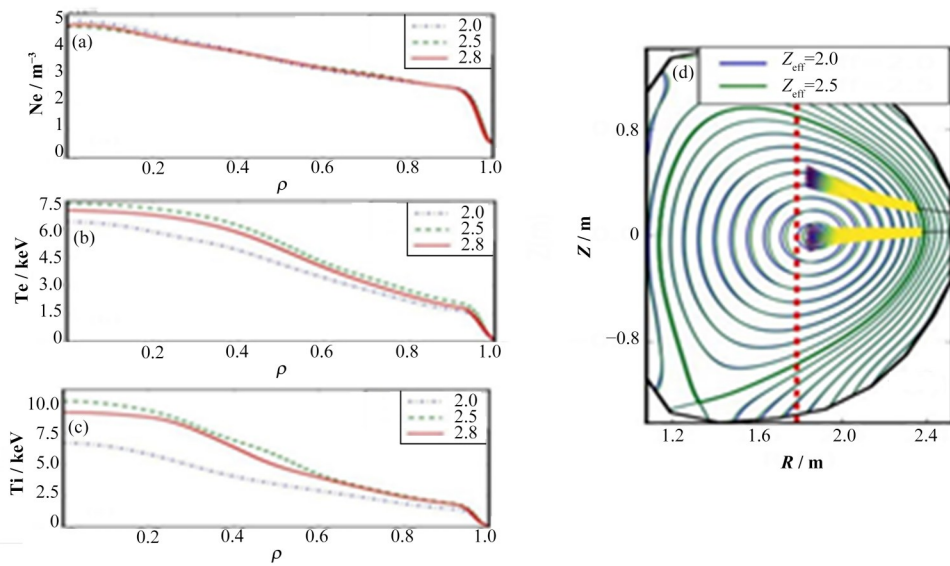


图3 不同 Z_{eff} 情况下的等离子体动力学剖面 and 磁平衡位形图
(a) 电子密度分布, (b) 电子温度分布, (c) 离子温度分布, (d) 等离子体磁平衡位形

Fig.3 Plasma dynamic profiles and magnetic equilibrium configuration in different Z_{eff} cases

(a) Electron density distribution, (b) Electron temperature distribution, (c) Ion temperature distribution, (d) Plasma magnetic equilibrium configuration

于等离子体参数的影响取决于辐射效应和稀释效应相互竞争的结果。

图4和图5给出了不同 Z_{eff} 对应的等离子体输运通量和辐射损失功率。从图4、5可以看出,当 Z_{eff} 比较小时,增加 Z_{eff} 导致的输运通量降低得多,湍流致

稳效应强劲,随着 Z_{eff} 的继续增加, Z_{eff} 导致的输运通量降低得少,湍流致稳效应减弱,而辐射功率基本随 Z_{eff} 增加呈线性增加,所以等离子体比压和储能等随 Z_{eff} 的增加先增加后下降,芯部电子/离子温度先增加后减小。

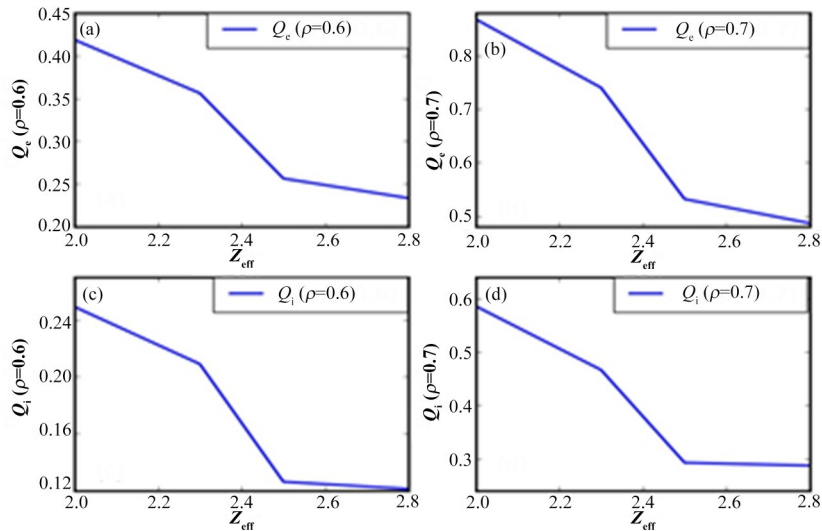


图4 各通道的输运通量与 Z_{eff} 的关系

(a) 径向位置(0.6)处的电子能量通量, (b) 径向位置(0.7)处的电子能量通量, (c) 径向位置(0.6)处的离子能量通量, (d) 径向位置(0.7)处的离子能量通量

Fig.4 The relationship between the transport flux of each channel and Z_{eff}

(a) Electron energy flux at radial position 0.6, (b) Electron energy flux at radial position 0.7, (c) Ion energy flux at radial position 0.6, (d) Ion energy flux at radial position 0.7

在考虑 Z_{eff} 变化引起的等离子体参数改变的基础上,计算了不同 Z_{eff} 时的电子回旋波电流驱动,模拟结果如图6和表1所示,从图6可以看出,随着 Z_{eff}

的增加,驱动电流位置先向等离子体芯部移动,且驱动电流效率先增加。这是由于随着 Z_{eff} 的增加,比压增加,对应的等离子体磁面的Shafranov位移增加,

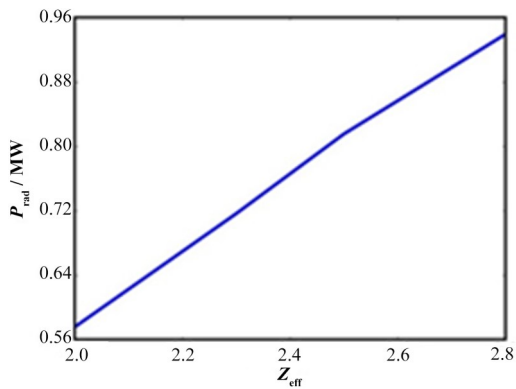


图5 不同 Z_{eff} 下的辐射损失功率
Fig.5 Radiation loss power under different Z_{eff}

如图3(d)所示,从而导致沉积位置向芯部移动,电子俘获效应变小,驱动电流增大。另一方面,芯部电子温度高,而碰撞频率与温度的 $3/2$ 次方成反比,电子碰撞阻力降低,也可导致驱动电流增大。对比 Z_{eff} 为2.5和2.8时的ECCD剖面,发现当 Z_{eff} 进一步增加时,电流驱动效率降低,驱动电流位置向边缘移动,这是由于当 Z_{eff} 超过一定值后,等离子体比压,温度等会随着 Z_{eff} 的增加而降低导致的。

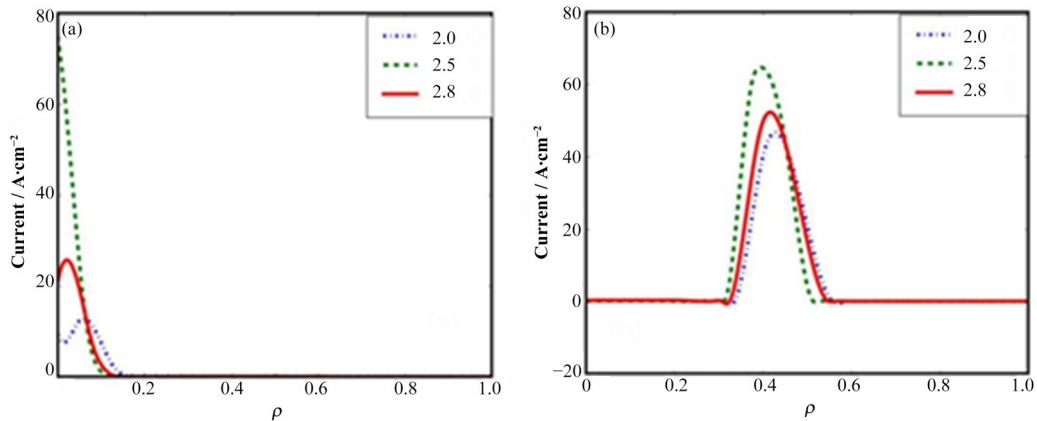


图6 考虑 Z_{eff} 改变对于等离子体性能影响时,不同 Z_{eff} 作用下的电子回旋波电流驱动
Fig.6 Electron cyclotron current drive with different Z_{eff} considering the effect of Z_{eff} changes on plasma performance

作者贡献声明 杨光: 进行调查研究、数值模拟、数据处理、论文初稿撰写、论文校对与修订; 钟翊君: 提供研究思路, 建立物理模型, 指导论文写作与修改; 龚学余: 对文章的知识性内容作批评性审阅, 获取研究经费; 黄千红: 指点研究方向, 提供研究思路及文献, 初稿审阅; 郑平卫: 提供电子回旋波电流驱动的理论支持; 王占辉: 提供涉及的实验装置参数, 获取软件程序支持。

参考文献

1 Prater R. Heating and current drive by electron cyclotron waves[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(5): 2349 - 2376.

3 结语

利用OMFIT集成模拟平台研究了杂质浓度对ECCD的影响, 研究中分别就自洽考虑杂质浓度改变对等离子体平衡和动力学剖面的影响以及保持等离子体平衡和动力学剖面不变两种情况进行探讨。在不考虑杂质浓度改变对等离子体平衡和动力学剖面的影响时发现, 杂质浓度的增加对ECW沉积位置没有影响, 但是会使ECCD效率降低。在自洽考虑杂质浓度改变对等离子体平衡和动力学剖面的影响的模拟中, 发现由于杂质一方面会产生辐射效应辐射能量, 另一方面又能稀释主离子降低各通道的输运通量改善约束, 从而导致等离子体温度、比压等先增加后下降, 使ECW与等离子体相互作用产生的驱动电流效率将先增加后减小, 驱动电流径向位置将先往芯部移动然后向边缘移动。这些研究对于ECCD控制等离子体电流剖面, 以及控制磁流体不稳定性具有重要意义。有助于在托卡马克装置上规划和分析ECW实验, 以及为开展ECCD控制等离子体(如新经典撕裂模抑制, 芯部杂质抑制)相关实验研究提供理论参考。

DOI: 10.1063/1.1690762.

- Huang Y H, Xiang N, Chen J L, *et al.* Modeling very high electron heating by radio frequency waves on EAST[J]. *Nuclear Fusion*, 2021, 61(9): 096026. DOI: 10.1088/1741-4326/ac1199.
- Petty C C, Haye R J L, Luce T C, *et al.* Complete suppression of the $m=2/n=1$ neoclassical tearing mode using electron cyclotron current drive in DIII-D[J]. *Nuclear Fusion*, 2004, 44(2): 243 - 251. DOI: 10.1088/0029-5515/44/2/004.
- Sertoli M, Angioni C, Dux R, *et al.* Local effects of ECRH on argon transport in L-mode discharges at

- ASDEX upgrade[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2011, **53**(3): 035024. DOI: 10.1088/0741-3335/53/3/035024.
- 5 Beurskens M N A, Dunne M G, Frassinetti L, *et al.* The role of carbon and nitrogen on the H-mode confinement in ASDEX Upgrade with a metal wall[J]. Nuclear Fusion, 2016, **56**(5): 056014. DOI: 10.1088/0029-5515/56/5/056014.
- 6 Petrie T W, Osborne T, Fenstermacher M E, *et al.* Improved confinement in highly powered high performance scenarios on DIII-D[J]. Nuclear Fusion, 2017, **57**(8): 086004. DOI: 10.1088/1741-4326/aa7399.
- 7 Urano H, Nakata M, Aiba N, *et al.* Roles of argon seeding in energy confinement and pedestal structure in JT-60U [J]. Nuclear Fusion, 2015, **55**(3): 033010. DOI: 10.1088/0029-5515/55/3/033010.
- 8 Dux R, Neu R, Peeters A G, *et al.* Influence of the heating profile on impurity transport in ASDEX Upgrade[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2003, **45**(9): 1815 - 1825. DOI: 10.1088/0741-3335/45/9/317.
- 9 Fisch N J, Boozer A H. Creating an asymmetric plasma resistivity with waves[J]. Physical Review Letters, 1980, **45**(9): 720 - 722. DOI: 10.1103/physrevlett.45.720.
- 10 Zheng P W, Gong X Y, Lu X Q, *et al.* On current drive by Ohkawa mechanism of electron cyclotron wave in large inverse aspect ratio tokamaks[J]. Nuclear Fusion, 2018, **58**(3): 036010. DOI: 10.1088/1741-4326/aaa338.
- 11 Meneghini O, Snyder P B, Smith S P, *et al.* Integrated fusion simulation with self-consistent core-pedestal coupling[J]. Physics of Plasmas, 2016, **23**(4): 042507. DOI: 10.1063/1.4947204.
- 12 Chen J L, Chan V S, Jian X, *et al.* Integrated modeling of CFETR hybrid scenario plasmas[J]. Nuclear Fusion, 2021, **61**(4): 046002. DOI: 10.1088/1741-4326/abd7b8.
- 13 Meneghini O, Smith S P, Lao L L, *et al.* Integrated modeling applications for tokamak experiments with OMFIT[J]. Nuclear Fusion, 2015, **55**(8): 083008. DOI: 10.1088/0029-5515/55/8/083008.
- 14 Lin Y R, Chan V S, Prater R. Electron cyclotron current drive efficiency in general tokamak geometry[J]. Physics of Plasmas, 2003, **10**(10): 4064 - 4071. DOI: 10.1063/1.1610472.
- 15 Snyder P B, Groebner R J, Hughes J W, *et al.* A first-principles predictive model of the pedestal height and width: development, testing and ITER optimization with the EPED model[J]. Nuclear Fusion, 2011, **51**(10): 103016. DOI: 10.1088/0029-5515/51/10/103016.
- 16 Taylor T S, St John H, Turnbull A D, *et al.* Optimized profiles for improved confinement and stability in the DIII-D tokamak[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 1994, **36**(12B): B229 - B239. DOI: 10.1088/0741-3335/36/12b/019.
- 17 Lao L L, St John H, Stambaugh R D, *et al.* Reconstruction of current profile parameters and plasma shapes in tokamaks[J]. Nuclear Fusion, 1985, **25**(11): 1611 - 1622. DOI: 10.1088/0029-5515/25/11/007.
- 18 Pan C, Staebler G M, Lao L L, *et al.* Investigation of energy transport in DIII-D High- β_p EAST-demonstration discharges with the TGLF turbulent and NEO neoclassical transport models[J]. Nuclear Fusion, 2017, **57**(3): 036018. DOI: 10.1088/1741-4326/aa4ff8.