

抽气对HL-2A装置偏滤器靶板热负载的影响研究

王哲¹ 黄千红¹ 谭清懿¹ 叶浩然¹ 曹诚志²

1(南华大学 衡阳 421001)

2(核工业西南物理研究院 成都 610041)

摘要 磁约束核聚变托卡马克装置来自芯部的高强热流与偏滤器靶板相互作用,不但会直接影响偏滤器寿命,同时会产生大量杂质影响等离子体芯部性能,而抽气是控制等离子体密度和杂质密度的重要手段。本文基于环流2号托卡马克(HL-2A)装置利用SOLPS-ITER程序研究了不同上游电子密度条件下抽气对偏滤器靶板热负载的影响。通过密度扫描发现在脱靶阈值($T_{\text{et}}^{\text{osp}} \sim 5 \text{ eV}$)附近抽气对靶板热负载影响更大,在抽气速率分别为 $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $96 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,外靶板脱靶阈值和热负载峰值分别为无抽气条件下的1.11、1.24、1.39倍和1.37、1.96、2.54倍。进一步从原子分子碰撞过程分析了 $n_{\text{e,sep}} = 0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 上游密度条件下抽气对偏滤器区等离子体和中性粒子参数分布的影响,发现在脱靶后密度条件下抽气会使氦分子密度明显降低,碰撞反应损耗的能量降低,从而导致靶板等离子体温度和能流增加。

关键词 托卡马克, 偏滤器脱靶, 抽气, 边界等离子体

中图分类号 O532⁺.11

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.100603

The effect of heat load on divertor target by pumping in HL-2A Tokamak

WANG Zhe¹ HUANG Qianhong¹ TAN Qingyi¹ YE Haoran¹ CAO Chengzhi²

1(University of South China, Hengyang 421001, China)

2(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract [Background] The energy produced by nuclear fusion on a Tokamak device is mainly exhausted through the divertor, its service life is directly affected by the interaction between huge heat flux from core and the divertor target. The large amount of impurity produced by the heat flux hitting the target leads to the reduction of the plasma confinement performance whilst pumping is an important means to control plasma density and impurity density. [Purpose] This study aims to investigate the influence of pumping on the heat load of the target plate which is of reference significance for the future experiment. [Methods] Based on the experimental parameters of the HL-2A Tokamak, SOLPS-ITER code was used to study the effect of pumping on the heat load of the divertor target under different upstream electron densities. Analysis was performed through density scanning to find the sensitive threshold

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)资助

第一作者: 王哲, 女, 1998年出生, 2020年毕业于华北理工大学, 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: 黄千红, E-mail: hqhgy@163.com

收稿日期: 2022-06-08, 修回日期: 2022-08-11

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)

First author: WANG Zhe, female, born in 1998, graduated from North China University of Science and Technology in 2020, master student, focusing on nuclear fusion and plasma physics

Corresponding author: HUANG Qianhong, E-mail: hqhgy@163.com

Received date: 2022-06-08, revised date: 2022-08-11

whilst and atom-molecular collision process was applied to the effect of pumping on the distribution of plasma and neutral particle parameters in divertor region at different upstream electron density. **[Results]** Density scanning results show that pumping near the detachment threshold ($T_{et}^{OSP} \sim 5$ eV) has a greater effect on the thermal load of the target plate. When the pumping rate is $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $96 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ respectively, the miss threshold and thermal load peak of outer target plate are 1.11, 1.24, 1.39 and 1.37, 1.96, 2.54 times of those without pumping respectively. **[Conclusion]** It is found that the decreases of deuterium molecular density results in the energy of the collision reaction power decreases when the upstream electron density exceeds the detachment threshold, leads to the increase of the temperature and energy flow of the plasma in the target plate.

Key words Tokamak, Divertor detachment, Pumping, Edge plasma

偏滤器能量排出是国际热核聚变实验反应堆计划 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 和未来聚变托卡马克装置高功率运行的关键问题^[1-2], 偏滤器是磁约束核聚变托卡马克装置承受来自芯部等离子体巨大粒子流和热流的关键组成部分, 如果热流粒子流直接排到偏滤器, 将会严重影响偏滤器的使用寿命, 同时等离子体与靶板发生强烈的相互作用产生了大量杂质, 将直接影响等离子体正常放电。而偏滤器脱靶运行被认为是控制偏滤器靶板热负荷的有效方法^[3-4]。目前, 实验装置需要通过抽气控制等离子体密度、杂质密度和减少再循环粒子^[5-7], 但对于未来聚变装置抽气更重要的任务是排除聚变反应产生的氦灰, 因为氦灰浓度过高将导致等离子体约束破裂, 因此探究抽气对偏滤器靶板热负荷的影响对将来聚变堆的设计和运行有重要意义。

实验上关于单独抽气条件对靶板热负荷影响的研究较少, Petric 等^[8]在抽气与充气混合运行的实验条件下, 发现脱靶阈值附近的靶板热负荷最高。桑超峰等^[9]针对不同抽气速率和抽气口位置对偏滤器功率的损耗以及粒子排放的影响进行研究, 发现偏滤器抽气速率越高排除粒子能力越强, 电子温度越高, 热流密度也越高, 达到脱靶所需要的上游电子密度也越大, 平靶结构偏滤器的最佳抽气口位置在靠近偏滤器公共磁通区 (Common Flux Region, CFR); 杜海龙等^[7]研究发现, 无抽气条件更容易脱靶, 抽气导致的等离子体压强损失在偏滤器脱靶中起重要作用。但关于抽气在偏滤器脱靶前后对偏滤器靶板热负荷影响研究开展较少, 且对其潜在的物理机制尚待分析。

本文利用 SOLPS-ITER 程序研究了脱靶前后抽气对偏滤器靶板热负荷的影响。分别考虑脱靶前后, 对比了抽气与无抽气条件下偏滤器靶板等离子体温度密度及中性粒子密度等参数的分布, 获得了抽气导致靶板热流及电子温度升高的主要影响因素。

1 模拟工具及边界条件

SOLPS-ITER^[10]是目前最为主流的边界模拟程序之一, 广泛应用于托卡马克偏滤器物理研究。SOLPS-ITER 是由流体输运程序 B2.5^[11]和中性粒子输运程序 EIRENE^[12]耦合而成, 其中等离子体输运模拟基于 Braginskii^[13]的电子和离子的连续性方程、动量方程、能量守恒方程, 中性粒子输运是基于线性玻尔兹曼方程。在耦合计算过程中流体程序 B2.5 为 EIRENE 程序提供等离子体背景, 而 EIRENE 程序为 B2.5 提供源项, 然后自洽迭代计算^[14-15]。而抽气的设置会使粒子源项发生变化, 则 EIRENE 程序求解的粒子分布函数会发生变化, 因此将抽气后的粒子分布函数耦合到 B2.5 中的流体输运方程求解, 得到的背景等离子体参数及靶板能流热流分布也会发生改变, 多次迭代计算使得粒子、动量、能量达到稳态。通过对比无抽气条件下背景等离子体参数及偏滤器靶板能流粒子流分布, 就可以研究抽气对偏滤器热负荷的影响。

本文模拟计算是基于环流 2 号托卡马克 (HL-

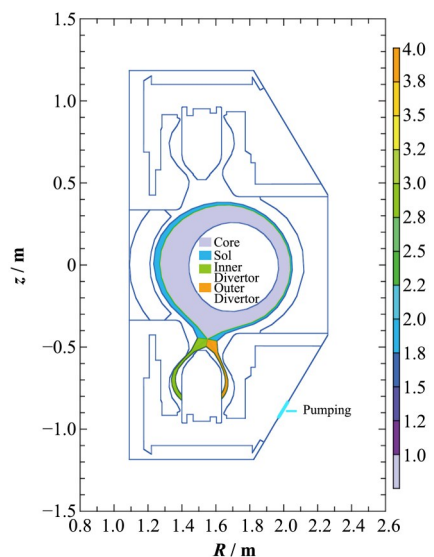


图1 HL-2A 装置的 SOLPS 计算网格
Fig.1 The SOLPS computational mesh of HL-2A

2A)装置^[16-17]进行的。计算条件为:芯部边缘输入功率为300 kW,径向反常输运系数设置为 $D_{\perp}=0.5 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $\chi_i=\chi_e=1 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$;计算粒子种类包括D、D⁺、D₂、D₂⁺。依据HL-2A装置偏滤器几何参数,构建计算网格如图1所示,HL-2A装置的偏滤器室设置的抽气系统为低温泵,抽气口位置在图1中标识^[18]。

根据公式 $S_p = 3.6384(1 - \text{Recyct})\sqrt{T/m}$ ^[19]。式中: S_p 为抽气速率, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$;A代表抽气口表面积, m^2 ;Recyct代表氘的再循环系数; T 为泵内气体温度,K; m 为气体质量,AMU。本文计算了无抽气条件和不同抽气速率 $12 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $36 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $96 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下偏滤器内外靶板热负载的分布。EIRENE程序可以直接调用数据库(AMJUEL, HYDHEL, METHAN, ADAS^[20])处理原子分子过程,涉及的电离、电荷交换、解离、弹性碰撞和体积复合过程等反应列于表1^[21-23]。

表1 EIRENE中包含中性氘的反应表
Table 1 Deuterium neutral reactions included in EIRENE

序号 Index	反应式 Reaction	反应类型 Reaction type
1	$\text{D} + \text{e} \rightarrow \text{D}^+ + 2\text{e}$	电离 Ionization
2	$\text{D}_2 + \text{e} \rightarrow \text{D}_2^+ + 2\text{e}$	电离 Ionization
3	$\text{D}_2 + \text{e} \rightarrow \text{D} + \text{D} + \text{e}$	解离 Dissociation
4	$\text{D}_2 + \text{e} \rightarrow \text{D}^+ + \text{D} + 2\text{e}$	电离 Ionization
5	$\text{D}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{D} + \text{e} + \text{D}^+$	解离 Dissociation
6	$\text{D}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{D}^+ + \text{D}^+ + 2\text{e}$	电离 Ionization
7	$\text{D}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{D} + \text{D}$	再复合 Recombination
8	$\text{D}^+ + \text{e} \rightarrow \text{D}$	再复合 Recombination
9	$\text{D}^+ + \text{D} \rightarrow \text{D} + \text{D}^+$	电荷交换 Charge exchange
10	$\text{D}^+ + \text{D}_2 \rightarrow \text{D} + \text{D}_2^+$	电荷交换 Charge exchange
11	$\text{D}^+ + \text{D} \rightarrow \text{D}^+ + \text{D}$	弹性碰撞 Elastic collision
12	$\text{D}^+ + \text{D}_2 \rightarrow \text{D}^+ + \text{D}_2$	弹性碰撞 Elastic collision

2 模拟结果与讨论

本文以靶板电子温度为5 eV作为偏滤器脱靶状态的判别标准^[10]。不同抽气速率对偏滤器内外靶板的电子温度、热流、粒子流的影响如图2所示,图中垂直虚线从左到右依次代表了无抽气、抽气速率为 $12 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $36 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $96 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的脱靶阈值位置。从图2(a)、(d)可知,抽气速率为 $0 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $12 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $36 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $96 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,外靶板脱靶起始密度分别为 $0.654 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.728 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.809 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.91 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,内靶板脱靶起始密度分别为 $0.502 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.541 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.580 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.625 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,可知三种抽气速率条件下脱靶阈值分别是无抽气条件外

靶板的1.11、1.24、1.39倍和无抽气条件内靶板的1.08、1.16、1.25倍,抽气速率对外靶板脱靶阈值影响更大,这可能与抽气口位置有关,抽气口设置在靠近外靶板侧,抽气泵工作时更易抽吸走外靶板区域的粒子;从图2(b)、(e)可知,随着上游电子密度的增大,抽气对靶板热负载的影响逐渐增大,抽气速率越大,同一上游电子密度条件下靶板热负载增加的越大,在上游密度达到脱靶阈值后抽气与无抽气条件的靶板热负载差异明显,当抽气速率分别为 $12 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $36 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $96 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 时,其外靶板峰值可达无抽气条件的1.37、1.96、2.54倍,内靶板峰值可达无抽气条件的1.33、1.78、2.22倍。图2(c)、(f)可知,外靶板的粒子通量在脱靶阈值附近发生翻转,而内靶板的粒子通量翻转要略早于脱靶阈值位置,但在脱靶阈值附近不同抽气速率的粒子通量相近,上游电子密度进一步增大,抽气条件的粒子通量高于无抽气条件且差异增大。

偏滤器能量耗散主要是通过氘粒子的辐射和原子分子碰撞过程,因此从这两方面进行了分析,本文考虑的氘辐射主要是线辐射、韧致辐射及原子辐射。其中线辐射是指电子处于束缚态时,由于所处的能级不稳定,从高能级向低能级跃迁所产生的辐射;韧致辐射是带电粒子与原子核发生碰撞时,在电磁场的作用下带电粒子速度和方向发生改变而发出的辐射,其主要在芯部高温条件下占主导;此处考虑的原子辐射是指原子过程中产生辐射的过程包括复合辐射、电荷交换和激发态的粒子退激生成的激发辐射。本文所考虑的辐射具体表达式可见文献^[24-26]。根据辐射碰撞模型^[27-29],等离子体中氘的辐射功率可以用式(1)表示:

$$q_{\text{Drad}} = n_e n_i L_D(T_e) \quad (1)$$

式中: n_e 、 n_i 分别为靶板处的等离子体电子和离子密度; L_D 是氘的辐射冷却率与电子温度相关。

如图3所示,无抽气条件和三种抽气速率条件下氘的靶板区域辐射功率趋势一致,随着上游电子密度的增加,氘的偏滤器区域辐射功率逐渐增加,内外靶板的热负载持续降低,在上游电子密度达到脱靶阈值附近,辐射功率变化趋于平缓,当上游电子密度进一步增大,辐射功率降低。因此在无抽气情况与抽气速率为 $12 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下,选取脱靶前后三个上游密度位置 $0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 对原子分子碰撞过程进行分析。

如图4所示,对脱靶前后抽气速率为 $12 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 与无抽气条件下偏滤器靶板的背景等离子体参数进行分析发现,无论是内靶板还是外靶板在脱靶前 $0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 的情况下抽气对等离子体密度影响较小,但

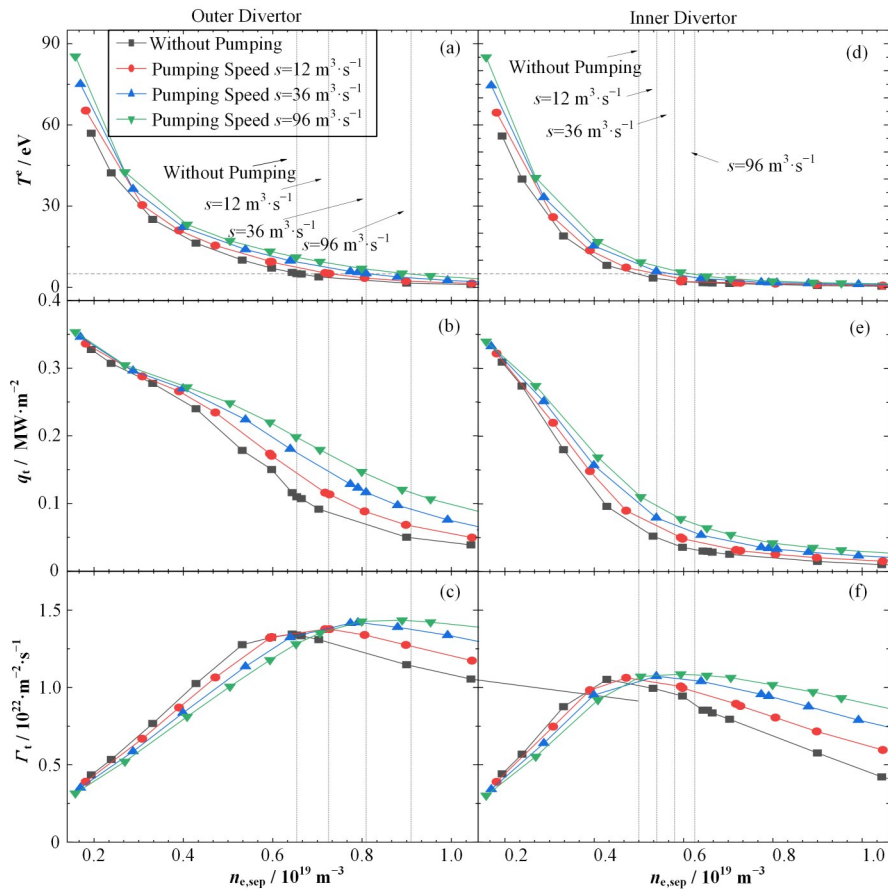


图2 抽气与无抽气情况下偏滤器靶板等离子体参数变化

(a) 外靶板电子温度, (b) 外靶板热负载, (c) 外靶板粒子通量, (d) 内靶板电子温度, (e) 内靶板热负载, (f) 内靶板粒子通量

Fig.2 Variation of plasma parameters of divertor target with and without pumping

(a) Electron temperature of the outer target, (b) Heat load of outer target, (c) Particle flux of outer target, (d) Electron temperature of the inner target, (e) Heat load of inner target, (f) Particle flux of inner target

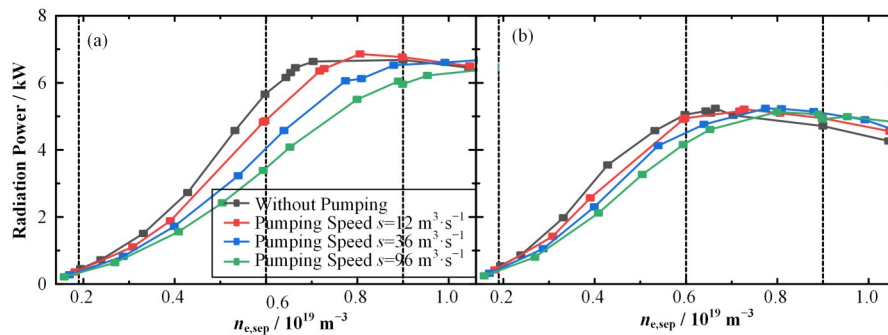


图3 偏滤器靶板不同抽气速率下的辐射功率变化

(a) 偏滤器外靶板辐射功率, (b) 偏滤器内靶板辐射功率

Fig.3 Variation of radiation power of divertor outer target (a) and inner target (b) with different pumping rates

导致内外靶板电子温度增加,外靶板的温度变化更显著;在 $0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 密度条件下,内靶板的等离子体密度要比外靶板下降的更明显,靶板温度差异逐渐减小。由于靶板处原子分子的碰撞反应主要对象是电子离子及中性粒子,靶板的电子和离子密度降低,会减弱原子分子过程,从而降低能量耗散效率,而原子分子过程主要包括中性粒子电离、解

离、再复合、电荷交换和弹性碰撞,因此我们进一步分析了脱靶前后抽气对靶板中性粒子分布的影响以研究其对靶板能流热流的影响。

图5~8分别为脱靶前后抽气与无抽气条件下偏滤器内中性粒子参数的内外靶板分布、氦原子、氦分子、中性压强的平面分布。由图5(a)、(f)和图6可知,在 $n_{e,sep} = 0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 的条件下,氦原子主要分布

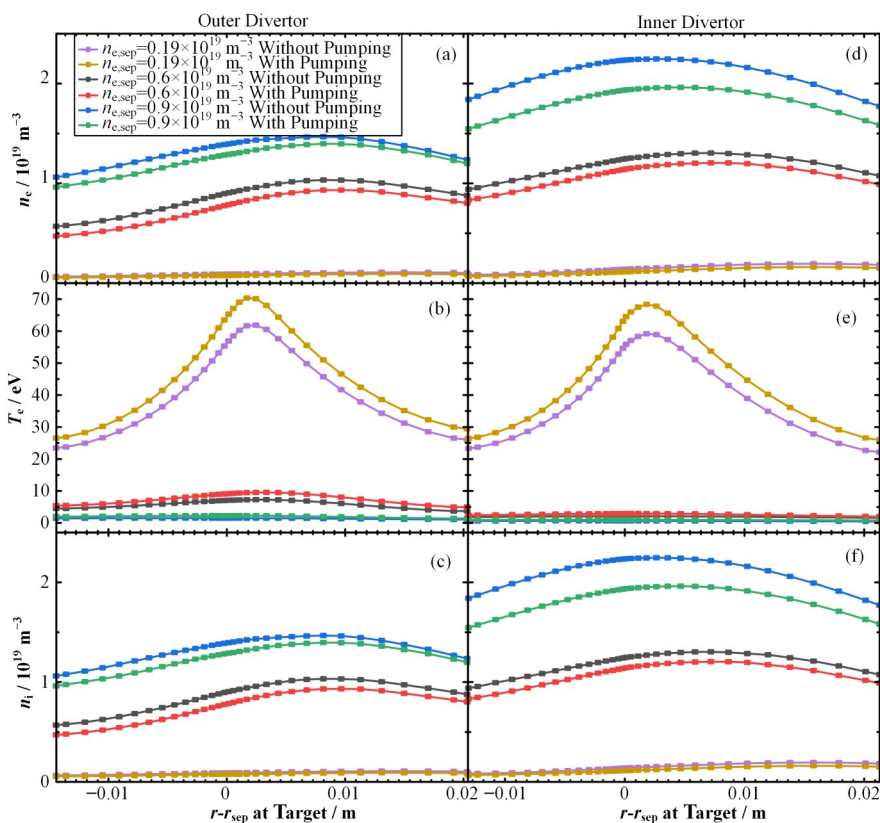


图4 不同上游电子密度条件下的偏滤器靶板等离子体参数变化
 (a) 外靶板的电子密度分布, (b) 外靶板的电子温度分布, (c) 外靶板的离子密度分布, (d) 内靶板的电子密度分布,
 (e) 内靶板的电子温度分布, (f) 内靶板的离子密度分布

Fig.4 Changes of plasma parameters of divertor target at different upstream electron density
 (a) The electron density of outer target of divertor, (b) The electron temperature of outer target of divertor,
 (c) The ion density of outer target of divertor, (d) The electron density of inner target of divertor,
 (e) The electron temperature of inner target of divertor, (f) The ion density of inner target of divertor

在偏滤器靶板区域,抽气对偏滤器区域的氦原子密度影响较小,随着上游密度增大到 $0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,氦原子逐渐远离靶板,向上游扩散,抽气降低了内外偏滤器区域的氦原子密度,内靶板电子温度较低,氦原子的电离碰撞反应减弱,同时抽气降低了氦离子密度导致电荷交换反应减弱,因此 $0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 密度时抽气情况下内靶板表面的氦原子密度反而高于无抽气情况的;由图5(c)、(h)可知,脱靶前后抽气内外靶板的氦原子温度都是略高于无抽气条件,且外靶板的氦原子温度大于内靶板,这是由于抽气降低氦原子密度,其碰撞反应产生的能量损耗减少,导致氦原子温度升高;由5(b)、(g)和图7可知,氦分子主要分布在非等离子体区域,氦分子在温度高的区域易电离,随着上游密度的增加,氦分子逐渐聚集在内靶板分割线外侧和非等离子体区域, $n_{c,sep} = 0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 时抽气使得偏滤器靶板区域的氦分子密度略有减少,但非等离子体区域的氦分子密度显著降低,在 $n_{c,sep} = 0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 密度条件下偏滤器的内外靶板区域、非等离子体区域的氦分子

密度都显著降低;由图5(d)、(i)可知,脱靶前 $n_{c,sep} = 0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 情况下抽气对粒子密度影响不大,但靶板温度显著增加,较高温下,氦分子的电离、解离反应增强,导致能量损耗增加因此会使内外靶板氦分子温度降低,随着上游密度增大到 $0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、 $0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,此时靶板温度较低,电荷交换与复合反应在原子分子碰撞中占据优势,抽气对温度的影响较小主要减少了氦分子粒子密度进而能量耗散少导致氦分子温度升高,由于内靶板粒子密度被抽吸的更多,因此内靶板氦分子温度上升更明显;由图5(e)、(j)和图8可知,在脱靶前 $0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 密度情况下抽气对偏滤器区域内外靶板和非等离子体区域的中性压强影响不大,随上游密度的增加,偏滤器区域的中性压强逐渐增大,因氦原子在内靶板向上扩散以及氦分子聚集在靶板附近以及非等离子体区域,因此此时的中性压强主要聚集在以上区域,并且外靶板的中性压强要大于内靶板,抽气导致偏滤器外靶板区域与非等离子体区域的中性压强明显降低。

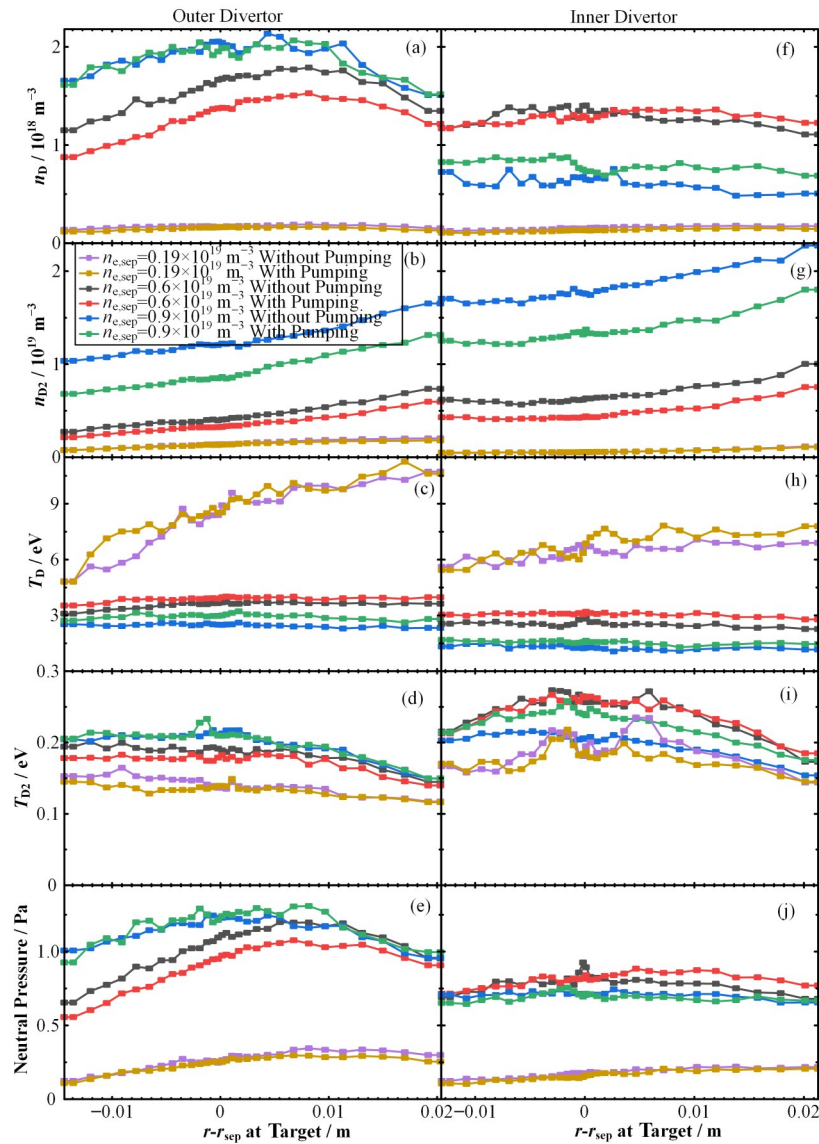


图5 不同上游电子密度条件下偏滤器靶板的中性粒子参数变化

(a) 外靶板的氘原子密度, (b) 外靶板的氘分子密度, (c) 外靶板的氘原子温度, (d) 外靶板的氘分子温度, (e) 外靶板的中性压强, (f) 内靶板的氘原子密度, (g) 内靶板的氘分子密度, (h) 内靶板的氘原子温度, (i) 内靶板的氘分子温度, (j) 内靶板的中性压强

Fig.5 Variation of neutral particle parameters of divertor target before and after detachment at different upstream electron density (a) The deuterium atomic density of outer target of divertor, (b) The deuterium molecular density of outer target of divertor, (c) The deuterium atomic temperature of outer target of divertor, (d) The deuterium molecular temperature of outer target of divertor, (e) The neutral pressure of outer target of divertor, (f) The deuterium atomic density of inner target of divertor, (g) The deuterium molecular density of inner target of divertor, (h) The deuterium atomic temperature of inner target of divertor, (i) The deuterium molecular temperature of inner target of divertor, (j) The neutral pressure of inner target of divertor

3 结语

本文使用 SOLPS-ITER 程序模拟 HL-2A 装置不同上游电子密度条件下抽气对偏滤器内外靶板热负载的影响。针对脱靶后抽气导致靶板热负载差异增大的现象从原子分子碰撞过程方面分析, 选取脱靶前后三个相同上游电子密度的条件, 抽气速率 $12 \sim 96 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的外靶板和内靶板的脱靶阈值约是无抽气条件的 1.11~1.39 倍和 1.08~1.25 倍, 外靶板和内靶板

的热负载峰值约无抽气条件的 1.37~2.54 倍和 1.33~2.22 倍, 当抽气速率超过一定范围后, 抽气对脱靶阈值和热负载的影响减弱。通过分析无抽气条件和抽气速率 $S_p = 12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下的背景等离子体参数与中性粒子参数评估抽气对偏滤器区域的影响, 发现 $n_{e, \text{sep}} = 0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 条件下抽气对粒子密度影响有限, 偏滤器区域辐射功率相近, 对靶板热负载影响也不大; 上游密度增加到脱靶阈值前 $n_{e, \text{sep}} = 0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

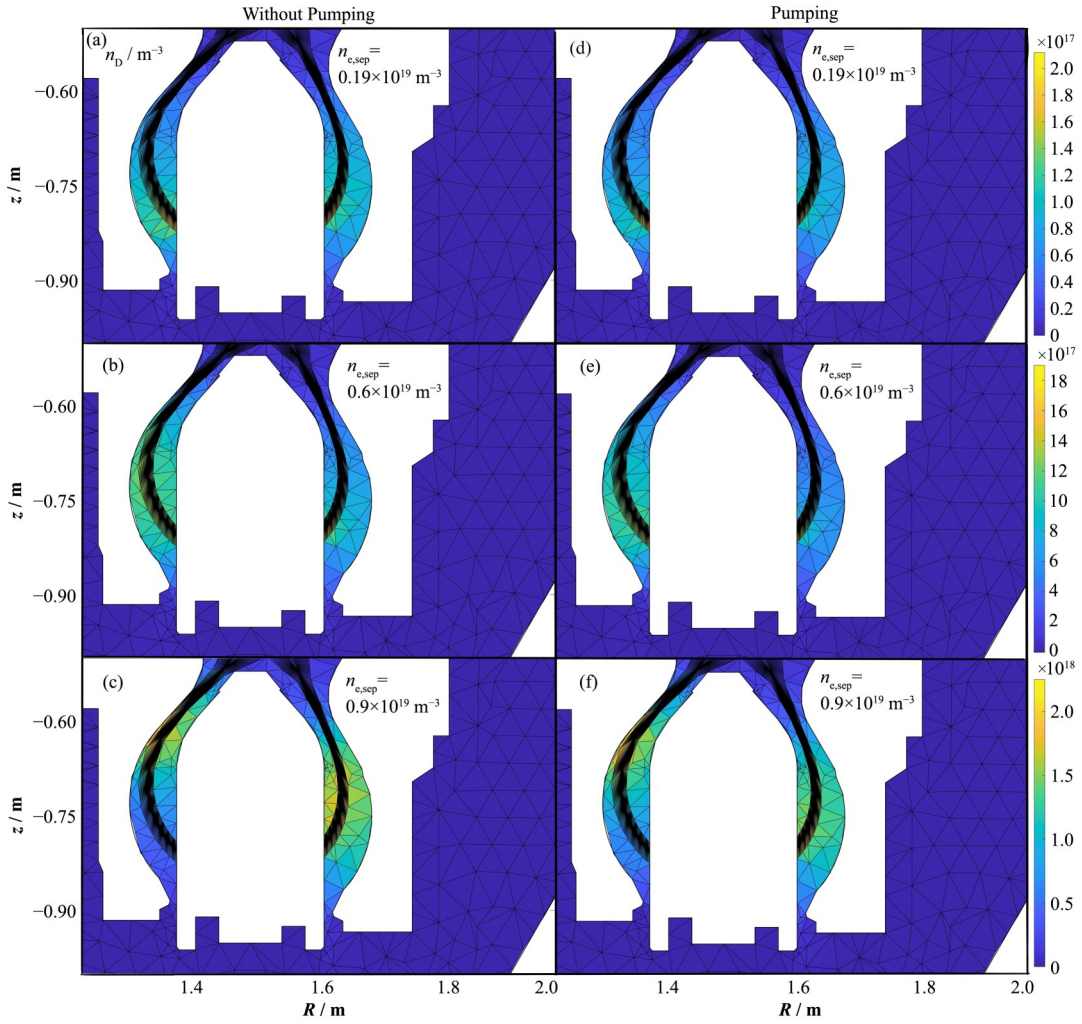


图6 偏滤器区域的氘原子密度分布

- (a) 无抽气条件下 $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, (b) 无抽气条件下 $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,
 (c) 无抽气条件下 $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, (d) 抽气条件下 $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,
 (e) 抽气条件下 $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, (f) 抽气条件下 $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

Fig.6 Distribution of the deuterium atomic density of divertor area

- (a) $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ without pumping, (b) $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ without pumping,
 (c) $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ without pumping, (d) $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ with pumping,
 (e) $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ with pumping, (f) $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ with pumping

时,抽气降低了等离子体密度和中性粒子的密度,影响原子分子碰撞反应,靶板热负载差异增大;上游密度达到 $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,外靶板区域的辐射功率相近,抽气条件下内靶板区域的辐射功率略大于无抽气条件,此时导致偏滤器靶板热流的差异的原因主要是原子分子过程的碰撞反应,氘原子主要分布在靶板附近的等离子体区域受抽气影响较小,抽气条件下的靶板氘原子密度与无抽气条件相近甚至略大,而氘分子沉积在偏滤器内外靶板附近以及非等离子体区域,更易被抽气口抽取,因此认为抽气影响靶板热负载的主要因素是氘分子密度。抽气减少氘分子密度,降低中性粒子碰撞反应,使其能量损耗降低,

增大偏滤器靶板热负载与电子温度。从模拟结果看,在未来的脱靶实验中为了避免抽气增加靶板热负载损伤靶板,同时为促进达到脱靶状态,考虑在保证等离子体的约束性能的情况下,充气增加上游等离子体密度和氘分子密度降低靶板的热负载;从控制等离子体密度和靶板热负载方面考虑,在上游电子密度达到脱靶阈值后抽气优于在脱靶阈值附近抽气。本文尚未考虑抽气充气结合作用下对装置脱靶以及靶板热流的影响,因此下一步工作计划将探究不同充气速率的氘分子注入和抽气协同作用条件下对等离子体和中性粒子参数的影响。

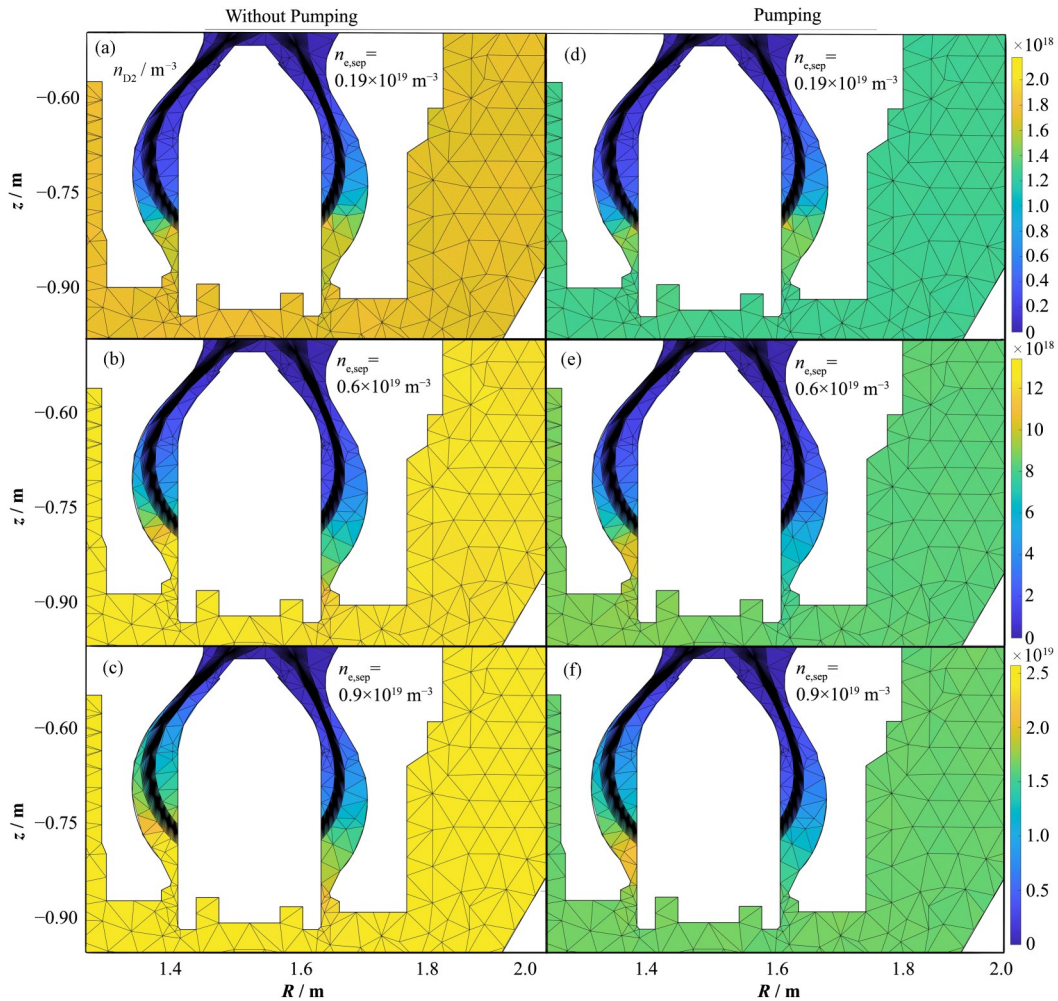


图7 偏滤器区域的氘分子密度分布

- (a) 无抽气条件下 $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, (b) 无抽气条件下 $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,
 (c) 无抽气条件下 $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, (d) 抽气条件下 $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,
 (e) 抽气条件下 $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, (f) 抽气条件下 $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

Fig.7 Distribution of the deuterium molecular density of divertor area

- (a) $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ without pumping, (b) $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ without pumping, (c) $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ without pumping,
 (d) $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ with pumping, (e) $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ with pumping, (f) $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ with pumping

作者贡献声明 王哲:研究方案的执行者,参与调查研究、数据采集处理、论文初稿撰写、论文校对与修订;黄千红:提供研究思路,指导论文写作与修改,对文章知识性内容作批评性审阅,获取研究经费;谭清懿:指点研究方向,提供相关研究思路及文献,初稿审阅;叶浩然:参与文献收集整理工作,数据整理;曹诚志:提供涉及的实验装置参数,获取软件程序支持。

参考文献

- Pitts R A, Carpentier S, Escourbiac F, *et al.* Physics basis and design of the ITER plasma-facing components[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, **415**(1): S957 - S964. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.01.114.
- Pitts R A, Bardin S, Bazylev B, *et al.* Physics conclusions in support of ITER W divertor monoblock shaping[J]. Nuclear Materials and Energy, 2017, **12**: 60 - 74. DOI: 10.1016/j.nme.2017.03.005.
- Loarte A, Hughes J W, Reinke M L, *et al.* High confinement/high radiated power H-mode experiments in Alcator C-Mod and consequences for International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) QDT = 10 operation[J]. Physics of Plasmas, 2011, **18**(5): 056105. DOI: 10.1063/1.3567547.
- Zohm H, Angioni C, Fable E, *et al.* On the physics guidelines for a tokamak DEMO[J]. Nuclear Fusion, 2013, **53**(7): 073019. DOI: 10.1088/0029-5515/53/7/073019.

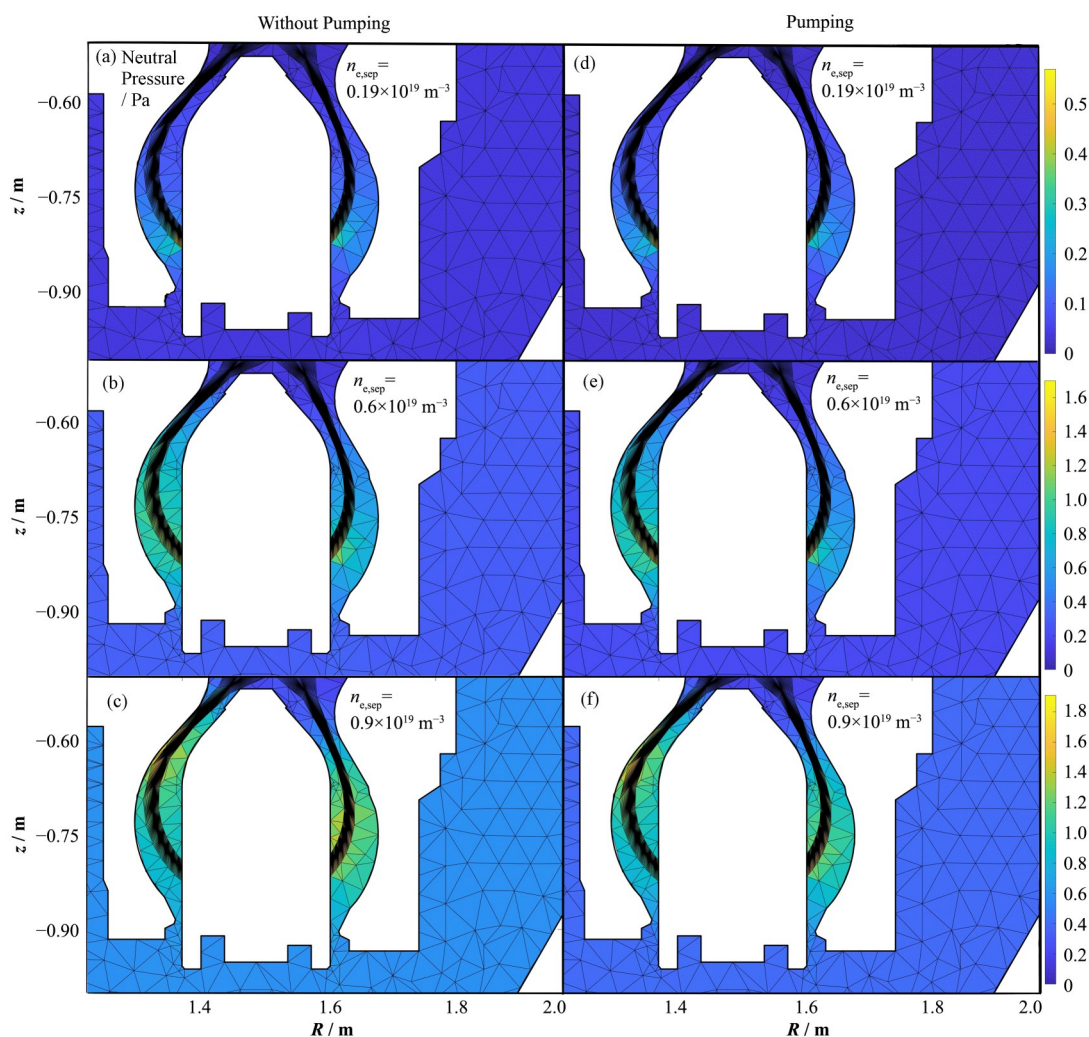


图8 偏滤器区域的中性压强分布

(a) 无抽气条件下 $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, (b) 无抽气条件下 $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, (c) 无抽气条件下 $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,
 (d) 抽气条件下 $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, (e) 抽气条件下 $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, (f) 抽气条件下 $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

Fig.8 Distribution of the neutral pressure of divertor area

(a) $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ without pumping, (b) $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ without pumping, (c) $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ without pumping,
 (d) $n_{e,sep}=0.19 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ with pumping, (e) $n_{e,sep}=0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ with pumping, (f) $n_{e,sep}=0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ with pumping

5 邓柏权, 谢中友. FEB 氦灰问题研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 1996, **16**(4): 22 - 24. DOI: 10.16568/j.0254-6086.1996.04.004.
 DENG Baiquan, XIE Zhongyou. Studies on feb helium ash issues[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 1996, **16**(4): 22 - 24. DOI: 10.16568/j.0254-6086.1996.04.004.

6 Nakamura H, Sakasai A, Shimada M, *et al.* Hydrogen/deuterium recycling and initial results of helium ash study in JT-60U[J]. Journal of Nuclear Materials, 1992, **196 - 198**: 642 - 646. DOI: 10.1016/S0022-3115(06)80115-7.

7 Du H L, Zheng G Y, Bonnin X, *et al.* Deeply understanding particle flux rollover with argon impurity injection and pumping effects in HL-2A by SOLPS[J].

Fusion Engineering and Design, 2020, **156**: 111601. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.111601.

8 Petrie T W, Maingi R, Allen S L, *et al.* Partially detached radiative divertor with active divertor pumping[J]. Nuclear Fusion, 1997, **37**(5): 643 - 655. DOI: 10.1088/0029-5515/37/5/i07.

9 Sang C F, Stangeby P C, Guo H Y, *et al.* The role of divertor pumping in plasma detachment and particle exhaust in a closed divertor[J]. Nuclear Fusion, 2021, **61** (1): 016022. DOI: 10.1088/1741-4326/abc356.

10 Wiesen S, Reiter D, Kotov V, *et al.* The new SOLPS-ITER code package[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, **463**: 480 - 484. DOI: 10.1016/j.jnucmat. 2014.

- 10.012.
- 11 Schneider R, Bonnin X, Borrass K, *et al.* Plasma edge physics with B2-eirene contrib[J]. Plasma Physics, 2006, **46**(1 - 2): 3 - 191. DOI: 10.1002/ctpp.200610001.
 - 12 Reiter D, Baelmans M, Börner P. The EIRENE and B2-EIRENE codes[J]. Fusion Science and Technology, 2005, **47**(2): 172 - 186. DOI: 10.13182/fst47-172.
 - 13 Schneider R, Coster D, Braams B, *et al.* B2 - solps5. 0: SOL transport code with drifts and currents[J]. Contributions to Plasma Physics, 2000, **40**(3 - 4): 328 - 333. DOI: 10.1002/1521-3986(200006)40:3/4<328::AID-CTPP328>3.0.CO;2-Q.
 - 14 杜海龙. EAST 高约束模式伴随边界局域模时能量在偏滤器靶板沉积模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. DU Hailong. The simulation study of energy deposition on the divertor target when EAST highly constrained mode is accompanied by boundary localized modes[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
 - 15 Liu X J, Wang L, Deng G Z, *et al.* Modeling study of the onset density for divertor detachment on EAST[J]. Physics of Plasmas, 2019, **26**(10): 102510. DOI: 10.1063/1.51110959.
 - 16 Duan X R, Ding X T, Dong J Q, *et al.*, Overview of experimental results on HL-2A[J]. Nuclear Fusion, 2009, **49**: 104012. DOI: 10.1088/0029-5515/49/10/104012.
 - 17 Cui Z Y, Morita S, Kobayashi M, *et al.* Study of carbon transport in the scrape-off layer of HL-2A with impurity sources located at limiter, dome, and divertor[J]. Nuclear Fusion, 2015, **55**(9): 093034. DOI: 10.1088/0029-5515/55/9/093034.
 - 18 Li Q. Brief introduction to engineering and experiment of HL-2A Tokamak[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(S2): 204. DOI: 10.7538/yzk.2009.43.suppl2.0204.
 - 19 Reiter D. The EIRENE code user manual[EB/OL]. [2019-09-13]. <http://www.eirene.de/html/manual.html>.
 - 20 Guzmán F, O'Mullane M, Summers H P. ADAS tools for collisional - radiative modelling of molecules[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, **438**: S585 - S588. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.073.
 - 21 Celiberto R, Janev R K, Laricchiuta A, *et al.* Cross section data for electron-impact inelastic processes of vibrationally excited molecules of hydrogen and its isotopes[J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 2001, **77**(2): 161 - 213. DOI: 10.1006/adnd.2000.0850.
 - 22 Janev R K, Reiter D, Samm U. Collision processes in low-temperature hydrogen plasmas[M]. Jülich: Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 2003.
 - 23 Phelps A V. Cross sections and swarm coefficients for H⁺, H₂⁺, H₃⁺, H, H₂, and H⁻ in H₂ for energies from 0.1 eV to 10 keV[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1990, **19**(3): 653 - 675. DOI: 10.1063/1.555858.
 - 24 杨秀达. EAST 和 WEST 等离子体芯部高 Z 杂质的输运研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020. YANG Xiuda. The transport studies of high-Z impurities in the EAST and WEST plasma cores[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
 - 25 陈伟. HL-2A 杂质原子参数和非日冕辐射的模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. CHEN Wei. Simulation of HL-2A impurity atomic parameters and noncoronal radiation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
 - 26 黎嫫. EAST 托卡马克等离子体中低 Z 杂质的行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021. LI Lei. Behavior study of low-Z impurities in EAST tokamak plasma[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
 - 27 Bates D R, Kingston A E, McWirtter R W P. Recombination between electrons and atomic ions. I. Optically thin plasmas[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series a-mathematical and Physical Sciences, 1962, **267**(1330): 297 - 312. DOI: 10.1098/rspa.1962.0101
 - 28 Fujimoto T. Kinetics of ionization-recombination of a plasma and population density of excited ions I: equilibrium plasma[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1979, **47**(1): 265 - 272. DOI: 10.1143/JPSJ.47.273.
 - 29 Wunderlich D, Dietrich S, Fantz U. Application of a collisional radiative model to atomic hydrogen for diagnostic purposes[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, **110**(1 - 2): 62 - 71. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2008.09.015.