

中国聚变工程实验堆雪花偏滤器脱靶运行的 SOLPS 模拟

吴昊声¹ 毛世峰¹ 陈 彬¹ 张传家¹ 罗正平² 郭 勇² 彭学兵² 叶民友¹

1 (中国科学技术大学 合肥 230026)

2 (中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 在中国聚变工程实验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)的工程概念设计中,为探索有效降低偏滤器靶板热负荷的途径,相对于国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)特别增加了两个极向场线圈用于产生近年来新提出的雪花偏滤器位形。脱靶运行状态下,偏滤器靶板上的热负荷显著降低,但同时由于偏滤器温度的降低,杂质约束性能会变差,因此需要对 CFETR 雪花偏滤器的脱靶运行状态进行研究。基于边界等离子体物理模拟软件 SOLPS (Scrape-off Layer Plasma Simulation),通过数值模拟研究了 CFETR 雪花偏滤器的脱靶运行状态。模拟中通过主等离子体室内的 D₂ 充气改变等离子体密度。当充气速度足够高时,CFETR 雪花偏滤器实现完全脱靶,靶板上的离子流和热负荷都显著降低。但此时偏滤器区域等离子体温度已经非常低,杂质将容易通过 X 点进入芯部,有产生辐射不稳定性风险。因此,对于 CFETR 雪花偏滤器较为合适的工作状态应当是部分脱靶运行。

关键词 中国聚变工程实验堆,雪花偏滤器,脱靶,刮削层,数值模拟

中图分类号 TL62⁺6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110601

目前正在工程概念设计阶段的中国聚变工程实验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)^[1-3]的目标与国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)互补。为验证聚变能,CFETR 的主要目标为:(1) 聚变功率 50–200 MW; (2) 年聚变燃烧时间(Duty time)达到 0.3–0.5; (3) 验证聚变堆系统的氦自持。偏滤器是托卡马克聚变装置中的关键内部部件,承受着来自于中心等离子体的热流和粒子流,起着屏蔽掉壁的杂质、排除热流和氦灰的重要任务。CFETR 未来能否稳定地运行,偏滤器的设计至关重要。CFETR 进入刮削层的热功率以及装置尺寸与 ITER 相仿,因此 CFETR 偏滤器的基准位形选择为标准下单零位形^[4]。然而,在未来聚变堆中,由于聚变功率远超目前已有的装置,偏滤器所面临的热负荷问题将更加严峻^[5]。为探索进一步降低偏滤器靶板热负荷的途径,CFETR 的工程概念设计中将近年来新提出的雪花偏滤器(Snowflake divertor, SF)^[6]和 Super-X 偏滤器^[7]纳入了考虑,特别在下偏滤器

下方增加了两个极向场线圈用于产生先进的偏滤器位形。

标准雪花偏滤器位形通过在极向场产生二阶零点,相对于传统的下单零偏滤器的一阶零点,在 X 点的附近有着更大的磁通展宽,理论上对于靶板热负载有着明显改善;同时在 X 点附近的 separatrix 变为 6 条,形成雪花的形状,雪花偏滤器也因此得名。标准雪花位形是不稳定的,更加稳定的位形是当偏滤器线圈电流增大(或减小)时,转化为 SF+ (或 SF-) 位形,此时仍然能够保持较大的磁通展宽。在 CFETR 的工程概念设计工作中,基于已有的极向场线圈,并考虑到 45 kA·turn⁻¹ 的线圈电流工程限制,产生了准 SF+ 位形^[3]。由于在 CFETR 中线圈到等离子体距离较远,第二个 X 点距离主 X 点仍然较远。尽管如此,该位形在 X 点附近的磁通展宽仍然具有较大的磁通展宽,接近标准下单零位形展宽的两倍。

对 CFETR 雪花偏滤器热负荷的初步评估表明^[8],当主等离子体室 D₂ 充气(用于改变等离子体

国家自然科学基金(No.11375191、No.11305216)、国家磁约束核聚变能发展研究专项(No.2014GB110000)、中国科学技术大学中央高校基本科研业务费专项(No.WK2140000006)、安徽省自然科学基金(No.1308085QA21)资助

第一作者: 吴昊声, 男, 1989 年出生, 2012 年毕业于中国科学技术大学, 现为硕士研究生

通讯作者: 毛世峰, E-mail: sfmao@ustc.edu.cn

收稿日期: 2015-09-15, 修回日期: 2015-10-26

密度) 达到 $3.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 时, 雪花偏滤器内外靶板热负荷均降至 $4 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下, 满足靶板热负荷 $10 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的工程限制, 同时内外靶板都已经进入高再循环状态。特别地, 在充气速度为 $1.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 时, 雪花偏滤器的内靶板热负荷峰值与下单零位形相当, 外靶板则有着显著的改善。同时考虑到在初步设计的兼容雪花和下单零偏滤器的几何位形中, 雪花位形内外靶板打击点处 separatrix 与靶板的夹角要大于标准下单零位形, 因此雪花偏滤器带来的热负荷的改善还可以进一步提升。

为进一步研究更高密度 (更高充气速度下) CFETR 雪花偏滤器是否能够实现脱靶以及对杂质的约束情况, 基于边界等离子体物理模拟软件 SOLPS5.0^[9]开展了相应的数值模拟。

1 SOLPS 模拟设置

边界等离子体物理模拟程序 SOLPS 是由二维等离子体流体程序 B2.5 和三维中性粒子 Monte Carlo 模拟程序 EIRENE^[10]的耦合形成的。基于 EFIT 计算得到的平衡位形^[3]和初步设计的几何位形所生成的 64×24 的计算网格如图 1 所示, 其中上方箭头表示 D_2 充气位置, 下方箭头表示抽气位置。值得注意的是, 目前 SOLPS 程序还无法处理偏滤器区域存在两个 X 点的情况, 但由于 CFETR 准雪花偏滤器位形中第二个 X 点不在计算区域内, 仍然可以近似地采用类似于下单零偏滤器的计算网格进行模拟。

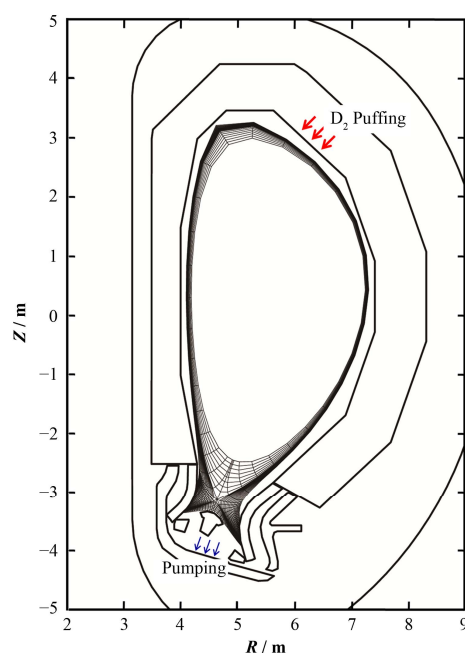


图 1 CFETR 雪花偏滤器的 SOLPS 计算网格 (64×24)
Fig.1 Computational grid of CFETR snowflake divertor in SOLPS (64×24).

密度扫描是探索偏滤器运行窗口常用的方法, 参考 ITER 偏滤器的设计工作^[11], 本文中固定抽气速度为 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 通过改变上游 D_2 充气速度 (边界加料) 实现密度扫描的模拟。在前期工作中^[8]给出了充气速度为 $(0.8-3.0) \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 的结果, 可以判断偏滤器已经达到高再循环的状态。在本文的模拟中 D_2 充气速度范围选取为 $(3.0-9.0) \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$, 旨在探索更高的上游密度下偏滤器脱靶运行的状态。

按照 CFETR 聚变功率为 200 MW、辅助加热功率 100 MW 考虑, 假定芯部辐射的功率为 40 MW, 最终进入到刮削层的功率 $P_{\text{SOL}} = 100 \text{ MW}$ 。模拟中假定离子和电子各携带一半功率, 均为 50 MW, 即 $P_e = 50 \text{ MW}$ 、 $P_{\text{ion}} = 50 \text{ MW}$ 。模拟中粒子扩散系数 $D_{\perp} = 0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 电子/离子热扩散系数 $\chi_{\perp} = 1.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由于 CFETR 的主要目标是验证磁约束核聚变的工程可行性, 钨偏滤器将是 CFETR 优先考虑的, 因此必须要通过充入辐射杂质从而降低偏滤器靶板的热流。由于充入杂质的类型 (如 Ne、Ar)、充入速度以及位置需要通过系统的工作来进行模拟和优化, 同时基于 ITER 的设计经验, 在不考虑氦滞问题时, C 杂质可以提供足够的杂质辐射。因此在该模拟中实际上是利用靶板表面溅射的 C 杂质作为充入杂质的替代, 模拟的结果将作为未来研究杂质充入时所需达到效果的参考。

2 模拟结果与讨论

模拟得到的随着充气速度 S_{puff} 增加的内外偏滤器靶板峰值热负荷 q_{pk} 如图 2 所示。可以看到, 随着充气速度的增加, 内外靶板的峰值热负荷逐渐降低, 在充气速度达到 $9.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 时, 内外靶板峰值热负荷分别降低至 $0.10 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.23 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$, 这意味着绝大部分热流在到达靶板前已经被耗散掉。对于 CFETR 偏滤器的进一步结构和排热设计, 靶板表面热流密度分布是重要的数据基础。在图 3 中给出了高密度 (充气速度 $5.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$) 和低密度 (未充气) 情况下靶板热流密度对比。在高密度情况下, 靶板热负荷得到极大的改善, 峰值热负荷已经远低于 $10 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的工程限制。

为进一步讨论靶板的工作状态, 图 4 中首先给出外中平面电子密度随充气速度的变化关系。在模拟中, 提高充气速度是为提高上游的等离子体密度。从图 4 中可以看到, 计算网格的外中平面处芯部边界的电子密度 $n_{e, \text{ce}, \text{omp}}$ 随着充气速度的增加一直升高, 而 separatrix 处的电子密度 $n_{e, \text{sep}, \text{omp}}$ 却在下降, 这是由于在充气量较高时, 随着边界温度的降低, 充入的中性气体电离的位置更加向芯部深入。

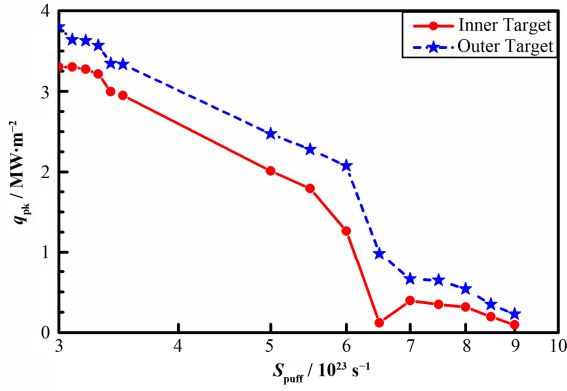


图2 内外靶板峰值热负荷 q_{pk} 随充气速度 S_{puff} 的变化
Fig.2 Peak heat load q_{pk} as a function of puffing speed S_{puff} .

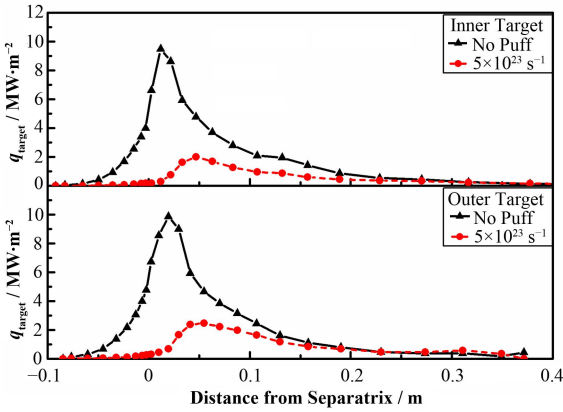


图3 未充气以及充气速度为 $5.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 内(a)、外(b)靶板热流密度分布

Fig.3 Heat flux onto inner (a) and outer (b) targets without gas puffing and with gas puffing rate of $5.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$.

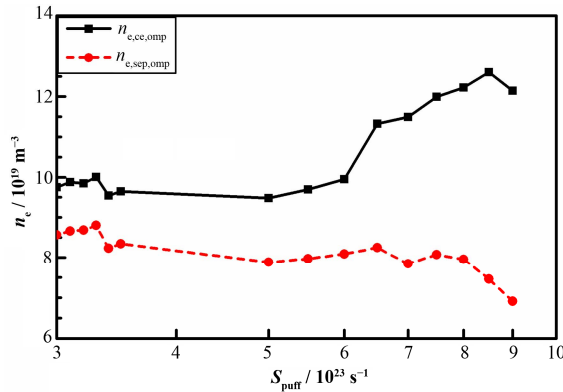


图4 外中平面处计算网格芯部边界电子密度 $n_{e,ce,omp}$ 以及 separatrix 电子密度 $n_{e,sep,omp}$ 随充气速度的变化

Fig.4 Electron density of core edge and separatrix at outer midplane as a function of gas puffing.

如图 5 所示的外中平面电子温度 $T_{e,omp}$ 和电子密度 $n_{e,omp}$ 剖面可以清楚地看到，充气速度增加时，电子温度保持剖面形状相似和整体下降，但电子密度剖面的形状则出现了较大的变化，在靠近 SOLPS 计算网格芯部边界的位置，密度整体上升，但在 separatrix 附近，电子密度梯度则逐渐变大，当充气速度较高时，separatrix 附近的电子密度反而下降。

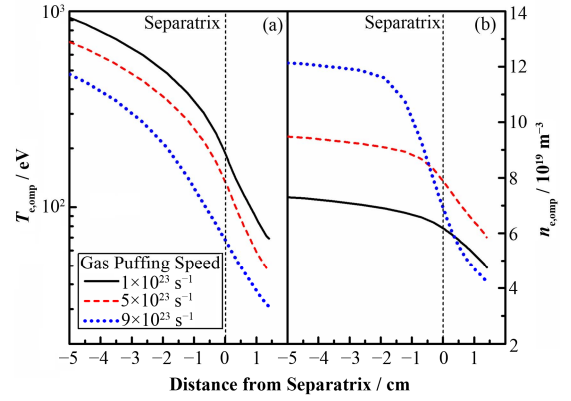


图5 外中平面电子温度 $T_{e,omp}$ (a)及电子密度 $n_{e,omp}$ 剖面(b)
Fig.5 Electron temperature $T_{e,omp}$ (a) and electron density $n_{e,omp}$ profiles (b) along outer midplane with various gas puffing speed.

图 6 中给出了内外靶板打击点(Strike point, SP)电子温度 $T_{e,SP}$ 、电子密度 $n_{e,SP}$ 以及离子流 $\Gamma_{ion,SP}$ 随外中平面芯部边界处电子密度 $n_{e,ce,omp}$ 变化的趋势。从图 6 可以看到，随着等离子体密度的增加，电子密度和内外打击点的离子流都在逐渐降低，说明在充气 $3.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 时已经开始脱靶。当密度进一步升高时，内外靶板的密度和离子流都开始急遽降低，当充气速度达到 $9.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 时，内外靶板打击点电子密度分别降至充气速度 $3.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 时的 7.4% 和 9.1%，打击点离子流分别降低至 3.9% 和 4.3%，同时内外靶板打击点的电子温度分别降低至约 0.5 eV，已经处于完全脱靶状态。不同充气速度下偏滤器工作状态可以更加直观地由图 7 看到。

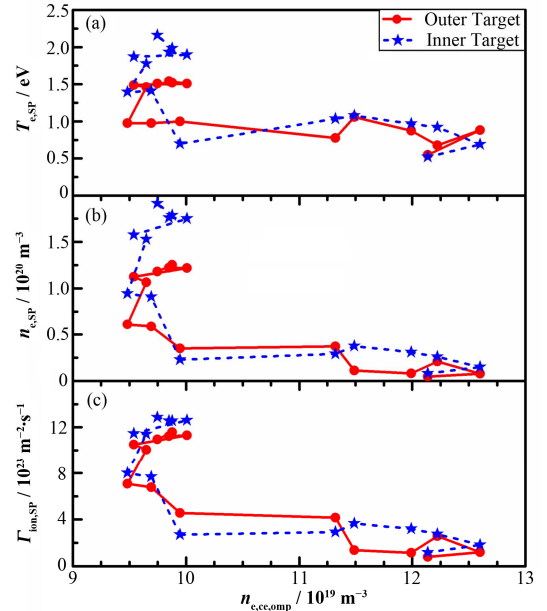


图6 内外靶板打击点处电子温度 $T_{e,SP}$ (a)、电子密度 $n_{e,SP}$ (b) 以及离子流 $\Gamma_{ion,SP}$ (c) 随外中平面芯部边界处电子密度 $n_{e,ce,omp}$ 的变化关系

Fig.6 Electron temperature $T_{e,SP}$ (a), electron density $n_{e,SP}$ (b) and ion flux $\Gamma_{ion,SP}$ (c) at inner and outer strike points as a function of electron density of core edge at midplane.

对比图 7(a)和(b)可以看到, 当充气速度为 $3.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 时, 私有区大部分区域温度已经降至 5 eV 以下, X 点附近温度仍然较高。除了打击点外, 刮削层在靶板附近的温度高于 10 eV, 呈现部分脱靶状态。而当充气速度达到 $9.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 时, 整个私有区、内外靶板附近区域、沿着 separatrix 的区域包括 X 点附近区域都已经降至 5 eV 以下, 这意味着此时偏滤器区域体积复合(Volume recombination)占据主导地位, 已经完全脱靶。图 7(c)、(d)给出了不同充气速度下碳杂质的分布, 由于在更高充气速度下电子温度的降低, 碳杂质的主要电离位置(电子温度约 10 eV 的区域)超出私有区和靶板表面附近区域, 导致在刮削层区域, 特别是沿着 separatrix 的位置碳杂质密度的明显提升, 同时在芯部区域碳

杂质的密度也明显提高。由图 7(e)、(f)给出的碳杂质所占比例可以更加明显地看出, 当偏滤器部分脱靶运行时, 除了靶板附近远刮削层区域和私有区中的部分区域的碳杂质含量在 1% 以下, 而完全脱靶时, 碳杂质所占比例显著上升, 特别在芯区比例上升至约 3%。尽管这一比例仍然较低, 但从图 7(g)、(h)的杂质辐射密度比较中可以看到, 部分脱靶时位于私有区的杂质线辐射的峰值位置移至刮削层, 特别是在 X 点附近也有着较强的杂质辐射, 同时在芯区也形成一块显著的辐射区, 这两点意味着在完全脱靶时有产生辐射不稳定性的风险。因此, 对于 CFETR 雪花偏滤器较为合适的工作状态应当是部分脱靶运行。

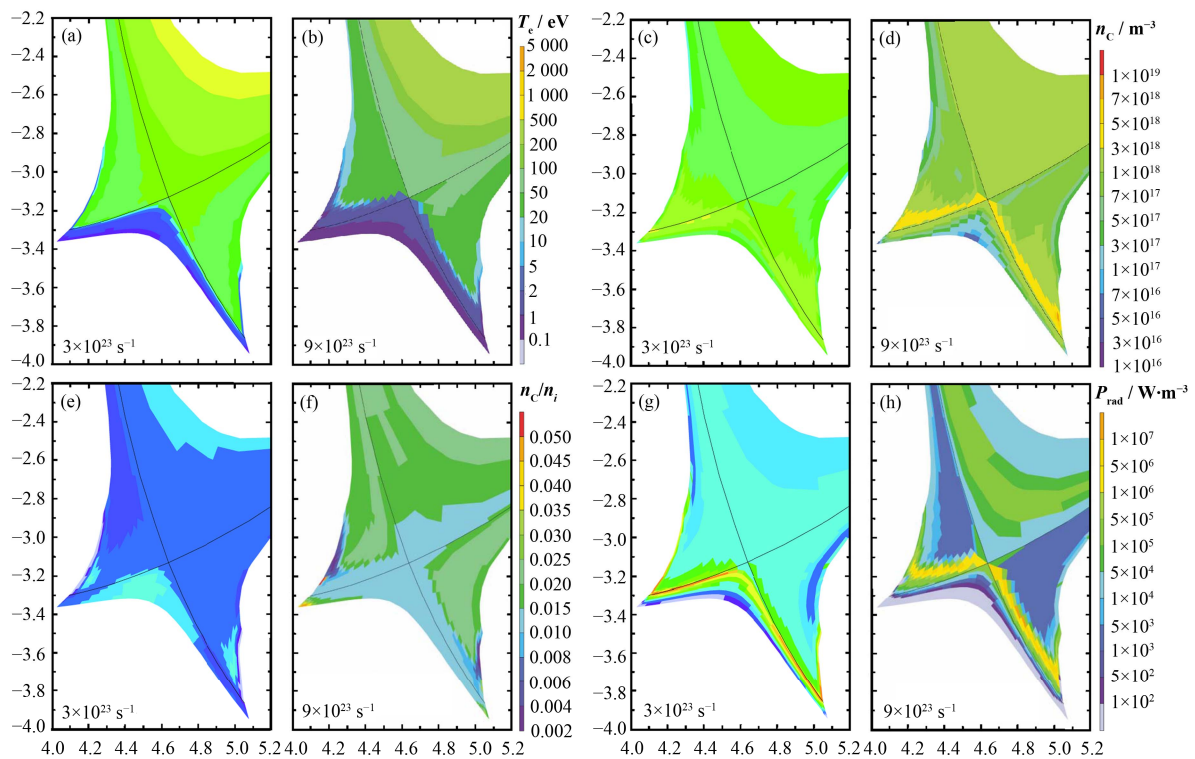


图 7 CFETR 雪花偏滤器充气速度分别为 $3.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 和 $9.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 时的电子温度 T_e (a, b)、C 杂质浓度 n_c (c, d)、碳杂质比例 n_c/n_i (e, f) 和杂质辐射密度 P_{rad} (g, h) 的二维分布

Fig.7 Distribution of electron temperature T_e (a, b), carbon impurities density n_c (c, d), the ratio of carbon ions and all ions n_c/n_i (e, f), the radiation of impurities P_{rad} (g, h) respectively at gas puffing rate of $3.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ and $9.0 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ for CFETR snowflake divertor.

3 结语

在未来聚变堆中, 有效降低靶板的热负荷是必须解决的关键问题之一。为验证聚变能, 提出了与 ITER 互补的 CFETR。模拟结果表明, 在完全脱靶时, 偏滤器靶板打击点的温度降低至约 0.5 eV, 靶板上的热流和离子流显著降低, 靶板热负荷峰值改善明显。然而, 考虑到在完全脱靶时偏滤器温度,

特别是 X 点附近的温度已经降得非常低, 杂质非常容易进入芯部。模拟得到的杂质分布表明, 完全脱靶时, 芯部的杂质比例上升至约 3%; 同时杂质辐射密度分布结果表明, 在 X 点附近有着较强的辐射, 并且在芯部产生了明显的强辐射区, 有产生辐射不稳定性的风险。因此, 对于 CFETR 雪花偏滤器较为合适的工作状态应当是部分脱靶运行。

参考文献

- 1 Song Y T, Wu S T, Li J G, *et al.* Concept design of CFETR tokamak machine[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, **42**(3): 503–509. DOI: 10.1109/TPS.2014.2299277
- 2 Wan B, Ding S, Qian J, *et al.* Physics design of CFETR: determination of the device engineering parameters[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, **42**(3): 495–502. DOI: 10.1109/TPS.2013.2296939
- 3 Luo Z, Xiao B, Guo Y, *et al.* Concept design of optimized snowflake diverted equilibria in CFETR[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, **42**(4): 1021–1025. DOI: 10.1109/TPS.2014.2307581
- 4 Chen B, Mao S F, Luo Z P, *et al.* SOLPS modelling of detachment in lower single-null divertor for China fusion engineering testing reactor[C]. Proceedings of ICONE-23, ICONE23-1882, 2015
- 5 Valanju P M, Kotschenreuther M, Mahajan S M. Super X divertors for solving heat and neutron flux problems of fusion devices[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, **85**(1): 46–52. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2009.06.001
- 6 Ryutov D D. Geometrical properties of a “snowflake” divertor[J]. Physics of Plasmas, 2007, **14**(6): 064502. DOI: 10.1063/1.2738399
- 7 Valanju P M, Kotschenreuther M, Mahajan S M, *et al.* Super-X divertors and high power density fusion devicesa[J]. Physics of Plasmas, 2009, **16**(5): 056110. DOI: 10.1063/1.3110984
- 8 Mao S F, Guo Y, Peng X B, *et al.* Evaluation of target-plate heat flux for a possible snowflake divertor in CFETR using SOLPS[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, **463**: 1233–1237. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.11.078
- 9 Coster D P, Bonnin X, Braams B, *et al.* Further developments of the edge transport simulation package, SOLPS[C]. Proceedings of the 19th IAEA Fusion Energy Conference, Lyon, France, 2002
- 10 Reiter D, Baelmans M, Börner P. The EIRENE and B2-EIRENE codes[J]. Fusion Science and Technology, 2005, **47**(2): 172–186
- 11 Kukushkin A S, Pacher H D, Federici G, *et al.* Divertor issues on ITER and extrapolation to reactors[J]. Fusion Engineering and Design, 2003, **65**: 355–366. DOI: 10.1016/S0920-3796(02)00380-0

Simulation study on detachment operation of snowflake divertor for CFETR

WU Haosheng¹ MAO Shifeng¹ CHEN Bin¹ ZHANG Chuanjia¹ LUO Zhengping² GUO Yong²
PENG Xuebing² YE Minyou¹

¹(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

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

Abstract Background: In the conceptual design of China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR), two additional poloidal coils, with respect to International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), are used to generate snowflake divertor configuration proposed recently for the purpose of exploring effective way for reducing heat loads onto divertor targets. Heat flux onto divertor targets was dramatically reduced in detached regime, while the performance of impurity screening would also be reduced due to the decrease of divertor temperature. **Purpose:** This study aims to simulate the detachment operation of snowflake divertor for CFETR. **Methods:** The detachment operational status was investigated by numerical simulation based on the edge plasma simulation software SOLPS (Scrape-off Layer Plasma Simulation). A D₂ gas puffing in the main chamber was used to change plasma density. **Results:** When the gas puffing rate was sufficiently high, snowflake divertor of CFETR was completely detached, and the ion flux and heat loads onto the targets significantly decreased. However, the plasma temperature in the divertor region was too low and the impurities could easily pass through the X-point to core plasma, which implied a risk of radiation instability. **Conclusion:** Therefore, a proper operational status for the snowflake divertor in CFETR should be partial detachment.

Key words CFETR, Snowflake divertor, Detachment, Scrape-off layer, Numerical simulation

CLC TL62+6