

UCLA

UCLA Previously Published Works

Title

Experimental studies of edge shear flow and poloidal residual stress in proximity to the density limit of HL-2A tokamak

Permalink

<https://escholarship.org/uc/item/9h18103j>

Authors

Long, T

Diamond, PH

Ke, R

et al.

Publication Date

2022-05-15

DOI

10.16568/j.0254-6086.2022s1010

Peer reviewed

HL-2A 托卡马克密度极限附近边缘剪切流和极向剩余肋强的 实验研究

龙婷¹, P. H. Diamond², 柯锐¹, 洪荣杰³, 许敏^{1*}, 聂林¹, 王占辉¹, 李波¹,
高金明¹, HL-2A 团队¹

¹核工业西南物理研究院, 中国成都

²加利福尼亚大学圣地亚哥分校, 美国洛杉矶

³加利福尼亚大学洛杉矶分校, 美国洛杉矶

中图分类号: O533

摘要: 文章报道了 HL-2A 托卡马克密度极限附近边缘剪切流和极向剩余肋强的最新实验研究结果。研究发现, 等离子体密度向 Greenwald 密度靠近时, 等离子体响应由绝热响应向流体动力学响应转变, 导致湍流雷诺肋强中的非扩散项——剩余肋强降低, 其径向梯度表征的等离子体自发旋转力矩显著降低, 由边缘极向流的湍性驱动降低进一步导致边缘 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 极向流剪切强度减弱。从实验上证明了湍流剩余肋强的降低是导致托卡马克密度极限附近边缘极向剪切层崩塌的关键因素。

关键词: 托卡马克, Greenwald 密度极限, 边缘湍流, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 剪切流, 雷诺肋强, 剩余肋强, 绝热参数

致谢

感谢晏庆豪、袁金榜、田文静、吴婷、李兵利、刘灏、龚少博、陈逸航、袁博达、王华杰、肖晨雨、朱宇轩、吴雪科及 ESL 团队对论文工作的帮助。感谢以下项目/课题对论文工作的大力支持：国家磁约束核聚变能发展研究专项 2018YFE0310300、2018YFE0303100、2019YFE0303003，国家自然科学基金 11905050、11875023、U1867222、11875124、11905080，四川省青年科技创新研究团队项目 2020JD TD0030，核工业西南物理研究院人造太阳攻关计划 202001XWCXRZ004。

第一作者的个人简介

龙婷(1991-)，女，湖南邵阳人，博士，助理研究员，中级，主要从事核聚变等离子体物理实验和诊断研究。

通讯作者的个人简介

许敏(1978-)，男，湖南岳阳人，博士，研究员，高级，博士研究生导师，主要从事核聚变等离子体物理实验和诊断研究。

Experimental studies of edge shear flow and poloidal residual stress in proximity to the density limit of HL-2A tokamak

T. Long¹, P. H. Diamond², R. Ke¹, R. J. Hong³, M. Xu¹, L. Nie¹, Z. H. Wang¹, B. Li¹,
B. L. Li¹, J. M. Gao¹, Q. H. Yan¹, T. Wu¹, H. Liu¹, S. B. Gong¹, Y. H. Chen¹, J. B.
Yuan¹, B. D. Yuan¹, H. J. Wang¹, W. J. Tian^{1,4}, C. Y. Xiao¹, Y. X. Zhu¹, X. K. Wu¹

¹ Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China

² University of California, San Diego, USA

³ University of California, Los Angeles, USA

⁴ Tsinghua University, Beijing, China

Abstract: Recent experimental results about the edge shear flow and poloidal residual stress near the density limit of HL-2A tokamak are reported in this paper. The residual stress is deduced by extracting the synthesized diffusive stress from the Reynolds stress. It is found that the residual stress reduces as density approaches Greenwald density. The plasma intrinsic poloidal torque characterized by the divergence of residual stress decreases drastically as the plasma response passes from adiabatic to hydrodynamic. The reduction of turbulent generation of edge poloidal flow leads to the decreased $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ poloidal shearing rate. These experimental results demonstrate the important role of reduced residual stress in the edge shear layer collapse in the proximity of tokamak density limit.

Keywords: tokamak, Greenwald density limit, edge turbulence, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ shear flow, Reynolds stress, residual stress, adiabaticity

1. 引言

磁约束聚变能具有储量丰富、环境友好、固有安全等突出优势，有望成为未来社会发展的主力清洁能源。聚变功率正比于等离子体密度的平方。因此，高密度运行模式对实现高效经济的聚变功率至关重要。当今世界最大的大科学工程国际科技合作计划——国际热核聚变实验堆（ITER）及未来的聚变示范堆（DEMO）计划将高密度运行模式作为基本运行方案^[1,2]。然而，托卡马克磁约束聚变装置的运行普遍存在密度极限^[3]：当等离子体弦平均密度超过某一极限值时，等离子体约束性能急剧降低，导致放电破裂。由此带来的巨大热沉积及电磁应力有可能对托卡马克装置造成严重损坏。为避免密度极限破裂，保证 ITER 及未来商业聚变堆在高密度下安全运行，有必要对托卡马克高密度运行模式及相关物理进行研究。

通过对托卡马克高密度放电破裂时的密度值与放电参数进行统计，提出了多个密度极限经验定标律。其中，适用范围最广的是 Greenwald 定标律^[4]：等离子体极限弦平均密度 $n_G[10^{20}\text{m}^{-3}] = I_p[\text{MA}]/\pi a^2[\text{m}^2]$ 。其中， I_p 表示等离子体电流， a 表示等离子体小半径。Greenwald 定标律为现役托卡马克的高密度运行提供了参考。然而，Alcator C、JT-60、DIII-D、ASDEX、TEXTOR、JET、FTU 等托卡马克装置的大量实验研究表明，不同装置能实现的最高密度不仅依赖于电流与小半径，还受到密度峰化程度、杂质水平、加热功率等因素的影响^[5-10]。

一般认为，密度极限与等离子体边界冷却（edge cooling）密切相

关。导致边界冷却的物理机制包括边界杂质辐射、等离子体输运、电荷交换、电离损失等^[3]。HL-2A 托卡马克的实验研究表明，当弦平均密度升高时，等离子体边缘湍流雷诺数减少，低频带状流从湍流获得的动能降低，极向剪切流崩塌，不能有效缓解湍流粒子输运，从而导致边缘粒子损失增强，温度降低，最终引起边界冷却^[11,12]。最新理论工作指出，密度升高过程中，边缘剪切层崩塌的主要原因是边缘极向自发旋转的动量源——极向剩余肋强的降低，而极向剩余肋强与表征电子响应的绝热参数具有很强的依赖关系^[13]。目前，关于托卡马克边缘极向剩余肋强已开展了一些实验研究^[14]，发现电子回旋波加热有利于提高极向剩余肋强、从而驱动更快的极向自发旋转^[15]，但关于托卡马克密度极限附近极向剩余肋强的实验研究尚不完善。

文章对 HL-2A 装置密度极限附近边缘剪切流和极向剩余肋强的最新实验研究结果进行报道。采用专门设计的静电探针阵列，获得了等离子体密度升高、向 Greenwald 密度靠近情形下极向 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 流和边缘湍流运输的实验测量，通过从雷诺肋强中提取出扩散肋强，获得剩余肋强的计算结果，并对 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 剪切流与剩余肋强对绝热参数的依赖关系进行研究。论文最后对现有工作进行总结。

2. 实验设置

实验在 HL-2A 托卡马克装置上开展，大半径 $R = 1.65 \text{ m}$ ，小半径 $a = 0.4 \text{ m}$ 。工作气体为氘，采用下单零偏滤器位形进行欧姆放电。等离子体基本参数如下：等离子体电流 $I_p = 150 \text{ kA}$ ，环向磁场 $B_T = 1.3 \text{ T}$ ，边界安全因子约 3.5-4。Greenwald 极限密度 $n_G \approx 3.2 \times$

10^{19} m^{-3} 。采用普通送气进行加料，并逐炮改变等离子体密度。利用 HCN 激光干涉仪测量弦平均电子密度 \bar{n}_e ，归一化到 n_G 后的范围为 0.4-0.7 n_G 。

实验采用的主要诊断手段为位于 HL-2A 外中平面的一个 3x5 多台阶往复式静电探针阵列^[16]，如图 1 所示。探针针头为圆柱形石墨，直径 2 mm，长 2 mm，相邻探针的极向间距 $d_\theta = 6 \text{ mm}$ ，径向间距 $d_r = 2.5 \text{ mm}$ 。悬浮电位探针 V_f 用白色示意，双探针的 V_+ 用蓝色示意，双探针的 V_- 用红色示意。

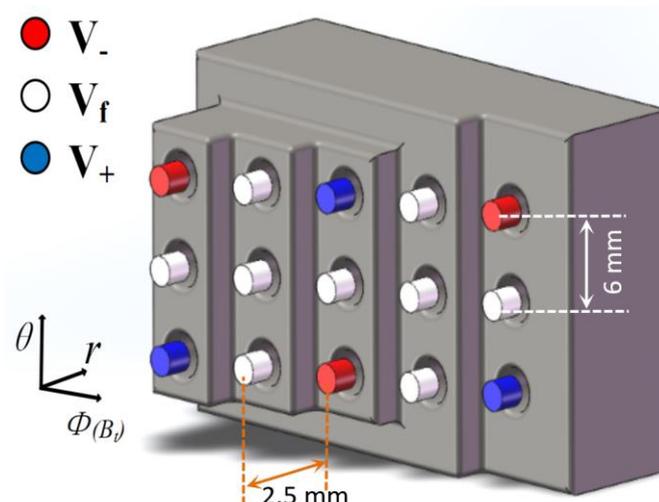


图 1 3x5 台阶式静电探针阵列示意图

利用该探针阵列，可对电子温度、电子密度、等离子体 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 速度及湍流动量通量——雷诺肋强进行同时测量。电子温度 $T_e = (V_- - V_f)/\ln 2$ ，离子饱和流 $I_{sat} = (V_+ - V_-)/R_s$ ，电子密度 $n_e = I_{sat}/(0.49eA_{eff}C_s)$ ，其中， R_s 为分流电阻， C_s 为离子声速， A_{eff} 为有效收集面积。径向 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 速度扰动 \tilde{v}_r 由测得的极向电位差扰动计算，极向 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 速度扰动 \tilde{v}_θ 由测得的径向电位差扰动计算。正 v_r 由等离子体芯

部指向真空室壁，正 v_θ 指向电子逆磁漂移方向。湍流雷诺肋强 $RS = \langle \tilde{v}_r \tilde{v}_\theta \rangle$ ，其中 $\langle \cdot \rangle$ 由时间平均代替。采用 FIR 数字滤波器对信号进行滤波，获得 40-200 kHz 的宽谱湍流数据。

3. 研究结果

湍流动量通量——雷诺肋强可拆分成三项^[17]，如(1)式所示。等号右边第一项是由湍流动量扩散引起的扩散肋强 $\Pi_{r\theta}^{Diff} = -\chi_\theta \frac{\partial \langle v_\theta \rangle}{\partial r}$ ，即湍流粘滞通量。其中， χ_θ 表示极向流的湍性粘度，即扩散系数。右边第二项是由湍流动量对流引起的对流肋强。第三项是剩余肋强^[18] (Residual stress)。剩余肋强不依赖于极向速度及其梯度，是温度梯度和密度梯度的函数， $\Pi_{r\theta}^{Res} = \Pi_{r\theta}^{Res}(\nabla T, \nabla n)$ ，是动量运输矩阵中的非对角项^[19,20]。

$$\langle \tilde{v}_r \tilde{v}_\theta \rangle = -\chi_\theta \frac{\partial \langle v_\theta \rangle}{\partial r} + v_r^{eff} \langle v_\theta \rangle + \Pi_{r\theta}^{Res} \quad (1)$$

剩余肋强是等离子体自发旋转的动量来源，其散度 $\partial_r(\Pi^{Res})$ 定义了自发旋转力矩密度^[19]。可以通过一个简单的情形进行说明：考虑理想情况下的无耗散等离子体， $t = 0$ 时刻，等离子体没有旋转，即 $\langle v_\theta \rangle = \partial_r \langle v_\theta \rangle = 0$ ，由 $\partial_t \langle \tilde{v}_\theta \rangle = -\partial_r \langle \tilde{v}_r \tilde{v}_\theta \rangle$ 得出， $\partial_t \langle v_\theta \rangle = -\partial_r \Pi_{r\theta}^{Res}$ ，对等离子体半径进行积分，有 $\partial_t \int_0^a \langle v_\theta \rangle dr = \partial_t \bar{v}_\theta = -\Pi_{r\theta}^{Res} |_{a}$ 。由此可见，只有当等离子体边界处的剩余肋强为有限值时，等离子体整体才能获得净动量^[21]。

在此框架下，温度/密度梯度通过剩余肋强来驱动等离子体旋转，可以类比汽车车轮发生转动的过程^[22]。对于汽车而言，汽车发动机内

凸轮轴转动控制送气和排气，汽油燃烧产生巨大压力推动活塞进行运动，通过传动装置使车轮发生转动，热能转化为机械能。对于等离子体而言，对等离子体进行加热， $\nabla T, \nabla n$ 自由能驱动漂移波湍流，湍流对称性破缺导致剩余胁强为有限值，进而驱动等离子体进行旋转，温度梯度中的自由能转化为等离子体动能^[23]。

根据回旋动理学计算^[24]，(1)式的对流项中，有效箍缩速度 $v_r^{eff} \cong \chi/R$ ，在边缘狭窄（~1-2cm）的强剪切层内，对流胁强远小于扩散胁强而被忽略^[24]。准线性理论下，湍流动量扩散系数 χ_θ 可用涡旋径向速度和涡旋自相关时间表示， $\chi_\theta = \langle \tilde{v}_r^2 \rangle \tau_c$ 。 τ_c 由径向速度扰动 \tilde{v}_r 的时间自相关函数下降到 1/e 对应的的时间宽度决定。由湍流动量扩散系数 χ_θ 及 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 极向流剪切可合成扩散胁强，结合实验测量得到的雷诺胁强，可由(1)式估算出剩余胁强。各物理量（ $\langle \tilde{v}_r \tilde{v}_\theta \rangle$ 、 $\langle \tilde{v}_r^2 \rangle$ 、 $\langle v_\theta \rangle$ ）的测量误差由平均值 $\langle \cdot \rangle$ 的标准差进行估计，每个平均窗口包含 3000 个测量点。剩余胁强的误差通过计算各物理量的误差传递给出。

图 2 展示了不同等离子体密度 0.45/0.6/0.7 n_G 放电下，闭合磁面内外雷诺胁强的测量结果和剩余胁强的计算结果。蓝色曲线表示密度为 0.45 n_G 情形，橙色曲线表示密度为 0.6 n_G 情形，红色曲线表示密度为 0.7 n_G 情形。图 2(a)和图 2(e)分别为径向电场及极向 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 速度。可以看到，闭合磁面内外 ~1cm 区域存在一个很强的剪切层。如图 2(d)所示，当密度逐渐升高、接近 Greenwald 密度时， $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 速度剪切率 $\partial \langle v_\theta \rangle / \partial r$ 整体呈下降趋势。

图 2(f)为测量得到的湍流雷诺胁强。当密度接近 n_G 时，闭合磁面

内的湍流雷诺肋强明显降低，而 SOL 区则变化不大。利用图 2(b-d)中径向速度扰动的均方值 $\langle \tilde{v}_r^2 \rangle$ 、 \tilde{v}_r 的自相关时间 τ_c 和极向速度剪切 $\partial \langle v_\theta \rangle / \partial r$ ，可合成扩散肋强 $\Pi_{r\theta}^{Diff}$ ，如图 2(g)所示。从雷诺肋强 $\langle \tilde{v}_r \tilde{v}_\theta \rangle$ 中提取出扩散肋强 $\Pi_{r\theta}^{Diff}$ ，即可得到剩余肋强 $\Pi_{r\theta}^{Res}$ ，如图 2(h)所示。当等离子体密度升高、向 Greenwald 密度靠近时，边缘剩余肋强及其径向梯度降低。

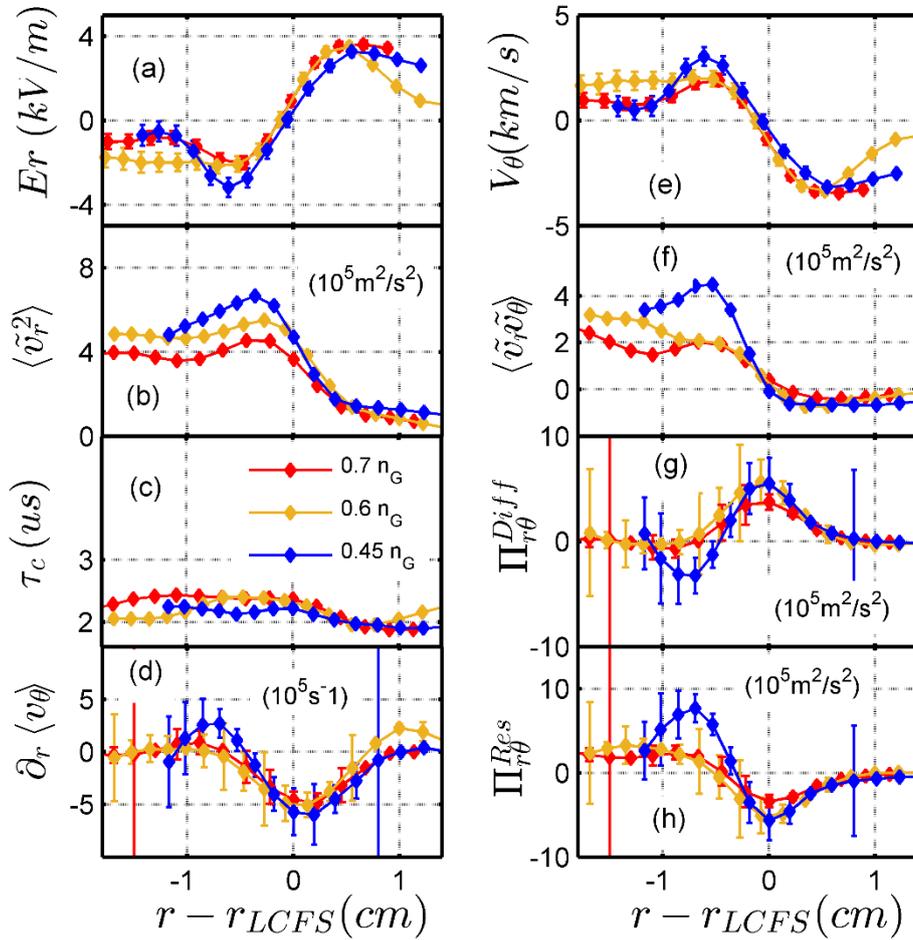


图 2 不同等离子体密度下边缘物理量的径向剖面：(a)径向电场 E_r ；(b)径向速度扰动的均方值 $\langle \tilde{v}_r^2 \rangle$ ；(c) \tilde{v}_r 的自相关时间 τ_c ；(d)极向速度剪切 $\partial \langle v_\theta \rangle / \partial r$ ；(e) $E \times B$ 极向速度；(f)雷诺肋强；(g)扩散肋强；(h)剩余肋强

图 3(a)展示了不同密度放电条件下(0.4/0.45/0.5/0.6/0.7 n_G)，边缘

电子温度的剖面。图 3(b)展示了边缘电子密度的剖面。图 3(c)和图 3(d)分别展示了剪切层内 ($-1 \text{ cm} < r - r_{LCFS} < 0 \text{ cm}$) 的平均自发旋转力矩 $\langle \tau_{intr} \rangle = \int -\partial_r \Pi_{r\theta}^{Res} r dr / \int r dr$ 及极向流剪切率 $\omega_s = \partial_r \langle v_\theta \rangle$ 与绝热参数 $\alpha = \frac{k_{\parallel}^2 v_{th}^2}{v_{ei} |\omega|}$ 的依赖关系。当弦平均密度趋向 n_G 时, 等离子体边缘电子温度显著下降, 绝热参数降低, 边缘剪切层内的平均自发旋转力矩 $\langle \tau_{intr} \rangle$ 逐渐降低。注意到, 自发旋转力矩 $\langle \tau_{intr} \rangle$ 在 $\alpha \sim 0.5$ 附近急剧下降, 对应等离子体响应由绝热响应 ($\alpha > 1$) 向流体动力学 ($\alpha < 1$) 转变, 此时, 极向流剪切率 ω_s 也迅速减弱。

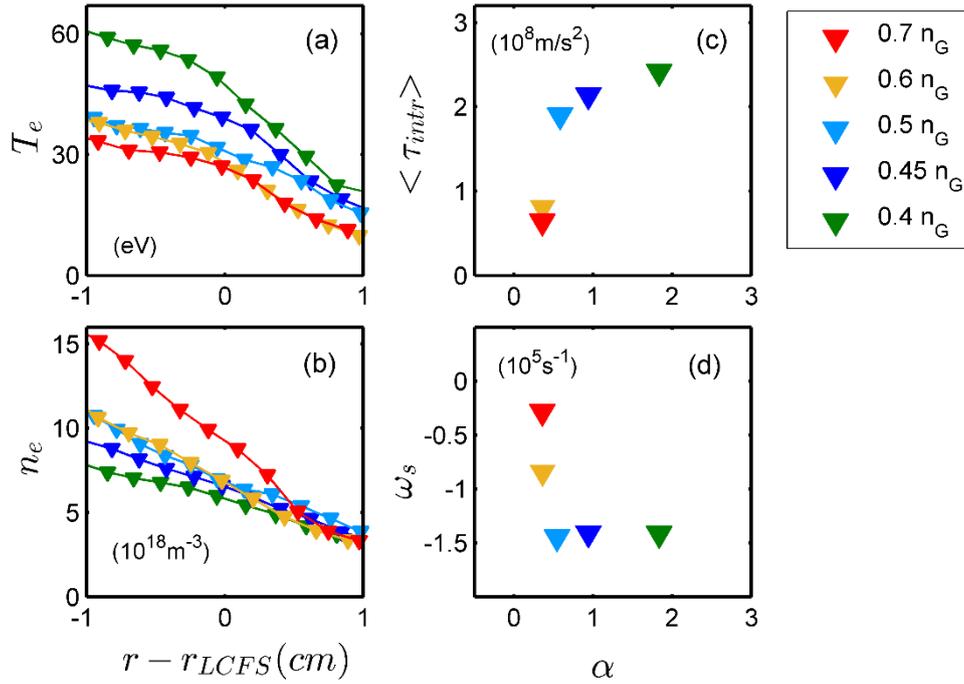


图 3 不同等离子体密度下: (a)电子温度剖面; (b)电子密度剖面; (c)平均自发旋转力矩 $\langle \tau_{intr} \rangle$ VS 绝热参数 α ; (d)极向流剪切率 ω_s VS 绝热参数 α

从等离子体边缘温度、剪切层及自发旋转力矩与绝热参数之间的依赖关系可知, 当等离子体密度升高、趋向 Greenwald 密度时, 等离

子体响应由绝热响应向流体动力学转变,意味着密度扰动与电势扰动的耦合减弱、极向流无法有效地从湍流中获取能量^[13],极向流的湍性驱动即极向剩余压强梯度降低,导致边缘剪切层崩塌,不再有效调节湍流粒子/热输运^[11],从而引发托卡马克密度极限的边界冷却现象。

4. 结论

文章对 HL-2A 托卡马克密度极限附近边缘剪切流和极向剩余压强的实验研究结果进行了报道。发现等离子体密度向 Greenwald 密度靠近时,等离子体响应由绝热响应向流体动力学响应转变,导致湍流雷诺数中的非扩散项——剩余压强降低,其径向梯度表征的等离子体自发旋转力矩显著降低,导致了边缘剪切层发生崩塌,无法有效调节湍流粒子/热输运,进而引起边缘电子温度明显降低,产生边界冷却现象。实验结果验证了由湍流驱动的自发转动量源的降低是导致托卡马克密度极限附近边缘极向剪切层崩塌的关键原因。

参考文献

- [1] DOYLE E J, HOULBERG W A, KAMADA Y, et al. Chapter 2: Plasma confinement and transport [J]. Nuclear Fusion, 2007, 47(6): S18.
- [2] ZOHN H, ANGIONI C, FABLE E, et al. On the physics guidelines for a tokamak DEMO [J]. Nuclear Fusion, 2013, 53(7): 073019.
- [3] MARTIN G. Density limits in toroidal plasmas [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2002, 44(8): R27.
- [4] GREENWALD M, TERRY J L, WOLFE S M, et al. A new look at density limits in tokamaks [J]. Nuclear Fusion, 1988, 28(12): 2199.
- [5] KAMADA Y, HOSOGANE N, YOSHINO R, et al. Study of the density limit with pellet fuelling in JT-60 [J]. Nuclear Fusion, 1991, 31(10): 1827-33.
- [6] MAINGI R, MAHDAVI M A, PETRIE T W, et al. Density limit studies on DIII-D [J]. Journal of Nuclear Materials, 1999, 266-269(598-603).
- [7] FRIGIONE D, PIERONI L, ZANZA V, et al. High density operation on Frascati

- Tokamak Upgrade [J]. *Nuclear Fusion*, 1996, 36(11): 1489-99.
- [8] STABLER A, MCCORMICK K, MERTENS V, et al. Density limit investigations on ASDEX [J]. *Nuclear Fusion*, 1992, 32(9): 1557-83.
- [9] HUBER A, BREZINSEK S, GROTH M, et al. Impact of the ITER-like wall on divertor detachment and on the density limit in the JET tokamak [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, 438(S139-S47).
- [10] GREENWALD M, GWINN D, MILORA S, et al. Energy Confinement of High-Density Pellet-Fueled Plasmas in the Alcator SC Tokamak [J]. *Physical Review Letters*, 1984, 53(4): 352-5.
- [11] HONG R, TYNAN G R, DIAMOND P H, et al. Edge shear flows and particle transport near the density limit of the HL-2A tokamak [J]. *Nuclear Fusion*, 2018, 58(1): 016041.
- [12] WANG L, TYNAN G R, HONG R, et al. Edge turbulence evolution and intermittency development near the density limit on the HL-2A tokamak [J]. *Phys Plasmas*, 2019, 26(9): 092303.
- [13] HAJJAR R J, DIAMOND P H, MALKOV M A. Dynamics of zonal shear collapse with hydrodynamic electrons [J]. *Phys Plasmas*, 2018, 25(6): 062306.
- [14] 龙婷, 聂林, 柯锐, 等. HL-2A 等离子体边缘极向剩余肋强的研究 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2018, 1): 1-7.
- [15] LONG T, DIAMOND P H, XU M, et al. Studies of Reynolds stress and the turbulent generation of edge poloidal flows on the HL-2A tokamak [J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59(10): 106010.
- [16] 龙婷. HL-2A 托卡马克等离子体边缘湍流动量运输的研究 [D]; 成都: 核工业西南物理研究院, 2017.
- [17] G RCAN Ö D, DIAMOND P H, HAHM T S, et al. Intrinsic rotation and electric field shear [J]. *Phys Plasmas*, 2007, 14(4): 042306.
- [18] DIAMOND P, MCDEVITT C, G RCAN Ö, et al. Transport of parallel momentum by collisionless drift wave turbulence [J]. *Physics of Plasmas (1994-present)*, 2008, 15(1): 012303.
- [19] DIAMOND P H, MCDEVITT C J, G RCAN Ö D, et al. Physics of non-diffusive turbulent transport of momentum and the origins of spontaneous rotation in tokamaks [J]. *Nuclear Fusion*, 2009, 49(4): 571-6.
- [20] GROUP J-M, IDA K, MIURA Y, et al. Evidence for a Toroidal-Momentum-Transport Nondiffusive Term from the JFT-2M Tokamak [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(11): 1990-3.
- [21] YAN Z, XU M, DIAMOND P H, et al. Intrinsic Rotation from a Residual Stress at the Boundary of a Cylindrical Laboratory Plasma [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(6): 065002.
- [22] KOSUGA Y, DIAMOND P H, G RCAN Ö D. On the efficiency of intrinsic rotation generation in tokamaks [J]. *Phys Plasmas*, 2010, 17(10): 102313.
- [23] LI J C, DIAMOND P H, XU X Q, et al. Dynamics of intrinsic axial flows in unsheared, uniform magnetic fields [J]. *Phys Plasmas*, 2016, 23(5): 052311.
- [24] PEETERS A G, ANGIIONI C, STRINTZI D. Toroidal Momentum Pinch Velocity due to the Coriolis Drift Effect on Small Scale Instabilities in a Toroidal

Plasma [J]. Physical Review Letters, 2007, 98(26): 265003.