

文章编号: 1001-4322(2004)05-0597-06

长脉冲等离子体放电下 HT-7 装置 限制器温度变化及能流分析

胡建生, 张晓东, 李建刚, 何诗英, 罗南昌, 姚大毛, 陈峻凌

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 在 HT-7 托卡马克等离子体长脉冲放电过程中, 作为直接面对等离子体的第一壁——限制器表面的温度变化及其承受的能流密度的计算, 对于判断限制器的作用和对等离子体的影响都有非常重要的意义。主要从测量到的距离限制器表面 3mm 处温度变化曲线, 采用无限大平面模型计算限制器模头表面能量沉积的能流密度, 并讨论了不同等离子体放电下局部点能流密度的差别。多数长脉冲放电下, 少数局部点的温升超过 1 000℃, 最大能流密度超过 10MW/m²; 但通过对等离子体位移的控制, 局部点温升被抑制, 高密度能流持续时间短, 有利于长脉冲放电。同时对限制器结构和材料对模头温度的影响也做了比较详细的分析。

关键词: 长脉冲等离子体放电; 限制器; 热轰击; 能流密度

中图分类号: O453 **文献标识码:** A

在长脉冲等离子体放电过程中, 高能粒子长时间轰击到限制器表面, 导致限制器表面温度上升过高, 限制器表面易于发生物理和化学溅射, 产生的杂质进入中心等离子区域, 使得等离子体放电难以继续^[1~3]。在未来聚变反应堆水平等离子体运行的装置上更加需要能够处理高能量的第一壁。而分析限制器表面温升情况和限制器表面受等离子体轰击的能流密度, 对于判断限制器的作用和对长脉冲准稳态运行影响都有非常重要的意义, 同时对于改进和优化限制器的结构, 调整位置也是很有用的。

限制器所接受的等离子体能流主要取决于限制器模头在托卡马克内真空室等离子体区域所处的径向位置及等离子体运行参数^[4~6], 如等离子体密度、温度、位移、 Z_{eff} 及等离子体脉冲长度等。限制器材料的抗热轰击能力、热扩散系数等对于其温升、能量输运及杂质产生有很重要的影响。限制器结构, 如模头与热沉的连接、热沉材料和结构、以及水冷系统等, 对系统稳定运行也非常重要^[6]。在 TEXTOR, Tore Supra 等托卡马克装置上都对等离子体轰击限制器表面温度分布和能流计算进行了比较详细的分析和研究^[4, 8~10]。在 2000 年进行的面对等离子体的 HT-7U 石墨材料样品实验中, 详细分析了石墨样品深入等离子体位置及在不同等离子体加热条件下样品表面温度变化及接受的能流密度^[11]。

1 HT-7 托卡马克限制器系统

随着技术的进步, 以及 HT-7 物理实验要求不断提高(长脉冲准稳态等离子体放电), HT-7 托卡马克限制器经历了不同的阶段, 在 HT-7 等离子体物理实验中都发挥了阶段性作用。在 2003 年春季实验中, 取得了 63s 长脉冲等离子体放电, 重复性非常好; HT-7 超导托卡马克也成为世界上重要的稳态等离子体运行装置之一。

目前, HT-7 托卡马克主要由内侧环向限制器和两个极向限制器组成, 如图 1 所示。内侧环向限制器主要位于等离子体高场侧, 宽度为 120mm。极向限制器位于装置的正南和正北, 宽度均为 150mm。两者石墨模头厚度都为 15mm。模头材料为 GBST1308 的掺杂石墨, 具有很高的导热性能和良好的抗热轰击能力; 石墨的主要机械和热性质见表 1。所有的石墨材料表面镀 100μm 的

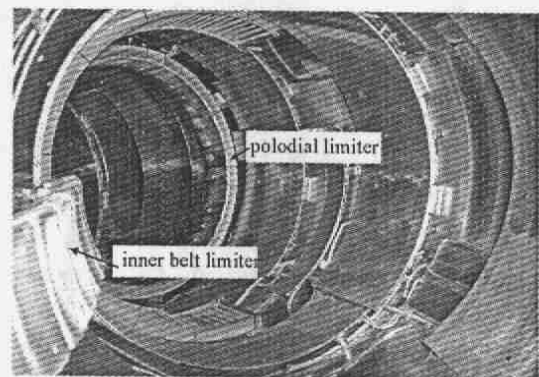


Fig. 1 Photo of HT-7 limiter system

图 1 HT-7 限制器系统

• 收稿日期: 2003-08-22; 修订日期: 2003-11-05

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题(20020433)

作者简介: 胡建生(1973—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事 Tokamak 装置真空及第一壁研究; 合肥 1126 信箱; E-mail: hujs@ipp.ac.cn.

表 1 限制器模头材料石墨的主要机械和热性质
Table 1 Main properties of graphite as material of limiter head

properties	bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	flexual strength /MPa	compressive strength /MPa	tensile strength /MPa	elastic modulus /GPa	thermal conductivity /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	c_p /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
	1.87	37	68	32	10.2	118	1 300

SiC+B₄C膜,能有效地减弱化学溅射和压制表面辐射增强升华^[11]。热沉材料为不锈钢,有效截面为 $\phi 10\text{mm}$ 。水管冷却水压在 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 左右。20根热电偶用于测量石墨模头的温度变化,热电偶采用的是WRKK凯装热电偶(镍铬-镍硅型);热电偶的反应时间为200ms,采集周期为100ms。热电偶的测量点位于离限制器石墨表面3mm处。温度与热电偶电势的关系采用每 100°C 平均线性系数。极向限制器12根热电偶分布如图2所示。

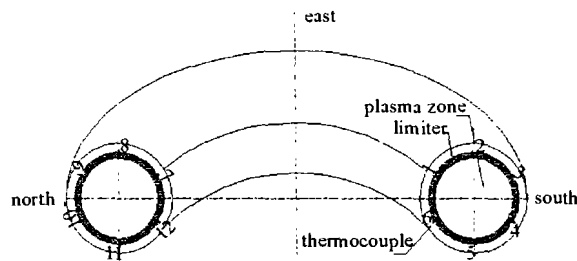


Fig. 2 Thermocouple positions in poloidal limiters
图 2 极向限制器热电偶分布

2 长脉冲等离子体放电限制器温度变化

在 HT-7 装置 2002~2003 年度等离子体物理实验中,取得的长脉冲等离子体放电中,极向限制器局部点的温度上升很大,很多放电局部点超过 $1\ 000^\circ\text{C}$,影响了放电的持续。由于温度采集的限制,最大采集电压为20mV(对应的温度为 630°C),超过 $1\ 000^\circ\text{C}$ 只能从测量仪表上观测。我们着重分析在 HT-7 物理实验中,分别以 56779 和 61578 炮为例,长脉冲长度超过 30s 放电的限制器温度变化情况。

2.1 56779 和 61578 炮两次放电基本参数比较

两次等离子体放电的主要参数如图 3 所示, I_p 表示等离子体电流, V_p 表示环电压, N_p 表示等离子体密度, P_{LHI} 表示低杂波加热功率, I_{OH} , I_{CH} 表示装置内氧和碳杂质的谱线强度。 I_p 分别为 60kA 和 50kA; N_p 分别为 $3 \times 10^{18}/\text{m}^3$ 和 $4 \times 10^{18}/\text{m}^3$;低杂波加热功率分别为 148kW 和 110kW。

2.2 56779 炮限制器温度上升情况

图 4 分别表示 56779 炮等离子体放电极向限制器主要测量点(温度上升较大的点)温度曲线。当等离子体击穿后,极向限制器各测量点温度均开始上升,但上升幅度最大在北限制器下侧(11点)。随着放电的继续,北限制器内下侧(12点)变为温升最快的点,并且以最快的速度上升直到放电结束。类似等离子体放电中,12点温度上升具有相似的行为,但由于放电时间的不同,其在超过采集极限时间长度也不同。平顶时间越长,表明温度上升的幅值越大。其余各测温点温度上升有相似的行为,但上升速度较慢。

2.3 61578 炮限制器温度上升情况

由于对等离子体位移较好控制的原因,在脉冲长度超过 60s 放电的 61578 和 61579 两炮(也是 HT-7 装置最长放电),温度上升具有不同于 56779 炮的行为,最大温度上升为 310°C ,并且南限制器上侧(2点)和北限制器内下侧(12点)温度上升相互交替,如图 5 所示。从图 5 可以得到:除了 2 和 12 点外,所有测温点温度上升都接近线性,其中南限制器外上侧(3点),南限制器下侧(5点)和北限制器下侧温度(11点)峰值基本相同,而其它点温度上升幅度小,但也有区别;2 和 12 测温点温度上升具有互补性,当 2 点温度快速上升时,12 点温度几乎没有变化,而当 2 点温度结束快速上升并开始下降时,12 点温度开始快速上升,并且在等离子体放电结束前 20s 这两个通道温度均上升,只是速度有所不同;最大温升点在 2 点,最终温度为 310°C ,远低于多数长脉冲等离子体放电极向限制器最高温升。

2.4 放电结束后限制器表面冷却

当等离子体熄灭后,限制器各测温点温度上升均停止;各测温点温度下降速度同温度和测量点有关,在 56779 炮中,冷却速度最慢的是南限制器上侧,而在 61578 炮中,冷却速度最慢的是北限制器内下侧;一般地,温度越高,冷却速度越快。

2.5 内侧环向限制器的温度变化

从长脉冲的大量数据可以看到在内侧环形限制器温度上升非常小,比如在 61578 炮等离子体放电中,4 个

测温点温度都只上升了 6°C 左右, 远远小于极向限制器表面温升。

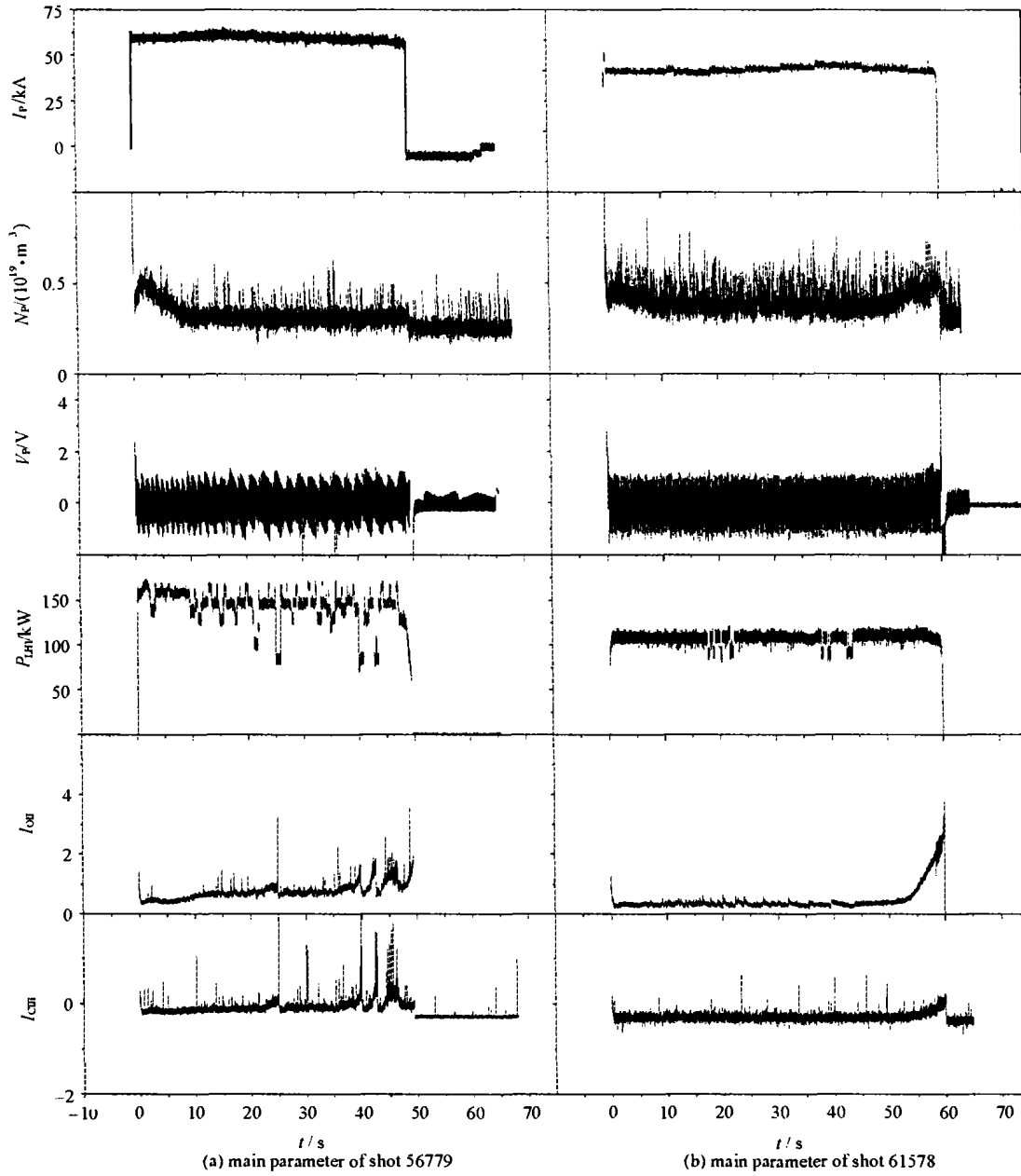


Fig. 3 Main parameters of 56779 and 61578 shot plasma discharges

图 3 56779 和 61578 两炮等离子体放电主要参数

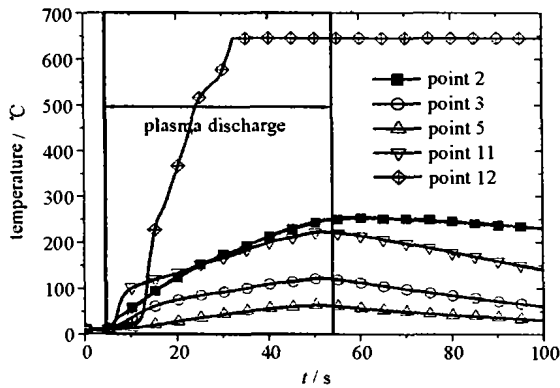


Fig. 4 Temperature curves in poloidal limiter for shot 56779

图 4 56779 炮极向限制器各测温点温度变化曲线

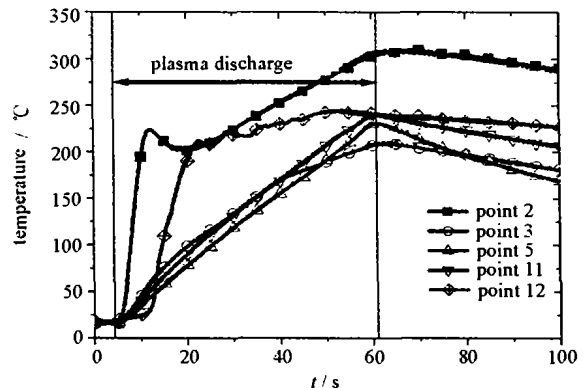


Fig. 5 Temperature curves in poloidal limiter for shot 61578

图 5 61578 炮极向限制器各测温点温度变化曲线

3 沉积在限制器表面能量的能流密度

计算沉积在限制器表面的等离子体轰击能流密度,可以知道等离子体同限制器相互作用强度及位置,为更有效地控制等离子体位形提供必要的参考,也为以后限制器改进和新限制器设计提供理论根据。限制器是由石墨模头及带水冷热沉组成,能量的输运包括它们之间的热交换以及向周围的热辐射。为了简化系统的计算,采用单一材料的无限大平面模型来计算,采用测量点的温度信号反演计算其受等离子体轰击的石墨表面总的能流,即等离子体轰击能流及冷却能流之和,即认为所有热交换和热辐射都在限制器表面集中反映,计算过程简化如下^[5,6,13]。

瞬时面热源温度分布函数为

$$T(x,t) = \frac{Q}{\rho c_v} \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) \quad (1)$$

连续作用的面热源温度分布函数为

$$T(x,t) = \frac{1}{\rho c_v} \int_0^t \frac{q(t)}{\sqrt{4\pi\alpha t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) dt \quad (2)$$

式中: ρ, c_v, α 分别表示材料的密度、比定容热容、传热系数,其中与 $\alpha=k/\rho C$ 。 Q 表示瞬时热流密度, $q(t)$ 表示随时间变化的连续面热源能流密度; $T(x,t)$ 表示在面热源距离为 x ,时间为 t 的温度曲线。

计算中, $T(x,t)$ 采用热电偶采集的 $x=3\text{mm}$ 处温度曲线,石墨材料的 ρ, c_v 分别为 $1.87 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, $1300 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;热导率 k 为 $118 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,计算得到 α 为 $4.85 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$,则得到以下几种情况下的能流密度值。

3.1 56779 炮等离子体放电限制器表面能流计算

首先计算 56779 炮等离子体放电中南限制器上侧和北限制器内下侧(2 和 12 测温点)对应的限制器表面在前 30s 放电中总的能流变化,如图 6 所示。在 12 点对应的限制器表面能流密度的变化为:在建立等离子体后 5s 内,接收的能流比较小,只有 $100 \text{kW}/\text{m}^2$;随后受到超过 $10 \text{MW}/\text{m}^2$ 等离子体大能流的快速轰击,温度急剧上升;并且在放电整个过程中受到持续大能流的轰击(多次接近 $10 \text{MW}/\text{m}^2$,最小能流密度 $2 \text{MW}/\text{m}^2$),导致其温度上升幅度很大,在等离子体放电进行到 30s 时测量点温度上升到 630°C ,超过温度采集范围。而在 2 点对应的限制器表面能流密度始终在 $1 \sim 2 \text{MW}/\text{m}^2$ 范围内,在等离子体放电进行到 30s 时测量点温度只是上升到 150°C ,并且在放电结束时温度为 250°C 。

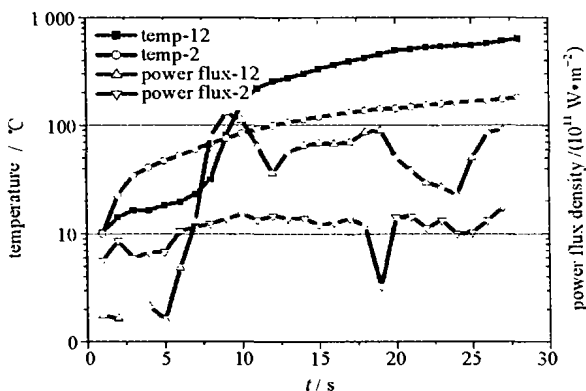


Fig. 6 Temperature and deposited power flux density at 2 and 12 points for shot 56779

图 6 56779 炮 2 和 12 点温度及能流密度曲线

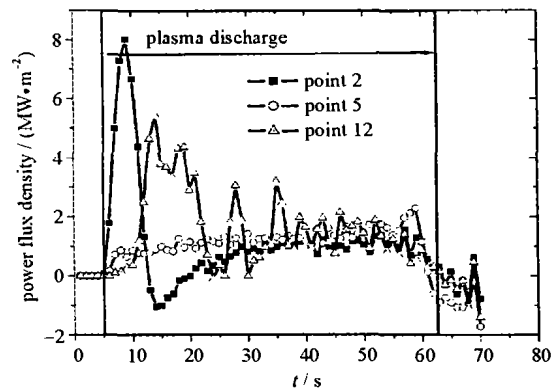


Fig. 7 Deposited power flux density at 2, 5 and 12 points for shot 61578

图 7 61578 炮 2,5 和 12 点能流密度曲线

3.2 61578 炮等离子体放电限制器表面能流计算

61578 炮等离子体放电中 2,5 和 12 测温点对应的限制器表面在放电中总的能流变化,如图 7 所示。2 和 12 点是温度上升最快并且直接影响等离子体放电的关键点。5 点温度上升曲线代表了多数测温点的温度变化趋势。对于 2 点:在放电开始后接受的总能流逐渐增加,并在 1s 时,接受的总能流密度达到最大值,为 $8 \text{MW}/\text{m}^2$;随后温度上升被抑制,总能流密度为负值,基本上只有冷却能流;放电终止前,总的能流密度不超过 $1 \text{MW}/\text{m}^2$ 。12 点能流变化与 2 点具有一定的互补性:当 2 点接收的总能流密度下降时,11 点接收的总能流增加,并在 2 点接收的总能流为负的极大值时接收的总能流为最大 $6.5 \text{MW}/\text{m}^2$ 。12 点接收的总能流在整个等离子体

放电中多次振荡,反应了等离子体位形变化;并在放电结束前 20s 时间范围内达到稳定,此时能流密度同其它测量点能流密度接近,为 $1.5\text{MW}/\text{m}^2$ 。而以 5 点为代表的其它各测量点接收的总能流在 $1\text{MW}/\text{m}^2$ 左右,其温度上升幅度也不大。

3.3 冷却能流的计算

在等离子体放电结束后,温度下降反应了冷却的水平。通过将所有冷却形式归一到限制器表面冷却,利用公式(2)则得到各点冷却能流基本上是 $2\text{MW}/\text{m}^2$ 以下;不同点冷却有差别,但不是很大。冷却效率与温度及水冷结构有关。

4 总结与展望

当限制器受到等离子体高能轰击时,温度急剧上升。很多长脉冲放电中,限制器局部点沉积超过 $10\text{MW}/\text{m}^2$ 等离子体能流轰击,温度在很短的时间内快速上升,影响了等离子放电的继续。

大多数长脉冲放电中限制器温度上升最大的点是在 12 点,温度上升都超过测量范围(即超过 630°C),线性上升幅度较大的依次为 2, 11, 5, 7 点等,限制器温度变化具有一定的规律性。而在 61578 炮放电中,限制器接受的最大能流都低于 $8\text{MW}/\text{m}^2$,并且持续的时间也很短,同时由于两点接受的等离子体轰击能流具有互补的特点,虽然其放电脉冲时间长于其它放电,但限制器温度上升的幅度不大,到等离子体放电结束时温度只是上升到 310°C ,远低于石墨大量产生杂质的温度。在内侧环形限制器各测温点温度上升幅度比较小(温度在 $10\sim 30^\circ\text{C}$ 度区间),计算得到在内侧环向限制器平均能流密度为 $1.65\times 10^4\text{W}/\text{m}^2$,总的热功率为 10.3kW ,远远低于沉积在极向限制器上的功率。这种限制器受等离子体轰击的不均匀可以通过等离子体位移的控制有效抑制;也可以通过对装置各种位置关系的重新校准,使得等离子体能量在整个限制器系统分布比较均匀。

归一到限制器表面冷却能流基本上是在 $2\text{MW}/\text{m}^2$ 以下;在受等离子体强烈轰击的部位,不能满足冷却的需要。

新的限制器正在研究和设计中,将在装置内真空室上下位置安装两个环向平面限制器。热沉材料选择铬青铜,其热导系数明显高于不锈钢材料;石墨模头与铬青铜热沉间将采用直接焊接的方式,改善热交换;水冷结构仍然采用热沉上直接开水槽的方式,但是水流通径为 $\phi 30\text{mm}$,比现有限制器水冷截面增加了 9 倍。新的石墨材料也在不断研制,性能逐步提升,在下一轮实验中我们将会采用更高热导的新石墨材料,提高能量在石墨模头的快速扩散和输运。

参考文献:

- [1] 朱士尧. 核聚变原理[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1992. (Zhu S Y. Principle of nuclear fusion. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1992)
- [2] Federici G, Skinner C H, Brooks J N, et al. Plasma-material interactions in current Tokamaks and their implications for next step fusion reactors[J]. *Nuclear Fusion*, 2001, 41 (12): 1967—2137.
- [3] 徐伟,万宝年,李建刚,等. HT-6M 托卡马克限制器前 $\text{H}\alpha$ 谱线型分布的测量[J]. 强激光与粒子束,1997,9(3):413—417. (Xu W, Wan B N, Li J G, et al. Measurement of distribution of $\text{H}\alpha$ spectral lineshape in the front of the limiter in HT-6M Tokamak. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997,9(3): 413—417)
- [4] Finken K H, Watkins J G, McGrath R T, et al. Thermographic and power deposition measurements on ALT-II blades[J]. *J Nucl Mater*, 1989, (162—164):655—660.
- [5] D-III Physics Group, Hino T, DeGrassie J, et al. Heat flux to the limiter during disruptions and neutral beam injection in Doublet-III[J]. *J Nucl Mater*, 1984, (121): 337—343.
- [6] Wada M, Tanabe T, Philipps V. High-heat-flux-exposure-experiments of a tungsten-test-limiter at TEXTOR-94[J]. *J Nucl Mater*, 1998, (258—263): 853—857.
- [7] Sonnenberg K, Deksnis E, Shaw R, et al. Jet pump limiter[J]. *J Nucl Mater*, 1989, (162—164): 674—679.
- [8] Nygren R, Koski J, Lutz T, et al. Steady-state heat and particle removal with the actively cooled phase III outboard pump limiter in Tore Supra[J]. *J Nucl Mater*, 1995, (220—222): 526—530.
- [9] Garin P. Actively cooled plasma facing components in Tore Supra[J]. *Fusion Engineering and Design*. 2001, (56—57): 117—123.
- [10] Cordier J J. Tore Supra experience on actively cooled high heat flux components[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2002, (61—62): 117—71—78.
- [11] 胡建生,李建刚,曾敏,等. HT-7U 爆材料在 HT-7 超地托卡马克中的先行实验[J]. 真空科学与技术,2001,21(3):245—249. (Hu J S, Li J G, Zeng M, et al. Study of HT-7U graphite in HT-7 superconducting Tokamak. *Vacuum Science and Technology*, 2001, 21(3):

245—249)

- [12] Li J, Zhao Y P, Wan B N, et al. Impurity generation and suppression during IBW heating in HT-7[J]. *J Nucl Mater*, 2003, (313—316): 1188.
- [13] 扬强生, 浦保容. 高等传热学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2001. (Yang Q S, Pu B G. *Advanced convective heat transfer*. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2001)

Temperature change and power deposition analysis of HT-7 Tokamak limiter during long pulse plasma discharge

HU Jian-sheng, ZHANG Xiao-dong, LI Jian-gang, HE Shi-ying,

LUO Nan-chang, YAO Da-mao, CHEN Jun-lin,

(*Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1126, Hefei 230031, China*)

Abstract: It is important to calculate the temperature change and heat flux in the surface of the limiter in HT-7 for analyzing the influence of its function on the plasma during long pulse discharge. In this paper, the heating flux density was calculated by the curve of temperature at 3mm from limiter surface. for many long pulse shots, temperature at a few local points was over 1000°C, and deposited power flux density exceeded 10MW/m². But by effectively controlling plasma position, temperature dispersal was more uniform and plasma discharge was easily sustained. The influence of limiter materials and construction on the temperature change of limiter surface was discussed; in-time cooling power of water was analyzed.

Key words: Log pulse plasma discharge; Limiter; Heating impact; Flux density