

边界局域模对 EAST 钨偏滤器靶板腐蚀程度的数值模拟研究*

黄艳¹⁾²⁾ 孙继忠¹⁾ 桑超峰¹⁾ 丁芳³⁾ 王德真^{1)†}

1)(大连理工大学, 物理与光电工程学院, 大连 116024)

2)(大连工业大学, 信息科学与工程学院, 大连 116034)

3)(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

(2013年8月15日收到; 2013年10月8日收到修改稿)

在高约束模式下发生的边界局域模会释放高能量等离子体, 其中主要部分会辐照到面积相对较小的偏滤器靶板, 偏滤器钨靶板发生热腐蚀的可能性最大. 本文建立了包括了熔化、汽化和热辐射效应的一维热传导模型, 采用数值模拟的方法, 研究了 EAST 未来偏滤器钨靶板在边界局域模作用下的热腐蚀程度. 根据现有的边界局域模热流数据和多种未来可能的高能量边界局域模热流数据, 计算了钨靶板的表面温度分布. 结果显示当前的第一类边界局域模作用在钨靶板上, 在高约束模式运行时间取 32 s 情况下, 靶板表面温度从 350 K 增加到 373 K, 表明在当前的参数范围内, 只要避免其他更严重的瞬时事件如破裂的发生, 边界局域模还不会带来严重的威胁; 如果边界局域模的能量增加到接近未来托卡马克边界局域模的能量范围 1 MJ/m^2 , 沉积时间为 600 μs , 表面最大熔化厚度将达到 6.8—6.9 μm .

关键词: 托卡马克, 边界局域模, 钨, 熔化

PACS: 52.55.Fa, 52.55.Rk, 52.40.Hf

DOI: 10.7498/aps.63.035204

1 引言

伴随着边界局域模(edge localized modes, ELMs)的高约束模式(high confinement mode, H-mode)被认为是在未来的聚变装置 ITER 中首要参考的运行方式^[1]. 但是发生 ELMs 时, 会有高能量的等离子体从中心区域进入刮削层打到靶板, 与器壁发生相互作用, 造成器壁的腐蚀. 这种作用不仅会缩短偏滤器靶板的寿命, 而且侵蚀产生的杂质粒子可能会输运至芯部, 影响等离子体的约束性质、宏观稳定性等^[2], 同时造成中心等离子体污染, 甚至导致聚变装置运行失败. 由于 ELMs 的存在, 对器壁材料的选择、器壁表面的结构设计提出了极大的挑战^[3].

针对等离子体与器壁相互作用, 为给 ITER 器壁的设计提供安全可靠的依据, 各国在托卡马克装置上做了大量的实验研究. EAST 是我国自行设计研制的, 与 ITER 结构类似的国际首个全超导托卡马克装置. 2006 年以来, 在面向等离子体碳壁条件下, EAST 取得了举世瞩目的成绩^[4]. 尽管碳壁有抗热冲击强, 导热好等优点, 但碳材料有腐蚀额高和氦滞留严重等致命问题; 相比之下, 钨具有热性能好, 腐蚀额低, 氦滞留少等优点, 因此钨成为未来托卡马克像 ITER 的首选器壁材料; ITER 急需钨材料作为面向等离子体壁的全超导托卡马克装置的运行经验与数据. 从 2012 年起 EAST 逐步把面向等离子体碳壁更换为金属钨. 在第一阶段 EAST 计划把上偏滤器碳靶板改为钨材料. 但作为重金

* 国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划专项 (批准号: 2013GB109001, 2013GB107003)、国家自然科学基金 (批准号: 11275042, 11205198) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: DUT13ZD102, DUT12RC(3)53) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangdez@dlut.edu.cn

属, 芯等离子体对钨杂质的容忍度非常低, 要求其含量必须在 10^{-5} 以下. 当强大等离子体能量作用到钨壁时, 钨材料可能发生熔化, 甚至汽化等现象, 不但缩短了器壁的使用寿命, 同时从上偏滤器溅射下来的钨尘将会严重威胁等离子体运行.

Gao 等利用红外相机测量偏滤器靶板表面温度, 再通过数值方法得到沉积到靶板表面的热流 [5]. Hassanein 等计算了 ELMs 取某一特征参数时偏滤器靶板的热腐蚀情况 [6-8]. Federici 等假设 ELMs 能流密度按三角波分布, 讨论了不同 ELMs 参数对不同靶板材料的影响 [9]. 根据当前实验测量结果, ELMs 能流密度更接近为高斯分布. 由于固体向液体的转化是个瞬间过程, 同文献 [9] 相比本文对固体液体交界面的处理采用了更为合理的方法.

本文将采用数值模拟的方法, 结合实验数据, 研究了 EAST 的偏滤器钨靶板在 ELMs 作用下的热腐蚀程度. 由于到目前为止, EAST 还没有以钨作为靶板材料的高能量运行模式的数据, 因此本文首先采用以碳作为偏滤器靶板取得的 ELMs 数据作为出发点, 然后进一步讨论将来试验中因为采用钨壁材料可能会遇到的问题.

2 计算模型

ELMs 出现时, 打击到偏滤器靶板的能流密度是不均匀的, 打击点附近的能流密度最高. 如果能流密度最高值出现的位置热腐蚀程度较小, 那么其他地方的热腐蚀就可以忽略, 这样可以认为钨靶板材料在此能流下是安全的. 为直观地分析热流对钨靶板的影响, 本工作将偏滤器靶板简化为一个平板, 等离子体热流垂直作用在靶板表面上, 靶板的背面为冷却源, 向下为 z 轴的正方向, 如图 1 所示.

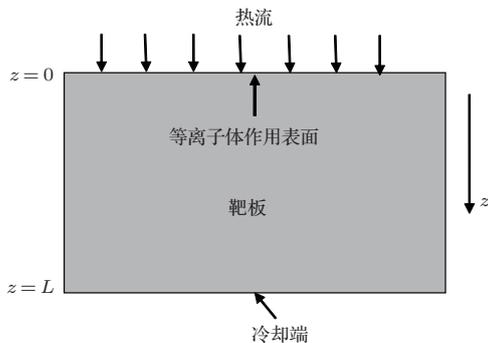


图 1 靶板模型示意图

这样可以用一维热传导方程来描述能流入射到靶板上时引起靶板的温度分布变化:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C v \frac{\partial T}{\partial z'} = \frac{\partial}{\partial z'} \left(k \frac{\partial T}{\partial z'} \right) + Q, \quad (1)$$

式中的 v , T , ρ , C 和 k 分别表示表面汽化的速度, 表面温度, 钨的密度、比热和热传导系数, Q 是体能量沉积项. 本模型考虑了熔化、汽化和热辐射效应. 当器壁发生汽化时, 表面的位置不断发生变化, 模型中引进了运动坐标

$$z' = z + \int_0^t v dt. \quad (2)$$

为了描述瞬间热流入射导致靶板表面的温度变化, 在靶板表面 ($z' = 0$), 采用如下的边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\text{surf}} = F(t) - \rho v L_v - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{FW}}^4). \quad (3)$$

方程 (3) 中温度梯度为靶板表面的温度梯度, 等式右端第一项 $F(t)$ 是入射到靶板表面的热通量, 第二项是汽化损失的能量, 第三项是热辐射损失的能量, L_v 为汽化潜热, T_s 表示靶板表面的温度, T_{FW} 表示靶板冷却部分的温度, 表面汽化速度和汽化过程使用了文献 [10] 中的方法.

在液体与固体交界面, 使用经典的斯蒂芬边界条件 [11]:

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial z} = \rho V_m L_m, \quad (4)$$

下脚标 s, l 分别代表固体和液体, V_m, L_m 为熔化层前端的熔化速度和溶解潜热. 当很高的能量瞬时沉积在偏滤器靶板上, 导致材料可能发生相变. 为了更加准确的预测材料的腐蚀额, 在计算过程中, 边界的位置是随着时间变化的, 材料的热物理性质也是随温度改变的, 热传导系数采用 $k = \frac{1}{aT + b}$ 表达形式 [12], 对于钨材料 $a = 1.70 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{W}^{-1}$, $b = 6.41 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ [13]. 靶板背面 ($z = L$) 边界条件取冷却温度为 350 K. 方程 (1) 及边界条件 (3), (4) 使用隐式差分方法进行数值求解, 其中 $dt = 10^{-6} \text{ s}$ 远小于 ELM 持续时间, 因此能够保证准确的描述 ELM 期间靶板的温度变化.

3 模拟结果

为了验证理论模型, 我们首先检验理论模拟是否可再现实验结果 [14]. 在文献 [14] 中 Yuan 等使用能流密度为 $23 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的能流辐照厚度为 3 mm 的钨靶 1.5 s, 热辐射是钨靶的主要冷却过程, 靶板

温度的演化利用红外摄像实时测量. 图2为实验和本模型模拟所得的钨靶表面温度随时间变化的对照图, 研究发现当能流沉积时间为1.5 s时钨靶发生熔化, 之后由于能量照射停止, 温度开始下降. 模拟所得结果与实验结果符合很好. 此外, 把差分步长加大50%, 我们得到了几乎一样的结果.

应用此模型, 研究EAST的ELMs对钨偏滤器靶板的损害程度. 本工作主要研究热负荷对钨壁的侵蚀, 其他的腐蚀机理, 比如物理溅射, 裂纹等效应不在本文的讨论之内. 在入射粒子能量比较低情况下, 钨靶的物理溅射可以忽略. 发生ELMs时, 等离子体能量沉积深度很浅(通过TRIM计算, 不到半个空间间隔, 空间间隔 $dx = 4 \times 10^{-7}$ m), 可以看成表面热源^[10]. 具体模拟过程如下: 先根据给定的钨靶厚度, 算出稳态运行下的钨靶温度分布作为初始分布, 然后计算第一个ELM能流入射后材料的温度分布, 第二个ELM后靶板的温度变化, 直到稳定或对应的放电结束. 期间要时刻监视靶板是否熔化或汽化. 如果靶板厚度在第一个ELM之后会有所改变, 温度分布会变化, 在这个新的温度分布下, 再算稳态和第二个ELM来之后, 材料表面的温度, 以此类推.

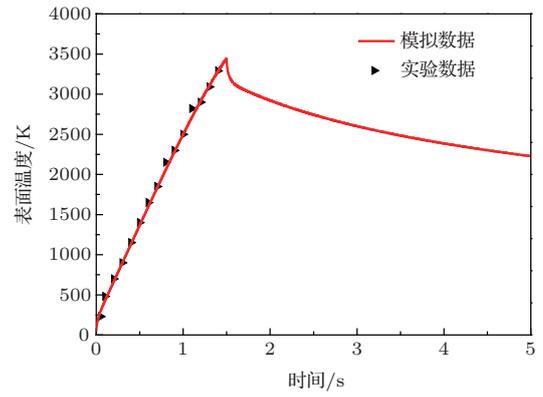


图2 钨靶表面温度随时间变化的理论值和实验值对比 (能流密度为 $23 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, 能流沉积时间为 1.5 s)

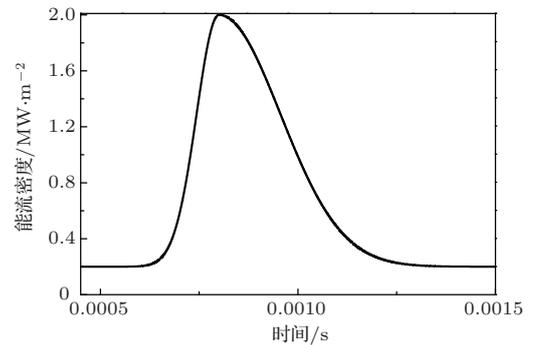


图3 峰值为 $2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, 能流密度随时间变化曲线

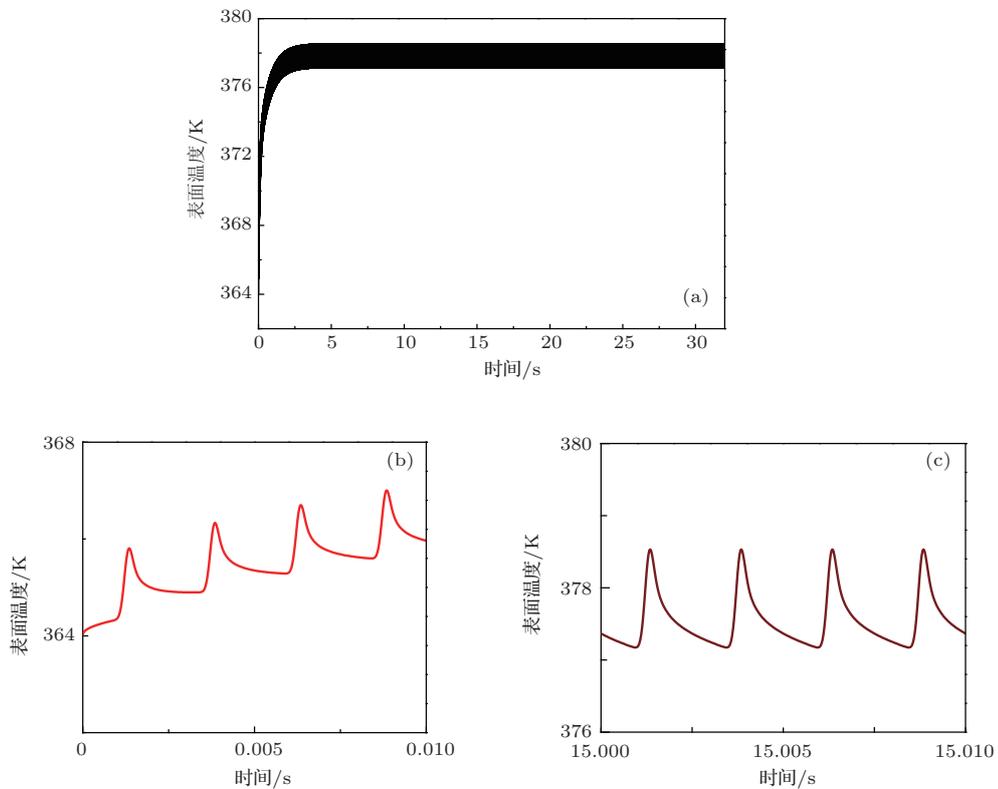


图4 (a) 能流密度峰值为 $2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, ELMs 间隙间入射到靶板能流密度为 $0.2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, 放电时间为 32 s, 靶板表面温度分布曲线; (b) 0—0.01 s 内温度分布; (c) 15.00—15.01 s 内温度分布

3.1 低加热功率下的ELMs

在2010年实验中,在实现的H-mode运行条件下,主要发生的是第三类ELMs,产生的ELMs能流密度平均峰值为 $2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,频率范围在几百赫兹之间^[1].首先模拟这种类型的ELMs作用在钨偏滤器靶板上,钨靶的温度变化.具体条件如下:假设第三类ELMs的参数相同,即峰值相同,周期相同.峰值在 $2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,每一个ELM的沉积时间为 $600 \mu\text{s}$ (能流密度大于 $0.23 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的时间),频率取为 400 Hz ,ELMs间隙打到靶板的能量取 $0.2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[1],如图3所示.根据EAST实验,H-mode可重复的最长运行时间为 32 s ^[15],靶板厚度取 1 cm ,初始温度取 350 K .

靶表面温度随时间演化如图4所示.当前几个ELMs后,靶板表面温度开始上升,1000多个ELMs(约为 3 s)之后,靶板表面温度趋于稳定,温度约在 377 K 和 379 K 之间变化.由图可以看出,温度分布是振荡的,ELMs峰值时刻,温度最高(约 379 K),ELMs结束之后,温度迅速降低到约 377 K .但是器壁温度始终没有达到熔点,温度最高增加 29 K ,表明在此热流负荷下,不会存在器壁的热腐蚀.

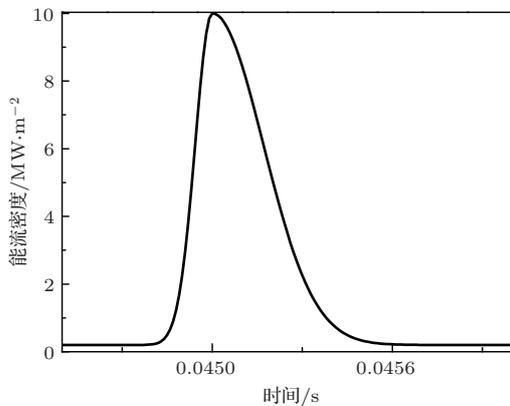


图5 峰值为 $10 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,能流密度随时间变化曲线

在2012年EAST的实验中^[15],出现了第一类ELMs,打击到靶板的能流密度峰值大约为 $10 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,频率在 $10\text{--}20 \text{ Hz}$.计算过程中,能流密度的幅值和频率的取值与实验保持一致,幅值为 $10 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,频率为 10 Hz ,持续时间为 $600 \mu\text{s}$ (能流密度大于 $0.37 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的持续时间),如图5所示.H-mode的运行时间依然取 32 s ,钨靶表面的温度分布如图6所示.可以看出,发生ELMs时,靶板温度开始上升,时间到达 3 s 左右时,靶板温度基本

达到稳定状态,最高温度保持在 373 K 左右,最低温度下降到 365 K 附近,靶板的最高温度不会随着运行时间的增长而增加.因此在现有的实验条件下,如果用钨取代碳,靶板材料并不会产生热损失,可以说是安全的.

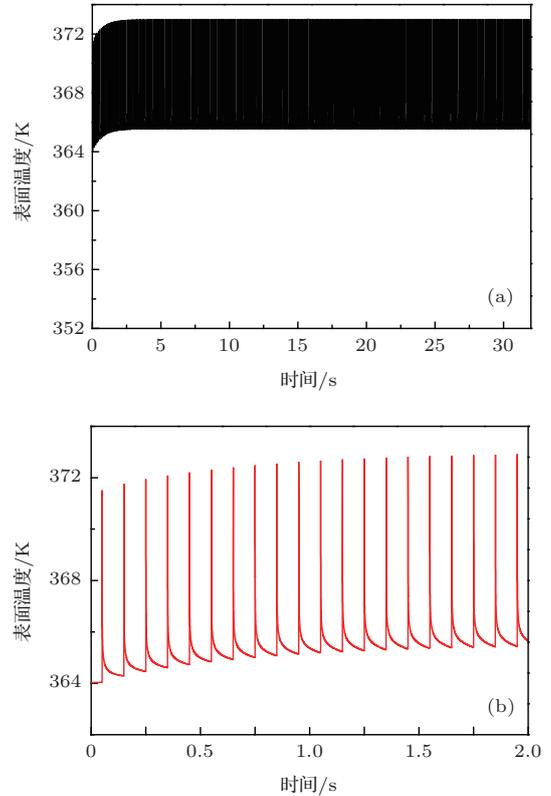


图6 (a) 能流密度峰值为 $10 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,ELMs间隙间打到靶板能流密度为 $0.2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,放电时间为 32 s ,钨靶表面温度分布曲线;(b) $0\text{--}2.0 \text{ s}$ 内温度随时间变化关系曲线

比较第三类ELMs和第一类ELMs(图4和图6),能流密度的峰值分别为 $2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $10 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,两种模式ELMs间隙间入射到靶板的能流密度都是 $0.2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$.ELMs间隙间,发生第三类ELMs时,钨靶表面温度(约 377 K)要高于发生第一类ELMs时表面温度(约 365 K).虽然第一类ELMs打到靶板的能流密度大,但是频率远小于第三类ELMs.第一类ELMs平均单位时间内沉积的能量为 0.23 MJ ,而第三类ELMs平均单位时间内沉积的能量为 0.39 MJ .这表明ELMs间隙间靶板表面的温度不仅与此时打到靶板的能流密度有关,还与ELMs的频率有关.发生ELMs过程中,第一类ELMs使靶板表面温度从 365 K 增加到约 373 K ,增加了不到 8 K ;而发生第三类ELMs时,靶板表面温度从 377 K 增加到约 379 K ,增加值却是不到 2 K .这表明发生ELMs过程中,温度增加的幅值主

要是由发生ELMs时打到靶上的能流密度决定. 根据图4和图6, 两种情况都是ELMs之后温度很快下降, 不过时间上略有不同, 第三类ELMs在不到2 ms的时间内温度回到最低温度; 而第一类ELMs在不到100 ms的时间里, 温度回到最低温度, 说明温度下降的时间与ELMs的频率是相关的, 频率越大, 下降的速度越快, 所用时间越短. 从计算结果可以看出, 一个ELM之后, 温度虽然很快下降, 但是下降的幅度不同. 没有到达稳定状态时, 温度不会下降到初始值, 会比初始值略高, 而且再次发生ELMs时, 靶板表面温度会继续上升; 而到达稳定状态时, ELMs之后温度都会下降到初始值, 而且再次发生ELMs时, 温度几乎升高到同一个值, 如图4和图6所示. 温度一直在最高值和最低值之间变化, 所以即使是运行时间很长, 靶表面温度也不会再继续上升, 不会达到熔点, 钨靶的厚度不会发生变化. 综上所述, 钨靶表面的温度不仅与ELMs的能流密度值有关, 而且与ELMs的频率有关. 对于第三类ELMs, 虽然频率较大, 但是能流密度很低, 靶板温度上升不多; 而现有的第一类ELMs, 虽然打到靶板的能流密度大大提高了, 但是频率较低, 所以靶板温度也远没有达到熔点.

在以上计算过程中, 假设所有ELMs均具有相同的波形, 相同的幅值、相同的沉积时间, 即取了一种时间平均值. 但在实际过程中, 入射到靶板的能流密度不一定是均匀分布, 可能存在高密度的辐照点. 取一种极端情况, 由文献[1]可知, ELMs的最大峰值是平均峰值的2—10倍, 如果发生第一类ELMs时打到靶板的能流密度可达100 MW·m⁻²,

通过计算, 靶板表面温度达到稳定分布时, 最高温度约为460 K, 也远远小于熔点. 所以在目前EAST的加热功率下, 即使存在高能流密度的辐照点, 也不会引起靶板材料额外的热损失.

3.2 高加热功率下的ELMs

伴随第一类ELMs的H-mode是未来聚变装置的重要运行方式. 第一类ELMs的一个典型特征是随着加热功率的增加, 其频率增加. ASDEX-U和DIII-D的实验显示第一类ELMs导致的等离子体能量损失比率近似常量^[16]. 随着EAST装置的升级, 加热能力迅速提升, 约束等离子体参数会随之快速提高, 其运行方式也会以第一类ELMs为主, 届时打到靶板的能流密度会越来越大, 对偏滤器靶板, 特别是外偏滤器靶板的威胁越来越大, 值得做一些理论预测.

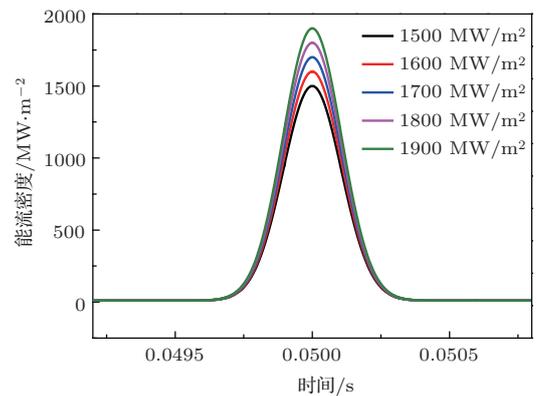


图7 峰值分别为1500, 1600, 1700, 1800, 1900 MW·m⁻², 能流密度随时间变化曲线

表1 ELMs峰值分别为1500, 1600, 1700, 1800, 1900 MW·m⁻², ELMs间隙间能流密度分别为20, 10, 5, 0 MW·m⁻²时, 靶板表面温度的最大值. 这些结果是在熔化层没有发生流动和溅射的假设下得到的

能流密度峰值/ MW·m ⁻²	靶板表面最高温度/K			
	ELMs 间隙	ELMs 间隙	ELMs 间隙	ELMs 间隙
	间能流密度/ 20 MW·m ⁻²	间能流密度/ 10 MW·m ⁻²	间能流密度/ 5 MW·m ⁻²	间能流密度/ MW·m ⁻²
1500	约 3757	约 3197	约 2710	约 2249
1600	约 3790	约 3318	约 2827	约 2361
1700	约 3805	约 3440	约 2944	约 2474
1800	约 3845	约 3563	约 3062	约 2588
1900	约 3871	约 3686	约 3182	约 2702

未来托卡马克装置(ITER)发生ELMs时打到偏滤器靶板的能量预期为1—3 MJ·m⁻², 沉积时间为0.1—1 ms, 即ELMs时能流密度峰值能达到1000—30000 MW·m⁻², 在稳态运行时打到靶板的能流密度预期为5—20 MW·m⁻²[17]. ELMs间隙间打到靶板的能流密度如果为10 MW·m⁻², 本文分别计算了峰值为1500, 1600, 1700, 1800和1900 MW·m⁻², 按高斯分布的ELMs(如图7所示. 根据实验数据, 虽然ELMs的上升沿时间比下降沿短, 但是与高斯分布很接近, 本文对于未来托卡马克的能流分布规律均采用高斯分布)作用在偏滤器靶板上, 在持续时间为600 μs, 频率为10 Hz, H-mode运行时间为5 s条件下, 靶板表面的温度分布. 表1给出了靶板表面的最高温度, 从结果可以看出, ELMs能流密度峰值越大, 表面温度越高, 分别约为3179 K, 3318 K, 3440 K, 3563 K和3686 K. 图8给出了能流密度峰值为1900 MW·m⁻², ELMs间隙间能流密度为10 MW·m⁻²时, 钨靶表面温度分布. 温度依然随时间发生振荡变化, ELMs间隙间靶板表面温度迅速降低, ELMs过程中表面温度升高, 大约经过3 s的时间, 靶板表面的温度达到稳定值, 约等于熔点(3683 K), 此时每个ELM之后靶板表面温度都会下降到最低值, 下一个ELM来临时靶板表面温度再次升高到熔点附近, 靶板表面的最高温度始终是接近熔点.

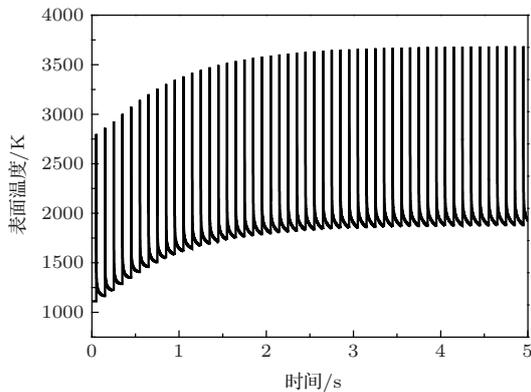


图8 能流密度峰值为1900 MW·m⁻²时, 钨靶表面温度随时间变化曲线

本文还计算了ELMs间隙间能流密度分别为0, 5和20 MW·m⁻², 其他参数不变, 靶板表面的温度分布, 靶板表面的最高温度如表1所示. 从表1可以看出ELMs间隙间打到靶板表面的能流密度对靶板表面温度影响很大, 对于ELMs能流密度峰值为1900 MW·m⁻²情况, 如果打到靶板的ELMs间隙间能流密度为20 MW·m⁻², 靶板表面

的最高温度约为3871 K, 靶板熔化了一定厚度; 如果为10 MW·m⁻², 靶板表面的最高温度约为3686 K, 靶板表面开始熔化; 如果间隙间打到靶板能流密度为5 MW·m⁻², 靶板表面的最大温度约为3182 K, 小于熔点; 而如果ELMs间隙间打到靶板的能流密度为0 MW·m⁻², 这是一种理想的情况, 靶板表面的最大温度只有约2702 K. 这些结果全部是在熔化层没有发生流动和溅射的假设下得到的, 如果考虑了液体层的流动和溅射, 靶面的温度会有小范围的变动.

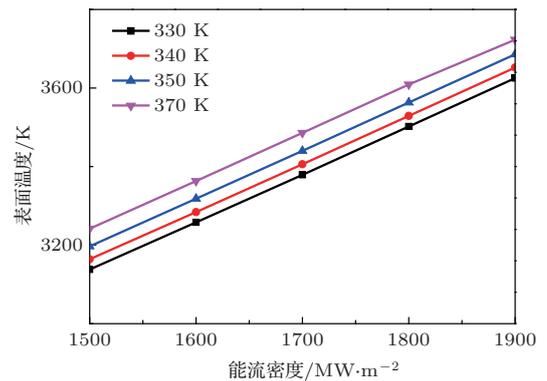


图9 冷却端温度分别为330 K, 340 K, 350 K和370 K, 能流密度峰值分别为1500, 1600, 1700, 1800和1900 MW·m⁻²时, 靶板表面的最高温度

过高的靶面温度是工程上不允许的, 必须降低靶面温度. 图9给出了ELMs能流密度峰值分别为1500, 1600, 1700, 1800和1900 MW·m⁻², ELMs间隙间能流密度为10 MW·m⁻², 频率为10 Hz, 冷却端温度分别为330 K, 340 K, 350 K和370 K, H-mode运行5 s时, 靶板表面的最大温度分布曲线. 从图9中可以看出, 冷却端温度越低, 沉积在靶板的热量越容易传出, 靶板表面温度越低. 所以为了实现托卡马克的平稳运行, 关键是将传递到靶板冷却端的热流带走, 使冷却端保持低温状态, 但是现在实验上还不能将沉积在冷却端的热流全部带走, 这样靶板表面将会因为冷却效率不够高而温度升高, 进一步加剧靶板的熔化. 所以要想降低偏滤器靶板表面温度, 关键要控制到达偏滤器靶板的能量. 这样除了物理上更好控制ELMs外, 只能采取物理手段例如外部采用共振磁场扰动[18], 或喷入弹丸等方法减轻ELMs[19], 从而降低靶板表面温度.

本研究同时评估了持续时间为600 μs(能流密度峰值大于121 MW·m⁻²的沉积时间), 数值为1 MJ·m⁻²高斯分布的能量(能量上升和下降的时

间各为 300 μs), 间隙间打到靶板的能流密度为 10 $\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的 ELMs 作用在靶板上, 靶板表面的温度分布情况, 如图 10 所示. 从图 10 可以看出, 发生 ELMs 时, 表面温度迅速升高, 经过 0.3 ms 表面温度就已经超过了熔点, 表面熔化, 之后表面温度继续增加, 当汽化和热辐射损失的能量等于入射到靶板表面的能量时, 靶板表面温度达到最高 (3865 K 左右). 由于此时表面温度导致的汽化深度很小, 图中没有给出. 如果不考虑熔化层损失, 大约在 0.5 ms 时, 熔化的厚度达到最大值, 大约为 6.8—6.9 μm , 然后熔化层厚度减少, 开始固化. 而实际上由于在偏滤器靶板的不同位置, 沉积的能量不同, 沿着偏滤器靶板各点表面温度将不同, 作用于表面各点的作用力将会不同, 钨熔化层将会发生流动、溅射, 熔化层的损失会进一步加剧. 而且由于入射能流的不均匀性, 存在高密度的辐照点, 将使局部温度更高, 导致更大的熔化损失. 最近自洽模拟研究显示 [20], 偏流器瓦片间狭缝改变了狭缝附近的能流, 使相应部分面板更易被腐蚀. 在今后的工作中, 将结合本文所用模型和流体动力学的纳维斯托克斯方程, 进一步研究钨熔化层, 特别是瓦片缝隙附近区域的流动和溅射.

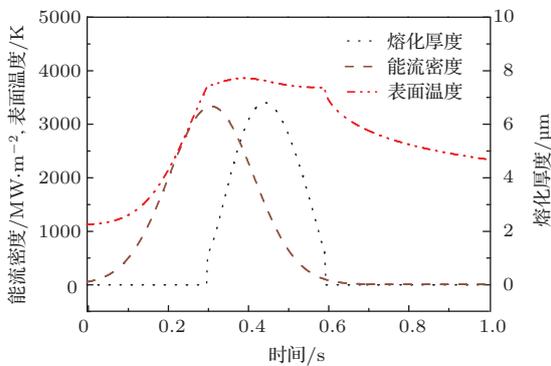


图 10 能流密度峰值为 $3333 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, ELMs 间隙间打到靶板的能流密度为 $10 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, 能流密度、靶板表面温度和熔化厚度随时间变化曲线

对于多个 ELMs 作用在钨靶板上, 在不考虑熔化层损失的条件下, 本文计算了沉积时间为 600 μs , 峰值为 $3333 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, ELMs 频率分别为 5, 10, 15 Hz, H-mode 运行 5 s 时, 靶板表面的温度及熔化厚度随间隙间能流密度的变化关系. 对于本文所取的不同 ELMs 间隙间能流密度, 靶板表面温度随时间均做周期性变化, 变化规律同图 8. 靶板表面温度分布达到稳定时, 发生 ELMs 过程中, 靶板表面温度都超过熔点, 即靶板都被熔化; 间隙间能流密度

越大, ELMs 间隙间靶板温度越高, 但都低于熔点, 即 ELMs 之后靶板会重新凝固. 图 11 给出了不同间隙间能流密度所对应靶板的熔化厚度, 从图中可以看出, 靶板的熔化厚度与间隙间的能流密度呈线性关系, 间隙间能流密度越大, 靶板的熔化厚度越大. 同时还研究了 ELMs 峰值对于靶板熔化厚度的影响, 图 12 给出了间隙间能流密度为 $10 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, ELMs 频率分别为 5, 10, 15 Hz, 不同 ELMs 峰值所对应靶板的熔化厚度. 从图中可以看出, ELMs 峰值越大, 靶板熔化厚度越大. 峰值与熔化厚度同样呈线性关系. 因此通过本研究可以得出靶板表面温度和熔化厚度是受 ELMs 频率、峰值以及间隙间能流密度综合影响的, 即固定其他参数不变, 靶板表面温度 (熔化厚度) 均随间隙间能流密度和 ELMs 峰值线性增大.

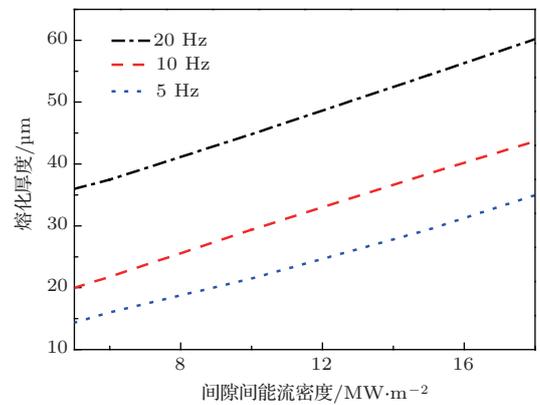


图 11 靶板熔化厚度与 ELMs 间隙间能流密度、频率之间的关系曲线

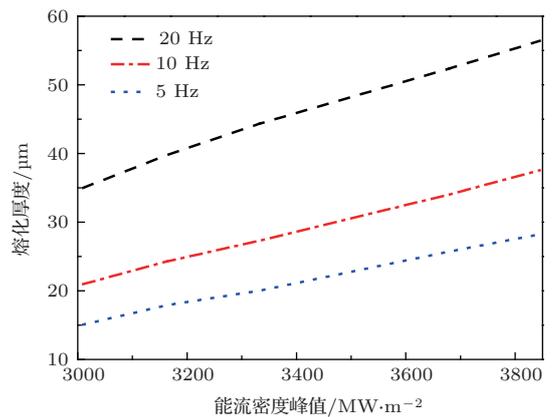


图 12 靶板熔化厚度与 ELMs 峰值、频率之间的关系曲线

4 结 论

本文采用一维热传导方程描述能流入射到钨

靶板表面引起的热腐蚀, 理论预测了发生ELMs时, EAST钨偏滤器靶板腐蚀程度, 得到如下结论:

1. 无论是ELMs的频率、能流密度峰值, 还是间隙间打到靶板表面的能流密度对靶板表面的温度都有很大的影响. 发生ELMs时, 靶板表面升高的温度主要由发生ELMs时打到靶板的能流密度峰值决定. 峰值为 $2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的第三类ELMs作用在偏滤器靶板上, 稳定时每个ELM过程中, 表面温度从377 K增加到379 K, 增加约为2 K; 峰值为 $10 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$ 的第一类ELMs作用在偏滤器靶板上, 稳定时每个ELM过程中, 表面温度从365 K增加到373 K, 增加了约8 K, 所以在当前条件下, 即使是第一类ELMs, 也不会对器壁造成热腐蚀损失; ELMs间隙间靶板表面的温度不仅由此时打到靶板的能流密度决定, 还与发生ELMs的频率有关. 间隙间能流密度都是 $0.2 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, 频率为400 Hz的第三类ELMs作用在靶板上, 稳定时表面温度约为377 K, 频率为10 Hz的第一类ELMs作用在靶板上, 表面温度约为365 K.

2. 当增加运行功率, ELMs的能量也将伴随着增加. 对多种数值的ELMs进行模拟, 如果ELMs能流密度峰值为 $1900 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, ELMs间隙间打到靶板的能流密度为 $10 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, H-mode运行时间为5 s时, 稳定状态靶板表面温度约等于熔点, 表面刚开始出现熔化; 但是如果间隙间打到靶板的能流密度为 $5 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, 靶板表面温度约3182 K, 低于熔点; 间隙间能流密度为 $20 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$, 表面最高温度为3871 K, 形成一定厚度熔化层; 如果ELM的能量为 $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 沉积时间为600 μs , 靶板表面最高温度约为3865 K, 液体层的最大厚度约为6.8—6.9 μm . 同时本文还计算了不同频率、不同峰值、不同间隙间能流密度对靶板表面温度及熔化厚度的影响, 在本文所考虑的几种参数下, 钨靶板均被熔化, 熔化厚度随频率、ELMs峰值、ELMs间隙间能流密度线性增加.

下一步工作, 我们将把此热传导模型与流体动力学的纳维斯托克斯方程相结合, 进一步研究钨熔化层, 特别是瓦片缝隙附近区域的流动和溅射.

感谢对本文提出宝贵建议的王亮博士.

参考文献

- [1] Jiang M, Xu G S, Xiao C, Guo H Y, Wan B N, Wang H Q, Wang L, Zhang L, Naulin V, Gan K F, Wang D S, Duan Y M, Yan N, Liu P, Ding S Y, Zhang W, Liu S C 2012 *Plasma Phys. Control. Fusion* **54** 095003
- [2] Xu W, Wan B N, Xie J K 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1970 (in Chinese)[徐伟, 万宝年, 谢纪康 2003 物理学报 **52** 1970]
- [3] Li M H, Ding B J, Kong E H, Zhang L, Zhang X J, Qian J P, Yan N, Han X F, San J F, Liu F K, Wang M, Xu H D, Wan B N 2011 *Chin. Phys. B* **20** 125202
- [4] Wan B N for the EAST and HT-7 Teams and International Collaborators 2009 *Nucl. Fusion* **49** 104011
- [5] Gao J M, Li W, Xia Z W, Pan Y D, Lu J, Yi P, Liu Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 015202
- [6] Sizyuk V, Hassanein A 2010 *Nucl. Fusion* **50** 115004
- [7] Sizyuk V, Hassanein A 2011 *J. Nucl. Mater.* **415** S881
- [8] Hassanein A, Sizyuk T, Sizyuk V, Miloshevsky G 2010 *Fusion Eng. Des.* **85** 1331
- [9] Federici G 2003 *Plasma Phys. Control. Fusion* **45** 1523
- [10] Semak V V, Damkroger B, Kempka S 1999 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32** 1819
- [11] Bazylev B, Wuerz H 2002 *J. Nucl. Mater.* **307** 69
- [12] Carslaw H W, Jaeger J C 1959 *Conduction of Heat in Solids* (Oxford: Clarendon)
- [13] Behrisch R 2010 *J. Surf. Invest-X-Ray+* **4** 549
- [14] Yuan Y, Greuner H, Bösowirth B, Krieger K, Luo G N, Xu H Y, Fu B Q, Li M, Liu W 2013 *J. Nucl. Mater.* **433** 523
- [15] Wang L, Xu G S, Guo H Y, Wang H Q, Liu S C, Gan K F, Gong X Z, Liang Y, Yan N, Chen L, Liu J B, Zhang W, Chen R, Shao L M, Xiong H, Qian J P, Shen B, Liu G J, Ding R, Zhang X J, Qin C M, Ding S, Xiang L Y, Hu G H, Wu Z W, Luo G N, Chen J L, Hu L Q, Gao X, Wan B N, Li J G, the EAST Team 2013 *Nucl. Fusion* **53** 073028
- [16] Hill D N 1997 *J. Nucl. Mater.* **241** 182
- [17] Miloshevsky G V, Hassanein A 2010 *Nucl. Fusion* **50** 115005
- [18] Kirk A, Liu Y Q, Chapman I T, Harrison J, Nardon E, Scannell R, Thornton A J, the MAST Team 2013 *Plasma Phys. Control. Fusion* **55** 045007
- [19] Xiao W W, Diamond P H, Zou X L, Dong J Q, Ding X T, Yao L H, Feng B B, Chen C Y, Zhong M, Xu M, Yuan B S, Rhee T, Kwon J M, Shi Z B, Rao J, Lei G J, Cao J Y, Zhou J, Huang M, YU D L, Huang Y, Zhao K J, Cui Z Y, Song X M, Gao Y D, Zhang Y P, Cheng J, Han X Y, Zhou Y, Dong Y B, Ji X Q, Yang Q W, Liu Y, Yan L W, Duan X R, Liu Y, the HL-2A Team 2012 *Nucl. Fusion* **52** 114027
- [20] Sang C F, Sun J Z, Wang D Z 2011 *J. Nucl. Mater.* **415** S204

Numerical study of the erosion of the EAST tungsten divertor targets caused by edge localized modes*

Huang Yan¹⁾²⁾ Sun Ji-Zhong¹⁾ Sang Chao-Feng¹⁾ Ding Fang³⁾ Wang De-Zhen^{1)†}

1) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

2) (School of Information Science and Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

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

(Received 15 August 2013; revised manuscript received 8 October 2013)

Abstract

Edge localized modes (ELMs) in company with high-confinement mode (H-mode) will release high energy plasma fluxes to the scrape of layer (SOL). Large portions of these high heat fluxes will eventually irradiate the divertor target plates, and may erode, even melt them. In this paper, we develop a one-dimensional heat conductivity model including evaporation, radiation, melting processes of tungsten to study the erosion of the divertor tungsten targets caused by ELMs in EAST at the current and possible future operation parameters. Based on both experimental data of heat fluxes on the carbon-fibre composites divertor in EAST and possible future data of high heat fluxes, the surface temperature of slab-shaped tungsten is evaluated numerically by solving the one-dimensional model. It is found that the current Type I ELMs do not cause any noticeable changes of the tungsten target, the surface temperature being raised only several tens of degrees. Simulation results show that ELMs will not become a problem for EAST tungsten wall for the time being and the near future as long as much more severe transient events, e.g. , disruption, can be avoided. When deposition energy is increased to 1 MJ/m^2 with a duration of $600 \mu\text{s}$, the tungsten plate will melt for a layer as thick as $6.8 \mu\text{m}$.

Keywords: Tokamak, edge localized modes, tungsten, melting

PACS: 52.55.Fa, 52.55.Rk, 52.40.Hf

DOI: [10.7498/aps.63.035204](https://doi.org/10.7498/aps.63.035204)

* Project supported by the National Magnetic Confinement Fusion Science Program, China (Grant Nos. 2013GB109001, 2013GB107003), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11275042, 11205198), and the central university basic scientific research business expenses special funds, China (Grant Nos. DUT13ZD102, DUT12RC(3)53).

† Corresponding author. E-mail: wangdez@dlut.edu.cn