

HL-2A 第一镜挡板防护效果模拟*

郑灵^{1)†} 赵青¹⁾ 周艳²⁾

1) (电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2) (核工业西南物理研究院, 成都 610041)

(2010年10月8日收到; 2010年12月27日收到修改稿)

如何提高第一镜防护效果是目前托卡马克装置急需解决的问题之一, 防护挡板是减轻第一镜表面杂质再沉积的很有效方法. 为了研究挡板的防护效果, 根据 HL-2A 装置的具体情况, 采用蒙特卡罗方法建立了粒子在第一镜上再沉积的物理模型, 模拟了不同情况下粒子在第一镜上的再沉积情况, 包括无挡板情况和加锥形挡板情况. 和实验结果进行了比较, 从而验证了该模型的正确性. 这为有效改善第一镜防护效果提供了理论依据.

关键词: 第一镜, 再沉积, 挡板, 蒙特卡罗方法

PACS: 52.40.Mj, 52.70.-m, 52.55.Fa

1. 引言

在磁约束核聚变装置中, 光学诊断是等离子体运行状态与控制信号探测的主要诊断方法之一, 许多光学诊断系统都必须在装置的真空室内设置反射镜, 以获得来自等离子体内部的信息^[1,2]. 核聚变装置中面对等离子体的光学诊断系统用的反射镜或收集镜统称为第一镜. 然而, 由于第一镜放置在托卡马克真空室内, 直接面对等离子体, 必将受到等离子体的各种辐射以及从托卡马克第一壁溅射腐蚀出的各种杂质的污染^[3]. 这些作用严重影响了第一镜的表面光学性能(主要是反射率和透过率), 使其寿命缩短, 从而影响了诊断信号的可靠性, 严重时甚至会导致整个诊断系统无法工作^[4]. 因此, 第一镜问题成为国际热核聚变实验反应堆^[5] (ITER) 及其他托卡马克装置急需解决的问题之一.

远红外激光干涉仪^[6]是 HL-2A^[7] (中国环流器二号 A) 装置上测量等离子体电子密度的装置, 信号的测量必须通过在托卡马克真空室内设置第一镜来实现. 等离子体辐照后, 第一镜表面被杂质沉积所覆盖^[8], 沉积材料吸收光的能量, 导致第一镜反射率下降, 图 1 所示为 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜在托卡马克中辐照前后反射率的变化. 减轻第一镜表面杂质再沉积的一个很有效

的方法是使用防护挡板^[9]. 杂质粒子入射到挡板上, 被挡板吸收或反射, 从而减轻了第一镜上的杂质沉积.

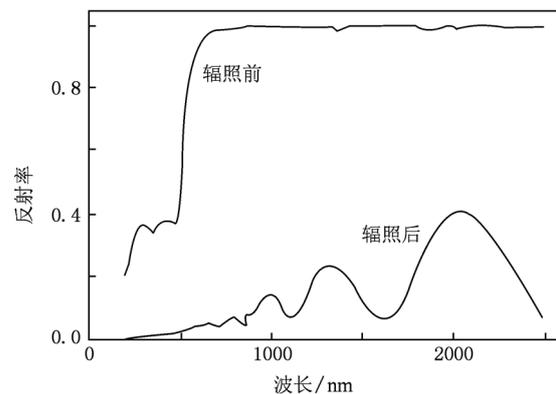


图 1 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜在托卡马克中辐照前后反射率的变化

在托卡马克中第一镜辐照实验的周期很长, 往往需要半年甚至更长的时间, 而且第一镜真实辐照实验的成本较高, 挡板形状的选择也常有一定的盲目性. 为了节约成本和从理论上对实验进行指导, 就需要对第一镜上的粒子沉积情况和挡板防护效果进行模拟. 文献[10]应用 B2 程序和非线性中性粒子模型对 ITER 第一镜上的 D, He, C 等粒子通量进行了估计. 然而, 挡板对第一镜的防护效果仍是一个迫切需要解决的问题. 文献[1]曾模拟了均匀

* 国家自然科学基金 (批准号: 10775029) 和四川省科技支撑计划 (批准号: 2010G20157) 资助的课题.

† E-mail: zhengling137@sohu.com

入射粒子在第一镜上的横向轮廓. 可是, 作者尚未见有采用真实托卡马克位形的第一镜粒子沉积分布模拟工作报告.

为了研究挡板的防护效果, 本文根据 HL-2A 装置的具体情况, 采用蒙特卡罗方法, 建立了粒子在第一镜上再沉积的物理模型, 模拟了不同情况下粒子在第一镜上的再沉积情况, 包括无挡板情况和加锥形挡板情况.

2. 粒子在第一镜上再沉积的物理模型

本文根据 HL-2A 装置的基本参数^[11-13]建立了真实的托卡马克位形^[14,15], 第一镜的位置如图 2 所示. 第一镜位于 HL-2A 装置真空室内壁上, 沿中平面上下对称分布, 距离等离子体中心 524 mm. 由于托卡马克是一个很复杂的系统, 为了模拟的方便, 在不影响结果真实性的前提下, 我们建立了以下物理模型: 由于第一镜沿中平面上下对称分布, 偏滤器区等离子体对第一镜的影响很小. 假设放电位形为孔栏位形, 孔栏半径为 40 cm; 假设粒子为中性粒子, 且忽略重力及其他力; 假设粒子在托卡马克中为麦克斯韦分布, 并且只有孔栏外的粒子能沉积到第一镜上; 由于边界等离子体很稀薄, 假定等离子体粒子间无碰撞^[16] (自由程足够长); 粒子和第一镜、挡板间的碰撞均为非弹性碰撞.

处于热平衡态的气体, 其粒子有一切速度, 这些速度的最可几分布称为麦克斯韦分布. 对于三维情况, 粒子的麦克斯韦分布为^[17]

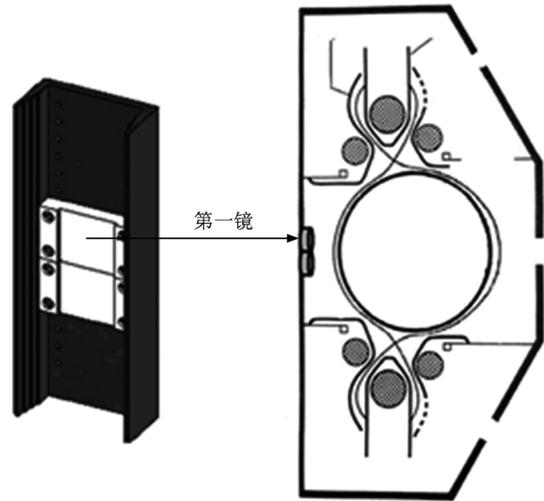


图 2 第一镜在 HL-2A 托卡马克中的位置^[1]

$$f(v_x, v_y, v_z) = n_0 \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) / (k_B T) \right], \quad (1)$$

其中 n_0 为单位体积内的粒子数, m 为粒子质量, k_B 为玻尔兹曼常数 ($k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K), T 为粒子温度 (模拟中假定 $T = 3$ eV^[18,19]), v_x , v_y 和 v_z 分别为粒子在 x 方向、 y 方向和 z 方向的运动速度.

图 3 所示为模拟中建立的方形第一镜和 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜坐标系, 其中 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜共由 8 块镜子组成, 每块镜子尺寸均为 $0.07 \text{ m} \times 0.07 \text{ m}$.

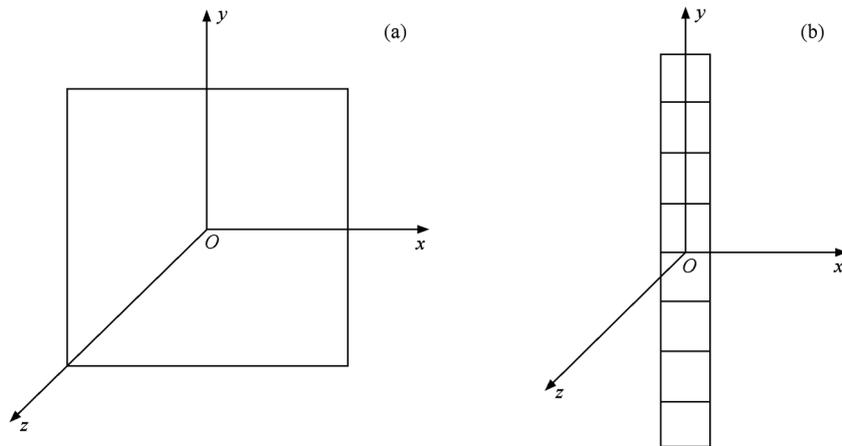


图 3 模拟中建立的第一镜坐标系 (a) 方形第一镜, (b) HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜

根据模型和假设条件, 我们用蒙特卡罗方法建立了粒子在第一镜上再沉积的物理模型, 对粒子在

第一镜上的沉积情况进行了编程模拟. 对于无挡板情况和加锥形挡板情况, 分别模拟了 10^9 个粒子在

0.1 m × 0.1 m 的方形第一镜、0.4 m × 0.4 m 的方形第一镜和 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜上的沉积分布情况.

3. 模拟结果及讨论

3.1. 无挡板情况

在不加挡板情况下,用蒙特卡罗方法分别模

拟了 10^9 个粒子在 0.1 m × 0.1 m 的方形第一镜、0.4 m × 0.4 m 的方形第一镜和 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜上的沉积分布情况,所得结果如图 4 所示.

由图 4(a) 可以看到,在 0.1 m × 0.1 m 的方形第一镜上,粒子沉积在横向(即 x 方向)和纵向(即 y 方向)基本上都是均匀的.这是由于相对于托卡马克中的粒子分布,第一镜的尺寸(0.1 m × 0.1 m)较小,粒子在第一镜上沉积分布的形状不是很明显.

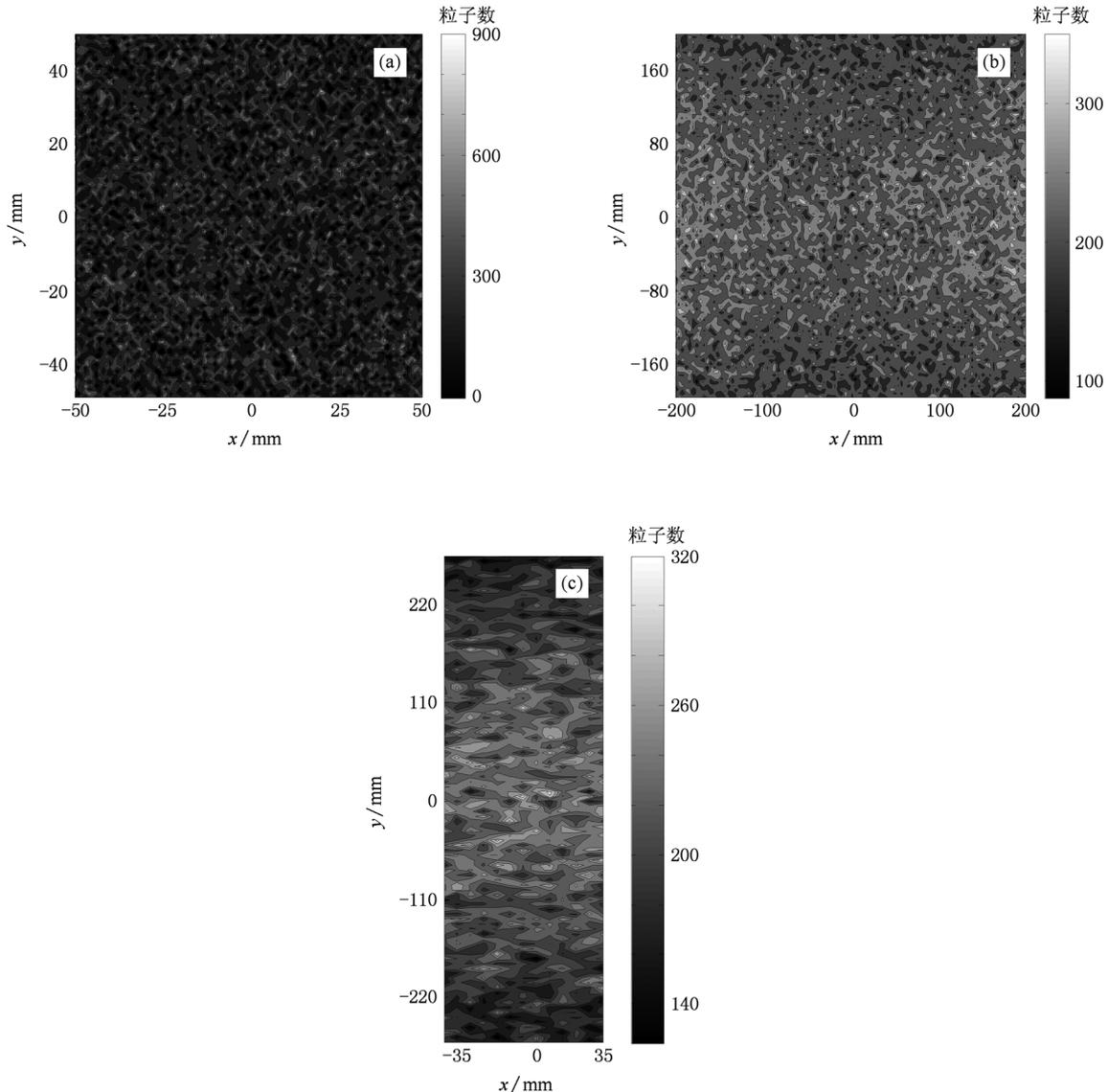


图 4 不加挡板时,第一镜上粒子沉积分布的模拟结果 (a)0.1 m × 0.1 m 的方形第一镜,(b)0.4 m × 0.4 m 的方形第一镜,(c)HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜

由图 4(b) 可以看到,在 0.4 m × 0.4 m 的方形第一镜上,粒子沉积在横向基本是均匀的,在纵向呈现中间厚,边缘薄的分布.这是由于在纵向上第

一镜中部距离粒子源较近,因而沉积比较厚,而边缘距离粒子源较远,因而沉积比较薄.另外,仔细观察还可以看到,粒子沉积在横向上的分布,边缘比

中间稍微厚一些,这是不可思议的. 在位于瑞士洛桑的“位形可变的托卡马克”(the tokamak à configuration variable)上也发现了这一矛盾的现象^[4]. 具体的原因还有待进一步分析.

由图 4(c) 可以看到,在 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜上,粒子沉积在横向基本是均匀的,在纵向呈现中间厚,边缘薄的分布. 这是由于在纵向上第一镜中部距离粒子源较近,因而沉积较厚,而边缘距离粒子源较远,因而沉积较薄.

3.2. 加锥形挡板情况

图 5 为第一镜和锥形挡板示意图,锥形挡板与第一镜平面之间的夹角为 45° . 在 y 方向,挡板和第

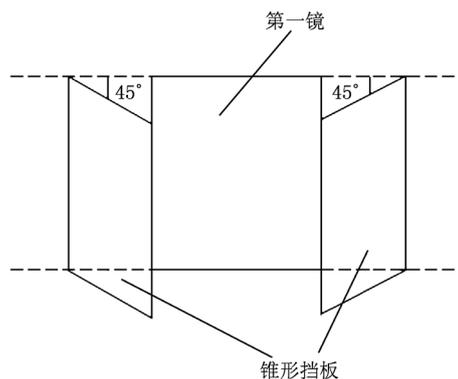


图 5 第一镜和锥形挡板示意图

一镜高度相同. 在 z 方向,挡板垂直高度为 0.1 m.

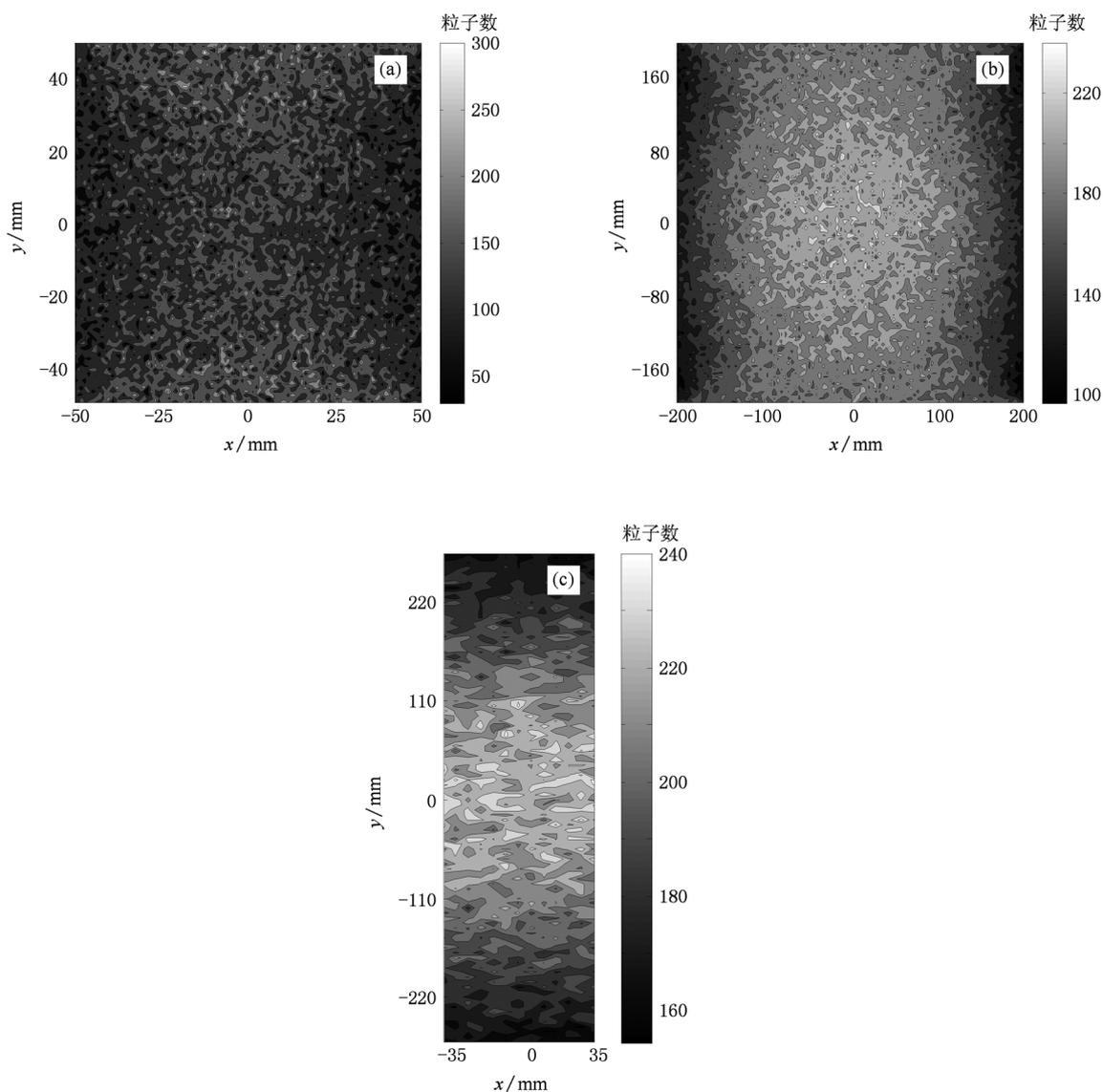


图 6 加锥形挡板时,第一镜上粒子沉积分布的模拟结果 (a) $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的方形第一镜, (b) $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的方形第一镜, (c) HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜

第一镜横向加 0.1 m 宽锥形挡板的情况下,用蒙特卡罗方法分别模拟了 10^9 个粒子在 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的方形第一镜、 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的方形第一镜和 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜上的粒子沉积分布情况,结果如图 6 所示.

第一镜横向加 0.1m 宽的锥形挡板时,通过模拟 10^9 个粒子在 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的方形第一镜上的沉积分布可知,锥形挡板挡住了 40.21% 的粒子.由图 6(a) 可以看到,在 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的方形第一镜上,粒子沉积在横向呈现中间厚,边缘薄的分布.这是由于横向加了锥形挡板,粒子不容易沉积到被挡板遮挡的区域.在纵向,粒子沉积呈现中间薄,边缘厚的分布,这是由于纵向未加挡板,粒子可以从上下方向沉积到第一镜上,因而粒子更容易沉积到第一镜的边缘部分,中间部分沉积相对较少.

第一镜横向加 0.1 m 宽的锥形挡板时,通过模拟 10^9 个粒子在 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的方形第一镜上的分布可知,锥形挡板挡住了 22.97% 的粒子.由图 6(b) 可以看到,在 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的方形第一镜上,粒子沉积在横向呈现中间厚,边缘薄的分布,这是由于横向加了锥形挡板,粒子不容易沉积到被挡板遮挡的区域.在纵向,从第一镜中心到边缘粒子沉积由厚变薄,再变厚.纵向分布先由厚变薄的原因是第一镜中部比第一镜边缘距离粒子源更近,因而中部沉积较厚;第一镜边缘沉积又由薄变厚是由于纵向未加挡板,粒子更容易沉积到第一镜的边缘区域.

第一镜横向加 0.1 m 宽的锥形挡板时,通过模拟 10^9 个粒子在 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜上的沉积分布可知,锥形挡板挡住了 18.22% 的粒子.由图 6(c) 可以看到,在 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜上,粒子沉积在横向基本上是均匀的,在纵向则呈现中间厚,边缘薄的分布.纵向的这种分布是由于第一镜中部距离粒子源较近,因而沉积较厚,而边缘距离粒子源较远,因而沉积较薄.

图 7 所示为 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜上粒子沉积分布的实验结果.通过比较图 6(c) 和图 7 可以发现,HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜粒子沉积分布的模拟结果和实验结果基本类似.

当 $x=0$ 时,HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜上的沉积粒子数纵向(即 y 方向)变化的模拟结

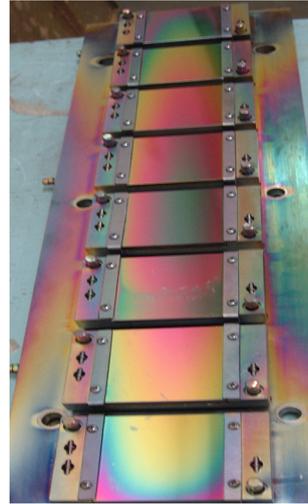


图 7 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜粒子沉积分布的实验结果

果如图 8 所示.假定反射率的下降与沉积粒子数成正比,即

$$R_0 - R \propto n, \quad (2)$$

其中 R_0 和 R 分别为粒子沉积前后第一镜的反射率,并设 $R_0 = 100\%$; n 为第一镜单位面积上的沉积粒子数.由(2)式通过拟合可以得到 $x=0$ 时第一镜反射率在纵向(即 y 方向)的变化趋势,结果如图 9 所示.

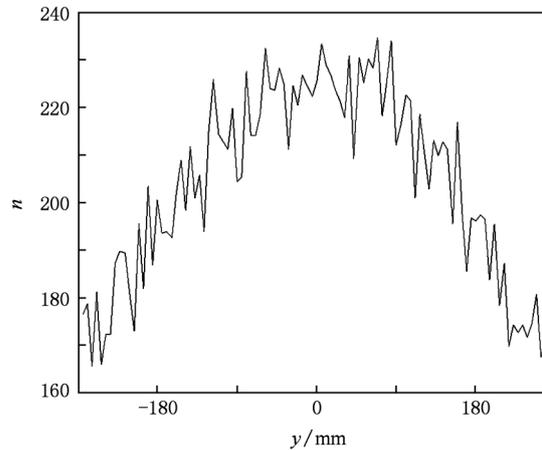


图 8 $x=0$ 时,HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜上的沉积粒子数纵向(y 方向)变化的模拟结果

图 10 为 $x=0$ 时,真实托卡马克环境中辐照后的 HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜反射率的纵向(即 y 方向)变化情况(用 $3.39\text{ }\mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器进行测量).通过比较图 9 和图 10 可以发现,模拟结果和实验结果基本相符.

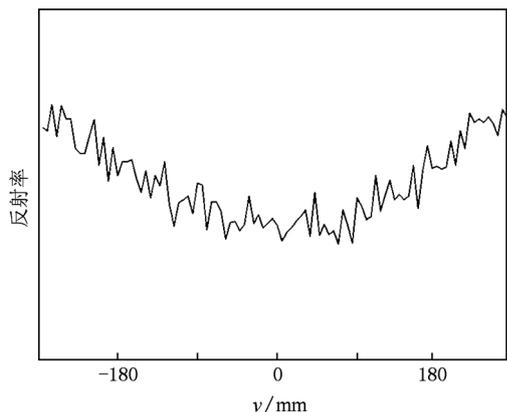


图9 $x=0$ 时, HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜反射率纵向(y 方向)变化趋势的拟合结果

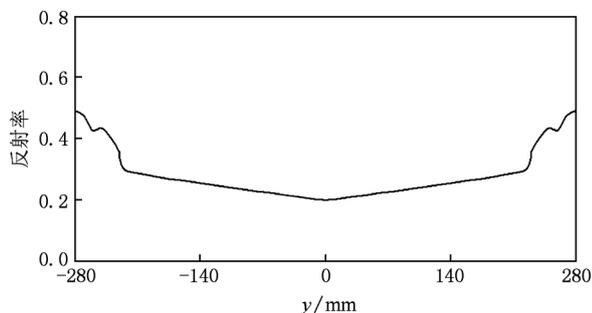


图10 $x=0$ 时, HL-2A 装置远红外激光干涉仪第一镜反射率纵向(y 方向)变化的实验结果

以上分析说明,本文建立的模型是科学的.稍有不同是在真实托卡马克环境中辐照后第一镜上边缘沉积分布呈圆弧形,而模拟的结果则不太明显.造成这一差别的原因可能是模拟的粒子数太少,使得粒子在第一镜上的沉积分布随机性大(在蒙特卡罗方法中模拟的粒子数越多,和真实的情况越接近);也有可能是模拟中做了一些假设的缘故.

4. 结 论

本文通过蒙特卡罗方法编程模拟得到了粒子在第一镜上再沉积分布的一些初步结果,模拟结果和实验结果基本相符,验证了模型的正确性,为有效改善第一镜防护效果提供了理论依据.另外,如果已经测得第一镜上任一点的沉积厚度,根据模拟结果就可以大概估算出其他点的沉积厚度,这对于激光清洗第一镜^[20]是有利的.在下一步的工作中,我们将继续分析所得结果并减少假设条件,进一步模拟不同形状挡板的防护效果,以比较挡板形状对防护效果的影响.

衷心感谢 HL-2A 装置全体工作人员为本文提供数据以及在测试方面给予的帮助.

- [1] Zhou Y, Gao B Y, Jiao Y M, Deng Z C, Tang Y W, Yi J, Tian C L, Ding X T, Liu Y 2006 *Fusion Eng. Des.* **81** 2823
- [2] Li R H, Tang C J, Chen J L, Zhong F L 2007 *Surf. Technol.* **36** 11 (in Chinese) [李仁红, 汤春江, 陈俊凌, 种法力 2007 表面技术 **36** 11]
- [3] Gao B Y, Zhou Y, Deng Z C, Yi J, Tang Y W, Ding X T 2006 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **26** 31 (in Chinese) [高炳义, 周艳, 邓中朝, 易江, 唐益武, 丁玄同 2006 核聚变与等离子体物理 **26** 31]
- [4] Temmerman G D, Pitts R A 2008 *Fusion Eng. Des.* **83** 30
- [5] Shimomura Y 2006 *Fusion Eng. Des.* **81** 3
- [6] Zhou Y, Deng Z C, Liu Z T, Yi J, Tang Y W, Gao B Y, Tian C L, Li Y G, Ding X T 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 113503
- [7] Liu Y, Yan J C, Zhou C P, Ding X T, Wang S J, Wang E Y, Yao L H, Mao W C, Pan C H 2004 *Nucl. Fusion* **44** 372
- [8] Wu J, Zhang P Y, Sun J Z, Zhang J, Ding Z F, Wang D Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1848
- [9] Zhou Y, Deng Z C, Gao B Y, Yi J, Tang Y W, Tian C L, Liu X 2007 *12th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics* (Princeton; International Tokamak Physics Association) p16
- [10] Sugie T, Kukushike A, Takamura S, Yoshida N, Litnovsky A 2006 *11th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics* (Sendai; International Tokamak Physics Association) p9
- [11] Jian G D, Dong J Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1657 (in Chinese) [简广德, 董家齐 2003 物理学报 **52** 1657]
- [12] Yan J C, Liu Y, Zhou C P, Li X D, Wang S J, Liu D Q, Xuan W M, Chen L Y, Cao Z, Yang Q W, Song X M, Yao L Y, Mao W C, Ding X T, Pan C H 2004 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **24** 241 (in Chinese) [严建成, 刘永, 周才品, 李晓东, 王树锦, 刘德全, 宣伟民, 陈燎原, 曹曾, 杨青巍, 宋显明, 姚列英, 毛维成, 丁玄同, 潘传红 2004 核聚变与等离子体物理 **24** 241]
- [13] Yuan B S, You T X, Qin Y W, Feng B B, Ji X Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1316 (in Chinese) [袁保山, 游天雪, 秦运文, 冯北滨, 季小全 2006 物理学报 **55** 1316]
- [14] Shi B R 2010 *Chin. Phys. B* **19** 065202
- [15] Zhang Y P, Yang J W, Liu Y, Song X Y, Yuan G L, Li X, Zhou Y, Zhou J, Yang Q W, Chen L Y, Rao J, Duan X R, Pan C H, HL-2A Team 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5385
- [16] Zhao Q, Liu S Z, Tong H H 2009 *Plasma Technology and Its Applications* (Beijing; National Defence Industry Press) p10 (in

- Chinese) [赵青、刘述章、董洪辉 2009 等离子体技术及应
用 (北京: 国防工业出版社) 第 10 页]
- [17] Chen F F 1980 *Introduction to Plasma Physics and Controlled
Fusion* (Beijing: People's Education Press) pp3, 4 (in
Chinese) [Chen F F 1980 等离子体物理学导论(中译本)(北
京:人民教育出版社) 第 3, 4 页]
- [18] Yu D L 2006 *Annual Report of Southwestern Institute of Physics*
(Chengdu: Southwestern Institute of Physics) p96 (in Chinese)
- [于德良 2006 核工业西南物理研究院年报(成都:核工业西
南物理研究院) 第 96 页]
- [19] Hong W Y, Yan L W, Wang E Y, Li Q, Qian J 2005 *Acta
Phys. Sin.* **54** 173 (in Chinese) [洪文玉、严龙文、王恩耀、李
强、钱俊 2005 物理学报 **54** 173]
- [20] Zhou Y, Zheng L, Gao H, Zhao G, Li Y G, Li L C, Jiao Y M
2009 *Phys. Scripta* **2009**(T138) 014066

Simulation of protective effect of the buffer on the first mirror in HL-2A tokamak*

Zheng Ling^{1)†} Zhao Qing¹⁾ Zhou Yan²⁾

1) (School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

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

(Received 8 October 2010; revised manuscript received 27 December 2010)

Abstract

How to improve the protective effect of the first mirror is urgent for tokamaks at present. Buffer is one of the efficient methods to reduce the impurity redeposition on the first mirror. In order to study the protective effect of the buffer, the physical model of the particle redeposition on the first mirror is established with the Monte Carlo method on the basis of the parameters and experiments of the HL-2A tokamak. Particle redepositions on the first mirror are simulated under different conditions, including the cases without buffer and with cone buffer. The simulation results match well with the experimental results. The accuracy of the model is verified, and the simulation is efficient for providing theoretical basis for the protection of the first mirror.

Keywords: first mirror, redeposition, buffer, Monte Carlo method

PACS: 52.40.Mj, 52.70.-m, 52.55.Fa

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10775029) and the Key Program of Science and Technology of Sichuan Province, China (Grant No. 2010G20157) .

† E-mail: zhengling137@sohu.com