

基于 Monte-Carlo 方法模拟分析 NBI 真空压力分布的研究

熊模华¹, 朱 武¹, 胡纯栋², 谢远来², 刘智民²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要:中性束注入装置是产生高能中性粒子以加热托卡马克等离子体的装置。NBI 真空压力分布是影响中性束传输效率特别是再电离损失的关键因素之一。研究分析了超导托卡马克实验装置中 NBI 的工作原理和结构特点,建立了 EAST NBI 的几何与物理模型,利用 Monte-Carlo 方法建立 NBI 主真空室内分子运动及碰撞的数学模型,并运用 Matlab 软件编程实现对 NBI 主真空室内真空压力分布的模拟计算,得到主真空室内三段区域在进气过程中的气体分子三维分布图和平均压力变化曲线。研究可为 EAST NBI 主真空室内的中性化室、偏转系统、低温抽气系统的结构设计提供指导。

关键词:中性束注入装置;模拟计算;压力分布;结构设计

中图分类号: TB75

文献标识码: A

文章编号: 1002-0322(2010)02-0012-05

Simulative analysis based on Monte Carlo method for vacuum pressure distribution in NBI

XIONG Mu-hua¹, ZHU Wu¹, HU Chun-dong², XIE Yuan-lai², LIU Zhi-min²

(1. School of Mechanical and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China;
2. Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Neutral Beam Injector (NBI) is used to generate high-energy neutral particles so as to heat the tokamak plasma. The vacuum pressure distribution in NBI is one of the key influencing factors on the efficiency of neutral beam transmission especially the loss due to reionization during the transmission. Analyzing the operating principle and constructional characteristics of NBI applied in the Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST), the relevant geometric and physical models were developed. Then, based on the Monte Carlo method, a mathematical model of molecular movement and collision in the main vacuum chamber of NBI in EAST was developed. And the software Matlab was used for programming to implement the simulative calculation of the pressure distribution in NBI's main vacuum chamber. As a result, the 3-D molecular distribution of gas and variation of average pressure in the intake process of the three zones in main vacuum chamber were obtained, thus providing the reference to the constructional design of neutralizer, deflecting system and cryopumping system.

Key words: neutral beam injector; simulative calculation; pressure distribution; constructional design

实现受控核聚变所必须解决的主要问题之一就是如何将等离子体加热到反应温度^[1]。中性束注入加热被国际核聚变界公认为是最有效的加热手段之一,诸多试验表明,中性束注入加热系统能够显著提高核聚变装置中的等离子体性能^[2]。

1 中性束注入器装置的典型结构和工作原理

中性束注入装置(Neutral Beam Injector,简称

NBI)的典型结构如图 1 所示,它包括离子源、中性化室、主真空室、偏转磁体、离子消除器、束流限制靶、飘移管道及真空系统等部分组成。

由离子源产生的离子,经引出电极引出并经加速电极加速,成为能量达几十乃至上百 keV 的高能离子束。高能离子束进入中性化室实现中性化,从而使其其中的一部分转化为高能中性粒子束。

中性粒子束经飘移管道注入到超导托卡马克装置(Experimental Advanced Superconducting

收稿日期:2009-07-05

作者简介:熊模华(1983-),男,江西省南昌市人,硕士生。

联系人:朱武,教授。

Tokamak (简称 EAST)的等离子体中,中性粒子在等离子体中通过电荷交换和碰撞电离变成离子并被磁场捕获,把能量交给等离子体,达到加热等离子体的目的。

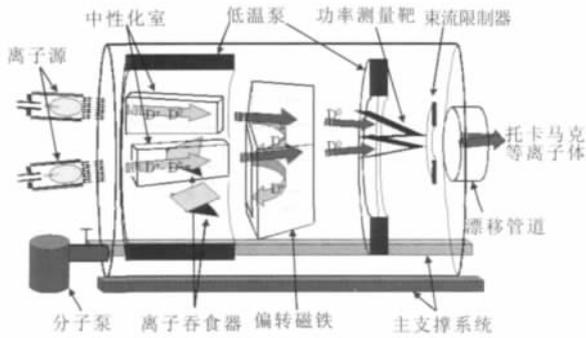


图 1 中性束注入器装置结构示意图
Fig.1 Schematic of construction of NBI

2 中性束注入装置真空压力的理论分析

NBI 总的气源有两个:离子源头部进气和中性化室补充进气。下面分析在 NBI 系统稳态实验运行时,系统各部分的气体量。

为了简化计算过程,对该真空系统作了如下几点假设:

(1) 主真空室内的压强分布情况单独计算,而在计算其它部分的压力分布时不予考虑。

(2) 在主真空室内,气体抽速可以近似认为是低温泵的有效抽速。

(3) 由于中性化室的体积远远小于主真空室的体积,故可认为中性化室内的气体流出中性化室出口后立刻扩散到整个主真空室,且这个过程与抽气过程相比要快得多。

(4) 主真空室内的气流状态近似属于分子流状态。

对于假设(4),用下面的计算来证明。对于分子流和粘滞流的判据,目前国内外多数学者推荐下列公式^[3]:

$$\frac{\lambda}{D} > 1 \text{ 为分子流} \quad (1)$$

$$\frac{\lambda}{D} < 0.01 \text{ 为粘滞流} \quad (2)$$

$$0.01 < \frac{\lambda}{D} < 1 \text{ 为粘滞 - 分子流} \quad (3)$$

其中 $\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 \bar{P}}$ k 为波尔兹曼常数 $k=1.38 \times$

10^{-23} J/K ; T 是气体的热力学温度,取 293 K ; σ 是气体分子的直径, D_2 分子的 $\sigma=2.75 \times 10^{-10} \text{ m}$; \bar{P} 是气体的压力, $\bar{P}=5.5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$; D 为气体流经管道最小直径,为 1.8 m 。从而,有

$$\frac{\lambda}{D} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 293}{\sqrt{2} \times 3.14 \times 2.75^2 \times 10^{-20} \times 5.5 \times 10^{-3} \times 1.8} = 1.216 \quad (4)$$

根据上面的计算和气流状态判据可知,主真空室内气流状态为分子流状态。那么就可以认为:气体分子之间几乎不再发生碰撞,主要是气体分子与器壁(固体表面)之间的持续碰撞;碰撞后的分子离开壁面的方向通常遵从余弦定律;碰撞后分子的平均动能由器壁温度决定^[4];气体的流动靠管内分子密度梯度推动进行^[5]。

3 NBI 主真空室压力分布模拟计算

3.1 Monte-Carlo 方法

Monte-Carlo(M-C)方法,就是根据待求随机问题的变化规律,使它的某些统计参量正好是待求问题的解^[6]。真空中微观粒子运动是随机过程,宏观物理性质是大量微观粒子相应微观量的统计平均,这就使得 M-C 方法在真空学科中获得了广泛应用。

3.2 NBI 实验装置真空压力分布模拟的数学模型

为了研究 NBI 实验装置真空压力分布,必须建立几何模型以便进行模拟计算。这里主要研究主真空室真空压力分布,坐标系以中性化室的右端面的中心为原点,主真空室的轴线为 X 轴,正方向沿着束线传输的方向(向右)。Y 轴为主真空室的径向方向,正方向为纸面内侧。根据右手定则,可以确定 Z 轴及其正方向,如图 2 所示:

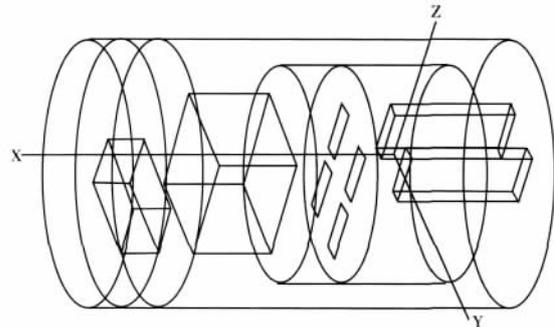


图 2 NBI 主真空室及漂移管道三维坐标系
Fig.2 The 3-D coordinate system of main vacuum chamber and drift tube

3.3 NBI 主真空室压力分布模拟的物理模型

模拟计算主真空室内的压力分布,运用分子运动的相关理论,分析主真空室内的压力分布情况。对此作如下物理假设^[7]:

(1) 从中性化室端面出来的气体分子运动方向是随机的,且与主真空室的相关部件器壁碰撞后反射规律遵从余弦定律(又称“克努曾定律”):碰撞于固体表面的分子飞离表面时按与表面法线方向所成的角度 θ 的余弦而分布^[8]。

(2) 气体分子与器壁表面碰撞后平均动能由器壁表面的温度决定。碰撞后离开表面的分子动能为^[8]：

$$E_w = \frac{3kT_w}{2} \quad (5)$$

式中 E 为碰撞后的气体分子动能，单位为 J； k 为波尔兹曼常数； T_w 为分子碰撞的器壁固体表面温度，单位为 K。

(3) 空间体内压力与空间体内的分子密度成比例。在模拟计算中认为每个分子的运动都服从麦克斯韦 - 波尔兹曼分布律^[9]。

4 NBI 主真空室压力分布的模拟计算

稳定的分子流由中性化室端面进入主真空室，用 M-C 方法确定入射分子在空间的坐标的方向余弦，分子进入主真空室后，与相关器壁表面碰撞后记录下分子每次与器壁碰撞点的坐标，直到分子运动时间等于需要采集压力分布的时间为止，计算中将主真空室划分成有限空间。包括：

(1) 分子运动过程中碰撞坐标点的确定。

(2) 分子在相邻两次碰撞间运动距离 d 的确定。计算中需要注意的是分子在运动过程中的速度主要是由碰撞器壁表面的温度所决定。在主真空室中主要有三种温度：第一种是真空室壁和真空室空间，其温度为 293 K；第二种为低温冷凝泵人字形挡板的温度，其温度为 77 K；第三种为中性化室端面即气体分子发射面的温度，因为从中性化室端面发射的气体分子主要是从离子源栅极处扩散过来的，而离子源栅极区域等离子体温度高达几万 K^[10]，一般计算时取发射气体温度为 1000 K^[11]。

(3) 分子运动的时间 t 的确定。

(4) 分子运动的方向角 (α, β, γ) 的确定。

(5) 运动过程中分子从碰撞面发射的方向角 (α, β, γ) 的确定。

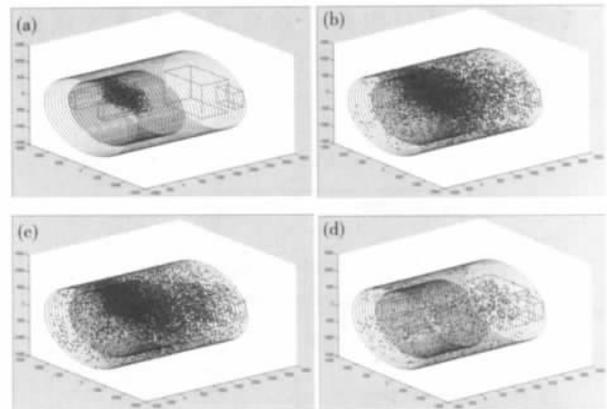
(6) 压力的模拟计算。应用 Matlab 软件^[12,13] 编写模拟计算的程序。首先记录分子的总运动时间大于压力分布采集时刻 $t_{\text{采集}}$ 的碰撞的前一次碰撞相关参数(位置、方向余弦、速度、运动总时间)，从而计算采集时刻的位置，作出粒子分布示意图。

5 模拟计算的结果与分析

5.1 气体分子的三维空间分布

模拟主真空室进气量为 $6.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，模拟进气时间为 500 ms，模拟比例(每个模拟分子代表实际的分子个数)为 10^{15} ，不同采集时刻的分子三

维分布图如图 3 所示。



(a) $t_{\text{采集}}=1 \text{ ms}$ 时刻的分子三维分布;(b) $t_{\text{采集}}=20 \text{ ms}$ 时刻的分子三维分布;(c) $t_{\text{采集}}=400 \text{ ms}$ 时刻的分子三维分布;(d) $t_{\text{采集}}=520 \text{ ms}$ 时刻的分子三维分布

图 3 不同采集时刻的分子三维分布图

Fig.3 The 3-D molecular distributions at different sampling moments

由图可以看出，从 1 ms 到 520 ms 气体分子有着明显的区域分布特征及扩散趋势。分子密度分布从高到低的区域依次是：①主真空室第一段左端面至主真空室第一段内的气体挡板之间区域；②气体挡板至主真空室第三段内的前端冷凝板之间的区域；③前端冷凝板至主真空室第三段右端面区域。500 ms 以后，随着进气的结束，在低温泵冷凝吸附作用下气体分子密度迅速降低。

5.2 主真空室内三个区域的压力变化曲线

模拟进气量为 $6.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，进气时间为 500 ms，得到主真空室内三个区域的压力变化曲线，如图 4 所示。横坐标是压力分布采集时间，单位为 s；纵坐标是平均压力，单位为 Pa。

在进气 50 ms 后，主真空室内三段区域的平均压力达到平衡直至进气完成。

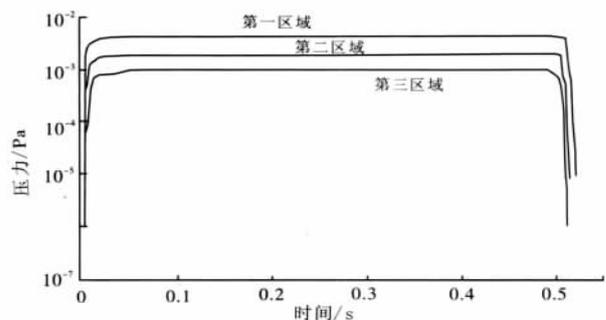


图 4 主真空室压力分布曲线

Fig.4 Pressure distribution in main vacuum chamber

5.3 气体挡板位置对主真空室内压力分布的影响

气体挡板是主真空室内第一区域和第二区域的分界面，图 5、图 6 分别是气体挡板位置为 300 mm、450 mm 时的压力分布曲线。

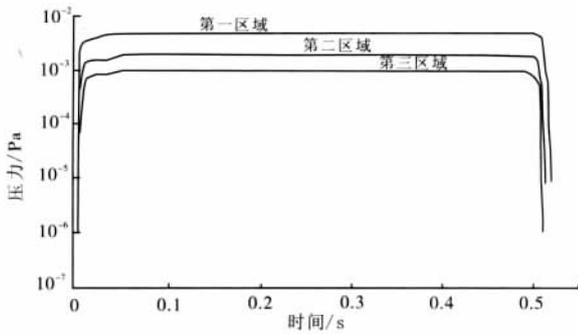


图 5 气体挡板位置为 300 mm 时的压力分布曲线

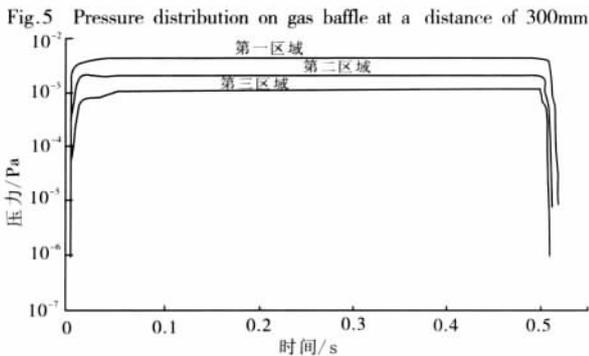


图 6 气体挡板位置为 450 mm 时的压力变化曲线

可知安装在主真空室第一段内的气体挡板,其位置主要影响第一区域和第二区域的压力分布。挡板位置为 300 mm 时,第一区域的压力可达 4.9×10^{-3} Pa。

5.4 前端冷凝板位置对主真空室内压力分布的影响

前端冷凝板是主真空室内第二区域和第三区域的分界面,图 7、图 8 分别是冷凝板位置为 150 mm、250 mm 时的压力分布曲线。

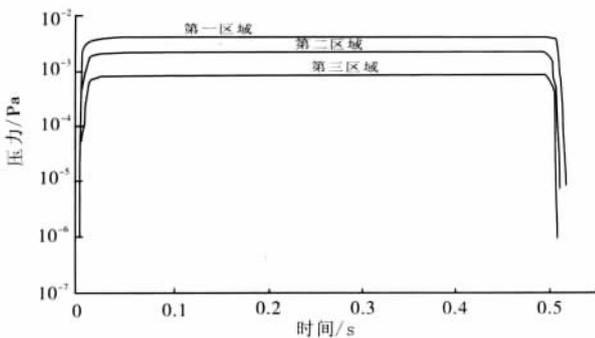


图 7 冷凝板位置为 150 mm 时的压力变化曲线

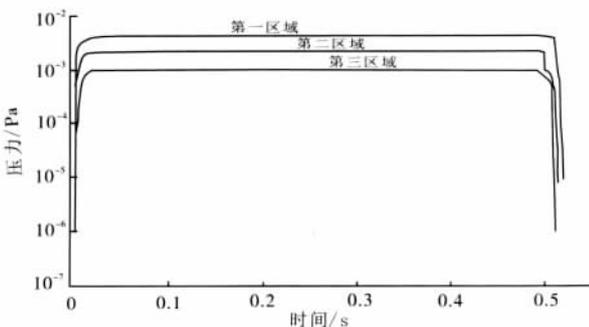


图 8 冷凝板位置为 250 mm 时的压力变化曲线

图 8 Pressure distribution on cryopanel at a distance of 250mm

分析可知:随着冷凝板左移,第三区域的压力减小,第二区域的压力增大。冷凝板位置的改变,减小了第二区域的体积,第二区域中的气体被低温冷凝板抽除的几率也变大了。

6 实验验证

运用美国原子能公司(GA)的 DIII-D 装置中的 Neutral Beam Injector (DIII-D NBI)实验数据来验证模拟计算结果的可靠性和实用性。图 9 是 DIII-D NBI 装置在冷凝板温度从 3.7 K 到 4.3 K,进气量为 $6.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 时,束线压力与低温冷凝板温度的关系曲线。

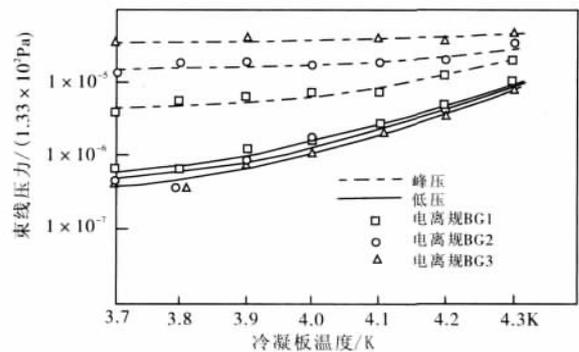


图 9 DIII-D NBI 装置的压力与低温冷凝板温度的关系图
Fig.9 Relationship between pressure in DIII-D NBI and temperature of cryopanel

图 9 中的点划线是进气过程中(脉冲周期内)束线压力的峰值。由横坐标 4.2 K 所对应的数值可得出:脉冲周期内,BG3 处的压力为 5.0×10^{-3} Pa (4.0×10^{-5} Torr),BG2 处的压力为 2.1×10^{-3} Pa,BG1 处的压力为 1.0×10^{-3} Pa。由此可知:模拟结果是可靠的,所建立的模型为 EAST NBI 的真空压力分布的研究提供了理论指导。

7 结论

采用 M-C 方法,运用 Matlab 软件对 EAST NBI 主真空室的压力分布计算进行编程,模拟计算出了主真空室的压力分布情况,使用 DIII-D NBI 的实验数据验证模拟运算结果,得出了以下结论:NBI 主真空室内压力分布呈现梯度性,总体上看,主真空室内三个区域的压力逐渐降低,呈沿束线方向下降的趋势;NBI 主真空室各处平衡压力在 1×10^{-3} Pa 至 5×10^{-3} Pa 之间,能够稳定保持 10^{-3} Pa 量级,满足 NBI 装置对主真空室压力分布的要求;运用 DIII-D NBI 的实验数据验证,结果表明模拟计算可靠有效;NBI 主真空室第一段的被抽气体量最大,其内部的后端冷凝板采用强迫流的结构形式,加大了低温冷凝吸附几

率,提高了抽气能力。

参考文献

[1] 国家自然科学基金委员会. 等离子体物理学 (第 1 版)[M].北京:科学出版社,1994:57.

[2] Jones T T *et al.* Tritium operation of the JET Neutral beam systems[J]. *Fusion Eng. Design*, 1999, 47:205-232.

[3] 达道安. 真空设计手册(第 3 版)[M].北京:国防工业出版社,2004:101-102.

[4] 谷田和雄. 真空系统工程[M].北京:机械工业出版社,1985:34-35.

[5] 陈丕瑾. 真空技术的科学基础[M].北京:国防工业出版社,1987:131-137.

[6] 尹增谦,管景峰,张晓宏. 蒙特卡罗方法及应用[J]. *物理与工程*, 2002, 12(3):45-49.

[7] 王绍良. 基于 M-C 方法的 NBI 实验装置真空压力分布研究及实验[D].合肥:合肥工业大学硕士学位论文,2008.

[8] 高本辉,崔素言. 真空物理[M].北京:科学出版社,1983:136-137.

[9] 秦允豪. 热学[M].北京:高等教育出版社,1999:54-77.

[10] 王娟,庄达民,欧阳峥嵘. 低温冷凝泵辐射挡板结构分析与热负荷计算[J]. *真空与低温*, 2005, 11(3):165-169.

[11] Benvenuti C, Blechschmidt D and Passardi G. Molecular and radiation transmissivities of chevrontype baffles for cryopumping[J]. *J. Vac. Sci. Technol*, 1981, 19(1):100-103.

[12] Kalashnik L I, Kislov A M *et al.* Calculation of the parameters of cryogenic vacuum chambers by the Monte Carlo method [J]. *Journal of Engineering Physics*, 1967, 13(6):479-484.

[13] Lillie R A, Gabriel T A, Schwenterly S W *et al.* Monte Carlo Simulation of Molecular Flow in a Neutral Beam Injector and Comparison with Experiment [J]. *Journal of Fusion Energy*, 1982, 2(2):161-171.

[14] 苏金明. Matlab6.1 实用指南[M].北京:电子工业出版社,2002.

[15] 刘卫国. MATLAB 程序设计教程[M].北京:中国水利水电出版社,2005.



吴江市永达石油化工有限公司为您提供 ——最优的产品、最真诚的服务

吴江市永达石油化工有限公司于一九九九年九月正式投资运行,主要产品为“日大”牌系列真空用油。产品由优质原料油经深度精制而成,产品各项性能指标均已达到国家质量标准要求,并已通过苏州市产品质量监督检验中心的多项检测,是替代进口的理想产品,得到上海曙光机械厂、广东创高真空工艺设备厂等用户的一致好评。

一、高级扩散泵油 粘度等级为 100;适用于获得 $10^{-4} \sim 10^{-8}$ kPa 高真空度的油扩散泵;达到 SH0529—92 标准要求,具有抽气速率高,极限压力低(可达 2.0×10^{-8} kPa),热、氧化安定性好等特点。

二、高级直联真空泵油 粘度等级分为 46、68 和 100 三种;适用于获得 10^{-5} Pa 真空度的各种旋片式真空泵;达到 SH0529—92 标准要求,具有粘度指数高(可达到 100 以上),抽气速率高,极限压力低,热、氧化安定性好等特点。

三、增压泵油 粘度等级为 46;适用于获得 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ kPa 真空度的增压泵;达到 SH011-015-88 标准要求,具有抽气速率高,热、氧化安定性好等特点。

四、1 A 高级真空泵油 粘度等级为 100;适用于各种普通机械真空泵使用,具有抽气速率高,极限压力低,热、氧化安定性好等特点。

本公司承诺以最优的产品、最真诚的服务迎接全国各地的客户前来洽谈!

总经理:朱永根 手机:13706256880

传真:(0512)63699572

地址:江苏省吴江市横扇镇 邮编:215224

<http://www.jsyongda.com.cn>

电话:(0512)63699159 63699572

E-mail: jsyongdaa@jsyongda.com.cn