

EAST 中性束注入角度的 NUBEAM 模拟研究

王进芳, 吴 斌, 胡纯栋

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要: 采用蒙特卡罗程序 NUBEAM 对 EAST NBI 上的中性束注入角度(中性束系统中心线与注入窗口轴线的夹角)进行了分析。讨论了中性束注入角度对电流驱动效率、加热效率和束的穿透功率的影响, 对 EAST NBI 系统选取了一个最优的注入角度。模拟结果表明: 对 EAST NBI 系统, 在典型的 EAST 实验参数和实际工程允许的范围内, 19.5° 是最优的注入角度。在此注入角度下, 可以通过增大等离子体密度的方法来进一步提高加热效率和电流驱动效率, 并减少束的穿透功率。

关键词: 中性束注入; 注入角度; 束穿透; 数值模拟

中图分类号: O532⁺.11; O532⁺.26; O411.3

文献标识码: A

1 引言

多年的理论和实验研究表明, 中性束注入(NBI)在加热和驱动等离子体电流的同时, 会激发了大量的模, 并影响它们的稳定性。80年代初中期, 采用中性束注入的投卡马克放电实验中观察到了鱼骨模不稳定性的存在^[1-3]; 2001年在NSTX上观察并证实了中性束的注入会产生CAE^[4]; 2005年观察到中性束的注入会引起TAE的稳定性的变化^[5]; 随后从理论、模拟和实验多方面全面分析了中性束锯齿稳定性的影响^[6-9], 同时在JIPP T-IIU上也观察到, 由于中性束的注入而产生了带状流^[10]。可见中性束注入会对托卡马克等离子体平衡、稳定和控制都会产生很大的影响, 因此在EAST建立4MW的中性束注入系统的同时, 必须对其进行仔细的模拟分析, 为正在建立的工程和以后的实验提供参考和借鉴。同时, 中性束的注入角度对加热和电流驱动以及所引起的不稳定性都有很重要的影响^[11-14]。2010年, 文献[15]对EAST NBI上的注入角度对加热和电流驱动的影响进行了分析, 此文的分析中采用了

解析的中性束模拟程序 NBEAMS^[16]。在本文中采用 PPPL 的蒙特卡罗模拟程序 NUBEAM^[17]来模拟分析了 EAST NBI 的注入角度的问题。

本程序所采用的平衡是从 EFIT 读取的, 在输运程序 ONETWO^[18]的运行环境下运行了中性束蒙特卡罗程序 NUBEAM。2010年, 程序 ONETWO 首次被用来模拟了 EAST 上的中性束注入情况^[19], 其中中性束模拟采用的是一个解析的模型, 且主要分析的是 EAST 上中性束注入后的输运特性。本文对中性束的模拟采用的程序 NUBEAM, 重点分析了中性束的加热、电流驱动和束的穿透等情况, 对中性束的分析更完整和全面。

2 EAST 中性束注入系统

为了达到高参数稳态运行的目标, 在 EAST 装置上计划建立 4MW 的中性束注入系统。EAST 上的两套 NBI 系统建成后的总体注入示意图如下图 1 所示。第一套 NBI 系统拟沿 EAST 装置 A 窗口注入。由于 EAST 装置环向场和极向场的超导线圈占

收稿日期: 2010-09-28; 修订日期: 2010-11-24

基金项目: 中国科学院知识创新工程青年人才领域专项前沿项目(075FCQ012C)和国家自然科学基金项目(10975160)

作者简介: 王进芳(1979-), 女, 湖北省荆门市人, 博士研究生, 主要从事束与等离子体相互作用的数值模拟研究。

据了大量的空间,目前第一套 NBI 系统所能达到的 NBI 的最大注入角度为 19.5°,即 NBI 的注入角度可以在 0~19.5°的范围内调节。这也是本文后面进行模拟时将要考虑的主要限制因素。

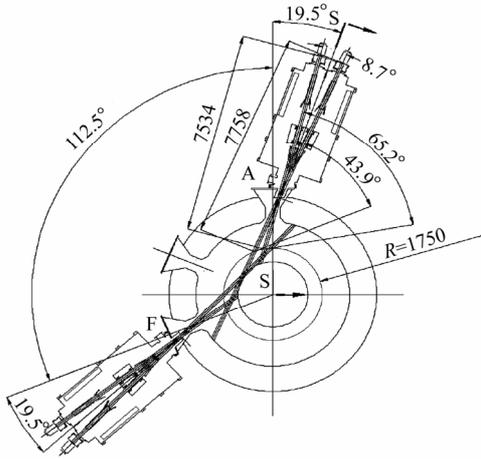


图 1 NBI-1 和 NBI-2 在 EAST 上的总体注入情况示意图

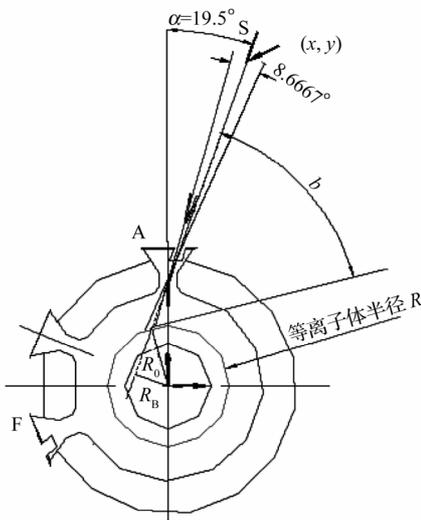


图 2 EAST NBI 注入角度、切向半径和螺旋角示意图

EAST 中性束的注入角度示意图如图 2 所示。在同向注入且给定束引出面的位置 (x, y) 、切向注入角度 α 和等离子体的大半径 R_0 时,由以下的公式可以得到束的切向半径 R_b 和束的螺旋角(束的注入方向与等离子体大半径的切向角) b , 即:

$$R_b = |y \sin \alpha - x \cos \alpha|$$

$$b = \arccos[(y \sin \alpha - x \cos \alpha) / R_0] \quad (1)$$

在给定引出面的位置(2.0745m, 8.8555m)、等离子体大半径为 196.5cm 和小半径为 43.3cm 时,得到的不同注入角度下束的切向半径和束的螺旋角列于表 1 中。

表 1 束的切向半径和螺旋角与注入角度的关系

注入角度/°	17.5	18.5	19.5	21.5	22.5	24.5
切向半径/cm	68.44	84.26	100.05	131.54	147.23	178.46
螺旋角/°	69.62	64.61	59.39	47.98	41.47	24.74

虽然现在的中性束装置有着各种不同的注入方式,但最基本的物理过程是一致的,即中性粒子注入到等离子体中后,与背景的电子和离子通过电荷交换或电离变成快离子,快离子通过与背景离子和电子的库仑碰撞而慢化,达到加热背景电子和离子,以及产生非感应电流的目的。根据束的注入角度和束能量的不同,捕获粒子的轨道有不同的类型。对于垂直注入,此时被捕获磁场快离子大部分是具有香蕉轨道的离子;对于切向注入,则大部分是通行离子。可见注入角度对快离子的分布有着很大的影响。由于注入的束能量很大,此时的高能粒子被离化成快离子后的初始运动方向与束的注入方向基本一致,因此可以把束的螺旋角作为快离子初始的螺旋角,故由式(1)可知注入角度对快离子的初始螺旋角有着很大的作用。

3 EAST NBI 不同注入角度的模拟分析

程序 NUBEAM 是一个采用蒙特卡罗(MC)方法模拟轴对称托卡马克中快粒子行为随时间变化的一个综合性程序,该程序考虑了中性束注入及聚变反应产生的多种快粒子成分,自共轭地处理经典导向中心漂移轨道以及在快离子慢化过程中的碰撞和原子物理过程。它可以用来模拟计算托卡马克等离子体中由于中性束注入的功率沉积、驱动电流、动量运输、添料等其它一些剖面。

本文从 EFIT 读取的初始平衡与文献[19]中的平衡是相同的。平衡时的环向电流 $I=1\text{MA}$, 环向磁

场 $B_0=3.5\text{T}$, 大半径 $R_0=196.5\text{cm}$, 小半径 $a=43.3\text{cm}$, 如图 3 所示。初始的电子密度、电子温度和离子温度都是类抛物线分布的, 其中, $n_e(0)=5\times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, $n_e(a)=1\times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, $T_e(0)=1.5\text{keV}$, $T_e(a)=0.2\text{keV}$, $T_e=T_i$ 。初始电子密度剖面如下图 4 所示。假定杂质是碳, 且有效电荷数 Z_{eff} 在整个径向方向是均匀的, 即 $Z_{\text{eff}}=2$ 。

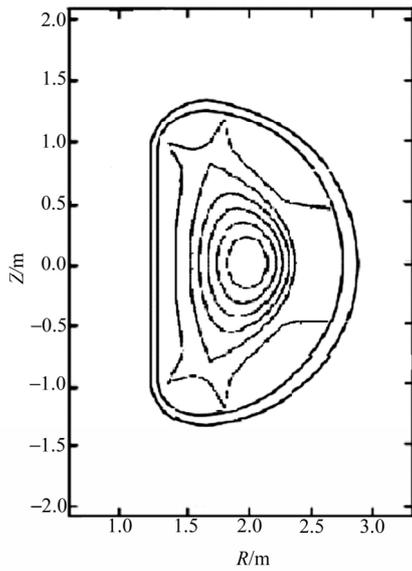


图 3 模拟所选用的初始 EFIT 平衡位形

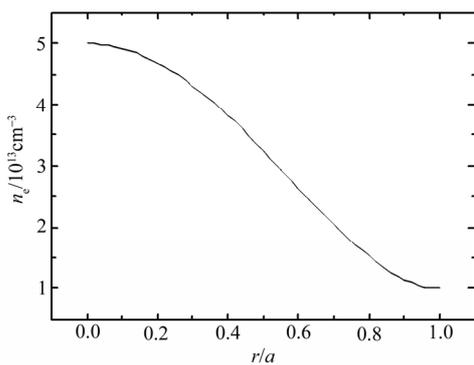


图 4 初始的电子密度剖面

根据以上的初始平衡以及初始的密度和温度剖面, 在束能量为 50keV (2MW) 同向注入的情况下, 通过调整不同的注入角度, 给出了在不同注入角度

的功率沉积剖面和驱动电流剖面, 如图 5~7 所示。其中, 横坐标为 $\rho = \sqrt{\phi_{\text{tot}} / \pi B_0}$ (归一化环向磁通的平方根, 近似为归一化的小半径)。在不同的注入角度下, 2MW 的束功率在各个不同部分的沉积和损失以及驱动电流的大小分别列于表 2 和表 3 中。

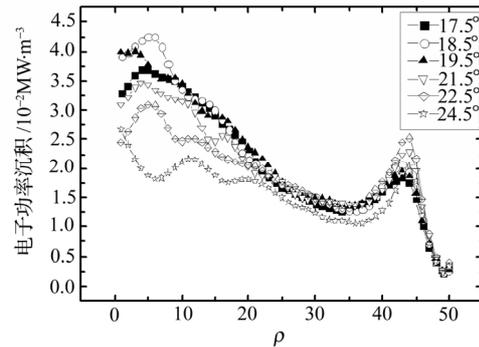


图 5 不同注入角度下束在电子上的功率沉积剖面

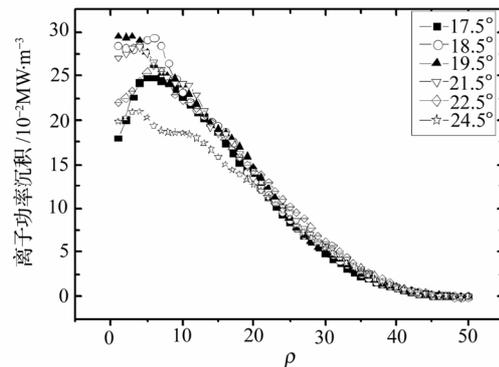


图 6 不同注入角度下束在离子上的功率沉积剖面

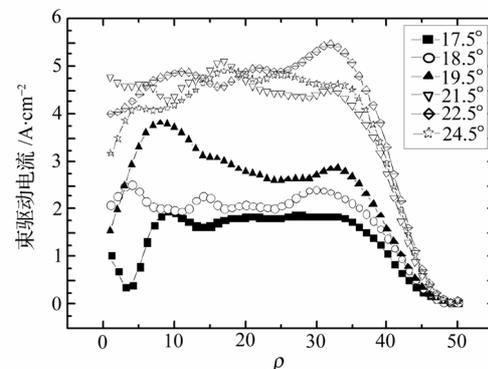


图 7 不同注入角度下束的驱动电流剖面

表 2 不同注入角度下 2MW 的束功率在不同部分的沉积和损失

注入角度/ $^{\circ}$	电子功率 沉积/MW	离子功率 沉积/MW	总加热 功率/MW	电荷交换损 失功率/MW	穿透功率 /MW	轨道损失 功率/MW	热化功率 /MW	旋转功率 /MW
17.5	0.19	0.67	0.86	0.41	0.45	0.00	0.22	0.05
18.5	0.19	0.71	0.90	0.38	0.42	0.00	0.23	0.07
19.5	0.19	0.71	0.91	0.38	0.38	0.00	0.20	0.13
21.5	0.19	0.72	0.92	0.41	0.15	0.00	0.21	0.32
22.5	0.19	0.74	0.93	0.40	0.03	0.00	0.20	0.48
24.5	0.15	0.63	0.79	0.30	0.01	0.00	0.10	0.81

表 3 不同注入角度下的驱动电流

注入角度/ $^{\circ}$	17.5	18.5	19.5	21.5	22.5	24.5
束驱动电流/kA	11.84	14.76	18.93	30.15	34.07	31.42

表 2 中的总加热功率指的是沉积在电子和离子上的功率之和；电荷交换损失功率指的是快离子在慢化的过程中再次被中性化变成中性原子所导致的功率损失；穿透损失指的是束粒子注入等离子体后没有被完全离化而打到注入窗口对面的器壁上所导致的功率损失；轨道损失指的是快离子没有被完全约束而打到器壁或者限制器上导致的损失；热化功率指的是快离子在慢化的过程中能量下降到背景离子温度的 3/2 后被当成热化离子源项所带有的能量；旋转功率主要是由于中性束注入导致等离子体的旋转所带有的能量。

由图 5、图 6 和表 2 可知，当注入角度小于 22.5° 时，注入角度对束的沉积的影响不是很明显，这与 Rome^[20]证明的切向半径对束的沉积的影响不大的结论是一致的，但随着注入角度的增大也有微小的增大趋势。由图 7 可知，注入角度对驱动电流的影响较大，由表 3 可知，当注入角度在一定范围内增大时，驱动电流也随之增加，但是注入角度也不能无限的增大。当注入角度超过 22.5° 时候，由图 7、表 2 和表 3 可知，此时的加热效率和驱动电流的值都会下降。这主要是由本底等离子体本身的特征决定的，由表 1 可知，当注入角度为 22.5° 时，此时的切向半径(147.2265cm)最接近等离子体的大半径(196.5cm)与等离子体小半径(43.3cm)的差值，束在等离子体中经过的距离相对最长，束被等离子体吸收的几率也是最大的，所以此时的加热效率也是最

好的。所以理论上的中性束最好的加热效果是选择适当的注入角度使得切向半径和等离子体大半径与小半径的差值相当。

对驱动电流，由快离子产生的电流密度为^[21]：

$$j_{b0} = Z_b n_b e V_{b0} \xi_0 I \quad (2)$$

式中， I 为与离子慢化过程有关的函数； $\xi_0 = \cos \theta = V \cdot B / |VB|$ 为离子速度与磁力线夹角的余弦； n_b 为高能离子密度； Z_b 为束成分的电荷数； V_{b0} 为束的初始速度。由于束的能量很大，所以 $\xi_0 = \cos b$ ，其中 b 为螺旋角。由余弦函数的基本性质，当 $b > 45^{\circ}$ 时候，随着 b 的减小， $\cos b$ 增大很快，当束的其它量都基本不变时，快离子的电流密度 j_{b0} 也随之增大。对于大部分的托克马克当 $v_b \ll v_e$ 即 $v_b^* = v_b / v_e \rightarrow 0$ 时，中性束驱动的总电流 j_b 与快离子驱动的电流 j_{b0} 的比值^[22]：

$$F = j_b / j_{b0} \rightarrow (1 - 1/Z - 1.2v_b^{*2}/Z) \rightarrow (1 - 1/Z) \quad (3)$$

式中， Z 为背景等离子体的有效电荷数。当背景等离子体固定， j_{b0} 增大时，由式(3)可知，总的束驱动电流密度 j_b 也随之增大。因此，随注入角度增大，螺旋角 b 减小，束驱动电流随之增大。所以，要达到较好的驱动电流，注入角度应尽可能增大。

在目前 EAST NBI 上工程所允许的范围内，束的注入角度应为 19.5° 较为合适，此时的束的电流驱动和加热效果都是工程范围内最好的。

在束的注入角度 19.5° 、束能量为 50keV(2MW) 度的情况下，分别模拟了在高密度 $[n_e(0) = 5 \times 10^{13}]$

cm^{-3} , $T_e(0)=1.5\text{keV}$]和低密度[$n_e(0)=2.5\times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, $T_e(0)=1.5\text{keV}$]两种不同背景等离子体密度情况下的功率沉积和驱动电流剖面,如图 8 和图 9 所示。此时 2MW 的中性束的沉积和损失以及总的驱动电流列于表 4 中。

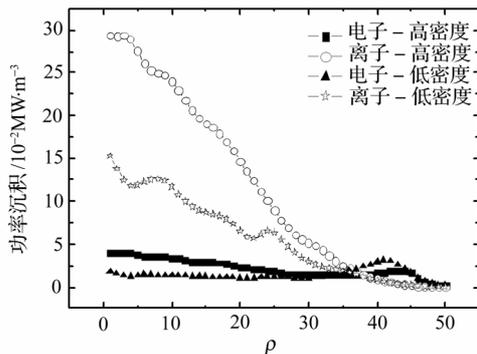


图 8 固定角度 19.5°时不同密度的功率沉积剖面

由图 8 可知,当背景等离子体的密度增大时,束的沉积功率随之增大。这主要是因为当密度增大

的时,束与背景等离子体碰撞截面随之增大,束被吸收的概率增加,加热效率也就随之增加。由表 4 可知,在两种不同的背景等离子体密度下,束的驱动电流总值的大小基本上是不同的,但是由图 9 可知,随着等离子体密度的增大,驱动电流的中心向等离子体中心移动,这对等离子体来说是更稳定的。因此,要达到较好的加热和电流驱动效率,应尽量增加等离子体密度。

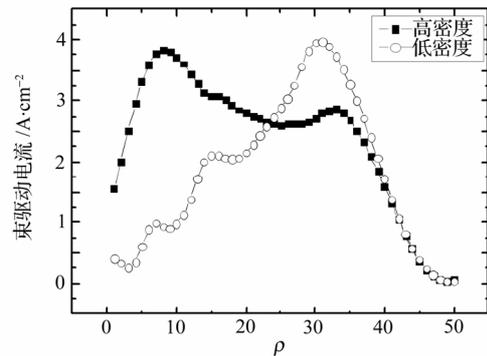


图 9 固定角度 19.5°时不同密度的驱动电流剖面

表 4 注入角度 19.5°、注入功率 2MW 下束的沉积、损失和总的驱动电流

密度	电子功率沉积/MW	离子功率沉积/MW	总加热功率/MW	电荷交换损失功率/MW	穿透功率/MW	轨道损失功率/MW	热化功率/MW	旋转功率/MW	束驱动电流/kA
高密度	0.19	0.71	0.91	0.38	0.38	0.00	0.20	0.13	18.93
低密度	0.17	0.38	0.55	0.44	0.75	0.00	0.14	0.10	18.87

在保持束的注入角度(19.5°)、束的功率(2MW)、背景等离子体密度和温度[$n_e(0)=5\times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, $T_e(0)=1.5\text{keV}$]的情况下,通过调整不同的束的能量,模拟了在不同束能量下的功率沉积剖面 and 驱动电流剖面,如图 10~12 所示。2MW 的中性束的沉积和损失以及总的驱动电流列于表 5 中。

由图 10、图 11 和表 5 可知,在束功率不变的情况下,束的加热效率随着束能量的增大而减小。这主要是由于当束的功率不变的情况下束的能量增大时,束的速度也随之增大。单位长度上中性粒子被电离的几率 $\alpha^{[23]}$ 为:

$$\alpha = n_i\sigma_i + n_i\sigma_{ch} + n_e\langle\sigma_e v_e\rangle/v_b \quad (4)$$

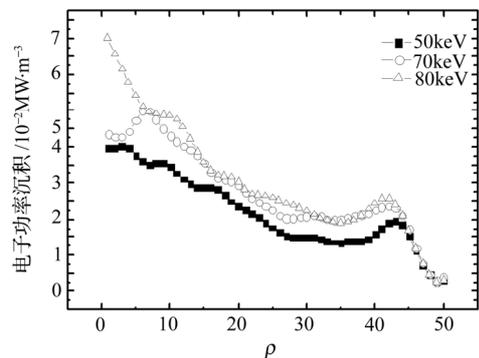


图 10 不同注入能量时束在电子上的功率沉积剖面

式中, n_e 和 n_i 分别为等离子体电子和离子的密度;

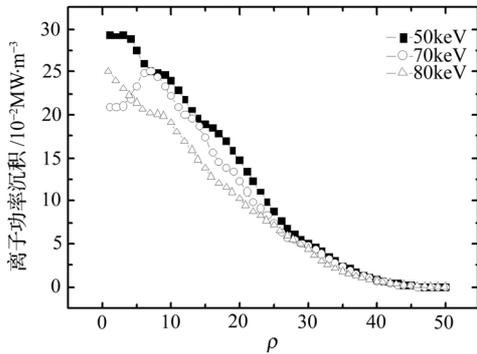


图 11 不同注入能量时束在离子上的功率沉积剖面

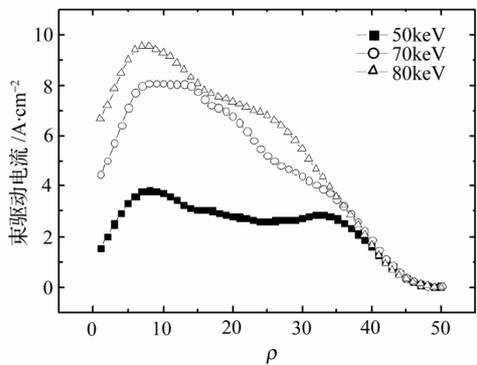


图 12 不同注入能量下束的驱动电流剖面

σ_i 为离子引起的电离截面； σ_{ch} 为电荷交换截面； v_e 和 v_b 分别为电子运动速度和中性束运动速度； $\langle \sigma_e v_e \rangle$ 为对麦克斯韦平均后电子电离系数。由式(4)

可知，当其它条件几乎不变时，束被电离的几率随之束的速度的增大而减小，即束被吸收的概率也随之减小，因此束的加热效率也随之减小。由表 5 可知，随着束能量的增大，驱动电流的值之增大。这可由式(2)可知，当束能量增大而其它参数不变时，快离子驱动电流随之增大。对于大部分托克马克，当背景等离子体固定时，由式(3)可知，总的束驱动电流密度也随之增大。因此，驱动电流随着束能量的增大而增大。

最后，对束的穿透功率进行一定的分析和总结。由不同注入角度下束的沉积和损失表(表 2)可知，随着注入角度在一定范围内的增大，束的穿透功率随之减小。这主要是因为随着注入角度在一定范围内的增大，束的切向半径越接近等离子体的大半径和小半径的差值，因此束在等离子体中经过的距离也就越大，束被吸收的概率也就越大，束的穿透也随之减少。由不同密度下的束的沉积和损失表(表 4)可知，束的穿透功率随着等离子体密度的增大而减小。这主要是因为密度越大，束总的被离子化截面也就越大，束被吸收的概率也就越大，束的穿透就越小。由不同能量下的束的沉积和损失表(表 5)可知，束的穿透随着束能量的增大而增大。这主要是因为束的能量越大时，束的速度也随之增大。由式(4)可知，束被电离的概率随之减少，束被吸收的概率也减少，束的穿透随之增加。

表 5 不同的束能量下 2MW 的束功率的沉积和损失情况

束能量/keV	电子功率沉积/MW	离子功率沉积/MW	总加热功率/MW	电荷交换损失功率/MW	穿透功率/MW	轨道损失功率/MW	热化功率/MW	旋转功率/MW
50	0.19	0.71	0.91	0.38	0.38	0.00	0.20	0.13
70	0.25	0.63	0.88	0.44	0.53	0.01	0.12	0.09
80	0.26	0.54	0.80	0.44	0.59	0.01	0.08	0.05

4 总结

采用蒙特卡罗中性束模拟程序 NUBEAM 模拟了中性束的注入角度对中性束加热和电流驱动的影响以及在注入角度固定的情况下不同的背景等离子体密度和束能量对束加热和电流驱动的影响，对束的穿透进行了分析和总结。模拟结果表明，如果考虑到实际的工程问题，EAST NBI 束注入角度

选取 19.5°是比较好的，此时具有较好的加热和电流驱动效果，且束的穿透也是相对较小的。在注入角度一定时，为了到达更好的加热、电流驱动效果和更小的束穿透，应该尽量增大背景等离子体的密度；在束功率一定的情况下，束的能量并不是越大越好，当束能量增大时，虽然能驱动更大的电流密度，但也会增大束的穿透，使得束的加热效率降低。

感谢 PPPL 项目^[24]允许 NUBEAM 程序的使用,感谢周登研究员、任启龙博士和李国强博士在本文的模拟过程中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Mcguire K, Goldston R, Bell M, et al. Study of high-beta magnetohydrodynamic modes and fast-ion losses in PDX [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, 50(12): 891–895.
- [2] Heidbrink W W, Bol K, Buchenauer D, et al. Tangential neutral-beam-driven instabilities in the Princeton Beta Experiment [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 57(7): 835–838.
- [3] Strachan J D, Grek B, Heidbrink W, et al. Studies of energetic ion confinement during fishbone events in PDX [J]. *Nucl. Fusion*, 1985, 25(8): 863–880.
- [4] Fredrickson E, Gorelenkov N, Cheng C Z, et al. Observation of compressional Alfvén modes during neutral-beam heating on the National Spherical Torus Experiment [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87(14): 145001.
- [5] Gorelenkov N N, Berk H L, Budny R V. Beam anisotropy effect on Alfvén eigenmode stability in ITER-like plasmas [J]. *Nucl. Fusion*, 2005, 45(4): 226–237.
- [6] Chapman I T, Pinches S D, Graves J P, et al. The physics of sawtooth stabilization [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2007, 49(12): 385–394.
- [7] Chapman I T, Pinches S D, Appel L C, et al. Modeling sawtooth stabilization by energetic ions from neutral beam injection [J]. *Phys. Plasmas*, 2007, 14(7): 070703.
- [8] Chapman I T, Pinches S D, Koslowski H R, et al. Sawtooth stability in neutral beam heated plasmas in TEXTOR [J]. *Nucl. Fusion*, 2008, 48(3): 035004.
- [9] Chapman I T, Jenkins I, Budny R V, et al. Sawtooth control using off-axis NBI [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2008, 50(4): 045006.
- [10] Hamada Y, Watari T, Yamagishi O, et al. Change of zonal flow spectra in the JIPP T-IIU tokamak plasmas [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99(6): 065005.
- [11] Okamura S, Hanatani K, Nishimura K, et al. Heating experiments using neutral beam with variable injection angle and ICRF waves in CHS [R]. Würzburg, 1992.
- [12] Taguchi M. Bootstrap current in NBI heated plasmas [J]. *Nucl. Fusion*, 1996, 36(5): 657–667.
- [13] Na Yong Su, Sips A C C, Garbet X, et al. Modelling of the current profile control with neutral beam injection at ASDEX Upgrade and comparison to JET [R]. Russia: Petersburg, 2003.
- [14] Gorelenkov N N, Cheng C Z, Fredrickson E. Compressional Alfvén eigenmode instability in NSTX [J]. *Nucl. Fusion*, 2002, 42(8): 977–985.
- [15] Wang Jinfang, Wu Bin, Hu Chundong. Simulation on heating and current drive using neutral beam injection with variable injection angle on EAST [J]. *Plasma Science and Technology*, 2010, 12(3): 289–294.
- [16] Mandrekas J. Physics models and user's guide for the neutral beam module of the super-code [R]. United States: Atlanta, 1992.
- [17] Pankin A. The tokamak Monte Carlo fast ion module NUBEAM in the national transport code collaboration library [J]. *Computer Physics Communications*, 2004, 159(3): 157–184.
- [18] Pfeiffer W W, Davidson R H, Miller R L, et al. ONETWO: A computer code for modeling plasma transport in tokamaks [R]. San Diego: General Atomics Company, 1980.
- [19] Zhou D, John H S. Transport modelling for EAST with LHRF and NBI [J]. *Plasma Science and Technology*, 2009, 11(4): 417–421.
- [20] Rome J A, Callen J D, Clarke J F. Neutral-beam injection into a tokamak-fast ion spatial-distribution for tangential injection [J]. *Nucl. Fusion*, 1974, 14(2): 141–151.
- [21] 石秉仁. 磁约束聚变原理与实践 [M]. 北京: 原子能出版社, 1999. 207.
- [22] Cordey J D. A kinetic theory of beam-induced plasma currents [J]. *Nucl. Fusion*, 1979, 19: 249–259.
- [23] Wesson J. Tokamaks [M]. Clarendon Press, 1997. 222.
- [24] NTCC module library. [Http://www.pppl.gov/NTCC](http://www.pppl.gov/NTCC) [Z].

Simulation of neutral beam injection on EAST by NUBEAM

WANG Jin-fang, WU Bin, HU Chun-dong

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031)

Abstract: The role of the injection angle (the angle between the axis of the neutral beam injection system and the center of the injection window) on the neutral beam current drive, heating efficiency and beam shine-through power are studied with NUBEAM code to explore the optimum injection angle for the EAST NBI system. From the simulation results, under the limitation of the actual project, it is indicated that an injection angle of 19.5° is the optimum for EAST with its typical experimental parameters. With this injection angle, the increase of the plasma density can improve the current drive and heating efficiency and reduce the beam shine-through power.

Key words: Neutral beam injection; Injection angle; Beam shine-through; Simulation