**EAST托卡马克中性束快离子输运与稳态分布的数值模拟**

胡友俊1, 徐颖峰1, 郝保龙1, 李国强1, 黄娟1, 李莉2, 何开洋1, 叶磊1, 肖小涛1, 王丰3 潘成康1, 许永健1, 吴斌1, 刘钺强4, 孙有文1

1. 中国科学院等离子体物理研究所，合肥 230031

2. 东华大学理学院, 上海，201620

3. 大连理工大学物理学院, 大连 116024

4. General Atomics, PO Box 85608, San Diego, CA 92186-5608, USA

**摘要:**

为配合自主集成输运模拟程序的开发，我们开发了一套模拟EAST中性束注入、电离、及相应的快离子碰撞输运的数值程序TGCO, 并应用这套程序研究了有共振磁扰动（RMP）情况下的快离子边界损失、热化、及快离子稳态相空间分布。这套程序由两个主要模块组成。第一个模块模拟中性束的持续注入及中性原子的电离过程，第二个模块模拟快离子的碰撞输运、热化、边界损失和快离子稳态相空间分布。我们还同时开发了另一个程序GYCAVA，模型与TGCO稍有差别，功能类似。 作为独立的数值实现，两个程序之间的相互校验提高了程序的可靠性。本报告内容包含了这两个程序的结果。

模拟从中性束系统的加速电极开始，考虑束聚焦效应及束发散效应。（从引出电极出来的快离子在中性化室的中性化过程没有被直接模拟，而是借助中性化效率的经验公式来描述。）中性束进入托卡马卡等离子体后的电离过程是用蒙特卡洛方法直接模拟。模拟出的穿透损失与快离子的初始空间分布与NUBEAM程序的计算结果一致，验证了新程序的可靠性。

托卡马克等离子体的二维磁平衡由平衡重构程序EFIT给出，三维的真空共振磁扰动(RMPs)由TGCO程序根据线圈电流计算，等离子体对RMPs的响应磁场由MHD程序MARS-F计算。模拟的空间区域包含最外闭合磁面与第一壁之间的区域，并使用真实的第一壁形状。使用导心漂移模型推测离子位置，在判断离子是否碰壁时，考虑离子位置与导心位置的距离。同时实现了一种基于Boris算法的全轨道积分器。该全轨道算法计算出的损失份额与上述用导心漂移模型计算出的结果一致，从而验证了两种方法的可靠性。快离子与背景等离子体的碰撞由蒙特卡罗算法实现，包含速度慢化、能量扩散、角度散射效应。该碰撞模型计算出的稳态快离子分布与解析慢化分布一致，验证了碰撞模型数值实现的正确性。

在中性束持续注入下，快离子分布在慢化时间尺度(约100ms)可以到达稳态。 我们比较了无RMP与有RMP两种情况下的快离子稳态分布，这些分布包括快离子的能量分布，pitch-angle分布，快离子密度与压强的径向分布，快离子驱动的电流的径向分布等。模拟结果表明共振磁扰动增强快离子输运，使得饱和快离子储能下降约10%. 同时中性束电流驱动效率也下降（模拟中，快离子电流直接由蒙特卡洛粒子方法计算，但电子屏蔽电流是用新经典理论的经验公式计算）。对RMP作用下的快离子边界损失也进行了细致研究。本报告仅考虑环向模数n=1的RMP。模拟结果表明快离子损失份额与RMP线圈电流成线性关系。对比磁力线的庞加莱截面与快离子轨道的庞加莱界面，我们发现轨道损失的增强主要是由于磁力线随机引起的轨道随机效应。 损失离子在低场侧第一壁产生的热负荷有显著的n=1分量，其峰值热负荷的环向位置与RMP线圈的上下相位差密切相关。此外，RMP引起的轨道随机效应与碰撞输运有协同效应：pitch-angle散射与RMP引起的轨道随机效应共同作用下的快离子边界损失大于二者单独作用下的损失之和。等离子体对RMP的响应可以增强快离子损失也可以降低损失，具体情况与上下线圈的相位差有关。