

文章编号: 1001-2486 (2001) 03-0021-04

磁镜场约束等离子体的粒子模拟*

刘 列, 刘永贵, 杨建坤

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 用 PIC 粒子模拟的方法描绘具有初始速度分布的等离子体在磁镜场中的运动状态, 得出等离子体在磁镜场中的运动轨迹图, 形象表现了磁镜场对等离子体的约束作用, 表明用 PIC 粒子模拟方法探索在磁镜场中等离子体运动的物理过程和规律是可行的和有效的。

关键词: 粒子模拟; 等离子体; 磁镜

中图分类号: TN015 文献标识码: A

Particle Simulation of the Magnetic Mirror Field Confining Plasma

LIU Lie, LIU Yong-gui, YANG Jian-kun

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The motion of the plasma with an initial velocity distribution in magnetic mirror field is described by using PIC particle simulation methods, and the particle tracks of the plasma motion in magnetic mirror field can be obtained. It is proved that the magnetic mirror field can confine the motion of plasma and PIC particle simulation method is feasible and effective to simulate the physical process of the plasma in the magnetic mirror field.

Key words: particle simulation; plasma; magnetic mirror

磁约束是受控热核聚变研究一开始时就想到的方法, 也是目前主要的约束手段之一。所谓磁约束, 就是利用磁场与等离子体粒子间的相互作用把高温等离子体约束在一定区域, 使其进行核聚变反应的方法。最简单的约束等离子体的磁场设计是磁瓶。它是一种直线型开端装置, 与环型闭合装置 Tokamak 有着本质的差别^[1], 这一差别给磁镜带来如下特点:

- (1) 在不损失平衡和稳定的情况下, 能作高 β 运动;
- (2) 稳态运行是磁镜的固有性质;
- (3) 相对封闭系统而言, 磁镜可通过镜喉自然的排除灰尘和杂质;
- (4) 磁镜反应器的主要能量释放单元将是一个带有均匀磁场的简单螺线管, 这在工程上是非常重要的;
- (5) 开端装置能方便地有效利用以荷电粒子形式出现的部分聚变能。

1 原理

磁镜是通过带电粒子在缓变磁场中的磁矩守恒效应来约束等离子体的。在理论上可以证明^[2], 当磁场 B 随时间和空间缓慢变化时, 磁矩大小 μ_B 等于在垂直于磁场方向粒子的动能 $W_{\perp} = mV_{\perp}^2/2$ (V_{\perp} 为粒子速度在垂直于磁场方向的分量) 与磁场 B 的比值, 而对于某一粒子来说, 其磁矩大小 μ_B 为一常数, 即

$$\mu_B = \frac{W_{\perp}}{B} = \text{常数}$$

由此可知, 当带电粒子从弱磁场区域向强磁场区域运动时, 由于磁场 B 的不断增大, W_{\perp} 也不断增大。由于磁场力与粒子的运动速度始终垂直, 磁场力对粒子不做功, 粒子的总能量 $W = W_{\perp} + W_{\parallel}$ 保持守恒 (式中 $W_{\parallel} = mV_{\parallel}^2/2$ 是粒子在平行磁场方向的动能), 故随着 W_{\perp} 增大, W_{\parallel} 将逐渐减小,

* 收稿日期: 2000-11-10
作者简介: 刘列 (1960-), 男, 副教授, 博士生。

如果磁场 B 强到使 $W_{\perp} = W$, 则 $W_{\parallel} = 0$, 也就是 $V_{\parallel} = 0$, 这时粒子不再沿磁力线方向运动, 在 $F_{\parallel} = -\mu_B \nabla B$ 的作用下 (式中 ∇B 是磁场梯度在轴向的分量), 粒子开始从强磁场区域向弱磁场区域运动, 形成“反射”。如图 1 所示。

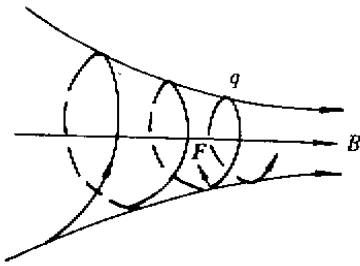


图 1 非均匀磁场对运动带电粒子的作用
Fig.1 Effect of the inhomogeneous magnetic field on the moving charged particles

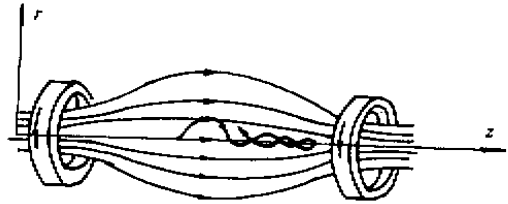


图 2 简单磁镜结构示意图
Fig.2 Schematic of the simple magnetic mirror

简单磁镜有两个相距一定距离、电流方向相同的同轴线圈组成, 它可以产生一个中间弱两端强的磁场, 其结构见图 2。在这一磁场的作用下, 平行于磁场方向的速度分量不太大的带电粒子将被约束在磁场区域内来回运动而不能逃脱。这种磁场分布可以对带电粒子进行约束, 形象的称之为磁镜, 本文粒子模拟模型就基于此物理结构。

2 模拟结果

根据上述原理和图 2 的结构, 设磁镜场长度 60 cm, 磁镜半径 6 cm 和等离子体密度 $3 \times 10^{12}/\text{cm}^3$, 密度分布是均匀的, 处于热平衡状态, 如图 3 所示。

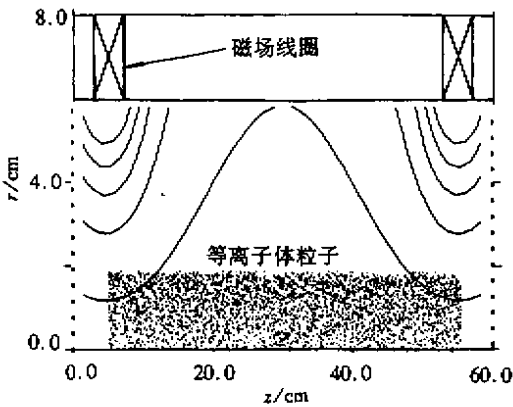


图 3 磁镜内的磁场和初始时刻粒子分布
Fig.3 Distributions of the magnetic field and the initial particles in magnetic mirror

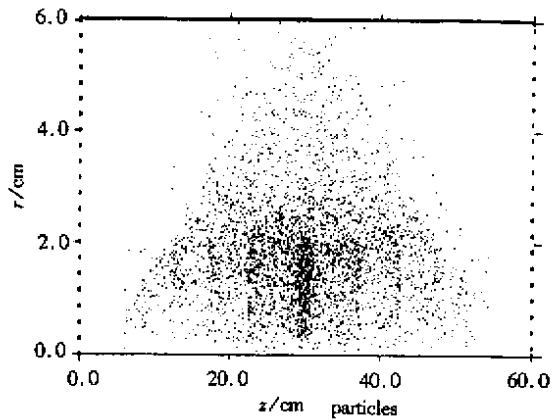


图 4 一定时间后粒子的空间分布
Fig.4 Spatial distributions of the particles after a certain time

为了在短时间内快速得到物理图像, 人为提高了等离子体的温度和磁镜场强度。实际物理图像随着相互作用时间的增大, 与这里描绘的图像是一致的。使用 $2\frac{1}{2}$ 维 PIC 程序模拟了磁镜场对等离子体的约束过程^[3]。模拟结果清晰地给出了等离子体在 r 方向和 z 方向粒子分布的变化。在 r 方向上, 由于结构限制, 仍保持为轴对称分布; 在 z 方向上, 由于磁镜效应的影响, 在中心位置处, 出现粒子的数目最大, 靠近边缘部位粒子的数目较少, 如图 4 所示。图 5 为粒子在 z 方向和垂直于 z 轴方向的速度分布情况。从图中看出, 在 z 方向上部分粒子围绕几何中心位置往返运动, 这部分粒子主要为电子。离子由于

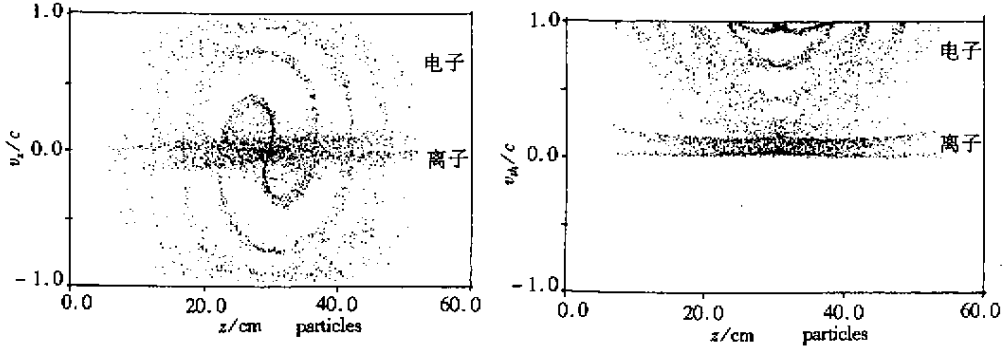


图 5 一定时间后等离子体粒子速度分布图

Fig.5 Velocity distributions of the particles after a certain time

质量较大,运动的加速度和速度都较小,这种运动效果不明显。垂直于 z 轴方向的速度定义为 $v_{tr} = \sqrt{v_r^2 + v_{\theta}^2}$,从图中看出为一种近似的螺旋运动,半径和螺距都将不断发生变化。两者综合作用的结果是:当粒子具有一定速度向磁场较强处螺旋前进时,磁场力有一个和沿 z 轴前进方向相反的分量,这一分量最终使粒子的前进速度减小到零,并继而沿反方向前进,使粒子发生“反射”,这样磁场就把高温等离子体限制在一定空间区域内,不为零的那一小部分,不被磁镜场“反射”回磁镜中心,而是沿磁力线逃逸掉,形成损失锥,等离子体速度分布为损失锥形是磁镜约束的一个重要特征。

为了更进一步说明粒子在磁镜中的运动情况,跟踪 6 组有代表性的粒子运动轨迹,图 6 给出这 6 组粒子在 r 方向和 z 方向上的位置随时间变化。从图中看出,带电粒子在磁场中的位置呈现周期性变化,粒子作螺旋运动,但不同粒子的螺旋运动半径和螺距各不相同。同时看出,不论在 r 方向或 z 方向,其位置都被限制在所给定的区域内,在该区域内来回“振荡”,形成“反射”。

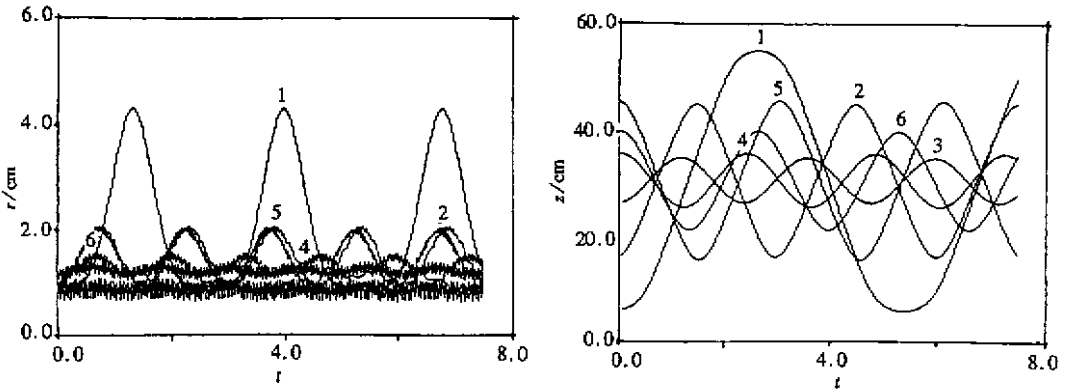


图 6 r 方向和 z 方向等离子体粒子位置随时间变化曲线

Fig.6 Variations of the particles v. s. time in the r and z directions

图 7 为粒子的动量随 z 的变化(即速度的变化),图中展示了其变化呈现出对称性,正是这种对称性,粒子可以在运动一定时间后,返回到起始位置,即粒子的运动轨迹是闭合的,即粒子被约束在该磁场空间内进行运动。

3 结论

磁镜装置具有 β 值高,稳态运行和结构简单等特点,正是这些特点推动了磁镜的研究和发展,

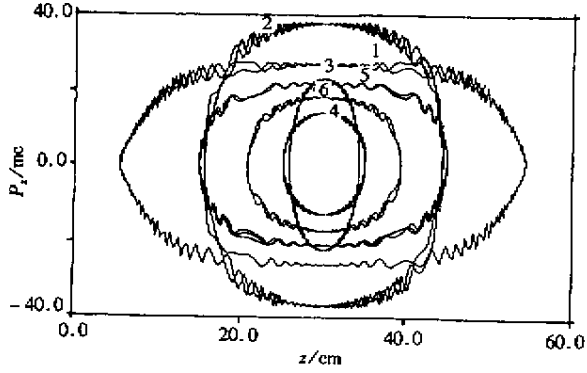


图7 等离子体粒子动量随 Z 变化轨迹

Fig.7 Variations of the particle momentum v. s. z

PIC 粒子模拟的方法被广大科技工作者广泛使用,用 *PIC* 粒子模拟的方法探索在磁镜场中等离子体运动的物理过程和规律,比一般理论分析可给出更直接更形象的物理图像。

参考文献:

- [1] 张建德. ECRH 产生晃荡电子形成串级磁镜热垒的研究 [D]. 中国科学院等离子体物理研究所, 1992.
- [2] 李银安. 受控热核聚变 [M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1994.
- [3] 蒋伯诚. 计算物理中的谱方法 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988.

