文章编号：1000-5773(2003)04-0326-04

等离子体断路开关的一维磁流体力学数值模拟*

王刚华，陈 林，胡熙静

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：采用磁流体力学的方法对等离子体端路开关进行了一维数值模拟，通过对给定的进入等离子体的电流波形模型的计算，给出了轴向上等离子体的运动及其不同时刻的密度分布，分析了磁场在等离子体内部的异常渗透过程，指出考虑 Hall 效应是产生这一异常现象的最为主要的因素。

关键词：磁流体力学；等离子体断路开关；Hall 效应

中图分类号：O361.3 **文献标识码**：A

1 引 言

等离子体断路开关是电感触能脉冲功率装置的关键部件之一，常用于 Z 箍缩、加速器等实验装置中，其工作性能的好坏极大地影响着脉冲功率装置的功率和效率[1]，因此，等离子体断路开关的研究在脉冲高功率技术研究中占有相当重要的地位。等离子体开端开关的导通过程，包含有十分复杂的物理现象，如等离子体内部磁场的异常渗透现象、磁压缩导致的等离子体向负载端的漂移、等离子体本身的热膨胀等等。关于这一问题的数值模拟研究主要由粒子模拟[2]和磁流体动力学两种方法，在国外这两种方法均有相关报道。粒子模拟算法对于电子的密度分布等能给出较好结果，而磁流体力学方法则对于磁渗透等问题能给出更为直接合理的解释[3]。

2 一维柱坐标 Z 向磁流体力学方程组

质量守恒方程

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}=\rho\frac{\partial u}{\partial z}=0 \tag{1}$$

动量守恒方程

$$\rho\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}+\frac{\partial}{\partial z}\left(p+q+\frac{B_\theta^2}{2\mu_0}\right)=0 \tag{2}$$

$$J_r=-\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial B_\theta}{\partial z} \tag{3}$$

能量守恒方程

$$e_T\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}+(q+Tp_T)\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial F}{\partial z}-\dot{e}_D=0 \tag{4}$$

磁扩散方程[4]

* **收稿日期**：2003-01-15；**修回日期**：2003-05-08

基金项目：中国工程物理研究院行业科学技术预先研究基金(20020207)

作者简介：王刚华(1976—)，男，硕士，主要研究方向：Z-Pinch 物理和等离子体开关的理论和数值模拟.

$$\rho \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{B_\theta}{\rho}\right)=\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial B_\theta}{\partial z}\right)+\frac{\partial(uB_\theta)}{\partial z}+\frac{2\alpha B_\theta}{\mu_0 n_e e r}\frac{\partial B_\theta}{\partial z} \tag{5}$$

$$\alpha=1+\frac{r}{2n_e}\frac{\partial n_e}{\partial r} \tag{6}$$

式中:ρ 是密度,u 是速率,只有 z 向分量,t 是时间,p 是标量压强,q 是人为粘性,$\boldsymbol{J}z$ 是电流密度,$\boldsymbol{B}$ 是磁场,T 是温度,v 是比容,$e_T=(\partial e/\partial T)_v$ 定容比热,e 为物质的比内能,$p_T=(\partial p/\partial T)_v$,$\dot{e}_D$ 为单位质量上的焦耳加热,$\boldsymbol{F}$ 为能流矢量,包括热流矢量和辐射损失,μ_0 为真空中磁导率,η 为电阻率,n_e 为电子数密度,(6)式中 r 取平均半径。

3　计算结果与分析

等离子体开关为轴对称结构,图 1 为其结构示意图,外筒为阳极,内筒为阴极,开关左端与发生器相联,右端接负载。

在计算中我们取阳极半径为 5 cm,阴极半径为 3 cm。模拟初始时刻等离子体均匀分布于轴线上 4 cm 到 9 cm 的空间,初始密度为 5.87×10^{-4} kg/m^3,电流从左端输入等离子体区域,取恒电流值 0.5 MA。左端磁场边界条件由输入电流决定,为一恒定值 B_0,右端磁压为 0,计算时间区域为加入电流后的 130 ns。

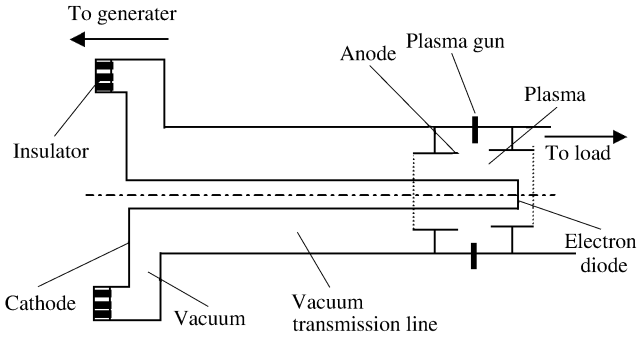


图 1　PEOS setup on the inductive energy system

Fig. 1　等离子体断路开关的结构示意图

如图 2 所示,给出了开关中等离子体的位置随时间的变化曲线,由图可见,由于开关中加入的电流不够大,故而等离子体的运动主要表现为向左右两边的热膨胀运动,中间大部分等离子体的运动不明显,左边由于受磁力的作用,膨胀较右边小。从图 3 四个不同时刻的密度分布图中亦可看出中间部分(曲线的峰值处)的密度变化不大,粒子宏观运动主要体现为两端的膨胀。

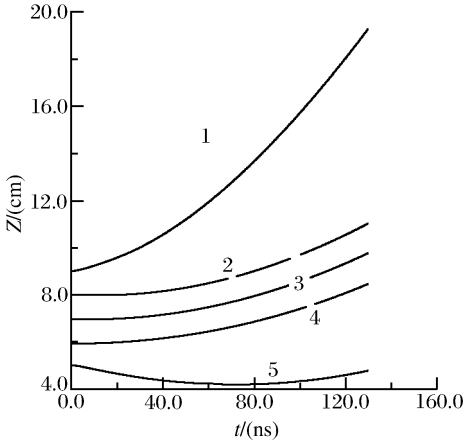


图 2　等离子体位置随时间的变化曲线

Fig. 2　Plasma position versus time

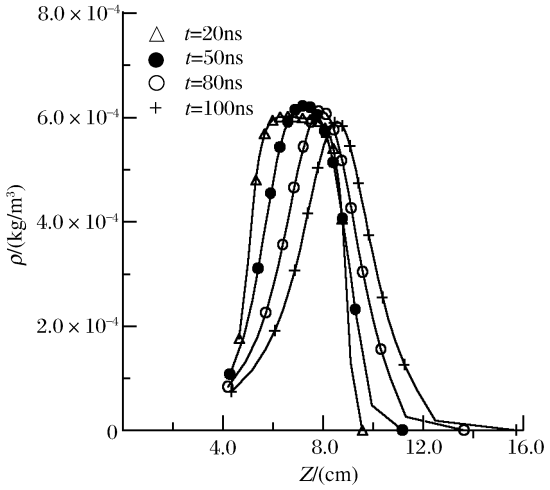


图 3　不同时刻等离子体的密度分布

Fig. 3　Axial distribution of plasma density at different moment

图 4 示出了磁场在等离子体内部的渗透过程，从图中可以看出，磁场迅速向等离子体内渗透，图中 5 条曲线依次为加入电流后 0.1 ns、5.0 ns、10.0 ns、15.0 ns 和 20.0 ns 各时刻的磁场分布。可见磁场在 20 ns 的时间内已经完全渗透了整个等离子体区域，这么快的渗透速度，即使使用反常的电阻率也是无法解释的。为了解释这一现象，我们可以对磁扩散方程即(5)式进行分析。(5)式右端三项分别为磁场渗透的三种途径，第一项为阻抗引起的磁扩散项，由 Spitzer 电阻率公式可知，对于等离子体开关而言，其电阻率为 $10^{-3}\sim10^{-5}$ Ω·m，一般认为该项小于第二项、第三项；第二项为流体(离子)“磁冻结”项，其大小取决于 Alfven 波速 $v_A=B/\sqrt{\rho\mu_0}$，表征了流体对输入电磁脉冲的依赖程度，对于我们的计算模型而言 Alfven 波速为 $2.4\times10^5\sim8.2\times10^5$ m/s；第三项为 Hall 效应项，亦既是磁场在电子上的冻结，其引起的磁场渗透速度为

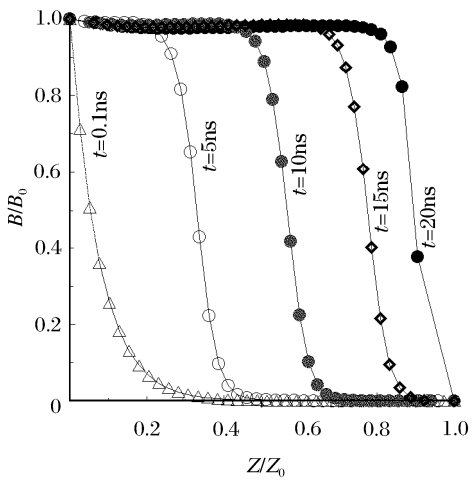


图 4 Hall 效应引起的磁场渗透

Fig. 4 Hall penetration of magnetic field into the plasma

$$v_H=\frac{\alpha B_\theta}{\mu_0 n_e e r}$$

取 $\alpha=1$，r 取为中间点的值，即 4 cm，则对于我们的计算模型，这一速度的大小为 $2.1\times10^6\sim8.2\times10^6$ m/s。因此磁场扩散的速度主要取决于 Hall 效应项，充电后前 20 ns 计算给出的平均磁扩散速度为 2.8×10^6 m/s，这一结果与估计值基本相符。

4 结 论

我们在磁流体动力学方程组的基础上，建立了适应于等离子体开断开关的一维 Z 向磁流体力学基本模型，编制了我们自己的程序，对于给定输入电流的模型进行了计算，并且对计算结果进行了分析，用 Hall 效应给出了磁场异常渗透的合理的物理解释，指出 Hall 效应是磁场快速渗透的主要原因，计算结果与估算值相近。必须指出的是目前我们的电路中没有将负载耦合进去，这是我们下一步要开展的工作。

References:

[1] Model C W, Goldstein S A. A Fast-Opening Switch for Use in REB Diode Experiments [J]. J Appl Phys, 1977, 48: 1004－1006.

[2] Zhuo H B, Chang W W, Ma Y Y. Nonliner Magnetic Field Penetration in Erosion Opening Switch Plasma [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(5): 605－609. (in Chinese)
卓红斌，常文蔚，马燕云. 融断开关等离子体中磁场的异常渗透 [J]. 强激光与粒子束，2000, 12(5): 605－609.

[3] Grossmann J M, Decore C R. Electron and Ion Magnetohydrodynamic Effects in Plasma Opening Switches [A]. IEEE International Conference on Plasma Science [C]. 1993. 559－564.

[4] Cassany B, Grua P. Analysis of the Opening Regimes of Microsecond-Conduction-Time Plasma Opening Switches [J]. J Appl Phys, 1995, 78(1): 67－76.

One-Dimensional Magneto-Hydrodynamic Simulation of Plasma Opening Switch

WANG Gang-Hua, CHEN Lin, HU Xi-Jing

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Preliminary results of an one-dimensional numerical code designed to investigate the magnetic field thrust effects in plasma opening switch are presented. The code is based on the magneto-hydrodynamic equations, and the current into the switch is given as a known condition. The plasma development on the axial direction is calculated. Also plasma density at different moment during the opening process is described. It is pointed out that the Hall effect plays a predominant role in the abnormal penetration of magnetic field.

Key words: MHD; plasma opening switch; Hall effect