

文章编号: 1001-4322(2003)06-0595-04

# 带辅助磁场等离子体断路开关的数值模拟<sup>\*</sup>

陈玉兰, 曾正中, 孙凤举

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 利用全电磁网格粒子方法模拟了外加磁场对等离子体断路器(POS)断路性能的影响,给出了电压倍增系数与外加磁场的关系曲线。数值模拟表明,外加轴向磁场线圈必须放在同轴型 POS 阴极的同侧才能显著改善开关的断路性能;当外加角向磁场时,内电极为阴、阳极的同轴型 POS 的断路性能都得到了不同程度的改善。随着外加磁场的增大,电压倍增系数将达到饱和。

**关键词:** 等离子体断路器; 粒子模拟; 辅助磁场; 电压倍增系数

**中图分类号:** TL503

**文献标识码:** A

等离子体断路器(POS)是脉冲功率电感储能装置中的关键部件,它是一种可传导大电流、产生高电压的快速断路器。在断路阶段,POS 相当于一磁绝缘离子二极管,系统的磁场(自磁场和外加辅助磁场)要满足电子流磁绝缘条件,才能获得高的能量传输效率以及电压和功率倍增。为了减小超高功率脉冲源和重复频率脉冲源的体积和复杂程度,降低造价,采用电感储能和 POS 技术进行脉冲压缩和功率放大,是一种很有前途的技术方案。辅助磁场的作用在于两个方面:一是在传导大电流(MA 级)时,外加辅助磁场可以防止电流过峰值以后,POS 阻抗过早崩溃<sup>[1]</sup>;另一方面,重复频率运行等离子体断路器(RPOS)的传导电流一般较小(约百 kA 级),产生的磁场可能不足以满足磁绝缘条件,需要借助辅助磁场来改善断路性能<sup>[2]</sup>。国内外从九十年代开始就开展了带辅助磁场 RPOS 及磁场控制等离子体断路器(MCPOS)的实验研究<sup>[1~5]</sup>,发现对于同轴型的 POS,外加轴向磁场具有电极极性效应,而外加角向磁场对于内电极为阴、阳极的同轴型 POS 的断路性能均有改善。但是,迄今对产生这些现象的原因以及 POS 电压倍增系数与外加辅助磁场关系的研究还比较欠缺。本文利用全电磁网格粒子模拟方法分别模拟了外加轴向和角向辅助磁场对 POS 断路行为的影响,获得了电压倍增系数与外加磁场(或磁场线圈电流)关系曲线及相应的粒子轨迹图,对加深有关物理认识有一定作用。

## 1 计算模型

由于应用场合和脉冲功率源不同,POS 的结构及参数也各不相同。为了使问题典型化并减少计算量,本文采用图 1 所示的轴对称 POS 模型<sup>[6]</sup>进行模拟。POS 的工作时间为 10ns~ $\mu$ s,有研究表明可将模拟时间压缩至 ns<sup>[6~8]</sup>;POS 等离子体的实际初始温度为 eV 量级,有研究<sup>[6~8]</sup>表明,将温度人为提高 3~4 个量级对结果无明显影响,这样可以在满足网格长度与德拜长度相当而远小于无碰撞趋肤深度的条件下,将跟踪粒子数减少几个数量级,使计算量大大减少。因此,我们选取的等离子体参数如下:密度为  $10^{12}\text{cm}^{-3}$ ,初始温度设为 5keV,定向漂移速率取为 5cm/ $\mu$ s,离子取为  $\text{H}^+$ ,在初始时刻已注入到 POS 区( $z = 4 \sim 9\text{cm}$ ,  $r = 2.5 \sim 6.5\text{cm}$ )。POS 及负载二极管(图 1 右端间隙)的阴极表面区域设为空间电荷限制方式发射电子。轴向和径向的网格间距都取 0.5mm,模拟时间取 10ns。

为使问题简化,在许多粒子模拟工作中都将 POS 的驱动电源等效为一恒流源<sup>[7,8]</sup>。根据本文采用的 KARA T 粒子模拟程序<sup>[9]</sup>本身的特点,我们使用电压源等效<sup>[6]</sup>,即在初始时刻从图 1 左端阴阳极间馈入如图 2 的三角电压波,电压波在 5ns 时刻达到幅值 0.8MV。这不仅更符合实际,还便于获取电压倍增系数。在模拟的初始时刻在开关区加辅助磁场,并设磁场在 POS 的工作过程中保持不变。

## 2 带轴向辅助磁场 POS 的数值模拟

POS 区的轴向辅助磁场由位于同轴外电极同侧的磁场线圈产生,见图 3;线圈为 5 匝,中心坐标为  $z = 6.5\text{cm}$ ,  $r = 6.5\text{cm}$ ;靠近线圈的区域,磁场强度大;通过调节线圈电流大小来改变外加轴向磁场的大小。

\* 收稿日期:2002-08-12; 修订日期:2002-11-26

基金项目:国家自然科学基金重点资助课题(10035020)

作者简介:陈玉兰(1974-),女,工程师,硕士研究生,主要从事高功率脉冲技术方面的研究;西安 69 信箱 10 分箱。

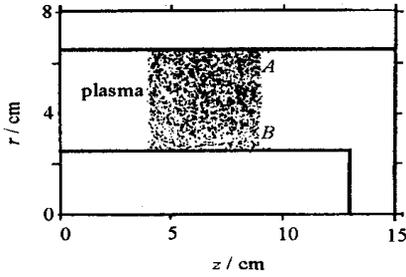


Fig. 1 Simulation model of coaxial POS  
图1 数值计算模型

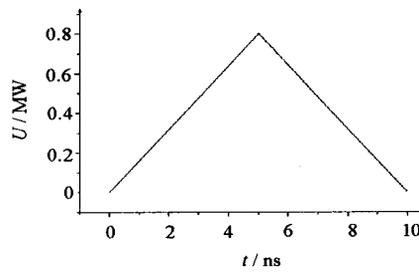


Fig. 2 Driving voltage waveform  
图2 驱动电压波

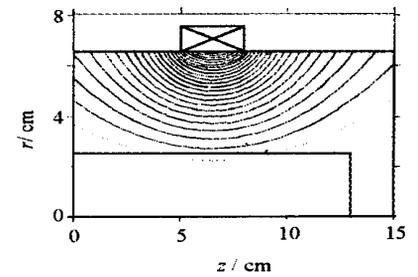


Fig. 3 External magnetic field of POS  
图3 线圈在 POS 区产生的磁场分布

模拟结果表明:当同轴型 POS 内电极为阳极时,若不加辅助外磁场,开关不能正常断开;随着线圈电流增大( $I=1\sim 7\text{kA}$ )和外加磁场强度的增加,获得的电压倍增系数  $K^{[2]}$  ( $K=|U_{\text{pos}}/U_0|$ ,  $|U_{\text{pos}}|$  是从 A、B 两点间提取的电压,  $U_0$  为驱动电压幅值) 不断增大,基本上与外加轴向磁场  $B_z$  (或线圈电流  $I$ ) 存在线性单调增加关系。当  $I=7\text{kA}$  (相应 POS 区产生的最大磁场为  $1.9\text{T}$ ) 时,电压倍增系数  $K$  约为 5;继续增加外加磁场,对电压倍增系数的改善不大,表明在此外加磁场的作用下,POS 断路阶段的电子电流基本上都被完全磁绝缘了。图 4(a) 是其电压倍增系数与外加轴向磁场关系图。图 5 是外加轴向磁场时典型的粒子轨迹图。POS 在前  $4.5\text{ns}$  处于电流传导阶段。在断路阶段,由于阴极(外筒)发射的电子具有一定的径向运动速度  $v$ ,在 POS 传导电流产生的角向自磁场  $B$  和外加轴向磁场  $B_z$  的共同作用力  $e\mathbf{v}\times(\mathbf{B}+B_z)$  下,电子近似以磁力线为导向中心线作角向回旋运动,容易返回阴极而达到磁绝缘状态,使 POS 在约  $1\text{ns}$  时间内断开,获得功率和电压倍增。

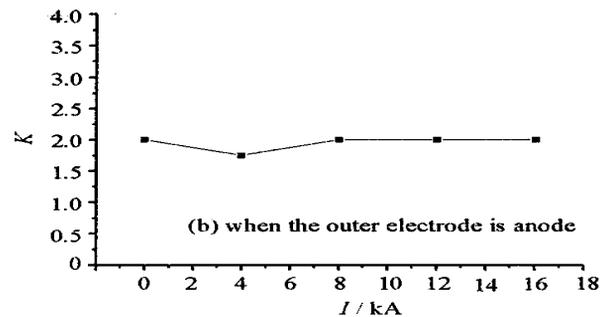
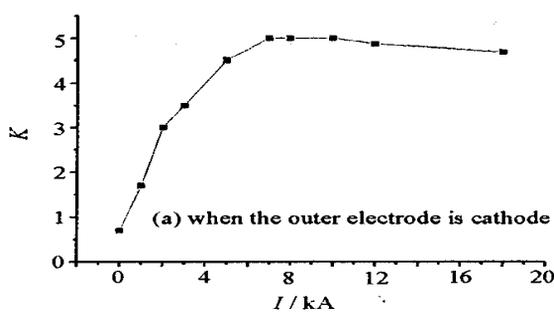


Fig. 4 Voltage multiplication coefficient  $K$  versus the coil current when the coils are at the outer electrode side.

图4 轴向磁场线圈与 POS 外电极同侧时,电压倍增系数与线圈电流的关系

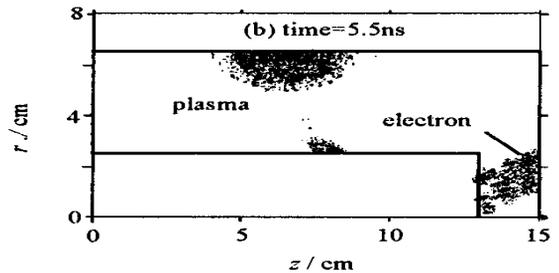
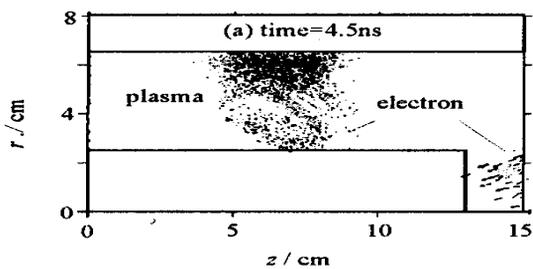


Fig. 5 Particle traces at POS region when the coils are at the cathode (outer electrode) side.

图5 轴向磁场线圈与 POS 阴极(外电极)同侧时的粒子轨迹

若同轴 POS 内电极为阴极,其它模拟参数保持不变,没有辅助磁场时,POS 可以正常工作,电压倍增系数  $K$  约为 2;加上如图 3 所示的轴向辅助磁场,几乎没有改善电压倍增系数,参见图 4(b)。这种现象称为外加轴向磁场的电极极性效应<sup>[7]</sup>。粒子轨迹图(图 6)较直观地反映了电极极性效应产生的原因:外加轴向磁场与角向自磁场对阴极(内电极)发射电子的运动方向的影响不一致,因此在 POS 的断路阶段,仍有一部分阴极发射的电子泄漏到阳极(外筒),从而不能改善开关的断路性能。模拟计算还表明,若将轴向磁场线圈放置在阴极内筒里面,使其在 POS 区产生一个磁力线弯向阴极内筒的轴向磁场,也能改善 POS 的断路性能。但这种情况所需电流很大,在工程上较难实现,而且磁场的利用率很低。

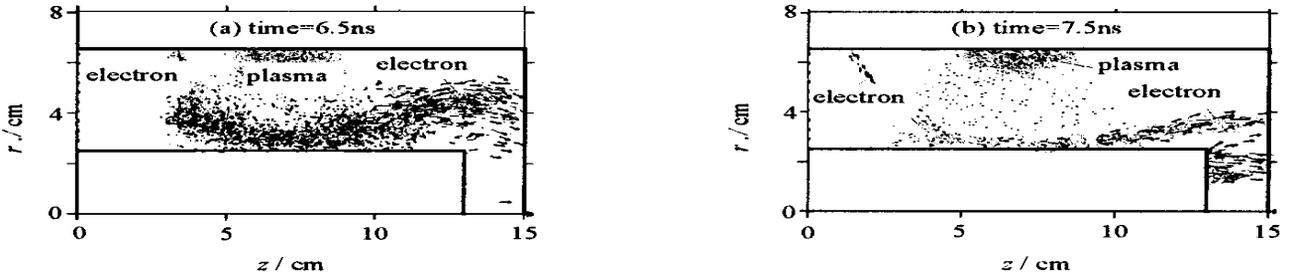


Fig. 6 Particle traces at POS region when the coils are at the anode (outer electrode) side.

图 6 轴向磁场线圈与 POS 阳极 (外电极) 同侧时的粒子轨迹

### 3 带角向辅助磁场 POS 的数值模拟

POS 区的角向辅助磁场可通过中间电极外加电流或由位于阴极同侧的短脉冲磁场线圈产生<sup>[4,10]</sup>。根据 KARAT 软件的功能及 POS 的几何结构,我们分两种情况模拟了角向磁场对 POS 断路性能的影响。

(1) 当 POS 内电极为阴极时,在 POS 区加一个与半径  $r$  成反比的角向磁场,即

$$B(z, r) = B_0 \frac{2.5}{r}, \quad 2.5 < r < 6.5(\text{cm}) \quad (1)$$

角向磁场在同轴 POS 内电极(阴极)处取最大值。

(2) 当 POS 外电极为阴极时,在 POS 区加一个与径向半径成正比的角向磁场,即

$$B(z, r) = B_0 \frac{r}{6.5}, \quad 2.5 < r < 6.5(\text{cm}) \quad (2)$$

此时角向磁场在同轴 POS 外电极(阴极)达到最大值。

数值模拟时,改变式(1)、(2)中  $B_0$  值,获得电压倍增系数  $K$  与角向磁场的关系曲线如图 7,曲线的变化趋势与图 4(a)相似。外加角向磁场对内电极为阴、阳极的同轴 POS 断路性能均有改善。当同轴 POS 内电极为阴极时,在外加角向磁场下可获得的最大  $K$  约为 3,而不加外加磁场时,  $K$  约为 2;当同轴 POS 内电极为阳极时,在外加角向磁场下可获得的最大电压倍增系数  $K$  约为 3.5,不加外加磁场时,  $k$  为 0.7。

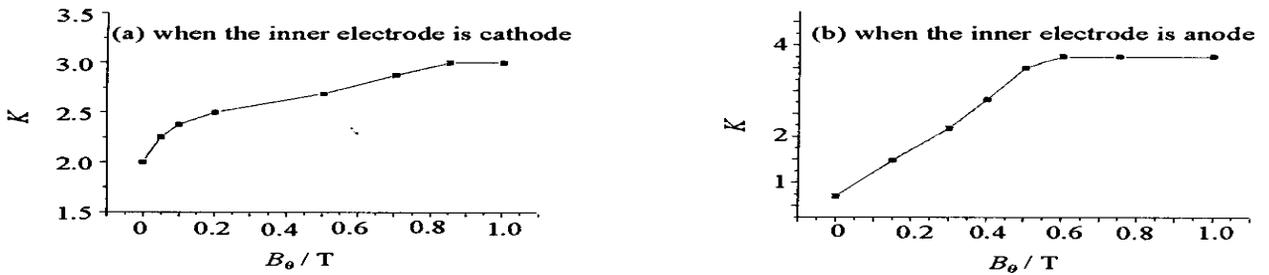


Fig. 7 Voltage multiplication coefficient  $K$  versus the external azimuthal magnetic field

图 7 电压倍增系数  $K$  与外加角向磁场  $B$  的关系

图 8 是同轴 POS 内电极为阴极时,外加角向磁场下粒子轨迹图。阴极发射电子在自磁场和外加角向磁场

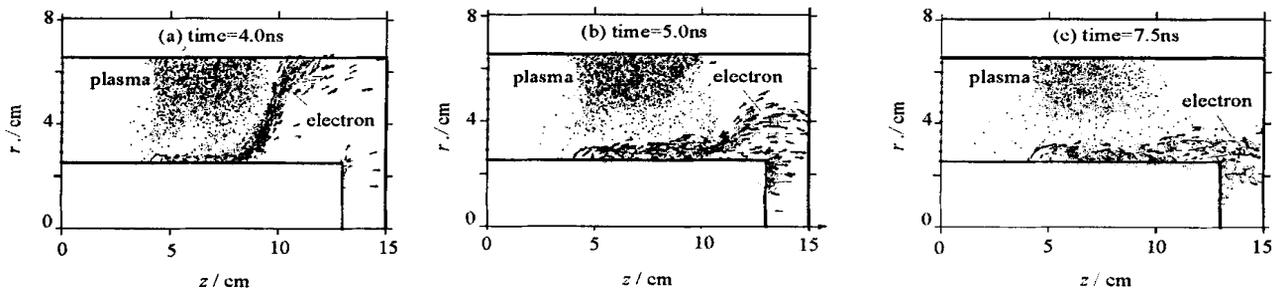


Fig. 8 Particle traces at POS region with additional  $B$  when the inner electrode is cathode.

图 8 POS 内电极为阴极,外加角向磁场下的粒子轨迹

的共同作用下,向 POS 负载端作轴向偏转运动,使 POS 在 1 ns 内断开。当 POS 内电极为阴极时,虽然不加外磁场 POS 也可以断开,但其粒子轨迹图(图 9)表明,开关的断开速度要慢一些,断开时间约 2 ns;而且无外加磁场时,POS 断路以后有再次接通的可能,降低了向负载的能量传输效率。

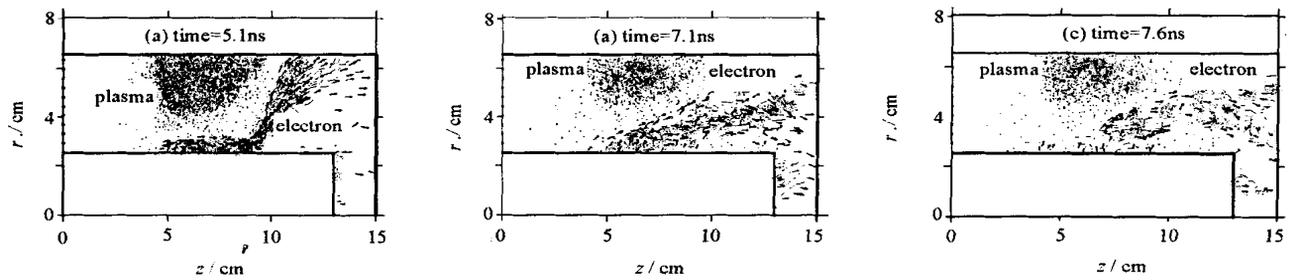


Fig. 9 Particle traces at POS region without external magnetic field when the inner electrode is cathode.

图9 同轴 POS 内电极为阴极,无外加磁场时的粒子轨迹

## 4 结论

利用全电磁网格粒子模拟方法模拟了外加磁场对 POS 断路性能的影响,获得了电压倍增系数与外加磁场(磁场线圈电流)的关系及相应的粒子轨迹图。数值模拟结果表明:(1)当外加轴向磁场线圈放在同轴型 POS 阴极的同侧时,POS 的断路性能可得到改善,其中阴极为外电极时断路性能改善显著;而当外加轴向磁场线圈与同轴型 POS 的阳极同侧时,不能改善 POS 的断路性能;这种电极极性效应与文献报道的实验结果<sup>[5,10]</sup>一致。(2)外加适当分布的角向磁场,对内电极为阴、阳极的同轴 POS 的断路性能都有改善。(3)在一定范围内,电压倍增系数随着外加磁场的增大而递增,但随着外加磁场的进一步增大,电子流在 POS 断路阶段全部磁绝缘,电压倍增系数将达到饱和。

### 参考文献:

- [1] Kovalchuk B M. GIT16: State of project in 1995-1997[A]. Proceedings of 11<sup>th</sup> IEEE IPPC[C]. 1997. 715—723.
- [2] Dolgachev G I, Zakatov L P, Ushakov A G. Study of repetitive plasma opening switch generator technology[J]. *IEEE Trans Plas Sci*, 1998, **26**(5): 1410—1419.
- [3] Mendel C W, Savage M E, Zagar D M, et al. Experiments on current-toggled plasma opening switch[J]. *J Appl Phys*, 1992, **46**(7): 3731—3738.
- [4] Mark E S, Seidel D B, Mendel C W. Design of a command-triggered plasma opening switch for terawatts application[J]. *IEEE Trans Plas Sci*, 2000, **28**(5): 1533—1539.
- [5] 孙凤举,邱爱慈,曾江涛,等. 带外加磁场的微秒级等离子体断路器[J]. *高压电器*, 2002, **38**(3): 46—50. (Sun F J, Qiu A C, Zeng J T, et al. Microsecond plasma opening switch with external magnetic field. *High Voltage Apparatus*, 2002, **38**(3): 46—50)
- [6] 曾正中,邱毓昌,邱爱慈. POS 工作参量定标关系的数值模拟[J]. *电工电能新技术*, 1999, **18**(4): 5—8. (Zeng Z Z, Qiu Y C, Qiu A C. Simulations of POS operation parameters scaling. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 1999, **18**(4): 5—8)
- [7] Swanekamp S B, Grossmann J M, Fruchtman A, et al. Particle-in-cell simulations of fast magnetic field penetration into plasmas due to the Hall electric field[J]. *Phys Plas*, 1996, **3**(10): 3556—3563.
- [8] Grossmann J M, Ottinger P F, Neri J M, et al. Numerical simulation of a low-density plasma erosion opening switch[J]. *Phys Fluids*, 1986, **29**(8): 2724—2735.
- [9] Tarakanov. KARAT user manual[Z]. USA: Berkeley Research Associates, Inc, 1998.
- [10] Dolgachev G I, Zakatov L P, Ushakov A G. Microsecond plasma circuit breakers[J]. *Sov J plas phys*, 1991, **17**(10): 679—685.

## Particle-in-cell simulations of plasma opening switch with external magnetic field

CHEN Yurlan, ZEN G Zheng-zhong, SUN Feng-ju

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Fully electromagnetic particle-in-cell simulations are performed to study the effects of an external magnetic field on coaxial plasma opening switch (POS). The simulation results show that POS opening performance can be significantly improved only when external longitudinal magnetic field coils are placed at the cathode side, and an additional azimuthal magnetic field is effective whether the central electrode is of positive or negative polarity. Voltage multiplication coefficient  $K$  rises with the additional magnetic field increasing till the electron current is completely magnetically insulated during the opening of POS.

**Key words:** Plasma opening switch; Particle-in-cell simulations; Additional magnetic field; Voltage multiplication coefficient