

# 减少轨道炮电极烧蚀的探讨

秦实宏 颜湘莲 程礼椿

华中理工大学  
电力工程系

邹积岩

大连理工大学  
电磁系

摘要: 提出了外加控制磁场减少轨道电极烧蚀的方法, 计算了试验条件下外加控制磁场的大小和空间分布, 外加磁场线圈放在等离子体电极电弧运动加速的起始段, 控制磁场增加了电磁推力, 加速了电弧斑点的运动, 从而达到减轻烧蚀的目的.

关键词: 轨道炮; 电极烧蚀; 磁场控制

中图分类号: O53; TM924.0 文献标识码: A 文章编号: 1000-8616(2000)06-0012-03

轨道电极表面烧蚀不仅使轨道炮的整体性能下降, 而且影响轨道炮系统寿命. 实验表明, 在弹丸进入炮膛的起始段轨道电极表面的烧蚀较为严重. 烧蚀后轨道电极表面的形貌主要为弧痕道、弧坑沉积的小凹坑的形状以及悬挂在上轨道电极上的滴状颗粒.

为了减少轨道电极表面的烧蚀, 研究者们已开展了许多相应的研究<sup>[1,2]</sup>, 如采用前级炮、增强轨道电极结构和分段轨道电极结构形式以及分布储能调节电流波形等方法, 但在轨道电极弹丸运动的起给段, 轨道电极的烧蚀仍然比较严重. 据此本文提出了采用外加控制磁场的新方法, 理论分析和试验结果表明, 该方法能减轻轨道的烧蚀.

## 1 试验装置系统

外加控制磁场的方法使外加控制磁场电感线圈产生的磁场方向与轨道炮轨道电流自身磁场方向一致. 外加控制磁场回路的等效电路如图 1. 图

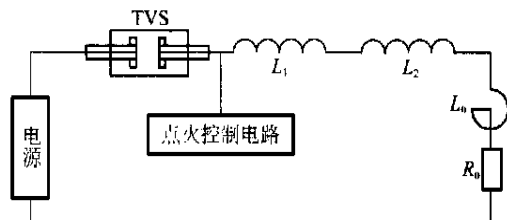


图 1 外加控制磁场电路

1 中, 电源由 4 层电容器组 (每层有 100 个电容并联, 每个电容的额定电压 5 kV、容量 150  $\mu$ F) 串联组成.  $L_0$  为回路系统自身电感 (20  $\mu$ H).  $L_1$  和  $L_2$  为结构相同的线圈, 线圈内径为 180 mm, 外径

为 210 mm, 截面为 2.5 mm  $\times$  12.5 mm, 高度为 125 mm. TVS 为真空触发开关, 在图 1 的接线方式下, 该触发开关工作在 15 kA 的电流条件下, 具有第一半波过零点后自然熄弧的能力, 其电流波形如图 2 所示. 由于真空触发开关在电流过零点

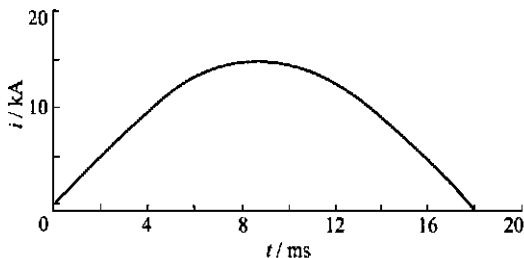


图 2 VTS 关合时电流波形

时能自行开断电流, 因此, 实验回路其他元件不会受到过电压的冲击, 同时, 又保证了所加控制磁场不会改变方向而减弱轨道回路的自身磁场.

点火控制电路参见文献 [3].

## 2 控制磁场的空间分布

控制磁场线圈分别放置在弹丸起始加速段轨道电极的两侧, 线圈产生的磁场方向与轨道电极电流产生的磁场方向一致. 在如图 3 所示的坐标空间中, 场点  $p$  在垂直  $z$  轴的坐标平面上,  $z$  为线圈中心轴线, 源点空心线圈电流微元  $dv'$  在场点  $p(\rho, \varphi, \theta)$  处产生的磁场强度  $B$ , 可由 Biot-savart 定律求得

$$B(\rho, \varphi, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{I \times r}{r^3} dv' = B_{\rho e\rho} + B_{\varphi e\varphi} + B_{ze_z}.$$

收稿日期: 1999-12-26.

作者简介: 秦实宏 (1964-) 男, 博士; 武汉, 华中理工大学电力工程系 (430074)

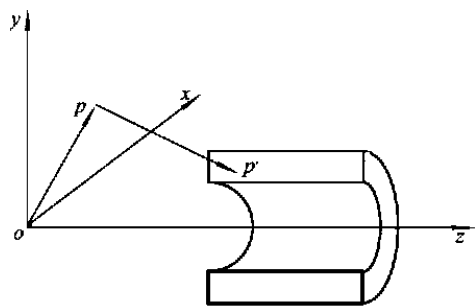


图 3 单个磁场控制线圈磁场计算图示

磁场强度  $B$  的三个分量分别是:

$$B_{\rho} = \frac{\mu_0 J}{2\pi} \int_0^{\pi} d\theta \int_{a_1}^{a_2} d\rho \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho' z' \cos\theta}{r^3} dz'; \quad (1)$$
$$B_z = \frac{\mu_0 J}{2\pi} \int_0^{\pi} d\theta \int_{a_1}^{a_2} d\rho \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho' (\rho - \rho \cos\theta)}{r^3} dz'; \quad (2)$$
$$B_{\varphi} = 0, \quad (3)$$

式中,  $\theta = \varphi' - \varphi$ ;  $z_1$  为线圈左端平面的轴向坐标;  $z_2$  为线圈右端平面的轴向坐标. 将式 (1) 和 (2) 的变量长度作如下处理:  $A_1 = a_1/\rho$ ,  $A_2 = a_2/\rho$ ,  $Z_1 = z_1/\rho$ ,  $Z_2 = z_2/\rho$ ,  $R = r/\rho$ ,  $A = \rho'/\rho$ ,  $Z = z'/\rho$ , 由式 (2) 和 (3) 得

$$B_{\rho} = w \int_0^{\pi} d\theta \int_{A_1}^{A_2} dA \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{AZ \cos\theta}{R^3} dz;$$
$$B_z = w \int_0^{\pi} d\theta \int_{A_1}^{A_2} dA \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{A(A - \cos\theta)}{R^3} dz,$$

式中,  $w = -\mu_0 J \rho / (2\pi)$ ;  $R = (1 + A^2 - 2A \cos\theta + Z^2)^{1/2}$ .

利用单积数值积分的办法<sup>[4]</sup> 求出场点  $p$  处磁场大小, 在实验所给条件下, 轴向磁场和径向磁场强度的大小分别如图 4 和图 5 所示.

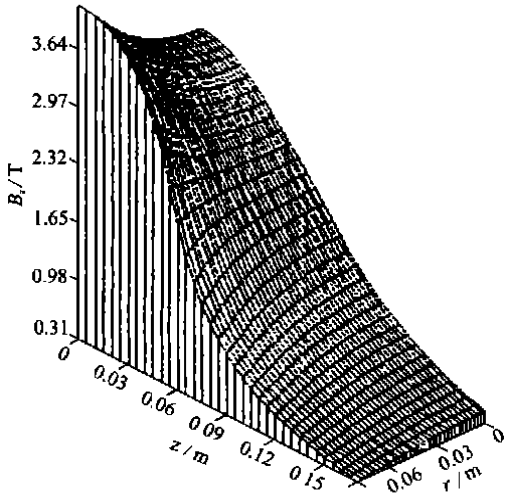


图 4 轴向方向的磁场

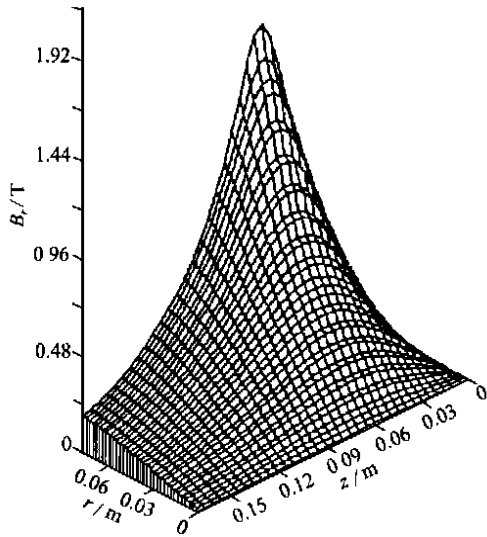


图 5 径向方向的磁场

### 3 试验结果分析

图 1 中实验回路参数如下:  $C = 60\,000\,\mu\text{F}$ ; 根据外加控制磁场电路电流波形和回路电容的值, 可以得到实际回路总电感  $L = 500\,\mu\text{H}$  (其中包括回路固有电感, 实测值为  $20\,\mu\text{H}$ ); 周期  $T = 36\,\text{ms}$ .  $10\,\text{kA}$  时, 充电电压为  $10\,\text{kV}$ . 通过计算机控制系统<sup>[5]</sup>, 分别控制磁场触发开关 TVS 的点火和前级炮三球隙开关的点火时刻, 使等离子体电极电弧在达到主炮时, 控制磁场电路电流的值最大, 此时控制磁场线圈电流产生的磁场最强. 文献 [3] 进行了外加控制磁场机理的分析.

采用前级炮的措施, 使弹丸在进入炮膛时获得一定的初速度. 由于前级炮的能量不可能使用得很大, 因此在弹丸进入炮膛时, 弹丸的速度提高受到了限制, 利用增强轨道的方法, 由于电流存在一个上升时间, 致使弹丸起始加速电流较小加速弹丸的电弧停滞时间太长, 轨道电极的烧蚀状况改善程度不明显. 采用外加磁场控制的方法克服了所述方法的不足, 减轻了轨道电极的烧蚀.

#### 参 考 文 献

[1] Shahinpoor M. Use of a Two-Stage Light-Gas Gun as Aninjector for Electromagnetic Railgun. IEEE MAG., 1989, 25(1): 514~ 518

[2] Usuba S. Development of Railgun Accelerator Combined with Two-Stage Light Gas Gun. IEEE MAG., 1984, 20(2): 260~ 263

[3] 秦实宏. 等离子体电极轨道炮的烧蚀机理及实验研究: [博士学位论文]. 武汉: 华中理工大学电力工程系, 1999

- [4] 雷银照. 轴对称线圈磁场计算. 北京: 计量出版社, 1991.
- [5] 秦实宏, 邹积岩, 何俊佳等. 电磁轨道炮信号控制处理

系统的研究. 华中理工大学学报, 1998, 26 (11): 38 ~ 40

## The Erosion of Electrode Surfaces in Railguns

*Qin Shihong Yian Xianglian Chen Lichun Zou Jiyan*

**Abstract:** The erosion of electrode surfaces is reduced with an external magnetic field control and the strength and distribution of the external magnetic field are calculated. The coils of the external magnetic field control are placed at the breech that the plasma armature is accelerated initially. The magnetic field control enhances the magnetic force to the projectile, resulting in the erosion of electrode surfaces is reduced. The experimental study is also performed.

**Key words:** railgun; electrode erosion; magnetic field control

**Qin Shihong** Dr.; Dept. of Electrical Power Eng., HUST, Wuhan 430074, China.

(上接第 11 页) 值时, 串联电感方法行之有效. 因此本文提出的多途径调波方法, 可以满足电压、电流、脉宽多种调波需要.

### 参 考 文 献

- [1] Sarjeant W J. Technical Tradeoffs For Downsizing ETCG Power Systems. IEEE Trans. on Magn., 1993, 29 (1): 1054~ 1059
- [2] Murthy S K, Weldon W F. Multiphase Railgun System: A New Concept. IEEE Trans. on Magn., 1993, 29 (1): 472~ 477
- [3] Driga M D, Ingram M W, Weldon W F. Electro Thermal Accelerators: The Power Conditioning Point of View. IEEE Trans. on Magn., 1989, 25 (1): 147~ 150
- [4] 武卫东, 李朗如. 两相被动补偿脉冲发电机的电流脉冲波形调节. 华中理工大学学报, 1998, 26(6): 43~ 46
- [5] Leob A, Kaplan Z. A Theoretical Model for the Physics Processes in the Confined High Pressure Discharges of Electro Thermal Launchers. IEEE Trans. on Magn., 1989, 25 (1): 342~ 345

## Strategy of Waveform Regulations of CPA as Plused Power Supplies for ETCG

*Liu Kefu Pan Yuan*

**Abstract:** According to the special requirements to voltage and current waveforms of pulsed power supply from electro-thermal chemical guns (ETCG), the strategy of waveform regulation has been put forward based on the compensated pulsed alternator (CPA) as power supply. The system models have been built and simulated. The results showed that the waveform regulations meet the requirements of waveforms of ETCG. The different effect of the waveform regulations on pulse shapes and power output is discussed and compared.

**Key words:** electro-thermal chemical guns; pulsed power supply; compensated pulsed alternator; waveform regulation

**Liu Kefu** Assoc. Prof.; Dept. of Electrical Power Eng., HUST, Wuhan 430074, China.