

原理性电磁轨道炮的实验研究

龚兴根 孙承纬 周之奎 史建勋
蔡明亮 吴杏梅 李宗毅

本文介绍了电磁轨道炮的工作原理、原理性实验装置和实验结果。实验中用储能50kJ的电容器组作为能源，用一个2.51μH的储能电感器和四个开关调节电流波形，以便保持持续地向轨道炮供电。炮体长为30cm，炮膛口径为0.8×0.6cm²。在两发首次进行的实验中，把340mg重的聚碳酸酯弹丸加速到1.5km/s的速度。

一、引言

电磁力加速弹丸的设想早在本世纪二十年代初就已提出。第二次世界大战末期，Hansler用蓄电池作为能源，在2m长的炮上，使用固体电枢把10g重的弹丸加速到1.08km/s。六十年代初，Brast和Sawyer用28kJ电容器组作为能源，使用等离子体电枢，把31mg重的尼龙弹丸加速到6km/s，Chapman等则用爆炸磁压缩发生器作能源，使用固体铜电枢把0.21g重的钢弹丸（包括电枢重）加速到9.5km/s^(1,2)。到了七十年代末，Rashleigh和Marshall等⁽³⁾使用单极发电机能源及等离子体电枢，把2.5g重的聚碳酸酯弹丸加速到5.9km/s。从此，有关这方面的研究被人们重视而开展起来⁽⁴⁻⁹⁾。近年来，电磁轨道炮的研究发展很快，目前已能把317g重的弹丸加速到4.2km/s和2.4g重的弹丸加速到11km/s的速度，并且逐步向实用方向发展^(10,11)，如高速碰撞⁽¹²⁾、常规兵器⁽¹⁾、空间发射⁽¹⁰⁾、碰撞聚变⁽²⁾等方面具有广阔的应用前景。

二、电磁轨道炮的工作原理

电磁轨道炮主要由能源、开关装置、两根平行的导电轨道和放在它们之间的电枢及弹丸组成。来自能源装置的电流*I*，由一根轨道经过电枢流向另一根轨道后形成电回路。电枢中流动的电流和轨道中流动电流引起的磁场*B*相互作用产生洛伦兹力，使电枢推动弹丸沿着轨道向前运动，如图1。这种作用力*F*和弹丸速度*v*可以分别用下式表示

$$F = ma = \int_0^w \vec{T} \cdot d\vec{w} \cdot \vec{B} = \frac{1}{2} L_l I^2 \quad (1)$$

$$v = \int_0^t a dt = \frac{L_l}{2m} \int_0^t I^2 dt \quad (2)$$

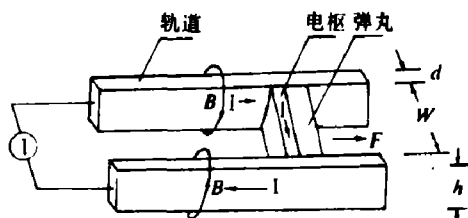


图1 电磁轨道炮的工作原理

式中 m 、 v 、 a 分别为弹丸的质量、速度和加速度, L_l 为单位长度轨道的电感。弹丸在轨道上移动的距离 l 为

$$l = \int_0^t v dt \quad (3)$$

文献〔14〕给出单位长度轨道的电感经验公式为

$$L_l = [A + B \ln(F_1)] \ln(F_2) \quad (4)$$

其中 $F_1 = 1 + a_1 \left(\frac{d}{h}\right) + a_2 \left(\frac{d}{h}\right) \left(\frac{w}{h}\right)$, $F_2 = b_1 + b_2 \left(\frac{w}{h}\right) + b_3 \left(\frac{d}{h}\right) + b_4 \left(\frac{w}{h}\right) \left(\frac{d}{h}\right)$, 式中 d 、 h 、 w 为轨道的几何参数, 见图 1, 式中 A 、 B 、 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为确定的常数, 见下表

参数	A ($\mu\text{H}/\text{m}$)	B ($\mu\text{H}/\text{m}$)	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	b_4
值	0.4406	-0.07771	3.3971	-0.0660	1.008	2.744	0.02209	0.2637

根据 (4) 式计算, 得到本装置的单位长度轨道电感为 $0.403 \mu\text{H}/\text{m}$

如果电流以下面的形式随时间变化

$$I = \begin{cases} at & 0 < t < t_1 \\ I_0 - \beta(t - t_1) & t > t_1 \end{cases} \quad (5)$$

则由 (2)、(3) 式可得

$$v = c_0 + c_1(t - t_1) + c_2(t - t_1)^2 + c_3(t - t_1)^3 \quad (6)$$

$$l = e_0 + e_1(t - t_1)^2 + e_2(t - t_1)^3 + e_3(t - t_1)^4 \quad (7)$$

式中 I_0 为轨道回路的峰值电流, a 、 β 为比例常数, t_1 为轨道回路电流上升时间, c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 e_0 、 e_1 、 e_2 、 e_3 为常数, 对于原理性实验轨道炮, 它们的数值由下表给出:

附号	c_0	c_1	c_2	c_3	e_0	e_1	e_2	e_3
表示式	$\frac{L_l a^2 t_1^3}{6m}$	$\frac{L_l I_0^2}{2m}$	$-\frac{L_l I_0 \beta}{2m}$	$\frac{L_l \beta^2}{6m}$	$\frac{L_l a^2 t_1^3}{24m}$	$\frac{L_l I_0^2}{4m}$	$-\frac{L_l I_0 \beta}{6m}$	$\frac{L_l \beta^2}{24m}$
数值	63.7 m/s	6.534 $\times 10^6 \text{ m/s}^2$	-6.26 $\times 10^9 \text{ m/s}^3$	2 $\times 10^{12} \text{ m/s}^4$	4.65 $\times 10^{-4} \text{ m}$	3.267 $\times 10^6 \text{ m/s}^2$	-2.087 $\times 10^9 \text{ m/s}^3$	0.5 $\times 10^{12} \text{ m/s}^4$

从 (6)、(7) 式可以粗估本实验轨道炮弹丸的轨迹和速度, 分别见图 6 和图 7。

据文献报道, 电磁轨道炮的能量有蓄电池组、电容器组、单极发电机、爆炸磁通量压缩发生器和分布式能源〔13〕。为了使能源装置有效而持续地向轨道供电, 通常采用贮能电感器和开关系统, 以调整回路中的参数和电流波形, 同一定长度的轨道相匹配。电枢分固体电枢和等离子体电枢两类。对于小弹丸、高速度的炮型, 常用后者。等离子体电枢由铝或铜箔在通电瞬间发生电爆炸而形成。轨道要传导大电流和经受强大的等离子体压力和电磁力的作用, 因而要选用导电性能良好、强度大而熔点高的材料制成。弹丸在高温、高压的等离子体推动下沿轨道高速滑动, 因而也要选择强度大、耐高温和滑动性能良好的材料制作。

三、实验装置

能源装置由 28 台 MY - 5 - 140 型电容器组成, 总电容量为 4.067 mF , 实际充电电压为

4.6kV, 贮能为43kJ。

贮能线圈用80根直径1.8mm的铝导线平行地绕制在直径27cm、长50.8cm的聚氯乙烯骨架上, 共5匝, 再用环氧树脂固定而成, 电感量为 $2.51\mu\text{H}$ 。

轨道炮装置由轨道和炮体组成(图2)。轨道长30cm, 由截面为 $1\times 1\text{cm}^2$ 的紫铜条制成, 轨道间距离为0.8cm, 炮膛口径为 $0.8\times 0.6\text{cm}^2$ 。炮体由3.5cm厚的有机玻璃板制成, 用螺栓夹紧。架住轨道, 并构成炮膛上下底面的两条透明的聚碳酸酯板⁽¹⁵⁾。

电枢是厚0.05mm的紫铜箔, 质量为30mg, 通电爆炸后变成等离子体。在电枢的后面塞了一块枪栓, 其大小, 材料同弹丸一样。

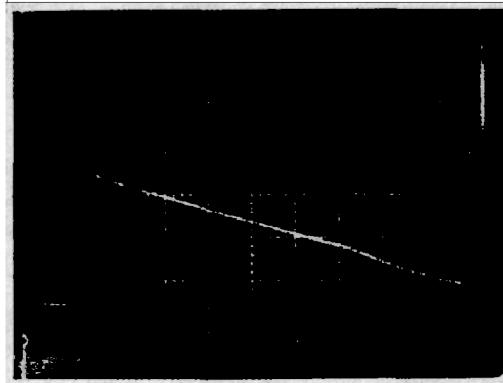


图 2. 原理性轨道炮装置

弹丸是由强度大且滑动性良好的聚碳酸酯制作成 $0.8\times 0.6\times 0.6\text{cm}^3$ 的长方体, 质量为340mg。

整个系统的电路见图3。 C 为电容器组, L 为贮能电感, L_0 为连接板等杂散电感, 约为 $1\mu\text{H}$ 。 S_1 为主放电回路的闭合开关, 由两个并联的氩气(10^5Pa)火花隙开关组成。 S_2 为爆炸丝断路开关, 它由4根直径1mm、长度为14cm的铜丝并联组成。 S_3 为间隙通路开关, 即由铜箔一端与一根轨道连接, 而另一端与另一根轨道之间留有3mm的间隙而成。 S_4 为熄弧开关, 间距为5mm, 其作用是在弹丸抛射出炮膛后泄放贮能电感器的残余能量, 防止轨道的进一步破坏。能源开关系统的研究详见⁽¹⁵⁾。

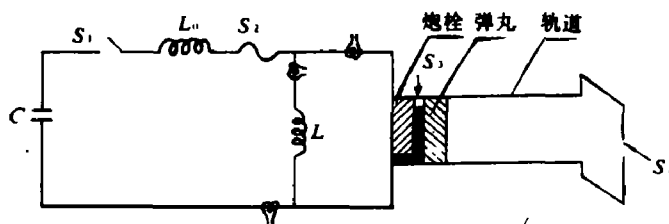


图 3 轨道炮实验电路图

当 S_1 闭合时, 电容器组 C 就对贮能电感器 L 放电。当贮能电感器中的电流正好或接近极大电流时, 爆炸丝开关 S_2 爆炸断路, 阻止贮能电感器对电容器组的反充电, 截断主回路电流, 使电感器 L 的两端形成极高的瞬时电压, 击穿间隙开关 S_3 , 使贮能电感器、电枢铜箔、轨道形成次级回路。当铜箔中流入的电能达到一定的比作用量(以电流平方对时间积分值计)时, 发生爆炸汽化, 形成等离子体电枢, 并在洛伦兹力的作用下, 推动弹丸沿着轨道向前运动。

实验测量的主要内容是: 主、次级回路中的电流和弹丸的内弹道、外弹道速度。电流测量是通过如图3放置的三个罗柯夫斯基线圈来实现。弹丸速度测量采用三种方法, 即磁探针法、光测法和丝开关法。

四、实验结果

原理性轨道炮已进行了两次实验,实验结果表明,电容器组 C 贮存的能量转换到电感器 L 的能量效率约为45%,转换到弹丸动能的效率分别为1.1%和3%;电容器组对电感器放电时,主回路中电流峰值约为110kA; S_1 断路后,电感器和轨道的次级回路中的电流经过20-30 μ s上升到约104kA的峰值,然后按指数规律衰减,直到弹丸飞出炮膛,此后轨道之间的电弧电阻明显增加,电流曲线发生明显下降(图4)。一发试验的峰值电流经过381 μ s后下降到62kA,弹丸总的加速时间约为400 μ s。

第二发试验中,由于熄弧开关 S_2 失灵,弹丸出炮膛后,电感贮能未泄放干净,轨道之间出现三个地方的再击穿(图5),电流曲线上的明显下降直到这些电弧抛离炮膛后才出现,因此难于确定弹丸的加速时间。

弹丸的内弹道速度的测量比较困难,由于等离子体的泄漏,信号的干扰,等离子体区域较宽等原因,磁探针法得到的信号不够理想,难于确定弹丸的速度。光测法是用GSJ型高速转镜照相机观察

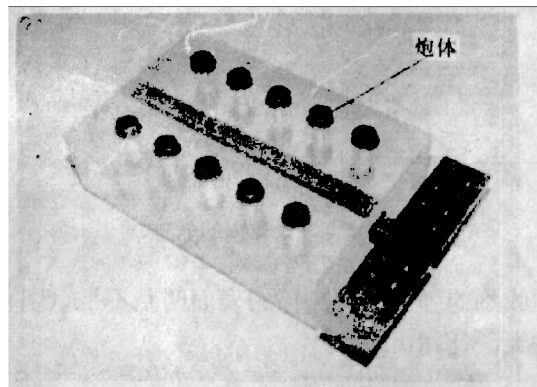


图4、次级回路波形图。
(横坐标0.1ms/div,纵坐标 3.46×10^4 A/div)

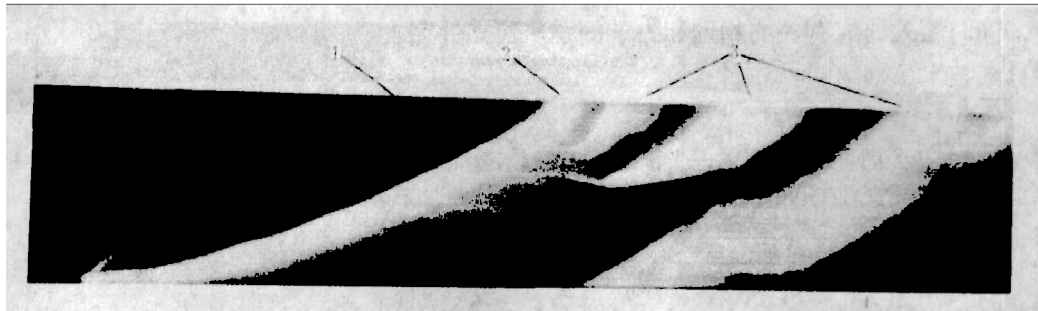


图5、光测底片图。

(1.超前等离子体发光区,2.主等离子体发光区,3.再击穿等离子体发光区)

弹丸后面主等离子体发光区前沿的轨迹,然后换算得到弹丸的内弹道速度,得到的光测底片见图5,实测弹丸位置随时间的变化曲线和换算得的速度曲线见图6和图7。从图5中,不仅可以见到弹丸后主等离子体发光区的轨迹,还可以见到等离子体泄漏到弹丸前面的发光区(超前等离子体发光区),这是由于轨道与弹丸之间间隙太大造成的,经采取措施后,第二发试验中等离子体的泄漏明显减少,使得弹丸的内弹道的末端速度有了很大增加。测量计算得到弹丸内弹道的末端速度为1.68m/s。图5还可以测出主等离子体宽度约为40~70mm。第二发试验还采用了丝开关法测量弹丸外弹道速度,经衰减后的弹丸的平均速度约为1.58km/s。

实验后,炮体结构均遭破坏,由于应力集中,两块有机玻璃板沿着矩形炮膛的四角破裂成六块。轨道的表面喷镀一层碳黑,烧蚀严重,深达0.10mm,表面粗糙,呈颗粒状。试验

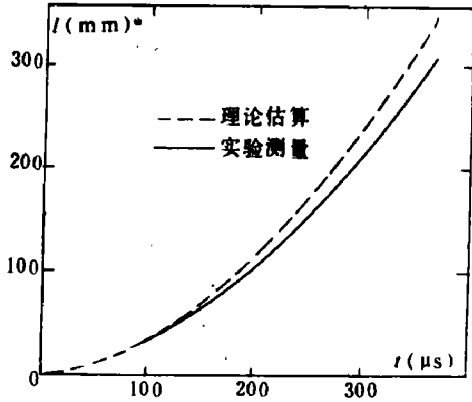


图6 弹丸在炮膛内的轨迹,

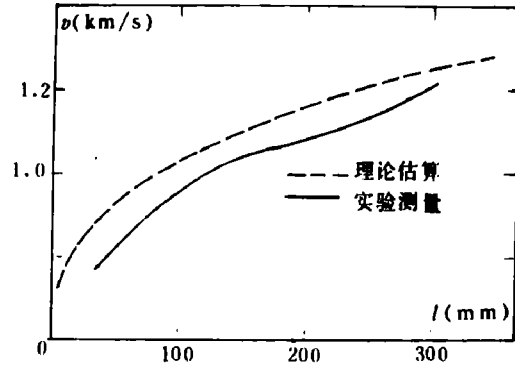


图7 弹丸的内弹道速度

后回收到的弹丸与靶碰撞的表面凹凸不平(图8),重量损耗较大,达46mg。

五、结束语

原理性研究阶段首次进行的两次试验是成功的。在此基础上,我们下一步打算将较大质量的弹丸加速到更高的速度,同时深入研究有关的物理和力学问题,建立并完善各种诊断技术。

图8 试验后回收到的弹丸实物像。

参加本工作的同志还有韩立石,张希林。作者们感谢陈能宽教授、胡仁宇、经福谦、徐志磊、陶祖聪、李幼平等研究员对此项工作的关怀。对沈金华、贾浩等提供调研资料也表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Brooks, A. L., Hawke, R. S., UCRL-85877 (1981).
- [2] Hawke, R. S., UCRL-52778 (1979).
- [3] Rashleigh, S. C., Marshall, R. A., *J. Appl. Phys.*, 49(4)(1978), 2540.
- [4] Brooks, A. L., et al., UCRL-84876 (1980).
- [5] Bedfow, A. J., Cclark, G. A., Thio, Y. C., AD/D-139529(1983).
- [6] Jamison, K. A., Burden, H. S., AD/A-131153(1983).
- [7] Deis, D. W., Poos, D. P., *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-10(1)(1982), 23.
- [8] Deis, D. W., Menab, I. R., *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-10(1)(1982), 16.
- [9] Menab, I. R., et al., LA-8000c (1979).
- [10] Hawke, R. S., Fowler, C. M., et al., UCRL-85007 (1981).
- [11] UCRL-52000-82-7, (1982), 19.
- [12] Hawke, R. S., Scudder, J. K., UCRL-82296 (1979).
- [13] Marshall, R. A., *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG, 10(1)(1982), 11.

(14) Kerrisk, J. F., LA-9092-MS (1981).

(15) 高顺受等, 一种小型轨道炮的能源系统。本刊本期

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE TEST ELECTROMAGNETIC RAILGUN

Gong Xinggen, Sun Chengwei, Zhou Zhikui

Shi Jianxun, Cai Mingliang, Wu Xingmei, Li Zongyi

Abstract

The principle, experimental arrangement and related results of the test electromagnetic railgun are described in this paper. A 50kJ capacitor bank is used as the primary power supply, and an inductor of $2.5 \mu\text{H}$ as the secondary magnetic energy storage. In order to supply a sustained current to the railgun, four switches are inserted in the circuit for adjusting the variation of the current. The barrel is 30cm long and with a cross-sectional area of $0.8 \times 0.6 \text{cm}^2$. It is shown from two launching tests that a 0.34 gram polycarbonate projectile might be accelerated the speed over 1.5km/s.

一种小型轨道炮的能源系统

高顺受 陈素年 冷观松 韩俊玉

本文介绍了一个50kJ的能源系统,它是专为进行轨道炮原理性实验而研制的。初级能源是4mF的电容器组,它再通过储能电感给轨道炮输送能量。初步实验表明,这个能源系统设计基本合理,使用可靠。文中还初估了轨道炮的性能。

一、引言

电磁轨道炮是一种新型的弹丸发射装置。国外对电磁驱动问题早在二十年代就开始研究,直到七十年代澳大利亚材料研究实验室对电磁轨道炮取得突破性进展之后,才引起各国的重视。近年来美国、日本、澳大利亚等国开展了广泛深入的研究。电磁轨道炮种类很多,它依据应用目的,供能方式和作用原理而划分。我们选取进行研究的轨道炮是一种直流加速型电磁轨道炮。它的作用原理是,当电流流过轨道和电枢时,产生磁场,磁场与流过电枢电流相互作用,产生洛伦兹力,从而加速弹丸。弹丸可以加速到非常高的发射速度。用于状态方程研究的轨道炮要求把1-3g的弹丸加速到15km/s或更高些。我们所设计的能源是为加速0.5g聚碳酸酯弹丸达到1-3km/s的速度提供的。