

电磁轨道炮抗烧蚀枢轨结构设计

毛保全 张天意 白向华 朱 锐

(装甲兵工程学院 兵器与控制系, 北京 100072)

摘要: 为优化制约电磁轨道炮工程化的电枢-轨道烧蚀问题, 分析电枢和导轨受到烧蚀的原因, 应用低温等离子体加上磁场的定向约束作用设计了电磁轨道炮的枢轨结构, 增升高速运动的电枢-轨道接触面的电导率, 从而提高电流在电枢-轨道接触面的电流扩散率, 降低趋肤效应, 降低烧蚀效果。分析表明: 基于磁约束低温等离子体技术设计的电磁轨道炮枢轨可以有效的优化电枢-轨道结构的烧蚀问题。

关键词: 电磁轨道炮; 烧蚀; 等离子体; 磁约束

本文引用格式: 毛保全, 张天意, 白向华, 等. 电磁轨道炮抗烧蚀枢轨结构设计[J]. 兵器装备工程学报 2020 41(03): 67-71.

Citation format: MAO Baoquan, ZHANG Tianyi, BAI Xianghua, et al. Design of Anti-Ablation Armature Structure for Electromagnetic Rail Gun[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering 2020 41(03): 67-71.

中图分类号: TJ301

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2020)03-0067-05

Design of Anti-Ablation Armature Structure for Electromagnetic Rail Gun

MAO Baoquan, ZHANG Tianyi, BAI Xianghua, ZHU Rui

(Weapons and Control Department, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to optimize the armature-orbital ablation of electromagnetic orbital guns, this paper firstly analyzed the causes of ablation. Then, this paper applied magnetic field constrained low temperature plasma to increase the electrical conductivity of the armature-orbit contact surface, and the current diffusion of the current at the contact surface. Meanwhile, the skin effect and ablation effect is reduced. Combined with theoretical analysis, the design of the new pivotal structure was carried out. The analysis shows that the electromagnetic orbital armature designed based on the magnetic confinement low-temperature plasma technology can effectively optimize the abrasion problem of the armature-orbit structure.

Key words: electromagnetic railgun; ablation; plasma; magnetic confinement

电磁轨道炮是当今世界各军事强国竞相发展的前沿武器, 被军事专家喻为 21 世纪的重大武器、人类发展史上的革命性武器^[1]。电磁炮弹丸发射速度达到 2.5~3 km/s, 小质量弹丸甚至达到 80 km/s, 远超过目前火药发射极限速度 1.8 km/s。电磁轨道炮是由两条与大电流并联的固定轨道和一个与轨道保持良好电接触并可沿轨道轴线滑动的电枢构成。

如图 1 所示, 当电源接通时, 电流沿着一个轨道流过电枢, 然后通过另一个轨道返回, 从而形成闭环。当大电流流过两条平行轨道时, 在两条轨道之间产生强磁场, 该磁场与流过电枢的电流相互作用, 产生电磁力以推动电枢和放置在电枢前方的抛射物沿轨道加速以获得高速^[2]。

收稿日期: 2019-05-16; 修回日期: 2019-07-06

作者简介: 毛保全(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事兵器科学与技术研究, E-mail: 381944978@qq.com。

通讯作者: 张天意(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事兵器科学与技术研究, E-mail: zty_1995@foxmail.com。

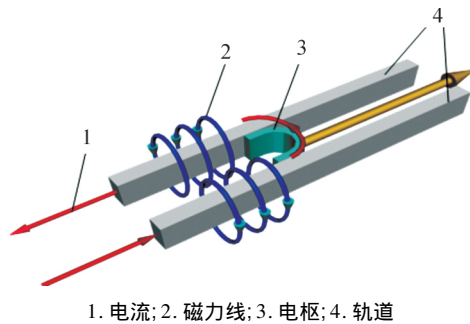


图1 轨道炮原理图

电磁轨道炮发射时是在 MA 级别的强脉冲电流的条件下加速弹丸的,其工作条件极为恶劣^[3],材料要经受极大的瞬时热流冲击,易造成轨道的严重烧蚀。烧蚀电枢和导轨在轨道炮发射期间受热。这种热源一方面是由电枢和导轨之间的摩擦,另一方面是电流和电弧产生的焦耳热。这种热量可能导致电枢熔化甚至导致电枢焊接到导轨上。由于加工精度的限制,在导轨的接触面和衔铁之间经常存在间隙,并且产生电弧,该电弧产生的热量足以熔化导轨的表面以形成永久性损坏^[4]。

烧蚀极大的限制了电磁轨道炮发挥其应有的威力,烧蚀问题的解决是电磁轨道炮工程实用的关键,具有重要意义。

1 电枢-导轨结构的烧蚀

电枢和轨道烧蚀是制约电磁轨道炮工程化的瓶颈难题。电枢和轨道烧蚀主要集中在电枢的尾部和轨道与电枢接触的部分,对于这部分的烧蚀,主要原因归结为速度趋肤效应、高速表面磨损和电枢导轨电接触面上接触失压等^[5]。建立一个 2D 仿真电枢几何模型如图 2 所示。

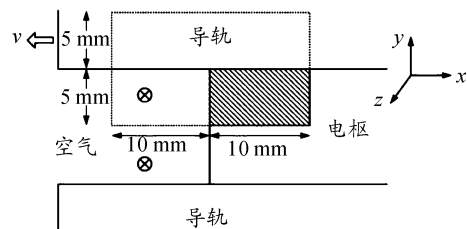


图2 电枢仿真模型

仿真中电枢内侧的磁感应密度为 30 T,电枢运动速度为 0 ~ 150 m/s。计算获得的电枢温度分布如图 3 所示。可以看出,首先发生烧蚀的部位在电枢-轨道接触表面的尾部区域。这是因为速度趋肤效应导致电流集中在该区域,并且高电流产生高焦耳热。

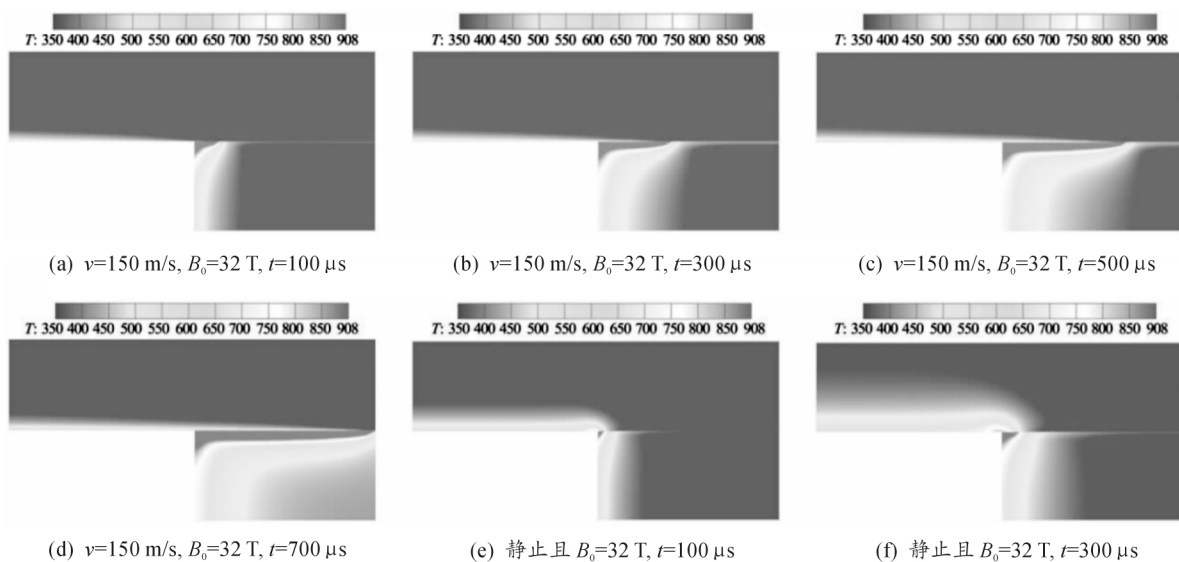


图3 电枢接触面上温度的影响

图 3(a) ~ 图 3(d) 表明,由于电流总是集中在接触表面的后缘,因此熔化波在速度趋肤效应的作用下向前传播进而形成间隙,由于间隙的存在使得发生烧蚀的电枢部分不再与轨道接触,并且当熔化的波通过整个接触表面后,电枢与轨道分离,接触方式由金属与金属的接触转换成电弧接触,电枢将有可能发生转摆。

图 3(e) 及图 3(f) 为电枢速度为 0 m/s 时温度分布图。可以发现,由于频率趋肤效应的影响,烧蚀也发生在轨道和

电枢之间的界面的后缘处。烧蚀区域基本上是固定的,并且没有向前形成熔化波的过程。进一步分析表明,电枢运动速度越高,激励磁场的磁感应强度越大,烧蚀进展越快。

从仿真分析可以看出电流速度趋肤效应对于轨道与电枢间的烧蚀有很大影响。所以通过改变电枢这个“电流源”和导轨这个“电流受体”的部分电流输入量和电流接受量是减少速度趋肤效应的一种可行办法。

在 10^6 A 强大电流下,高速运动的电枢-轨道结构被严

重烧蚀和磨损,影响了电磁轨道炮的使用寿命。目前工程界主要采用两种方式提高轨道、电枢寿命:一是提高电枢和轨道结构间的加工精度,同时增加电枢和轨道间的接触作用力(电枢和轨道间作用力达到几吨,随之带来巨大摩擦阻力和磨损沟壑);二是强化电磁炮轨道材料性能,提高耐烧蚀、耐磨损性(在高速大电流高热量环境下,轨道烧蚀效应依然存在)。经过多年发展,以上两种方法仍不能很好地解决电磁轨道炮的烧蚀问题。特别是电枢的尾部和轨道的初始位置,烧蚀更为严重,缩短了轨道的使用寿命。

2 新型电枢-轨道抗烧蚀结构设计

目前电磁轨道炮主要采用固体电枢,存在的电流趋肤效应、切削烧蚀和摩擦生热等造成烧蚀的原因,其中趋肤效应是主要因素。目前针对固体电枢也进行了各种理论和试验研究。而混合电枢即固体和等离子体结合而形成的电枢结构,国外上世纪九十年代曾实现过,但等离子体为高温等离子体,目前公开资料较少,国内亦没有开展相关研究。高温等离子体也存在对轨道的二次烧蚀作用,所以不做考虑。

基于磁约束低温等离子体可以改变电枢-轨道接触面电导率梯度、提高电流扩散率进而减轻电流趋肤效应、降低其接触面烧蚀,可以设计新型的电磁轨道炮电枢-轨道结构来将低温等离子体添加到电磁轨道炮的发射过程中。

2.1 磁约束等离子体理论

根据等离子体物理学理论^[6],在大约1%的气体电离情况下,这种电离气体已可称为理想的导电气体。磁约束等离子体技术已在多种工程试验中得到广泛应用,高速等离子体通过磁场时将产生一个影响流动的洛伦兹力,形成磁流体动力学(MHD)效应^[7],这种效应可以改变气体的流动状态,一定程度地抑制湍流,进而影响其传热特性^[8]。

在国外的研究报道中,NASA 艾姆斯研究中心采用电弧激波管(EAST)设备开展了磁流体加速实验研究^[9]。其中磁场和电场所需的电通过大容量电容提供,并且还专门构建了电离种子粉末注入装置以提高气导电率^[10]。研究表明:当磁场强度为0.92T时,导电气体最大可以加速40%。

2.2 强磁环境下低温等离子体的生成

低温等离子体可以通过辉光放电、电晕放电、介质阻挡放电、射频放电、滑动电弧放电、热电弧放电来生产^[11]。但其中有很多限制因素如辉光放电只适用于低气压环境,且难于连续化生成,一般在高压和强电场的工作条件下,不容易获得稳定的电晕放电,亦容易产生局部的电弧放电等,综合电磁轨道炮发射环境为强电磁环境,选择介质阻挡放电、射频放电、热电弧放电技术进行研究,详细分析每种方法在强电磁环境下造成的不同影响,进行计算机仿真分析,保证产生稳定高效的低温等离子体源。

这里制定两种安装方案,一是在电枢上设置等离子体发生器;二是在导轨上设置等离子体发生器。

1) 电枢式:

在电枢上安装等离子体发生器,利用流经电枢的电流作为阳极,底座为接地阴极,在高电压的情况下电离电枢中的惰性气体从而生成低温等离子体,并在洛伦兹力和电场作用下自由电子被电枢吸收,可以在发射全程作用,而不用过多时间控制。图4为电枢式等离子体发生器示意图。

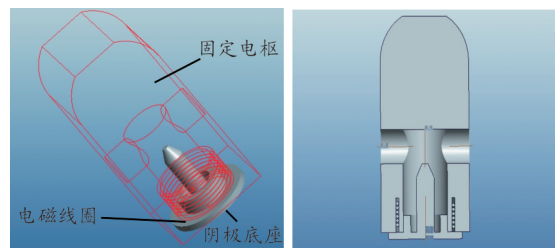


图4 电枢式等离子体发生器示意图

2) 导轨式

由于电磁轨道炮电枢体积较小,在电枢上布置等离子体发生器空间较小,会影响到低温等离子体产生密度,具体实施也有一定工程难度。而在轨道上布置则会减少此类难度,而且可以利用外部能源为等离子体发生器供能,也能采用现有的成熟低温等离子体发生器,降低了工程实践难度。但缺点在于对等离子体喷射时间的控制,避免由于控制不当,导致等离子体弥漫在导轨与电枢之间造成转捩,降低发射效率。图5为导轨式低温等离子体喷枪结构。

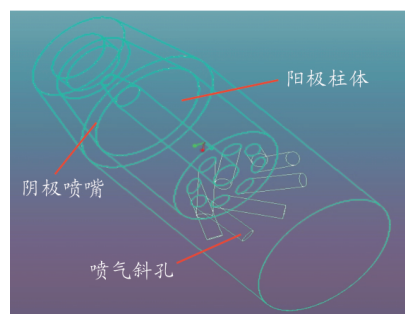


图5 低温等离子体喷枪结构示意图

2.3 磁约束低温等离子体的控制技术

低温等离子体控制即为达到特定目的利用相应技术原理对等离子体的运动状态或速率进行人为控制。由于等离子体包含大量的电子、正离子和中性粒子,因而对于等离子体控制方法主要有磁场约束控制、外加电场控制、其他动力源控制等方法。

1) 磁场约束控制

通过给等离子体源外加一个电磁线圈,线圈上施加频率为 ω 、幅度为 I_0 的电流,线圈在等离子体源内产生随时间变化的磁场:

$$B_z(t) = B_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

变化的磁场产生感应电场:

$$E_\theta(t) = -E_0 \cos \omega t \quad (2)$$

电离气体的电子受到磁场的约束。带电粒子在垂直磁

场方向,围绕磁力线作回旋运动,电子的回旋半径约为:

$$r_{Le} = \frac{\sqrt{2m_e k T_e}}{q B_0} \quad (3)$$

其中: m_e 是电子质量; T_e 是电子温度; q 是电子电荷; B_0 是等离子体源内的磁场。

在平行磁场方向带电粒子做匀速直线运动,所以粒子的运动轨迹是绕磁力线做等螺距的螺旋线运动。

2) 外加电场控制

通过在等离子体源外直接加载电场,可以控制等离子体内的电子运动方向。电场是电荷及变化磁场周围存在的一种特殊物质。电场具有通常物质所具有的力和能量等客观属性。电场对进入其中的电荷有作用力,即电场力 F :

$$F = Eq \quad (4)$$

E 为电场强度; q 为电荷量。

等离子体基本方程包含等离子体连续性方程(粒子数守恒原理)和等离子体运动方程(动量守恒原理):

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (nu) = g - l \\ nm \frac{du}{dt} = -\nabla p - nmv \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为粒子密度; u 为流速; g 、 l 分别为每秒单位体积内粒子由电离而产生、由复合而湮灭的比率; p 为压强; m 为粒子质量; v 为粒子热运动速度。

部分电离等离子体状态方程为等离子体辅助方程:

$$p = kT \sum_i n_i - \frac{kT}{24\pi\lambda_D^3} \quad (6)$$

式中: n_i 为第 i 种成分的粒子数密度; λ_D 为 Debye 长度。

3) 其他动力源控制

对于等离子体的控制也可以通过使介质在电离前即带有一定速度,如通过控制惰性气体的流量来间接控制等离子体速度与方向。

在强电磁环境下控制方式都会不同程度受到干扰,可能会影响等离子体的控制程度,造成不能使等离子体充满电枢与轨道间的缝隙或者不能达到为电枢提供电子的目的,这需要后续要进行模拟仿真来确定。

2.4 电磁轨道炮电枢-轨道结构模型设计

1) 电磁轨道炮电枢结构构建

电磁轨道炮的相关研究中,最主流的电枢类型依旧是固体电枢,如图 6。

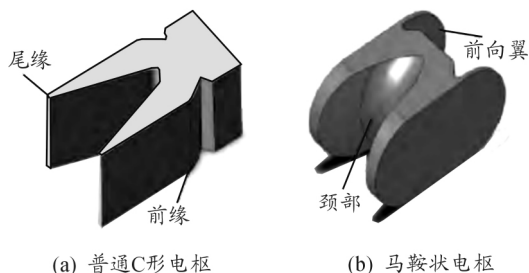


图6 固体电枢

为了实现设计要求,除了要考虑正常电磁轨道炮发射时必须具有良好0电枢-轨道接触面、质量足够小、良好的电导率与耐烧蚀的材料外,还要重点考虑利于电子吸附的具体结构,使等离子体与固体电枢有较大的接触面积。初步考虑采用大通孔和喇叭形设计,如图7所示,主要是增大接触面积。

为了使等离子体可以更好充满电枢与导轨间的缝隙,设计了侧边开槽中间打圆形通孔的电枢结构如图8所示。

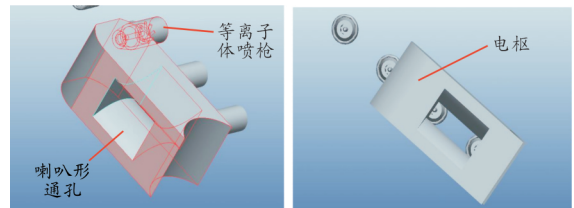


图7 采用大通孔和喇叭形的固体电枢结构

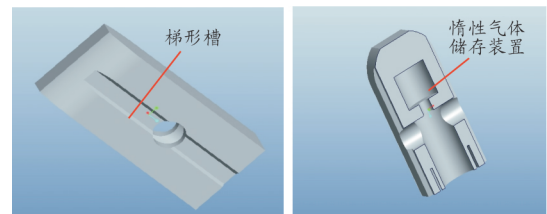


图8 采用侧边开槽中间打圆形通孔的固体电枢结构

2) 电磁轨道炮轨道结构构建

本文的轨道设计要从总体结构设计角度考虑低温等离子体发生器、低温等离子体控制、电磁绝缘设计等方面因素,使结构上便于布置,以便产生大量稳定可控的低温等离子体。

构造成如图9所示的结构,导轨侧边开梯形槽,单侧导轨依次排列等离子体喷枪,喷枪间距等于电枢喇叭孔长度,控制等离子体喷枪工作的时机,使其在电枢喇叭孔上沿到达时第一个喷枪开始工作产生等离子体喷至导轨另一侧,在孔下沿接触时停止工作,第二个喷枪开始工作依次进行,从而保证等离子体喷枪只在电枢经过时工作,这样的考虑即避免了等离子体弥漫于电枢经过后的区域,也能保证电枢一直有等离子体作用。

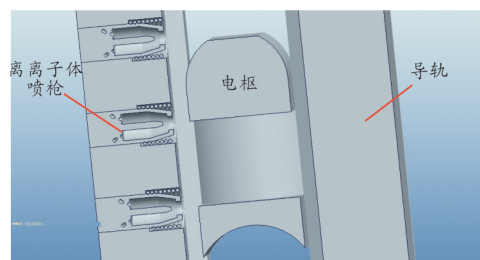


图9 电枢导轨结合半剖图

2.5 新型电枢-轨道结构的工作

电磁轨道炮发射过程中,无论采用何种电枢-轨道结构,都会

把低温等离子体加入到发射过程。图 10 表示电枢式和导轨式等离子体磁约束控制基本原理。

虽然低温等离子体在放电过程中会产生温度极高的电子,但也同时生成温度很低的重粒子,整个系统呈现出低温的状态,并且加上磁场的定向约束作用,增升高速运动的电枢-轨道接触面的电导率,从而提高电流在电枢-轨道接触面的电流扩散率,降低趋肤效应,进而降低烧蚀效果。添加横向磁场后,低温等离子体做螺旋运动形成磁箍缩,有利于增加等离子体密度,而且可以控制等离子体填充电枢与导轨间的缝隙,从而减少电弧放电,也能有助于减少烧蚀。

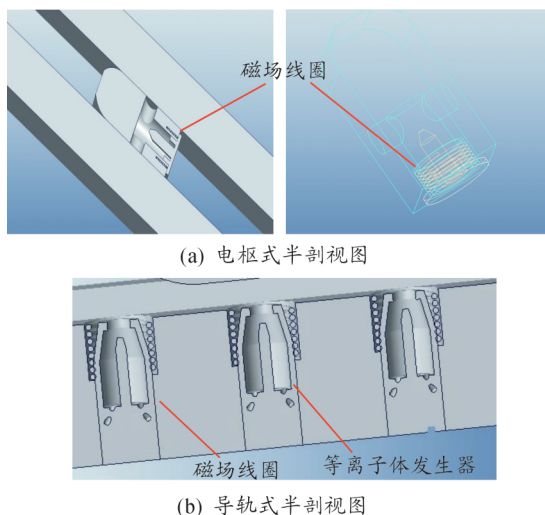


图 10 等离子体磁约束控制基本原理示意图

3 结论

1) 仿真分析结果表明,电流速度趋肤效应对轨道与电枢间的烧蚀起主要作用。

2) 基于磁约束低温等离子体技术设计的电磁轨道炮枢可以优化电枢-轨道结构的烧蚀问题。

参考文献:

- [1] 贺景瑞, 李小将. 增强型电磁轨道发射器电磁场和电感梯度仿真分析[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 78-82.
- [2] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [3] 岳松堂, 林芳竹. 前景黯淡的电磁炮[J]. 装备技术, 2013(1): 44-47.
- [4] 乔志明, 雷彬, 吕庆敖, 等. 电磁轨道炮关键技术与发展趋势分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(2): 91-95.
- [5] 李军, 严萍, 袁伟群. 电磁轨道发射技术的发展与现状[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1052-1064.
- [6] RICHARD J R, CHARLES H, KRUEGER. Plasmas in MHD power generation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1991, 19(6): 1-15.
- [7] BURR U, BARLEON L, et al. Magnetohydrodynamic convection in a vertical slot with horizontal magnetic field[J]. Journal of Fluid Mech, 2003, 475(1): 21-40.
- [8] 侯俊, 毛杰, 潘华辰. 磁流体管流的层流与湍流模型数值模拟[J]. 核聚变与等离子体物理, 2013, 33(1): 7-13.
- [9] DAVID W B, UNMEEL B M. Experimental demonstration of Magneto-Hydro-Dynamics (MHD) acceleration[R]. AIAA-2003-4285, 2003.
- [10] ASANO H, KAMINAGA S, YAMASAKI H. Effect of non-uniform discharge on performance of MHD accelerator with non-equilibrium plasma[R]. AIAA-2006-969, 2006.
- [11] 吴云, 李应红. 等离子体流动控制研究进展与展望[J]. 航空学报, 2015, 36(2): 381-405.

科学编辑 田振国 博士(燕山大学副教授)

责任编辑 周江川