

# 等离子体对电磁轨道炮身管内壁 烧蚀磨损及疲劳寿命影响研究

张天意, 毛保全, 白向华

(装甲兵工程学院 兵器与控制系, 北京 100072)

**摘要:** 通过 workbench 多物理场的耦合分析, 考虑最大温度对温度场的影响, 进行了等离子体对电磁轨道炮烧蚀磨损和疲劳损伤的有限元建模和分析。通过理论分析和仿真计算发现, 理想状态下, 添加等离子体会比不添加等离子体时降低烧蚀磨损, 电枢和轨道承受的最大应力分别降低了 99.427%, 99.73%, 寿命大幅提升。

**关键词:** 电磁轨道炮; 等离子体; 烧蚀磨损; 疲劳寿命

**本文引用格式:** 张天意, 毛保全, 白向华. 等离子体对电磁轨道炮身管内壁烧蚀磨损及疲劳寿命影响研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(07): 33–37.

**Citation format:** ZHANG Tianyi, MAO Baoquan, BAI Xianghua. Effect of Plasma on Ablation Wear and Fatigue Life of Inner Wall of Electromagnetic Rail Gun [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(07): 33–37.

中图分类号: TJ301

文献标识码: A

文章编号: 2096–2304(2020)07–0033–05

## Effect of Plasma on Ablation Wear and Fatigue Life of Inner Wall of Electromagnetic Rail Gun

ZHANG Tianyi, MAO Baoquan, BAI Xianghua

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

**Abstract:** In order to study the effect of plasma on the ablation wear and fatigue life of the inner wall of the electromagnetic track gun barrel, the paper used the workbench to analyze the multi-physics coupling, the ablation wear and fatigue damage of electromagnetic track gun were modeled and analyzed by finite element method. Through theoretical analysis and simulation calculation, ideally, after adding plasma, the ablation wear was greatly reduced, and the maximum stress received by the armature and the track was reduced by 99.427% and 99.73%, respectively, and the life was greatly improved.

**Key words:** electromagnetic railgun; plasma; ablation wear; fatigue life

与传统火炮相比, 电磁轨道炮既有高炮反应快、拦截精度高的优点, 又比高炮初速高、威力大、射程远、综合毁伤能力强, 比导弹全寿命成本低, 是一种极具潜力的新概念动能武器, 已成为军事大国竞相研究的对象。

虽然不像传统火炮一样, 依靠火药燃烧推进, 但是在电磁轨道炮发射过程中, 仍然会产生大量的热, 这种热主要来自放电烧蚀。这种热效应同样会对电磁轨道炮的轨道产生烧蚀和热应力。电磁炮的发射过程伴随着这种烧蚀和热应

力现象, 必然会对电磁炮的精度以及可靠性产生极大的危害, 甚至导致电磁轨道炮部件受损破坏。

武器寿命问题是武器研发、设计以及使用部门都相当重视的问题。电磁轨道炮的寿命主要包括疲劳寿命和烧蚀寿命, 烧蚀磨损使得射弹出口初速降低, 射击精度下降, 弹丸散布增加, 最终报废。这在传统火炮中已经得到广泛的认可<sup>[1]</sup>。为了满足电磁轨道炮的轻便和机动等要求, 多采用高强度和超高强度的新型材料, 相应的这些新型材料普遍韧性

收稿日期: 2019–08–29; 修回日期: 2020–06–06

作者简介: 张天意(1995—), 男, 研究生, 主要从事兵器科学与技术研究, E-mail: 381944978@qq.com。

降低、脆性断裂的倾向性变大,其所受应力未达到材料屈服强度时就可能会发生破坏。电磁轨道炮重复发射后,轨道会产生裂纹,这些微裂纹将使身管的承载能力大大降低,影响寿命。因此不能单一地用烧蚀寿命来判断身管的使用寿命,疲劳寿命已开始成为身管寿命标准必须要参考的重要指标<sup>[1]</sup>。

身管内膛烧蚀磨损与寿命密切相关,通常以以下四个指标来评定身管的寿命:①炮口速度下降量;②射击精度下降量;③引信不能解脱保险;④弹带削光。一般认为该四项指标有一项不合格就可以判定身管寿命终止。但是这四种判定标准均很难预测究竟何时何种指标达到失效<sup>[2]</sup>。多年来的火炮试验证明,不管是初速下降、密集度增大还是弹带削光,决定因素都是烧蚀磨损量。烧蚀磨损量越大,初速下降量就越大,引信不能解除保险的概率就越大,同时弹丸在飞行过程中稳定性变差,从而使得射击精度下降<sup>[3]</sup>。所以当前普遍使用最大烧蚀磨损量与身管寿命之间的关系来确定火炮的全寿命。

## 1 模型构建

电磁轨道炮由导轨、电枢、等离子层等组成,根据比例关系绘制三维几何模型如图1。

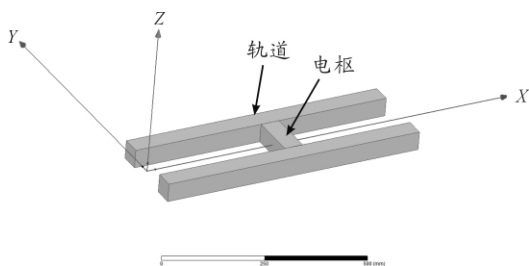


图1 构建三维几何模型示意图

电磁轨道炮的导轨选用材料铜,电枢选用材料铝,自定义材料 dlz(代表等离子体层)并赋予其密度、比热、热传导系数等值,其具体数值将在不同仿真条件时确定。本文要求电流大小为  $1 \times 10^6$  A。导轨、电枢、等离子层网格单元最大长度分别设置为 10 mm, 5 mm, 1 mm。设置求解步骤即可对其进行电磁分析。使用 workbench 添加瞬态热分析模块可以加载热生成云图。

## 2 等离子体对电磁轨道炮烧蚀磨损影响

由于电磁轨道炮是新型的尖端科技,一方面,电磁轨道炮仍处在发展的初期阶段,所以至今仍未有一种获得广泛认可的理论公式。另一方面,处于对尖端技术的技术保护,所以相关的研究资料极难获得。目前,主要从传统火炮发射身管内壁烧蚀磨损的一些理论公式进行推断。传统火炮身管

的计算方法如下:

1) 最早的身管的烧蚀模型是由 Jones 在 1911 年提出<sup>[4]</sup>的:

$$N = \frac{V}{A^2 d (d - 2) P^{1.7}}$$

式中:  $N$  为身管极限射击发数;  $V$  为弹丸初速 (m/s);  $A$  为经验常数;  $d$  为膛内径;  $P$  为膛内最大气体压力 (MPa)。

2) Lawton 和 Laird 使用简单的集总参数内弹道模型计算出火药气体中心流动参数,并利用计算出的火药气体中心流动参数和半经验公式来计算火药气体传递到膛壁上的热量和烧蚀磨损量<sup>[5]</sup>。传递到膛壁上的最高温度 (SI 单位):

$$T_{\max} = \frac{T_f - 540}{1.8 + 7.130d^{2.22}m_c^{-0.86}v_m^{-0.86}} + 360$$

烧蚀系数  $A$ :

$$A = 114 \exp [0.02(f_{\text{CO}} - 3.3f_{\text{CO}_2} + 2.4f_{\text{H}_2} - 3.6f_{\text{H}_2\text{O}} - 0.5f_{\text{N}_2})]$$

每发射一组弹的烧蚀磨损量:

$$\omega = A t_0 \exp \left( \frac{\Delta E}{RT_{\max}} \right)$$

其中:  $T_f$  为中心气流温度;  $d$  为身管内径;  $m_c$  为装药质量;  $v_m$  为粘度系数;  $f$  为各个气体的体积百分含量。

3) 最高温度相关公式

目前认可度比较高的火炮烧蚀磨损的经验式为:

$$W = A \exp(B T_{\max})$$

式中:  $W$  为身管磨损量 (m);  $T_{\max}$  为身管内壁表面的最高温度 (K);  $A$  和  $B$  是由身管内壁的材料和火药的性质等决定的经验常数。而这一公式反映了火炮身管烧蚀磨损和膛壁表面温度呈指数关系,该指数规律目前已被各国专家和学者都认可。则射弹发  $N$  后,烧蚀量为:

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^N A \exp(B(T_{\max}))$$

4) BP 神经网络法

BP 神经网络是一种具有高度非线性映射能力的计算模型,被广泛应用于模式识别、自动控制和数值分析等领域,它不需要知道具体的数学模型,仅通过学习样本数据就能完成十分精确的预测<sup>[6]</sup>。

电磁炮和传统火炮不同,并不是以火药燃烧作为推进方式,所以,对于理论计算方法中的前两种无法借鉴,但是通过第3种方法可知,烧蚀量和最大温度相关,最大温度越高、则烧蚀量越大。所以,我们通过磁流体层对电磁轨道炮的最大温度的影响,可以获得对其烧蚀磨损的影响。而采用 BP 神经网络法,需要大量的实验数据支撑,不在考虑范围内。综上,采用磁流体层对电磁轨道炮的温度场的影响来定性确定磁流体层对电磁轨道炮烧蚀磨损影响。

分别设定空气组的参数和含等离子体组参数,如表1所示。将空气组(不含等离子体层)结果作为未添加磁流体层的计算对照组。

空气组计算记过如图2,图3所示,可以发现,未添加等离子体层时电磁轨道炮系统的最大温度最高温度高达

$1.147 \times 10^5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,位于空气区域中间层。此时,空气区域内的高温将传导至电枢和轨道,使其快速升温,电枢和轨道处的最大温度高达  $1\,390\text{ } ^\circ\text{C}$ 。

表1 两组系统参数

	A	B	C	D	E	F	G
空气组	0.1	1	20 000	1.2	0.1	1 030	0.01
等离子体组	0.001	1	2 000 000	1.2	0.5	1 030	0.02

注:A为空气厚度(mm),B为相对磁导率,C为电导率( $\text{s/m}$ ),D为密度( $\text{kg/m}^3$ ),E为热传导系数( $\text{W/m}\cdot\text{k}$ ),F为比热( $\text{J/kg}\cdot\text{c}$ ),G为通电时间(s)。

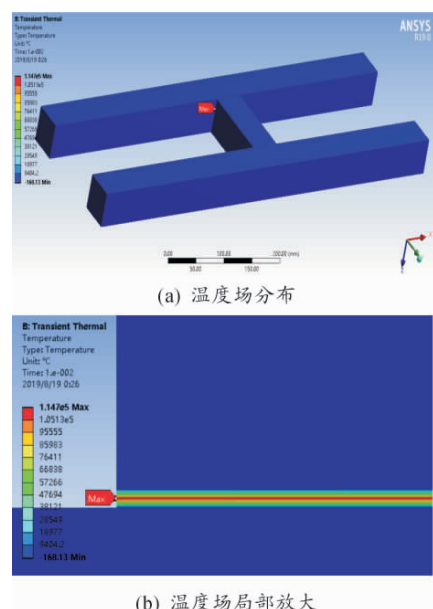


图2 未添加离子层时的温度场

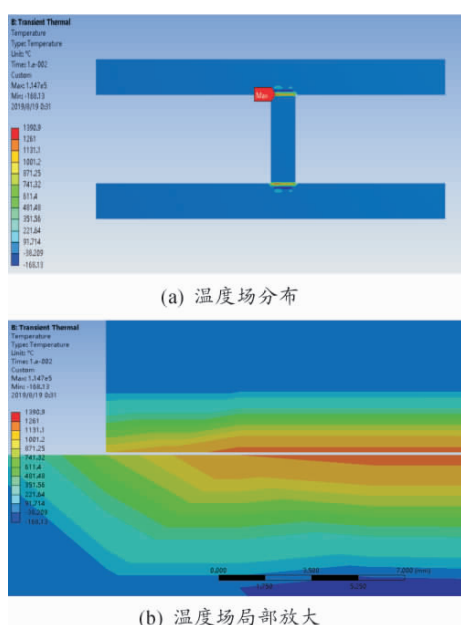


图3 未添加离子层时轨道和电枢的温度场

将理想化参数赋予含等离子层组进行数值仿真,在此理想化参数下的系统温度、导轨温度、电枢温度、等离子层温度仿真结果分别如图4~图7所示,系统最高温升仅有  $10\text{ } ^\circ\text{C}$  左右,最高温度  $30.207\text{ } ^\circ\text{C}$  位于电枢电流输入端与导轨连接拐角处附近;导轨最高温度  $24.159\text{ } ^\circ\text{C}$  在与等离子层接触表面,通电段导轨相比未通电段温度较高;等离子层处与导轨和电枢相比温度梯度较大,从通电段导轨向未通电段方向逐渐降低。

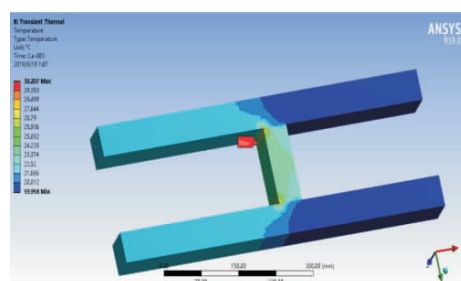


图4 理想磁流体参数下电磁轨道炮系统温度

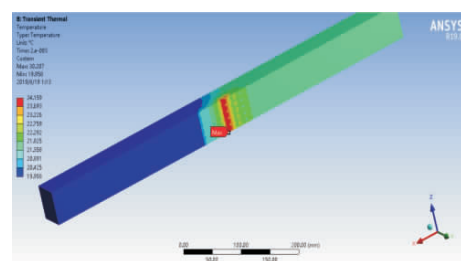


图5 理想磁流体参数下电磁轨道炮导轨温度

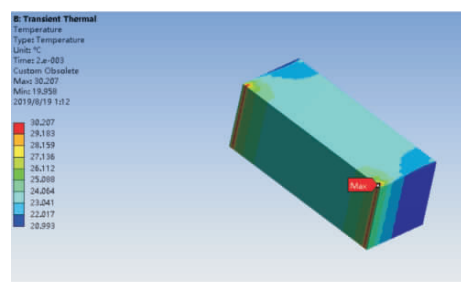


图6 理想磁流体参数下电磁轨道炮电枢温度

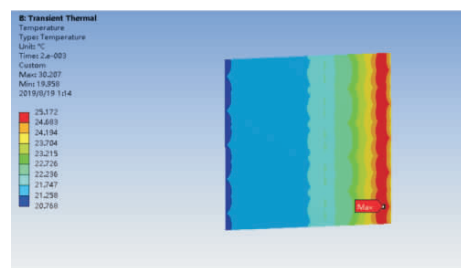


图7 理想磁流体参数下电磁轨道炮等离子层温度

从上面两组计算结果对照来看,未添加等离子体层时电磁轨道炮系统的最大温度最高温度已经远超过铜和铝的熔

点温度。理想磁流体参数下,最高温度和导轨的最高温度远小于铜和铝的熔点温度。根据给出的参照公式,可以推断得出,磁流体对电磁轨道的轨道和电枢有极强的保护作用,将会极大的降低电磁炮发射时的烧蚀磨损情况。

### 3 等离子体对电磁轨道炮疲劳寿命影响分析

疲劳破坏是机械零部件强度失效的一种主要形式,结构的疲劳强度和疲劳寿命是进行结构抗疲劳设计、强度校核的重要内容<sup>[7]</sup>。本文采用 Workbench 内置的 Fatigue Tool 疲劳计算工具。

#### 3.1 电磁轨道炮热应力场分析

电磁轨道炮的热应力场分析,需要耦合磁场、温度场以及应力场。将电磁/温度场的耦合的几何模型及材料参数以及计算结果作为热应力分析的输入边界条件,进行求解。

由于应力场计算时是以温度场作为一种热输入的边界条件进行计算,所以计算时保持求解参数的时间可控制选项和温度场计算保持一致。需要注意的是,由于应力场计算需要,需要在材料模型中,定义相关的参数,包括弹性模量、泊松比等。

所有设定完成,即可进行计算。本次计算包含两组参数,一组为对照组,作为不含等离子体系统。两组参数如表 2 所示。

图 8、图 9 给出了不含等离子体层组系统的应力场、应变场以及电枢和导轨的应力场、应变场。

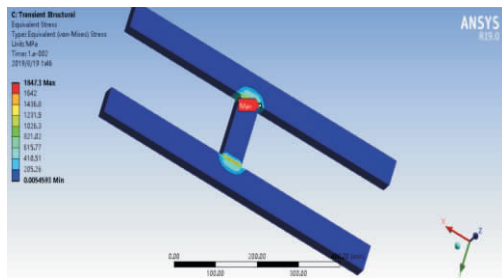


图 8 不含磁流体时系统应力场

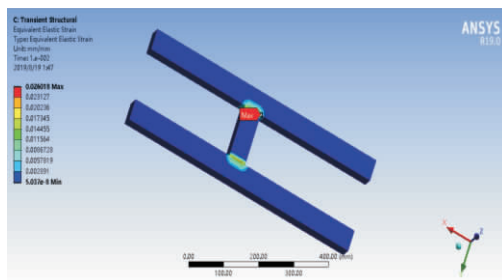


图 9 不含磁流体时系统应变场

当电磁轨道炮不包含磁流体层时,系统的最大应力高达 1 847.3 MPa,最大应变为 0.026。其中,电枢和轨道的最大

应力分别为 1 847.3 MPa 和 1 709.8 MPa,这已经超过铜和铝的屈服强度。

将理想化参数赋予等离子层进行数值仿真,计算结果如图 10、图 11 所示。

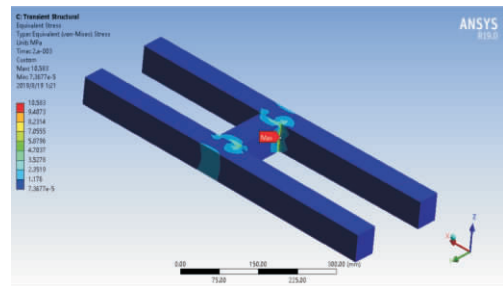


图 10 理想磁流体参数下系统应力场

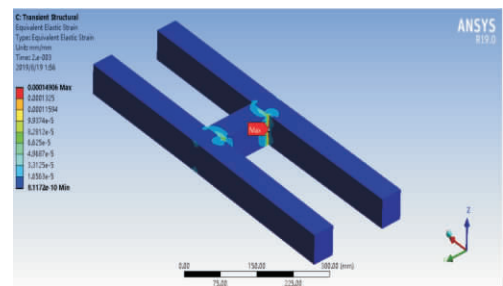


图 11 理想磁流体参数下系统应变场

由图可知,理想磁流体参数下电磁轨道炮系统的最大应力仅为 10.583 MPa,最大应变约为 0.000 15。最大应力和应变出现在电枢和轨道的拐角处。电枢和轨道的最大应力分别为 10.583 MPa 和 4.559 9 MPa。同未添加等离子体层的计算结果相比较,最大应力分别降低了 99.427%,99.73%。

#### 3.2 电磁轨道炮疲劳寿命分析

在获得电磁轨道炮系统的应力场后,即可进行疲劳寿命分析,本次分析假设炮弹为单次发射,每次发射后恢复至静态进行下一次发射。

图 12 和图 13 为不含磁流体时电枢结构以及轨道的疲劳寿命云图,从图中可以看出在电枢的两端以及导轨与电枢的结合位置处,寿命为 0,这表明结构会直接破坏。

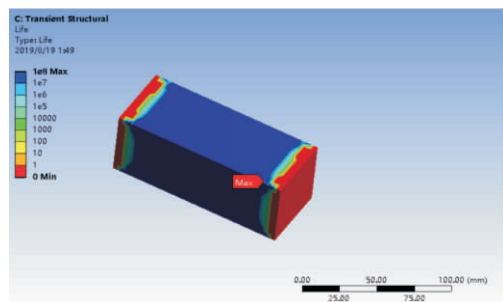


图 12 不含磁流体时电枢结构的疲劳寿命云图

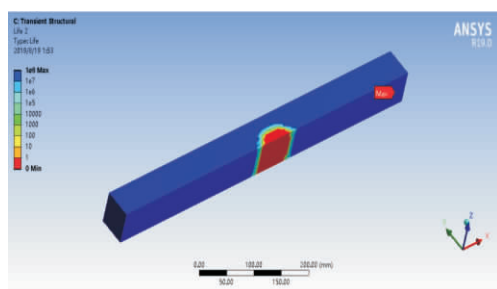


图13 不含磁流体时轨道的疲劳寿命云图

图14和图15为理想磁流体参数下电枢与导轨的疲劳寿命云图。图中,可以看出其寿命都超过了 $10^8$ 。这表明,在此种参数下,寿命无限大,可以不考虑疲劳破坏的情况。

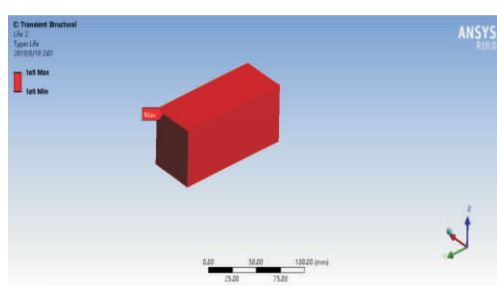


图14 理想磁流体参数下电枢结构的疲劳寿命云图

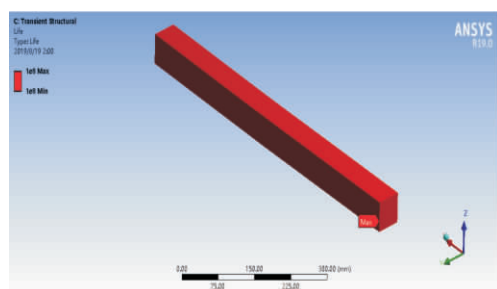


图15 理想磁流体参数下轨道的疲劳寿命云图

## 4 结论

1) 未添加等离子体层时电磁轨道炮系统的最大温度最高温度高达 $1.147 \times 10^5$ ℃,位于空气区域中间层。此时,空气区域内的高温将传导至电枢和轨道,使其快速升温,电枢和轨道处的最大温度高达1390℃,已经超过铝和铜的熔点,将会发生严重的烧蚀行为。

2) 理想等离子体参数下,最高温度30.3℃位于电枢电

流输入端与导轨连接拐角处附近;导轨最高温度24.12℃在与等离子层接触表面。所以,等离子体对电磁轨道的轨道和电枢有极强的保护作用,将会极大的降低电磁炮发射时的烧蚀磨损情况。

3) 当电磁轨道炮不包含等离子体层时,系统的最大应力高达1847.3MPa,最大应变为0.026。其中,电枢和轨道的最大应力分别为1847.3MPa和1709.8MPa,这已经超过铜和铝的屈服强度。

4) 理想等离子体参数下电磁轨道炮系统的最大应力仅为10.583MPa,最大应变约为0.00015。最大应力和应变出现在电枢和轨道的拐角处。电枢和轨道的最大应力分别为10.583MPa和4.5599MPa。同未添加等离子体层的计算结果相比较,最大应力分别降低了99.427%,99.73%。

5) 不含等离子体时,在电枢的两端以及导轨与电枢的结合位置处,寿命为0,这表明结构会直接破坏。这和前面计算的温度场中,温度超过熔点,以及应力场中应力超过屈服强度保持一致。理想等离子体参数下,电枢与导轨的疲劳寿命寿命都超过了 $10^8$ 。这表明,在此种参数下,寿命无限大,可以不考虑疲劳破坏的情况。

## 参考文献:

- [1] 庄健. 某坦克火炮身管温度应力场数值模拟及疲劳寿命分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [2] 高付申, 邱文坚, 梁世超, 等. 火炮身管寿命预测问题的研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 1997(03): 229-232.
- [3] 罗天放, 陈荣刚. 火炮身管寿命理论预测方法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(06): 28-32.
- [4] 欧阳青. 火炮身管烧蚀磨损与寿命问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [5] 欧阳青, 于存贵, 张延成. 国内外火炮身管烧蚀磨损问题研究进展[J]. 兵工自动化, 2012(06): 48-50.
- [6] 郭斌. 中厚板轧机厚度预测及模糊控制系统研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- [7] 张涛. 中直升机重要改装设计疲劳评定符合性验证方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

科学编辑 王维占 博士(中北大学讲师)

责任编辑 周江川