

螺旋线圈电磁炮驱动线圈的应力及其影响因素

蒋雅琴, 刘振祥, 杨丽佳, 沈志, 杨栋

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 基于 Ansoft-Maxwell 有限元分析软件, 建立了磁阻型螺旋线圈电磁发射装置的 3D 仿真模型, 分析了此种发射装置的三维应力场问题, 在导轨材料、求解器、求解精度等保持不变的情况下, 通过单独改变某一参数, 得到了电枢与驱动线圈的相对位置、电流大小、电枢尺寸、驱动线圈尺寸等参数与其驱动线圈所受应力之间的关系。分析结果表明, 弹丸与线圈存在一个最佳位置, 在这一位置驱动线圈所受的应力最小; 驱动线圈应力与电流的平方成正比; 最大应力随着电枢长度的增加先是逐渐减小, 然后逐渐增大, 存在一个最佳电枢长度使应力最小; 同质量铁磁质弹丸, 弹丸长径比约为 1 时, 驱动线圈应力达到最小值。最大应力随线圈长度(通电线圈匝数)增加而减小, 但减速逐渐变缓; 最大应力随线圈内径的增加逐渐增加。

关键词: 电磁发射; 应力; 驱动线圈; 有限元分析

中图分类号: TM303.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-6848(2011)07-0011-04

Stress of Driving Coil and Its Affecting Factors in Helical Electromagnetic Launchers

JIANG Yaqin, LIU Zhenxiang, YANG Lijia, SHEN Zhi, YANG Dong

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on Ansoft-Maxwell finite-element software, this paper investigated 3D stress field issue of reluctance helical electromagnetic launchers. The influencing factors of stress on driving coil in helical coil electromagnetic launchers (HCEL's) were analyzed numerically, such as the relative position of the armature and stator, current magnitude, armature and stator size. The results show that, the stress is related to the position of the armature, and the least stress position exists. The maximum stress of driving coil is proportional to the square of the current. The stress is related to axial length and radius of the armature, and the least stress parameter exists. And there also related to axial length and radius of the driving coil.

Key words: electromagnetic launching; stress; driving coil; finite-element analysis

0 引言

电磁发射是一种利用电磁能量推进物体的发射技术, 按照结构和工作原理不同, 电磁发射器(俗称电磁炮)可分为轨道炮、线圈炮和重接炮三类^[1]。螺旋线圈型电磁发射器(Helical electromagnetic launchers)具有推力大、效率高、寿命长等许多优点, 因而具有广泛的应用前景^[2-3]。

发射器是线圈炮的核心部分, 它主要由驱动线圈和电枢组成, 当电流通过电磁炮的驱动线圈时, 由于与电枢的电磁感应, 会产生一个安培力^[4]。这个力必定会有两个方向, 径向力和轴向力。轴向力使电枢加速向前发射, 径向力则对驱动线圈起反作用^[5], 特别是在大电流情况下驱动线圈的结构形变会更加明显。国内外学者对发射器中的电枢的受力、

速度及烧蚀问题做了大量的研究^[6-7], 但对驱动线圈的应力以及它所能承受的最大应力和最大电流的研究较少。本文建立了磁阻型线圈发射器三维应力计算模型, 运用有限元分析软件 Maxwell 3D 对其进行仿真, 通过单独改变某一参数, 得到了电枢与驱动线圈的相对位置、电流大小、电枢尺寸、驱动线圈尺寸等参数与其驱动线圈所受应力之间的关系。

1 理论模型

1.1 发射器基本结构

磁阻型螺旋线圈电磁发射器的基本结构如图 1, 主要由铁磁质电枢和驱动线圈组成。电刷使驱动线圈的一段通电, 导电的驱动线圈和电枢总是处于产生最大力的最佳位置。线圈与铁磁质电枢上磁化电流的引力加速电枢前进。

收稿日期: 2010-10-14

作者简介: 蒋雅琴(1983), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向为电磁发射、数值仿真。E-mail: happy-jiangyaqin@163.com

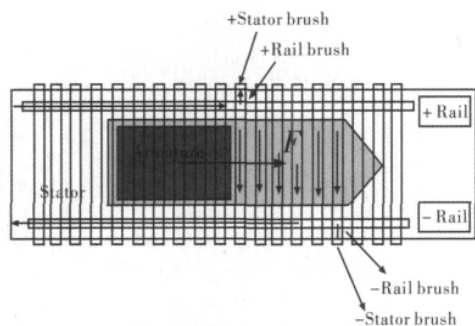


图1 磁阻型电磁发射器基本结构示意图

1.2 等效应力

物体由于外因(载荷、温度变化等)而变形时,在它内部任一截面的两方出现的相互作用力,称为“内力”。内力的集度,即单位面积上的内力称为“应力”。应力可分解为垂直于截面的分量,称为“正应力”或“法向应力”(用符号 σ 表示);相切于截面的分量称为“剪应力或切应力”(用符号 τ 表示)。

Von Mises 是一种屈服准则,屈服准则的值我们通常叫等效应力^[8]。Von Mises 应力是基于剪切应变能的一种等效应力,其大概的含义是当单元体的形状改变比能达到一定程度,材料开始屈服。Von Mises 应力是根据第四强度理论得到的当量应力。第四强度理论认为形状改变比能是引起材料流动破坏的主要原因,结果更符合实际。

Von Mises 应力用应力等值线来表示模型内部的应力分布情况,它可以清晰描述出一种结果在整个模型中的变化,从而使分析人员可以快速的确定模型中的最危险区域。

在3D应力求解器中,Von Mises 等价应力通过计算主应力分量得到^[9]:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

其中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为主应力的分量。

应力会随着外力的增加而增长,对于某一种材料,应力的增长是有限度的,超过这一限度,材料就要破坏。对某种材料来说,应力可能达到的这个限度称为该种材料的极限应力。

根据文献[1],计算得作用于驱动线圈上的径向力为: $F_r = \frac{dM}{dr} I^2$,其中 $\frac{dM}{dr}$ 是径向互感梯度,令 A_r 为力作用于驱动线圈的径向面积,则驱动线圈所受的径向应力为: $\sigma = F_r / A_r$ 。

2 有限元模型

基于图1所示的基本结构图,利用Maxwell 3D构建了三维模型,如图2所示。

其中电枢为圆柱形铁磁材料,线圈采用铜导线绕制,单层。一般模型中都是把线圈当作具有一定电流密度的圆筒处理^[10],但考虑到电磁发射器工作的电流较大,需要较大的匝间距,模型中将线圈用多个导线环进行近似,更符合实际情况。

仿真模型中,具体参数为:电枢长度为30 mm,电枢直径为40 mm;线圈直径为60 mm,长度为80 mm;线圈绕线线径为2 mm,匝间距2 mm;线圈电流 I 为1 kA。后续分析中通过改变某一个参数,分析最大应力的变化。

材料设置:驱动线圈的材料为铜;电枢为铁磁材料;其它求解区域均设定为空气。

边界条件设置:电枢的外表面和驱动线圈的内表面施加零边界条件。

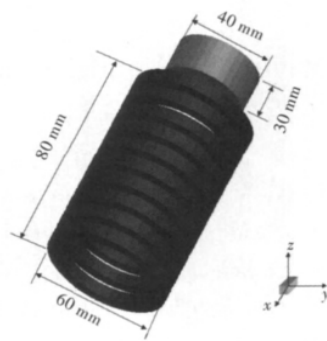


图2 3D仿真模型

3 计算结果及分析

3.1 电枢与驱动线圈相对位置对应力的影响

电枢与线圈相对位置不同,所处的磁场不同,受力也不相同,从而驱动线圈所受应力也不相同。其它参数不变,改变电枢在线圈中所处的相对距离 s (s 为电枢尾部与驱动线圈尾部的相对距离),计算出电枢的受力变化,如图3所示。

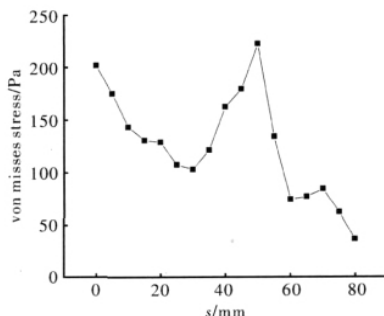


图3 应力随电枢与线圈相对距离变化曲线

从图3中可以看出, $s = 0$ mm的位置是电枢头部刚刚进入驱动线圈时,由于驱动线圈激励的磁场在轴向上的分量较大,此时应力较大;随着相对距

离 s 的增加, 磁场在轴向上的分量慢慢变小, 应力先是慢慢变小, 然后到相对位置为 30 mm 时, 磁场在驱动线圈内径向分量最大, 轴向分量最小, 应力最小, 此后应力逐渐增大; 当相对位置为 50 mm 时, 即电枢头部刚到达驱动线圈的出口边缘时, 应力达到最大值 222.8411 Pa, 然后快速减小, 当相对位置为 60 mm 时, 应力有少许的增大, 但到达 $s = 70$ mm 时, 又有下降, 出口时应力最小。

相对位置为 50 mm 时应力最大, 此时驱动线圈的最大应力分布和方向图如图 4 所示。

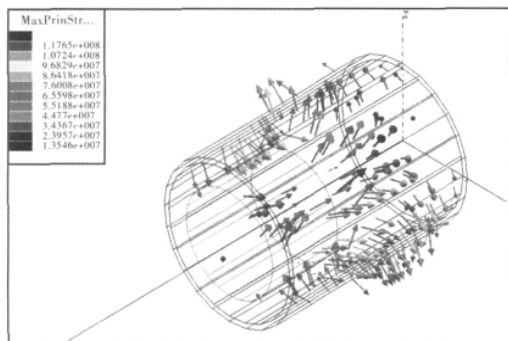


图 4 驱动线圈的最大应力分布和方向图

从图 4 可以看出, 电枢经过处, 驱动线圈应力方向是向内, 线圈塌陷; 而其他地方的应力方向主要是向外的排斥力, 线圈膨胀。

3.2 电流对应力的影响

螺旋线圈炮驱动线圈最大应力还与电流大小有关。数值计算中, 对线圈通有不同的电流 (1 ~ 20 kA), 仿真得到最大受力的变化规律。图 5 为最大应力随电流的变化曲线。

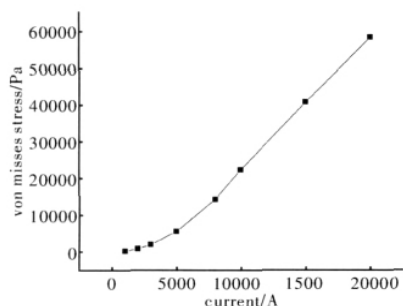


图 5 最大应力随电流变化曲线

对图 5 曲线进行二项式拟合, 得到关系式为:

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (1)$$

图 5 曲线与式 (1) 所表示的曲线基本吻合, 仿真结果为驱动线圈应力与电流的平方成正比。这也与理论公式中应力与电流的关系相符。

计算得, 当电流达到 1800 kA 时, 应力最大值。

铜的屈服强度为 235.5 MPa^[11], 若考虑安全系数, 取安全系数值为 1.3, 则允许用应力极限值 $\sigma_{\max} \approx 189$ MPa, $\sigma_{\max}$ 大于 $[\sigma]$, 所以, 此结构电磁发射器所能承载的最大电流不超过 1800 kA。

3.3 不同结构电枢对驱动线圈所受应力的影响

螺旋线圈炮驱动线圈的应力不仅与电枢相对驱动线圈的位置有关, 还与电枢及驱动线圈的形状有关。影响应力的尺寸因素主要有: 驱动线圈和电枢的结构、长度和直径。

(1) 空心电枢对驱动线圈应力大小

本文设定驱动线圈和电枢的半径、长度、电流大小和材料均不变, 将电枢挖空成圆筒形, 圆筒形电枢径向厚度 2 mm。数值计算得其最大应力值为 176.6603 Pa, 且最大应力位置在电枢与线圈相对距离 $s = 30$ mm 处。在发射时, 空心电枢较实心电枢对驱动线圈的应力小, 这样可以减小对驱动线圈的损耗, 有利于电磁发射系统的重复利用。

(2) 电枢尺寸对应力的影响

电枢长度不同, 所处磁场不同, 受力不同, 从而驱动线圈所受应力不同。改变电枢长度从 15 mm 增加到 60 mm, 寻找驱动线圈的最小应力 (图 6)。从图 6 中可以看出, 随着电枢长度的增加, 最大应力先是逐渐减小, 当长度为 40 mm 时, 驱动线圈所受应力最小, 然后又是逐渐增大。这一规律表明存在一个最佳的电枢长度对驱动线圈的应力最小, 这对工程设计具有一定的指导意义。

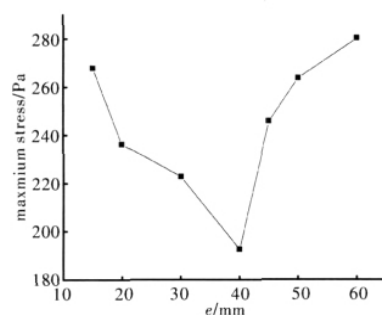


图 6 最大应力随电枢长度变化曲线

图 7 为最大应力随电枢长径比的变化曲线。计算中, 电枢长度与直径比从 0.3 增加到 3。从图 7 中可以看出, 存在长径约比为 1 时最大应力达到最小值。这一点对工程设计具有一定的指导意义。说明: 这里的长径比只是作为弹芯的铁磁材料的长径比, 实际的弹丸还包括电刷、外壳等部件, 所以实际的长径比要大。

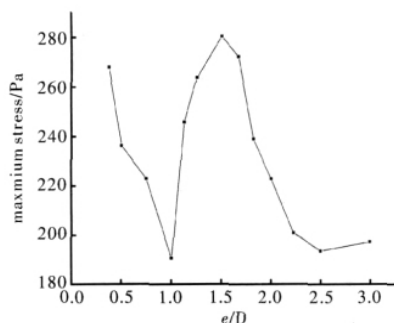


图7 最大应力随电枢长径比变化曲线

3.4 驱动线圈尺寸对应力的影响

线圈半径不同,磁场的分布不同,对驱动线圈的最大应力具有影响。计算中线圈外半径从 28 mm 增加到 40 mm,模型中设定电枢半径、长度不变。图 8 为驱动线圈最大应力随线圈半径的变化曲线。从图 8 中可以看出,随着驱动线圈半径的增大,其所受的最大应力增大,这是因为,驱动线圈的半径与电枢的半径越接近,其与电枢的耦合系数越大,电枢所受的轴向力就越大,在径向的分力就越小。

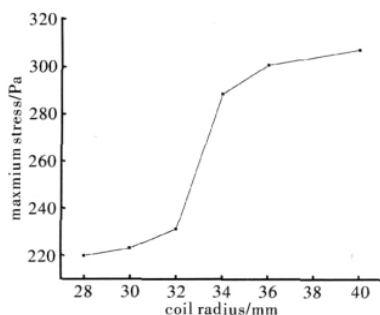
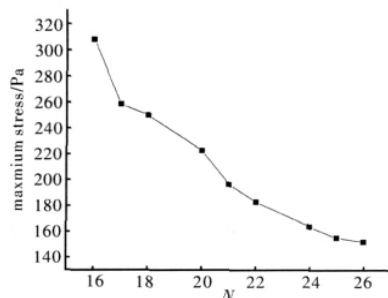


图8 最大应力随驱动线圈半径变化曲线

通电线圈的长度不同,形成的磁场不同,驱动线圈的最大应力也不同。仿真模型中,导线线径和匝间距一定,改变线圈匝数即改变线圈长度,匝数 N 从 16 匝开始增加到 26 匝,线圈长度从 64 mm 增加到 104 mm。图 9 为最大应力随通电线圈匝数的变化曲线。

图9 最大应力随通电线圈匝数 N 变化曲线

从图 9 中可以看出,随着匝数的增加,最大应力减小,但减速变缓,并在 22 匝以上时变化较小。

这是由于匝数越大,线圈越长,它所产生的磁场在径向的分量越大,轴向分量越小,对驱动线圈的应力越小。实际设计中可以根据这一规律确定线圈通电匝数,以达到最佳加速效果。

4 结 论

本文利用 Ansoft-Maxwell 有限元分析软件,建立了磁阻型螺旋线圈电磁发射装置的 3D 仿真模型,分析了此种发射装置的三维应力场问题,在导轨材料、求解器、求解精度等保持不变的情况下,通过单独改变某一参数,得到了电枢与驱动线圈的相对位置、电流大小、电枢尺寸、驱动线圈尺寸等参数与其驱动线圈所受应力之间的关系。分析得出的结论如下:

(1) 弹丸与线圈存在一个最佳位置,在这一位置驱动线圈所受的应力最小;电枢经过处,驱动线圈应力方向是向内,线圈塌陷;而其他地方的应力方向主要是向外的排斥力,线圈膨胀。

(2) 驱动线圈应力与电流的平方成正比;此结构电磁发射器所能承载的最大电流不超过 1800 kA。

(3) 最大应力随着电枢长度的增加先是逐渐减小,然后逐渐增大,存在一个最佳电枢长度使应力最小;同质量铁磁质弹丸,弹丸长径比约为 1 时,驱动线圈应力达到最小值。

(4) 最大应力随线圈长度(通电线圈匝数)增加而减小,但减速逐渐变缓;最大应力随线圈内径的增加逐渐增加。

参考文献

- [1] 王莹,肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 93-97.
- [2] T. G. Engel, S. member. Development of a Medium-bore High-efficiency Helical Coil Electromagnetic Launcher[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(5): 1893-1895.
- [4] R A Marshall, W Ying. Railguns: their Science and Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [8] 金奕山. 随机振动载荷作用下结构 von mises 应力过程的研究. 应用力学学报. 2004(3): 24-26.
- [9] 刘国强, 赵凌志. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] Bin lei, xiao-cun Guan. Research of Electromagnetic Launcher Driving Coil Reinforcement Technology [J]. IEEE Trans. Magn, 2008, 30(5): 1693-1695.
- [10] Wei Dengwu, Liu Shaok. Study of a New Synchronous Coil EML [J], Small & Special Electrical Machines, 2008, 36(6): 5-7.
- [3] T. G. Engel. A Same-Scale Comparison of Electromagnetic Launchers[J]. IEEE Trans. Magn, 2006, 32(5): 1193-1195.
- [9] T. G. Engel. Prediction and Verification of Electromagnetic Forces in Helical Coil Launchers [J]. IEEE Trans. Magn, 2003, 39(1): 112-115.
- [7] T. G. Engel. Medium-bore Helical-Coil Electromagnetic Launcher with Liquid Nitrogen Cooled Armature [C]. to appear Proc. 15th IEEE International Pulsed Power Conference, 2005.
- [11] 王从曾. 材料性能学[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2004.