

轨道炮复合身管纤维缠绕封装结构优化设计及预应力模拟

肖宏成,尹冬梅,林庆华,栗保明

引用本文:

肖宏成,尹冬梅,林庆华,等. 轨道炮复合身管纤维缠绕封装结构优化设计及预应力模拟 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(5):055107.

XIAO Hongcheng, YIN Dongmei, LIN Qinghua, et al. Structural Optimum Design and Pre-stress Simulation of Fiber Housing for Railgun [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(5): 055107.

当期更多内容>>

您可能感兴趣的其他文章:

[基于接触算法的电磁轨道发射装置的磁场-结构耦合数值分析](#)

尹冬梅,栗保明

DOI: 10.11858/gywlxb.2013.05.016

[电磁轨道炮接触热时空分布特性分析](#)

王志恒,万敏,李小将

DOI: 10.11858/gywlxb.2016.06.012

[电磁轨道炮刨削的形成机理及仿真分析](#)

刘峰,赵丽曼,张晖辉,王振春,温银堂

DOI: 10.11858/gywlxb.2015.03.006

[电磁轨道炮滑动电接触的热效应](#)

巩飞,翁春生

DOI: 10.11858/gywlxb.2014.01.015

[磁探针方法测串联增强型固体电枢电磁轨道炮内弹道速度](#)

程诚,关永超,何勇,高贵山,李业勋,仇旭,宋盛义

DOI: 10.11858/gywlxb.2013.06.017

[电磁轨道炮 C 型固体电枢坡膛段的装填方式研究](#)

张祎,杨春霞,栗保明

DOI: 10.11858/gywlxb.2012.01.007

轨道炮复合身管纤维缠绕封装结构优化设计 及预应力模拟*

肖宏成, 尹冬梅, 林庆华, 栗保明

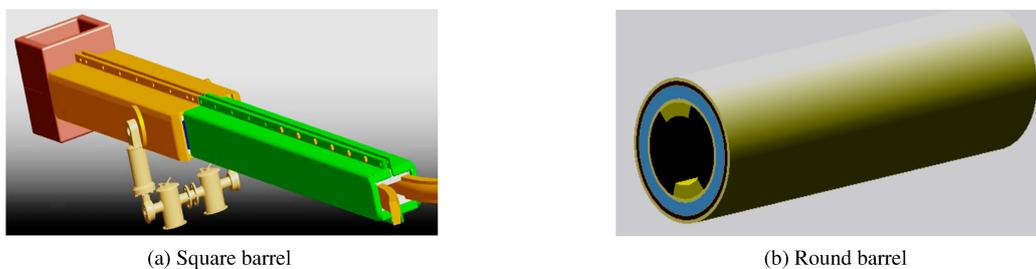
(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要:介绍了电磁轨道炮复合身管纤维缠绕封装的结构优化设计方法。给出了 $\varnothing 50$ mm 复合身管纤维层的缠绕厚度、缠绕角、层叠次序优化结果。基于生死单元及多步连续降温, 给出了缠绕增强复合身管的预应力逐层模拟方法。采用分步逐层随机搜索法, 优化了纤维缠绕张力制度, 详细分析了两种状态约束下的张力优化结果, 并给出了对应的身管初应力场和发射叠加应力场。优化结果表明, II 型张力方案中身管复合层发射前及发射过程的应力分布满足身管预应力设计要求。

关键词:轨道炮; 复合身管; 随机搜索; 张力制度

中图分类号: O442; TJ303.2 **文献标识码:** A

电磁轨道炮作为新概念发射武器已经被提出多年, 目前其相关研究已进入工程实用化阶段。虽然在发射器效率、发射器寿命及可靠性等方面仍存在问题有待突破, 但电磁轨道炮发射系统的总体设计已初见端倪^[1-2]。电磁轨道炮发射系统是一个机械、电力电子强耦合系统, 脉冲成型网络为驱动单元, 指令计算机为控制单元, 发射器为主要执行机构。轨道炮身管是发射器的核心部件, 如图 1 所示。电磁轨道炮身管是一个耐压器件, 发射过程中身管内膛同时承受兆安级电流和数百兆帕压力的冲击。身管外层复合结构既要能够密封膛内的“电磁力”, 保证绝缘强度并提高电感梯度, 又要能固定住导轨、绝缘支撑等内膛部件, 保证身管横、纵向刚度, 因此轨道炮身管的结构设计非常复杂^[3-4]。



(a) Square barrel

(b) Round barrel

图 1 轨道炮身管模型

Fig. 1 Model of railgun barrel

考虑到碳纤维材料的低磁导率、高强高模以及纤维铺层的可设计性, 早期就有针对小口径、低炮口动能的轨道炮采用纤维缠绕管身的相关研究。随着碳纤维材料及其应用技术的发展, 目前国内外也已展开了对中、大口径电磁轨道炮身管采用碳纤维缠绕增强技术的研究^[5-8]。本研究针对 $\varnothing 50$ mm 轨道炮复合身管, 开展预应力身管纤维缠绕增强型封装壳体的优化设计。

* 收稿日期: 2017-06-19; 修回日期: 2017-07-02

作者简介: 肖宏成(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事轨道炮复合身管结构研究。

E-mail: hongcheng19901228@163.com

通信作者: 栗保明(1966—), 男, 教授, 主要从事电磁发射技术研究. E-mail: baomingli@njust.edu.cn

1 纤维铺层优化设计

1.1 整体内膛的轮廓设计

作为外部纤维缠绕层的内衬结构,电磁轨道炮的整体内膛主要由铜导轨、陶瓷或聚酰亚胺拼接而成。发射时身管受到较强的振动冲击作用,为使身管在多次发射后仍然保持稳定的口径,轨道炮的整体内膛与外部的纤维缠绕壳体必须始终保持紧密粘连,以保证应力沿径向传递的连续性。采用高模量碳纤维对整体内膛进行大张力预应力缠绕可以有效增强整个结构的内力刚度,提高身管复合层的抗冲击变形能力。为了降低身管预应力损失,同时减少纤维局部应力集中,需要优化整体内膛的外包络曲面轮廓,并严格控制内膛外表面的光洁度,提高纤维与内膛外表面的有效接触。在内膛设计阶段,以绝缘阻抗、电感梯度、内膛外轮廓曲率为约束,以最小内膛质量为目标,结合 Ansoft、OptiStruct 等有限元软件,对内膛导轨及绝缘支撑的材料分布和内膛外轮廓曲线进行拓扑优化和形状优化。

1.2 纤维缠绕层设计

多层套装筒体力学特性表明,采用“内软外硬”的材料模量组合形式,可使筒体应力沿径向分布更均匀,提高整体结构强度;采用“内硬外软”的组合形式,则可以最大程度利用高模量内环材料承压,降低整体结构的径向变形。为获得较高的横向刚度,轨道炮身管需采用高模量内部绝缘支撑,同时采用更高模量的外部封装。碳纤维模量高于内膛材料平均模量,将其缠绕于内膛外部,在发射冲击载荷下可吸收更多变形能,并提高身管刚强度。在内膛设计完毕后,以整体内膛为纤维缠绕壳体的内衬,设计外部纤维缠绕层。纤维缠绕层的主要设计参数为各角度层厚度、缠绕角及叠放次序。以圣路易斯研究所试制的一种 50 mm 圆口径模拟身管为例,身管模型参考文献[9],具体如图 2 所示。在内膛外表面首层缠绕绝缘玻纤使内膛对外壳绝缘,玻纤外围缠绕碳纤维对内膛产生预紧。在碳纤维外表缠绕玻纤使复合身管对外界温湿隔离。

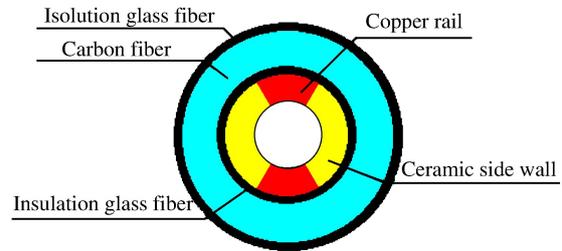


图 2 50 mm 圆口径轨道炮身管截面
Fig. 2 Sectional view of 50 mm circular bore railgun barrel

1.2.1 各缠绕层厚度

纤维环向缠绕提高身管横向刚度,轴向缠绕提高纵向刚度,螺旋向缠绕效果可等效为环向加轴向缠绕。缠绕层总厚度 h 由 4 部分组成: h_1 为绝缘玻纤厚度, h_2 为环向碳纤维厚度, h_3 为纵向碳纤维厚度, h_4 为隔离玻纤厚度。以最小质量为目标,以各纤维层厚度为设计参数,建立复合外壳质量优化模型

$$m = f(h_1, h_2, h_3, h_4) \tag{1}$$

约束条件为

$$\begin{cases} a \leq h_1 \leq 6, & b \leq h_4 \leq 8, & h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \leq H_0 \\ S \geq 1.2, & f_{c,k} \leq 0.6, & \delta \leq C, & \omega \leq D \end{cases} \tag{2}$$

式中: a 为玻纤最小绝缘厚度,取 2 mm; b 为玻纤最小隔离厚度,取 5 mm; H_0 为身管缠绕层总厚度的上限,取 40 mm; S 为导轨在 360 MPa 磁压下的内膛安全系数; $f_{c,k}$ 为第 k 超级层内纤维失效的蔡吴逆指数; δ 为内膛实际径向变形量; C 为内膛容许扩张量,取为口径的 0.75%; ω 为自重弯曲下炮口实际挠度; D 为身管挠度极限,取为身管长度的 0.04%。通过对纤维复合身管完全参数化建模,采用一阶优化方法调用 ANSYS 软件的静力分析模块,求解上述极值模型,得到各纤维最小厚度尺寸。基于图 2 所示 50 mm 圆口径身管结构,采用上述优化模型得到各向纤维厚度如表 1 所示。

表 1 50 mm 圆口径复合身管最小缠绕质量优化结果

Table 1 Optimization result of minimum fiber mass for a 50 mm circular bore composite barrel

h_1 / mm	h_2 / mm	h_3 / mm	h_4 / mm	δ / mm	S	$f_{c,k}$ (Maximum)	ω / mm
5.38	14.5	6.94	5.07	0.283	1.51	0.481	1.83

1.2.2 各子层缠绕角及层叠次序优化

纤维各子缠绕层的层叠次序需满足以下条件:(1)正负角度层对称分布,以降低层间剪切和边界翘曲;(2)同一角度层不连续超过 4 层,使各向纤维均能有效承载;(3)满足复合材料制造工艺约束。将缠绕层沿身管径向划分为若干超级层,采用 OptiStruct 软件可优化各超级层的缠绕角度,并进一步优化超级层各子层的层叠次序。对图 1 所示试制身管进行上述分析,考虑实际机加工自由度限制,得出比较理想的材料几何和缠绕几何,其外部纤维缠绕层特征参数如图 3 所示。

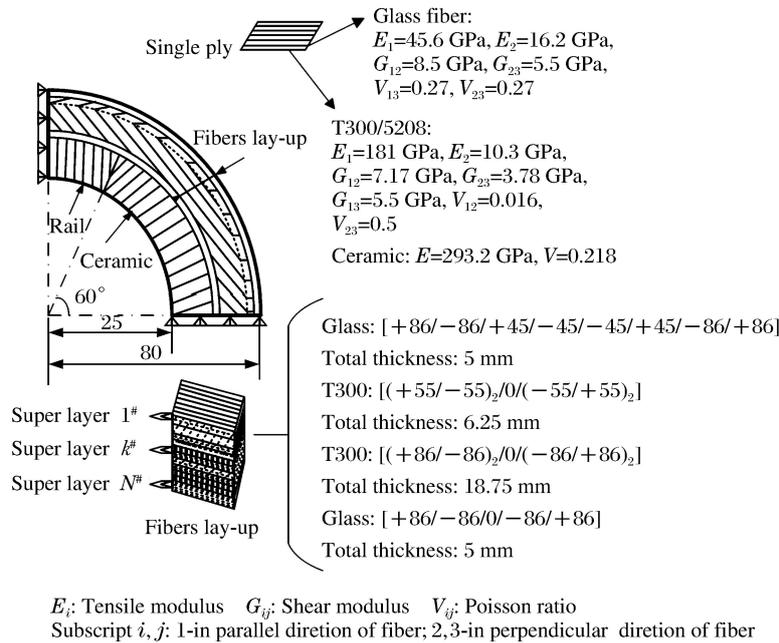


图 3 50 mm 圆口径复合身管材料及缠绕工艺参数(1/4 模型)

Fig. 3 Material properties and processing parameters for 50 mm circular bore barrel (1/4 model)

2 整体内膛预应力模拟

2.1 预应力数值方法

采用逐层降温法模拟缠绕工艺过程中外层纤维对内膛及内层纤维的预紧作用。考虑到实际机加工时内层纤维轮廓尺寸随外层缠绕层数、张力及缠绕厚度不断变化,故结合 ANSYS 生死单元技术及多载荷连续求解法逐层模拟各纤维缠绕过程中的实时应力-应变分布。该方法只需一次建模,在模拟初时将所有层合实体单元、接触单元杀死,在进行第 k 层纤维缠绕分析时,将第 k 层及 k 层纤维以内所有单元激活。采用连续求解法,在不退出求解器时,ANSYS 将逐层进行缠绕预紧计算。降温法赋予某层纤维一个虚拟的纤维轴向膨胀系数 α_L ,给单元施加温度降 ΔT ,纤维层获得的纤维向应变 ϵ_L 满足

$$\epsilon_L = \Delta T \alpha_L = \sigma_L / E_L \quad (3)$$

式中: E_L 为纤维纵向模量, σ_L 为该层纤维的纤维向应力。利用该热变形等效内层纤维受到外层纤维大张力缠绕时的压缩变形。采用该方法模拟身管初应力场,其精度主要由身管沿径向网格划分数决定,径向分层越多,单次降温模拟的纤维层越薄,结果越接近实际缠绕加工时该层对内部施加的预应力。

2.2 张力制度优化结果与讨论

对整体内膛采用大张力预应力缠绕可有效提升身管内力刚度,进而提高身管抗冲击变形能力。典型张力制度有恒张力、线性变化张力、多项式张力制度曲线。不同张力制度对复合身管整体内膛的影响主要包括:(1) 张力平均幅值越高,内膛预压缩程度越高,外壳平均应力水平越高;(2) 缠绕层越厚、缠绕张力越大,外层纤维对内层纤维的应力释放越明显^[10-11]。以 50 mm 口径、35 mm 厚纤维绕层复合身管为例,由于其缠绕层较厚,在实际预应力缠绕时,必须充分考虑外层纤维对内层已缠绕完毕纤维的应力释放作用。

考虑到玻纤及碳纤材料的各向异性,通过张力制度优化,使缠绕加工后的身管复合层满足以下条件:(1) 发射前纤维内部周向应力不为零,更不能表现为周向压缩状态;(2) 发射前导轨及绝缘支撑等内膛材料处于预压缩状态,发射时各接触面仍保持相互挤压;(3) 在发射过程中纤维层的径向应力表现为压应力,或者处于极小应力水平的径向拉伸状态;(4) 在发射过程中,纤维层及内膛的整体应力分布尽量均匀,沿身管径向纤维应力幅值落差不大且处于较高应力水平,纤维得到充分利用。

在口径、材料及缠绕几何不变的前提下,针对图 3 所示的身管模型,通过张力制度优化使其满足身管预应力分布要求。张力制度优化采用自编的分步逐层随机搜索法^[12]。由于轨道炮身管缠绕层较厚,故分两步进行优化。第一步:以整个纤维缠绕层为优化对象,先将纤维层沿径向分为 20 层单元,每个单元为一个超级层,包含若干子层,其网格划分见图 4;对第 k 层中任意单元施加张力 T_k ,以 $T_k (k=1, 2, \dots, 20)$ 为设计序列,基于预应力模拟方法,逐层对各单元施加张力,通过随机搜索迭代,求解满足目标函数的初步张力结果。第二步:以其中某一单元对应的超级层为优化对象,控制其余超级层的张力不变,在该超级层内建立各个子层的张力设计序列,通过优化进一步细化各子层的最佳缠绕张力。

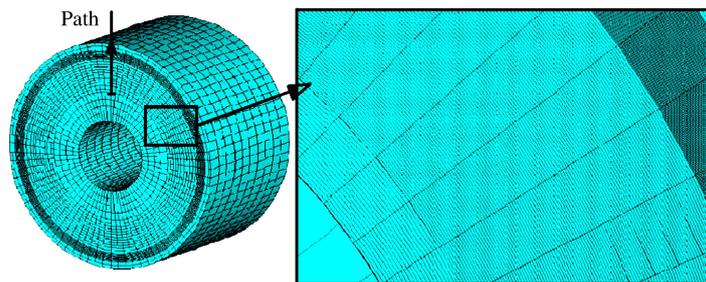


图 4 圆口径身管网格划分细节

Fig. 4 Feature of mesh for the circular bore barrel

图 5 为以整体内膛获得最大初始压缩变形为目标,两种不同状态约束下的纤维张力初步优化结果曲线,其中:I 型状态变量约束为各超级层在发射载荷下的最大蔡吴逆指数,满足 $0.3 \leq f_{c,k} \leq 0.5$,从而保证整个纤维封装结构具有足够强度;II 型状态变量约束为发射载荷下整体纤维封装的最大蔡吴逆指数,满足 $f_{c,k} \leq 0.6$,且各超级层之间的最大应力幅值差小于 100 MPa。由图 5 可知,I 型状态约束下得到的近似为一恒张力曲线,表明在 600 MPa 恒张力缠绕完毕后,在 360 MPa 轨道斥力下,身管复合层内不存在明显危险失效区。II 型状态约束下得到的为一阶梯变化张力制度,且总体呈递减趋势。这是因为在初步优化设计中,身管径向网格划分数目有限,并且在大张力缠绕设计中,考虑了外层纤维对内层纤维的应力松懈作用。

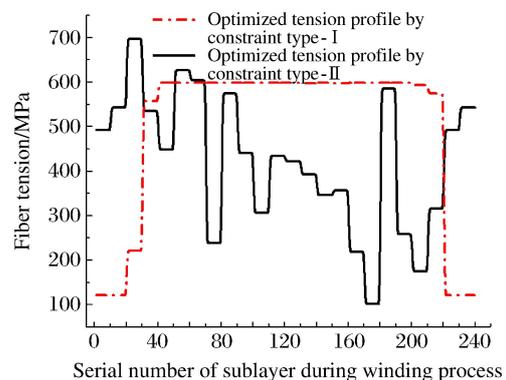


图 5 两种状态约束下张力优化结果曲线

Fig. 5 Optimization results of tension force under two different constraints of state variables

图 6 为根据 I 型张力加工的身管(以下简称 I 型身管)发射前的初应力场和在 360 MPa 轨道斥力下的应力分布。从图 6(a)可看出,在缠绕加工完毕后,内膛获得 377 MPa 初始环向压缩,纤维周向应力由内而外递增,且总体处于环向拉伸状态;图 6(b)中由发射应力叠加初应力场结果表明,纤维内部拉应力、轨道内表面局部等效力有所增大,而绝缘支撑内表面局部拉应力降低。

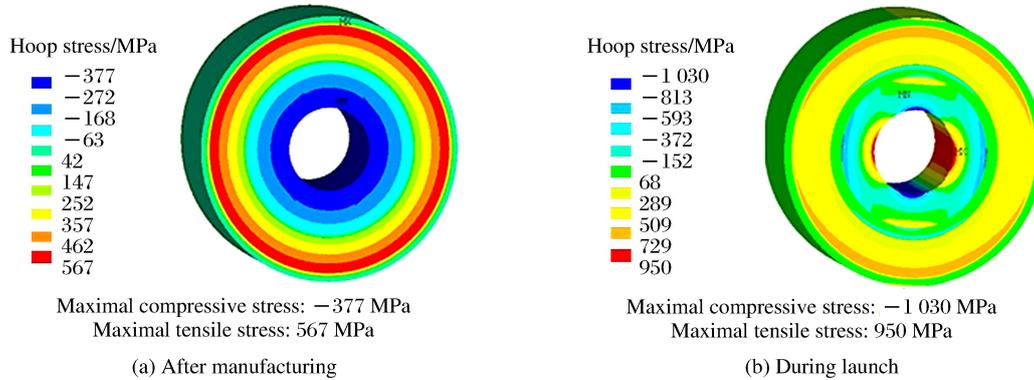


图 6 I 型状态约束身管发射前及发射时环向应力分布

Fig. 6 Hoop stress distribution of barrel under type I constraints before and during launch

图 7 为身管横截面内,在纤维层中沿垂直方向作一应力观察路径(具体见图 4),得到复合层内应力沿管壁厚度的分布曲线。由图 7 可知, I 型身管内层 5 mm 玻纤在发射前、后始终处于环向压缩状态,表明恒张力制度下,内层纤维在发射前由于外层纤维的压缩,其预应力已经损失殆尽,在发射时由于身管横向局部弯曲,内层玻纤的环向压缩程度进一步加剧。考虑到玻纤的纤维向压缩强度较低,应更正张力制度,尽量使纤维处于拉伸状态,并减少内膛预应力损失。

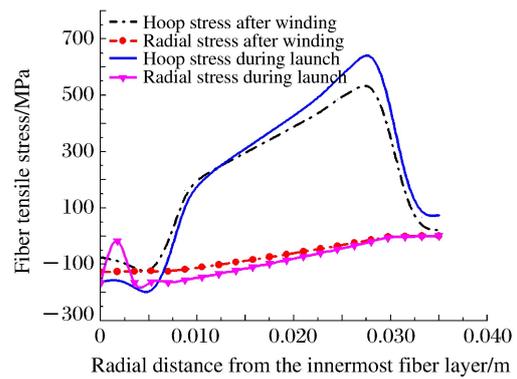


图 7 I 型状态约束身管路径(见图 4)应力分布
Fig. 7 Stress distribution of barrel along the path (see Fig. 4) under type I constraints

图 8 为根据 II 型张力加工的身管(以下简称 II 型身管)发射前的初应力场及发射过程叠加应力场。由图 8(a)可知,在 II 型张力制度下,内膛可以获得 497 MPa 的环向初始压缩应力,高于 I 型身管内膛

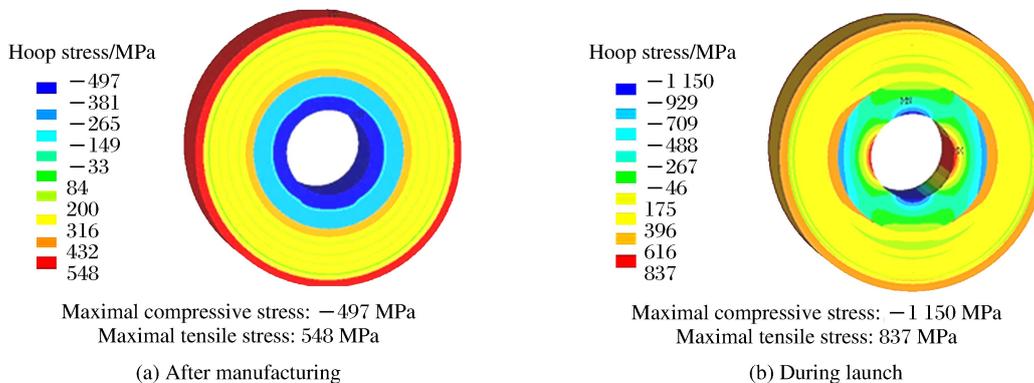


图 8 II 型状态约束身管发射前及发射时环向应力分布

Fig. 8 Hoop stress distribution of barrel under type II constraints before and during launch

预应力。在发射载荷下, II型身管轨道陶瓷界面仍存在约 300 MPa 的挤压力, 高于 I型身管的挤压力。因此, 在发射时, II型身管具有更好的横向刚度, 可抵御更强的轨道斥力及枢轨冲击。

图 9 为 II型身管复合层沿图 4 路径的应力分布曲线。由图 9 可知, II型身管发射前、后纤维全部处于拉伸状态, 纤维层径向全部处于压应力状态。对比图 7 中 I型身管的应力-壁厚曲线, II型身管碳纤维缠绕层环向应力为 250~350 MPa, 而 I型身管碳纤维环向应力沿壁厚连续递增, 内、外层应力幅值差达 400 MPa 以上。因此, 在极端工况下, I型身管更容易产生首层失效, 进而引发缠绕层刚度衰减及整体失效^[13]。

综合上述分析可以得到如下结论: II型张力制度方案下, 身管复合层的环、径向应力均满足身管预应力设计要求; 可将 II型张力制度中各层初张力乘以相同放大系数 k_s ($k_s=1.5\sim 2.5$, 视发射安全裕度而定), 提高初始缠绕张力, 从而将身管碳纤维层的工作应力提高至当前水平的 k_s 倍, 进一步提高内膛的径向刚度; 可通过第二步子层张力随机搜索优化, 细化超级层的各子层缠绕张力, 进一步设计出理想的张力制度曲线, 使身管发射载荷下的应力-壁厚曲线更平滑, 降低纤维内部首层失效概率。

3 结 论

介绍了电磁轨道炮复合身管纤维缠绕封装的结构优化设计方法。基于有限元方法, 给出了 50 mm 圆口径复合身管纤维层的缠绕厚度、缠绕角、层叠次序优化结果。基于 ANSYS 生死单元技术及多步连续求解方法, 给出了缠绕增强复合身管的预应力模拟数值方法。采用分步逐层随机搜索法, 优化了纤维缠绕张力制度, 详细分析了两种不同状态约束条件下的张力优化结果, 并给出了对应张力曲线的身管初应力场和发射叠加应力场结果。初步优化结果表明, 采用 II型张力制度方案, 身管复合层的环、径向应力均满足身管预应力设计要求。

参考文献:

- [1] 闵飞炎, 杨明, 王子才. 电磁发射技术的关键问题及其数值模拟 [J]. 固体火箭技术, 2009, 32(3): 237-241.
MIN F Y, YANG M, WANG Z C. Critical problems of electromagnetic launch technique and its numerical simulation [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, 32(3): 237-241.
- [2] 曹海要, 战再吉. 铜/金刚石复合材料电磁轨道烧蚀特性的实验研究 [J]. 高压物理学报, 2016, 30(4): 317-322.
CAO H Y, ZHAN Z J. Experimental study of Cu/diamond composite electromagnetic rail ablation characteristics [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2016, 30(4): 317-322.
- [3] PARKER J V, LEVINSON S. Loss of propulsive force in railguns with laminated containment [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(1): 442-446.
- [4] LANDEN D, SATAPATHY S. Eddy current effects in the laminated containment structure of railguns [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 150-156.
- [5] TZENG J T. Dynamic response and fracture of composite cylinders [J]. Composites Science & Technology, 1998, 58(9): 1443-1451.
- [6] SALZAR R S. Influence of autofrettage on metal matrix composite reinforced gun barrels [J]. Composites Part B

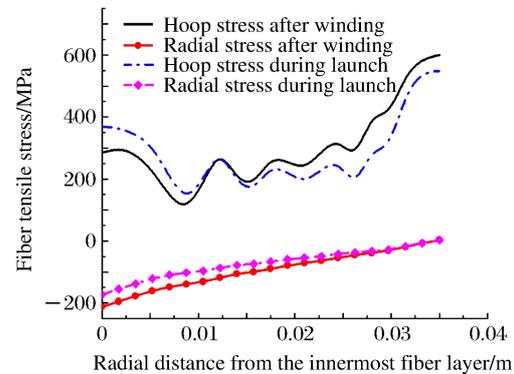


图 9 II型状态约束身管路径(见图 4)应力分布
Fig. 9 Stress distribution of barrel along the path (see Fig. 4) under type II constraints

- Engineering, 1999, 30(8): 841-847.
- [7] 徐亚栋, 钱林方, 陈龙森. 复合材料身管非线性热弹性有限元分析 [J]. 兵工学报, 2007, 28(12): 1428-1432.
XU Y D, QIAN L F, CHEN L M. Nonlinear thermo-elastic finite element analysis for composite material barrel [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(12): 1428-1432.
- [8] 尹冬梅, 栗保明. 考虑缠绕预应力的轨道炮身管复合外壳渐进损伤分析 [J]. 兵工学报, 2016, 37(6): 988-995.
YIN D M, LI B M. Analysis of progressive damage of composite housing for railgun under winding prestress [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(6): 988-995.
- [9] LEHMANN P, VO M D, WENNING W. Comparative study of railgun housings made of modern fiber wound materials, ceramic, or insulated steel plates [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 200-205.
- [10] 秦勇, 夏源明, 毛天祥. 纤维束张紧力缠绕复合材料飞轮初应力的三维数值分析 [J]. 复合材料学报, 2005, 22(4): 149-155.
QIN Y, XIA Y M, MAO T X. 3D Numerical analysis of initial stress of composite flywheel fabricated by filament tension winding [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(4): 149-155.
- [11] 晏飞, 戴德海, 朱智春. 纤维缠绕压力容器结构有限元分析技术 [J]. 上海航天, 2003, 20(6): 33-36.
YAN F, DAI D H, ZHU Z C. Finite element analysis technology of filament wound pressure vessel structures [J]. Aerospace Shanghai, 2003, 20(6): 33-36.
- [12] 任明法, 郑长良, 陈浩然. 具有内衬的缠绕容器缠绕层等张力设计的迭代搜索 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(5): 153-158.
REN M F, ZHENG C L, CHEN H R. Iterative search for the isotension design of the band wound vessels with liner [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(5): 153-158.
- [13] 孙先念, 陈浩然, 苏长健, 等. 含分层损伤复合材料层合板分层扩展研究 [J]. 力学学报, 2000, 32(2): 223-232.
SUN X N, CHEN H R, SU C J, et al. Delamination growth in composite laminates [J]. Acta Mechanica Sinica, 2000, 32(2): 223-232.

Structural Optimum Design and Pre-stress Simulation of Fiber Housing for Railgun

XIAO Hongcheng, YIN Dongmei, LIN Qinghua, LI Baoming

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The structural optimization design of filament winding housing for a railgun barrel is introduced. The thickness of fiber laminates, the winding angle and the stacking sequence of fibers for a 50 mm circular bore composite barrel are investigated for structural optimization. Numerical simulation of railgun prestressing has been studied based on continuous solution with birth-death element method. By using a method of stepwise optimization of multi-variable based on random search, the tension profile of fibers is optimized. Optimization of state variables under two different constraints is analyzed and initial stress field and superposition stress field of the prestressed barrel are given. The second type of optimization results show that the profile in this study can meet design requirements of the composite barrel.

Keywords: railgun; composite barrel; random search; tension profile