文章编号：1000-5773(2012)01-0048-07

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

（南京理工大学瞬态物理国家重点实验室，江苏南京　210094）

摘要：为了满足电磁轨道炮对电枢和轨道间初始接触压力的要求，以小口径电磁轨道炮C型固体电枢的坡膛段装填过程为研究对象，在力学分析的基础上，采用有限元计算方法，对匀速装填、冲击装填以及组合装填3种方式进行了计算，并对电枢臂头部、中间和尾端单元的径向变形、应力和剪切应力随时间的变化进行了对比分析。分析结果表明，在同等条件下，采用组合装填方式可以明显地降低固体电枢在装填过程中受剪切破坏的程度，并有效地提高初始接触压力。研究结果表明，组合装填方式有利于提高电磁轨道炮的发射效率。

关键词：电枢；组合；装填方式；起始弹道学；有限元

中图分类号：TJ012.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

将电枢置于距电磁轨道炮尾部约4倍口径的位置，可以使电枢在接通电流时获得最大推力[1]，客观上存在了电枢的装填过程。为了保证电枢与轨道之间一定的初始接触压力，主要通过控制电枢和轨道之间的过盈量来实现。有实验表明：在静摩擦系数为0.25的前提下，电枢尾翼和轨道内壁的接触压强达到7～9 MPa时不起弧；轨道炮在过盈量为0.25 mm时，法向接触压强为40～80 MPa时认为是良好接触。这样就会在固体电枢的装填过程中出现电枢、轨道及相关部件的弹塑性变形以及接触表面的摩损。在实验中，观察轨道内壁时发现，铜轨道内表面上有铝电枢磨损后留下的痕迹，而且不同装填方式对应的轨道表面痕迹不同，所以装填方式直接影响到电枢和轨道之间的接触情况。目前已发表的文献[2-4]主要是针对电枢最终的接触压力，而对整个装填过程没有系统完整的分析研究。

本研究从实际工程应用的角度出发，经过合理假设后，对电磁轨道炮中C型固体电枢的装填过程进行力学分析，分别对匀速、冲击以及长距离匀速＋短距离冲击3种装填方式进行有限元计算，对装填过程中得到的电枢臂的应力、径向变形及剪切应力随时间变化的曲线进行分析。对电磁轨道炮装填方式的研究将有助于提高电磁轨道发射的精度和效率，对电磁轨道炮起始弹道的研究有重要的意义。

2　固体电枢装填过程的力学分析

由于电枢直径略大于轨道内径，因此在挤进过程中，推进力F必须克服挤进阻力R的作用才能推动电枢向前运动。当所受应力超过材料的弹性极限时，电枢就会发生塑性变形，同时，接触面轨道壁也

* **收稿日期**：2011-04-14；**修回日期**：2011-06-01

基金项目：瞬态物理国家重点实验室基金(9140C3001011001)

作者简介：张　祎(1977－)，女，博士研究生，讲师，主要从事电磁发射起始弹道研究. E-mail：zhangyi_11111@163.com

通讯作者：栗保明(1966－)，男，博士，教授，主要从事兵器发射理论与技术、脉冲功率源技术、等离子体应用技术研究. E-mail：baomingli@vip.sina.com

可能会发生塑性变形,而且接触变形情况与装填方式有直接关系,使得接触应力的求解变得十分复杂。因此,需要建立相应的理论模型来解决实际问题,同时还要积累实验数据进行验证和修正,以完善理论模型[5]。

在进行理论分析之前,作如下假设:(1)电枢材料的应变状态是平面应变,(2)载荷的施加是静态的,(3)轨道壁面没有变形,(4)直角形轨道没有坡度。

基于假设条件,挤进过程中电枢的应力-应变分析见图 1。实际的坡膛段锥度很小,为 1∶0.005,为了清楚地画出应力-应变情况,图 1 中将坡膛段的锥度调整为 1∶0.5。将电枢的装填过程划分为 3 个区:Ⅰ区为电枢与轨道不接触区,Ⅱ区为电枢与坡膛段接触区,Ⅲ区为电枢与直线型轨道接触区,其中Ⅱ区和Ⅲ区是电枢几何变形区,在该区内电枢受到径向压缩并处于弹塑性变形状态。

取 $ABCD$ 单元作为分析对象(见图 1),根据塑性理论,其二维变形微分方程为[6]

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}=0 \tag{2}$$

$$(\sigma_x-\sigma_y)^2+4\tau_{xy}^2=\frac{4}{3}\sigma_\Phi \tag{3}$$

$$u_x=\lambda(\sigma_x-\sigma_{cp}) \tag{4}$$

$$u_y=\lambda(\sigma_y-\sigma_{cp}) \tag{5}$$

$$\dot{\gamma}_{xy}=2\lambda\tau_{xy} \tag{6}$$

式中:σ_x、σ_y、τ_{xy} 为应力张量分量,σ_Φ 为挤压停止时实际变形阻力,$\sigma_{cp}=(\sigma_x+\sigma_y)/2$ 为平均应力,u_x、u_y、$\dot{\gamma}_{xy}$ 为挤压和剪切变形速度张量分量,λ 为比例系数。

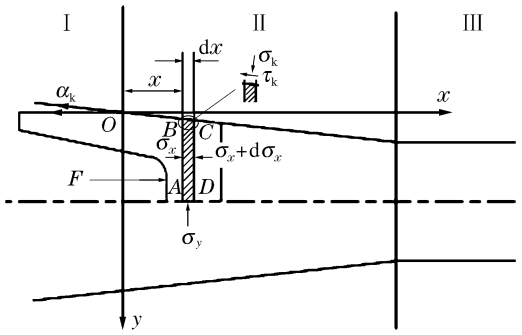


图 1　挤进过程中电枢的应力-应变分析

Fig. 1　Stress-strain analysis of armature during engraving process

单元体 $ABCD$ 接触应力基本方程为

$$\mathrm{d}\sigma_k=\left(2K\xi+\frac{\mu\sigma_k}{\tan\alpha_k}\right)\frac{\mathrm{d}h_x}{h_x} \tag{7}$$

式中:σ_k 为法向接触应力;K 为塑性系数;h_x 为 $ABCD$ 单元的径向高度;ξ 为正切应力作用系数,$\xi<1$;μ 为摩擦系数;α_k 为轨道炮坡膛段与轴线的夹角。

挤进阻力 R 沿着轨道轴向由轨道壁作用于电枢

$$R=\iint_{A_c}\sigma_k\sin\alpha_k\mathrm{d}A_c+\iint_{A_c}\tau_k\cos\alpha_k\mathrm{d}A_c \tag{8}$$

式中:τ_k 为切向接触应力,$\tau_k=\mu\sigma_k$;A_c 为电枢和轨道壁面的接触面积。(8)式等号右边第 1 项为导致电枢材料变形的压力,第 2 项为电枢和轨道内表面的摩擦力。从(8)式可以看出,当 α_k、A_c 为常数时,挤进阻力 R 主要与接触应力有关。综合(1)式~(8)式可知,影响挤进阻力的因素有电枢及轨道材料的力学性质和状态(屈服极限、硬度、变形速率)、电枢和轨道的几何形状(电枢截面结构、过盈量、坡膛角度)、电枢和轨道的表面状态(表面粗糙度、润滑程度)。由于影响因素较多,方程的求解非常困难,因此采用有限元方法对不同装填方式下电枢的挤进过程进行仿真分析,不仅节省时间和费用,而且能直观观察整个挤进过程中节点应力分布变化及接触压力分布,有助于结构的优化设计。

3　C 型固体电枢有限元模型

根据以上分析,对电枢装填过程作如下假设:(1)电枢、轨道为连续性均匀介质,具有各向同性,为理想弹塑性材料;(2)电枢、轨道是完全的轴对称结构,载荷具有轴对称性;(3)电枢在装填过程中不发生偏移,不计重力作用;(4)温度场应力忽略不计。

基于假设,取图 1 所示的物理模型的 1/2 作为计算区域,如图 2 所示。求解区域由 S_1、S_2、S_3 组成,其中 S_1 为电枢区域,S_2 为轨道坡膛段区域,S_3 为轨道直线段区域。求解域外部边界有 L_1、L_2、L_3 3 部分,其中电枢对称边界 L_1 上的法向位移为零,在电枢边界 L_2 上施加载荷作用,轨道边界 L_3 为径向和轴向约束边界。求解域内部边界 Γ_{12} 和 Γ_{13} 为电枢和轨道的接触面,视为面-面滑动接触,将这两个区域离散成带节点的四边形单元。

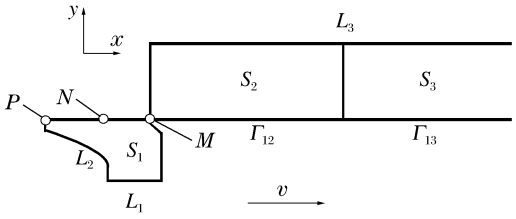


图 2 计算区域

Fig. 2 Computational zone

在材料的弹性区域内,平面应力问题的胡克定律的通用公式为

$$\begin{pmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{yy}\\ \tau_{xy}\end{pmatrix}=\frac{E}{(1-\nu)(1-2\nu)}\begin{pmatrix}1-\nu & \nu & 0\\ \nu & 1-\nu & 0\\ 0 & 0 & \dfrac{1}{2}-\nu\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\varepsilon_{xx}\\ \varepsilon_{yy}\\ \gamma_{xy}\end{pmatrix} \tag{9}$$

式中:E 为弹性模量,ν 为泊松比,σ_{xx}、σ_{yy} 为正应力,τ_{xy} 为剪应力,ε_{xx}、ε_{yy} 为正应变,γ_{xy} 为剪应变。应变和位移的关系为:$\varepsilon_{xx}=\partial u/\partial x$,$\varepsilon_{yy}=\partial v/\partial y$,$\gamma_{xy}=\partial u/\partial y+\partial v/\partial x$。

施加在物体上的外力使物体发生变形,变形期间外力所做的功以弹性能的形式储存在材料内

$$\Lambda=\frac{1}{2}\int_V(\sigma_{xx}\varepsilon_{xx}+\sigma_{yy}\varepsilon_{yy}+\tau_{xy}\gamma_{xy})\mathrm{d}V \tag{10}$$

其矩阵形式为

$$\boldsymbol{\Lambda}=\frac{1}{2}\int_V\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}\boldsymbol{\varepsilon}\mathrm{d}V \tag{11}$$

由于采用四边形单元,其体内的位移用节点值表示为[7]

$$\begin{cases}u=S_iU_{ix}+S_jU_{jx}+S_mU_{mx}+S_nU_{nx}\\ v=S_iU_{iy}+S_jU_{jy}+S_mU_{my}+S_nU_{ny}\end{cases} \tag{12}$$

式中:S_i、S_j、S_m、S_n 为四边形 4 个节点 i、j、m、n 的形函数,其函数形式依赖于局部坐标系和自然坐标系;U_{ix}、U_{jx}、U_{mx}、U_{nx} 为四边形 4 个节点 i、j、m、n 在 x 方向上的位移;U_{iy}、U_{jy}、U_{my}、U_{ny} 为四边形 4 个节点 i、j、m、n 在 y 方向上的位移。通过形函数将应变和节点位移联系起来,得到

$$\boldsymbol{\varepsilon}=\left(\frac{\partial u}{\partial x},\frac{\partial v}{\partial y},\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{D}\boldsymbol{U} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{A}=\frac{1}{|\boldsymbol{J}|}\begin{pmatrix}J_{22} & -J_{12} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -J_{21} & J_{11}\\ -J_{21} & J_{11} & J_{22} & -J_{12}\end{pmatrix} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{U}=(U_{ix},U_{iy},U_{jx},U_{jy},U_{mx},U_{my},U_{nx},U_{ny})^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{D}=\frac{1}{4}\begin{pmatrix}-1+\eta & 0 & 1-\eta & 0 & 1+\eta & 0 & -1-\eta & 0\\ -1+\xi & 0 & -1-\xi & 0 & 1+\xi & 0 & 1-\xi & 0\\ 0 & -1+\eta & 0 & 1-\eta & 0 & 1+\eta & 0 & -1-\eta\\ 0 & -1+\xi & 0 & -1-\xi & 0 & 1+\xi & 0 & 1-\xi\end{pmatrix} \tag{16}$$

式中:$\boldsymbol{J}$ 为坐标变换的雅各比矩阵,$\boldsymbol{U}$ 为单元节点 i、j、m、n 的位移矩阵,ξ、η 为单元内节点的坐标。

单元有限元公式为

$$\boldsymbol{K}\boldsymbol{U}=\boldsymbol{F} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{K}=\int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{D})^{\mathrm{T}}\nu\boldsymbol{A}\boldsymbol{D}\,|\boldsymbol{J}|\,\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta \tag{18}$$

式中:$\boldsymbol{K}$ 为单元刚度矩阵,$\boldsymbol{F}$ 为单元节点载荷矩阵。

结构的总刚度矩阵为

$$\sum \boldsymbol{KU} = \sum \boldsymbol{F} \tag{19}$$

每施加一个载荷增量就能求出一个位移增量,进而求出应力和应变增量,将所有增量叠加后求出全量[5],同时可以通过节点变形得到对节点施加的推进力曲线。

4　算例与分析

根据上述分析,对 C 型固体电枢的匀速、冲击以及匀速+冲击 3 种装填方式进行比较分析。

4.1　计算参数

本算例选择的具体材料参数和结构参数见表 1 和表 2[6,8-9]。表 1 中:ρ 为密度,E 为杨氏模量,σ_y 为屈服应力,ν 为泊松比,G 为剪切模量,μ 为摩擦系数。

表 1　材料参数

Table 1　Material parameters

Material	ρ/(g/cm^3)	E/(GPa)	ν	σ_y/(GPa)	G/(GPa)	μ
Cu	8.9	220	0.37	1.20	44.7	0.25
7075 Al	2.8	72.4	0.33	0.42	26.9	0.25

表 2　结构参数

Table 2　Structure parameters

Structure	Length/(mm)	Width/(mm)	Surface-volume ratio	Magnitude of unilateral interference/(mm)
Rail-horn	80	20	20.1∶20	
Rail-line	30	20		
Armature	25	6	20.04∶20	0.01

4.2　计算结果与分析

电枢的初始位置设置在距炮尾 55 mm 处,此时电枢与轨道未发生接触。电枢的 3 种装填方式为:(1) 匀速方式,20 s 推进 55 mm,保证电枢的推进速度小于 3 mm/s;(2) 冲击方式,冲击作用力取三角形脉冲载荷,单个脉冲持续作用时间为 1 ms,在 0.5、1.5 和 3.5 ms 时脉冲载荷的最大值分别 400、800 和 1 600 N;(3) 组合方式,在坡膛段为匀速装填,即 10 s 内匀速推进电枢 25 mm,随后的直线段为冲击装填,即 1 s 内向前冲击 30 mm。

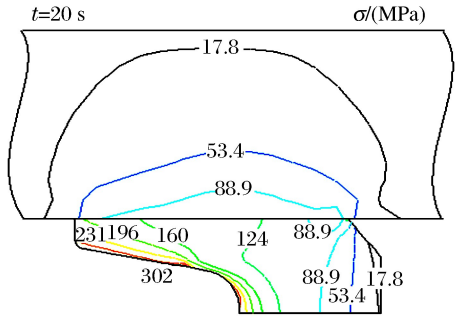
装填结束时,3 种方式下电枢和轨道接触面上的应力梯度分布如图 3 所示。从图 3 中可以看出:冲击装填方式下,电枢和轨道都出现了明显的局部应力集中,最大应力达到 4 000 MPa 以上,对电枢和轨道表面都会造成损伤;匀速方式和组合装填方式下,电枢和轨道接触面间的应力分布总体上呈向外扩散趋势,组合装填方式下接触应力明显高于匀速方式,并且应力有向电枢头部集中的趋势,电枢臂内侧在外载荷作用的部位都有明显的局部应力集中,并为应力最大值,匀速装填方式下为 302 MPa,组合装填方式下为 502 MPa,这是由于组合装填方式第 2 阶段装填杆对电枢臂内侧的冲击作用造成的。

为了详细研究电枢在不同装填方式下挤进历程中的受力变形情况,选取电枢头部 M、中部 N、尾部 P 这 3 个单元(见图 2)进行考察。图 4、图 5 为 3 种装填方式下 M、N、P 单元径向变形及应力随时间变化的曲线。

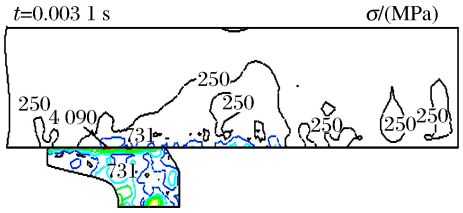
采用全程匀速装填方式时,随着载荷的施加,电枢臂受到轨道内壁的挤压,单元沿着 y 轴负方向发生径向变形,将图 4(a)和图 5(a)进行分段综合分析有:电枢在坡膛段的应力-应变关系基本为线性,说明此段装填过程中电枢发生的是弹性变形;随着挤进的继续,M、N、P 单元同轨道直线段先后发生接触,径向变形有明显的跳变和回弹,相应地,应力曲线则出现了非常明显的尖峰及非常大的衰减,最大应力的出现位置与径向变形的跳变位置相同,说明此段电枢发生了塑性变形;电枢臂的最大径向变形出现

在单元 P，其值为 0.03 mm；最大应力出现在单元 M 与轨道直线段接触时，最大值为 347 MPa。

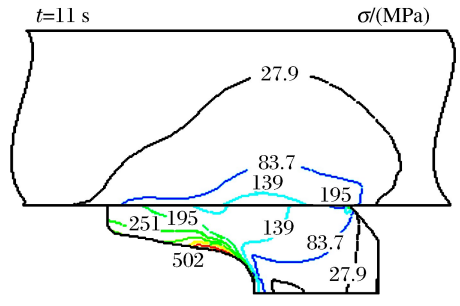
采用全程冲击装填方式时，如图 4(b)和图 5(b)所示：在装填过程中整个电枢臂的径向变形剧烈(单元 N 的最大值为 0.22 mm)，应力曲线波动巨大，最大值达到了 7 000 MPa，从计算结果上可以看到电枢的头部有明显的塑性变形，局部有弯曲现象(观察点 M 的应力突然减小，径向变形不变)；在电枢臂中部、尾翼处和轨道接触面上的单元出现了部分失效，说明电枢在冲击装填方式下发生了磨损；此外，轨道内表面也有变形。在全程冲击装填方式下，电枢臂和轨道内壁的接触情况非常差，这对接触电阻的均匀分布是极其不利的。



(a) Uniform loading



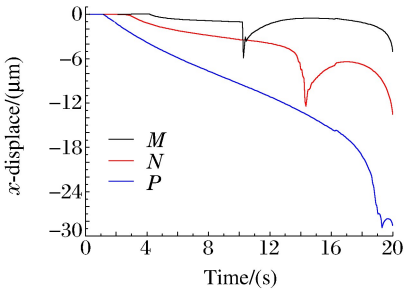
(b) Impact loading



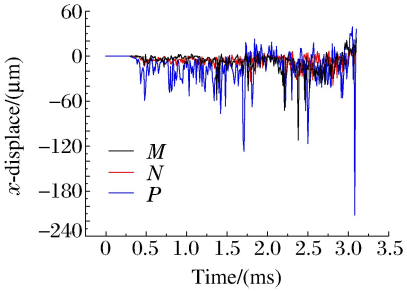
(c) Combined loading

图 3 应力分布

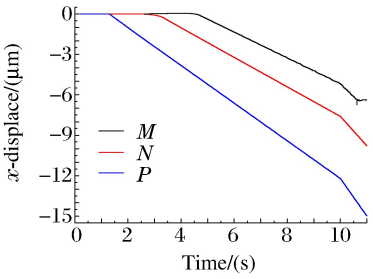
Fig. 3 Stress distribution



(a) Uniform loading



(b) Impact loading



(c) Combined loading

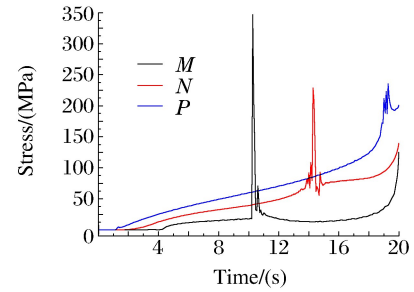
图 4 径向变形-时间曲线

Fig. 4 Radial strain-time curves

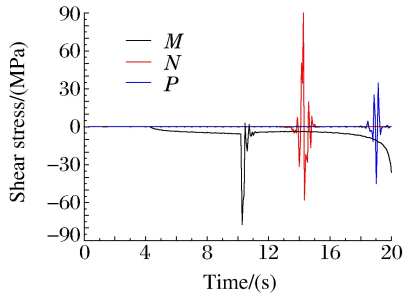
采用坡膛段匀速＋直线段冲击的组合装填方式时，节点径向变形的方向与前两种方式一样沿着 y 轴负方向，但是电枢的变形量在坡膛段和直线段都表现为线性，只是单元 M 和 N 在冲击载荷施加过程中与轨道直线段接触时有略微的振荡，见图 4(c)，P 单元的径向变形最大，其值为 0.015 mm；单元应力变化基本与径向变形随时间变化相吻合，在冲击载荷施加段，应力的变化由于阻尼和冲击应力波的作用出现了明显的振荡衰减过程，最大应力出现在单元 M 受到冲击载荷时，最大值为 170 MPa，见图 5(c)。

材料损坏通常是受到拉伸破坏或剪切破坏。图 6 为 3 种装填方式下 M、N、P 单元所受剪切应力随时间变化的曲线。从图 6 中可以看出：匀速装填方式下，单元受到的剪切应力沿着 x 方向有正有负，意味着电枢表面受到了剪切力的反复作用，不同方向上的最大值分别为 90 MPa 和－77 MPa；冲击装填方式下，单元受到的剪切应力曲线有很大的毛刺，剪切应力均值为±1 000 MPa，最大的剪切应力发生在电

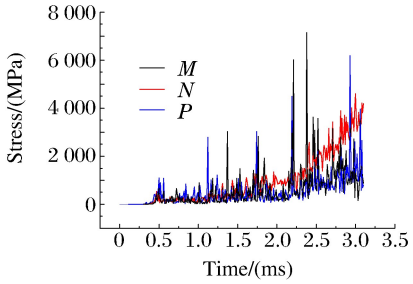
枢臂的中部 N 单元,峰值为 3 000 MPa,说明装填过程中存在很大的剪切破坏,导致接触表面受到很大损伤,出现接触表面单元的失效、剥落;坡膛段匀速+直线段冲击装填方式下,N 和 P 单元的剪切应力为锯齿状,其值在[−0.1 MPa,0.1 MPa]区间内,而 M 单元在坡膛段受到的剪切应力为线性增长,最大值为−31 MPa,而在直线段冲击载荷作用下剪切应力陡增,最大值为−43 MPa,但是相较于前两种方式要小得多,有助于接触面情况的改善。



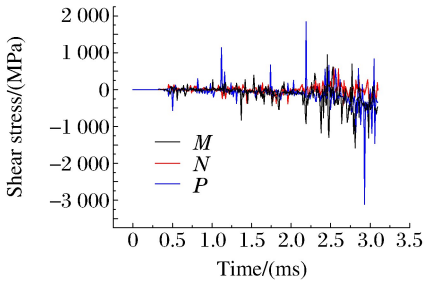
(a) Uniform loading



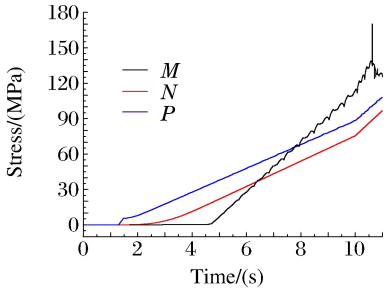
(a) Uniform loading



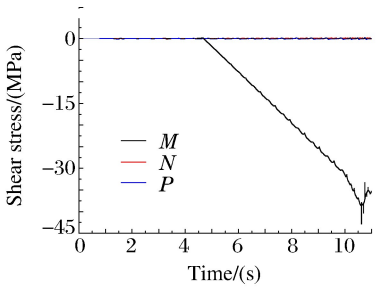
(b) Impact loading



(b) Impact loading



(c) Combined loading



(c) Combined loading

图 5　应力-时间曲线

Fig. 5　Stress-time curves

图 6　剪切应力-时间曲线

Fig. 6　Shear stress-time curves

5　结　论

初步分析了电磁轨道炮 C 型固体电枢在装填过程中的力学模型,采用有限元方法对 3 种装填方式进行了计算,得到了电枢头部、中部和尾部 3 个单元的径向变形、应力及剪切应力随时间变化的曲线。通过对曲线及计算所得数据进行分析,结果表明在满足发射对接触压力要求的前提下,采用组合装填方式可以明显减小电枢在装填挤进过程中所受到的剪切破坏,尤其是在电枢中部和尾翼。研究结果为实现电磁轨道炮起始弹道过程的多物理场分析提供了基础,通过耦合电磁场的作用可进一步研究应力场、温度场等。该研究尚处于初步阶段,存在以下不足:研究过程中假设所有材料为均匀且具有各向同性,而实际的身管却是非均质多层结构,因此计算与实际装填过程存在偏差。后续将结合实验对 C 型固体电枢的装填过程做进一步研究。

References:

[1] Marshall R A, Wang Y. Science and technology of electromagnetic railgun [M]. Translated by Cao Y J. Beijing: Weapon Industry Press, 2006. (in Chinese)
Marshall R A, 王 莹. 电磁轨道炮的科学与技术 [M]. 曹延杰, 译. 北京: 兵器科学出版社, 2006.

[2] Watt T, Stefani F, Crawford M, et al. Investigation of damage to solid-armature railguns at startup [J]. IEEE Trans Magn, 2007, 43(1): 214-218.

[3] Stefani F, Parker J V. Experiments to measure wear in aluminum armatures [J]. IEEE Trans Magn, 1999, 35(1): 100-106.

[4] Liu X H, Zhang J G, Zhao Y S. The reservation of contact pressure between C-shaped solid armature and rail [J]. Electrical Engineering, 2010, (Supplement): 8-9. (in Chinese)
刘晓辉, 张建革, 赵彦森. C 型固体电枢与导轨接触压力的保持 [J]. 电气技术, 2010, (增): 8-9.

[5] Qiubarov E B. Interior ballistics and engraving force of projectile during engraving [M]. Translated by Yang J R. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. (in Chinese)
丘尔巴诺夫. 挤进时期内弹道学与挤进压力计算 [M]. 杨敬荣, 译. 北京: 国防工业出版社, 1997.

[6] Greenwood J A, Williamson J B P. Contact of nominally flat surfaces [J]. Proc Royal Soc Lond, 1966, 295: 300-319.

[7] Moaveni S. Finite element analysis theory and application with ANSYS [M]. Translated by Wang S, Liu L J, Dong C M, et al. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
Moaveni S. 有限元分析——ANSYS 理论与应用 [M]. 王 崧, 刘丽娟, 董春敏, 等, 译. 第 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[8] James T E, James D C. Optimum contact region geometry of solid armatures [J]. IEEE Trans Magn, 1997, 33(1): 86-91.

[9] Xiao Z, Chen L X, Xia S G, et al. Geometry design of monolithic C-shaped armature for EML system [J]. High Voltage Engerineering, 2010, 36(7): 1809-1814. (in Chinese)
肖 铮, 陈立学, 夏胜国, 等. 电磁发射用一体化 C 形电枢的结构设计 [J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1809-1814.

Combined Engraving Process of C-Shaped Solid Armature in Electromagnetic Railgun

ZHANG Yi, YANG Chun-Xia, LI Bao-Ming

(*Science and Technology on Transient Physics Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: In order to meet the requirement for initial contact pressure between armature and rails of electromagnetic railgun, by taking the engraving process of C-shaped armature in small caliber electromagnetic railgun as the research object, three engraving modes including uniform loading, impact loading and combined loading are simulated by using finite element method based on the mechanical analysis, and then the changes of radial deformation, stress and shear stress of the elements in the armature arm are compared and analyzed. The results show that the combined loading can obviously decrease the degree of shearing damage during solid armature engraving process and, in addition, improve initial contact pressure effectively in the same condition. The research findings show that combined mode is beneficial to increase the launching efficiency of electromagnetic railgun.

Key words: armature; combination; engraving process; initial ballistics; finite element