



不同内膛结构下弹带挤进参数化建模及动力学特性研究

姚助国¹, 李 雷^{1*}, 王中成², 杨国来¹

(1.南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094;2. 内蒙古北方重工业集团有限公司,内蒙古 包头 014033)

摘要:火炮发射时的弹带挤进过程持续时间短、膛线与弹带作用剧烈,对弹丸膛内运动的起始状态具有重要影响。采用数值方法研究弹带挤进过程时,保证建模和设置流程规范统一,是比较不同内膛结构下弹带挤进动力学响应的重要前提。针对该问题建立了弹带挤进数值建模与计算设置基本的参数化流程。通过脚本计算网格节点坐标,并将网格节点与网格单元相对应,生成膛线膛身管有限元模型;编译有限元软件的执行日志,实现弹丸弹带建模及弹带挤进前处理的程序化操作。创建了能够一键生成膛线膛身管和弹丸弹带有限元模型并完成前处理设置的 GUI 插件,并对不同内膛结构参数下的弹带挤进过程进行了分析。重点探究了膛线形式、阳线高度及阳线宽度等结构差异对弹带挤进过程的影响。动力学计算结果表明:混合膛线膛身管在挤进过程中弹带受到的阻力小于等齐膛线膛身管,弹带挤进完成时的最大应力也较低;阳线高度越低或宽度越窄,弹带挤进过程受到的内膛阻力越小,挤进速度越快。

关键词:弹带;挤进过程;参数化建模;内膛结构;动力学分析

中图分类号:TJ303 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2025)02-0039-10

Research on Parametric Modeling and Dynamic Characteristics of Belt Extrusion Under Different Bore Structures

YAO Zhuguo¹, LI Lei^{1*}, WANG Zhongcheng², YANG Guolai¹

(1.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2.Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co. Ltd., Baotou 014033, China)

Abstract: The rotating band engraving process during artillery firing is transient in duration, which involves intense interactions between the rifling and the rotating band, exerting significant influence on the initial state of projectile motion within the barrel. Standardized modeling and setup procedures is a critical prerequisite for comparing the dynamic responses of rotating band engraving under different internal bore structures. Regarding this issue, basic parameterization of the finite element analysis process for rotating band engraving was studied. Specifically, mesh node coordinates were calculated through scripting, and the correspondence between mesh nodes and elements was established to generate finite element models of rifled barrels. Additionally, the execution logs of finite element software were compiled to proceduralize the modeling of the projectile rotating band and the preprocessing of rotating band engraving. A GUI plugin capable of one-click generation of rifled barrel and projectile rotating band finite element models, along with automated preprocessing configurations, was developed. The engraving processes under varying internal bore structural parameters were analyzed. The study focused on the effects of structural differences in rifling profiles, land height and land width on the rotating band engraving process. Dynamic simulation

1.1 膛线身管的节点编号与模型生成

为保证节点编号与单元编号的唯一性,从左向右依次定义身管轴向截面编号、膛线编号、径向编号及周向编号4类,如图2所示。以膛线段节点编号“400010110”为例,编号前4位为身管网格轴向截面编号,第5位和第6位为膛线编号,第7位为同一网格截面径向层编号,第8位和第9位为同一径向层节点的周向顺序编号。这样既保证编号唯一且数量充足,同时也方便按照编号规律构造网格单元。

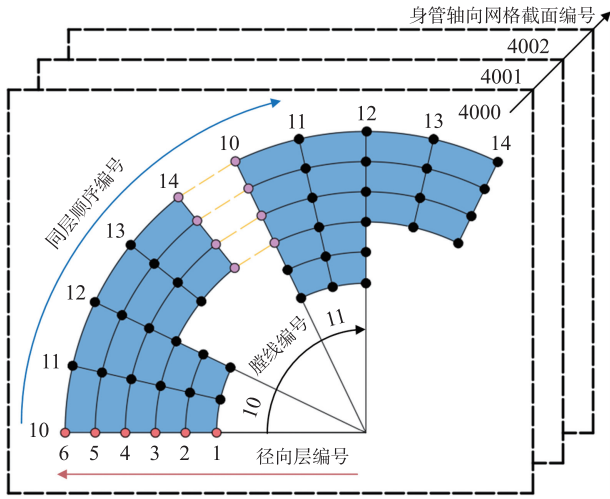


图2 关键节点编号示意图

Fig. 2 Schematic diagram of key node number

为方便计算网格节点坐标,获得混合膛线缠角与身管轴向距离之间的关系,按照混合膛线展开形式,以混合膛线起始点为坐标原点建立直角坐标系,混合膛线展开曲线如图3所示。图中, l_1 和 l_2 分别为混合膛线渐速段和等齐段在身管轴向上的长度,膛线缠角 α 在渐速段起始处对应的起始缠角为 α_1 ,渐速段结束处对应的终止缠角为 α_2 。

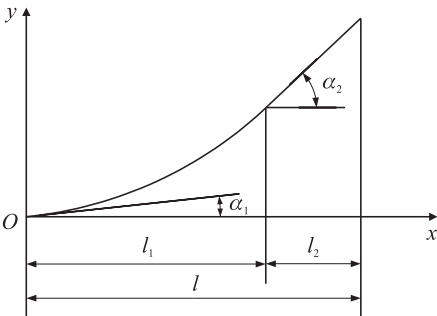


图3 混合膛线展开图

Fig. 3 Expansion diagram of mixed rifling

通常使用二次抛物线来描述混合膛线渐速段展开所形成的平面曲线^[9],设渐速段曲线的方程为

$$y = \frac{1}{2p}x^2 + qx + r \quad (1)$$

式中: p 和 q 为待定参数。式(1)中对 x 求一阶导数得

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{p}x + q \quad (2)$$

缠角的正切为曲线在该点的斜率,即该点的一阶导数,代入式(2)后得

$$\tan\alpha = \frac{1}{p}x + q \quad (3)$$

将 $x=0, x=l_1$ 以及两点处对应的斜率分别代入式(3)求解得

$$\begin{cases} q = \tan\alpha_1 \\ p = \frac{l_1}{\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1} \end{cases} \quad (4)$$

则缠角与膛线轴向距离之间的关系为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1}{l_1}x + \tan\alpha_1\right) \quad (5)$$

当 $\alpha_1 = \alpha_2$ 时,膛线形式为等齐膛线。

基于混合膛线缠角曲线及内膛结构参数,计算节点 P 的空间坐标 P_x, P_y 和 P_z ,基本流程框架如图4所示。其中, L 为身管中某一段的长度, M 为轴向网格层数, n 为膛线数, f 为节点 P 所在网格截面的径向网格层数, v 为节点 P 所在膛线的周向网格层数, R_1 为身管口径, R_3 为身管外径, P_L 为缠角 α 时膛线旋转一周后在身管轴向上的长度, β_4 为节点 P 在缠角 α 时单层网格需要旋转的角度, R_i 为节点 P 与所在身管截面圆心之间的距离, β_1 为节点 P 所在膛线与起始膛线之间的夹角, β_2 为节点 P 与所在身管截面圆心连线以及所在膛线的周向起始层网格节点连线之间的夹角, β_3 为节点 P 之前所有网格截面因不同缠角而旋转的累积角度。

在Python语言框架下根据节点坐标计算流程编写脚本,获得各节点空间坐标,按照有限元INP文件的编译规则对节点以及单元进行编号,并将单元编号与节点编号相对应,得到完整的有限元INP文件。对应的混合膛线身管有限元模型如图5所示。身管内膛局部放大图如图6所示,其中阳线、阴线、坡膛以及药室等结构特征完整。

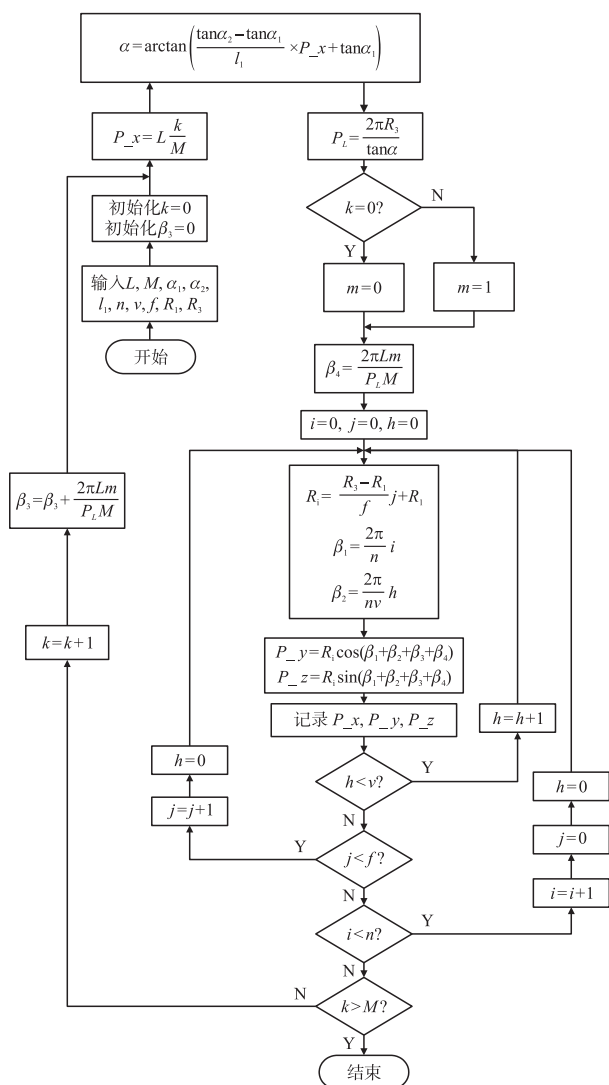


图 4 节点坐标计算流程图

Fig. 4 Flow chart of node coordinate calculation

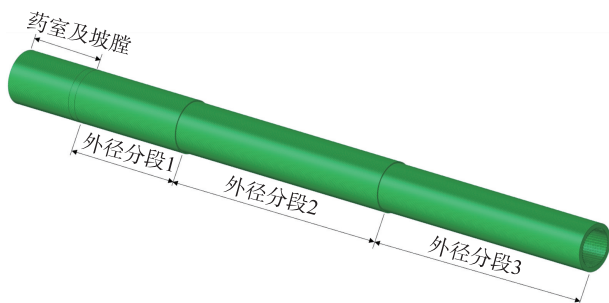


图 5 混合膛线身管有限元模型图

Fig. 5 Finite element model of mixed rifling barrel

1.2 弹丸弹带的参数化建模

基于 Python 语言的 ABAQUS 开发功能可通过 ABAQUS/CAE 窗口的命令交互界面、Python 脚本文件和图形用户界面 (GUI) 实现^[10], 如图 7 所示。Python 脚本可以绕过 ABAQUS/CAE 手动建模界面

直接对 ABAQUS 内核进行操作, 使用 Python 语言编制 ABAQUS 脚本接口可执行的程序能够快速完成建模、网格划分等前处理操作^[11]。

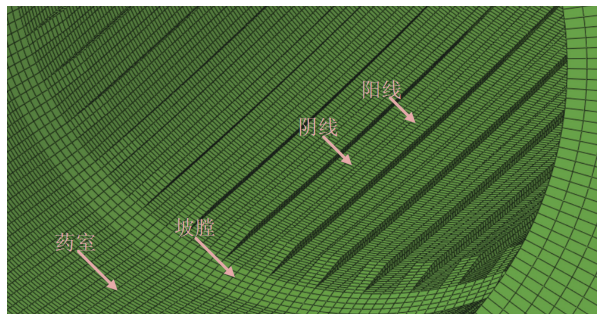


图 6 混合膛线身管有限元模型局部图

Fig. 6 Detailed finite element model of the mixed rifling barrel

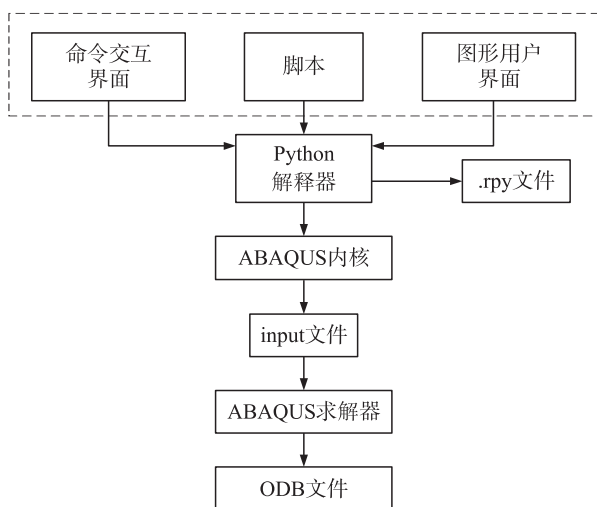


图 7 命令流与 ABAQUS/CAE 内核交互原理

Fig. 7 Principle of interaction between command stream and ABAQUS/CAE kernel

考虑弹丸与弹带结构为旋转体, 因此直接在 ABAQUS 软件的部件模块中, 根据弹丸弹带的结构特征参数创建草图后旋转生成实体模型。在网格模块中对其进行切割后划分网格, 生成弹丸和弹带有限元模型, 同时得到记录建模及划分网格的执行日志。将记录操作过程的执行日志文件后缀由 .rpy 改为 .py 形成 Python 脚本, 将脚本中具体结构参数以变量形式代替, 得到弹丸弹带参数化建模脚本。

2 弹炮耦合一体化设置

2.1 弹炮耦合程序化

为实现弹带挤进前处理的程序化操作, 在 ABAQUS 软件中完成弹带挤进前处理设置, 得到弹-炮耦合有限元模型如图 8 所示, 同时得到记录

- 前处理操作的执行日志。具体流程如下：
- ①基于脚本生成的线膛身管有限元模型的 INP 文件导入并与弹丸弹带装配。
 - ②弹带材料设为铜，弹带挤进过程中涉及到复杂的材料塑性流动，挤进过程中伴随着弹带材料的弹塑性大变形及损伤^[12]，采用 Johnson-Cook 塑性及断裂失效模型。
 - ③弹丸与弹带之间以 Tie 方式固接，弹带与身管内膛之间采用基于罚函数的接触算法。
 - ④弹底位置施加随时间变化的压力曲线，并将炮尾固定。
 - ⑤创建 job 并自动生成记录操作过程的执行日志。

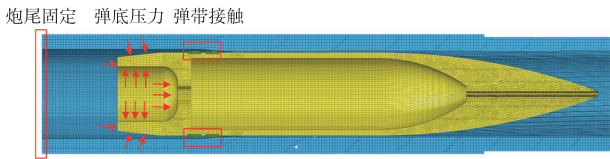


图 8 弹-炮耦合有限元模型

Fig.8 Coupled finite element model of projectile and barrel

上述操作完成后，将得到的执行日志文件后缀由.rpy 改为.py 形成 Python 脚本，对脚本进行编译。其中涉及连接方式以及边界条件等设定的脚本中，

默认使用掩码并通过 `getSequenceFromMask` 命令对目标位置进行选择。该命令不具有通用性，因而将其替换为能够使用模型的结构参数并通过 `getByBounding-Cylinder` 和 `findAt` 进行选择的命令，以此实现线膛身管火炮发射膛内运动的参数化建模过程。

2.2 参数化建模集成

ABAQUS 图形用户界面开发可通过自带的 RSG 对话框构造器来开发 GUI 插件，该方法操作简单，可满足大部分的开发需求^[13]。

本文通过使用 RSG 对话框构造器，利用可视化设计模块，搭建如图 9 所示的界面，其中 Length 模块可输入身管长度相关参数及各段身管网格层数，Radius 模块可输入与身管各段半径相关参数，其他参数模块可输入阳线高、阴线宽、起始缠角与终止缠角、渐速段长度等参数。将对话框与生成身管的 Python 脚本关联内核关键字后，创建一键生成身管有限元模型的 GUI 插件。搭建图 10 所示界面，其中图 10(a)可输入弹带结构相关的参数，图 10(b)可输入弹丸相关结构参数。将对话框与弹丸、弹带建模及弹带挤进前处理的 Python 脚本关联内核关键字后，创建一键实现弹丸、弹带建模及弹带挤进前处理的 GUI 插件。

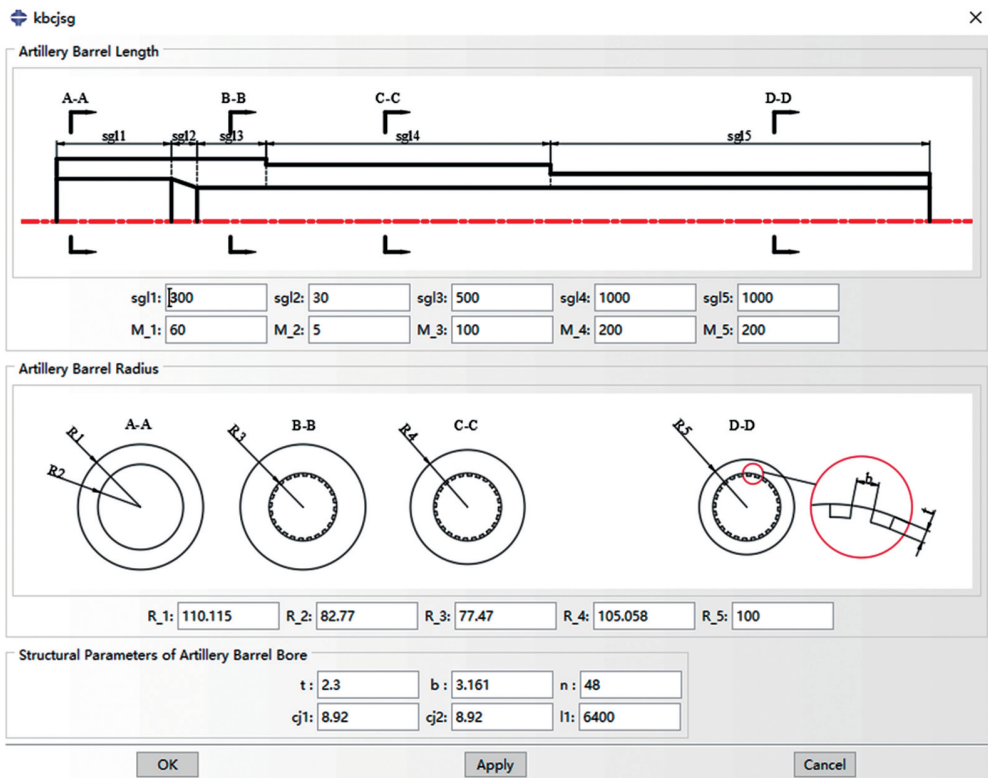
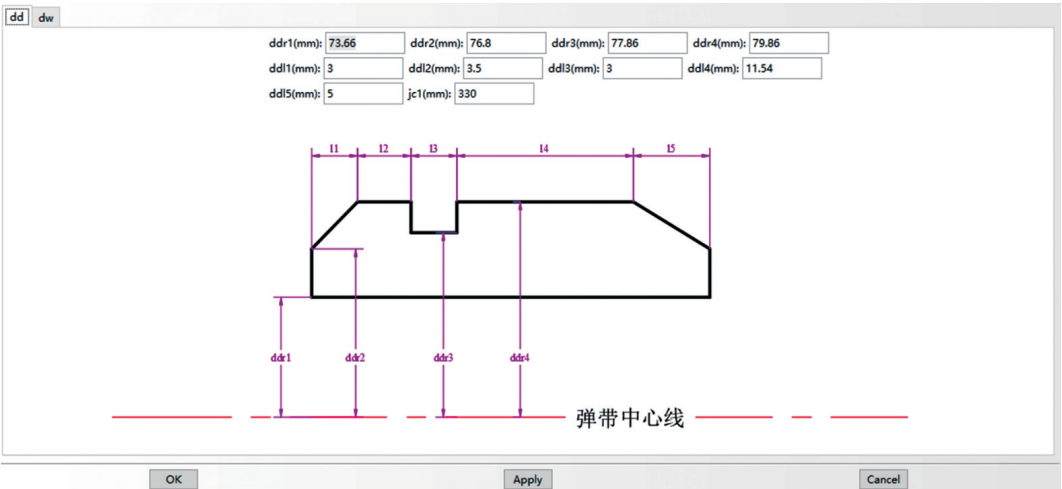
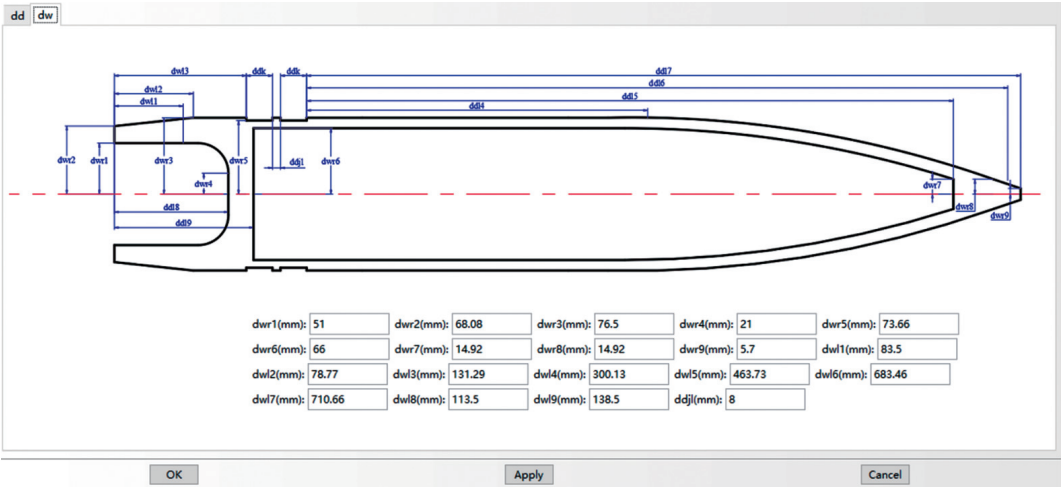


图 9 身管结构参数输入对话框

Fig.9 Parameter input dialog box of barrel structure



(a)弹带结构



(b)弹丸结构

图 10 弹丸弹带结构参数输入对话框

Fig. 10 Structure parameter input dialog boxes of projectile and band

3 不同内膛结构参数下弹带挤进结果分析

3.1 计算工况

为了简化模型,忽略次要影响因素,对弹丸膛内运动过程做如下假设:忽略身管的后坐运动;不计弹丸重力和前端空气动力的影响;不考虑弹丸初始卡膛角度对膛内运动过程的影响,默认弹丸初始运动角度与身管轴向一致;不考虑发射过程中火药燃气温度带来的热应力影响,不考虑摩擦产生的热量;不考虑耦合作用下,挤进过程对膛内燃气压力变化的影响,在弹丸底部施加膛压曲线作为载荷;忽略身管、弹丸本体的变形,假设他们为刚体;不考虑后弹带凸缘,前后弹带结构形状一致。

考虑不同膛线形式对弹带挤进过程的影响,本文对混合膛线身管及等齐膛线身管的弹带挤进过程进行对比分析,除膛线形式外其他参数均保持一致,膛线基本参数如表 1 所示。

表 1 不同膛线形式内膛参数

Table 1 Bore parameters of different rifling forms						
膛线形式	$\alpha_1/(^{\circ})$	$\alpha_2/(^{\circ})$	l_1/mm	l_2/mm	l/mm	
混合	0.8	8.92	6400	400	6 800	
等齐	8.92	8.92	—	—	6 800	

考虑不同内膛结构参数对弹带挤进过程的影响,基于控制变量法对不同阳线高度 h 及不同阳线宽度 b 的弹带挤进过程进行对比分析。膛线基本参数如表 2 所示,工况 1~工况 5 为不同阳线高度时膛线参数,工况 6~工况 10 为不同阳线宽度

时膛线参数,其中工况 2 与工况 6 为相同参数,只计算一组即可。

表 2 不同膛线结构内膛参数

Table 2 Bore parameters of different rifling structures

工况	<i>h</i> /mm	<i>b</i> /mm	工况	<i>h</i> /mm	<i>b</i> /mm
1	2.3	4.2	6	2.1	4.2
2	2.1	4.2	7	2.1	3.9
3	1.9	4.2	8	2.1	3.6
4	1.7	4.2	9	2.1	3.3
5	1.5	4.2	10	2.1	3.0

3.2 不同膛线形式弹带挤进计算结果

基于表 1 不同膛线形式内膛参数的混合膛线身管和等齐膛线身管的弹带挤进结果如图 11~图 15 所示,两种膛线结构在挤进完成时结果对比如表 3 所示。图 11 为不同膛线形式下弹带挤进完成时的应力场分布。由于等齐膛线相较混合膛线在膛线导引部有更大缠角,等齐膛线下弹带挤进完成时最大应力为 610 MPa,混合膛线下弹带挤进完成时最大应力为 550 MPa,均超过弹带材料的静态屈服应力,使弹带材料发生屈服变形,由于膛线起始缠角不同,等齐膛线下挤进结束后弹带刻槽与身管轴线方向的夹角更为明显。

表 3 不同膛线形式下弹带挤进结果对比

Table 1 Comparison of the results of belt extrusion under different rifling forms

膛线形式	挤进时间 /ms	挤进完成时最大应力/MPa	挤进过程最大阻力/kN
等齐膛线	3.6	610	2 061
混合膛线	3.5	550	1 949

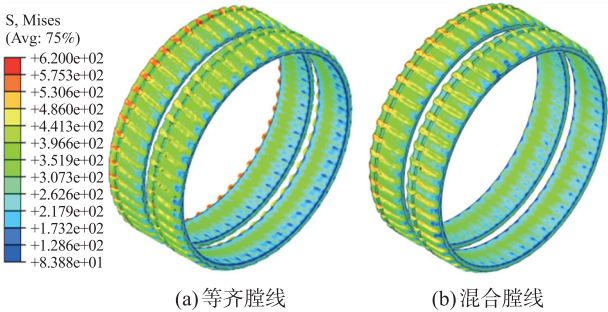


图 11 不同膛线形式弹带挤进应力云图

Fig. 11 Stress of belt extrusion under different rifling forms

图 12 为等齐膛线身管下弹带挤进过程中不同时刻应力云图。在 0.9 ms 时,前弹带与坡膛接触,挤进阻力开始上升;2 ms 时前弹带部分挤入膛线导引部,由于膛线缠角的作用,弹带与膛线导转侧接触位置发生应力集中,最大应力 570 MPa,明显大于弹

带与膛线非导转侧相接触的位置;2.4 ms 时后弹带开始与坡膛接触,挤进阻力上升趋势加快;在 3.1 ms 时,前弹带挤入全深膛线,后弹带也全部挤入膛线导引部,弹带与内膛之间有效接触面积不再增加,挤进阻力开始下降;3.6 ms 时后弹带挤入全深膛线,弹带挤进过程结束。

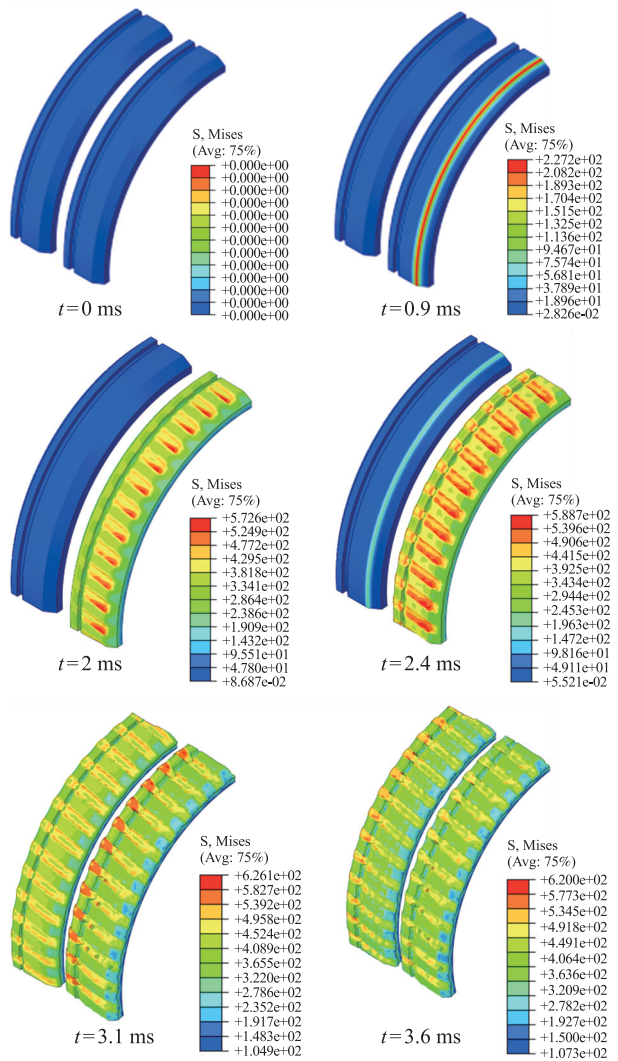


图 12 等齐膛线下弹带挤进不同时刻应力图

Fig. 12 Stress diagram of the belt squeezed into different moments under the uniform rifling

图 13 和图 14 分别为弹带挤进过程中弹丸膛内运动的速度与加速度曲线。混合膛线身管下弹带挤进用时 3.5 ms,早于等齐膛线下 3.6 ms 的挤进时间,在相同时刻下混合膛线身管的弹丸运动速度与加速度相较等齐膛线身管更大。由图 15 可知,前弹带开始挤进时阻力呈上升趋势,在后弹带开始挤进过程中,弹带与内膛之间的接触面积进一步增大,阻力呈现更加明显的上升,导致图 14 中弹丸加速度出现局

部下降,前弹带挤进结束后阻力开始下降,在后弹带挤入全深膛线后,阻力变化减缓。

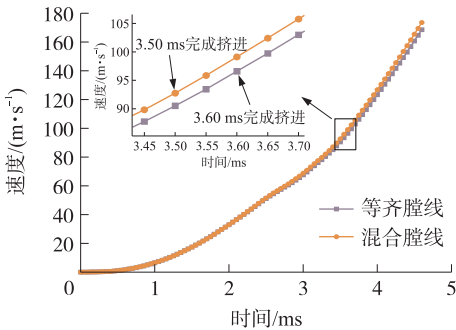


图 13 不同膛线形式下弹带挤进速度曲线
Fig. 13 Squeezing velocity curves of belt under different rifling forms

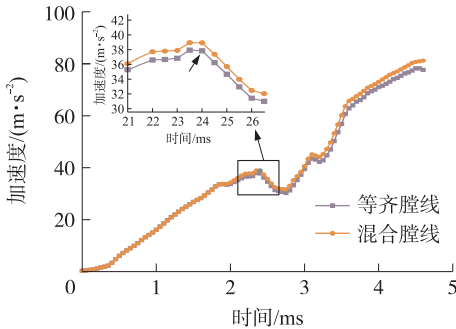


图 14 不同膛线形式下弹带挤进加速度曲线
Fig. 14 Acceleration curves of belt extrusion under different rifling forms

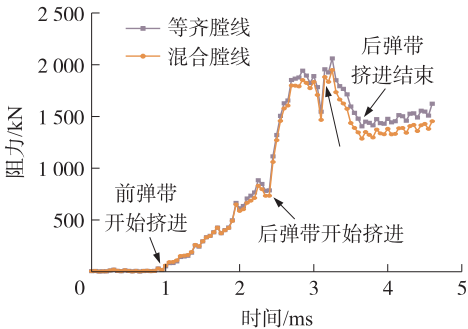


图 15 不同膛线形式下弹带挤进阻力曲线
Fig. 15 Extrusion resistance curves of the belt under different rifling forms

3.3 不同阳线高度弹带挤进计算结果

不同阳线高度下弹带挤进结果如图 16~图 19 所示,图 16 为不同阳线高度下弹带挤进完成时刻槽应力云图,从图中可知弹带刻槽深度随阳线高度的减小而变浅。

部分计算结果数据对比如表 4 所示,随着阳线高度的减小,挤进过程中弹丸所受最大阻力相应减小,挤进完成时弹带最大应力随之降低,弹带完全挤入全深膛线所用时间相应缩短。

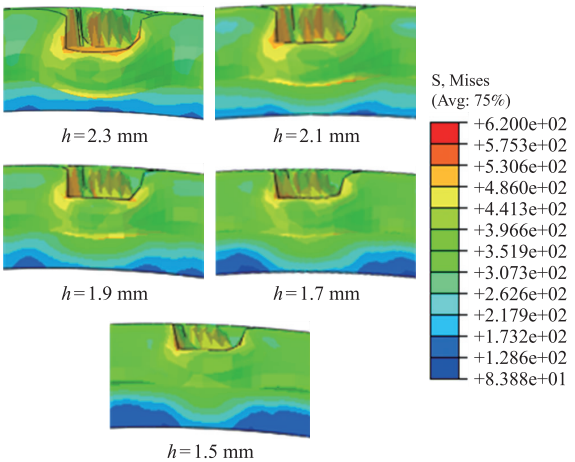


图 16 不同阳线高度下弹带挤进完成时刻槽应力云图
Fig. 16 Stress of the groove at the completion of belt squeezing under different sunline heights

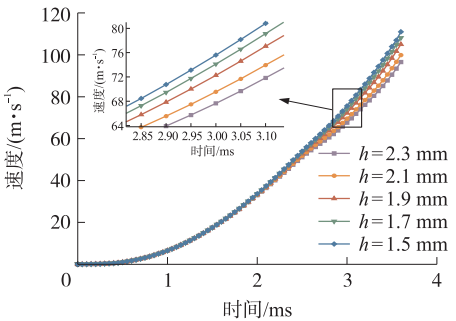


图 17 不同阳线高度下弹丸速度曲线
Fig. 17 Velocity curves of projectile under different sunline heights

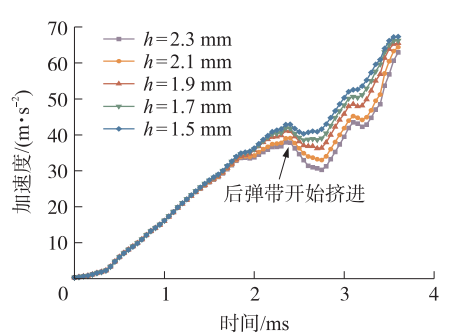


图 18 不同阳线高度下弹丸加速度曲线
Fig. 18 Acceleration curves of projectile under different sunline heights

表 4 不同阳线高度下弹带挤进结果数据对比

Table 4 Comparison of results data for squeezing in the belt under different sunline heights

阳线高/mm	挤进时间/ms	最大应力/MPa	最大阻力/kN
2.3	3.60	610	2 061
2.1	3.55	591	1 965
1.9	3.50	585	1 728
1.7	3.45	556	1 582
1.5	3.40	523	1 471

图 17 和图 18 为不同阳线高度下弹丸膛内运动的速度与加速度曲线,从图中可以看出在相同时刻下,随着阳线高度的降低,弹丸运动的速度与加速度增大,在后弹带开始挤进后,挤进阻力呈现快速上升趋势(如图 19 所示),导致弹丸加速度减小。

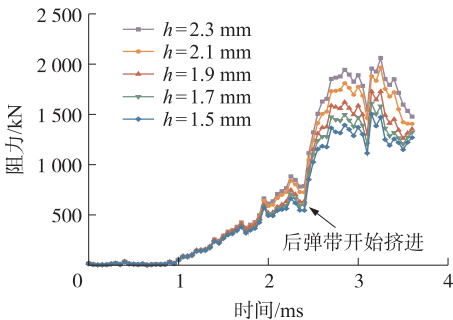


图 19 不同阳线高度下弹带挤进阻力曲线
Fig. 19 Squeezing resistance curve of elastic belt under different sunline heights

3.4 不同阳线宽度弹带挤进计算结果

不同阳线宽度下弹带挤进结果如图 20~图 23 所示。图 20 为不同阳线高度下弹带挤进完成时弹带局部应力分布图,从图中可以看出,随着阳线宽度的减小,弹带刻槽宽度随之变窄。

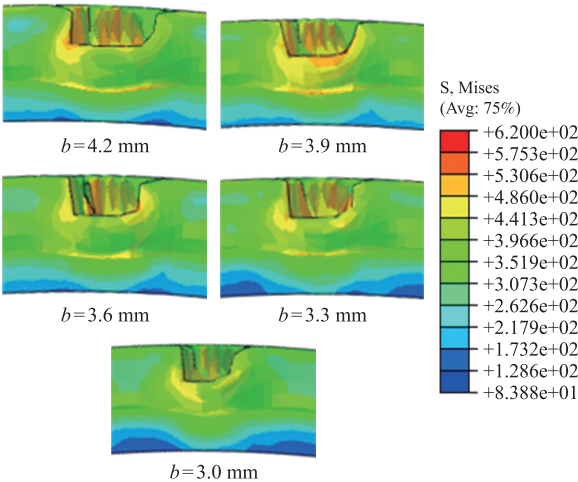


图 20 不同阳线宽度下弹带挤进完成时刻槽应力云图
Fig. 20 Stress of the groove at the completion of belt squeezing under different sunline widths

部分计算结果数据对比如表 5 所示,随着阳线宽度的减小,弹带挤进过程中弹丸所受最大阻力相应降低,挤进时间呈缩短趋势,挤进完成时的最大应力也随之减小。

图 21 和图 22 为不同阳线高度下弹丸膛内运动的速度与加速度曲线,从图中可以看出在相同时刻下,随着阳线宽度的减小,弹丸运动的速度与加速度

增大。由图 23 可知,在后弹带开始挤进时,阻力出现快速上升趋势,导致弹丸运动加速度减小。

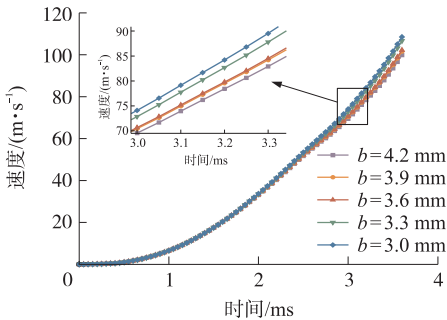


图 21 不同阳线宽度下弹丸速度曲线
Fig. 21 Velocity of projectile under different sunline widths

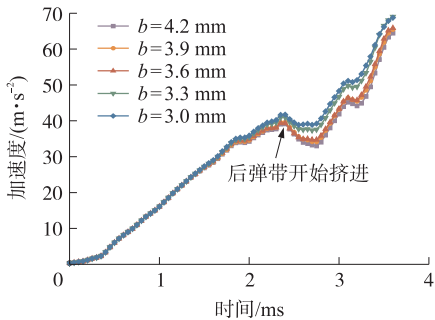


图 22 不同阳线宽度下弹丸加速度曲线
Fig. 22 Acceleration of projectile under different sunline widths

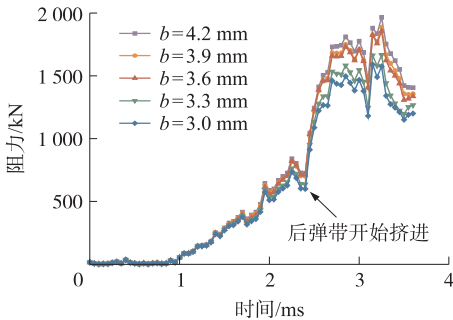


图 23 不同阳线宽度下弹带挤进阻力曲线
Fig. 23 Squeezing resistance of elastic belt under different sunline widths

表 5 不同阳线宽度下弹带挤进结果对比
Table 5 Comparison of results for squeezing in the belt under different sunline widths

阳线宽/mm	挤进时间/ms	最大应力/MPa	最大阻力/kN
4.2	3.55	591	1 965
3.9	3.55	585	1 886
3.6	3.50	560	1 855
3.3	3.50	521	1 665
3.0	3.45	505	1 575

4 结束语

本文通过 Python 语言编写脚本,对 ABAQUS 有限元软件进行二次开发,创建了 GUI 插件,实现了一键生成线膛火炮身管和弹丸弹带有限元模型并自动完成前处理操作。在此基础上对比分析了不同内膛结构及参数下的弹带挤进过程。得到以下结论:

①混合膛线身管的起始缠角较小,在挤进过程中受到的阻力相对等齐膛线较小,挤进完成时弹带最大应力相对较小,且所刻槽与身管轴线之间的夹角偏小。

②阳线高度越低,挤进过程的阻力越小,弹带挤进完成时最大应力越小,弹带刻槽深度越浅,挤进过程中相同时刻下弹丸速度与加速度越大。

③阳线宽度越窄,挤进过程所受阻力越小,弹带挤进完成时最大应力越小,弹带刻槽越窄,挤进过程中相同时刻下弹丸速度与加速度越大。

参考文献

- [1] 常星星,吴星超,张晓川. 弹带挤进过程膛线受力的影响分析[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(1):78-82.
CHANG Xingxing, WU Xingchao, ZHANG Xiaochuan. Influence of rifle force on rotation band engraving process[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2020,41(1):78-82. (in Chinese)
- [2] 刘琦,王育维,朱文芳,等. 基于不同内膛结构参数的弹带挤进阻力特性研究[J]. 舰船电子工程,2023,43(5):153-157.
LIU Qi, WANG Yuwei, ZHU Wenfang, et al. Research on engraving resistance characteristic of band based on different structure parameters of bore ship electronic engineering[J]. Ship Electronic Engineering,2023,43(5):153-157. (in Chinese)
- [3] 彭松江,陈亮,何行,等. 某舰炮典型膛线结构的受力和内弹道特性分析[J]. 火炮发射与控制学报,2020,41(4):27-31.
PENG Songjiang, CHEN Liang, HE Hang, et al. Analysis of force and interior ballistic performance of the typical forcing cone structure of a naval gun[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020,41(4):27-31. (in Chinese)
- [4] 梁兴旺,李强,安俊斌,等. 弹丸挤进过程中弹带变形仿真分析[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(1):94-97.
LIANG Xingwan, LI Qiang, AN Junbin, et al. Deformation simulation analysis of rotating band in engraving process[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2019,40(1):94-97. (in Chinese)
- [5] 刘欢,刘朋科,宁变芳,等. 155 mm 火炮不同膛线结构与弹带作用力研究[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(11):187-193.
LIU Huan, LIU Pengke, NING Bianfang, et al. Study on force of different rifling structures and rotating band of 155mm artillery[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2022,43(11):187-193. (in Chinese)
- [6] 丁传俊,张相炎,刘宁. 身管内膛参数化模型及其磨损有限元模型的生成方法[J]. 兵工学报,2016,37(12):2212-2219.
DING Chuanjun, ZHANG Xiangyan, LIU Ning. A parametric modeling method for gun barrel and a meshing generation strategy for worn barrel[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(12):2212-2219. (in Chinese)
- [7] 邹利波,于存贵,郭昭蔚,等. 线膛身管有限元网格参数化建模方法[J]. 国防科技大学学报,2019,41(3):77-82.
ZOU Libo, YU Cungui, GUO ZhaoWei, et al. Parametric modeling method of finite element grid for rifling barrel[J]. Journal of National University of Defence Technology, 2019,41(3):77-82. (in Chinese)
- [8] 李政,张相炎,刘宁. 火炮磨损身管中弹带挤进过程模拟研究[J]. 弹道学报,2018,30(4):85-91.
LI Zheng, ZHANG Xiangyan, LIU Ning. Numerical research on band engraving process in the abraded barrel[J]. Journal of Ballistics,2018,30(4):85-91. (in Chinese)
- [9] 田大畅,王雨时,闻泉. 大口径火炮混合膛线约束下的弹丸膛内角加速度特性[J]. 探测与控制学报,2023,45(3):74-80.
TIAN Dachang, WANG Yushi, WEN Quan. Large-caliber cannon projectile angular acceleration characteristics of mixed rifling constraint[J]. Journal of Detection & Control,2023,45(3):74-80. (in Chinese)
- [10] 于金,王胤棋. ABAQUS 二次开发及在曲面薄壁件加工变形模拟中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术,2017(9):129-131.
YU Jin, WANG Yinqi. Secondary development of ABAQUS and its application in curved thin-walled part machining deformation simulation[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique,2017(9):129-131. (in Chinese)
- [11] 邵培,于存贵,魏浩. 基于 ABAQUS 二次开发的旋压参数化加工研究[J]. 机械制造与自动化,2015(1):109-112.
SHAO Pei, YU Cungui, WEI Hao. Parametric processing of spinning based on ABAQUS secondary development[J]. Machine Building and Automation,2015(1):109-112. (in Chinese)
- [12] 王鹏,杨国来,葛建立,等. 基于 Johnson-Cook 本构模型的弹带挤进过程数值模拟[J]. 弹道学报,2015,27(2):55-61.
WANG Peng, YANG Guolai, GE Jianli. Numerical simulation of rotating band engraving process based on Johnson-Cook constitutive model[J]. Journal of Ballistics, 2015, 27(2):55-61. (in Chinese)
- [13] 巫成,祁昌建,杨靖,等. ABAQUS 二次开发在列车薄壁框体零件铣削变形预测中的应用[J]. 工具技术,2023,57(3):105-110.
WU Cheng, QI Changjian, YANG Jing, et al. Application of ABAQUS secondary development in milling deformation prediction of train thin-walled frame parts[J]. Tool Engineering, 2023, 57(3):105-110. (in Chinese)