

doi: 10.7690/bgzdh.2024.10.010

某大口径火炮不同坡膛锥角弹丸挤进过程

张 亨, 石春明, 郭俊行, 张世全, 翟任培

(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712009)

摘要: 为对某大口径火炮不同坡膛锥角时弹丸挤进过程进行对比分析, 通过光滑粒子流体动力学法仿真某装药条件下弹带挤进过程。仿真得到挤进阻力和导转力矩, 分析产生力矩波动的原因, 并提出减轻力矩波动、缓解膛线受力的改进措施。结果表明, 该研究能为坡膛锥角对弹带刻槽影响的研究提供参考。

关键词: 大口径火炮; 弹丸挤进; 光滑粒子流体动力学法; 坡膛锥角

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A

Engraving Process of Projectiles with Different Bore Cone Angles in Large Caliber Gun

Zhang Heng, Shi Chunming, Guo Junxing, Zhang Shiquan, Zhai Renpei

(Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, China)

Abstract: In order to compare and analyze the engraving process of projectile in a big bore gun with different bore cone angles, smoothed particle hydrodynamics (SPH) method was used to simulate the engraving process of projectile band under a certain charge condition. The engraving resistance and driving torque are obtained by simulation, and the causes of torque fluctuation are analyzed, and the improvement measures to reduce the torque fluctuation and relieve the rifling force are put forward. The results show that the study can provide a reference for the study of the influence of the cone angle of the slope bore on the groove of the ammunition belt.

Keywords: large caliber gun; projectile engraving; smoothed particle hydrodynamic method; bore cone angle

0 引言

膛线火炮发射时高压火药燃气将弹丸瞬间挤入膛, 弹带在膛线作用挤进后形成刻槽, 同时使发射弹丸得到一定转速^[1]。由于经典内弹道理论忽略了复杂的弹丸挤进时期, 而该时期又很重要, 故一般采用数值仿真的方法研究。文献[2-4]通过有限元软件仿真分析了某大口径火炮弹丸挤进过程, 基于弹带材料失效模型揭示了弹带变形与应力三轴度和罗德角参数关系。这是因为使用连续体单元仿真大变形问题时容易导致单元畸变、引起时间增量步长过小, 继而导致求解中断。光滑粒子流体动力学法是一种无网格法, 通过随意散布的粒子可以离散求解域; 因此, 每个节点中间没有网格关联, 没有网格畸变影响, 所以能较好解决大变形问题, 从而获得了广泛应用^[5]。已经有学者使用光滑粒子流体动力学法求解了火炮的挤进过程, 文献[6-7]研究了大口径火炮发射弹丸挤入膛内的计算模型, 文献[8]研究了软铁弹带挤入膛内过程, 文献[9]研究了大口径火炮发射弹丸身管内全过程, 文献[10]研究了某浅

膛线身管弹丸挤入膛内过程, 文献[11]研究了在膛线烧蚀情况下对火炮发射弹丸过程弹丸与身管耦合动态响应的影响。通过以上研究充分验证使用光滑粒子流体动力学法构建弹丸挤入膛内过程计算模型, 可以很好地平衡求解精度和求解效率。

弹丸挤进过程对起始内弹道、身管寿命等有很大影响, 以往内膛结构设计时多依据经验, 很少考虑内膛结果变化对挤进过程、膛线受力等开展研究^[12-13], 只对一些基本问题开展了理论分析^[14], 研究了坡膛锥角对挤进阻力的影响, 但是坡膛锥角减小后是否带来某些负面影响, 如导致力矩、刻槽形貌等发生变化还需深入开展研究。

综上所述, 坡膛锥角对某大口径火炮弹丸弹带挤入膛内过程中动态响应研究较少, 尤其是对于挤进过程中接触应力、导致过程、弹带刻槽形貌等缺乏研究, 有必要开展坡膛锥角对弹带刻槽影响的研究。为此, 笔者采用光滑粒子流体动力学法仿真某大口径火炮在不同坡膛锥度时的弹丸挤进过程, 得到挤进过程中轴向阻力和导转力矩随坡膛锥度变化。

收稿日期: 2024-06-27; 修回日期: 2024-07-30

第一作者: 张 亨(1995—), 男, 安徽人, 硕士。

1 仿真模型及边界条件

某大口径火炮身管坡膛部分的 UG 3 维模型如图 1 所示。使用 Hypermesh 软件进行网格划分，膛线起始处单元沿轴向的尺寸为 2 mm，其余部分单元沿轴向的尺寸为 10 mm。坐标旋转变换得到了身管部分有限元模型如图 1(c)所示。弹丸的 3 维有限元模型如图 2 所示。

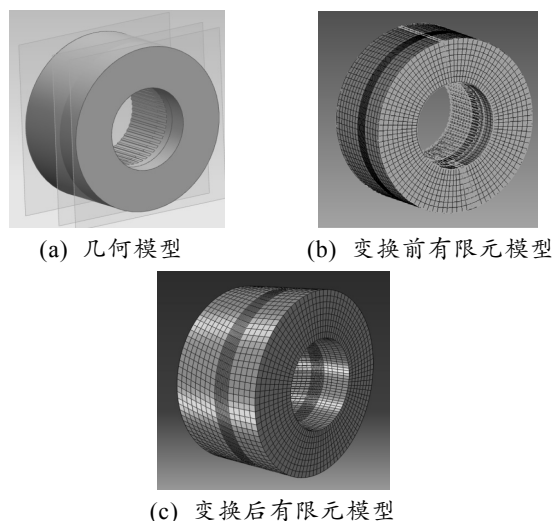


图 1 某大口径火炮 3 维有限元网格

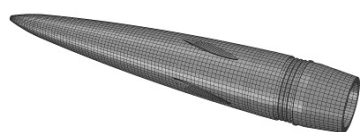
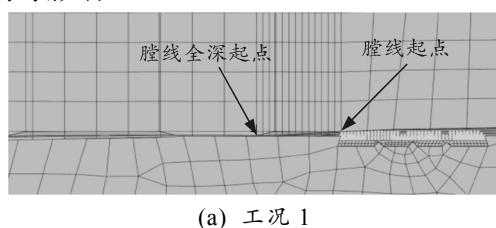
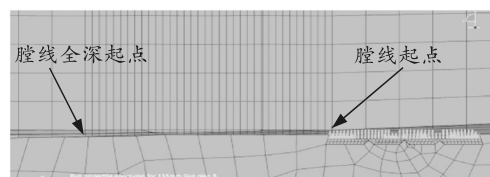


图 2 弹丸的 3 维有限元网格

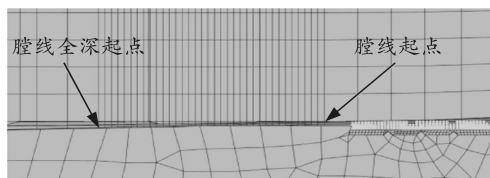
某些火炮为了减小坡膛磨损，采用由 2 段圆锥组成坡膛，膛线起点在第 1 段圆锥上、其锥度大，第 2 段圆锥锥度小^[1]。笔者研究的某大口径火炮身管内膛比较特殊，其第 1 段圆锥锥度小、第 2 段圆锥锥度大，弹丸合膛如图 3 所示，卡膛点设计在 1 锥上记为工况 1。将内膛 1、2 锥互换，似乎更符合火炮结构设计常理，卡膛点设计在 2 锥上的工况记为工况 2。也可以将内膛 1、2 锥互换后卡膛点设计在 1 锥上，记为工况 3。显然通过调整坡膛锥度使得从膛线起点到完整膛线起点距离、挤进完成时弹丸位移均会较原设计增大。笔者通过数值方法求解挤进过程，分析不同内膛锥度组合对内膛受力和弹丸运动等影响。



(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3

图 3 不同坡膛锥角火炮与弹丸组合工况

弹带分成 2 层建模，内层采用实体单元，外层采用光滑粒子单元建模，内外层网格之间建立绑定约束。因光滑粒子单元分析步长较小、占用计算资源更多，这样分配网格可充分发挥光滑粒子法处理大变形问题的优势，节省计算资源。

弹体与身管均设置为弹性体；由于弹带会发生大塑性变形并可能发生失效，故采用 Johnson-Cook 屈服模型^[15]与 Johnson-Cook 损伤失效模型^[16]，此处不再赘述。弹带本构方程材料常数由 Gleeble 等温热压缩实验和霍普金森压杆压缩实验曲线经过数值拟合获得^[17]。挤进过程持续时间很短，在全装药时还不到 4 ms，故采用显式动力学方法求解。全装药条件下内弹道计算出的弹底压力曲线如图 4 所示，施加于弹丸底部。在弹带光滑粒子单元、弹丸前定心部外表面和内膛表面之间建立接触关系。

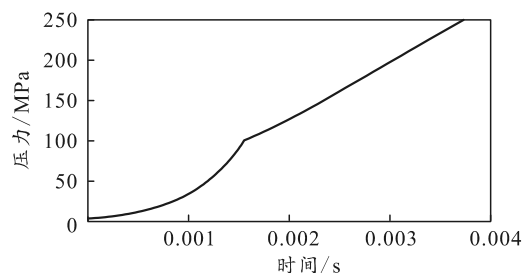


图 4 弹底压力曲线

2 模型计算结果

提交有限元软件求解模型后通过输出光滑粒子的坐标、等效应力、等效塑性应变等变量，通过自主开发的后处理程序，得到弹带截面上各变量分布^[10]。挤进完成后各工况时弹带局部横截面上等效应力分布如图 5 所示。以身管轴线某一点为原点建立坐标系，身管指向设为 z 轴正向，以向左为 x 轴正向，向上为 y 轴正向，符合右手法则。在挤进后弹带长度方向中间位置建立横切面，采用自主开发

的 Python 程序进行后处理得到该横切面上的场变量分布。从图中可知，在膛线的作用下弹带形成刻槽，弹带最大等效应力约 320 MPa，原设计时阳线压痕明显、阴线槽填充饱满，而更改坡膛锥角后阳线压痕不够明显。

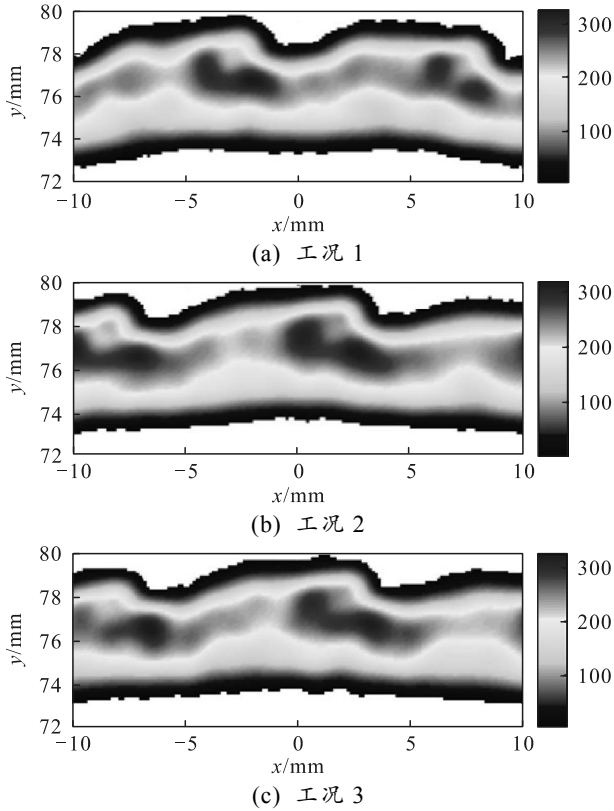


图 5 仿真得到的弹带切片等效应力分布(单位: MPa)

挤进完成时弹带纵向中间切面上的等效塑性应变分布如图 6 所示。局部等效应变分别可达 0.37、0.41 和 0.34。图中可以看出等效塑性应变分布不均匀，形成刻槽的部分塑性变形大，处于阳线下方，说明材料受阳线挤压而发生塑性变形流动。

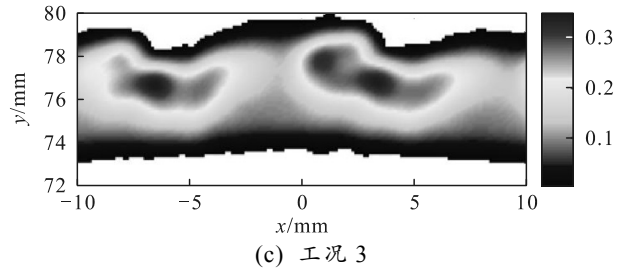
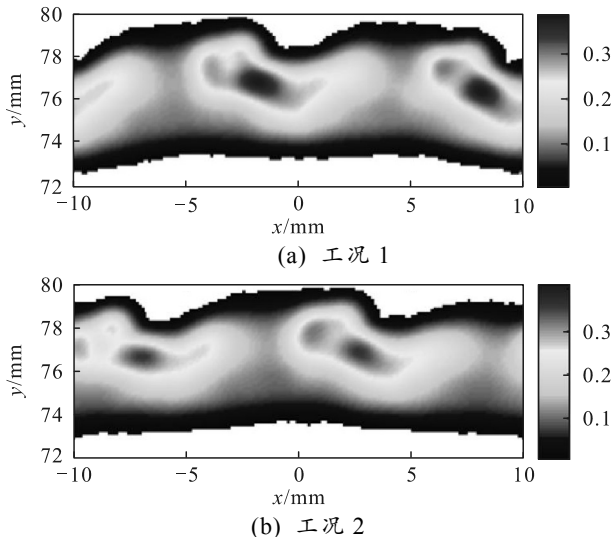


图 6 仿真得到的弹带切片等效塑性应变分布

仿真得到了各工况时弹带所受沿轴向阻力变化如图 7 所示，在设计工况 1 下弹丸行程为 35.7 mm 时达到最大挤进阻力为 1 080 kN，而后开始减小，在弹丸行程为 80 mm 时完成挤进。本文中仿真值与文献[13]给出的在弹丸行程为 34.6 mm 时达到最大挤进阻力 1 040 kN 的结果较为接近。工况 2 时弹丸行程为 35.0 mm 时达到最大挤进阻力为 926 kN，工况 3 时弹丸行程为 48.7 mm 时达到最大挤进阻力为 893 kN，均较工况 1 小，可见将坡膛锥角变小确实能减小最大挤进阻力，但挤进阻力下降较慢。

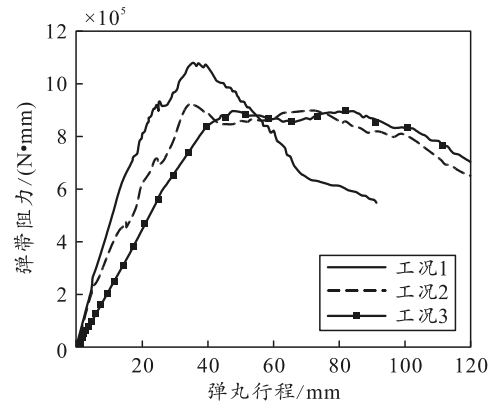
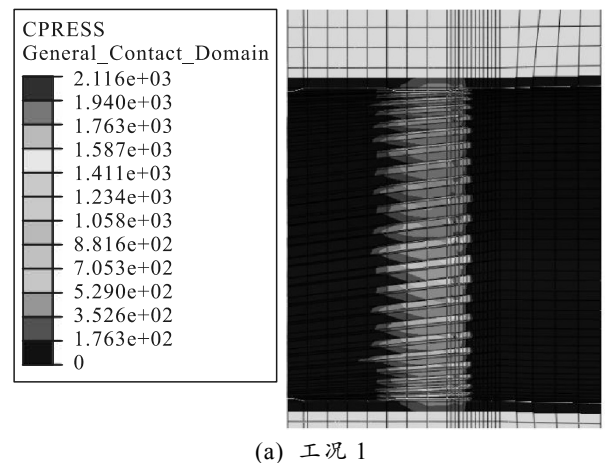


图 7 仿真得到的挤进阻力曲线

仿真获得了弹丸挤进过程中身管内膛接触应力分布，如图 8 所示。从图中可知，局部最大接触应力可达 2 116、1 847 和 1 829 MPa，锥角减小时坡膛处接触应力有减小趋势。



(a) 工况 1

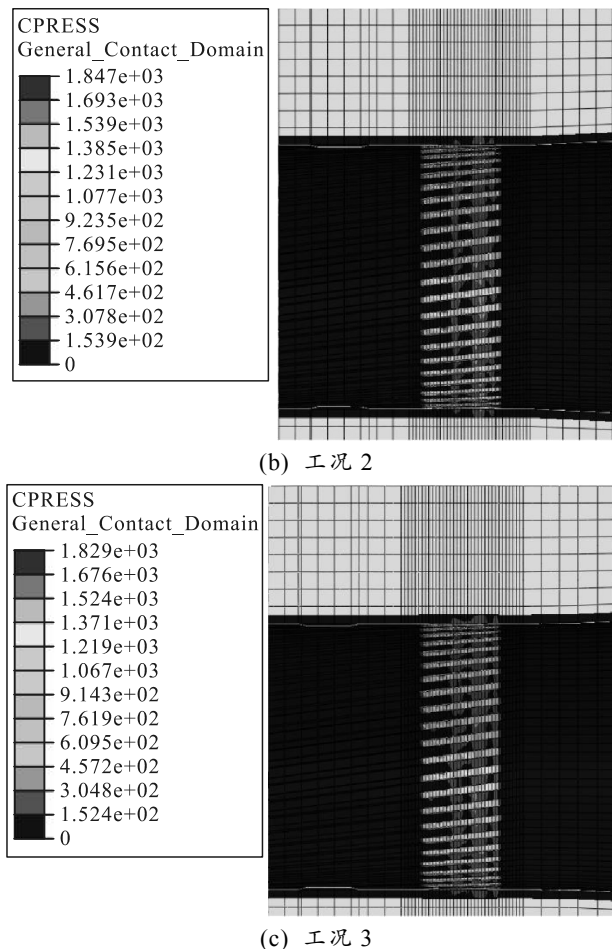


图 8 身管内膛接触应力分布(单位: MPa)

3 结果讨论

仿真后输出了弹带部分所受的导致力矩, 其变化曲线如图 9 所示, 前期导致力矩一直在增大, 之后开始减小再增大, 即力矩随着弹丸行程有所波动, 工况 1 中挤进所需行程短、力矩波动较小, 最大局部峰值约 $1\ 2000\ \text{N}\cdot\text{m}$, 将 1、2 锥互换后工况 2 和 3 导致力矩波动加大, 最大局部峰值约 $31\ 000\sim 36\ 000\ \text{N}\cdot\text{m}$, 对应的弹丸行程也在不断增大。这是因为将 1、2 锥互换时变相地增大了弹丸挤进的行程, 而弹丸挤进时正处于火药燃烧的初期, 压力正在急剧增大, 在弹丸尚未完全挤入时, 弹带部分尚未完成形成刻槽, 此时若受到很大的弹底压力推动, 使得弹带受力恶化, 也会引起力矩波动, 从仿真结果看这些都可能是导致阳线压痕不明显的原因。以上分析了产生力矩波动的机理, 有弹丸挤进过程中逐渐刻槽的内因, 也有火药燃气压力逐渐增大的外因, 采取减小膛线起始缠角、减少火药燃烧初期压力上升速率等措施则能够减轻力矩波动, 达到缓解膛线受力的目的。

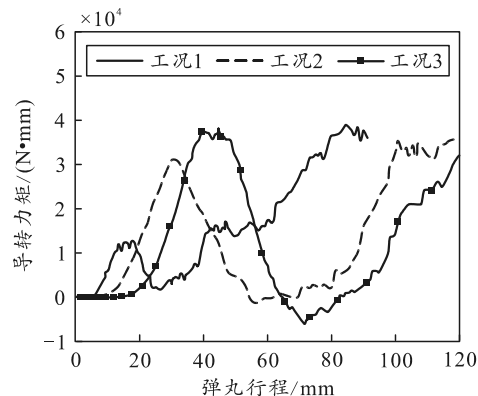


图 9 仿真得到的导致力矩曲线

4 结论

笔者采用光滑粒子流体动力学法仿真了某大口径火炮不同坡膛锥度时的弹丸挤进过程, 得到了挤进过程中轴向阻力和导致力矩随坡膛锥度变化。主要结论有:

1) 在工况 1 设计时, 仿真出最大挤进力 $1\ 080\ \text{kN}$, 同文献记载的 $1\ 040\ \text{kN}$ 大致接近。1、2 锥互换卡膛在 2 锥上工况 2 时最大挤进阻力为 $926\ \text{kN}$, 1、2 锥互换卡膛在 1 锥上工况 3 时最大挤进阻力为 $893\ \text{kN}$, 坡膛锥角变小确实能够减小最大挤进阻力。

2) 工况 1 设计时, 挤进过程中导致力矩波动小, 最大局部峰值约 $12\ 000\ \text{N}\cdot\text{m}$, 将 1、2 锥互换后工况 2 和 3 导致力矩波动加大, 最大局部峰值约 $31\ 000\sim 36\ 000\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。

3) 分析了挤进过程中产生力矩波动的机理, 有弹丸挤进过程中逐渐刻槽的内因, 也有火药燃气压力逐渐增大的外因, 并给出了减小力矩波动的措施, 如减小膛线起始缠角小、减少火药燃烧初期压力上升速率等。

参考文献:

- [1] 潘玉田. 炮身设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 37-42.
- [2] 孙全兆, 杨国来, 王鹏, 等. 某大口径榴弹炮弹带挤进过程数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 206-213.
- [3] 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.
- [4] 孙全兆. 大口径榴弹炮弹带挤进动力学研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 10.
- [5] LUCA M, YACINE K. SPH simulation of liquid metal target dynamics[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(5): 940-946.