

文章编号:1006-9941(2023)04-0356-09

# 尼龙弹带动态挤进特性试验研究与数值分析

杨明,余永刚

(南京理工大学能源与动力工程学院,江苏南京210094)

**摘要:** 为了研究尼龙弹带在滑膛炮中的挤进特性,设计了短管炮发射装置,进行了动态射击条件下的穿甲弹挤进试验研究。采用瞬态压力测量系统和高速摄像仪得到挤进过程中膛内压力和弹丸运动参量,计算得出弹丸动态挤进过程的阻力变化特性曲线,分析了弹底平均压力上升速率对于尼龙弹带挤进过程的影响。基于试验工况,采用弹塑性大变形的C-S模型,数值模拟了尼龙弹带的挤进形变过程,研究了尼龙弹带挤进动力学特性。研究结果表明:尼龙弹带在挤进过程中发生了弹塑性变形,弹带内部为压剪状态,弹带主要失效方式为剪切失效。动态射击条件下的弹丸在挤进过程中挤进阻力随挤进位移的增大先增大后减小;当弹底平均压力上升速率从 $2.92 \text{ MPa}\cdot\text{ms}^{-1}$ 增大到 $3.28 \text{ MPa}\cdot\text{ms}^{-1}$ 时,挤进时间缩短了4.36%,最大挤进阻力增大了5.12%;弹丸位移的计算值与测量值的平均误差为5.24%,该三维动态挤进模型可以较好地预测尼龙弹带的动态挤进过程。

**关键词:** 挤进动力学;动态射击;挤进过程;尼龙弹带;C-S模型

中图分类号: Tj5; Tj301

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022208

## 0 引言

火炮膛内射击主要分为点传火过程、挤进过程、弹丸膛内加速运动过程以及炮口后效期4个过程,从弹丸开始运动到弹带全部挤入身管这一过程被称作挤进过程<sup>[1]</sup>。挤进过程中弹带形变时间短且影响因素众多<sup>[2-4]</sup>,对于火炮的内弹道性能和火炮寿命有着较大的影响。试验研究是检验内弹道理论与数值模拟的基础。Andrews等<sup>[5]</sup>通过设计液压柱塞式模拟装置对155 mm火炮挤进过程进行了准静态试验研究,获得了弹丸挤进阻力与挤进位移的关系;曾思敏等<sup>[6]</sup>对于30 mm火炮弹丸挤进过程进行了动态射击试验测试研究,并用接触法和测压法2种方式同时测出了挤进结束时的燃烧室压力。Sun等<sup>[7-8]</sup>针对紫铜弹带的挤进过程进行了不同装药量的试验研究,获得了挤进过程的弹丸动力学参数及挤进阻力特性。上述文献的试

验结果均表明实际的弹丸动态挤进过程与经典内弹道的瞬时挤进假设不相同。Heikki等<sup>[9-10]</sup>基于射击试验与数值计算研究了弹带材料和几何形状对于火炮身管的应力影响。结果表明弹带材料是影响身管所受应力的一个重要因素。随着材料工艺的不断发展,尼龙弹带作为新式弹带被应用于火炮发射过程。尼龙弹带密封性能较好,价格低,易加工,且对身管的磨损较小,具有良好的应用前景<sup>[11]</sup>。所以针对尼龙弹带的挤进特性进行深入研究非常必要。

使用数值模拟来研究尼龙弹带挤进特性已成为一种重要的研究方法。史永高<sup>[12-13]</sup>建立和计算了尼龙弹带的弹丸运动微分方程,从而建立滑动式尼龙弹带的强度计算公式,然后对大口径制导炮弹进行试验,试验结果与之前的理论计算较为符合。Wu等<sup>[14-15]</sup>采用模拟动态试验研究了尼龙弹带在不同初始速度下的挤进阻力和弹带变形行为,研究结果表明温度和应变率对于挤进过程影响较大。Dong等<sup>[16]</sup>基于静态压力加载建立三维模型研究了尼龙弹带在不同膛压下的挤进过程。程申申等<sup>[17]</sup>通过ABAQUS软件耦合内弹道程序计算得到弹底的动态挤进压力,研究了不同结构下大口径线膛炮尼龙弹带的挤进过程。但上述文献使用的压力加载条件大多由内弹道程序或模拟动态试验得

收稿日期:2022-08-16;修回日期:2022-09-09

网络出版日期:2023-03-08

作者简介:杨明(1998-),男,博士研究生。主要从事弹丸挤进过程的研究。e-mail:ming\_yang1208@163.com

通信联系人:余永刚(1963-),男,教授,博士生导师。主要从事含能材料发射技术的研究。e-mail:yygnjust801@163.com

引用本文:杨明,余永刚.尼龙弹带动态挤进特性试验研究与数值分析[J].含能材料,2023,31(4):356-364.

YANG Ming, YU Yong-gang. Experimental Study and Numerical Analysis of Dynamic Engraving Characteristics of Nylon Belt[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(4):356-364.

到,关于尼龙弹带挤进试验研究尚未见报道。

本研究通过短管炮发射装置开展尼龙弹带动态挤进试验,对尼龙弹带在滑膛炮中的动态挤进特性进行研究,得到弹底压力、弹丸速度、弹丸动态挤进阻力与挤进位移、时间的关系。最后采用LS-DYNA软件进行仿真计算,研究了尼龙弹带挤进过程的形变损伤机理。研究结果可为后期弹带设计和弹道优化提供参考。

### 1 试验系统

为了开展尼龙弹带挤进过程的研究,设计了105 mm滑膛炮试验系统,其示意图如图1所示。它由短管炮发射装置、高速摄像机、压力数据采集设备和稳压电源等组成。并给出了尼龙弹带及坡膛的结构参数,其中尼龙弹带内径为95.9 mm,宽度为30.0 mm。坡膛总长为12.8 mm,坡膛角为11.3°。

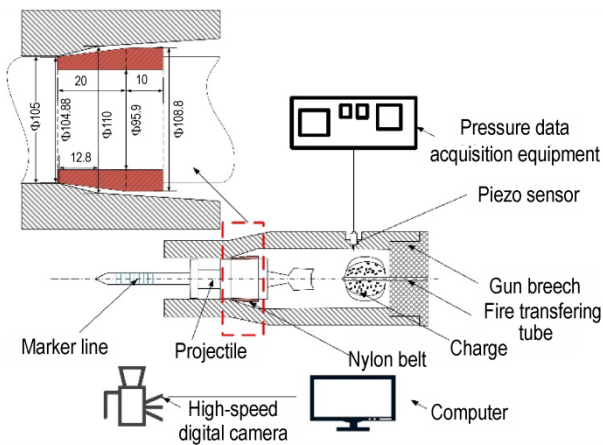


图1 试验系统示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of the test system (unit: mm)

#### 1.1 试验装置

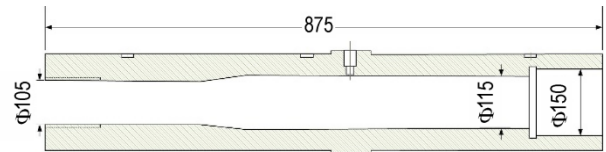
试验采用105 mm短管炮发射装置,设计的发射装置及试验弹如图2所示。其中图2a为短管炮发射装置,图2b为短管炮简化结构示意图。设计的短管炮为滑膛炮,口径为105 mm,坡膛起始部直径为110 mm。在离坡膛起始部82.82 mm处身管开了8条沟槽来泄压,当弹带完全通过此处后,弹后气体通过泄压孔泄压,弹底压力迅速下降。试验用弹如图2c所示,弹丸总重为6.25 kg,弹带材料型号为尼龙66,弹带宽度为30 mm。试验共有2种工况,工况一为8/1火药300 g和14/19火药400 g,工况二为8/1火药400 g和14/19火药300 g。

#### 1.2 试验测量方法

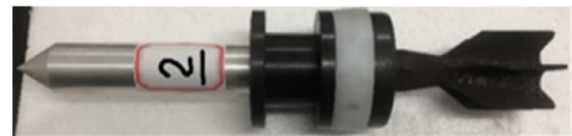
试验中初始卡膛力无法保持相同,也无法确定弹



a. short tube gun device



b. chamber structure



c. test projectile

图2 试验装置系统图(单位:mm)

Fig.2 Test device system (unit: mm)

丸的起始位置,故采用泄压标定的方式来获得挤进过程的弹丸动力学参数,再由弹丸挤进过程运动微分方程,计算得到挤进过程中弹丸动态挤进阻力  $F(t)$ 。

$$F(t) = Sp_d(t) - m\ddot{x}(t) \quad (1)$$

式中,  $S$ 为弹底面积,  $m^2$ ;  $p_d(t)$ 为弹底压力, Pa;  $m$ 为弹丸质量, kg;  $\ddot{x}(t)$ 为弹丸加速度,  $m \cdot s^{-2}$ 。

105 mm穿甲弹尼龙弹带挤进试验的测试系统主要分为2个部分:第一部分是基于压电式压力传感器的弹底压力测试;第二部分是基于高速摄像技术的弹丸运动参量测试。试验过程中,将数据储存在计算机中,等待试验结束后进行处理。

试验过程如下:准备固定好短管炮;安装压力传感器并调试好;将试验用弹装填到位;安装并调整高速摄像机与补光灯的位置以获得清晰图像;将测试装置开机预热进行装药的准备工作;装填发射药包、击发装置、关闭炮门;利用电击发装置点燃底火,通过同步触发器进行内弹道压力信号采集和弹丸运动图像拍摄,并记录存储下来。

尼龙弹带动态挤进试验的数据处理分为2个部分:第一部分是针对压电式压力传感器获得的内弹道压力信号,处理获得挤进时期弹后气体压力;第二部分是针对高速数字摄像机拍摄的图像数据,高速摄像机

的拍摄频率为 10000 fps, 像素为 384×256。经过处理后获得挤进时期弹丸运动位移时间关系。由身管结构知, 弹丸运动到身管沟槽区域时, 燃烧室大量气体通过泄压沟槽泄漏, 燃烧室压力开始下降, 同时根据高速摄像图片确定弹丸运动至此所需的时间, 从而确定挤进过程的弹丸运动数据和弹底压力数据, 最后计算得到弹丸挤进过程动力学特性。

## 2 结果与分析

### 2.1 弹丸位移与弹底压力

弹丸卡入膛到弹带完全进入身管的总位移为 30 mm, 这一段弹丸运动过程记为挤进过程。图 3 为不同时刻穿甲弹位移序列图, 图 3 中红线为起始弹丸所在的位置, 方框中的数据表示弹丸运动的位移。由图 3 可知, 弹丸运动了 2.0 ms 时, 弹丸位移较小, 仅为 0.7 mm; 弹丸运动了 10.0 ms 时, 弹丸位移为 11.7 mm; 当弹丸运动了 13.0 ms 时, 弹丸位移为 28.6 mm, 挤进未结束; 当弹丸运动了 13.1 ms 时, 弹丸位移为 31.7 mm, 弹带完全挤入身管。当弹丸运动了 14.3 ms 时, 弹丸位移为 105.4 mm, 弹丸已经运动到了泄压区域, 短管炮口出现火焰, 当弹丸运动了 14.4 ms 时, 炮口火焰明显。

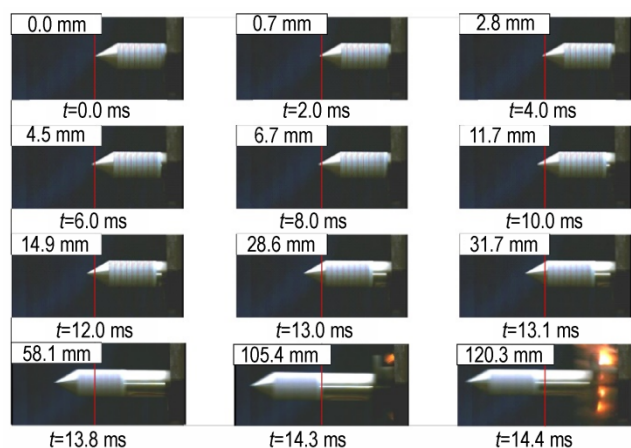


图 3 不同时刻穿甲弹前端位移序列图

Fig.3 Front-end displacement sequence diagram of armor piercing projectile at different time

基于高速摄影图像可以得到挤进过程弹丸位移  $l$  随时间  $t$  变化图, 如图 4 所示。由图 4 可知, 弹丸挤进总时间为 13.05 ms, 弹丸在弹后气体压力较小的时候, 弹丸缓慢运动, 直到运动到 13.5 mm 时, 弹丸运动速度降低。随着燃烧室压力逐渐升高, 弹丸开始加速运动, 直至弹带完全挤入身管, 挤进过程结束。

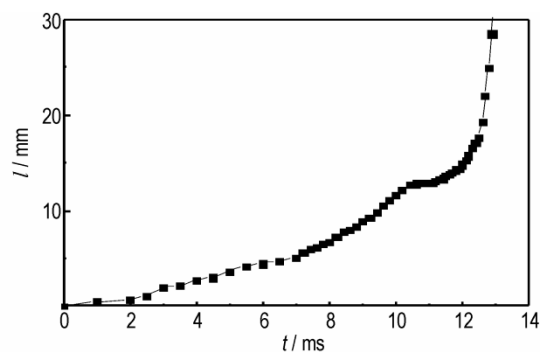


图 4 弹丸  $l-t$  曲线

Fig.4 The displacement-time curve of projectile

图 5 为燃烧室内压力传感器所得压力  $p_x$  随时间  $t$  的变化图像。为得到与弹丸挤进过程所匹配的动态挤进压力, 图 5 中取出足够范围的燃烧室压力曲线作 3 条辅助线, 其中: 实线为燃烧室压力最高值对应的时刻, 表示此时弹丸运动到泄压孔区域, 对应于图 3 的  $t=14.3$  ms 时刻; 从实线倒推 14.3 ms, 即弹丸启动时刻, 对应于图 5 中的虚线。依据弹丸挤进过程总时间为 13.05 ms (图 4), 由虚线前推 13.05 ms 得到点划线, 即弹丸挤进结束时刻。故图 5 中虚线与点划线之间的压力即为弹丸挤进过程燃烧室的动态压力。

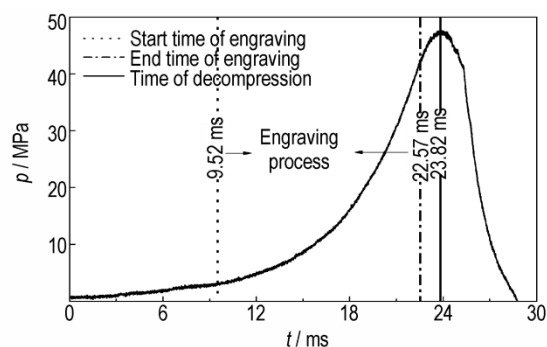


图 5 测压孔处  $p_x-t$  曲线

Fig.5 The pressure-time curve at the pressure hole

利用弹后空间压力分布关系式<sup>[1]</sup>计算得到弹底动态压力:

$$p_d = \frac{p_x}{\left[ 1 + \frac{\omega}{2\varphi_1 m} \left( 1 + \frac{x^2}{L^2} \right) \right]} \quad (2)$$

式中,  $p_x$  为在测压孔处的动态压力, Pa;  $p_d$  为弹底压力, Pa;  $\omega$  为装药质量, kg;  $m$  为弹丸质量, kg;  $\varphi_1$  为阻力系数;  $x$  为测压孔到膛底的距离, m;  $L$  为弹底到膛底的距离, m。

计算所得弹底动态压力如图 6 所示, 弹丸启动时弹底压力约为 2.0 MPa。随着弹底压力升高, 火药燃



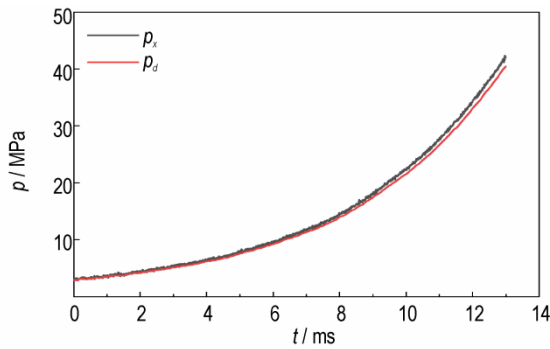


图6 挤进过程压力曲线

Fig.6 Pressure curve under engraving process

烧速度加快,燃烧室压力快速升高,直到弹丸挤进结束。

### 2.2 挤进过程中弹丸运动参量

对弹丸位移数据和弹底压力数据进行分析,得到弹底压力上升速率( $dp/dt$ )与弹丸位移( $l$ )的关系,结果如图7所示。由图7可以看出,当挤进位移在0~15.52 mm时,弹底压力上升速率随着挤进位移的增大而增大,当挤进位移在15.52~30 mm时,弹底压力上升速率略有下降,维持在 $7.86 \text{ MPa}\cdot\text{ms}^{-1}$ 左右。

对穿甲弹位移时间( $l-t$ )关系进行微分,得到穿甲弹尼龙弹带挤进速度 $v$ 、加速度 $a$ 随时间变化的曲线,结果如图8所示。由图8a可见,弹丸在开始挤进过程中速度会出现小幅的波动;由图8b可见,加速度会出现负值,这是因为开始时,弹带与膛壁接触面积较小,随着弹带不断地前进,接触面积增大,挤进阻力增加,而此时弹底压力较小,故加速度为负。

根据式(1)挤进过程弹丸运动方程,得到穿甲弹动态挤进阻力曲线 $F-t$ 、 $F-l$ 如图9所示。根据最大挤进阻力所对应的位移将图9b分成两段。当作用在弹底的作用力达到21.5 kN(弹底压力为2.0 MPa)时弹丸开始运动。在第一阶段中,随着膛压的升高和弹带的

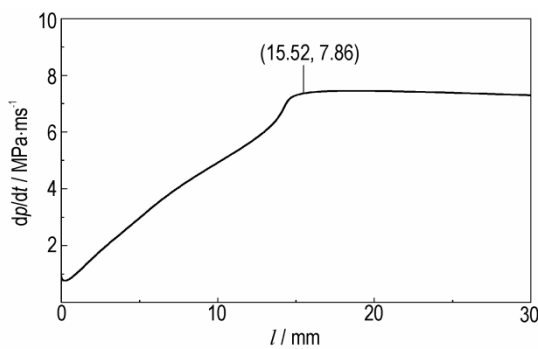
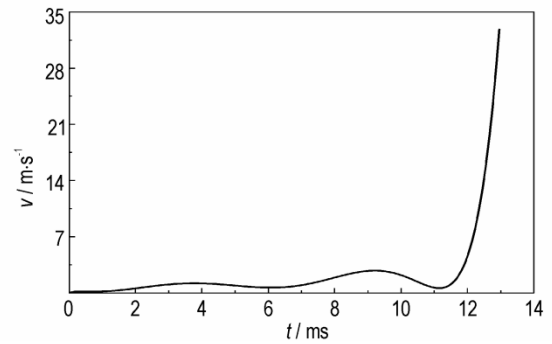
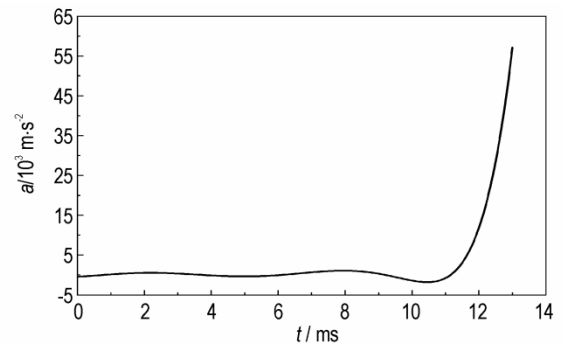


图7 穿甲弹压力上升速率与挤进位移曲线图

Fig.7 Pressure rise rate and engraving displacement curve of armor piercing projectile



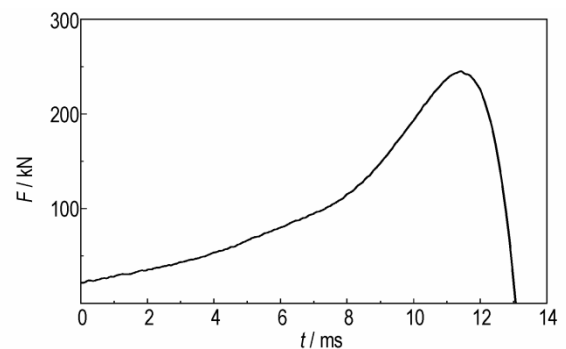
a.  $v-t$



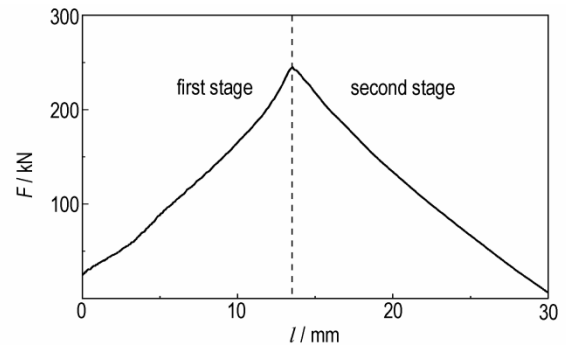
b.  $a-t$

图8 弹丸动力学特性

Fig.8 Dynamic characteristics of the projectile



a.  $F-t$



b.  $F-l$

图9 弹丸动态挤进阻力曲线

Fig.9 Dynamic engraving resistance curve of the projectile.

塑性变形,挤进阻力随挤进位移近似线性增大。直到11.4 ms时,阻力到达最大值,为254.1 kN,此时弹丸位移为13.5 mm。在第二阶段中,挤进阻力随挤进位移近似线性减小,直到弹带完全进入身管,挤进过程结束。此时弹丸的挤进阻力约为6.1 kN,弹底压力为41.0 MPa。

### 2.3 不同压力上升速率下的挤进过程

在总装药量700 g不变的条件下,通过改变发射药配比来控制压力上升速率。图10a为2种工况下测压孔所测的压力 $p_d$ -时间 $t$ 曲线,图10b为2种工况下的位移 $l$ -时间 $t$ 曲线。由图10可见,2种工况下弹底压力都是先升高后降低,弹丸均是先缓慢运动,后加速运动。挤进结束后工况一弹底压力为41.00 MPa,工况二弹底压力为43.14 MPa。工况一挤进时间为13.05 ms,工况二为12.48 ms。将挤进前后压力差( $\Delta p$ )除以挤进总时间( $\Delta t$ )作为弹丸挤进过程的弹底平均压力上升速率( $\overline{dp/dt}$ )。则工况一的弹底平均压力上升速率为 $2.92 \text{ MPa}\cdot\text{ms}^{-1}$ ,工况二的弹底平均压力上升速率为 $3.28 \text{ MPa}\cdot\text{ms}^{-1}$ ,工况二的弹底平均压力上升速率比工况一快12.33%。

通过将试验获得的内弹道数据经过标定处理得到不同升压速率下的挤进阻力 $F$ 与时间 $t$ 和位移 $l$ 关系,

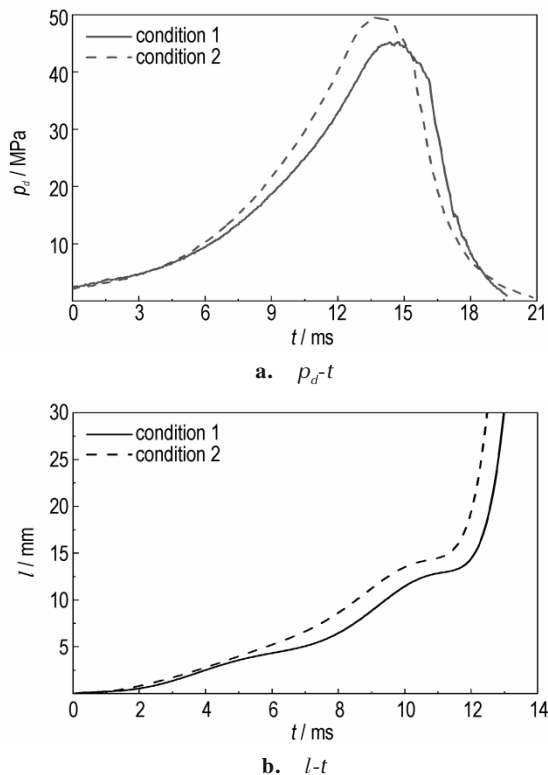


图10 不同工况下穿甲弹压力、位移对比图

Fig. 10 Comparison of pressure and displacement of armor-piercing projectile under different working conditions

如图11所示。图11a表明在弹丸运动0~5.0 ms时,工况一的挤进阻力高于工况二,在5.0~11.6 ms时,工况二的挤进阻力高于工况一。由于工况二的弹底压力上升速率高于工况一,且工况二弹丸运动越快,弹带发生变形越剧烈,弹丸挤进阻力上升越快,工况二的最大挤进阻力为267.1 kN,工况一最大挤进阻力为254.1 kN。由于工况二压力上升速率高于工况一,工况二塑性变形更多,工况二的最大挤进阻力高于工况一。工况一最大挤进阻力出现在13.5 mm,工况二出现在14.4 mm。而挤进结束后挤进阻力为动摩擦力,所以挤进结束后2种工况挤进阻力大致相同。挤进结束后工况一的弹丸速度 $32.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,工况二的弹丸速度为 $33.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。结果表明弹底升压速率越高,挤进结束后的弹丸速度越大。

依据图9b划分阶段的方法,结合图7、图8、图10、图11,我们可以发现:在挤进过程第一阶段弹丸运动速度较慢,弹丸挤进阻力和弹底压力上升速率均随挤进位移的增大而近似线性增大。弹底平均压力上升速率越大,最大挤进阻力越大,最大挤进阻力对应的位移也越大。第一阶段弹丸运动时间约占挤进总时间的88%。在挤进过程第二阶段,弹丸运动加快,弹丸挤进

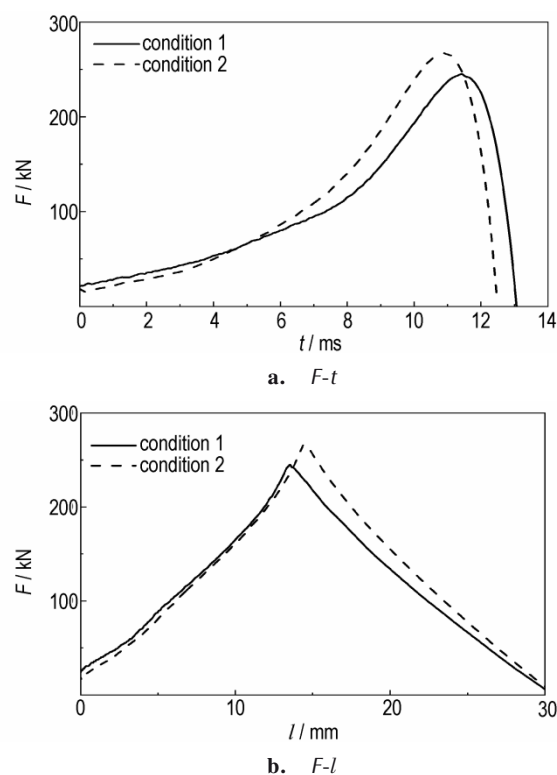


图11 不同工况下挤进阻力对比图

Fig. 11 Comparison of engraving resistance under different working conditions

阻力随挤进位移的增大而线性减小。弹底平均压力上升速率越大,弹丸挤进阻力下降速率越快,但挤进结束后的弹丸阻力近似相同。

### 3 挤进过程有限元模型的建立与验证

#### 3.1 基本假设

以试验中口径火炮挤进过程为研究对象,通过数值模拟进行对比分析,揭示弹带变形机理。弹带挤进身管时弹塑性变形很大,受力情况十分复杂,涉及到的影响因素很多,现对弹丸的挤进过程作如下假设:

(1)假定以装配完成时弹带和身管的相对位置作为挤进过程的开始位置,弹带的初始应力和初始变形设为零。

(2)对身管和弹体施加刚性体约束,仅考虑弹带材料的变形,忽略身管和弹体的变形。

(3)不考虑弹丸的动不平衡,假定炮弹质心与火炮身管的轴线共线。

(4)不考虑挤进过程中身管的后座运动,忽略弹丸前端空气阻力以及重力的影响。

(5)假定弹丸与身管没有热交换,挤进过程中弹带的变形是绝热过程。

#### 3.2 有限元模型

根据试验装置结构尺寸对短管炮系统建模,模型分为弹带、弹体和身管三部分。所有结构的单元选择八节点六面体实体单元。弹带是挤进变形的主体结构,采用细化网格;弹丸和身管假设为刚形体,采用粗网格。建立网格模型如图12所示,共353094个网格,其中弹带网格数量为321552。

身管材料均为炮钢,弹体材料为45钢,在数值计算中作为刚体不考虑其变形情况。弹体和身管弹性模量为207 MPa,密度为7800 kg·m<sup>-3</sup>。弹带材料为尼龙66,弹带模型采用与应变率相关的双线性随动塑性材料模型,可考虑失效。通过在0(仅随动硬化)和1(仅各向同性硬化)间调整硬化参数β来选择各向同性或随动硬化。应变率用Cowper-Symonds模型<sup>[16]</sup>来考虑,用与应变率有关的因素表示屈服应力σ<sub>y</sub>:

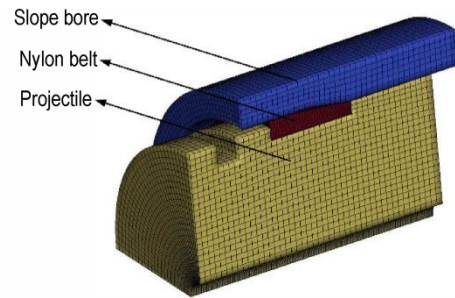


图12 1/4网格模型

Fig.12 1/4 model of grid

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (3)$$

式中,σ<sub>0</sub>为初始屈服应力,MPa;ε̇为应变率,s<sup>-1</sup>;C和P为Cowper-Symonds应变率参数,取值与试验过程中尼龙弹带的平均应变率有关;ε<sub>p</sub><sup>eff</sup>为有效塑性应变;E<sub>p</sub>为塑性硬化模量,MPa。E<sub>p</sub>由下式给出:

$$E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}} \quad (4)$$

式中,E<sub>tan</sub>为切线模量,MPa;E为杨氏模量,MPa。相关参数见表1。

本研究采用拉格朗日显式算法求解建立的有限元模型。为提高大变形计算的稳定性,采用单点积分法和沙漏控制运算进行求解。弹丸与弹带的接触定义为自动接触,弹带与坡膛的接触算法采用LS-DYNA中基于罚函数法的侵蚀接触算法;弹带与身管内壁之间采用库伦摩擦模型,摩擦系数见表1。

基于弹丸本体为刚体及不考虑弹丸动不平衡的假设,模型计算中将试验弹底压力与弹底面积乘积得到的合力作为数值计算的轴向主动载荷。数值计算构建了1/4模型,需同时设置弹带两端的对称边界条件作为约束,而身管边界条件为全约束。

在挤进过程数值计算的弹带材料模型中,选择最大塑性失效应变为0.65,当单元的应变大于0.65时,该单元会自动删除。

#### 3.3 模型验证

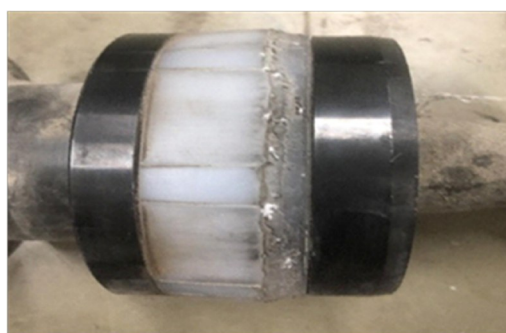
图13为挤进后穿甲弹尼龙弹带形态数值计算和试验结果的对比图。由图13可以发现,数值计算结果

表1 尼龙弹带材料参数

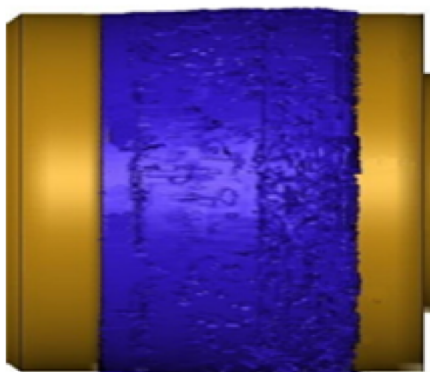
Table 1 Material parameters of nylon belt

parameters	E / MPa	ρ / kg·m <sup>-3</sup>	E <sub>tan</sub> / MPa	C	P	u	ν	σ <sub>0</sub> / MPa
values	3300	1140	1275	1285.3	0.574	0.10	0.4096	60

Note: E is young's modulus. ρ is density of nylon belt. E<sub>tan</sub> is tangent modulus. C and P are strain rate parameters. u is friction coefficient. ν is poisson's ratio. σ<sub>0</sub> is initial yield stress.



a. test result



b. numerical calculation result

图13 穿甲弹尼龙弹带挤进后形态对比图

Fig.13 Morphological comparison of nylon belt after engraving  
与试验结果的弹带形态变化吻合较好,弹带被挤压,弹带中部均出现明显凸起,试验中弹丸通过泄压孔产生刻槽。

图14为仿真计算与试验测试位移 $l$ -时间 $t$ 的对比图,二者趋势较为吻合。仿真计算忽略了卡膛力的影响,导致前期弹丸位移大于实测值。通过对仿真计算得到的 $l$ - $t$ 试验数据进行比较,试验中尼龙弹带完全挤入身管耗时12.48 ms,仿真计算得到的挤进过程耗时13.01 ms,误差仅为4.25%。数值计算得到的动态挤进位移与试验结果的平均误差为5.24%。由此可见,

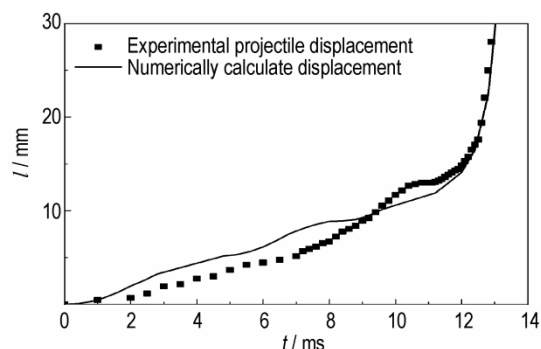


图14 试验测试与数值计算位移时间曲线对比图

Fig.14 Comparison of displacement time curves between test and numerical calculation

研究所建立的数值计算模型可信,计算结果较符合试验测试结果。

#### 4 滑膛炮尼龙弹带动态挤进结果分析

滑膛炮中尼龙弹带受到膛膛挤压形变,由于整体结构具有轴对称性,图15展示了动态挤进过程中不同时刻的弹带轴向截面应力云图。由图15可见,在挤进过程前期,弹带向上和向后空隙处发生弹性变形,使得弹带与膛膛接触面积增大。随着弹底压力的增大,弹丸不断向前运动,应力也不断增大,相应的挤进阻力逐渐增大。在挤进过程后期,虽然弹带截面应力增大,但是弹带前部在进入身管后的挤进阻力大幅减小。弹带后部被膛膛和弹丸挤压,部分弹带被膛膛挤压脱离,弹带与膛膛接触面积减小,相应的挤进阻力也减小。挤进结束时,弹带与身管紧密贴合,挤进阻力主要表现为弹带与身管之间的摩擦力。在弹丸动态挤进过程中,弹带被膛膛挤压摩擦,受到的阻力作用在弹带表面。而弹体对弹带的推力主要作用在弹带后部与弹体接触面上,且尼龙弹带具有弹性,从而出现弹带中部凸起的现象。

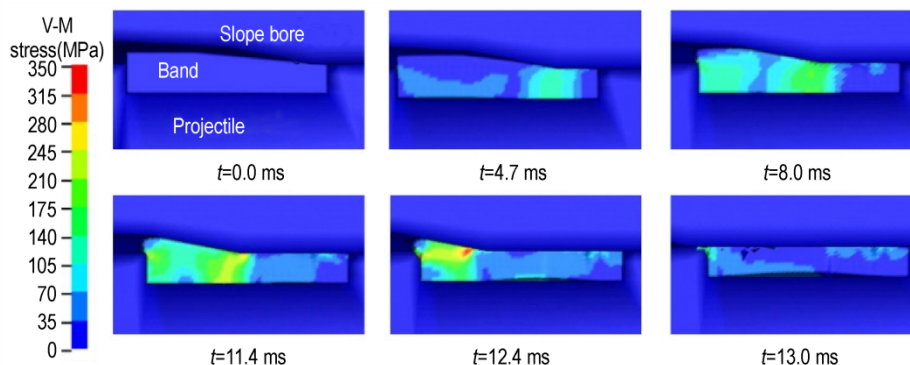


图15 弹带轴向截面应力图

Fig.15 Cross-sectional stress diagram of nylon belt



为研究挤进过程尼龙弹带的弹塑性变形机理,通过研究弹带不同轴向位置的应力应变状态来分析弹带材料的形变特性。图 16 为 12.4 ms 时刻弹带不同轴向位置处径向截面的应力三轴度和 Lode 参数云图,图 16 中  $d$  表示与弹带前沿的距离。图 16a 所在位置为弹带前部,在 12.4 ms 时,此处弹带已完全挤入身管。其应力三轴度均小于零,而 Lode 参数均为负值,表示此处弹带处于压剪状态。图 16b 为身管与坡膛交界处的弹带径向截面,其应力三轴度在弹带内部均为负值,在弹带外部边界处为正值。表示此处弹带内部处于受压剪切状态,而弹带外表面受坡膛挤压向后拉伸变形。图 16c 为最大应力处弹带径向截面,很显然大于身管内径的弹带部分受坡膛挤压处于拉伸状态。而此处 Lode 参数均小于零或等于零,表明该区域发生断裂失效模式主要是以剪切失效为主。

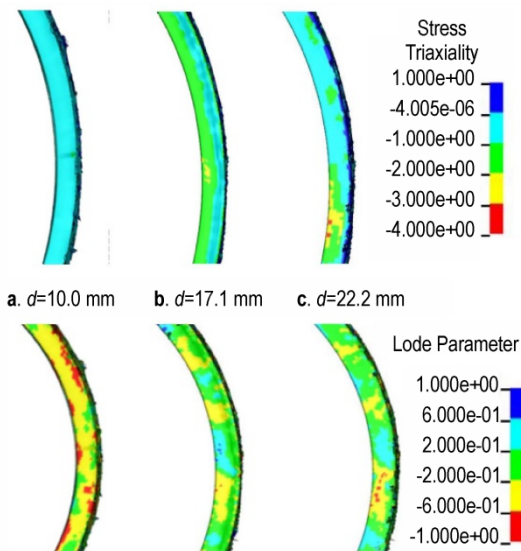


图 16 不同轴向位置的弹带径向截面应力三轴度和 Lode 参数云图

Fig.16 The radial section stress triaxiality and Lode parameter nehogram at different axial positions

根据弹丸运动方程进行数值仿真计算得到弹丸动态挤进阻力,并将其与试验结果进行对比。如图 17 的对比结果所示,二者趋势相同,均为先增大后减小,最大挤进阻力出现在弹丸部分挤进的时刻而不是完全挤进的时刻。由于数值计算中忽略了卡膛力的影响,导致弹丸前期运动快于试验测试,从而使得弹丸前期计算的挤进阻力小于试验结果。数值计算中弹丸最大挤进阻力为 290.3 kN,最大挤进阻力对应的时间为 11.5 ms,与试验结果的误差分别为 8.69%,0.88%。

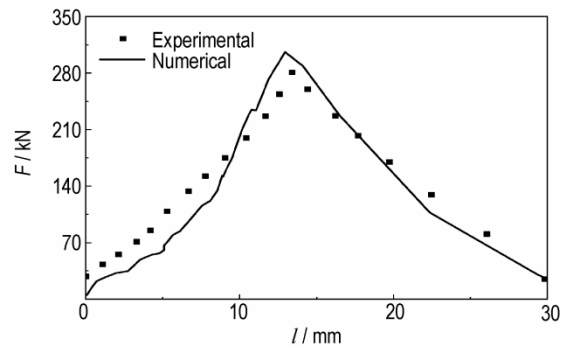


图 17 试验测试与数值计算挤进阻力对比图

Fig.17 Comparison of tested and simulated engraving resistance

### 5 结论

(1) 尼龙弹带在挤进过程中发生弹塑性变形,弹带向后和向上塑性变形。弹带内部主要为压剪状态,弹带断裂失效主要形式为拉伸剪切失效。该结构下的穿甲弹动态挤进阻力随挤进位移的增大先近似线性增大,后线性减小。最大挤进阻力出现在弹带部分挤进坡膛时刻,而不是弹带完全挤进时刻。

(2) 当弹底平均压力上升速率从  $2.92 \text{ MPa}\cdot\text{ms}^{-1}$  增大到  $3.28 \text{ MPa}\cdot\text{ms}^{-1}$  时,挤进时间缩短了 4.36%,最大挤进阻力增大了 5.12%,最大挤进压力对应的挤进位移增大了 0.93 mm。挤进结束后弹底气体压力增大了 5.22%,弹丸速度增大了 2.43%。

(3) 基于双线性随动塑性材料模型构建了穿甲弹尼龙弹带三维挤进模型,对挤进过程进行了数值模拟研究,数值模拟结果与试验结果较为吻合。后续将对不同装药条件下尼龙弹带挤进特性进行仿真研究。

#### 参考文献:

[1] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004, 58-64.  
JIN Zhi-ming. Interior ballistics of guns[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004, 58-64.

[2] 李森, 钱林方, 陈龙森. 弹带挤进过程内弹道特性研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(23):74-79.  
LI Miao, QIAN Lin-fang, CHEN Long-miao. Research on interior ballistic characteristics of band squeezing in[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(23):74-79.

[3] 孙河洋, 马吉胜, 李伟, 等. 坡膛结构变化对弹带挤进过程影响的研究[J]. 振动与冲击, 2011, 3:30-33.  
SUN He-yang, MA Ji-sheng, Li Wei, et al. Study on the influence of slope chamber structure change on belt extrusion process[J]. *Journal of Vibration and Impact*, 2011, 3: 30-33

[4] 杭宇, 商飞, 孔德仁. 串联发射弹丸挤进过程数值仿真与分析[J]. 含能材料, 2018, 26(2):123-129.  
HANG Yu, SHANG Fei, KONG De-ren. Numerical simulation and analysis of tandem projectile engraving process [J].



- Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(2):123-129.
- [5] ANDREWS T D. Projectile driving band interactions with gun barrels[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2006, 128(2):273-278.
- [6] 金志明, 曾思敏. 弹丸挤进过程的计算与研究[J]. 兵工学报, 1991, 12(1):7-13.  
JING Zhi-ming, ZENG Si-min. A study on the calculation of the engraving process on projectiles [J]. *Acta Armamentarii*, 1991, 12(1):7-13.
- [7] SUN Q Z, YANG G L, GE J L. Modeling and simulation on engraving process of projectile rotating band under different charge cases[J]. *Journal of Vibration & Control*, 2017, 23(6): 1044-1054.
- [8] 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.  
SUN Quan-zhao, YANG Guo-lai, WANG Peng, et al. Numerical research on rotating band engraving process of a large-caliber howitzer [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(2): 206-213.
- [9] KEINNEN H, MOILANEN S, TERVOKOSKI J, et al. Influence of rotating band construction on gun tube loading—part i: Numerical approach [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2012, 134(4): 041006.
- [10] KEINNEN H, MOILANEN S, TERVOKOSKI J, et al. Influence of rotating band construction on gun tube loading—part ii: Measurement and analysis [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2012, 134(4): 041007.
- [11] 王树伦, 章玉斋. 塑料弹带和塑料弹托的应用进展[J]. 工程塑料应用, 2008, 36(12):75-78.  
WANG Shu-lun, ZHANG Yu-zhai. Advance in application of plastic belt and plastic sabot [J]. *Engineering Plastics Application*, 2008, 36(12):75-78.
- [12] 史永高, 惠东. 滑动式塑料弹带的强度计算 [J]. 兵工学报, 1987, 2: 46-55.  
SHI Yong-gao, HUI Dong. Strength calculation of sliding plastic elastic belt [J]. *Acta Armamentarii*, 1987, 2: 46-55.
- [13] 史永高, 韩静, 胡桂梅. 滑动式塑料弹带的强度研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2003(S5): 166-167.  
SHI Yong-gao, HAN Jing, HU Gui-mei. Strength calculation of sliding plastic elastic belt [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2003(S5): 166-167.
- [14] WU B, ZHENG J, TIAN Q T, et al. Tribology of rotating band and gun barrel during engraving process under quasi-static and dynamic loading [J]. *Friction*, 2014, 2(4):330-342.
- [15] WU B, ZHENG J, QIU J, et al. Preparation of the projectile rotating band and its performance evaluation [J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2016, 30: 1-22.
- [16] DONG Y, SUN J, GONG L, et al. Numerical analysis of nylon projectile engraving into rifle [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 688(3): 033056 5pp.
- [17] 程申申, 陶如意, 王浩, 等. 弹丸不同结构尼龙弹带挤进过程的阻力特性 [J]. 兵工学报, 2021, 42(9):1847-1857.  
CHENG Shen-shen, TAO Ru-yi, WANG Hao, et al. Dynamic coupling simulation on engraving process of nylon sealing band of artillery [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(9): 1847-1857.
- [18] 蔡玄龙, 沈超明, 卢卫彬. 钢/尼龙夹层板动态压缩力学性能研究 [J]. 中国测试, 2016, 42(10):143-148.  
CAI Xuan-long, SHEN Chao-ming, LU Wei-bin. Study on dynamic compressive mechanical properties of steel/nylon sandwich panels [J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(10): 143-148.

## Experimental Study and Numerical Analysis of Dynamic Engraving Characteristics of Nylon Belt

YANG Ming, YU Yong-gang

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The launching device of 105 mm short tube gun was designed to carry out the armor piercing projectile test under dynamic shooting condition. Transient pressure measurement system and high-speed camera were used in the experiment to obtain the chamber pressure and projectile motion parameters during the engraving process. The engraving resistance characteristic curves of projectile were calculated by projectile dynamics equation. Besides, the influence of different pressure rise rate on the process of projectile engraving was analyzed under two conditions. Based on the test conditions, the engraving deformation process of nylon belt of armor piercing projectile was numerically simulated by using the C-S model with elastic-plastic large deformation of belt material. The experimental data indicated that the engraving resistance increases first and then decreases with the engraving displacement in the engraving process. Therefore, when the engraving resistance reaches the maximum, only part of the nylon belt was completely squeezed. The elasticity of the nylon elastic band increases the contact area with the groove. When the average pressure rise rate of projectile bottom increases from 2.92 MPa·ms<sup>-1</sup> to 3.28 MPa·ms<sup>-1</sup>, the engraving time shortens by 4.36% and the maximum engraving resistance increases by 5.12%. The nylon belt cross deformation stress cloud diagram was obtained by the numerical calculation to show that the elastic-plastic deformation of the nylon belt occurred. The interior of the elastic belt is mainly in the state of compression shearing and the main failure form of the elastic belt is tensile shearing failure. The displacement curves obtained by simulation and experiment have the same trend and the error is 5.24%.

**Key words:** engraving dynamics; dynamic shooting; engraving process; nylon belt; C-S model

**CLC number:** TJ5; TJ301

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022208

(责编: 王馨逸)