

doi: 10.7690/bgzd.2021.03.021

某高速自动机不同工作模式条件下断裂底火运动轨迹分析

翟剑峰¹, 戴劲松¹, 王茂森¹, 陈兴利², 罗定³

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094;

2. 国营第 152 厂, 重庆 400071; 3. 国营第 497 厂, 重庆 400071)

摘要: 针对高速自动机抛壳过程中断裂底火与弹壳分离造成火炮停射的现象, 对断裂底火运动轨迹进行分析。根据实际火炮抽壳过程工作原理, 利用虚拟样机技术, 对抛壳过程动力学方程进行分析, 构建抛壳机构模型, 计算接触发生时刻的各参数指标, 并通过虚拟样机对抛壳过程进行仿真。仿真结果表明: 炮闩速度大于 17.6 m/s 时, 断裂底火与箱体、下抱弹钩、挡板撞击过程发生分离将造成底火入膛导致火炮停射。

关键词: 抛壳过程; 断裂底火; 虚拟样机; 运动轨迹

中图分类号: TJ392 **文献标志码:** A

Trajectory Analysis of Broken Primer Under Different Working Modes of Certain Type High-speed Automatic Gun

Zhai Jianfeng¹, Dai Jinsong¹, Wang Maosen¹, Chen Xingli², Luo Ding³

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

2. No. 152 Factory, Chongqing 400071, China; 3. No. 497 Factory, Chongqing 400071, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon that the gun stop firing by the separation of the broken primer and the cartridge casing during the cartridge ejection process of high-speed automatic gun, the trajectory of broken primer is analyzed. Through the working principle of actual gun cartridge ejection process and the application of virtual prototype technology, the dynamic equation of cartridge ejection process is analyzed, the cartridge ejecting mechanism is established, the parameters indexes of contact time were calculated and the cartridge ejection process was simulated by virtual prototype. The results show that the separation of the broken primer and the receiver, the hook, the flap may cause the gun to stop shooting when the breechblock velocity is greater than 17.6 m/s.

Keywords: cartridge ejection process; broken primer; virtual prototype; trajectory

0 引言

自动武器抽壳过程是自动武器工作循环的一个重要环节, 若发生故障, 则会导致自动武器停止工作甚至产生危险^[1]。抽壳过程的研究大多集中在抽壳力方面, 如卫丰等^[2]、康艳祥等^[3]、谭波等^[4]等对抽壳过程进行仿真分析研究, 得到抽壳过程中的抽壳力变化以及分析各种因素对抽壳过程的影响。

对于抛壳故障分析, 国内学者也有一定研究: 傅振明等^[5]针对某型 25 mm 自动炮存在闩体阻挡抛壳的现象, 找出原因并分析可能引起的故障, 并对该炮结构提出了改进意见; 陈红磊等^[6]对卡壳现象提出了一种测试判断方法, 通过比较卡壳力和抽壳力的大小关系判断是药筒问题还是火炮问题; 石明全^[7]为解决自行火炮药筒抛出时能量过大, 易发生危险的问题, 对该炮后坐部分进行动力学仿真计算, 得到了不同情况下该机构运动规律, 通过结果比较

选择最优方案, 为该结构优化设计提供了理论依据。

通过虚拟样机技术仿真分析结构的动态特性, 具有成本低、结果准确等优点。王扬等^[8]建立某火炮预抽壳完成后抛壳机构的动力学虚拟样机模型, 通过仿真研究了不同射频和射角对抛壳轨迹线的影响。张子丘等^[9]基于虚拟样机技术对抛壳过程进行动力学仿真, 通过弹底壳速度、运动轨迹的仿真实验与实际结果对比, 研究了扭簧刚度系数变化对抛壳过程的影响。

笔者以某高速自动机为研究对象, 利用虚拟样机技术, 通过仿真分析抽壳过程中断裂底火轨迹及其对火炮射击过程的影响。

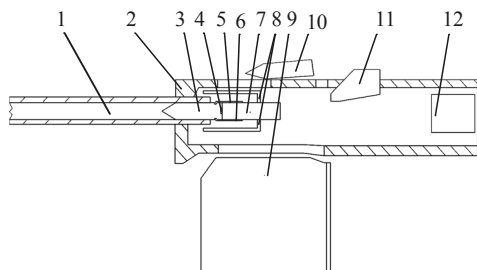
1 模型建立

1.1 工作原理分析

根据实际火炮抽壳过程工作原理, 建立如图 1 所示的抛壳机构原理图。

收稿日期: 2020-10-30; 修回日期: 2020-12-12

作者简介: 翟剑峰(1995—), 男, 湖北人, 硕士, 从事机械工程研究。E-mail: 695656864@qq.com。



1. 身管; 2. 炮箱; 3. 弹壳; 4. 断裂底火; 5. 上抱弹钩; 6. 下抱弹钩; 7. 活塞; 8. 炮闩; 9. 挡板; 10. 下一发弹丸; 11. 抛壳顶; 12. 缓冲器。

图1 工作原理

抽壳过程中：弹壳和断裂底火未发生分离，随弹壳一起运动，当弹壳发生撞击后，则产生分离；上、下抱弹钩通过旋转约束固定在炮闩上，在抽壳过程中带动弹壳一起后坐运动，将弹壳抽出，且能推动下一发弹丸入膛；运动过程中活塞受到导气室的气体作用，带动炮闩后坐；弹壳在抛出过程中会撞击挡板，限制弹壳抛出的落点范围；当炮闩复进的时候，受到上、下抱弹钩的作用入膛；抛壳顶固定在炮箱上，当弹壳撞击抛壳顶时，弹壳脱离抱弹钩；闩体后坐时与缓冲器接触，通过缓冲器后的缓冲簧后坐到位，达到最大后坐位移。

在建立抛壳机构模型时，作出假设如下：

- 1) 活塞和炮闩固定约束连接，相互之间碰撞忽略不计；
- 2) 运动副间隙和系统振动忽略不计；
- 3) 身管和炮箱固定约束连接，相互之间碰撞忽略不计。

工作原理：自动机通过导气室内气体作用推动活塞运动，活塞带动炮闩沿轴向后坐，上下抱弹钩带动弹壳同时后坐运动，当弹壳撞击到抛壳顶时，弹壳脱离抱弹钩，活塞继续后坐，当炮闩到达最大后坐位移时，复进簧推动活塞带动炮闩复进。在后坐-复进过程中，弹壳会发生多次碰撞，断裂底火则在撞击过程中与弹壳可能发生分离。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\varphi - \sin\psi \cos\theta \sin\varphi & -\cos\psi \sin\varphi - \sin\psi \cos\theta \cos\varphi & \sin\psi \sin\theta \\ \sin\psi \cos\varphi + \cos\psi \cos\theta \sin\varphi & -\sin\psi \sin\varphi + \cos\psi \cos\theta \cos\varphi & -\cos\psi \sin\theta \\ \sin\theta \sin\varphi & \sin\theta \cos\varphi & \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

假设有一欧拉转轴坐标系具有以3个单位矢量代表欧拉角的3个转轴，则可得刚体质心坐标系在该坐标系下的矩阵表达式为：

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sin\theta \sin\varphi & 0 & \cos\theta \\ \sin\theta \cos\varphi & 0 & -\sin\theta \\ \sin\theta \sin\varphi & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

1.2 虚拟样机模型建立

根据各零部件外形尺寸、质量、转动惯量和弹簧刚度阻尼系数等参数，建立如图2所示的虚拟样机模型。



图2 虚拟样机模型

根据工作原理，建立虚拟样机各部件约束如表1所示。

表1 各构件约束关系对照

序号	构件1	构件2	约束副
1	炮箱	大地	固定
2	挡板	大地	固定
3	断裂底火	弹壳	固定
4	上抱弹钩	炮闩	旋转
5	下抱弹钩	炮闩	旋转
6	炮闩	大地	移动
7	抛壳顶	大地	移动
8	缓冲器	大地	移动

其中断裂底火相对弹壳的固定约束通过脚本仿真 ACTIVATE\DEACTIVATE 命令使得固定约束在撞击后失效。

根据工作原理添加各构件之间的碰撞，各构件材料则根据工厂实际条件设置为特种钢。初始条件设置炮闩初始速度。

2 抛壳机构计算模型

2.1 动力学方程

笔者所用的虚拟样机模型中，将刚体的质心笛卡尔坐标和反映刚体方位的欧拉角作为广义坐标^[10]。若一个刚体在笛卡尔广义坐标系中，则令 $R=[x,y,z]^T, \gamma=[\psi,\theta,\varphi]^T, q=[R^T, \gamma^T]^T$ 对其位置和方位进行描述。经过数学计算可得机构质心的参考坐标系和底面坐标系之间的坐标转换矩阵为：

在欧拉角转轴坐标系中，用变量 ω 表示构件的角速度，用变量 ω_s 表示构件的角速度在欧拉转轴坐标系的分量，表达式为

$$\omega = B\omega_s = B\dot{\gamma}. \quad (3)$$

文中虚拟样机模型的动力学方程采用多刚体系统动力学理论中的拉格朗日方程方法建立。在考虑

约束情况下, 该虚拟样机机会利用带拉格朗日乘子的拉格朗日第一类方程的能量形式得到方程如下:

$$\dot{P}_j - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j - C_j \quad (4)$$

式中: $C_j = \sum_{i=1}^n \lambda_i \partial X / \partial q_j$, $P_j = \partial T / \partial \dot{q}_j$; T 为系统广义坐标系下动能; q_j 为广义坐标; Q_j 为在广义坐标 q_j 方向的广义力; C_j 为在广义坐标 q_j 方向的约束反力; P 为广义动量。

系统在广义坐标下的动能计算公式为:

$$T = 1/2 \dot{R}^T \mathbf{M} \dot{R} + 1/2 \dot{\gamma}^T \mathbf{B}^T \mathbf{J} \mathbf{B} \dot{\gamma} \quad (5)$$

其中: \mathbf{M} 为构件的质量矩阵; \mathbf{J} 为构件的惯量矩阵。

式(4)在移动方向和转动方向表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{P}_R - \partial T / \partial q_R &= d/dt(\partial T / \partial \dot{q}_R) - 0 = \\ d/dt(\mathbf{M} \dot{R}) &= \mathbf{M} \dot{V} = Q_R - C_R \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{P}_\gamma - \partial T / \partial q_\gamma = Q_\gamma - C_\gamma \quad (7)$$

式(7)中, $P_\gamma = \mathbf{B}^T \mathbf{J} \mathbf{B} \dot{\gamma}$, 将 P_γ 作为变量求解。

由上述理论可知, 在虚拟样机模型中每个构件都能用变量和方程描述。

变量表达式为:

$$\left. \begin{aligned} R &= [x, y, z]^T \\ \gamma &= [\psi, \theta, \varphi]^T \\ P &= [P_\psi, P_\theta, P_\varphi]^T \\ \omega &= [\omega_\psi, \omega_\theta, \omega_\varphi]^T \\ V &= [V_x, V_y, V_z]^T \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

方程表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M} \dot{V} &= Q_R - C_R \\ V &= \dot{R} \\ \dot{P}_\gamma - \partial T / \partial q_\gamma &= Q_\gamma - C_\gamma \\ P_\gamma &= \mathbf{B}^T \mathbf{J} \mathbf{B} \dot{\gamma} \\ \omega_s &= \dot{\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

集成约束方程虚拟样机建立动力学方程式为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{P} - \partial T / \partial q + \mu_q^T \lambda + \mathbf{H}^T F &= 0 \\ P &= \partial T / \partial \dot{q} \\ \mu(q, t) &= 0 \\ F &= f(\dot{q}, q, t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $\mu(q, t)$ 是系统约束方程; μ_q 是系统约束方程的雅可比矩阵; \mathbf{H} 是一个外力坐标矩阵。

2.2 接触碰撞算法

虚拟样机简化模型各部件两两添加接触碰撞,

这种接触摩擦现象十分复杂, 接触碰撞力只有在物体相互接触时才存在; 因此, 要计算出接触发生时刻的法向接触碰撞力, 各参数指标按实际实验情况设定。

法向力采用 Impact 冲击函数法, 材料刚度由下式计算:

$$K = 4 / (3\pi(h_1 + h_2)) \sqrt{\bar{R}} \quad (11)$$

式中: $\bar{R} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$; $h_1 = (1 - \zeta_1^2) / \pi E_1$; $h_2 = (1 - \zeta_2^2) / \pi E_2$; R_1, R_2 为接触区域两物体的曲率半径; ζ_1, ζ_2 为两接触物体泊松比; E_1, E_2 为两接触物体杨氏模量。

笔者采用的 Lankarani—Nkravesh 接触力模型不仅考虑了碰撞过程中的能量损失, 而且考虑了材料属性、接触区域的局部变形等因素。该接触力模型公式为:

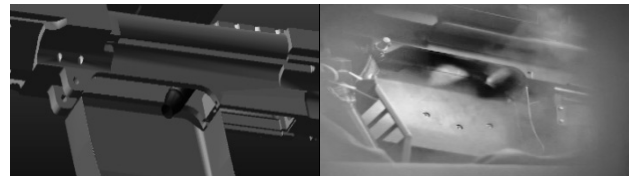
$$F_n = f(x) = \begin{cases} K \lambda^n + D \dot{\lambda}, & \lambda \geq 0 \\ 0, & \lambda \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: F_n 为接触力; $K \lambda^n$ 为弹力项; $D \dot{\lambda}$ 为能量耗散项; K 为材料刚度, 是由式(11)计算所得; λ 为径向或轴向上计算的法向穿透深度; $\dot{\lambda}$ 为接触点的法向相对速度; D 为阻尼系数; 指数 n 设为 1.5。

3 仿真结果及分析

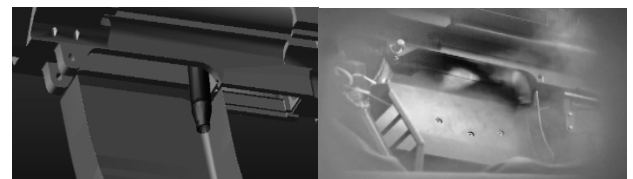
3.1 实验验证

分析抛壳过程中的力学响应, 仿真炮闩以 18.4~11.7 m/s 的后座速度情况下, 断裂底火的运动轨迹及对该高速自动机射击过程的影响。根据抛壳过程可知: 弹壳产生了多次撞击, 弹壳分别可能与抛壳顶发生撞击、与炮箱发生撞击、与下抱弹钩发生撞击以及与挡板发生撞击, 断裂底火在撞击过程中与弹壳分离。仿真典型过程与对应实验轨迹如图 3、图 4 所示。



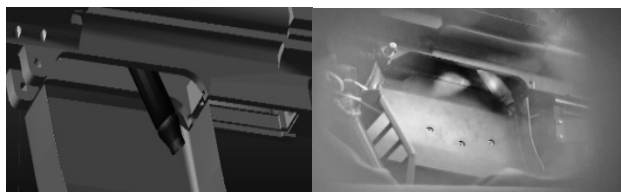
(a) $t=0.06$ s 时仿真图

(b) $t=0.06$ s 时实验图



(c) $t=0.075$ s 时仿真图

(d) $t=0.075$ s 时实验图



(e) $t=0.085$ s 时仿真图 (f) $t=0.085$ s 时实验图



(g) $t=0.095$ s 时仿真图 (h) $t=0.095$ s 时实验图



(i) $t=0.012$ s 时仿真图 (j) $t=0.012$ s 时实验图

图 3 实验仿真对比

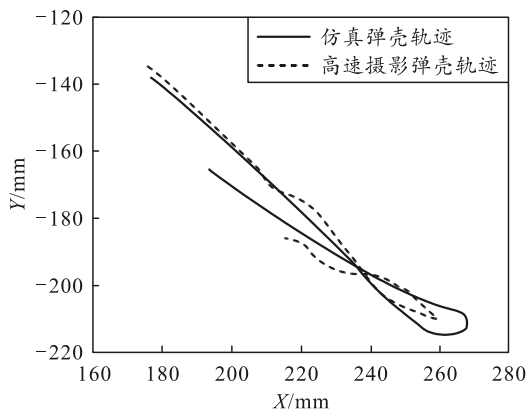


图 4 实验仿真弹壳某点轨迹对比

从图 3 可知，仿真弹壳轨迹与实验高速摄影所得轨迹基本吻合。从图 4 可知，仿真所得弹壳某点的轨迹与高速摄影相同点上的轨迹误差在允许范围内。从验证结果可以看出，建立的虚拟样机模型具有良好的精确度和可信度。

通过仿真测得：当时间大于 0.14 s、断裂底火中心 y 轴坐标小于 -56.51 mm 时，则断裂底火抛出；断裂底火中心 y 轴坐标小于 -30 mm 时，则断裂底火未入膛。

3.2 弹壳与抛壳顶撞击断裂底火分离仿真结果分析

分析弹壳在撞击过程中，断裂底火分离之后的轨迹情况。

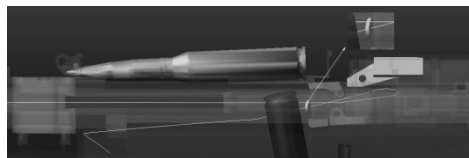
弹壳和抛壳顶发生撞击后，断裂底火与弹壳发生分离。仿真结果如图 5—7 所示。



图 5 断裂底火中心轨迹



(a) $t=0.055$ s 时断裂底火运动轨迹



(b) $t=0.09$ s 时断裂底火运动轨迹



(c) $t=0.17$ s 时断裂底火运动轨迹

图 6 断裂底火运动姿态局部放大图

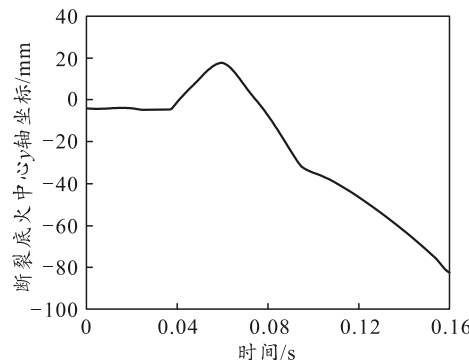


图 7 断裂底火中心 y 轴坐标变化

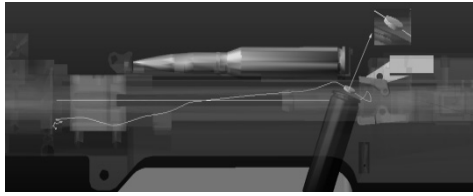
从图 5—7 中可以看出：弹壳撞击抛壳顶后发生偏转，而断裂底火则在此过程中与弹壳发生分离，断裂底火会在惯性作用下先向上运动，然后在重力和上抱弹钩的作用下向下运动，断裂底火顺利抛出。

3.3 弹壳与箱体撞击断裂底火分离仿真结果分析

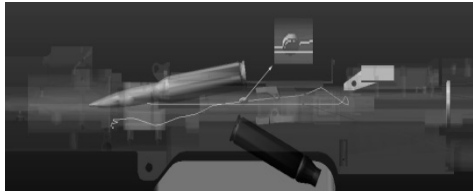
弹壳和箱体发生撞击后，断裂底火与弹壳发生分离。仿真结果如图 8—10 所示。



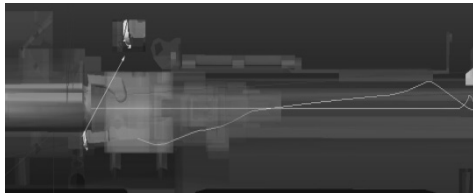
图 8 断裂底火中心轨迹



(a) $t=0.075$ s 时断裂底火运动轨迹



(b) $t=0.11$ s 时断裂底火运动轨迹



(c) $t=0.155$ s 时断裂底火运动轨迹

图 9 断裂底火运动姿态局部放大图

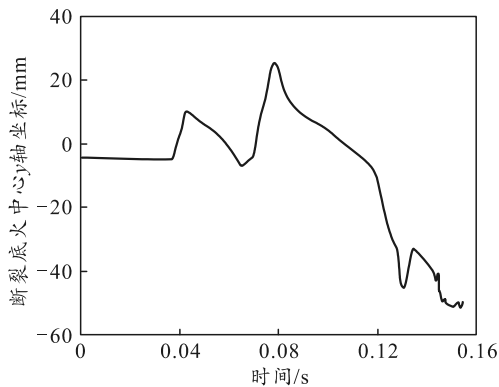


图 10 断裂底火中心 y 轴坐标变化

从图 8—10 可以看出：断裂底火在弹壳撞击抛壳顶后随弹壳发生偏转，先向上运动，然后在重力的作用下向下运动。当弹壳撞击箱体后，断裂底火与弹壳先发生分离且在惯性作用下向上运动，然后与下一发弹丸撞击后向下运动，最后进入箱体，最终落点在下抱弹钩附近。

3.4 弹壳下抱弹钩撞击断裂底火分离仿真结果分析

弹壳与下抱弹钩撞击后，断裂底火与弹壳发生分离。仿真结果如图 11—13 所示。

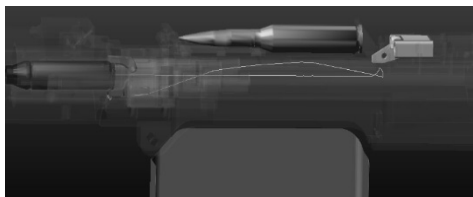
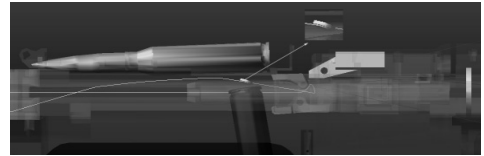
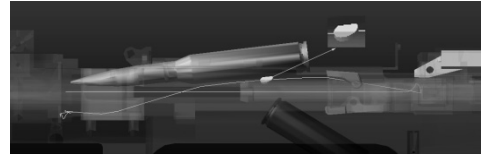


图 11 断裂底火中心轨迹



(a) $t=0.085$ s 时断裂底火运动轨迹



(b) $t=0.1$ s 时断裂底火运动轨迹



(c) $t=0.0165$ s 时断裂底火运动轨迹

图 12 断裂底火运动姿态局部放大图

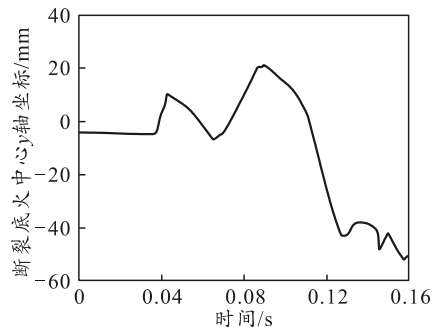


图 13 断裂底火中心 y 轴坐标变化

从图 11—13 可知：断裂底火在弹壳撞击抛壳顶后随弹壳发生偏转先向上运动，然后在重力的作用下随弹壳向下运动。直到弹壳与下抱弹钩撞击，断裂底火与弹壳发生分离且在惯性作用下先向上运动，然后与下一发弹丸撞击后向下运动，最后进入箱体，最终落点在下抱弹钩附近。

3.5 弹壳与挡板撞击断裂底火分离仿真结果分析

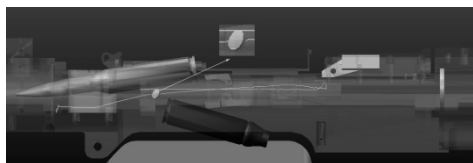
弹壳和挡板撞击后，断裂底火与弹壳发生分离。仿真结果如图 14—16 所示。



图 14 断裂底火中心轨迹



(a) $t=0.1$ s 时断裂底火运动轨迹



(b) $t=0.115$ s 时断裂底火运动轨迹



(c) $t=0.155$ s 时断裂底火运动轨迹

图 15 断裂底火运动姿态局部放大图

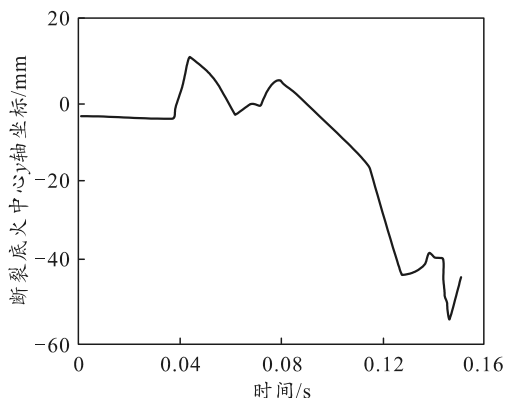


图 16 断裂底火中心 y 轴坐标变化

从图 14—16 可知：断裂底火在弹壳撞击抛壳顶后随弹壳发生偏转先向上运动，然后在重力的作用下随弹壳向下运动，当弹壳与炮闩撞击后加快偏转，断裂底火随弹壳加快偏转继续向上运动，直到弹壳撞击挡板后，断裂底火与弹壳发生分离且在惯性作用下向下运动，最后进入箱体，最终落点在下抱弹钩附近。

弹壳在 4 次撞击过程中产生的撞击力如图 17 所示。

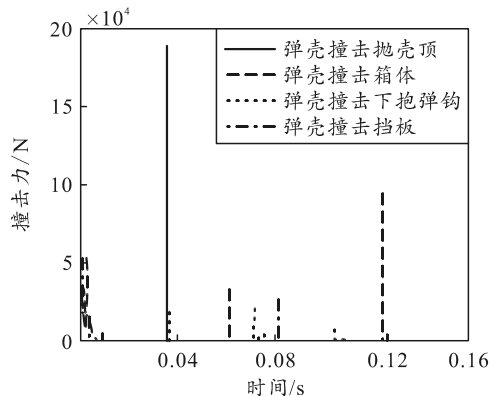


图 17 弹壳 4 次撞击撞击力

由图可知：弹壳在 4 次撞击过程中撞击力分别为 189 015.5, 33 666.3, 18 713.3, 26 491.5 N，第 1

次撞击过程所产生的撞击力远远大于另外 3 次撞击过程。

3.6 炮闩后座速度仿真结果分析

通过实验所得数据可知：炮闩后坐速度为 18.4~11.7 m/s，炮闩后坐速度极限速度为 18.4 m/s，且火炮停射故障发生在后坐极限速度范围附近，仿真选取炮闩不同后坐速度为极限速度范围附近，保持其他条件不变，改变不同的炮闩后坐速度分别为 18.4, 18.2, 18.0, 17.8, 17.6, 17.4, 17.2, 17.0 m/s。通过仿真探究不同炮闩后坐速度下断裂底火与弹壳分离后的运动轨迹，仿真情况如图 18—21 所示。

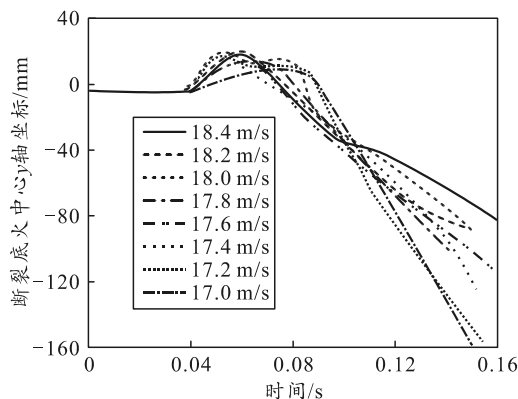


图 18 弹壳撞击抛壳顶后断裂底火中心 y 轴坐标变化

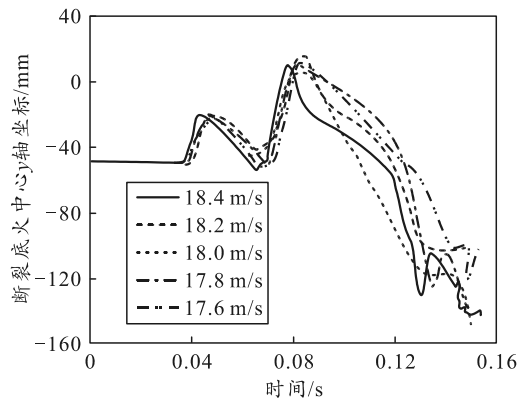


图 19 弹壳撞击箱体后断裂底火中心 y 轴坐标变化

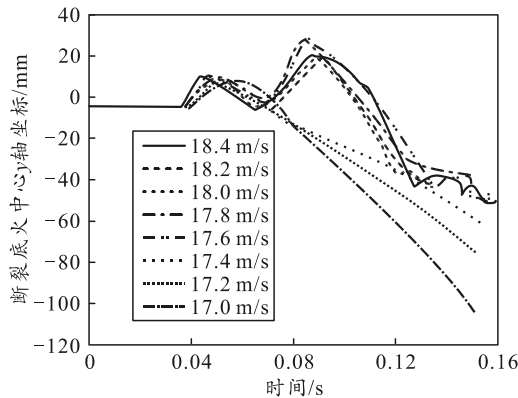


图 20 弹壳撞击下抱弹钩后断裂底火中心 y 轴坐标变化

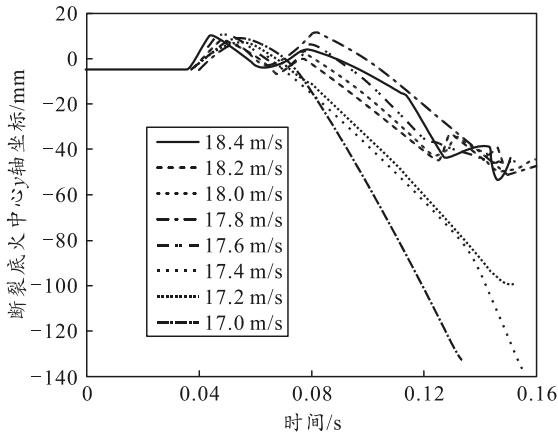


图 21 弹壳撞击挡板后断裂底火中心 y 轴坐标变化

通过图 18 可以看出：改变炮闩后坐速度，若断裂底火在弹壳撞击抛壳顶过程中与弹壳发生分离，则会随弹壳抛出。图 19—21 表明：当炮闩后坐速度较大，且若是后 3 次撞击过程中断裂底火与弹壳发生分离，则会进入箱体但是不会重新入膛，最终落点在下抱弹钩附近；当炮闩后坐速度较小，断裂底火在弹壳撞击过程中与弹壳发生分离则都会随弹壳抛出，不会造成火炮停射。

通过仿真可以看出：随着炮闩速度降低，断裂底火在炮闩速度较小的情况下都会随弹壳一起抛出，不会造成火炮停射。

4 结束语

笔者通过对该高速自动机的原理分析，建立虚拟样机模型并仿真，分析抽壳过程中断裂底火与弹壳不同分离时机的运动轨迹，并探究改变炮闩速度对断裂底火运动轨迹的影响。仿真实验结果表明：

1) 弹壳撞击抛壳顶过程产生的撞击力为 153 554.9~266 216.3 N，后 3 次撞击过程所产生的撞击力分别为 22 197.2~33 666.3 N、12 746.3~20 463.1 N、12 328.7~26 491.5 N，弹壳撞击抛壳顶撞击力远远大于其他 3 次撞击力，弹壳撞击抛壳顶过程中若断裂底火与弹壳发生分离会与弹壳一起抛出，不会造成火炮停射。

2) 当炮闩后座速度低于 17.6m/s，弹壳在撞击抛壳顶后，偏转过程中不会撞击到箱体，且若断裂底火在与下抱弹钩和挡板撞击过程中与弹壳发生分离，也都会随弹壳一起抛出，不会造成火炮停射；当速度高于 17.6 m/s，弹壳撞击抛壳顶后会分别与箱体、下抱弹钩、挡板发生碰撞，且若断裂底火在与箱体、下抱弹钩、挡板撞击过程中与弹壳发生分离，则会进入箱体，不会进入膛内，最终落点在下抱弹钩附近，可能造成火炮停射。

3) 笔者采用的仿真方法不但能够确定抽壳过程断裂底火可能与弹壳发生分离的碰撞点，而且对不同碰撞点底火脱落的轨迹进行了描述，为实战中出现的断裂底火与弹壳分离造成火炮停射的现象提供参考依据。

参考文献：

- [1] 欧学炳, 殷仁龙, 王学颜. 自动武器结构设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 174-190.
- [2] 卫丰, 张光. 药筒发射应力和抽壳力的有限元分析[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 72-75.
- [3] 康艳祥, 张以都, 白绍鹏. 自动武器抽壳过程仿真及抽壳力相关研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(3): 18-22.
- [4] 谭波, 侯健, 可学为, 等. 舰炮抽壳机构抽壳过程仿真分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2014(4): 49-52.
- [5] 傅振明, 朱攸长. 某型 25mm 自动炮闩体阻挡抛壳现象分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 1999(3): 56-59.
- [6] 陈红磊, 王文祥. 药筒射击时出现卡壳原因分析及测试方法[J]. 兵工自动化, 2010, 29(1): 83-84.
- [7] 石明全. 基于 ADAMS 的某火炮抽筒抛壳过程分析[J]. 中国制造业信息化, 2004, 33(3): 94-96.
- [8] 王扬, 戴劲松, 王茂森. 某型小口径自动火炮抛壳动力学仿真分析[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 91-96.
- [9] 张子丘, 孙正民, 王国辉, 等. 基于虚拟样机技术的抛壳过程动力学仿真分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2009 (1): 43-46.
- [10] 陈立平, 张云清. 机械系统动力学分析及 Adams 应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 12-15.