

doi: 10.7690/bgzdh.2026.05.010

## 某舰炮抽壳阻力及其影响因素仿真分析

袁 晋, 何 永, 陈雨浩

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 针对大口径舰炮卡壳的问题, 对某舰炮抽壳阻力及其影响因素进行仿真分析。通过理论分析得出影响抽壳阻力因素, 采用非线性有限元分析方法, 改变模型中的药膛厚度、初始间隙、药筒材料等参数进行仿真计算, 得出抽壳阻力跟初始间隙、药膛壁厚、药筒的屈服极限和切向模量成反比例关系, 初始间隙对抽壳阻力的影响在一定范围内相对较小, 药膛壁厚相对较薄时对抽壳阻力影响极大, 随着壁厚的增大抽壳阻力趋于常值。药筒材料的屈服极限和切向模量超过一定值时抽壳阻力变为 0。仿真结果表明: 在设计时, 可选择合适的药膛壁厚和初始间隙并分区选择药筒的材料, 使得抽壳阻力满足抽壳要求。

**关键词:** 舰炮; 抽壳阻力; 非线性; 仿真分析

**中图分类号:** TJ391 **文献标志码:** A

## Simulation Analysis of Extraction Resistance of a Certain Naval Gun and Its Influencing Factors

Yuan Jin, He Yong, Chen Yuhao

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In response to the issue of cartridge jamming in large-caliber naval guns, a simulation analysis was conducted on the extraction resistance and its influencing factors of a certain naval gun. Through theoretical analysis, the factors affecting extraction resistance were identified. Using nonlinear finite element analysis, parameters such as the thickness of the powder chamber, initial clearance, and cartridge material were altered in the model for simulation calculations. It was found that extraction resistance is inversely proportional to initial clearance, powder chamber wall thickness, yield limit, and tangent modulus of the cartridge. The influence of initial clearance on extraction resistance is relatively minor within a certain range, while the influence of a thinner powder chamber wall thickness on extraction resistance is significant. As the wall thickness increases, extraction resistance tends to stabilize. When the yield limit and tangent modulus of the cartridge material exceed a certain value, extraction resistance becomes zero. The simulation results indicate that during design, appropriate powder chamber wall thickness and initial clearance can be selected, and cartridge materials can be chosen based on different zones, to ensure that extraction resistance meets the extraction requirements.

**Keywords:** naval gun; extraction resistance; nonlinearity; simulation analysis

### 0 引言

舰炮的抽壳是一个瞬态过程, 抽壳性能的好坏直接影响舰炮的自动化程度和发射效率。某大口径舰炮在后坐过程中开闩抽壳, 抽筒子下端与药筒边缘接触, 抽筒子上端在后坐过程中撞击固定在摇架上的抽壳模板, 药筒在抽筒子的作用下从炮膛内抽出, 通过输弹通道进入排壳机构, 药筒要在后发弹进入输弹通道之前进入排壳装置, 这就要求药筒在被抽离炮膛时要具有足够大的速度, 这样才能避免卡壳故障的发生。针对抽壳卡壳的问题, 李翔等<sup>[1]</sup>通过仿真和试验得出抽壳阻力跟速度的关系并提出了减小初始间隙和增大摩擦系数的方法来增加抽壳阻力使舰炮能成功抽壳。陈红磊等<sup>[2]</sup>研究设计了 2

种试验装置, 能快速分清卡壳原因是火炮还是药筒。卫丰等<sup>[3]</sup>考虑了膛线的作用, 建立了轴对称模型对药筒发射应力和抽壳力进行了研究, 并对摩擦系数、初始间隙对抽壳阻力的影响进行了理论分析。倪路瑶等<sup>[4]</sup>通过建立动力学模型进行刚柔耦合仿真拟合出了抽壳阻力曲线。谭波等<sup>[5]</sup>通过有限元仿真分析得出抽壳模板不同位置对抽壳阻力的影响。李翔等<sup>[6]</sup>对比不同升速的膛压对药筒贴膛时间的影响, 仿真计算得出了药筒不同区域残余正压力的分布情况, 分析了二者对抽壳性能的影响。康艳祥等<sup>[7]</sup>对自动武器抽壳阻力影响因素进行了理论分析, 并对抽壳过程和阻力进行了仿真分析。总的来说, 对抽壳过程的研究主要集中在抽壳阻力方面。

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-01-10

第一作者: 袁 晋(1998—), 男, 河南人, 硕士。

笔者以某舰炮抽壳为工程实例，通过非线性有限元的方法模拟药筒在药室内的瞬态变化，得出了抽壳阻力与初始间隙、药膛壁厚和药筒材料等参数的关系。

### 1 抽壳阻力的理论分析

药筒在药室内的变化为瞬态变化过程，根据膛压的变化将药筒在药室内的变形情况分为 3 阶段。

第 1 阶段：当舰炮进行射击时，引燃了药筒内发射药，瞬间生成大量的高压气体，高压气体作用在药筒内壁，药筒首先发生弹性变形，随着火药气体压力的增大，超过了药筒材料的屈服极限时，药筒开始发生塑性变形直至贴膛。

第 2 阶段：药筒贴膛后跟随药室一起变形，这个阶段药筒接着发生塑性变形，药室因为设计要求只能做弹性变形，直到膛内火药气体压力达到最大。这时的药筒塑性变形和药室弹性变形都到达最大值。

第 3 阶段：火药气体压力达到最大值后开始下降，药筒和药室开始恢复变形，药室的变形完全是弹性变形，可以恢复到射击前的位置，药筒发生了塑性变形已经产生了永久变形，随着压力下降也只能做一部分的弹性恢复，不能再恢复到原来的位置。若药筒产生的变形量小于药筒与药室之间的初始间隙，则药筒和药室之间没有接触压力就不产生抽壳阻力；如果变形量大于药筒与膛壁之间的初始间隙，药室在作弹性回复的时候会由于药筒的永久变形量而不能恢复到射击前的位置，药室内壁会对药筒产生反向压力，直至药筒和药室达到平衡状态。

抽壳阻力的大小取决于平衡状态时药筒和药室之间的接触压力，接触压力越大抽壳阻力也就越大。

## 2 药筒和药室模型的建立

### 2.1 数学模型

药筒在药室内的变形情况是典型的弹塑性变形，当药筒进入塑性状态后，为了便于问题的分析作如下假设：

- 1) 药筒的材料采用双线性强化模型；
- 2) 药室受载后始终在弹性范围内；
- 3) 药筒在卸载时作完全弹性恢复，不发生反向屈服。

药筒在药室内的应力应变关系如图 1 所示。

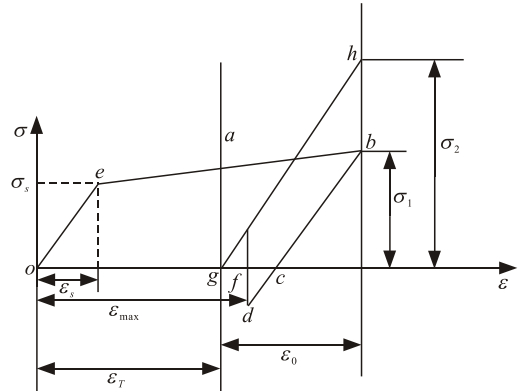


图 1 药筒和药室应力应变关系

图 1 中， $o-e-a-b-c-d$  为药筒的应力应变的关系， $g-h-g$  为药室的应力应变关系。 $\sigma_1$  是药筒贴膛后随药室一起达到最大变形受到的应力， $\sigma_2$  是药室达到最大变形受到的应力。 $oe$  段是药筒的弹性变形， $e$  点时到达药筒材料的屈服极限； $ea$  段是药筒发生塑性变形至贴膛阶段， $ab$  段是药筒随药室一起变形阶段，当膛压从最大值开始下降时，药室和药筒开始恢复变形，药筒由于进入了塑性变形区产生了永久变形，当药筒的弹性变形恢复完成时，药筒会受到药室内壁的反向压力， $f$  点处达到平衡。抽壳阻力的大小和药筒所受的药室内壁的反压力成正比关系，理论上图中的  $\epsilon_{max}$  越大，药筒与炮膛之间产生的接触压力就越大，抽壳阻力也就越大。影响  $\epsilon_{max}$  大小的因素有初始间隙、药筒的材料、药室的壁厚<sup>[8]</sup>。

### 2.2 有限元模型

舰炮抽壳阻力来源于药筒和炮膛的接触压力。药筒在炮膛内的弹塑性变形是一种典型的非线性的瞬态动力学情况。笔者采用 Abaqus/Explicit 来模拟药筒在药室内复杂的不连续接触情况。

有限元仿真模型包含药筒和药室 2 部分，药筒分区模型如图 2 所示。

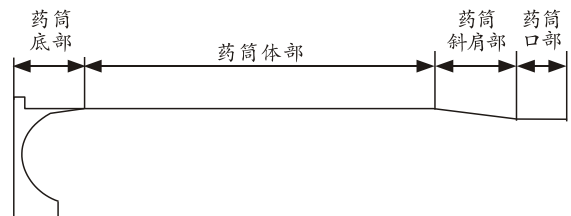


图 2 药筒分区

药筒体部和药筒斜肩部是圆锥段，药筒口部和药筒底部是平行段。

为了便于仿真计算，建模时作出以下假设：

- 1) 忽略炮膛内的起膛线和其他局部细节特征，

根据药筒在炮膛内受力、受约束的对称性建立轴对称模型求解，很大程度上减少了计算成本；

- 2) 忽略温度对抽壳阻力的影响；
- 3) 药筒变形时不产生裂纹等不协调变形；
- 4) 忽略闭锁机构的变形，药筒在药室内只需要添加轴向约束和轴对称约束。

建立的药筒和药室的有限元模型如图 3 所示。

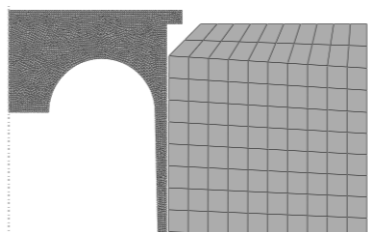


图 3 药筒和药室有限元模型

网格单元类型采用 CAX4R(4 节点双线性轴对称四边形单元，减缩积分，沙漏控制)药室和药筒分别划分为 1 010 和 4 874 个单元。

药筒和炮膛的材料力学性能如表 1 所示。

表 1 药筒和药室材料参数

材料参数	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	屈服极限/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
药筒	7 820	397	200	0.275
药室	7 900	—	210	0.275

考虑药筒发生了塑性变形，药筒的塑性应力应变关系按照表 2 来定义。

表 2 药筒塑性变形时的应力应变关系

应力/MPa	塑性应变	应力/MPa	塑性应变
397	0	803	0.022 5
487	0.005 0	814	0.023 1
577	0.010 0	837	0.024 4
662	0.014 7	870	0.026 2
711	0.017 4	922	0.029 1
764	0.020 3	1 000	0.033 5
790	0.021 8		

设置 2 步分析：1) 20 ms 模拟在火药气体压力作用下药筒在药室内的弹塑性变形情况；2) 6 ms 模拟药筒在抽筒子作用下抽出的情况。药筒在药室内受到的火药气体压力以压强载荷的形式施加到药筒内壁上，压力曲线如图 4 所示。

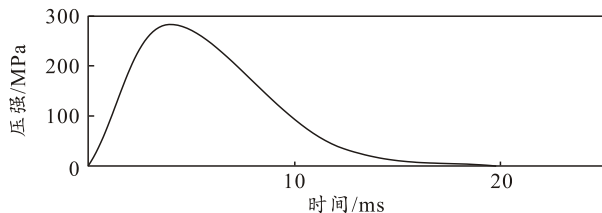


图 4 膛压曲线

最大膛压约为 282 MPa。药筒和药室之间的接触类型设置为面对面接触。为了分析药筒不同分区

抽壳阻力的占比，设置药筒和药室 4 个分区的接触对，摩擦系数取 0.15。

### 2.3 模型验证

#### 2.3.1 药筒应力应变分析

药筒在膛压的作用下，在药室内发生弹塑性变形。图 5—7 是在最大膛压( $t=4$  ms)作用下的药筒和炮膛的应力云图。

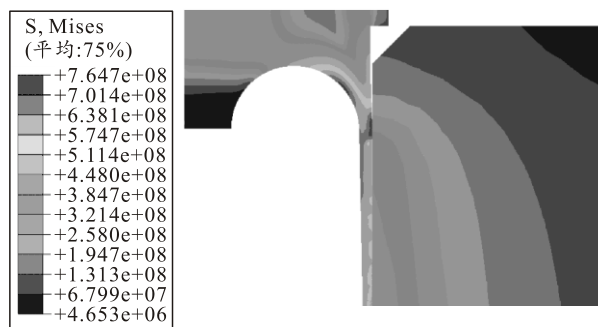


图 5 最大膛压下药筒药室应力

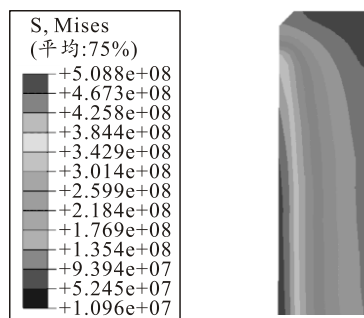


图 6 最大膛压下药室应力

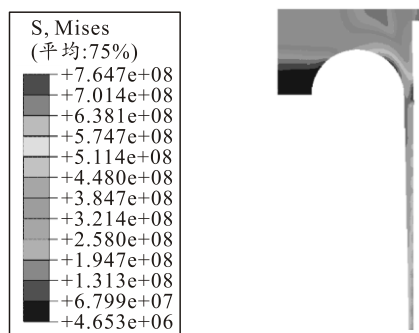


图 7 最大膛压下药筒应力

图 8 是在抽壳开始时药筒整体的残余应变曲线。

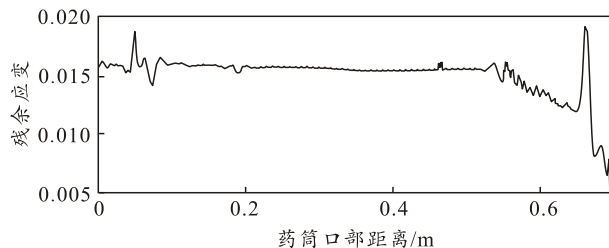


图 8 抽壳时药筒残余应变

当火药气体压力达到最大时，最大等效应力出现在药筒底部的内壁上，大小为 764 MPa，此时药室内壁的最大等效压力为 508 MPa。由图 8 可以得出：药筒口部和药筒体部的残余应变分布均匀，药筒斜肩部与药筒口部相连的部分残余应变明显大于与药筒体部相连部分的残余应变，由于加工问题药筒底部的内部应有一个不变的锥度，药筒底部的壁厚是逐渐增大的，药筒的残余应变随着壁厚的增加而减小，这将导致药筒底部会有一个不贴膛段，药筒底部不贴膛段的起始处类似于悬臂梁的支点，该处残余应变最大。

### 2.3.2 抽壳阻力仿真结果

药筒和药室内壁之间的摩擦力即为抽壳阻力。如图 9 所示，采用 Abaqus/Explicit 可以直接得出药筒和药室接触面之间的摩擦力。

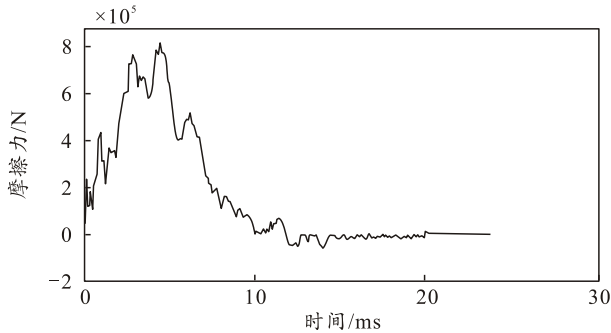


图 9 药筒和药室之间的摩擦力

从图 9 中可以看出：药筒和药室内壁之间的摩擦力在火药气体压力作用约 0.1 ms 时开始产生，大约 4 ms 时达到最大，随后开始下降，在 12 ms 时摩擦力方向发生变化，直到开始抽壳。图 10 即为抽壳阻力。

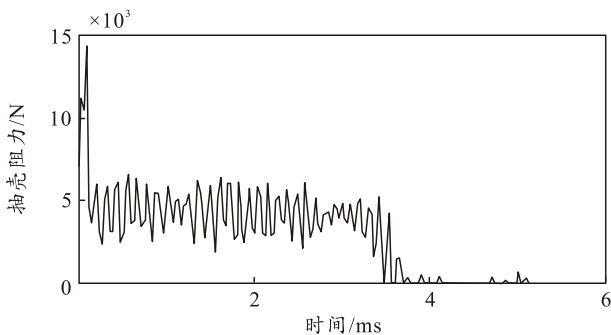


图 10 抽壳阻力

从图 10 中可以看出：抽壳阻力在抽壳发生约 0.09 ms 时达到峰值，抽壳阻力大小为 14 303 N，文献[9]在实验中测得该舰炮抽壳阻力为 11 060 ~ 14 250 N，验证了仿真模型的可靠性。

图 11 为药筒不同区域产生的抽壳阻力。

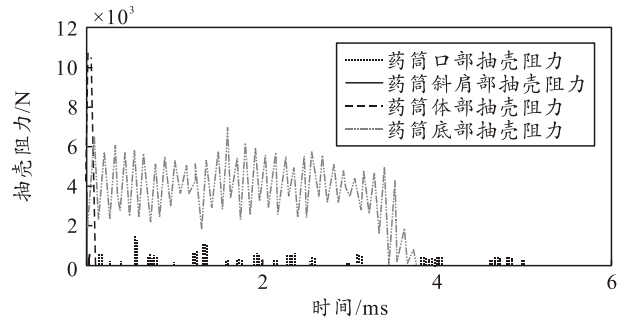


图 11 不同区域的抽壳阻力

从图 11 中可以看出：抽壳阻力主要来自于药筒体部，药筒口部产生的抽壳阻力占比最少，药筒斜肩部的抽壳阻力只存在于抽壳过程开始的瞬间，因药筒底部产生部分不贴膛段形成悬臂梁，药筒底部产生的抽壳阻力以大约 0.03 ms 的频率震荡。

药筒在火药气体压力作用下约 0.1 ms 就开始贴膛，然后跟随药室一起变形。因药筒进入塑性变形区产生了永久变形，在 12 ms 时药筒弹性变形量恢复完成，药筒开始受到药室内壁的反向压力直到开始抽壳，药筒形状为多锥度圆筒。抽壳开始的瞬间药筒斜肩部与药室之间产生间隙，抽壳过程进行约 0.1 ms 时，药筒体部与药室产生间隙，之后就只有药筒口部和药筒底部的平行段与药室之间产生抽壳阻力，此时抽壳阻力开始震荡，随着药筒在抽筒子的作用下抽离药室，抽壳阻力逐渐减小直至药筒和药室分离抽壳阻力变为 0。

### 3 抽壳阻力影响因素仿真研究

基于以上的仿真模型，通过修改模型中抽壳阻力影响因素参数的大小，进行多次仿真观察抽壳阻力峰值的变化情况。

图 12 是抽壳阻力随药室壁厚变化的曲线。

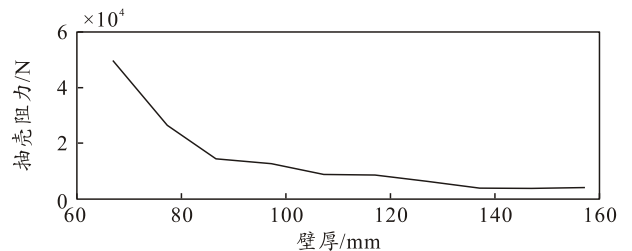


图 12 不同药室壁厚的抽壳阻力

由图 12 可以看出：抽壳阻力跟药室壁厚近似成反比关系，当壁厚相对较薄的时候，改变壁厚的大小，抽壳阻力变化较为剧烈，灵敏度达到 2 000 N/mm，随着药室壁厚的增加，抽壳阻力下降越来越缓慢，最后趋于常值。图 13—14 分别是抽壳阻力随药筒切向模量和屈服强度变化的曲线。

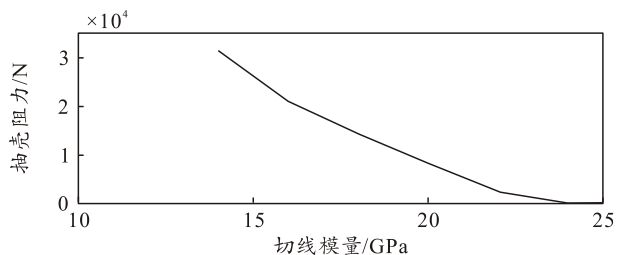


图 13 不同切向模量的抽壳阻力

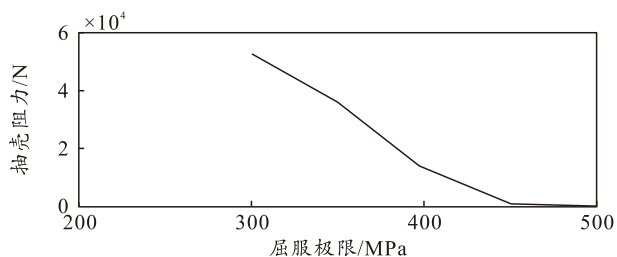


图 14 不同屈服极限的抽壳阻力

抽壳阻力的大小和这 2 个材料参数成反比例关系，当切向模量和屈服极限超过一定值时，抽壳阻力会变为 0。图 15 是抽壳阻力随初始间隙变化的曲线。

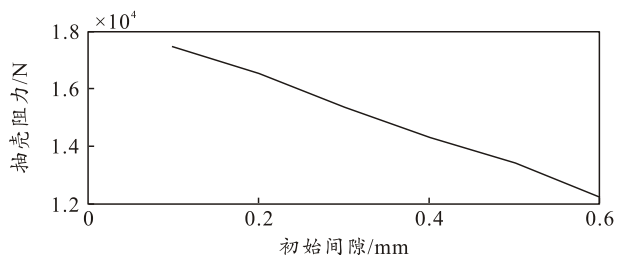


图 15 不同初始间隙的抽壳阻力

由图 15 可以看出：抽壳阻力的大小和初始间隙成反比关系，在初始间隙合理的取值范围内，改变初始间隙对抽壳阻力的影响较小。

## 4 结论

1) 抽壳阻力主要来源于药筒体部，药筒体部产生的抽壳阻力占比约为 75%，药筒斜肩部由于锥度较大率先与药室分离产生间隙，当抽壳过程进行约

0.1 ms 时，药筒体部与药室产生间隙，之后的抽壳阻力来自于药筒口部和药筒底部。

2) 药筒各个分区产生抽壳阻力的占比和作用时间影响抽壳时抽筒子的变形能的大小，为抽筒子结构的设计和材料的选择提供了一定的参考。

3) 抽壳过程开始时，药筒残余应变最大的位置在药筒底部未贴膛段的起始处，抽壳阻力在抽壳开始约 0.09 ms 时达到峰值，接着急剧下降到一定值，然后开始震荡，随着药筒与药室全部分离抽壳阻力减小到 0。

4) 抽壳阻力和药室壁厚、初始间隙、药筒的切向模量和屈服强度都近似成反比例关系，初始间隙相对于其他 3 个参数对抽壳阻力的影响最小。

## 参考文献：

- [1] 李翔, 王琳琳, 李洪果. 大口径舰炮抽壳力和抽壳速度试验研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(5): 146-149.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 倪路瑶, 朱永梅, 付彩越. 炮门抽壳机构抽壳过程和抽壳力分析[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2018, 32(1): 67-71.
- [5] 谭波, 侯健, 可学为. 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, 35(4): 49-52.
- [6] 李翔, 沈剑, 陈国光. 大口径舰炮抽壳性能的影响因素研究[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(19): 185-188.
- [7] 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.
- [8] 高乃同. 自动武器弹药学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [9] 王慧霖, 肖男, 张平宽. 焊接钢质药筒表面处理质量与药筒退壳性关系的研究[J]. 太原重型机械学院学报, 1999, 20(2): 189-191, 196.