

doi: 10.7690/bgzd.2018.05.017

# 热冲击对钢质药筒力学性能影响分析

杨吉林, 田晓丽, 乔茹斐, 贾晓玲  
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

**摘要:**针对传统研究忽略温度影响的问题,研究高压和高温载荷对焊接钢质药筒力学性能的影响。使用 LS-DYNA 软件,建立焊接药筒的仿真模型,分析弹丸发射过程中热冲击对钢质药筒的影响。结果表明:温度对药筒残余应力的影响较大,尤其是对筒体,并对抽壳力也有一定的影响,使抽壳力增大约 16%。该研究结果对钢质药筒研究有一定参考价值。

**关键词:** 钢质药筒; 热冲击; 抽壳力; 热固耦合  
**中图分类号:** TJ301 **文献标志码:** A

## Influence Analysis of Heat Shock on Mechanical Properties of Steel Cartridge Case

Yang Jilin, Tian Xiaoli, Qiao Rufeifei, Jia Xiaoling  
(College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** For ignoring the influence of temperature on traditional research, this paper study the influence of high-pressure and high-temperature loads on the mechanical properties of welded steel cartridges. Using LS-DYNA software, a simulation model of the welding cartridge was established to analyze the impact of thermal shock on the steel cartridge during projectile launching. The results show that the temperature has a great influence on the residual stress of the cartridge, especially on the cartridge body, and also affects the shell release force, that increased about 16%. The results of this paper have important guiding significance for the steel cartridge case.

**Keywords:** steel cartridge case; heat shock; shelling force; thermal-solid coupling

### 0 引言

就目前而言,大口径火炮基本上均使用焊接钢质的药筒<sup>[1-2]</sup>。许多学者致力于焊接钢质药筒的研究,已经有了很重大的成果。何清<sup>[3]</sup>从力学角度出发,对焊接钢质药筒整个研制过程进行理论分析;田晓丽等<sup>[4]</sup>研制了专用的焊接钢质药筒有限元分析前处理软件系统;卫丰等<sup>[5]</sup>利用有限元软件计算出焊接钢质药筒的发射应力和抽壳力。曹畅<sup>[6]</sup>研究温度对药筒的影响,但未能详细说明温度对钢质药筒有什么影响。

对于焊接钢质药筒,传统研究过程中认为钢的膨胀系数较黄铜小,忽略了温度对钢质药筒的影响。笔者利用 LS-DYNA 有限元软件研究高压和高温载荷对焊接钢质药筒的影响,并与传统研究进行比较。

### 1 建立仿真模型

#### 1.1 模型的建立

建立焊接药筒的几何模型时,为了节省计算时间,根据药筒结构的对称性和弹丸发射过程中膛压作用和温度作用的对称性,笔者将分析模型简化为

2 维平面对称模型。按照焊接钢质药筒的设计理论,把药筒分为 6 个区,分别为筒底部、筒底环、药筒缘焊缝、药筒环、药筒体部和药筒口部。药筒和身管的几何模型如图 1。

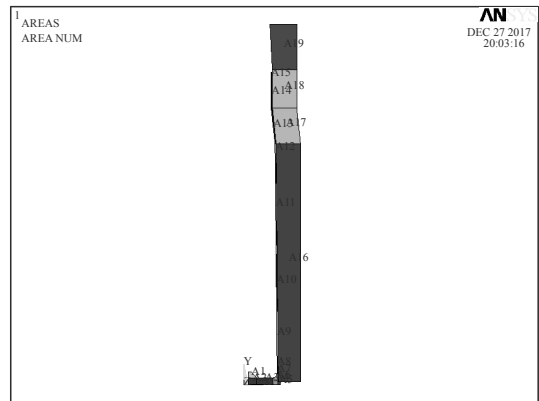


图 1 药筒几何模型

笔者采用 2 种方案对此过程进行分析,具体如表 1。

表 1 研究方案

方案	压载	温载
1	√	
2	√	√

收稿日期: 2018-02-01; 修回日期: 2018-03-13  
作者简介: 杨吉林(1992—),男,山西人,硕士,从事智能弹药研究。

### 1.2 主要材料模型

方案 1 中，药筒底部和体部均为双线性强化材料，身管为纯弹性材料<sup>[7]</sup>。方案 2 中，药筒底部采

用双线性强化材料，药筒体部采用考虑热膨胀的弹塑性模型，身管仍为纯弹性材料，但所有材料需考虑其热传导率。具体材料参数见表 2。

表 2 材料参数

方案	部件	材料编号	材料参数					
			E/GPa	PR	SIGN/GPa	HC/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	TC/ $(10^{-6} J \cdot K^{-1})$	ALPHA/ $(10^{-6} K^{-1})$
1	筒体	Mat_003	206	0.30	2.06	—	—	—
	筒底	Mat_003	196	0.28	1.96	—	—	—
	身管	Mat_001	206	0.30	—	—	—	—
2	筒体	Mat_004+Mat_T01	206	0.30	—	480	49.80	11.12
	筒底	Mat_003+Mat_T01	196	0.28	—	480	49.80	11.12
	身管	Mat_T01	210	0.30	—	480	49.80	11.12

### 1.3 边界条件和初始条件的确定

初始环境温度为 288 K，限制药筒底部节点和身管端面节点的 Y 方向位移，身管外表面为自由面。药筒内表面施加膛压作用曲线和温度作用曲线。方案 1 采用药筒和身管自动面面接触，方案 2 采用带有热膨胀的药筒和身管自动面面接触。

### 1.4 压载和温载的确定

弹丸发射过程中，膛内压力和温度的变化均是根据内弹道计算而得。

#### 1.4.1 p-t 曲线

根据经典内弹道学<sup>[8]</sup>，可计算得到膛压随时间变化曲线如图 2。

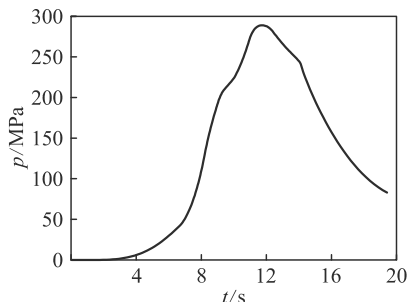


图 2 膛压曲线

#### 1.4.2 T-t 曲线

内弹道时期火药燃气温度是时间或弹丸位置的函数，可在求解内弹道参数时，通过下面的公式算出：

$$T_g(t) = [1 - (k - 1)\rho q v^2(t) / (2gf w \psi)] T_1 \quad (1)$$

式中： $v(t)$ 为弹丸运动速度； $q$ 为弹丸质量； $k$ 为绝热指数； $w$ 为装药量； $f$ 为火药力； $\psi$ 为火药燃去部分百分比； $T_1$ 为火药爆温。

表 3 列出了求解 T-t 曲线的内弹道参数值。

表 3 内弹道参数

项目	数值	项目	数值
口径/mm	130	弹质量/kg	33.4
余容/ $(m^3/kg)$	$1.0e-3$	火药力/(J/kg)	$8.80e5$
装药量/(kg)	10.5	火药密度/ $(kg/m^3)$	$1.55e3$
药厚/mm	0.81	燃速系数/ $(m^3/s \cdot kg)$	$7.75e-7$

可得，温度随时间变化曲线，如图 3。

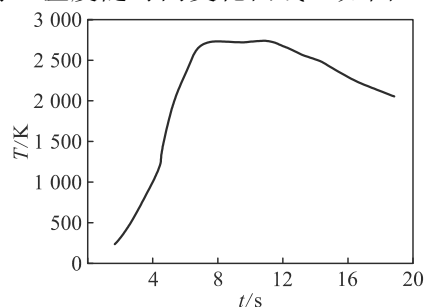


图 3 温度载荷曲线

## 2 计算结果与分析

### 2.1 不同时刻的局部应力云图

通过使用 LS-DYNA 后处理器观察药筒在不同时刻的变形，得到 2 种方案下不同时刻的局部应力云图，如图 4 和图 5。

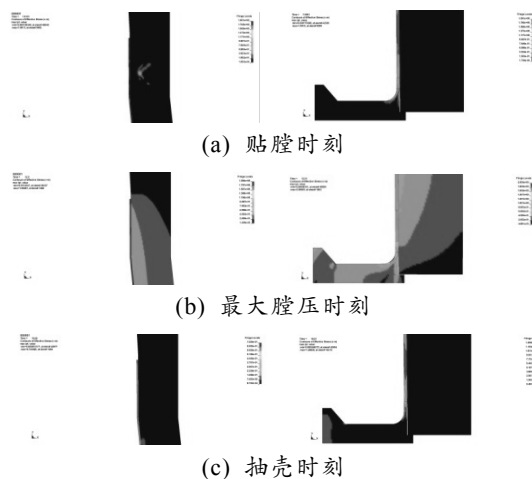


图 4 方案 1 的局部等效应力云图

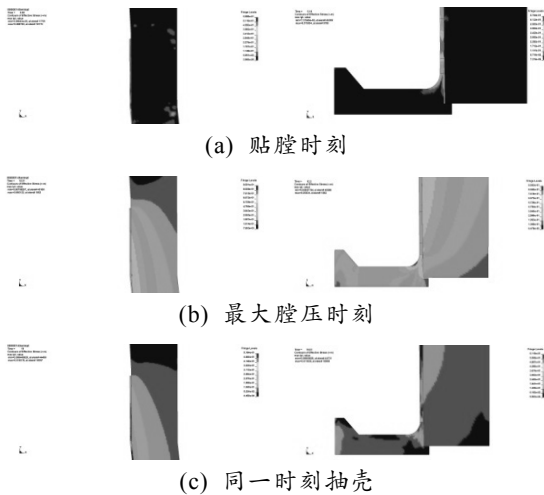


图 5 方案 2 的局部等效应力云图

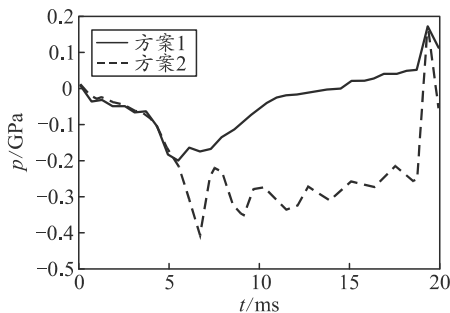
### 2.2 不同方案下药筒的工况

表 4 列出了不同方案下的工况。

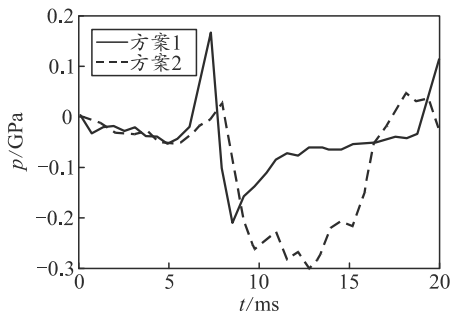
表 4 不同方案下药筒的工况

方案	贴膛时间/ ms	贴膛膛压/ MPa	最大应力时间/ ms	最大应力 位置
1	7.60	43	12.2	药筒缘焊缝
2	5.02	16.8	9.0~12.3	药筒缘焊缝、筒体

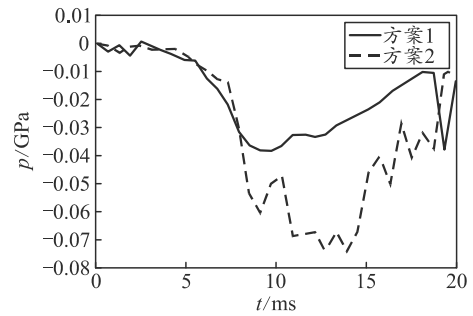
方案 2 与方案 1 相比，药筒的贴膛时间提前约 2.5 ms，贴膛膛压较小，因此温度对钢质药筒是有一定影响的。此外，方案 2 中，药筒最大应力维持的时间较长，约 3 ms。最大应力不仅出现在药筒缘焊缝处，在筒体部位也较大。提取各代表单元的应力，得到图 6。



(a) 筒体应力比较



(b) 缘焊缝应力比较



(c) 筒底应力比较

图 6 各代表单元应力变化

### 2.3 抽壳时刻药筒残余应力

提取方案 1 抽壳时刻药筒外表面各节点的残余应力和同一时刻方案 2 的药筒外表面各节点的残余应力，得到图 7（横坐标长度是指从筒底到筒口）。

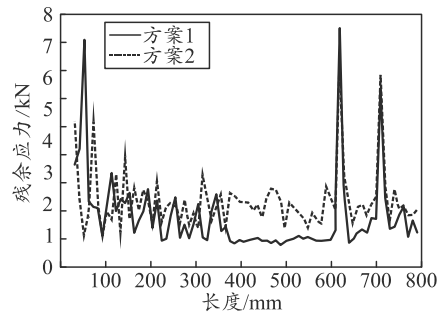


图 7 抽壳时刻药筒残余应力

由图 7 可知：温度使药筒的残余应力较高，尤其是筒体部位。

### 2.4 药筒退壳力计算公式

药筒退壳力的计算公式为

$$R = \sum f_i F_i \quad (2)$$

其中： $R$  为药筒退壳力； $i$  为接触面编号； $f_i$  为接触面  $i$  处摩擦系数； $F_i$  为接触面  $i$  处残余正压力。

经计算，方案 1 药筒的抽壳力为 6.05 kN，同一时刻方案 2 药筒所需抽壳力为 7.02 kN。药筒抽壳力增大约 16%，证明了热冲击对焊接钢质药筒存在一定的影响。

## 3 结论

笔者运用 LS-DYNA 有限元软件，分析了热冲击对药筒性能的影响，得到如下结论：

- 1) 点火器触发后，温度上升的速度比膛压快，此时温度对药筒影响较大，药筒会提前贴膛<sup>[11]</sup>；
- 2) 由于温度的影响，药筒缘焊缝和筒体所受压强增大，承压时间也较长；

Problems[J]. Journal of the Acm, 1976, 23(3): 555-565.

[2] BOZER Y A, WANG C T. A graph-pair representation and MIP-model-based heuristic for the unequal-area facility layout problem[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 218(2): 382-391.

[3] SADAN K K, ABDULLAN K. A new relaxed flexible bay structure representation and particle swarm optimization for the unequal area facility layout problem[J]. Engineering Optimization, 2011, 43(12): 1263-1287.

[4] ULUTAS B H, SADAN K K. An artificial immune system based algorithm to solve unequal area facility layout problem[J]. Expert Systems with Applications An International Journal, 2012, 39(5): 5384-5395.

[5] 高贵兵. 混流制造系统生产物流关键问题优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

[6] 朱大林, 詹腾, 张屹, 等. 元胞多目标粒子群优化算法

\*\*\*\*\*

(上接第 63 页)

[7] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 194-199.

[8] 安二峰. 新型战斗部聚能效应及相关问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004: 4-5.

[9] 赵捍东, 陈国光, 董永香. 聚能装药射流的数值仿真研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2001, 22(3): 211-214.

[10] 吴晗玲, 段卓平, 汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 328-332.

[11] 韩世峰. 破甲弹对运动体斜侵彻的仿真研究[D]. 太原:

\*\*\*\*\*

(上接第 66 页)

3) 同一时刻下, 温度对药筒残余应力的影响很大, 尤其是对筒体;

4) 同一时刻下, 温度使药筒的抽壳力略微增大, 增大约 16%。

综上所述, 热冲击对铜质药筒有一定的影响。温度使得药筒筒体残余应力增大, 对药筒的重复使用有严重影响。该研究对焊接钢质药筒的研究有较为重要的指导意义。

参考文献:

[1] 王志军, 尹建平. 弹药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 201-237.

[2] ROBBINS F W, COLBURN J W, ZOLTANI C K. Combustible Cartridge Cases: Current Status and Future Prospects[M]. Combustible Cartridge Cases Current Status & Future Prospects, 1992.

[3] 何清. 焊接钢质药筒设计理论与研究[D]. 太原: 中北

与其应用[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 280-287.

[7] 张屹, 卢超, 张虎, 方子帆. 基于差分元胞多目标遗传算法的车间布局优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(4): 727-734.

[8] 李伯虎. 复杂产品制造信息化的重要技术——复杂产品集成制造系统[J]. 机械设计与制造工程, 2006(14): 20-24.

[9] 钱超, 陈维义, 谢芝亮, 等. 基于遗传算法的装备技术准备资源平衡[J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 81-85.

[10] LENO I J, SANKAR S S, PONNAMBALAM S G. An elitist strategy genetic algorithm using simulated annealing algorithm as local search for facility layout design[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5): 787-799.

[11] 邹世伟. 车间柔性布局算法及三维仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.

\*\*\*\*\*

中北大学, 2015: 15-18.

[12] 卢芳云, 蒋邦海, 李翔宇, 等. 武器战斗部投射与毁伤[M].北京: 科学出版社, 2013: 176-177.

[13] 樊菲, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 爆炸成型弹丸战斗部不同侵彻着角下的毁伤能力研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(2): 199-204.

[14] 杨绍卿. 灵巧弹药工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 295-298.

[15] 郭希维, 姚志敏, 赵昉. 对抗主动防护系统的 EFP 战斗部设计[J]. 兵工自动化, 2013, 32(8): 6-9.

\*\*\*\*\*

大学, 2005.

[4] 田晓丽, 杨黎明, 何清, 等. 药筒有限元分析前处理软件系统研究与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 636-642.

[5] 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.

[6] 曹畅. 火炮膛内瞬态多相流场与药筒受力耦合作用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.

[7] 何清, 田晓丽, 陈国光. 焊接药筒发射强度应力场分析[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 82-83.

[8] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 19-46.

[9] 郭振宇. 火炮药筒在发射状态下的工作过程及其基本参量[J]. 兵工学报, 1981, 2(3): 34-39.

[10] 顾克秋, 钱林方, 常秀英, 等. 大口径火炮焊接药筒射击变形机理的启发式反演[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(6): 553-557.

[11] 张文革, 李德信, 杨世强. 悬索桥桥梁检查车力学性能分析[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1169-1175.