

doi: 10.7690/bgzd.2018.01.017

某弹药发射自燃现象的原因分析

曹梓育, 赵河明, 彭志凌, 郭宇
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对某轻武器在连续射弹 60 发后弹药在药室内自燃现象的原因分析。通过建立弹丸发射过程中含镀铬层身管和带漆层药筒的传热模型, 选取药筒漆层厚度、身管与药筒紧密程度、药筒漆层破损状况 3 个关键因素进行传热分析。该研究证明了现有漆层厚度能保证弹药的安全性, 说明弹药自燃主要原因是火药气体进入纵向气槽导致。

关键词: 轻武器; 弹药; 药筒; 自燃; 高温
中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Research on Cause of Spontaneous Combustion of Certain Type Ammunition

Cao Ziyu, Zhao Heming, Peng Zhiling, Guo Yu
(College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the causes analysis of ammunition spontaneous combustion in the medicine chamber after 60 rounds of continuous projectile, by established a heat transfer model of chrome-plated tube and painted cartridge case during the projectile launch. Select several key factors, such as the thickness of the tube coating, barrel and cartridge case closeness, and the damage of the tube coating, for heat transfer analysis. It is proved that the thickness of the existing paint layer can guarantee the safety of ammunition, which indicates that the main reason for the ammunition spontaneous combustion is the introduction of the gunpowder gas into the longitudinal gas tank.

Keywords: light weapon; ammunition; cartridge case; spontaneous combustion; high temperature

0 引言

长期以来, 世界各国对武器的可靠性高度重视, 通过可靠性评定技术判断武器是否达到设计标准, 找出系统设计的薄弱环节, 对产品进行改进, 提升性能, 同时减少实验和研发经费^[1-2]。

科研人员在试验时发现, 某武器有些身管在连续射弹 60 发左右时, 弹药留膛会出现弹药自燃的现象, 造成武器其余部件的损坏, 可靠性降低, 对射手的安全造成威胁^[3-4], 不能满足设计要求。笔者通过各种极限条件下药筒温度场的计算, 找出弹药自燃的原因。

1 模型假设

含镀铬层身管和带漆层药筒的 1/4 传热模型如图 1 所示。漆层厚度为 0.035 mm, 导热系数等于 0.8 W/(m·K); 镀铬层厚度为 0.10 mm, 导热系数等于 67 W/(m·K); 身管底金属和药筒底金属的导热系数均取为 48 W/(m·K)。

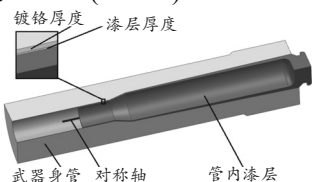


图 1 某武器含镀铬层身管和带漆层药筒的传热模型

2 热传递基本方程

在弹丸发射过程中, 药筒承受着剧烈的压力载荷冲击和热冲击, 热压耦合基本方程包括考虑身管结构变形的热传导和考虑惯性效应的热弹性方程。热传导基本方程为

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1)$$

式中: T 为枪管壁面温度; t 为时间; r 为枪管壁中某点距身管对称轴的距离; a 为热扩散率, $a = \lambda_s / C_s \rho_s a$, 其中, λ_s 、 C_s 、 ρ_s 分别为炮膛材料的热导系数、比热容及密度。

升温时外边界条件为

$$\alpha_1 [T_{b2}(t) - T_b(t)] = -\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{\rho_3 C_{p3} \Delta r_3}{2} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: Δr_3 为外层半径步长; λ_3 、 ρ_3 、 C_{p3} 分别为炮钢材料的导热率、密度、比热, 表 1 为炮钢随温度变化的热物性参数; $T_{b2}(t)$ 为 t 瞬时的枪管外表面温度。

表 1 身管材料热物性参数

温度/°C	弹性模量/ GPa	泊松比	导热系数/ W(m·°C)	膨胀系数 1e-6/°C	比热 J/(kg·°C)
15	211	0.277	48.00	11.5	—
100	208	0.286	—	12.8	—

收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2017-11-17

作者简介: 曹梓育(1992—), 男, 辽宁人, 在读硕士, 从事机电控制系统和可靠性研究。

温度/℃	弹性模量/ GPa	泊松比	导热系数/ W(m·℃)	膨胀系数 1e-6/℃	比热 J/(kg·℃)
200	202	0.263	—	13.7	553
300	195	0.29	44.70	14.3	578
400	186	0.292	43.12	14.8	611
500	177	0.277	41.15	15.1	674
600	168	0.284	37.47	15.4	754
700	—	—	31.40	—	849

升温时内边界条件方程为：

$$\alpha_g [T_g(t) - T_b(t)] = -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\rho_1 C_{p1} \Delta r_1}{2} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式中： α_g 为火药燃气的平均放热系数 $v(t)$ 数； $T_g(t)$ 为 t 瞬时的火药燃气温度； $T_b(t)$ 为 t 瞬时的枪管内表面温度； Δr_1 为内层半径步长； λ_1 、 ρ_1 、 C_{p1} 分别为铬的导热率、密度、比热。

冷却时内边界条件方程为

$$\alpha_1 [T_0 - T_b(t)] = -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\rho_1 C_{p1} \Delta r_1}{2} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

式中： α_1 为空气的放热系数； T_0 为环境温度。

3 内边界条件的求取

3.1 火药燃气平均温度计算

在进行计算时，将发射一发弹的过程分为 2 个部分：内弹道时期和与下一发之间的射击间隔。内弹道时期又分为膛内时期和后效期 2 个阶段。

3.1.1 内弹道时期火药燃气温度计算

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，通过下式算出：

$$T_g(t) = [1 - (k-1)\phi q v^2(t) / (2gf\omega\psi)] T_1 \quad (5)$$

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

3.1.2 后效期火药燃气温度

在后效期结束时，火药燃气基本恢复到大气温度；因此，假设后效期火药燃气的平均温度随时间的变化规律为：

$$T_{gh}(t) = T_h e^{(-A \cdot t^B)} \quad (6)$$

式中： T_h 为后效期开始时火药燃气的平均温度；

$$B = \frac{\ln(T_k/T_{bw})}{\ln(T_a/T_{bw})} \cdot \frac{\ln t_{ndd}}{\ln(t_{ndd} + t_{hxq})}; \quad A = -\ln(T_k/T_{bw}) / t_{ndd}^B$$

其中： T_k 为内弹道结束时膛内火药燃气平均温度； T_{bw} 为火药爆温； T_a 为后效期结束时刻膛内火药气

体平均温度； T_{ndd} 为内弹道持续时间； T_{hxq} 为后效期持续时间。

3.1.3 在两发弹之间的射击间隔

在两发弹之间的射击间隔，火药燃气已基本上从枪口流出，空气流入身管内并流动，故将此时身管内气体温度简化为环境温度 25℃。

3.2 火药燃气的放热系数

雷诺系数比是衡量火药燃气管内流动状态的重要依据，如图 2 所示，靠近药筒口部的地方，雷诺系数在 105 以上，属于强烈的湍流。

$$Re = \frac{v_g \rho_g d}{\mu_g} \quad (7)$$

式中： v_g 、 ρ_g 、 μ_g 分别为火药燃气速度、密度和黏度系数； d 为圆管直径。

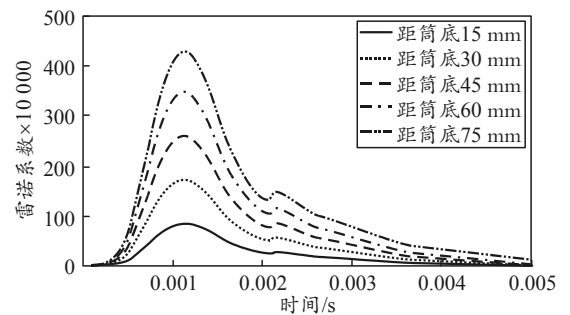


图 2 内弹道时期药筒内壁不同位置雷诺系数

内弹道时期和后效期火药燃气放热系数：

$$\alpha_g = \frac{1}{t_p(t)} \int_0^{t_p} \alpha_g(t) dt \quad (8)$$

式中 $t_p(t)$ 为弹丸在膛内运动时间。

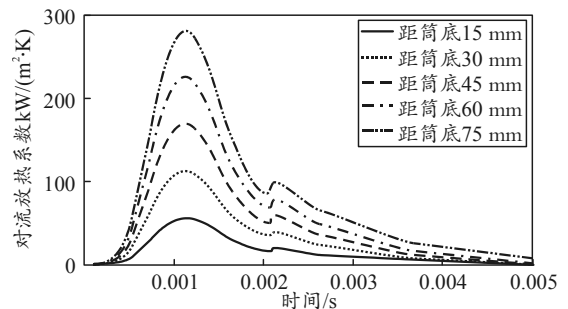


图 3 内弹道时期药筒内壁不同位置对流放热系数

内弹道时期药筒内壁不同位置对流放热系数如图 3 所示，对流放热系数峰值为 300 kW/(m²·K)。在后效期结束的瞬间，药筒从药室内抽出，管内火药气体排空，管内为空气，温度为常温。在空冷期，管内属于自然对流，其对流换热系数

$$h_{g2} = 0.53 \times \frac{\lambda_a}{d} \times \left(\frac{gd^3 \beta (T_r - T_a) C_{pa}}{\lambda_a \mu_a} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

式中： μ_a 为空气的动力黏度； C_{pa} 为空气的定压热容； λ_a 为空气的导热系数； d 为枪管的外径； Gr 为格拉晓夫准数； T_a 为环境温度； T_r 为枪管内壁的温度，待求(初始温度为环境温度 T_a)。

4 计算结果及分析

药筒漆层一般采用的是电泳加工法进行涂镀，漆层厚度在 0.03~0.04 mm 之间^[7-8]。当漆层厚度为 0.035 mm 时，在假定身管与每一发弹的药筒贴合紧密的条件下，如图 4 所示，连续射弹 30 发左右时，身管药室形成稳定的温度场，药室壁面峰值温度为 200 °C 左右，继续射击不会使弹药自燃。

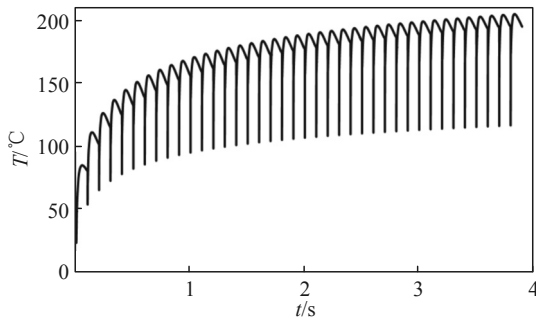


图 4 考虑漆层，药室温度-时间曲线

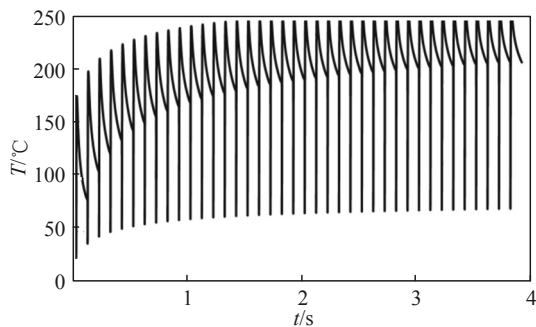


图 5 不考虑漆层，药室温度-时间曲线

在药筒入膛时，漆层通常会出现剥落，导致药筒基体与药室壁面直接接触。在不考虑漆层存在时，身管内壁温度变化规律如图 5 所示。连续射弹 15 发左右时，身管药室形成稳定的温度场，药室壁面峰值温度为 250 °C 左右。如图 6 所示，连续射弹 40 发后，弹药装填到位保温 1 s 药筒内壁峰值温度为 120 °C，继续射击不会使弹药自燃。漆层起到了一部分隔热的作用，但由于厚度很薄，所以隔热作用并不明显。

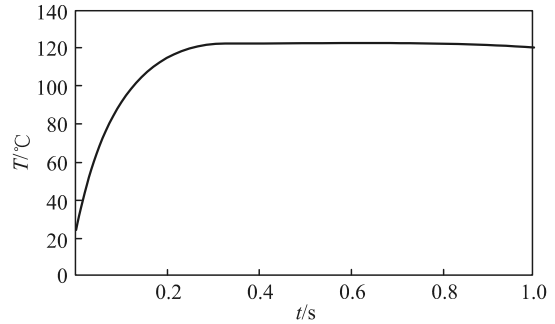


图 6 连续射弹 40 发，推弹入膛药筒内壁温度规律

火药燃气进入纵向气槽后直接与身管接触，如图 7 所示，身管内壁温度急剧升高，连续射弹 60 发后壁面温度为 400 °C。

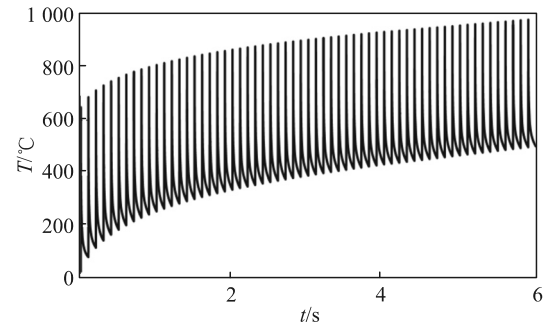


图 7 连续射弹 60 发，药室温度时间曲线

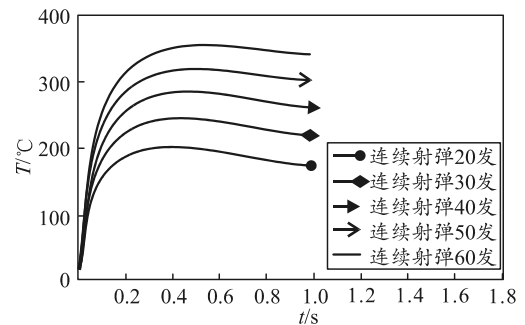


图 8 药筒收口尾端内壁温度时间曲线

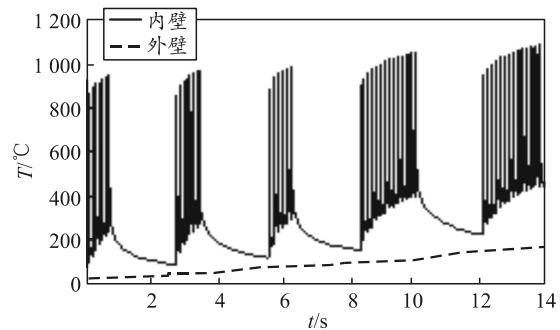


图 9 新射击规则身管内壁温度-时间曲线

图 8 为连续射弹 20、30、40、50、60 发，推弹入膛，静置 1 s，药筒内壁收口尾端温度变化规律。连续射弹 30 发以上，药筒收口处内壁峰值温度为 245 °C，已经接近火药的燃点，存在自燃的危险。为了降低身管内壁温度，笔者采用连射 8 发一

暂停 2 s—连射 8 发—暂停 2 s—连射 8 发—暂停 2 s—连射 18 发—暂停 2 s—连射 18 发的新射击规则。如图 9 所示, 60 发射击完成后, 身管内壁温度没有超过 400 °C, 此时弹药留膛不会引起弹药自燃。

5 结束语

综上所述, 药筒漆层的剥落不会导致弹药自燃。火药气体进入纵向气槽后直接与身管接触, 使药室温度急剧升高, 是造成弹药自燃的直接原因。调整射击规则是解决弹药自燃问题的有效手段。

参考文献:

- [1] EHIHARA WT. Erosion in 7.62mm machine gun barrels[Z]. AD721890, 1970.
- [2] AHMAD I, STIFEL L. The problem of gun barrel erosion[J]. *Astronautics and Aeronautics*, 1988 (109): 311-355.

(上接第 71 页)

参考文献:

- [1] 朱清华. 自转旋翼飞行器总体设计关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [2] 赵景芸, 金捷. 推力矢量技术的研究与发展[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 1999, 12(1): 51-54.
- [3] 王俊超, 李建波. 机翼对自转旋翼机纵向稳定性的影响[J]. *航空学报*, 2014, 35(1): 151-160.
- [4] 马振强, 董文瀚, 解武杰, 等. 具有全向推力矢量的六旋翼无人机设计与建模[J]. *飞行力学*, 2016, 34(2): 32-36.
- [5] 黄国勇, 甄子洋, 王道波. 变推力轴线无人机的建模与机敏性分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(2):

- [3] 乔自平, 李峻松, 薛钧. 大口径机枪枪管失效规律研究[J]. *兵工学报*, 2015, 36(12): 2231-2240.
- [4] 卓穗如. 机枪身管寿命预测技术[M]. 北京: 中国兵器工业第 208 研究所, 1996: 1-15.
- [5] 张坤, 胡莹, 陈光南, 等. 身管内膛镀铬层的抗烧蚀性能研究[C]//全国第五届航空航天装备失效分析研讨会, 宁波: 宇航学会, 2007: 395-399.
- [6] 刘涛, 龙书林, 康林, 等. 某型自动榴弹发射器身管铬层厚度研究[J]. *兵工自动化*, 2012, 31(1): 42-43.
- [7] 李晓闲, 张雪辉, 刘坚锋. 电沉积镍钨合金的应用及研究现状[J]. *上海有色金属*, 2010, 31(2): 40-45.
- [8] 孙福洋, 赵国仙, 郭清超, 等. 镍钨合金镀层对 QT-900 油管耐 CO₂ 腐蚀的影响[J]. *表面技术*, 2014 (6): 6-10.
- [9] COTE, P J, RICKARD, C. (2000) Gas-Metal Reaction Products in the Erosion of Chromium-Plated Gun Bores[J]. *Wear*, 2000, 241(1): 17-25.
- 170-174.
- [6] 陈森. 自转式无人旋翼机飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [7] 浦黄忠, 甄子洋, 黄国勇, 等. 变推力轴线无人机的混合姿态控制[J]. *南京理工大学学报*, 2010, 34(5): 596-601.
- [8] 张玉华, 王孝义, 洪泓, 等. 半转翼的 Weis Fogh 效应及推力的仿真研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(1): 1-5.
- [9] LEE A Y, BRYSON A E, HINDSON W S. Optimal landing of a helicopter in autorotation[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2015, 11(1): 7-12.
- [10] 王德爽, 李刚, 杨宁. 某型自转旋翼无人机半实物仿真系统[J]. *兵工自动化*, 2014, 33(4): 22-25.