

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.06.014

## 国内外火炮身管烧蚀磨损问题研究进展

欧阳青, 于存贵, 张延成

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为提高火炮身管抗烧蚀性, 延长火炮寿命, 提高火炮的使用精度, 对火炮身管烧蚀磨损问题进行深入研究。归纳总结国内外火炮身管延寿的各种措施, 对目前计算火炮身管烧蚀磨损的分析计算方法(经验公式法、壁温估算烧蚀磨损法、热化学烧蚀模型法)进行对比分析。该研究可为相关人员在了解目前国内外对火炮身管延寿方面的研究情况提供参考。

**关键词:** 身管寿命; 烧蚀; 磨损

**中图分类号:** TJ303<sup>+</sup>.1 **文献标志码:** A

## Development of Erosion and Wear of Gun Barrel

Ouyang Qing, Yu Cungui, Zhang Yancheng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to improve the gun barrel's ablation resistance properties, extend the gun barrel's life, improve the precision of artillery, and research the problem of erosion and wear of gun barrel effectively. Summarized the domestic and foreign measures of extending the gun barrel's life, analyzed and compared the analysis method for calculating the gun barrel's erosion and wear (experience formula method, wall temperature estimation method, thermochemical ablation model). The research provides reference for relevant personnel in understanding the extension of gun barrel's life.

**Key words:** gun barrel life; erosion; wear

### 0 引言

火炮身管烧蚀磨损是由于发射弹丸引起的热、机械、化学等多方面因素同时作用于身管膛面而产生的一种膛面损坏的复杂现象。这种损坏现象会导致膛内压力和弹丸初速的下降, 射弹散布增大, 射程和精度下降直至报废<sup>[1]</sup>。火炮身管的烧蚀磨损是一个涉及多个方面的综合过程, 到目前为止, 身管的烧蚀磨损问题仍然是火炮工程实践难题。目前, 国内外科技工作者结合近几十年世界上最新科研成果, 尤其是新材料技术、新型火药技术和更精确的数值分析法, 在分析计算身管烧蚀问题方面做了许多有益的尝试。因此, 笔者在总结、归纳前人在身管延寿方面研究成果的基础上, 对国内外计算火炮烧蚀磨损的方法进行研究。

### 1 降低身管烧蚀磨损的措施

#### 1.1 改进发射药

##### 1.1.1 低爆温发射药

使用低爆温的冷火药能够缓解身管烧蚀磨损现象, 但是由于发射药能量通常与火药气体温度是正相关的。采用冷火药可能会导致弹丸初速不高, 因而不是最佳选择。

##### 1.1.2 添加缓蚀剂

添加缓蚀剂能有效缓解身管内膛的烧蚀并广泛采用。其添加方法<sup>[2]</sup>有 2 种: 在弹体和药室之间的内膛壁的人工纤维上涂抹缓蚀剂; 或将缓蚀剂混在发射药中。

目前使用广泛的缓蚀剂中含有钛的氧化物(TiO<sub>2</sub>)等化学成分。Seiler 等人通过试验发现往发射药中添加相对于发射药质量的 4%缓蚀剂, 能够降低 15%~20%的身管烧蚀<sup>[3]</sup>。

在发射药中添加缓蚀剂, 在提高身管抗烧蚀性的同时也会带来很多负面作用, 如火药燃烧不完全、残渣多、枪口焰大、挂铜现象严重等。但因为缓蚀剂能降低内膛温度, 从根本上缓解身管烧蚀, 且效果明显。因此缓蚀剂仍是缓解身管烧蚀的主要措施。

##### 1.1.3 改变发射药化学成分

发射药中的化学成分也是影响身管烧蚀磨损的一个因素。如氢元素和碳元素都会降低身管材料性能。Kimura 认为发射药中的氢元素需控制在 13%范围内, 以降低身管的烧蚀。Kimura 还对发射药中化学成分对身管的热化学侵蚀性进行排序<sup>[4]</sup>:



根据 Kimura 的排序可知, CO<sub>2</sub> 对身管材料侵蚀

收稿日期: 2012-01-05; 修回日期: 2012-02-27

作者简介: 欧阳青(1987—), 男, 浙江人, 硕士, 从事火炮身管烧蚀磨损以及身管寿命问题研究。

性最强,而 $N_2$ 能提高身管的抗烧蚀性。

虽然发射药的化学成分能影响身管的抗烧蚀性,但发射药的组成往往需要考虑弹药的作战效能等综合因素。因此,在实际应用中通过此种措施来防身管烧蚀有些困难。

## 1.2 改进弹体结构

弹体结构和弹带的材料性能都能影响身管的烧蚀磨损。弹体结构应对称,弹带应采用高熔点、耐用的材料,防止因弹带熔化而导致火药气体泄漏加剧身管烧蚀磨损。

## 1.3 改进身管性能

### 1.3.1 身管内膛热处理

对火炮身管内膛进行激光热处理,淬火处理后材料组织主要为细化马氏体,它不仅硬度高,还有利于阻碍裂纹扩展<sup>[5]</sup>。

王茹等用 $CO_2$ 激光处理12.7 mm枪管,发现由于在裂纹前端形成了超载塑性区阻滞了裂纹的扩展,使硬化层提高了身管抗热、抗疲劳裂纹的能力,实弹射击考核枪管寿命提高了40%<sup>[6]</sup>以上。

### 1.3.2 镀层技术

目前广泛使用的高收缩性铬镀层在缓解身管烧蚀磨损方面很成功,但其脆性较大,且对环境有害。而低收缩性铬镀层和通过化学气体沉淀法制作的钼镀层身管能克服高收缩性铬镀层身管的缺点<sup>[7]</sup>。镀钼技术比镀铬技术更安全环保,且具有优异的物理、化学性能。

### 1.3.3 改进身管材料

美国陆军研究实验室利用陶瓷的耐磨性和抗高温性优点,用 $\alpha$ -碳纤维陶瓷制备陶瓷基复合材料身管内衬,该身管可经受1 000次滑膛炮的单发射击,并在射击中可有效消除火药气体造成的应力和结构损伤。德国在吸取美国碳-碳复合材料身管研制经验的基础上,也采用三维纤维增强方法试制出纤维增强身管,并在身管内涂上 $Si_3N_4$ 或 $SiC$ 涂层,保证身管在1 750℃下不发生氧化反应<sup>[8]</sup>。

### 1.3.4 渗氮技术

当身管中的碳含量超过2.1%时,炮钢就会产生相变,变成铸铁。熔点温度也由1 723 K降到1 423 K。从而会导致炮钢的抗烧蚀磨损性能下降。Schaaf学者使用激光渗氮技术处理后的身管和镀铬技术处理后的身管抗烧蚀性能<sup>[9]</sup>相当。

通过对身管进行热处理、镀层、使用新型材料、

渗氮等技术的使用,能够有效地提高身管抗烧蚀性能,延长身管寿命。改进身管性能这一措施相比于采用低爆温发射药、改变发射药化学成分、改进弹体结构措施,其工程实用性更好,更容易推广使用。并且不受弹药种类、弹体结构的限制,而通过改进身管以提高身管抗烧蚀性能。

## 2 烧蚀磨损问题分析计算方法

鉴于火炮烧蚀磨损问题的复杂性,要完全模拟火炮发射时的烧蚀磨损现象相当困难,也没有必要。可以将身管烧蚀磨损问题进行工程简化处理,选择比较重要的物理参数进行仿真。

### 2.1 经验方法

Lawton和Laird使用简单的集总参数内弹道模型计算出火药气体中心流动参数,并利用计算出的火药气体中心流动参数和半经验公式来计算火药气体传递到膛壁上的热量和烧蚀磨损量<sup>[10]</sup>。

传递到膛壁上的最高温度(SI单位):

$$T_{\max} = \frac{T_f - 540}{1.8 + 7130d^{2.22} m_c^{-0.86} v_m^{-0.86}} + 300$$

烧蚀系数 $A$ :

$$A = 114 \exp[0.02(f_{CO} - 3.3f_{CO_2} + 2.4f_{H_2} - 3.6f_{H_2O} - 0.5f_{N_2})]$$

每发射一组弹的烧蚀磨损量 $\omega$ :

$$\omega = At_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{RT_{\max}}\right)$$

其中: $T_f$ 为中心气流温度; $d$ 为身管内径; $m_c$ 为装药质量; $v_m$ 为粘度系数; $f$ 为各个气体的体积百分含量。

以上的经验公式对于火炮初始设计、初始试验有积极作用,也能进行快速初步估计火炮的烧蚀程度,较之建模分析计算而言,经验预测很简便。

### 2.2 计算分析法

#### 2.2.1 由壁温计算烧蚀量

1) Heiser等人通过计算流体动力学方法计算传递到身管内壁上的温度后,根据相关烧蚀磨损量和温度关系式预测身管的烧蚀磨损程度。此种方法计算壁温结果与实验数据测出的壁温比较得出:计算流体动力学方法算出的结果在膛壁表层( $<10\mu m$ )和实测值拟合度较高;在厚度较大的面上( $>100\mu m$ ),模拟结果低于实测值<sup>[11]</sup>。

2) Conroy等人耦合一维传热模型和一维两相流内弹道模型,对湍流边界层进行工程简化处理。由于边界层很薄,可以用平板模型求解边界层换热系数,从而根据一维导热方程求出壁温。其简化处

理边界层的对流换热系数<sup>[12]</sup>为:

$$h = 0.037 \frac{\mu}{X} Re^{0.8} \frac{C_f}{C_{f_i}} c_p$$

式中:  $X$  是等效平板长度;  $c_f/c_{f_i}$  是可压缩表面系数;  $Re$  为雷诺数;  $c_p$  为比定压热容。以上参数都是气流速度  $\mu_g$ , 温度  $T_g$ , 密度  $\rho_g$ , 气体粘性系数  $\mu$  的函数。

3) Conroy 等人在之前基础上采用熔化去除机制进一步改进。改进后的模型是热熔化、热量传递、质量转移、内部热化学等的耦合作用。

李明涛等人参考了这种基于熔化层理论的模型, 但没有考虑火药气体的化学反应。推导出身管熔化层厚度积分方程<sup>[13]</sup>:

$$S(t) = \frac{\int_0^{t_1} q_w dt + \int_0^{t_1} \lambda \frac{\partial T_s}{\partial r} dt}{\rho L}$$

式中:  $S(t)$  为射击一次所造成的熔化层厚度;  $q_w$  为火药气体对膛面的热流密度;  $t_1$  是燃起温度由峰值点下降到表层熔点温度的时刻;  $\lambda$  为固体导热系数;  $T_s$  为身管熔化过程中固相的温度;  $L$  为溶解热;  $\rho$  为炮钢材料密度。

### 2.2.2 热化学烧蚀模型

热化学烧蚀模型包括 5 个子模块: 内弹道计算模型、热化学模型、边界层烧蚀计算模型、身管烧蚀计算模型以及 ABAQUS 计算身管内壁机械磨损模型<sup>[14]</sup>, 如图 1。

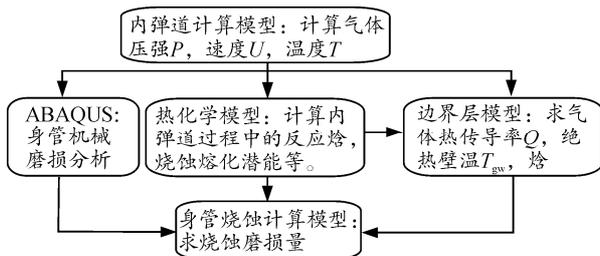


图 1 热化学烧蚀模型

### 2.3 计算方法比较

经验方法因其简便性, 能在火炮烧蚀磨损预测上提供参考性结果。经验公式通常是在特定条件下, 针对某种特定对象进行试验, 并由此推导出的经验性公式。因此, 这种公式都要在特定的使用范围内使用, 局限性较大, 对结果的精确度不好掌握。

通过计算壁温, 再由壁温和身管烧蚀磨损量之间的指数关系式, 得出身管烧蚀磨损量。这种方法计算精确度较高, 目前国内学者研究火炮身管烧蚀问题, 大多是通过计算内膛壁温而求身管烧蚀磨损

量的。基于熔化去除机制方法求解烧蚀磨损量方法也是在这基础上产生的, 但在计算火炮连发情况下的烧蚀磨损量求解有待完善。

建立热化学烧蚀模型, 计算身管烧蚀磨损量需要考虑化学侵蚀和热烧蚀的耦合。这种模型已在国外建立, 并在实际应用中得到与实际一致的结果。

### 3 结束语

笔者对国内外学者在身管延寿方面的研究进行了归纳, 并对目前计算火炮烧蚀磨损的方法进行了比较分析。但考虑到生产能力、加工成本、技术发展状况等因素, 应选取适宜国情的研究火炮烧蚀磨损方法或技术。

### 参考文献:

- [1] 张喜发, 卢兴华. 火炮烧蚀内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 190-209.
- [2] Ian A. Understanding and Predicting Gun Barrel Erosion[R]. Australia: Technical Report DSTO, 2005.
- [3] Seiler F, Zimmermann K, Schedblauer F. Erosion in a 20mm Gun Produced by Normal and LOVA Propellant Charges[R]. France: German-French Research Institute of Saint-Louis, 1989.
- [4] Kimura J. Hydrogen Gas Erosion of High-Energy LOVA Propellants[R]. U.S.: In 16th International Symposium on Ballistics, 1996.
- [5] 陈永才, 宋道志, 王建中. 国内外火炮身管延寿技术研究进展[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 330-334.
- [6] 王茹, 安世民. 激光处理不镀铬枪炮管提高抗烧蚀寿命的研究[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(2): 222-226.
- [7] Roland A. Investigation of Chemically Vapor Deposited Tantalum for Medium Caliber Gun Barrel Protection[R]. U.S.: New Jersey Institute of Technology, 2008.
- [8] Smith D B. Composite Tube for Gun Barrel: US, 6457274[P]. 2002-10.
- [9] Paul J, Charles S, James K, et al. The Role of Nitrogen in Gun Tube Wear and Erosion[R]. U.S.: US Army Research Laboratory, 2006, ARL-TR-3795.
- [10] Lawton B, Laird M. Influence of Gas Leakage on Heat Transfer and Wear in Gun Barrels[R]. U.S.: In 16th International Symposium on Ballistics, 1996.
- [11] Heiser R, Seiler F, Zimmermann K. Computational Methods and Measurements of Heat Transfer to Gun Barrels With and Without Coatings[R]. Canada: In 14th International Symposium on Ballistics, 1993.
- [12] Paul J Conroy. Gun Tube Thermal Management[R]. U.S.: U.S. Army Ballistic Research Laboratory. MD 21005, 1993.
- [13] 李明涛, 崔万善, 姚哲, 等. 基于内表面熔化层理论的身管寿命预测方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2009(1): 5-8.
- [14] Samuel S, Peter O'Hara, George P. Thermochemical Erosion Modeling of The 25mm M242/M791 Gun System[R]. U.S.: The 33th AIAA Joint Propulsion Conference, 1997.