

doi: 10.7690/bgzdh.2018.06.007

火炮身管寿命理论预测方法

罗天放, 陈荣刚

(陆军军官学院四系, 合肥 230031)

摘要: 针对火炮身管寿命预测问题, 对火炮身管寿命理论预测方法进行探讨。描述了身管寿命降低过程与表征, 分析了疲劳寿命、烧蚀磨损寿命以及温度及燃气 3 大因素对身管寿命造成的影响, 重点概括了预测身管寿命的理论方法, 并逐一进行分析。分析结果表明: 理论预测身管寿命方法的预测结果较为准确, 对研究火炮身管寿命理论预测有一定的参考价值。

关键词: 身管寿命; 寿命预测; 烧蚀磨损; 疲劳寿命

中图分类号: TJ303⁺.1 **文献标志码:** A

Life Prediction Theoretical Method of Gun Barrel

Luo Tianfang, Chen Ronggang

(No. 4 Department, Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: Aiming at the problem on the life prediction of gun barrel, this paper discusses its life prediction theoretical method of gun barrel. Describes the process of reducing and characteristics of the barrel life and analyzes 3 factors that affect it, including fatigue life, erosive abrasion life and the impact of the barrel by temperature and gas. The paper summarizes the theoretical methods of gun barrel life prediction. The analysis results show that prediction results are accurate and have some reference value for life prediction of gun barrel.

Keywords: barrel life; life prediction; erosive abrasion; fatigue life

0 引言

现代高技术战争的发展对武器有了更高的要求。目前, 火炮正朝着增加威力、射速和提高区域适应性的方向发展, 这使得身管受到更严重的烧蚀磨损以及热作用。身管是火炮的重要部件, 其寿命将会制约火炮的发展^[1-4]。身管寿命指火炮按规范条件以最大允许发射速度射击, 直至身管在弹道指标降低到允许的数值或者当身管报废瞬间发射的最少射弹数^[5]。各国学者从不同的角度为出发点建立了定义身管寿命的不同术语, 如身管弹道寿命、疲劳寿命、极限寿命、使用寿命、经济寿命等^[6]。火炮的射击过程非常复杂, 工作时很难直接预测其寿命, 目前常采用理论预测方法对寿命进行估算; 因此, 理论预测方法的预测结果直接影响了火炮的作战效能。笔者旨在对各种理论预测方法进行简要概述, 并对火炮身管寿命预测趋势进行探讨。

1 身管寿命失效过程及其表征

身管在射击的过程中会受到各种应力作用, 如交变热应力和机械应力等。随着高温高压的火药气体对身管的冲击破坏以及弹丸高速运动时发生的反

复烧蚀磨损, 其内膛结构的形状与尺寸将会发生变化, 身管内壁产生疲劳损伤, 最终产生微观裂纹。随着射击过程的进行, 身管内壁环境进一步恶化, 疲劳损伤能耗不断增大, 裂纹不断扩展, 最终使武器报废; 并且身管内径增大会造成弹丸起动力和挤进阻力降低, 使身管初速和最大膛压下降。这些原因将最终改变火炮性能, 当性能下降到不能完成射击过程时就认为身管寿命终止^[7-8]。

身管寿命终止有很多表现形式, 例如弹丸在弹道上失去稳定、弹带削光、射击精度变差、初速下降至规定量值、初速或然误差增大、射弹密集度下降到规定值、弹丸早炸、连续瞎火、炸膛(图 1)以及不能完成作战目的等^[9-10]。



(a) 美国某型坦克炮身管炸裂 (b) 韩国 155 mm 榴弹炮爆炸事故

图 1 炸膛现象

收稿日期: 2018-03-18; 修回日期: 2018-04-08

作者简介: 罗天放(1994—), 男, 安徽人, 硕士, 从事机械电子工程研究。

2 影响身管寿命的主要因素

身管是火炮最基本和最重要的部件，其寿命高低取决于身管和弹丸结构、弹道设计、发射药化学成分、身管材料性能等多种因素。文献[11]认为弹丸发射过程对身管内膛的作用是影响身管寿命的主要因素，主要表现包括：弹丸对膛线的机械磨损、火药气体的冲刷和烧蚀作用、热化学应力作用。各国专家普遍认为决定身管寿命的最重要 2 大因素是疲劳寿命和烧蚀磨损寿命。疲劳寿命是在周期承载的条件下身管产生裂纹并且扩展最终失去稳定发生断裂或炸膛所构成；烧蚀磨损寿命是由身管内膛烧蚀破坏而丧失要求的弹道性能所构成的。根据身管类型的不同，这 2 种作用的主次也不同^[12-13]。

2.1 疲劳寿命

疲劳寿命指火炮在各种因素反复作用下出现身管机械性能下降以及内表面产生裂纹并扩展，直到断裂时的寿命。疲劳寿命分为裂纹形成、裂纹扩展和快速断裂 3 个阶段^[14]。国内外学者以身管疲劳裂纹扩展为研究对象，开展过许多疲劳破坏机理的研究^[15-16]。

2.1.1 疲劳破坏的原因

造成身管疲劳破坏的原因有很多，主要有以下 2 个方面：弹带挤压应力对身管的疲劳破坏；膛内火药气体压力造成的疲劳破坏。文献[4]通过建立某型火炮身管、弹带、弹丸 3 结构的有限元模型，对比以上 2 种情况下的疲劳寿命，得出是二者共同加剧了身管的疲劳破坏这一结论，并且发现二者对身管疲劳寿命的影响程度不同，火药气体压力比弹带挤进压力要大得多。

2.1.2 确定疲劳寿命的方法

目前国内外有 3 种方法确定身管疲劳寿命^[17-18]：1) 实弹射击试验，此方法人力物资耗费巨大且周期长，已不再采用；2) 液压疲劳模拟试验，此方法费用低且适应性强，已被欧美多国采用；3) 通过断裂力学理论对身管疲劳寿命进行估算^[19]，目前此方法已经被广泛应用。

2.1.3 提高疲劳寿命的措施

早期研究认为疲劳寿命由材料韧性决定，文献[20]发现：提高断裂韧性而不改变其强度等级的情况下可以使裂纹扩展速率降低，有效地提高了疲劳寿命。目前提高疲劳寿命的方法有 2 种：改善身管

用刚的断裂韧性以及身管自紧技术。文献[21]认为身管自紧技术可以在自紧残余应力存在的同时改善发射时管壁内应力分布状态，提高身管承受膛压的能力从而提高身管疲劳寿命。

2.2 烧蚀磨损寿命

2.2.1 烧蚀磨损过程

热、化学和机械因素共同作用导致身管内膛烧蚀磨损^[22]。文献[23]在分析不同程度下的烧蚀过程后将烧蚀机理分成 2 类：1) 在内膛表面温度比其熔点低时，烧蚀机理主要是燃烧的火药气体与内膛表面发生反应形成氧化皮，最后被高速气流带走；2) 在内膛表面温度比其熔点高以后，主要烧蚀机理变成内表面的熔化冲刷。当第 2 种情况发生时可以简化烧蚀过程为：火药气体动力作用使得烧蚀熔化物被高温、高压、高速的火药气体带走，并且随着烧蚀过程的进行，身管内壁表面不断形成塑性流动的熔化层，进而开裂、破碎，最终在高速气体冲刷下以微粒的形状剥落并被带走，内膛直径不断扩大并且烧蚀表面不断外移。以上过程循环往复直至火药燃气产生的热流量维持不了时，此过程才会终止。由此可见，身管内膛烧蚀直径扩大的主要因素是燃气热因素和燃气动力作用^[23]。

2.2.2 烧蚀磨损的规律

烧蚀磨损最严重的地方位于阳线表面和膛线的起始段，因此专家学者在评价身管寿命时通常把膛线起始部的内膛扩展量当做评价标准^[22]。火炮不断进行射击也加剧了身管内膛烧蚀磨损。

在火炮发射时，内膛几何形状尺寸会发生改变，这是由于高温高压的气体烧蚀冲刷作用和弹丸的冲击摩擦而造成的。图 2 为身管阳线变化曲线。从图可以看出：磨损最严重的地方位于膛线起始部前段 I 处，此后位置的磨损较轻。炮口部 III 磨损也较重^[5]。

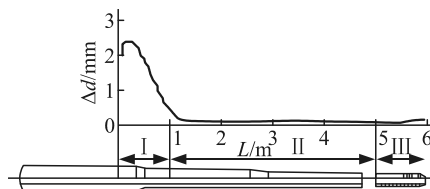


图 2 身管阳线变化曲线

2.2.3 影响烧蚀磨损的主要因素及后果

身管烧蚀磨损是由一种主导因素和众多相关因素交互作用产生的结果^[23]。其主要影响因素有：1)

膛内火药气体与内膛表面金属产生的化学作用；2) 火药气体的机械作用；3) 火药气体的热作用等^[3]。图 3 为枪炮身管烧蚀模型。

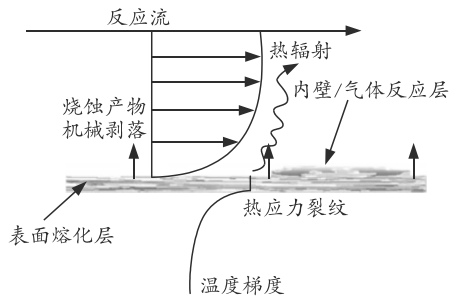


图 3 炮(枪)身管烧蚀模型

身管的烧蚀磨损会使内膛结构发生变化, 严重时改变火炮内外弹道性能。例如: 引起初速偏差, 使得火炮射程和精度下降; 恶化弹丸在膛内运动时的规律, 从而增大弹丸散布面积^[24]; 射击过程中发生弹丸瞎火甚至早炸等情况。当这些因素使武器无法满足使用要求时, 身管即告报废。

2.3 温度及燃气作用

2.3.1 身管升温与散热过程

身管在发射过程中会反复出现加卸压、升降温情况。内膛中大量高温、高压、高速的火药燃气, 在连续射击时会和身管内壁产生强迫对流换热, 会把热量传递给身管, 升高身管温度, 外壁则承受热辐射和空气对流作用^[7]。在散热时, 热量沿径向由身管内壁传至身管外壁, 又传递至表面与空气进行热量交换。靠近身管表面的空气受热后, 密度变小并向上升起进而将热量带走, 表面周围的空间由冷空气来补充。此过程重复几次后身管的热量即可散失, 完成散热。此传热过程称为自然对流换热^[2]。

2.3.2 身管内外壁的温升规律

由于连续射击时膛内作用时间极短, 因此沿 2 维轴向和径向是身管壁内的热传导方向。专家学者通过研究发现, 沿半径方向变化的身管温度梯度比沿轴向方向的梯度快 1 000 倍以上^[25]。并且径向传递的热量会产生 2 个影响: 1) 内表层熔化; 2) 通过固液界面传入非熔化层^[23]。

文献[11]通过内膛进行热分析计算, 发现在连续射击的情况下, 内膛表面的温度变化规律类似锯齿形。在发射的瞬间, 身管内膛表面温度会类似指数规律不断升高直到该发射弹时的极大值, 在单发结束后, 其温度又会以类似指数规律下降。下一次射击时, 内膛表面温度会比上一次射击开始时的温

度高。并且随着射速的提高, 内膛表面的温升速度会更快更高。

3 理论预测身管寿命的方法

射击过程会受到各种因素的共同影响, 是一个非常复杂的过程, 且射击时身管内膛为高温、高压、高速磨损的状态, 无法直接对身管进行快速预测; 因此, 目前常用理论预测方法来估算身管剩余寿命。理论预测身管寿命的方法主要有 2 种: 一是根据身管烧蚀机理或者挤进过程进行理论模型的推导来预测身管的寿命; 二是根据试验得出退化数据, 用数学方法处理此数据, 进而得到数学模型来进行寿命预测^[26]。

3.1 理论模型法

理论模型法指通过研究身管烧蚀机理或寿命降低过程, 进而得到表示此过程的各种变量以及它们相互之间的物理数学关系。近一个世纪以来, 国内外专家一致认为壁温与烧蚀量之间的关系是研究身管烧蚀模型的关键^[27]; 因此, 找出膛壁温度与烧蚀率的关系将成为未来身管寿命研究方向。文献[23]应用半无限大物体假设以及内表面熔化层理论模型, 得出了身管内壁熔化层厚度的积分方程:

$$S(t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} q_w dt + \int_{t_1}^{t_2} \left[\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \right] dt}{\rho L}$$

式中: $S(t)$ 为射击一次形成的融化层厚度; t_2 为燃气温度下降时等于表层熔点的时间; t_1 为内表面温度升高到表层金属熔点的时间; q_w 为火药气体对膛面的热流密度; λ_s 为固体导热系数; ρ 为炮刚材料密度; L 为熔解热; T_s 为身管熔化时的固相温度。

3.2 数学模型法

目前基于退化数据的处理方法有蒙特卡罗模拟法、灰色预测法、支持向量机法、神经网络法等。

3.2.1 蒙特卡罗模拟法

蒙特卡罗模拟法是一种数值计算方法, 可以通过估算系统响应函数的统计量, 进而求出近似解。其估算方法为随机变量的统计抽样试验。蒙特卡罗模拟法有大量的随机抽样优势, 可以解决身管寿命预测中由众多因素造成的不确定性问题, 并且解决效率高^[28]。

文献[7]基于蒙特卡罗原理建立了身管疲劳损伤的评估模型, 并且与局部应力应变法结合得到了

可靠的寿命预测方法；文献[1]将某速射武器作为研究对象，采用随机有限元法与蒙特卡罗法求解，得到了身管内膛径向磨损量的分布规律；文献[19]用蒙特卡罗数值模拟研究了自紧身管临界裂纹尺寸变化的可靠性，得出的身管自紧残余应力解比以往数据都要精确，因此证明此方法能够有效提高计算身管临界裂纹尺寸的精确性；文献[28]模拟了身管疲劳寿命加速试验，并用蒙特卡罗法得出身管疲劳寿命的分布规律，从而证明了身管疲劳寿命加速试验是可行的。

3.2.2 灰色系统预测方法

灰色系统是一种包含已知未知信息的系统。灰色预测的步骤是通过处理已知的部分原始数据，建立灰色模型并且掌握其系统发展规律，最终达到能够定量预测未来数据的目标。灰色预测的优点是可以弱化原始数列的随机性，从而加强其规律性^[29]。

传统灰色预测模型有灰色 GM[1,1]模型法，但该模型公式复杂且计算较多，只适用于时效性要求高的数据预测，而身管寿命变化过程是一种中长期过程；因此，该模型运用到寿命预测时会有较大误差。现代灰色预测模型有灰色 Verhulst 模型、灰色线性模型等，通过改进后可降低时效性要求。

文献[22]以某型火炮身管烧蚀磨损量为原始数据，将优化的灰色 Verhulst 模型与原始数据做对比，验证了新模型的准确性；文献[8]将灰色模型与线性回归模型的优点相结合，建立了灰色线性回归组合模型；通过与传统灰色模型在某型火炮身管寿命预测的准确性方面做对比，证实了新模型方法的有效性；文献[30]提出一种新型预测方法，将改进的非等间隔灰色理论和 BP 神经网络组合，实验证明该方法提高了预测身管烧蚀磨损量的精度。

3.2.3 支持向量机法

支持向量机 (support vector machine, SVM) 是一种机器学习理论，由 Vapnik 等在统计学理论的基础上提出。它克服了非线性、小子样以及高维度等困难，可以将非线性问题转化为线性问题，并且有很高的预测精度^[11]。它最初应用于模式识别和人工智能领域，目前已推广到包括身管寿命检测在内的多属性决策和评估等领域。

文献[31]构建了坦克炮身管寿命预测模型，通过使用最小二乘支持向量机法，将模拟试验得出的寿命与某型火炮射击试验测出的实际寿命数据作对

比，证明了该模型的准确性；文献[32]在优化了疵病特征体系以后，用最小二乘支持向量机法分类识别了各种内膛疵病，解决了火炮内膛小样本疵病识别问题，提高了疵病识别效率和质量；文献[33]发挥了支持向量机的小样本学习和数据挖掘能力的特点，将该方法应用于火炮质量综合评估，在有限数据中寻找到了规则的客观规律。

3.2.4 神经网络法

神经网络是一种特殊的算法数学模型，可以进行分布式并行信息处理，其原理为通过模仿动物的神经网络行为特征而实现。神经网络能够基于系统的复杂程度，通过调整内部节点之间的相互连接的关系，最终目的是实现处理信息。并且该网络可以根据学习算法对样本进行学习，从而调整神经网络中各个神经元之间的联系；因此，可以进行模式识别和仿真。神经网络自适应、自学习的功能可以对武器身管剩余寿命进行预测，通过已有的数据作为样本学习^[34]。常用的神经网络法有 BP 神经网络法、卷积神经网络法等。其中 BP 算法的优势在于可以通过不断修正各层神经元的连接权重，最后形成可以符合要求的网络结构误差；卷积神经网络可以直接把图像作为网络输入，因此避免了传统识别算法中复杂特征提取和数据重建的过程，并且有效减少了需要训练的参数，表现出极强的学习能力^[9]。

文献[34]基于用 BP 神经网络模型将某型坦克炮发射弹数与直径变化的统计数据进行分析，精确预测了其坦克炮的身管寿命，得出此型坦克炮身管寿命终止时直径为 107 mm，与事实情况相吻合，证明了该模型的可行性；文献[35]利用 BP 神经网络良好的非线性逼近能力和泛化能力，通过计算某型火炮身管膛内烧蚀磨损量，得到的数据与在射弹量较少的情况下得出的真实试验数据十分吻合，预示了 BP 神经网络法在预测火炮身管寿命方向有广阔的前景；文献[9]采用卷积神经网络法分类识别了火炮身管全景图中的多种疵病，实验结果显示其识别率高达 92%，证明该技术准确率很高，因此该方法能够减轻内膛疵病检测工作的负荷。

4 结论

笔者围绕火炮身管寿命这一大课题，对其失效过程、影响因素、理论预测方法进行了归纳总结，重点介绍了预测身管寿命的理论与数学模型方法。从身管寿命预测趋势来看，射击条件标准化与理论

预测身管寿命方法将会是未来火炮身管寿命预测研究的主要方向。

参考文献:

- [1] 樊黎霞, 刘伟. 基于随机有限元法的武器身管寿命预测[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(2): 8-11.
- [2] 彭克侠, 刘树华, 曹广群, 等. 某火炮身管温度场分析[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(11): 80-83.
- [3] 魏东. 延长火炮身管寿命之分析[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(2): 173-175.
- [4] 化斌斌, 马吉胜, 孙河洋, 等. 弹带挤进压力与火药气体压力对身管疲劳寿命影响研究[J]. 机械设计与制造, 2013, 51(6): 119-121.
- [5] 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: 180-182.
- [6] 徐东升, 贾长治, 刘广生, 等. 火炮身管寿命预测技术发展研究[J]. 价值工程, 2013, 5(37): 316-318.
- [7] 闫建伟, 方峻. 身管疲劳损伤与可靠寿命分析[J]. 机械设计与制造, 2016, 54(9): 7-11.
- [8] 孟翔飞, 王昌明, 何博侠, 等. 基于灰色线性回归组合模型的火炮身管寿命预测[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(4): 635-638.
- [9] 汤一平, 韩国栋, 鲁少辉, 等. 基于 CNN 的火炮身管全景图像此病识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 871-878.
- [10] 王振兴, 原梅妮, 李立州, 等. 镀镍缠绕式复合材料身管径向散热过程的数值模拟[J]. 火炮发射与控制学报, 2015, 36(3): 6-11.
- [11] 张国平, 王茂林, 杨东, 等. 某火炮身管寿命问题探讨[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 34(3): 1-5.
- [12] 张树松. 材料、工艺与枪炮身管寿命[J]. 西安工业学院学报, 1989, 9(1): 1-9.
- [13] 陈刚, 赵廷军. 火炮身管烧蚀机理的探讨[J]. 合肥炮兵学院学报, 1996, 16(4): 22-29.
- [14] MAHDAVINEJAD R A. Prediction of Cannon Barrel Life[J]. Journal of Achievements in Materials & Manufacturing Engineering, 2008, 30(1): 11-18.
- [15] UNDERWOOD J H, AUDINO M J. Army Cannon Fatigue Life Evaluation: Crack Initiation, Fracture Mechanics, and NDI[R]. Technical Report ARCCB-TR-96008, 1996: 1-9.
- [16] WU B, CHEN G, XIA W. Heat Transfer in a 155 mm Compound Gun Barrel With Full Length Integral Midwall Cooling Channels[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(8\9): 881-888.
- [17] 顾金桂. 国外炮管疲劳及其研究方法:上[J]. 现代兵器, 1982, 4(9): 10-14.
- [18] 顾金桂. 国外炮管疲劳及其研究方法:下[J]. 现代兵器, 1982, 4(10): 35-38, 41.
- [19] 陈爱军, 查子初. 自紧身管临界裂纹尺寸的概率断裂力学研究[J]. 应用力学学报, 2005, 22(1): 36-40.
- [20] 张树松, 周淑兰, 仝爱莲. 提高调质高强度钢韧性及其机理的研究[J]. 材料研究学报, 1988, 2(4): 34-43.
- [21] AUSTIN B A, REINER A N, DAVIDSON T E. Paper 35: Low Cycle Fatigue Strength of Thick-Walled Pressure Vessels[C]// Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings. SAGE Publications, 1967: 91-105.
- [22] 孟翔飞, 王昌明, 何博侠, 等. 火炮身管烧蚀磨损的灰色预测模型[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(3): 5-7.
- [23] 李明涛, 崔万善, 姚哲, 等. 基于内表面融化理论的身管寿命预测方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2009, 30(2): 5-8.
- [24] 潘玉田. 炮身设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 145-154.
- [25] 高志恒, 苏晓鹏. 高射频自动机射击模式下身管寿命分析[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(12): 6-9.
- [26] 方骏, 吴华晴. 融合理论退化模拟与试验数据的身管寿命预测[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(10): 1468-1472.
- [27] 高付申, 邱文坚, 梁世超, 等. 火炮身管寿命预测问题的研究[J]. 南京理工大学学报, 1997, 21(3): 229-232.
- [28] 李家坤, 杨国来, 葛建立, 等. 基于蒙特卡罗模拟的身管疲劳寿命加速试验与分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(3): 84-87.
- [29] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 116-118.
- [30] 易怀军, 刘宁, 张相炎, 等. 基于优化的非等间隔灰色理论和 BP 神经网络的身管磨损量预测[J]. 兵工学报, 2016, 37(12): 2220-2225.
- [31] 徐达, 武新星, 郭磊, 等. 基于最小二乘支持向量机的坦克炮身管剩余寿命预测方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(1): 42-44.
- [32] 傅建平, 雷浩, 甘霖, 等. 基于粗糙集和支持向量机的火炮内膛疵病识别方法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(1): 54-57.
- [33] 胡胜海, 何蕾, 徐鹏, 等. 基于灰色特征加权支持向量机的火炮质量评估[J]. 应用科技, 2011, 38(1): 21-25.
- [34] 卞拥峰, 刘焕章, 王永彬, 等. 基于 BP 神经网络的坦克炮身管剩余寿命的预测分析[J]. 兵工自动化, 2009, 28(5): 34-35.
- [35] 陈国利, 韩海波, 于东鹏. BP 神经网络的身管寿命预测方法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(9): 1364-1366.