

火炮身管失效机理和寿命预测

刘帮俊, 陈荣刚, 吴斌

(中国人民解放军陆军军官学院, 合肥 230031)

摘要:针对身管寿命预测这个长期研究的难点问题, 概括了当前预测身管寿命的主要方法和模型, 并对各自的特点和不足进行了分析。鉴于传统身管寿命预测技术不能准确预测身管失效时间, 根据身管损伤状况、外壁面应变和射弹数(寿命)的内在联系, 提出了基于身管外壁面应变变化量的身管寿命预测方法。

关键词:身管失效; 寿命预测; 应变变化量

本文引用格式:刘帮俊, 陈荣刚, 吴斌. 火炮身管失效机理和寿命预测[J]. 兵器装备工程学报, 2016(12): 121-125.

Citation format: LIU Bang-jun, CHEN Rong-gang, WU Bin. Failure Mechanism and Life Prediction of Gun Barrel[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(12): 121-125.

中图分类号: TJ3

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2016)12-0121-06

Failure Mechanism and Life Prediction of Gun Barrel

LIU Bang-jun, CHEN Rong-gang, WU Bin

(Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: Aiming at the difficult point in the long-term research on the life prediction of gun barrel, this paper summarized the methods and models of the life prediction of gun barrel, and analyzed the characteristics and shortcomings. In view of the traditional life prediction methods could not accurately assess the failure time of gun barrel. According to the relationship among the barrel health, outside surface strain and rounds (barrel life), a way of life prediction of gun barrel which based on strain variation was put forward.

Key words: failure mechanism; life prediction; strain variation

身管是火炮的重要零部件之一, 其寿命是指火炮按射击规范进行射击, 弹道性能降低到战术指标允许值以下或发生疲劳破坏前身管所发射的当量全装药的射弹数目, 前者称身管烧蚀磨损寿命, 后者称身管疲劳寿命^[1]。当量减装药的身管寿命, 通过火炮减装药等效换算为全装药的方法转换得到^[2]。火炮身管的工作环境为高温、高压、高速火药燃气和弹带机械摩擦的复合作用, 烧蚀磨损和疲劳是影响身管寿命的主要因素。在复杂工况下, 通过直接测量的方法对身管健康状况进行监测十分困难。身管寿命的长短关系到火炮作战效能的高低和使用者的安全, 对整个火炮系统具有重要意

义, 国内外学者对烧蚀磨损和疲劳引发的身管失效机理和寿命预测进行了大量研究, 取得了诸多成果。本文对烧蚀磨损和疲劳影响身管寿命的研究状况与身管寿命的预测方法进行概述, 并针对现有身管寿命预测方法的不足, 提出一种身管寿命预测方法。

1 身管烧蚀磨损

1.1 烧蚀磨损

火炮发射过程中, 燃气温度达 2 500 ~ 3 200 °C, 身管内

收稿日期: 2016-07-25; 修回日期: 2016-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475471)

作者简介: 刘帮俊(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事机械电子工程研究, E-mail: rogy07@163.com。

陈荣刚(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事机械电子工程研究。

吴斌(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事枪炮, 摩擦学与表面工程研究, E-mail: mewubin@tom.com。

表面 0.01 ~ 0.2 mm 厚金属层温度在 2 ms 的时间内能达 1 000 °C 以上^[3]。高温下,身管内表面金属变脆、产生裂纹;与燃气化学反应生成 FeO、FeC₃ 等比炮钢熔点低 250 ~ 300 °C 的化合物和奥氏体、马氏体^[4];弹带挤进时的挤压力、摩擦力及高速燃气冲刷作用,使身管内表面局部熔化,产生烧蚀磨损。

Cote^[5]研究了渗碳、氢蚀、氢脆等化学因素对身管烧蚀磨损的影响。Lawton^[6]分析了身管的热-化学腐蚀,指出身管磨损量与内表面最高温度的指数关系。文献[7]对射击过程中热对身管的影响进行了简要综述。文献[8]研究了身管与弹带的机械磨损。文献[9]就热-机械裂纹和机械磨损对大口径身管的损伤情况进行了模拟研究。研究表明身管烧蚀磨损是热、化学和机械三者耦合作用的结果^[10],其中热作用是首要的^[11]。图 1 描述发射过程身管的烧蚀作用机理^[12]。图 2 为烧蚀后的身管内膛照片。

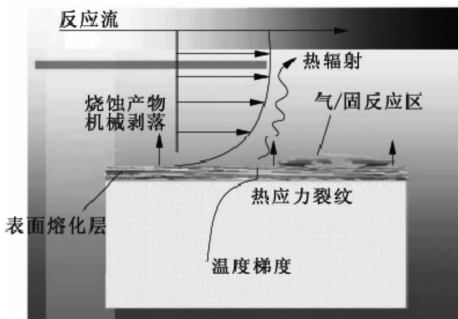


图 1 身管热-化学-机械烧蚀作用模型

1.2 弹带挤进过程

弹带挤进过程是指在燃气压力 P 推动下,弹带材料与膛壁碰撞、挤压,首先产生弹性变形;随弹底压力增加,弹带材料达到屈服极限,产生塑性变形,进而挤进膛线并被膛线完全侵彻的过程^[13]。

经典内弹道学将弹带挤进假设为瞬时过程,忽略其对身管寿命的影响。但挤进过程中弹带与膛线摩擦等因素,加快膛线烧蚀磨损速率,缩短身管寿命。因此,不能忽略其对身管寿命的影响。因挤进过程持续时间在 μs 量级^[14],用实弹

射击方法对其进行研究成本较高、难度较大。因此,主要通过数值模拟、仿真、有限元分析及模拟实验等方法进行研究,其结果与实际挤进过程相近^[15-20]。



图 2 烧蚀后身管内膛

1.3 烧蚀磨损寿命

身管寿命判定准则:凡出现初速下降超过 5%、弹带削光及横弹等情况,身管寿命终止^[21]。研究表明^[22]:初速偏差 10 m/s,命中概率为 64%;初速偏差 20 m/s,命中概率为 5%;初速偏差 30 m/s,命中概率为 0。因此,直接或间接分析初速下降量是研究身管烧蚀磨损寿命的主要途径,其方法有:膛线径向磨损量 W 法(简称 W 法)、药室增长量 ΔL 法、炮口初速测量法。

1.3.1 膛线径向磨损量 W 法

随身管内膛磨损,启动压力 P_0 、最大膛压 P_{\max} 及初速均下降,初速下降超过允许值时,身管寿命终止;挤压应力增加,当其增加到一定程度后,弹带削光,身管寿命终止^[23]。据此,目前国内外学者较多采用 W 法判别身管寿命终止与否。研究表明:膛线起始部向前约 1 ~ 1.5 倍口径段膛线磨损最为严重。因此,测量内膛径向磨损量就是在此段膛线上确定测量点,利用测径仪测量身管直径,计算出增量。为了提高测量精度,提出和改进了相应的测量方法与测量系统^[24]。但因操作的不可控性、每次测量点不完全重合等因素影响,测量结果相对误差较大,不能精确评估身管寿命。表 1 为某测量员对某炮内膛定点径向磨损量的测量值^[25],其结果表明误差较大。

表 1 某炮内膛定点径向磨损量测量数据

序号	测量方向								径向磨损量
	右	右下	下	左下	左	左上	上	右上	
1	0.810	0.820	0.842	0.840	0.804	0.786	0.868	0.820	0.823
2	0.850	0.738	0.810	0.765	0.762	0.781	0.801	0.758	0.783
3	0.725	0.728	0.807	0.777	0.710	0.778	0.819	0.771	0.764
4	0.777	0.734	0.810	0.760	0.757	0.799	0.768	0.782	0.773
5	0.761	0.786	0.777	0.779	0.761	0.781	0.750	0.769	0.770
极差	0.089	0.092	0.065	0.080	0.094	0.021	0.118	0.072	0.059
相对误差/%	12.28	12.64	8.370	10.53	13.24	2.700	15.73	9.500	7.720

针对 W 法测量误差大的情况,文献[25]提出了阳线膛膛段锥度法:即通过测量与计算膛段的斜率,根据其变化量评估身管烧蚀磨损寿命。此方法减小了测量点定位难等问题引起的误差,以研究膛段的磨损代替点的磨损,提高预测的可靠性。

1.3.2 药室增长量 ΔL 法

研究认为,每次弹丸装填时弹带的初始挤进量一定,即药室长度一定。随射弹数增加,内膛直径增大,若弹带初始挤进量不变,则药室增长。即测量药室增长量 ΔL 可知初速变化,进而预测身管寿命。但因弹丸装填力度、系统误差和测量误差等,难以精确地确定药室增长量与初速下降量的关系,预测精度低。文献[26]中对近百根身管的药室增长量进行测量分析表明: ΔL 法计算初速下降量的相对误差达 3.79%。现已不采用此方法预测评估身管的烧蚀磨损寿命。

1.3.3 炮口初速测量法

此方法在研究早期有所发展,测速方式有:炮口初速测定器测速、测速雷达测速、靶网测速和红外区截测速等。文献[27]中结合红外线发光管与光敏管,采用光纤传感器测量弹丸通过红外光区域时光通量突变的脉冲信号,测定弹丸初速,预测身管寿命。初速测量法虽能直接评估身管寿命,但由于其对测量环境要求高、测量仪操作复杂及价格昂贵等因素,难以在部队使用。

2 身管疲劳寿命

2.1 身管疲劳破坏的机理

疲劳破坏是指构件在交变载荷作用下,产生随时间变化的交变应力和应变,发生疲劳损伤。其特征有:构件在整体应力远小于材料强度极限 σ_b 时破坏、无明显塑性变形的突然破坏、局部破坏和损伤积累等。

身管的疲劳破坏是指发射过程中,火药燃气作用使身管内表面温度达 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 甚至更高、压力达 300 ~ 700 MPa,并处于升温、降温、加压、卸压的环境。连续射击时循环热应力与燃气压力对身管持续作用。当达到一定射弹数时身管内表面产生网状龟裂纹。随射弹数增加,初始裂纹沿身管径向和轴向扩展,当裂纹扩展到一定程度后,身管急剧失稳,发生断裂的疲劳破坏。同时,在不同射击频率下,挤进过程中急剧增大与变化的挤压应力和摩擦力亦造成身管疲劳破坏^[28]。身管疲劳本质上属于热机械疲劳,发射时,身管在同时受到温度和机械的作用下工作,热积累效应对热应力影响显著^[29]。

2.2 疲劳寿命

疲劳寿命是指火炮多次射击,热化学和应力等反复作用,身管机械性能下降,内表面产生裂纹并不断生长、扩展至最终断裂,身管寿命终止。从疲劳损伤的发展过程看,火炮身管的疲劳寿命分为裂纹形成、裂纹扩展和快速断裂 3 个阶段。因第三阶段裂纹失稳扩展,身管快速断裂,所以将前两个阶段称为疲劳全寿命阶段^[30]。介于疲劳破坏特征,身管的疲劳破坏往往在没有明显征兆的情况下发生。如美军 175

mm 榴榴炮,曾在没有任何异常或持续膛压的情况下发生炸膛事件。因此,研究身管疲劳寿命对武器系统的安全性、可靠性具有重要意义。

国内外身管疲劳寿命的确定方法有 3 种^[31]:法 1:实弹射击试验。能真实准确地确定身管疲劳寿命,但人力物资消耗巨大、试验周期长且不安全,不再采用。法 2:液压疲劳模拟实验。适应性强、费用低、结果可靠及操作安全,被英、美、德等多国采用。法 3:用断裂力学理论估算身管疲劳寿命,目前国内外学者广泛研究。

大量数据表明:在 100 ~ 200 发实弹后,火炮身管内表面初始裂纹深度 a_0 约为 0.5 ~ 1.0 mm。交变载荷作用下,裂纹逐渐扩展,当其达到临界裂纹深度 a_c 时,身管发生破坏。将裂纹由 a_0 扩展到 a_c 的阶段称为裂纹扩展阶段。研究表明,内膛初始裂纹数目和尺寸对身管疲劳寿命有着显著影响^[32]。身管疲劳试验的目的即是通过计算裂纹扩展速率 da/dN 来预测身管疲劳寿命。文献[1]中通过分析已有初始裂纹身管的疲劳试验数据,得到相应的 $da/dN - a, a - N$ 曲线图,预测身管疲劳寿命。文献[33]中通过有限元仿真,分析了挤进压力、燃气压力对身管疲劳寿命的影响,其结果与美军同型号火炮身管实弹试验相近。针对身管内表面裂纹深度测量难等问题,研究者提出射线探伤、磁粉探伤和超声探伤等无损检测法来测量裂纹深度。文献[34]中提出用相控聚焦超声导波检测技术检测身管不同损伤的特征信号,进而分析身管损伤情况及损伤速率。

3 身管寿命预测

火炮发射过程中,因烧蚀磨损和疲劳造成的身管损伤及寿命终止问题,极大地降低了火炮系统的可靠性和安全性。因此,如何在复杂工况下对身管寿命进行定性定量评估是火炮研究者与使用者亟待解决的问题。现对应用较多的 W 法预测身管寿命进行阐述,并针对现有身管寿命预测方法存在的不足,提出一种新的身管寿命预测方法。

3.1 W 法预测身管寿命

W 法是建立内膛直径与射弹数、炮口初速间的关系,通过测量身管内膛直径预测身管寿命。文献[12]建立身管内膛定点磨损量与射弹数的关系判别身管寿命

$$W_{\max} = 2(t_{sh} + A) \quad (1)$$

式中: t_{sh} 为膛线高度; A 为常数。

$$N = n[(W \rightarrow W_{\max})/L] \quad (2)$$

式中: $n[(W \rightarrow W_{\max})/L]$ 为身管轴向 L 处内膛磨损量 W 达到极限膛径磨损量 W_{\max} 时的射弹数。文献[35]建立内膛磨损量与初速下降率的关系判别身管寿命

$$\Delta v_0(Y) = C \cdot W^K \quad (3)$$

式中: $\Delta V_0 = (V_0 - V_{0n}/V_0)100\%$; $\Delta V_0(Y)$ 为预测的相对初速下降率; W 为内膛磨损量; C, K 为拟合参数。

$$N = n[\Delta v_0 = V_0 \max] \quad (4)$$

$$S_{N(Y)} = \frac{V_0 \max - v_0(Y)}{V_0 \max} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $S_{N(Y)}$ 为预测的火炮剩余寿命百分数; V_{0max} 为寿命终止时的相对初速下降率。

3.2 基于局部应变的身管寿命预测方法

目前身管寿命预测方法均不能做到实时准确,且是单方面考虑烧蚀磨损或疲劳对身管寿命的影响。随着现代战争对火炮性能要求的提高,能承受高膛压、高强度及质量轻的身管以及烧蚀磨损与疲劳耦合作用下身管寿命的预测成为新的研究重点。

3.2.1 方法可行性

研究表明,相同加载条件下,不同的结构其应变不同,反之,通过应变的变化可以推导结构的变化。文献[36]研究了输油管道内表面有无磨损时的应变情况,文献[37]研究了飞机结构在有疲劳裂纹时的应变情况,并通过其应变的变化确定磨损量的大小和疲劳裂纹的深度,分析结构的寿命。由此表明通过应变分析结构损伤的方法是可行的。

烧蚀磨损和疲劳耦合作用下,身管内表面局部磨损与形成裂纹,在燃气压力、挤压力和摩擦力等作用下,身管外壁面应变会发生变化。基于反问题研究思想,可以通过测量分析身管外壁面应变的变化来分析身管结构的损伤情况,进而预测身管寿命。

建立完好的和有4处2 mm深损伤的155 mm火炮身管横截面二维模型,在其内表面加载351.5 MPa压强,通过ANSYS仿真得其应变如图3、图4所示。

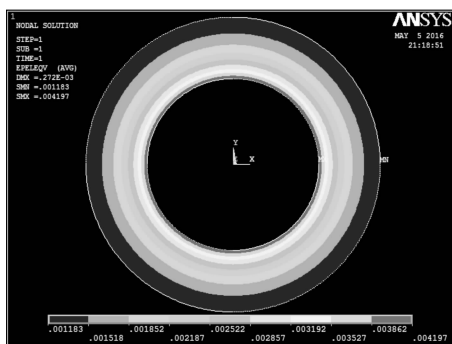


图3 完好身管应变图

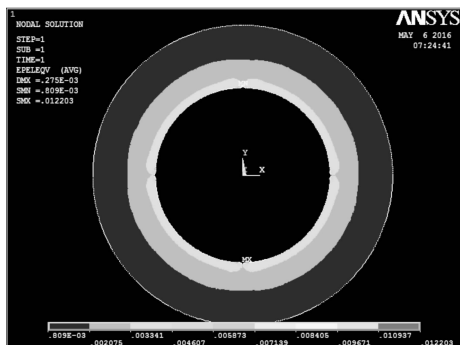


图4 损伤身管应变图

分析可知:完好身管最外部应变为1 200 $\mu\epsilon$,损伤身管最外部应变为800 $\mu\epsilon$,从理论上证实了不同身管结构对应不

同的应变。文献[38-39]对发射过程中身管轴向和径向应变情况进行了仿真分析,文献[40]对155 mm火炮身管发射过程中外表面的应力与应变情况进行了模拟试验与测量分析,得出身管外表面应变随着身管磨损、疲劳裂纹等变化而变化。为通过分析应变变化情况研究身管损伤和寿命预测提供了相应的理论基础。

3.2.2 方法与模型简述

枪炮发射涉及弹、炮、药三者组成的系统,通过测试分析不同射弹数后身管外表面应变预测身管寿命的方法^[41],即建立身管外壁面应变测试系统,分析弹带直径 d_b 、弹带长度 l_b 、弹带结构 s_b 、弹带材料 m_b 、膛线结构 s_r 、膛线类型 k_r 、坡膛结构 s_c 、身管内表面状态 s_B 及发射药种类、装药量等因素在膛压和弹带作用力等作用下对身管外壁面应变 ϵ 的影响规律,即

$$\epsilon = f(d_b, l_b, s_b, m_b, s_r, k_r, s_c, s_B, r_L) \quad (6)$$

式中: r_L 为发射药的影响。

新炮启用开始,每一发射弹其外表面均产生唯一的应变 ϵ_i ,令身管寿命为 N 发,建立第 i 发射弹的应变 ϵ_i 与射弹发数 R_i 的函数关系模型,即

$$R_i = f(\epsilon_i) \quad i = 1 \sim N \quad (7)$$

前后相邻的任意两发同种弹的应变增量为

$$\Delta\epsilon_i = \epsilon_i - \epsilon_{i+1} \quad i = 1 \sim N-1 \quad (8)$$

式中: ϵ_i 反映了第 i 发弹射击后的身管健康状况; $\Delta\epsilon_i$ 表征射击第 $i+1$ 发弹给身管造成的新损伤。即第一发弹和寿命终止时第 N 发弹之间的应变增量总和为

$$\epsilon_1 - \epsilon_N = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta\epsilon_i \quad i = 1 \sim N-1 \quad (9)$$

根据以上分析,通过模拟、试验数据分析与实弹验证等,建立身管射弹数 R_{i+1} 与应变 ϵ 、应变增量 $\Delta\epsilon$ 的寿命预测模型

$$R_{i+1} = f(\epsilon_i, \Delta\epsilon_i) \quad i = 1 \sim N \quad (10)$$

3.2.3 方法的对比分析

如前所述, W 法预测身管寿命,其测量的可操作性差、模型的适用性不强及预测精度低。而基于外壁面应变的身管寿命预测方法,综合考虑了烧蚀磨损与疲劳耦合作用对身管寿命的影响,应变 ϵ 作为身管健康状况的特征参数科学性,应变测量操作方便且其精度高,使身管寿命预测更加实时精确。

4 结束语

本文对烧蚀磨损、疲劳等导致身管失效的机理、影响因素等研究进行了总结归纳,分析了现有身管寿命预测方法和模型。针对其存在的不足,为提高身管寿命评估方法的科学性、适用性和可操作性,提出一种以身管外壁面应变为参数特征的寿命预测新方法。该方法体现了弹-炮-药系统的内在规律,应变参数的演变过程与身管寿命的衰变过程有明确的映射关系,能更好地表征磨损和疲劳耦合作用下的身管损伤情况。该方法的科学性和实际可操作性更强,能够实现

枪炮射击过程中身管健康的实时评估,可提高身管寿命预测的精度。

参考文献:

- [1] 曾志银. 火炮身管强度设计理论[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [2] 徐东升,刘广生,贾长治,等. 火炮身管等效全装药寿命换算方法研究[J]. 火炮发射与控制学报,2013(1):89-92.
- [3] WARRENDER J M, MULLIGAN C P, UNDERWOOD J H. Analysis of Thermo-Mechanical Cracking in Refractory Coatings Using Variable Pulse-Duration Laser Pulse Heating [J]. Wear,2007,263(7):1540-1544.
- [4] 彭小敏,夏长清,吴安如,等. 火炮身管烧蚀及其防护研究进展[J]. 四川兵工学报,2014,35(3):11-17.
- [5] COTE P J, RICKARD C. Gas-Metal Reaction Products in the Erosion of Chromium-Plated Gun Bores [J]. Wear, 2000,241(1):17-25.
- [6] LAWTON B. Thermo-Chemical Erosion in Gun Barrels[J]. Wear,2001,251(1/12):827-838.
- [7] 吴斌,夏伟,汤勇,等. 射击过程中热影响及身管热控制措施综述[J]. 兵工学报,2003,24(4):525-529.
- [8] 梁文凯,周克栋,李践飞. 身管与弹丸的熔融磨损模型与研究[J]. 兵工自动化,2015(9):10-14.
- [9] Underwood J H, Vigilante G N, Mulligan C P. Review of Thermo-Mechanical Cracking and Wear Mechanisms in Large Caliber Guns[J]. Wear,2007,263(7):1616-1621.
- [10] 张振山,吴永峰. 炮管内膛烧蚀磨损现象的分析[J]. 装甲兵工程学院学报,2003,17(2):67-70.
- [11] SOPOKS, RICKARDC, DUNNS. Thermal-Chemical-Mechanical Gun Bore Erosion of an Advanced Artillery System Part one: Theories and Mechanisms [J]. Wear, 2005, 258(1):659 - 670.
- [12] SOPOKS, RICKARDC, DUNNS. Thermal-Chemical-Mechanical Gun Bore Erosion of an Advanced Artillery System Part Two: Modeling and Predictions [J]. Wear, 2005, 258(1/4):671-683.
- [13] 张喜发. 火炮烧蚀内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [14] 吴斌,郑靖. 枪炮射击过程中弹丸与身管相互作用及其影响[J]. 四川兵工学报,2011,32(5):20-23.
- [15] 陈龙森,林贵,李森. 弹丸高速挤进过程动态试验设计与分析[J]. 南京理工大学学报,2015,39(2):139-143.
- [16] 孙全兆,杨国来,王鹏,等. 某大口榴弹炮弹带挤进过程数值模拟研究[J]. 兵工学报,2015,36(2):206-213.
- [17] 王鹏,杨国来,葛建立,等. 基于 Johnson-Cook 本构模型
- 的弹带挤进过程数值模拟[J]. 弹道学报,2015,27(2):55-61.
- [18] SUN H Y, MA J S, YAO J J, et al. Dynamic Analysis on the Rotating Band's Engraving Process [J]. Advanced Materials Research,2010,139-141:1285-1288.
- [19] WU B, FANG L H, CHEN X L, et al. Fabricating Aluminum Bronze Rotating Band for Large-Caliber Projectiles by High Velocity Arc Spraying [J]. Journal of Thermal Spray Technology,2014,23(3):447-455.
- [20] GIBSON M C, HAMEED A, HETHERINGTON J G. Investigation of Driving Force Variation During Swage Autofretting, Using Finite Element Analysis [J]. Journal of Pressure Vessel Technology,2012,134(5):63-7.
- [21] GJB 2975—1997, 火炮寿命试验方法[S].
- [22] 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.
- [23] 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,2013,32(5):316-318.
- [24] 王婉,曾朝阳,赵然. 基于光栅的火炮身管内径测量系统[J]. 四川兵工学报,2009,30(4):55-56.
- [25] 刘海平,贾长治,赵建新. 火炮身管质量评估方法探讨[J]. 火炮发射与控制学报,2008(1):10-14.
- [26] 高乐南,刘顺利. 高炮初速及身管寿命预测试验研究[J]. 火炮发射与控制学报,2008(1):86-89.
- [27] 崔军,杜建革,穆歌. 弹丸初速评定火炮身管寿命研究[J]. 火炮发射与控制学报,2003(S1):134-137.
- [28] 许邵杰,陈雄,封晓兵. 某型火炮弹带挤进数值模拟与分析[J]. 四川兵工学报,2011,32(8):14-17.
- [29] 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.
- [30] MAHDAVINEJAD R A. Prediction of Cannon Barrel Life [J]. Journal of Achievements in Materials & Manufacturing Engineering,2008,30(1):11-18.
- [31] 顾金桂. 国外炮管疲劳及其研究方法(上)[J]. 现代兵器,1982(9):10-14.
- [32] UNDERWOOD J H. Army Cannon Fatigue Life Evaluation; Crack Initiation, Fracture Mechanics, and NDI [J]. 1996.
- [33] 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(6):119-121.
- [34] 高望,张金,王瑾珏. 火炮身管无损检测方法[J]. 火力与指挥控制,2015(7):16-19.
- [35] 王道宏. 现代火炮工程实践[M]. 北京:国防工业出版社,1997:243-344.

- 分析[J]. 激光技术, 2015, 39(6): 829-833.
- [5] 赵琦, 樊红英, 李轶国, 等. 大能量中空光束大气传输的仿真与实验比对研究[J]. 激光技术, 2014, 38(4): 542-545.
- [6] 徐青山, 藏海祥, 卞海红. 太阳辐射实用模型的建立与可行性研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(8): 1180-1185.
- [7] 苏成博, 张新燕, 陆锦睿. 乌鲁木齐地区太阳辐射强度分析[J]. 电力学报, 2013, 28(5): 392-396.
- [8] 甘霖, 张合, 张祥金, 等. 非线性发射过载对激光引信光学接收系统的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2364-2369.
- [9] 于海山, 任宏光, 霍力君, 等. 考虑时间因子的激光引信目标散射回波建模方法[J]. 探测与控制学报, 2015(4): 11-15.
- [10] 安毓英. 光电探测原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [11] 张颖, 牛燕雄, 杨露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 1-6.
- [12] 陈慧敏, 刘洋, 朱雄伟, 等. 调频连续波激光引信回波特性仿真分析[J]. 兵工学报, 2015(12): 2247-2253.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 107 页)

- [10] 张焯, 汪一鸣. 图像压缩中小波基选择和评估的实用化方法[J]. 苏州大学学报, 2003, 19(1): 54-57.
- [11] 曾凡永, 谷东兵, 宋正勋. 基于小波变换的图像压缩方法中小波基的选取问题探讨[J]. 长春光学精密机械学院学报, 2000, 23(2): 73-74.
- [12] MALLAT S G. Multifrequency Channel Decompositions of Images and Wavelet Models[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1989, 37(12): 2091-2110.
- [13] 李晓霞, 苏红旗, 蔡瑞. 基于小波变换的图像压缩中小波基的选取[J]. 科协论坛, 2011(4): 105-106.
- [14] 郝俊瑞, 许红军. 图象压缩中小波基的选择[J]. 桂林电子工业学院学报, 2000, 20(2): 9-11.
- [15] 张一, 成礼智. 小波变换图像压缩中最优小波基的选取方法[J]. 数字电视与数字视频, 2004(10): 4-6.
- [16] COHEN A, DAUBECHIES I, VIAL P. Wavelet Bases on the Interval and Fast Algorithms[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1993, 1(12): 54-81.
- [17] 杨永. 小波图像压缩编码中小波基的选择技术研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(11): 2747-2749.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 125 页)

- [36] REN L, JIA Z G, LI H N, et al. Design and Experimental Study on FBG Hoop-Strain Sensor in Pipeline Monitoring [J]. Optical Fiber Technology, 2014, 20(1): 15-23.
- [37] CH. E. KATSIKOS, G. N. Development and Validation of a Strain-Based Structural Health Monitoring System [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2009, 23(2): 372-383.
- [38] KEIN? NEN H, MOILANEN S, TERVOKOSKI J, et al. Influence of Rotating Band Construction on Gun Tube Loading—Part I: Numerical Approach [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012, 134(4).
- [39] TOIVOLA J, MOILANEN S, TERVOKOSKI J, et al. Influence of Rotating Band Construction on Gun Tube Loading—Part II: Measurement and Analysis [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012, 134(4).
- [40] ANDREWS T D. Projectile Driving Band Interactions With Gun Barrels [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2006, 128(2): 273-278.
- [41] 吴斌, 邱健, 郑靖, 等. 枪炮身管疲劳和磨损及其健康监测研究 [C]//第十八届全国疲劳与断裂学术会议. 郑州: 出版社不详, 2016: 15-17.

(责任编辑 唐定国)