

专题——火炮身管烧蚀磨损机理及寿命提升技术

大口径火炮身管寿命提升技术探讨

宋彦明, 温钢柱, 张杰

(内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古 包头 014030)

摘要: 介绍了关于身管寿命研究的国内外发展现状、趋势和差距, 论述了身管寿命的定义与评定标准。基于一般身管寿命预测方法, 从发射装药、身管材料、身管发射负载、身管内膛表面强化等方面, 分析了身管寿命的影响因素, 确定了热作用、化学作用、机械作用、膛压作用的影响因素, 提出了包括身管内膛镀铬技术在内的身管寿命提升需要解决的问题和关键技术, 以及初步技术措施, 并详细论述了身管内膛镀铬技术方案与技术途径, 提出了达到世界先进水平的身管寿命提升技术发展目标, 指出了身管寿命提升技术的发展趋势等, 为今后身管寿命提升技术研究提供技术参考。

关键词: 火炮; 身管寿命; 炮钢材料; 发射药及装药结构; 烧蚀磨损; 内膛涂镀; 镀铬层

中图分类号: TJ30 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)07-0001-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.001

Technologies to Increase Barrel Life of Large-calibre Gun

SONG Yan-ming, WEN Gang-zhu, ZHANG Jie

(Inner Mongolia North Heavy Industries Group Corp. Ltd, Inner Mongolia Baotou 014030, China)

ABSTRACT: Barrel life of gun is the key indicator of gun's performance. The significance to increase barrel life of gun is to maintain gun's performance for a longer time with higher sustained & efficient combat capability in the life cycle on the condition of good stability of ballistic performance. The gun barrel life is described in terms of current developing status, trend and gap at home and abroad, definition & assessment criteria and the general predicting method of barrel life are put forward, the influence factors of barrel life including propellant charge, barrel materials, launching load, and gun bore surface strengthening are analysed, and those factors such as thermal effects, chemical effects, mechanical effects, and chamber pressure effects are specified. Some issues, key technologies and preliminary technical measures concerning the increase of barrel life are put forward, including gun bore chrome plating technology. The technical proposal and approaches of gun bore chrome plating technology are detailed, a target for increasing barrel life to reach the advanced international standards is set, technical development trend of increasing barrel life is pointed out, and technical reference for the study of increasing barrel life is provided.

KEY WORDS: gun; barrel life; gun steel material; propellant and charge structure; ablation and erosion; gun bore plating; chrome coating

身管寿命是火炮重要的性能指标之一, 它关系到 火炮作战使用性能和使用保障成本。火炮身管寿命主

收稿日期: 2022-05-20; 修订日期: 2022-07-16

Received: 2022-05-20; Revised: 2022-07-16

作者简介: 宋彦明(1961—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为火炮发射与结构技术。

Biography: SONG Yan-ming (1961-), Male, Senior engineering, Research focus: gun launch and structure technology.

引文格式: 宋彦明, 温钢柱, 张杰. 大口径火炮身管寿命提升技术探讨[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 001-009.

SONG Yan-ming, WEN Gang-zhu, ZHANG Jie. Discussion on Technologies To Increase Barrel Life of large-calibre Gun[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 001-009.

要指疲劳寿命和烧蚀磨损寿命(使用寿命)。身管疲劳寿命是保证发射安全性的边界条件,使用寿命是保证火炮弹道性能或作战效能的边界条件^[1-3],而身管疲劳寿命一般远大于使用寿命。

自从火炮作为兵器出现以来,人们就不断改进其性能,以期将更重的炮弹投射到更远的地方。现代与未来战争更需要火炮射程远、火力强、精度高,要求弹丸具有更高的初速和炮口动能,因此发射药装填能量越来越多^[4-6]。随着现代火炮发射技术发展和装备性能要求的不断提高,火炮呈现出大威力、高膛压、高初速、高过载的发展趋势,火炮身管寿命低的问题越来越突出。为提高火炮弹道性能,运用高火药力发射药和高装填密度装药结构,发射高膛压、高初速弹药^[7],使得射击时火炮身管承受越来越严重的火药气体热作用和物理化学作用,工作

环境越来越恶劣。高速流动的高温火药气体的冲刷以及弹丸对膛壁的磨损作用,造成身管烧蚀磨损加剧,已成为降低火炮弹道性能、导致身管使用寿命终止的重要因素,严重制约了火炮威力性能的发挥,提高了部队保障使用成本。因此,提高火炮身管使用寿命将是一个永恒主题。

西方发达国家非常重视火炮身管寿命的技术研究,不断从炮钢材料、身管结构、身管内膛表面抗烧蚀^[8-9]、发射药与装药结构、弹丸结构等方面开展技术研究,并取得了一定成果,而且一些适用性好的研究成果已经应用于现役装备。如高强度和抗烧蚀炮钢材料、身管内膛镀铬^[10]、低爆温高能发射药和高装填密度装药结构等均已得到应用,使西方国家现役火炮身管寿命不断提高,坦克炮身管寿命达到1 000发以上,大幅度领先于我国,见表1。

表1 国外部分坦克炮主要采用的身管寿命提升技术与相关参数

Tab.1 Barrel life improvement technology and related parameters mainly used by some foreign tank guns

	炮钢屈服强度 /MPa	身管结构 强化	身管内膛处理 技术	发射药爆 温/K	弹丸结构形式	身管寿命 /发
德国豹2坦克 120 mm 坦克炮	>1 300	自紧技术	内膛镀铬	<3 200	钨合金弹芯+铝合金弹托	>1 000
美国 M1A2 坦克 120 mm 坦克炮	>1 300	自紧技术	内膛镀铬	<3 200	钨合金/贫铀合金弹芯 + 非金属弹托	>1 000

提高身管寿命的意义主要有2个方面,从技术方面看,身管使用寿命越高,在寿命期内,弹道性能的稳定性越好,火炮保持能力与技术状态时间越长。从作战使用方面看,在部队平时训练演习过程中,可提高持续能力而提高训练演习效果,在一定程度上提高了使用时间,降低使用成本;在战时提高了持续作战能力,提高了作战效能。

1 身管寿命的判定

1.1 基本定义

身管寿命的定义指身管不能满足性能和使用要求前所能发射的等效全装药发数^[11]。等效全装药指按战技指标规定的弹种配比,按照不同弹种和装药号的不同等效系数,折算为全装药。一般等效系数由经验公式的计算结果,对试验数据修正后得到。也可以按照不同弹种和装药号单发射击后的不同内膛磨损量来计算等效系数和折算等效全装药。

1) 对于压制火炮,不同弹种和装药号的弹道负载不同,一般以常用主弹种(如杀伤爆破弹)常温全装药作为标准弹药,其他弹种和其他装药号弹药,按照弹道性能变化量或内膛磨损量,确定不同弹种之间的等效系数折算等效全装药。

2) 对于坦克炮,一般携弹量指标规定弹种配比

为 $n_{\text{穿甲弹}} : n_{\text{破甲弹}} : n_{\text{杀爆弹}} = 4 : 3 : 3$ 。按照此弹种配比,分别确定坦克炮各弹种等效全装药系数。另外,同一弹种的不同药温也有折算系数,因此把不同药温射弹发数按照药温折算系数折算为常温发数,再以不同弹种等效全装药系数乘以实际射弹发数后的和,计算出等效全装药射弹数。

1.2 判定标准

1.2.1 压制火炮身管

一般压制火炮身管的寿命主要评定标准为^[11]:初速下降量 $\geq 5\%$ (中口径),或 $\geq 10\%$ (大口径);千米立靶上出现横弹数量超过50%;弹带全部削光、无膛线印痕;引信连续(不少于2次)瞎火或弹丸弹道早炸;以 Ex/Xsh 表征的弹丸距离散布增大量 $\geq 1.5\%$;射击试验中,某一特征量超过战技指标规定的寿命标准。

1.2.2 坦克炮身管

高膛压坦克炮身管寿命主要评定标准如下所述^[3]。

1) 初速下降量 $\geq 5\%$ 。

2) 立靶密集度增大量的高低与方向散布中间偏差的乘积增大到大于或等于战术技术指标规定两指标乘积的6倍。

3) 引信工作可靠性降低:弹丸在弹道上早炸;

引信连续出现 2 次瞎火 (排除引信自身的因素)。

4) 弹带削平及断弹: 弹带削光; 穿甲弹连续出现 2 次断弹 (排除弹芯自身因素)。

5) 横弹率: 大于或等于 20% 的横弹率。

6) 烧蚀坑 (沟、环) 深: 镀铬身管烧蚀坑深度超过身管口径的 4.2%。

7) 内膛磨损: 按定型试验测定的此类身管寿命终止时的内膛定点径向磨损量。对于滑膛炮和线膛炮, 在严重磨损的直膛起始部处 (一般指距直膛起始部 25.4 mm) 直径接近或达到弹带外径最小尺寸 (可能造成弹丸入膛时弹带失去闭气效果, 身管内膛加速烧蚀, 弹丸在膛内运动和出炮口后飞行运动不稳定, 射击精度变坏, 并出现早炸或不炸现象)。

8) 药室增长量: 按试验时测定的此类身管寿命终止时的药室增长量大于规定值。

9) 疲劳寿命: 一般在 5 000 次以上。

2 身管寿命预测与评定方法

2.1 不作内膛表面强化的身管

内膛不进行强化处理的身管, 在寿命预测与评定方面, 国内外已有多个基于经验和统计的、侧重于不同影响因素的预测公式与方法。这些早期的公式大多数均是在一定条件和一些假设情况下获得的经验近似公式, 没有普遍适用性。

1) 安宁公式:

$$n = 60 \frac{d}{\omega} \left[\frac{\sigma_p}{2250} - 4 \left(\frac{P_{\max}}{2250} - 1 \right) \right] \frac{1}{b} \quad (1)$$

式中: n 为寿命发数; b 为弹带宽度; σ_p 炮钢材的屈服极限; d 为火炮口径; P_{\max} 为膛内最大压力。

2) 卡波公式:

$$n = N_0 e^{-\beta t}, \quad \beta = \frac{k(1-\lambda)}{\theta} \quad (2)$$

式中: N_0 和 λ 为取决于火炮材料性能、火药种类和装药条件的系数; k 为常数; θ 为材料的软化温度; t 为膛壁表面的温度。

3) 斯鲁哈斯基公式:

$$n = k_1 k_2 k_3 a_k \frac{D^2 - d^2}{e^{0.0022 P_0 \frac{d}{\varepsilon} 10^{-3} + 0.002 T_1}} \cdot \frac{\lambda + 1}{\omega v_0 \left[\lambda \left(\frac{v_1}{v_0} \right)^2 + \left(\frac{v_2}{v_0} \right)^2 \right]} \cdot e^{-0.001 t} \quad (3)$$

式中: v_0 为火炮初速; D 为弹带外径; a_k 为身管金属的冲击韧性; ε 为身管金属结构发生变化的内表面层的厚度; T_1 为火药的燃气温度; v_1 、 v_2 分别为弹丸在膛内运动时间内和后效时期的药室缩颈内火药气体的平均速度; P_0 为起动力; k_1 为根据口径而变化的系数; k_2 为膛线缠度系数; k_3 为膛线深度系数;

λ 为弹丸行程与药室缩径长之比; t 为弹带嵌入膛线前内膛表面层的温度。

4) 等效全装药系数法。为了计算火炮在寿命终止时的全部射弹量, 需将火炮射击不同的装药或不同弹种的射弹发数换算成主弹种全装药射弹发数。换算的方法是将火炮所射击不同的装药或不同弹种的射弹发数乘以等效全装药系数 η_{EFC} 。美国阿伯丁靶场的里尔根据当时的试验数据统计得出了等效全装药系数 η_{EFC} 的计算公式, 北约一些国家在使用。其计算公式为:

$$\eta_{\text{EFC}} = (P_m / P_{m\text{全}})^{0.4} (v_0 / v_{0\text{全}}) (\omega / \omega_{\text{全}})^2 (E / E_{\text{全}}) \quad (4)$$

式中: P_m 为等效装药膛内压力; $P_{m\text{全}}$ 为全装药膛压; v_0 为等效装药的初速; $v_{0\text{全}}$ 为全装药的初速; ω 为等效装药的质量; $\omega_{\text{全}}$ 为装药质量; E 为等效装药的潜能; $E_{\text{全}}$ 为全装药的潜能; $E = f(k-1)$, f 为火药力, k 为火药燃气比热比。

5) 我国在身管寿命计算方面, 将等效全装药系数法进一步简化, 采用式 (5) 的形式。

$$\eta_{\text{EFC}} = (P_m / P_{m\text{全}})^{1.4} (v_0 / v_{0\text{全}}) \quad (5)$$

2.2 进行内膛表面强化的身管

内膛进行强化处理的身管 (如内膛镀铬), 在寿命预测与评定方面, 不适用内膛不做强化处理身管的各种预测与计算, 目前国内还没有形成系统的镀铬身管寿命预测计算模型和公式。其主要原因是镀铬身管内膛损伤破坏规律与不处理的身管内膛差别较大, 而且还没有开展内膛镀铬身管的破坏机理方面的细化研究, 其损伤规律没有掌握。

3 身管寿命的影响因素

火炮身管内膛烧蚀磨损主要由热作用、化学作用、机械作用和压力作用等因素导致^[12-13]。

1) 热作用。在射击过程中, 高温 (瞬间 3 500 °C 以上)、高压 (瞬间 560 MPa)、高速 (1 000~1 700 m/s) 火药气体与身管内表面强瞬态换热造成的身管表面热软化、身管壁面热相变及身管表面局部热熔化等。该因素涉及发射药化学成分、火药力、爆温和装药量等参数。

2) 化学作用。发射装药燃烧生成物由 CO、CO₂、H₂、H₂O、N₂ 及少量的 NH₃ 和 CH₄ 组成, 高温下与膛壁 (炮钢材料) 发生化学反应, 形成碳渗透与氮渗透, 使得身管表面发生金相结构变化而脆化。该因素涉及发射药化学成分、火药力、爆温等参数。

3) 机械作用。发射时, 在高温高压高速火药气体冲刷, 未燃烧完的固态发射药的撞击, 弹体定心部、弹带运动对膛壁的摩擦和碰撞等作用下, 身管内膛表面会发生一定程度损伤。该因素涉及发射药量、燃烧

控制、弹丸与内膛的结构尺寸匹配、初速（弹丸膛内过载）、膛压等参数。

4) 膛压作用。发射时，膛压造成身管弹性变形，加速了膛壁裂纹产生和扩展，从而发生龟裂现象，加剧了身管内膛的烧蚀、磨损。如果是内膛镀铬身管，加剧了镀铬层与身管基体的剥离程度和局部脱铬状况的产生。该因素涉及身管承载能力，包括身管结构尺寸、材料强度等级等参数。

4 身管寿命提升技术分析

由于火炮身管烧蚀磨损是由热作用、化学作用、机械作用和压力作用等因素导致，因此针对火炮身管主要受到热、化学、机械和压力等负载作用影响，改善提高身管材料和结构、发射装药结构、身管内膛表面强化等方面相关性能，可有效提高身管寿命。

4.1 身管炮钢材料分析

对于身管炮钢材料来说，与身管寿命相关的主要是化学成分、力学性能等性能参数。

1) 优化炮钢材料的化学成分，在保证力学性能要求的前提下，提高炮钢材料抗高温烧蚀性能。一般炮钢材料采用 CrNiMo 系元素体系，其中 CrNiMo 为主要的合金元素，还有 C、Mn、Si 等元素。这些元素中，增加某些元素（像 Cr 元素等）的含量，可以提高合金钢的熔点，而钢的熔点越高，抗烧蚀性越好^[14]，但炮钢中的 Cr 元素等主要元素的含量又影响到材料的力学性能。因此，在保证力学性能要求的前提下，合理优化炮钢材料的化学成分，提高熔点，可提高炮钢材料本身抗烧蚀磨损性能。

2) 优化炮钢材料的化学成分，在保证力学性能要求的前提下，改善炮钢材料高温状态下抗氧化、烧蚀等性能。试验研究表明，火炮射击时，发射装药燃烧产生 CO、CO₂、H₂、H₂O、N₂、NH₃ 和 CH₄ 等物质，这些物质在 3 500 °C 左右高温作用下，与身管膛壁炮钢材料中的相关元素发生氧化、氮化等化学反应，形成碳渗透与氮渗透，使得身管材料表面发生金相组织与结构变化，形成强度和硬度改变的变化层，俗称“白层”。“白层”与身管材料基体之间形成接近于物理结合状态的界面，在射击时，“白层”极易在弹丸作用下剥离，并形成新的“白层”，身管内径逐步增大。因此，在保证力学性能要求的前提下，合理优化炮钢材料的化学成分，提高熔点和抗氧化氮化能力，可降低形成“白层”的厚度，从而提高炮钢材料抗烧蚀磨损性能。

3) 试验结果表明，火炮射击时，发射装药燃烧，在 3 500 °C 左右瞬态高温火药气体作用下，身管膛壁表面瞬间温度超过炮钢材料熔点，沿径向向外表面方向温度逐次降低，并产生一般在 5~10 mm 深度的热

影响区。在这个区域内，由于热作用，材料的屈服强度和硬度降低，使身管强度极限有所下降，同时降低了身管内膛表面抗弹丸磨损能力。因此，在保证力学性能要求的前提下，合理优化炮钢材料的化学成分，提高熔点和抗热传导性能，可减小热影响区深度，从而提高炮钢材料的抗磨损性能。

4) 炮钢材料的力学性能主要影响身管的发射强度性能和抗膛压能力^[15]。炮钢屈服强度越高，在结构尺寸相同情况下，发射时身管径向弹性变形越小。在膛压作用下，身管内膛由于高温作用产生的微裂纹或龟裂会扩展，降低了身管内膛表面抗烧蚀磨损能力。如果是内膛镀铬身管，径向弹性变形会使镀铬层固有微裂纹扩展贯通；另外，镀铬层与身管内壁基体材料物理结合面更易分离，造成局部脱铬现象，影响身管寿命。因此，改善炮钢材料的化学成分，提高炮钢材料的力学性能，可提高身管强度极限，减缓裂纹扩展程度，加强身管内膛抗磨损性能，提高身管寿命。

4.2 身管结构分析

理论上，炮钢材料的屈服强度与身管强度极限成正比^[15]，因此提高炮钢材料屈服强度可以提高身管承载膛压能力，从而减小身管发射时的径向弹性变形，减缓身管内膛裂纹扩展程度，强化身管内膛抗磨损烧蚀性能，提高身管寿命。身管采用自紧技术后，在结构尺寸不变情况下，增大了身管强度极限^[15]，承载膛压能力提升，身管发射时的径向弹性变形减小，减缓了身管内膛裂纹扩展程度，强化了身管内膛抗磨损烧蚀性能，提高了身管寿命。

4.3 发射装药分析

1) 发射药火药力与装填密度对身管内膛烧蚀的影响。随着火炮威力性能的不不断提高，发射药火药力将越来越高，装填密度也越来越大（坦克炮装填密度国内为 0.8~0.9 kg/L，国外最高达到 1.2 kg/L 以上）。随着火药力和装填密度的不断增加，对身管内膛表面热冲击作用越强，烧蚀越严重。但是火炮装备威力性能要求不断提高，初速膛压越来越高，产生了发射药火药力越高、装填密度越大，对身管内膛烧蚀越严重的矛盾。如何解决这个矛盾将是今后研究的重要课题。

2) 发射药爆温对身管内膛烧蚀的影响。一般发射药爆温在 3 500 °C 左右，发射时身管内表面瞬间产生高于炮钢材料熔点的高温，使身管内表面发生瞬间融化和凝固的过程。在膛压作用下，这个过程使身管内表面产生裂纹直到龟裂，降低内膛抗烧蚀性能。因此，在保持发射药火药力前提下，减低爆温，可以改善身管内膛烧蚀程度。

3) 装药结构对身管内膛烧蚀磨损的影响。炮弹的发射药装药结构对身管内膛抗烧蚀磨损性能具有

影响。一方面, 装药结构元件的合理匹配会减缓身管内膛的烧蚀磨损程度; 另一方面, 改进抗烧蚀衬里效能, 也可降低身管内膛的烧蚀磨损程度^[16-18]。一般抗烧蚀衬里含有滑石粉和钛金属氧化物, 发射时在身管内膛表面形成含有滑石粉和钛金属氧化物的薄膜, 一定程度上可改善弹丸的运动摩擦系数, 减缓身管材料基体的温升, 从而改善身管内膛抗烧蚀磨损性能。

4) 内弹道性能对身管内膛烧蚀磨损的影响。发射药火药力、燃烧速率及装填密度等性能参数是影响膛压和初速的主要因素^[7]。发射时, 膛压作用使身管产生径向弹性变形, 加速了身管内膛表面裂纹的产生与扩展, 同时膛压作用决定了弹丸膛内加速和过载的大小, 决定了弹丸与身管内壁摩擦碰撞的程度。另外, 随着火炮威力的不断提升, 高火药力发射药和高装填密度装药结构需求越来越多, 这些都是不利于身管寿命提升的因素。因此, 高火药力发射药和高装填密度装药结构情况下, 在优化匹配发射药火药力、燃烧速率及装填密度等参数基础上, 发展低爆温发射药, 强化控制发射药膛内燃烧规律, 在提高初速条件下尽可能降低最大膛压, 将有利于缓解身管内膛的烧蚀与磨损现象。

4.4 身管内膛表面强化

4.4.1 表面硬化

一般采用表面机械和激光强化等方法, 使身管内表面产生高硬度或高密度层, 理论上对提高耐高温和抗摩擦性能有一定作用。

1) 冷作硬化。在常温下或结晶温度下, 采用去除或不去除材料(如切削或挤压)的方法, 使身管内表面材料产生塑性变形, 晶格扭曲、畸变, 晶粒产生剪切、滑移, 晶粒被拉长等, 会使表面硬度增加, 屈服点提高, 伸长率降低, 可提高材料表面抗摩擦能力。但对材料抗烧蚀能力提升几乎没有作用, 所以在提高身管寿命措施方面, 这种方法没有得到广泛应用。

2) 内膛激光淬火。运用激光器发出的高能密度激光束, 照射身管内膛表面, 使其瞬间吸收热能, 使身管材料表面发生加热相变^[19-20]。激光束照射停止后, 被照射处温度急剧下降, 发生类似淬火效果的冷却相变, 材料组织主要变为细化马氏体, 不仅使身管内膛材料表面硬度提高, 还有利于阻碍表面裂纹的扩展。因此, 这种方法可提高材料表面的抗摩擦能力, 但对材料抗烧蚀能力提升作用有限, 所以在提高身管寿命措施方面, 这种方法应用不多。

4.4.2 身管内膛表面涂镀

为了提高身管使用寿命, 国内外均开展了诸多身管内膛涂镀技术研究和应用研究。发射时, 身管内膛的涂镀层将身管内膛表面与高压高温火药燃气进行了物理隔离。一方面, 当涂镀层完好时, 避免了火药

气体对身管材料表面的直接烧蚀和弹丸运动对身管内膛基体的直接撞击摩擦; 当涂镀层开始局部剥落后, 发射药气体才会对身管基体材料产生烧蚀, 但也会减缓火药气体对身管内膛基体表面的直接热作用, 降低身管内膛基体表面热软化、热相变及局部热熔化的程度。另一方面, 避免了弹丸运动对身管内膛基体的直接撞击摩擦。一般涂镀层硬度较高, 从而提高了身管内膛抗火药气体冲刷和弹丸运动时摩擦撞击能力。主要技术包括:

1) 镀铬技术^[21-23]。身管内膛镀铬是以身管基体作为阴极, 不溶性金属芯轴作为阳极, 采用电镀方式, 在身管内表面制备铬金属镀层。发射时, 镀铬层将身管内膛表面与高压高温火药燃气进行了物理隔离, 降低了身管内膛表面的烧蚀磨损状况, 提高了身管寿命。该技术较为成熟, 并大量应用于国内外大口径火炮身管。

2) 真空电弧离子镀铬。采用真空电弧离子镀在身管内膛表面制备 Cr 涂层。由于在沉积过程中, 有利于产生几乎完全电离的高温金属蒸汽, 其镀层与材料基体基本为半冶金结合, 因此结合力相比电镀技术更具优势。但该技术目前处于实验室研究阶段, 技术成熟度较低。

3) 热熔覆技术。热熔覆技术是利用高强度红外能量照射难熔金属粉末使之融化, 在基体材料上形成冶金结合涂层。一般身管涂层首选材料是钨钼合金材料。热熔覆技术用于身管内膛表面涂镀, 一方面工艺技术条件复杂还不成熟; 另一方面, 线膛炮身管膛线导转侧涂层难以保证, 适应性较差。另外, 还有一种“自蔓延”技术与热熔覆工艺制备技术类似, 采用高温电离子将难熔金属粉末熔化, 在身管高速旋转下产生的离心力, 使身管内膛熔化的金属与基体产生半冶金结合效果。

4) 线爆喷涂技术^[24]。将线爆喷涂装置放置在炮膛内, 由涂层物质制备的金属丝, 穿过该电极, 缠绕在一个线轴上。当电极组件在身管内移动时, 涂覆身管不同区域, 最终完成对整个身管内膛的涂覆。在身管内引入某种气体, 可以使涂层硬度进一步提高, 特别是采用甲烷作为工作气体有利于形成碳化物涂层。该技术在身管上应用技术成熟度的较差, 不太适用线膛炮身管。

5) 爆炸喷涂技术。利用炸药爆炸时产生的高压火药气体, 将熔点高、耐烧蚀的金属“冷焊接”在身管内膛表面上, 是爆炸喷涂技术的核心思想。涂层效果的好坏, 取决于炸药的爆炸速度和产生的气体压力, 涂覆材料金属筒的厚度和成分, 以及金属筒与炮膛的距离。该技术工艺实施难度大, 在身管上应用技术成熟度的较差, 同样不太适用线膛炮身管。

6) 磁控溅射钽镀层技术。金属钽是当今代替铬最有潜力的一种金属材料。和铬相比, 金属钽熔点高

(2 996 °C),耐发射药化学侵蚀,热传导率比较低,塑性好,具有丰富的延展性,可以拉成细丝式制薄箔,热膨胀系数很小,韧性很强,钼镀层不会发生裂纹,具有优良的防烧蚀磨损性能。磁控溅射钼镀层具有2种晶体结构,即体心立方晶格的 α 相和四方晶结构的 β 相。 α 相具有膛膛涂层所需的物理性能有利结构, β 相非常脆,在应力作用下易发生破坏。 β 相是亚稳定相,在750 °C以上温度时可转变成 α 相。由于发射过程中,火药气体温度超过3 000 °C,此时溅射沉积钼 β 相相对转化率较高,同时产生的H、N等游离态元素大量沉积,对镀层有破坏作用,且容易使高强度炮钢材料发生氢脆,降低火炮发射的安全性。因此,在膛内溅射沉积钼涂层的关键是在高温下不破坏身管基体材料力学性能前提下,获得高质量的 α 单相钼涂层。针对身管溅射钼而言,技术工艺实施难度很大,存在溅射设备、靶材(钼)、溅射工艺和涂层应用环境研究等方面技术难点。

5 内膛镀铬提高身管寿命技术分析

为了提高身管寿命,国内外各类涂镀技术层出不穷,但从目前实际装备应用来看,镀铬仍是各国提高高膛压坦克炮身管寿命最主要的技术途径^[25]。其中,瑞士代表了身管内膛镀铬技术的最高水平,并为大多数国家提供技术和产品。如美国M1A2和德国豹2坦克等装备的120 mm坦克炮、德国和美国的一些155 mm榴弹炮身管均采用内膛镀铬技术。国内大口径身管内膛镀铬技术研究始于20世纪80年代,已经应用于坦克炮身管30余年。因此,今后较长一段时间内,在提高身管寿命技术方面,镀铬技术仍是最可行、见效快的途径。随着火炮性能指标的不断提高,火炮(特别是高膛压坦克炮)身管发射工作环境恶化,身管内膛镀铬技术也逐步显现出对更高的膛压和更高能量发射药适应性的不足。

5.1 镀铬层特性

身管内膛镀铬后,发射时,镀铬层将基体材料与高压高温火药燃气进行物理隔离。一方面,当镀铬层完好时,避免了火药气体对身管的直接烧蚀;当镀铬层开始局部剥落后,发射药气体才会对身管基体材料产生烧蚀,但也会减缓火药气体对身管内膛基体表面的直接热作用,降低了身管内膛基体表面热软化、热相变及局部热熔化的程度。另一方面,避免了弹丸运动对身管内膛基体的直接撞击摩擦。由于镀铬层硬度较高,从而提高了身管内膛抗火药气体冲刷和弹丸运动时摩擦撞击能力。

由于镀铬层所固有存在的微裂纹,随着射弹发数的累积,身管内膛镀铬层微裂纹在高压高温作用下逐渐扩展,并会逐步产生点块状脱铬现象。这是镀铬身

管使用过程中的必然现象,不影响正常使用。一般来说,不镀铬身管发射时,内表面直接承受来自弹药的热作用、化学作用和机械作用;身管内膛镀铬后,镀层对热作用、化学作用和机械作用起到物理隔离效果。当镀铬层产生脱落后,这些因素才会作用于局部脱铬部位的身管基体表面,并开始对基体产生损伤,而这时损伤规律与身管不镀铬时类似。镀铬层厚度一般在0.1~0.2 mm,内膛局部呈现离散分布,微小脱铬物不会影响火炮正常安全发射。

5.2 镀铬层脱落情况分析

身管内膛镀铬后镀铬层主要受到高压、高温、火药燃气化学反应腐蚀、弹丸机械碰撞摩擦等复杂负载作用。由于镀铬层存在固有微裂纹,身管内膛镀铬层必然会随着射弹数量增加而经历裂纹扩展、贯通到局部脱落的过程。因此,通过优化镀铬层参数匹配性能(硬度、厚度、结构等)、减缓微裂纹扩展速度、提高镀层与基体结合性能等技术,可降低镀铬层脱落的程度,有效提高身管寿命。

5.3 身管内膛镀铬需要解决的问题

5.3.1 基础性问题

1)身管基体与内膛镀铬层结合匹配机理不明。需要解决和揭示发射时镀铬层的负载特性、镀铬层与机体结合结构、身管材料特性对结合结构的影响等,为提高身管基体与内膛镀铬层结合强度提供技术基础。

2)身管内膛镀铬层破坏机理不清。需要解决和揭示高温火药气体和高膛压作用下镀铬层的破坏规律、弹丸膛内运动对镀铬层的机械磨损规律、身管镀铬层破坏后与身管基体材料的烧蚀磨损关系等问题,为制定身管寿命提升提供方向指导。

3)缺乏身管内膛镀铬层结合强度表征及检测方法。身管内膛镀铬层结合强度的表征及检测方法是制定身管内膛镀铬量验收标准的先决条件。目前内膛镀铬后缺乏对身管全长镀铬层的量化检测方法,也没有合适的身管内膛镀铬量化检测质量验收标准,不能量化体现身管内膛镀铬质量状况。镀层结合强度等质量特性主要通过试板人工折弯、锉刀打磨、压坑法等定性或间接检测手段,直接影响了镀铬身管及镀层的质量判别。

4)缺乏镀铬身管寿命试验与预测方法。镀铬身管与非镀铬身管的烧蚀磨损机理不同,破坏规律差异很大。由于目前镀铬身管烧蚀磨损机理与破坏规律不明,身管寿命唯一的考核方法就是全寿命射击试验,成本较高;同时也没有准确的镀铬身管寿命预测模型与方法,对部队使用维护造成困扰。传统身管寿命试验与预测方法不能适用于内膛镀铬身管,需要解决身管内膛镀铬层的破坏规律等基础性问题,建立模型和制定镀铬身管寿命试验方法与身管寿命预测方法。

5.3.2 结构与工艺性问题

1) 身管内膛镀铬层厚度均匀性差。目前国内身管加工后内膛直线度和壁厚差等参数精度不足,实施镀铬后,整个内膛镀铬层厚度不均匀。因此,需要通过提高身管内膛直线度和壁厚差等参数的加工精度,提高镀铬设备工装制造与安装精度,优化镀铬过程控制等措施,改善身管内膛镀铬层厚度均匀性,同时探索研究身管内膛镀铬层厚度无损检测方法。

2) 身管内膛镀铬层与基体材料结合强度尚需提升。目前国内坦克炮身管采用现有镀铬技术,满足了身管寿命指标要求,但随着火炮威力性能不断提升,身管内膛负载大幅度提高,原有镀铬技术已不能满足新型火炮装备需求。需要通过身管内膛结构优化设计,提高内膛加工精度,改善镀铬层与内膛表面形貌的匹配性,以提高镀铬层与身管内膛基体的结合力,降低镀铬层剥落的可能性。

3) 新型身管内膛镀铬工艺技术有待进一步研究。由于镀铬层硬度较高,存在固有的微裂纹。减少镀铬层微裂纹和减缓微裂纹的扩展,可以使身管内膛镀铬层剥落得到缓解。深入研究身管内膛镀铬工艺技术,使镀铬层结构性能梯次变化,产生类似分层效果,使每一层裂纹相互交错,类似压缝结构效果。虽然裂纹存在却不贯通,从而缓解了整个镀铬层贯通裂纹的扩展,降低了局部脱铬的可能性。

为了提高镀铬层与身管内膛基体的结合强度,实施镀铬前对内膛进行激光强化处理,使身管内膛基体表面产生微坑,一方面增加了镀层结合面积,提高镀铬层与身管内膛基体结合强度,同时也提高了镀铬层抗轴向撞击摩擦能力。

6 身管寿命提升面临需要解决的技术问题

身管使用寿命是火炮装备威力和作战效能发挥的重要影响因素之一。影响身管寿命的因素很多,从大的方面有热作用、化学作用、机械作用和压力作用等因素。细致划分看,其影响因素众多,需要解决的问题较多,有些难度颇大。下面从专业划分方面进行分析。

6.1 发射药与装药结构

在火炮膛压一定或增加前提下,需要解决的问题:

1) 发射药火药力不变或提高情况下,降低爆温。目前高火药力发射药爆温,国外已经达到 $3\ 200\ ^\circ\text{C}$ 以下,国内在 $3\ 500\ ^\circ\text{C}$ 以上。

2) 优化发射药化学成分。在高能量、低爆温情况下,降低火药燃气成分与炮钢材料化学元素的反应程度,减少发射时因化学反应使身管内膛的损伤量。

3) 在保证火炮越来越高的炮口初速要求前提下,

降低膛压,是装药结构面临的问题之一。因此,深化发射装药结构研究和火药燃烧规律控制技术研究,成为一个重要突破方向。

4) 改善装药结构中的缓蚀衬里等元件性能,提高发射时的缓蚀效果,以改善对身管内膛的烧蚀磨损状况。

5) 高膛压坦克炮对上述发射药与装药结构问题的解决,需求更为迫切。一般坦克炮最大膛压达到 $500\ \text{MPa}$ 以上,炮口初速达到 $1\ 700\ \text{m/s}$,甚至更高,需要的发射能量更大,对身管内膛表面作用更强,损伤更严重。因此,在尽可能减小穿甲弹外形尺寸(提高装填密度)情况下,上述问题更为突出。

6.2 身管极限强度

1) 随着火炮制备威力和机动性要求的不断提高,对身管材料的力学性能也要求越来越高,因此促进了超高强度炮钢材料的技术的发展。炮钢材料性能的提升,提高了身管的承载能力,并减缓了身管内膛表面的裂纹产生和扩展,从而改善了内膛龟裂等损伤问题。但在超高强度炮钢材料性能提升方面的要求是永恒的,在此基础上,还需要进一步优化炮钢材料化学成分,提高材料抗烧蚀磨损和耐高温性能。

2) 身管自紧技术可在身管结构不变情况下提高其承载膛压能力,发射时身管在膛压作用下的径向膨胀量减小,减缓了身管内膛表面裂纹的产生和扩展。目前常用的机械和液压自紧技术,均存在工程化实施自紧应力不均匀问题,而工程化制造和产生的制造误差,对自紧技术的应用效果具有影响,但针对这些影响的技术研究还比较缺乏。

6.3 身管内膛涂镀技术

前面分析了很多身管内膛涂镀技术,除了镀铬技术外,其他技术均处于研究阶段,技术成熟度较低,没有在火炮装备中广泛应用,还需要不断开展深入研究,以提高其技术成熟度。身管内膛镀铬技术成熟,并大批量应用于坦克炮身管,但还需要解决所存在的问题。

1) 身管内膛镀铬基础性技术。前面分析的身管内膛镀铬基础性技术问题,近年来已经开展了相关技术研究,由于投入较少,研究进展缓慢,不能适应身管寿命不断提高的发展要求。很多基础性技术问题,还是处于“知其然,不知其所以然”状态,严重迟滞了镀铬技术的发展和身管寿命的提升。

2) 身管内膛镀铬工艺技术。大口径身管内膛镀铬工艺技术研究始于20世纪80年代,随着技术研究的不断深入,技术成熟度不断提高,并于20世纪90年代开始全面应用于坦克炮身管(包括线膛和滑膛)至今。随着身管寿命要求的不断提高和身管发射负载的不断加大,原有的身管内膛镀铬技术已不能满足要

求,急需提升身管内膛镀铬工艺技术。因此,在解决身管内膛镀铬基础性技术问题前提下,系统性开展新型身管镀铬工艺技术研究成为必然。

关于镀铬污染问题,根据国家与地方政府环保要求,对镀铬产生的废液等污染物,采用处理设备对其进行实时净化处理和实时监控,废液等排放物完全可以达到环保要求的标准,不存在环境污染问题。

7 结语

身管使用寿命是火炮的重要技术性能之一,是保证火炮威力性能和作战效能持续有效发挥的必然条件,提高身管使用寿命一直是火炮技术发展追求的目标之一。影响火炮身管寿命的因素多而复杂,关键影响因素的解决途径可能是多方面的。因此,有必要进行科学论证筛选,确定发展路线和主攻方向,集中有限资源,系统性突破制约身管寿命提升的关键技术。同时,大力加强影响身管寿命的基础性技术研究,揭示规律,制定规范标准,支撑关键技术与突破,为火炮身管寿命性能的不断提,达到世界先进水平提供技术支持。

参考文献:

- [1] 谈乐斌,张相炎,管红根. 火炮概论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
TAN Le-bin, ZHANG Xiang-yan, GUAN Hong-gen. Introduction to Artillery[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.
- [2] 张相炎. 火炮设计理论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
ZHANG Xiang-yan. Theory of Artillery Gun Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.
- [3] WJ 2691—2008, 高压压炮身管寿命评定准则[S].
WJ 2691—2008, Assessment Criterion for Barrel Life of High Chamber Pressure Gun[S].
- [4] FAN Wei, GAO Ping. A Review on Erosion-Reducing Additive Materials to Extend the Lifespan of Gun Barrels[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(36): 19767-19790.
- [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.
ZHANG Xi-fa, LU Xing-hua. Interior Ballistics of Erosion Guns[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [6] 易怀军. 火炮身管烧蚀磨损的影响研究[D]. 南京:南京理工大学,2016.
YI Huai-jun. Study on the Influence of Erosion Wear of Gun Barrel[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [7] 华东工程学院 103 教研室. 内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,1978.
- [8] SOPOK S, RICKARD C, DUNN S. Thermal-Chemical-Mechanical Gun Bore Erosion of an Advanced Artillery System Part One: Theories and Mechanisms[J]. Wear, 2005, 258(1/2/3/4): 659-670.
- [9] 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.
PENG Xiao-min, XIA Chang-qing, WU An-ru, et al. Development of the Ablation Behavior and Protection of Gun Barrel[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(3): 11-17.
- [10] 黄荣,李元素. 120 毫米自行反坦克炮论文集[M]. 北京:国防工业出版社,1991.
HUANG Rong, LI Yuan-su. Essays on 120 mm Self-Propelled Antitank Gun[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991.
- [11] GJB2975—97, 火炮寿命试验方法[S].
GJB 2975—97, Test Method of Gun Life[S].
- [12] DUNN S, SOPOK S, COATS D, et al. Unified Computer Model for Predicting Thermochemical Erosion in Gun Barrels[C]//31st Joint Propulsion Conference and Exhibit. San Diego: AIAA, 1995.
- [13] SAM S. Cannon Coating Erosion Model with Updated M829E3 Example[C]//36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Las Vegas: AIAA, 2000.
- [14] 高文,张津,黄进峰,等. 身管内膛镀铬层-钢基体界面损伤退化行为研究进展[J]. 材料导报,2017, 31(13): 90-98.
GAO Wen, ZHANG Jin, HUANG Jin-feng, et al. Research Progress of Degradation Failure of Interface of Chromium Coating and Steel Substrate in Gun Bores[J]. Materials Review, 2017, 31(13): 90-98.
- [15] 华东工程学院 101 教研室. 炮身设计[M]. 北京:国防工业出版社,1978.
101 Teaching and Research Section of East China Institute of Engineering. Design of Gun Barrel[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1978.
- [16] 李洪广,闫军,杜仕国,等. 火炮身管缓蚀剂技术研究进展[J]. 火炮发射与控制学报,2012, 33(4): 103-106.
LI Hong-guang, YAN Jun, DU Shi-guo, et al. Research Advance of Erosion Inhibitor Technology in Gun Barrel[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2012, 33(4): 103-106.
- [17] 樊新民,陈健中,徐天祥. 三种镀覆层材料抗烧蚀性能评价[J]. 弹道学报,2000, 12(1): 65-67.
FAN Xin-min, CHEN Jian-zhong, XU Tian-xiang. Erosion Resistance Evaluation of Three Coatings[J]. Journal of Ballistics, 2000, 12(1): 65-67.
- [18] 白若华. 缓蚀剂是提高武器身管烧蚀寿命的重要技术途径[J]. 兵工学报,1995, 16(3): 54-58.
BAI Ruo-hua. Application of Erosion Reducing Additives as Important Technical Measures in Improving the Ero-

- sion Life of a Gun Barrel[J]. *Acta Armamentarii*, 1995, 16(3): 54-58.
- [19] 张国祥, 陈光南, 张坤, 等. 基体激光淬火对镀铬层界面剪切强度的影响[J]. *中国表面工程*, 2006, 19(6): 25-28.
ZHANG Guo-xiang, CHEN Guang-nan, ZHANG Kun, et al. Effect of Laser-Quenched Substrate on Interfacial Shear Strength of Chromium Plated Coatings[J]. *China Surface Engineering*, 2006, 19(6): 25-28.
- [20] 张国祥, 陈光南, 张坤, 等. 激光离散预处理基体镀铬身管延寿的力学机理研究[J]. *兵工学报*, 2006, 27(6): 978-983.
ZHANG Guo-xiang, CHEN Guang-nan, ZHANG Kun, et al. The Mechanical Mechanism Study on Prolonging Life of Chromium-Plated Gun Bore through Laser Discrete Pretreatment[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(6): 978-983.
- [21] 郭瑞萍, 王宝生. 美国炮管抗烧蚀涂层工艺技术新进展[J]. *新技术新工艺*, 2008(9): 87-90.
GUO Rui-ping, WANG Bao-sheng. New Development of Coating Processes for Gun Barrels Anti-Erosion in America[J]. *New Technology & New Process*, 2008(9): 87-90.
- [22] 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.
ZHANG Guo-ping, WANG Mao-lin, YANG Dong, et al. Probing on Barrel Life for the Small Caliber Gun[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2013, 34(3): 1-5.
- [23] 罗业, 徐达, 黄勇, 等. 火炮镀铬身管性能退化规律及机理研究[J]. *火炮发射与控制学报*, 2017, 38(3): 63-68.
LUO Ye, XU Da, HUANG Yong, et al. Performance Decay Law Analysis of Artillery Chromed Barrel[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2017, 38(3): 63-68.
- [24] 蒋啸林, 王燕妮, 陆辛. 电爆炸喷涂技术用于提高炮管的抗烧蚀性分析[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(20): 2494-2497.
JIANG Xiao-lin, WANG Yan-ni, LU Xin. Anti-Erosion Analysis for Artillery Barrel Coated by Electrical Explosion Spraying Technology[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(20): 2494-2497.
- [25] 欧阳青, 于存贵, 张延成. 国内外火炮身管烧蚀磨损问题研究进展[J]. *兵工自动化*, 2012, 31(6): 44-46.
OUYANG Qing, YU Cun-gui, ZHANG Yan-cheng. Development of Erosion and Wear of Gun Barrel[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2012, 31(6): 44-46.

责任编辑: 刘世忠