

大口径火炮身管损伤机理及寿命提升方法综述

付佳维, 李延泽, 陈诗雨, 王昊宇

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 概述了身管内壁损伤的“热-力-化学”影响及其耦合特性, 提出了身管损伤的主要机制, 介绍了损伤机制的国内外研究现状。基于这些损伤机制, 进一步提出了提升身管寿命的 3 类技术措施, 即抗燃气化学烧蚀、抗弹带摩擦磨损、既抗烧蚀又抗磨损, 并分别对每一类措施中的典型方法进行了介绍。具体来说, 包括高能低爆温发射药技术、缓蚀添加剂技术、高热强炮钢技术、弹炮匹配设计技术、身管内壁抗烧蚀涂层技术等。文中研究结果可为火炮身管寿命基础理论和寿命提升方法的研究提供参考。

关键词: 火炮身管; 寿命; 损伤; 烧蚀; 发射药; 炮钢; 涂层

中图分类号: TJ301

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)07-0010-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.002

Erosion Mechanisms and Life Improvement Techniques of Large Calibre Gun Barrel

FU Jia-wei, LI Yan-ze, CHEN Shi-yu, WANG Hao-yu

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: The “thermal-mechanical-chemical” factors and their coupling effects on the damage of the barrel are summarized in this paper. The main mechanisms of the barrel damage are proposed, and the research progress on barrel damage at home and abroad is briefly introduced. According to these damage mechanisms, three kinds of techniques, namely, anti-erosion from propellant gas, anti-wear from rotating band, and simultaneous anti-erosion and anti-wear, are proposed to improve the barrel life. Moreover, the typical methods in the said three kinds are described, including new propellant with high energy and low detonation temperature, anti-erosion additives, gun steel with high strength at high temperature, matching design of projectile and gun, anti-erosion coatings, etc. As a result, this paper can serve as a reference for the investigation of fundamental theories of barrel damage and improvement methods of barrel life.

KEY WORDS: gun barrel; life; damage; erosion; gun propellant; gun steel; coating

火炮身管直接承受高温高压高活性火药燃气烧蚀冲刷和弹丸弹带挤压摩擦作用, 使役环境非常复杂。发射时, 在十几毫秒的时间内, 燃气温度迅速升

高到 3 000 K, 膛内压力高达 300~500 MPa, 火药燃气中包含了大量的 CO、CO₂、H₂、H₂O、N₂ 等高活性气体成分。大口径火炮身管一般由高强高韧特种钢

收稿日期: 2022-04-24; 修订日期: 2022-06-22

Received: 2022-04-24; Revised: 2022-06-22

基金项目: 国家自然科学基金 (U2141246, 11702137)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (U2141246, 11702137)

作者简介: 付佳维 (1989—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为火炮身管损伤机理及寿命提升技术。

Biography: FU Jia-wei (1989-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: erosion mechanisms and life improvement techniques of gun barrel.

引文格式: 付佳维, 李延泽, 陈诗雨, 等. 大口径火炮身管损伤机理及寿命提升方法综述[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 010-017.

FU Jia-wei, LI Yan-ze, CHEN Shi-yu, et al. Erosion Mechanisms and Life Improvement Techniques of Large Calibre Gun Barrel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 010-017.

Cr-Mo-V 炮钢制备而成, 随着射击次数的增加, 身管内壁逐渐烧蚀磨损, 产生硬而脆的化合物层, 膛线直径增大, 尤其是膛线起始部附近的磨损量最大。随着射击发数的增加, 内壁裂纹逐渐增多, 膛线结构发生改变, 同时内表层材料性能退化, 阳线直径扩大。损伤累积致使内弹道性能恶化, GJB 2975—97《火炮寿命试验方法》^[1]从弹道性能方面规定了身管寿命终止的具体判据。我国 155 mm 火炮身管的寿命为 1 000 发左右, 而国外同类型火炮身管的寿命可达 1 500 发以上, 差距显著。身管寿命短限制了火炮的持久作战能力, 增加了维护保养成本。

不同类型火炮身管各段的损伤情况有所差别, 美国 XM198 式 155 mm 榴弹炮在射击 1 805 发后, 其身管损伤量沿轴向的变化规律如图 1 所示。由图 1 可见, 身管在膛线起始段的损伤最严重。对 155 mm 浅膛线身管来说, 国际上一般通过测量阳线起始部 25.4 mm 处的阳线直径扩大量来判断身管的损伤程度, 当阳线直径扩大 3 mm 时, 认为寿命终止^[2]。

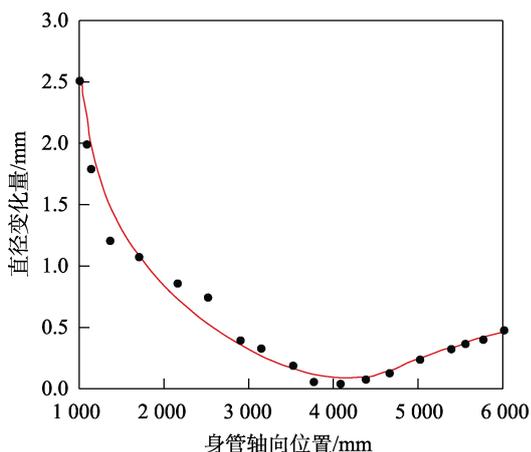


图 1 XM198 射击 1 805 发后内壁损伤量沿轴向的变化规律^[3]
Fig.1 Damage of inner surface along the axial direction of XM198 after firing 1 805 rounds^[3]

身管寿命的研究包括身管损伤机制和寿命提升技术 2 个方面, 损伤机制研究内壁在火药燃气和弹丸弹带作用下的内径扩大以及各种伴随现象的产生原因, 寿命提升方法研究提高寿命的具体方法等。本文将从身管损伤现象出发, 分析身管损伤研究的科学问题, 提出应当重点研究的身管损伤机制。基于这些机制, 指出了相应的身管寿命提升技术, 并简单介绍了一些典型方法。

1 身管损伤机制分析

身管损伤问题的科学性强, 耦合因素多, 研究难度大, 为了掌握身管损伤机制和损伤规律, 提高身管寿命, 欧美发达国家很早就开始了身管损伤理论的研究。例如, 由美国国防部主导的 2 次攻关项目, 持续 20 多年, 总体上建立了完整的身管损伤理论体系,

并于 20 世纪末, 开发了基于“热-力-化学”三因素的身管损伤计算程序。预测模型中包括了内弹道模型、传热传质边界层模型、气-壁热化学平衡模型、烧蚀量与温度预测模型等, 实现了各种中大口径身管、纯炮钢身管、镀铬身管的损伤量预测^[4-6]。国内, 梁文凯^[7]分析了身管烧蚀磨损现象, 并提出了基于熔化的损伤预测模型。许耀峰等^[2]综述了身管损伤现象, 将损伤机制归结为热烧蚀、化学烧蚀和机械磨损, 并概述了身管寿命预测方法。整体来说, 我国对损伤机制的研究较为滞后, 多为面向工程现象的寿终机制分析和寿命预测方法^[8-10], 尚未建立系统、深入的身管损伤理论体系。近年来, 随着火炮武器装备性能的进一步提升, 身管寿命不足的问题越来越突出, 南京理工大学、西北机电工程研究所等单位正在国家级重点项目支持下开展身管损伤理论的研究工作。

我国现役 155 mm 火炮采用内壁无涂层的炮钢裸材, 当火药燃气与弹丸弹带同时作用于身管时, 身管材料发生复杂的物理和化学变化。发生的主要现象有: 短脉冲强冲击高温载荷使得身管内壁浅表层材料发生结构微米级尺度组织相变, 引起材料性能硬脆化转变; 高膛压以及瞬态热应力交变作用下产生复杂的应力场演化, 引起表层裂纹萌生与扩展; 高温高压燃气组分与炮钢材料发生化学反应, 在内壁表层形成脆而硬的低熔点化合物层以及高浓度扩散层, 也合称“白层”, 直接改变了材料类型。身管内壁损伤是“热-力-化学”3 种物理场共同作用的结果。

1) 热影响。热因素是导致身管烧蚀磨损的主要因素之一, 膛内燃气与内壁面的强烈温差, 导致两者之间发生剧烈的强制换热。在内弹道循环过程中, 由于极大的热流传入, 将引起身管内壁金属表层软化, 炮钢表层最高温度可达 700 °C 以上^[11], 导致表层炮钢发生相变, 甚至局部熔化, 在高速燃气流冲刷下, 软化的金属更容易发生剥落。燃气冲刷磨损量对壁面的温度十分敏感, 当身管内壁在快速升温时, 发生奥氏体相变, 表层金属体积增大, 而在快速降温时, 又会重新转变为马氏体以及残留的部分奥氏体, 金属体积减小, 容易在降温过程中形成裂纹。同时, 由于身管内部温度分布极不均匀, 内表层将产生很大的热应力, 随着射击发数的增加, 周而复始的热应力加剧炮钢材料的疲劳失效过程, 引起大量的微裂纹, 并逐渐加深和扩展。

2) 力影响。弹带摩擦和火药燃气产生的热力脉冲载荷同时作用于身管内壁, 产生复杂的表面张应力, 非常容易造成脆性白层和表层炮钢基体发生断裂损伤, 引起表面龟裂。龟裂等形貌改变极大地提高了内膛表面粗糙度, 使得弹带对内膛的摩擦力(表面切应力)增大, 加剧内膛磨损。同时, 摩擦力随着弹丸运动的不断变化, 使得身管轴向不同位置的磨损量差异显著。

3) 化学影响。固体火药由 C、H、O、N 等元素构成, 相应的燃气混合物主要包含 CO、CO₂、H₂、H₂O、N₂ 等。当上述高温、高压还原性的气体作用于炮钢材料时, 两者将发生强烈的化学反应和元素扩散, 导致内膛微米层含碳量(还有少量氮)增加, 形成“白层”, 其中外白层的渗碳体为基相, 内白层为高碳奥氏体, 外白层厚度为 0.25~0.5 μm, 内白层厚度为 2~10 μm^[12]。伴随渗碳体或高碳奥氏体的形成, 材料熔点降低约 300 °C, 引起局部熔化或烧蚀坑, 使钢表面进一步暴露在火药燃气中, 白层增厚并脆化。

在“热-力-化学”3种因素的耦合作用下, 身管内壁材料流失, 其主要过程是燃气烧蚀炮钢产生的白层在弹带挤压作用下流失。烧蚀与磨损交替作用, 共同造成身管损伤, 因此燃气化学烧蚀和弹带摩擦磨损是身管损伤的2个重要机制。外载荷作用下, 身管自身性能退化, 包括表层材料属性和表面形貌2方面的改变, 自身性能退化又进一步促进烧蚀磨损损伤。因此, 材料性能退化和表面形貌演化是身管损伤的另外2个重要机制。

2 身管寿命提升方法

从身管内壁损伤的基本机制可以看出, 身管寿命的提升措施可以从3个方面进行研究。

1) 降低燃气的化学烧蚀作用, 减缓白层生成。主要包括高能低爆温发射药技术、低烧蚀发射药技术、缓蚀添加剂技术等。高能低爆温指的是发射药能量高的同时爆温低; 低烧蚀发射药指的是燃烧后的燃气组分不易与炮钢发生化学反应, 其化学侵蚀性降低。

2) 降低弹带对身管内壁的摩擦磨损作用。主要包括提高身管内壁硬度, 降低磨损; 优化炮钢材料属性, 提高高温稳定性; 匹配设计弹带与身管内壁结构, 优化弹带材料性能等。

3) 既减少化学烧蚀作用又降低摩擦磨损作用。主要是身管内壁抗烧蚀涂层技术。

下面从上述3方面概述身管寿命提升方法。

2.1 低烧蚀装药技术

2.1.1 高能低爆温发射药技术

由于发射药爆温越高, 产生的热量越多, 更多热量传导进入身管, 加剧了材料的性能退化, 而且高温能够促进燃气成分与炮钢的化学反应, 高温梯度会引起身管结构内复杂的热应力变化, 加剧裂纹扩展。根据理论预测^[13], 发射药爆温降低 100 °C 时, 155 mm 身管寿命提升 30%; 爆温降低 200 °C 时, 寿命提升 70%。因此, 研究低爆温发射药技术对降低身管损伤的意义重大。

一般来说, 能量高的发射药, 爆温也高。目前国内生产和装备的发射药仍然以单、双、三基发射药

为主。单基药能量较低, 多应用于轻武器和大口径火炮中, 如美国的 M6。双基药, 如美国的 M2、M5, 能量高, 烧蚀性强, 不能广泛应用于大口径火炮。在双基药中加入能量高且爆温低的冷炸药硝基胍或与其类似的炸药成分, 制得三基药, 其对炮钢的烧蚀程度低于相同能量水平的单、双基药, 较多地用于大口径和远程火炮等, 如美国的 M30 系列等。刘靖等^[14]用半密闭爆发器烧蚀管对 8 种三基发射药对炮钢材料的烧蚀率进行了试验测试, 结果表明, 发射药的爆温是影响烧蚀性的关键因素, 烧蚀时间对烧蚀性的影响较大, 爆热对烧蚀性的影响不明显。韩寒^[15]制备了改性太根发射药, 密闭爆发器试验结果表明, 爆温降低 15.6% 时, 火药力仅降低 6.2%。

2.1.2 缓蚀添加剂技术

利用缓蚀添加剂降低身管烧蚀的主要原理是, 在内膛表面形成冷却层, 将高温火药燃气与身管内膛进行部分隔离, 减少传入身管内壁的热量。缓蚀剂的使用方式主要有添加剂和护膛剂 2 类^[16]。一般来说, 缓蚀剂添加越多, 降烧蚀效果越明显, 但从综合性能考虑, 加入量不能随意增加, 需要通过试验确定, 否则会影响火炮的弹道性能^[17]。

传统缓蚀剂的主要成分为钛白粉(TiO₂)、滑石粉等无机化合物, 因能有效缓解身管内膛的烧蚀而被国内外广泛采用。研究表明^[16], 滑石粉/石蜡的降烧蚀性能比 TiO₂/石蜡优越, 残渣更少。针对传统缓蚀剂中烟雾大、残渣多等不良现象, 国内外很多学者进行了配方改进研究。例如, 新型缓蚀剂包括基于碳酸钙和滑石粉的配方^[18]、微细滑石粉缓蚀剂^[19]、有机硅树脂与多种基材的复合物^[20]、谷氨酸钾^[21]、碳酸氢铵和碳酸氢钾^[22]、稀土氧化物^[23]、新型有机硅^[24]、偏钛酸/脲醛树脂核壳结构复合物^[25]、纳米添加剂^[26]等。

2.2 身管内壁抗磨损技术

2.2.1 高温高强度钢技术

当今世界, 身管的主要制造材料是 Cr-Mo-V 系炮钢。20 世纪 80 年代, 国内在 AISI4340、ASTM A723 等国外炮钢基础上, 发展了 PCrNi3MoVA、32CrNi3MoVE 等身管材料。其成分特点为: 中高碳低合金钢, 碳的质量分数在 0.32%~0.42%, Ni 的质量分数在 3% 左右, Cr 的质量分数在 1% 左右。室温强度 ($R_{p0.1}$) 为 1 104~1 172 MPa, -40 °C 冲击功 A_{KV} 达 20 J 以上, 具有良好的强度与韧性。其静态性能见表 1, 动态本构关系见文献^[27]。

综上所述, 国内外现用炮钢均具有优良的室温和低温强韧性, 但高温热强性差。例如, 700 °C 下高温强度从室温的 1 100~1 200 MPa 急剧下降到仅 150~220 MPa, 高温弹性模量从室温的 200~210 GPa 下降到仅 45~50 GPa。低热强会导致身管变形加大, 服役

表 1 现用炮钢基本力学性能^[28]
Tab.1 Basic mechanical properties of current gun steel^[28]

材料	室温拉伸		700 °C 拉伸 R_m /MPa	-40 °C 冲击功 A_{KV} /J	K_{IC} /(MPa·m ^{0.5})
	$R_{p0.1}$ /MPa	Z/%			
AISI4330	870~1050	>25	170	>20	110~120
ASTM A723	920~1150	>25	167	>20	120~135
32CrNi3MoVE	1104~1172	>25	150~220	>20	130

性能降低。高文等^[29]从炮钢成分、高纯净度冶炼技术、热处理工艺等方面研发了新型炮钢材料, 高温强度较现用枪炮钢均提高 1.5~2 倍, 性能全面优于国内外同类材料。磨损试验表明, 新材料的室温与高温磨损量仅为现役炮钢的 1/3~1/5, 在各种温度下, 新炮钢材料具有更好的耐磨性能。

目前, 新型枪管材料和炮钢材料已经应用于自动步枪、大口径重机枪、小口径火炮等现役装备, 实现了仅通过替换炮钢材料就达到身管寿命翻倍的效果。新型炮钢材料的优异性能使其在大口径火炮上具有良好的应用潜力。

2.2.2 身管内壁激光强化技术

激光相变强化是一种比较成熟的金属热处理工艺, 是将材料表层快速加热到临界相变温度以上, 随后高温表层材料向基体快速导热的自淬冷却过程。由于金属的导热率比常规淬火介质(油或水)导热率高 2 个数量级, 因此其区别于常规淬火的明显特点是具有极快的加热与冷却速度。正是这些特性, 经激光相变强化处理的零件, 表面强化层组织晶粒细小、位错密度极高, 强度与塑性均得以提高, 并存在残余压应力, 使零件表层具有良好的耐磨性、耐腐蚀性、抗疲劳性能和高温性能等, 而零件芯部仍然保持原有的力学性能。李怀学等^[30]研究了激光淬火区的力学性能。徐向阳等^[31]采用激光相变硬化的方法对基体表层预先进行处理, 以改善电镀层与基体的结合强度。

经过激光相变强化处理后, 内膛表层的强度显著提高, 并且硬度比常规淬火高 15% 以上。因此, 身管内壁的耐磨损性能随之大幅度提高, 同时炮钢材料的疲劳性能有所提升。王茹等^[32]用连续 CO₂ 激光束处理了 12.7 mm 烧蚀试验枪衬管, 经实弹射击考核, 其抗烧蚀寿命比未经处理的枪管提高 40% 以上。南京理工大学联合中国科学院力学研究所进行了某外贸车载炮的激光内壁强化, 实弹射击表明, 激光强化可提升 20%~30% 的身管寿命。

2.3 身管内壁抗烧蚀涂层技术

2.3.1 耐高温抗烧蚀材料

膛内环境极端恶劣, 具有高温、高压、高活性的特点, 因此抗烧蚀材料的选择需要从化学、热、力学等 3 个角度综合考虑。要求具备以下性能: 良好的化学稳定性, 不与火药燃气中的主要成分发生化学反应;

具有优良的抗热性能和热稳定性, 熔点高, 而且在高温下能够维持较高的强度和刚度; 低热传导系数, 良好的抗热冲击性能, 减小热量向炮钢的传递; 具有较高的强度和一定的硬度, 能够承受弹带的挤压摩擦作用; 良好的断裂韧性, 能够阻止裂纹的大量萌生与扩展。

虽然很难找到完全满足上述要求的材料, 但从综合性能来看, 陶瓷显然是一种极具潜力的涂层材料, 具备优秀的高温性能, 硬度高, 密度低, 抗化学烧蚀能力强, 热稳定性高, 熔点极高。熔点超过 3 000 °C 的超高温陶瓷, 在火箭推进系统、冲压发动机、高超声速飞行器等领域应用广泛。美国陆军研究实验室对 8 种陶瓷在身管上应用的可行性进行了研究^[33], 基于烧蚀管实验考核了陶瓷内衬的抗烧蚀性能, 结果表明, 氮化硅陶瓷和塞隆陶瓷的性能最佳。陶瓷材料作为身管使用时, 虽然质量更轻、性能更优, 但是面临制造加工的难题, 制造较大长径比、深孔、具有一定缠角的线膛身管是陶瓷材料成形工艺的巨大挑战。制造复杂形状陶瓷结构的通常方式是金刚石研磨, 这种方式不仅价格昂贵, 而且容易在结构表面产生微裂纹, 严重影响陶瓷身管在内膛环境下的服役性能。美国 Materials Processing 公司使用粉末注射成形工艺尝试制备了氧化铝陶瓷的线膛身管^[34]。

另一类可选材料就是难熔金属, 根据元素周期表看, 主要包括铬(Cr)、铌(Nb)、钼(Mo)、钨(W)、铼(Re)、钽(Ta)等 6 种材料。金属铬的熔点最低, 小于 2 000 °C。铬作为内衬材料使用时, 另一个缺陷是脆性易萌生裂纹, 进而发生局部脱落。金属铌的优点是密度小、质量轻, 但是太软, 难以抵抗弹带的挤压摩擦作用。金属钼的强度也不高, 而且在内膛环境下容易发生氢脆破坏。金属钨的刚度、强度都非常高, 但韧性较差, 容易破坏, 机械加工难度大, 且容易发生氢脆。金属铼是最贵的难熔金属, 使用成本太高, 可以考虑作为其他难熔金属的合金添加剂, 来提升合金的延展性。金属钽的综合性能较好, 属于第二贵的难熔金属, 使用成本较高。

2.3.2 身管内壁涂层制备工艺

一般来说, 陶瓷内衬制造困难, 与炮钢基体的粘结性也较差, 抗机械冲击能力不如炮钢, 也会存在内衬滑出衬套或在衬套内转动等问题。难熔金属可以以内衬或者涂层的形式复合到身管内壁, 内衬较厚, 抗热抗烧蚀能力好, 但是大型薄壁圆筒内衬的加工以及

与身管的结合工艺复杂,成本较高。如果使用短内衬,可以有效降低成本。作为涂层使用时,难熔金属用量少,可选涂覆工艺多。难熔金属以涂层形式结合到身管内壁时,厚度一般在几十到上百微米,涂层无需承受射击时的瞬态结构应力响应,对涂层材料的强度要求较低。常见的身管内壁涂层技术有电镀、磁控溅射等。

电镀技术是用电化学的方法在固体表面上沉积金属或合金的过程,其原理如图2所示。身管内壁电镀铬已经作为一种成熟工艺,广泛应用于各种口径枪管、火炮身管的内壁处理,显著提升了身管寿命。20世纪80年代,我国开始将镀铬技术应用到枪管,从单一常规镀铬工艺扩展到换向镀铬、快速镀铬、流动镀铬、复合镀铬等^[35]。447厂在国内首创了中口径滑膛身管的内壁镀铬工艺,靶场试验结果表明,寿命明显提高^[36]。传统的电镀铬工艺存在铬层硬、易生裂纹、不环保、效率低等问题,促使科技工作者不断改进电镀工艺。陈光南等^[37]提出了通过激光淬火预处理改进镀铬工艺的新技术。张健等^[38]研究了炮钢表面电火花沉积铬的强化层性能。Shukla等^[39]对比了纯铬层和复合铬层的基本性能。

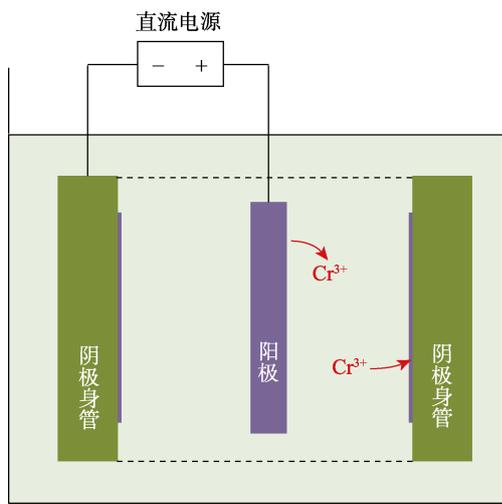


图2 身管电镀工艺原理
Fig.2 Schematic diagram of electro-plating process of gun barrel

磁控溅射法是一种物理气相沉积法,通过电场电离工质气体,形成带电离子,在磁场作用下离子高速轰击金属靶材,溅射出靶材原子或原子团,逐步沉积到身管内壁,形成致密靶材合金涂层。其基本原理如图3所示。该过程无排放、无污染,可在身管内壁形成冶金结合级别的耐高温抗烧蚀涂层,从而获得对身管寿命的有效提升。Vigilante等^[39]研究了120mm坦克炮内壁磁控溅射钽的工程实现方法,采取等离子清洗、中间过度铬层等方法以提高镀层与基体的结合力。苏北^[40]采用磁控溅射法在炮钢材料表面制备了钽钨合金涂层,使用摩擦磨损试验、激光烧蚀试验、高

温循环氧化试验对涂层性能进行了测试。

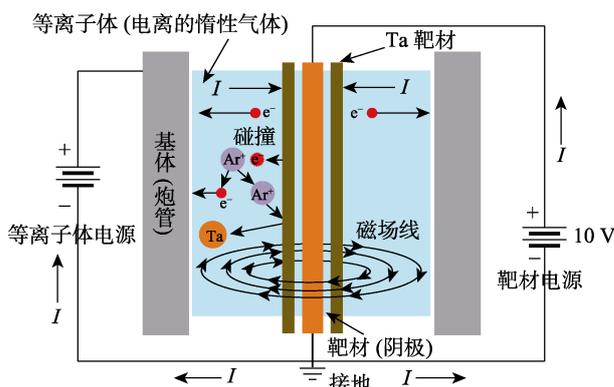


图3 身管内壁磁控溅射钽工艺原理^[40]
Fig.3 Schematic diagram of magnetron tantalum sputtering on the inner surface of gun barrel^[40]

除电镀铬和磁控溅射钽之外,科技工作者广泛研究了多种工艺方法和涂层材料用来提高身管寿命的可能性。胡明^[41]使用电镀、磁控溅射、多弧离子镀三种工艺制备了铬涂层,并比较了工艺对铬层抗磨损性能、与基体的结合性能、抗腐蚀性能等的影响。万轶等^[42]使用双层辉光等离子技术在炮钢表面进行了渗钽层制备,并利用激光烧蚀试验考核了涂层的抗烧蚀性。Garrett等^[43]使用低温化学气相沉积法在身管内壁制备了铼涂层。Rosset^[44]综合使用GLEEM技术和锤锻技术制备了金属铌内衬和炮钢的复合身管。王新^[45]使用磁控溅射技术在炮钢表面沉积了TiAlN和TiAlVN,并系统研究了Al/Ti含量对TiAlN涂层的影响,以及V含量对TiAlVN涂层的影响。Zhang等^[46]使用磁控溅射技术在炮钢表面制备了NiCrAlY涂层。此外,为了充分发挥材料优势,梯度涂层和复合涂层的研究与应用也逐步深入。例如,梯度镀铬层由底层的低收缩性铬和顶层的高收缩性铬组成,可以充分发挥2种铬涂层的优势^[47]。在电镀铬层中添加一定含量的氧化锆和碳纳米管可提升涂层的硬度和抗磨损性^[38]。磁控溅射制备金属钽涂层时,采用中间铬层可有效提升界面结合力。

3 结语

大口径火炮身管损伤机制主要包括高温高压燃气对炮钢的化学烧蚀机理、燃气对内壁的冲刷机理、内壁裂纹的形成与演化机理、弹带与身管内壁的摩擦磨损机理等。损伤机制是寿命提升方法的理论基础,对于制定切实有效的寿命提升技术方案至关重要。身管寿命提升技术是一项综合工程,需要综合火炮、材料、发射药、内弹道等开展多学科研究,从抗燃气化学烧蚀和抗弹带摩擦磨损2个方面采取措施。低爆温发射药、新型高性能炮钢材料、大口径火炮内壁涂层工艺等是身管寿命提升的重要研究方向。

参考文献:

- [1] GJB 2975—97, 火炮寿命试验方法[S].
GJB 2975—97, Test Method of Gun Life[S].
- [2] 许耀峰, 单春来, 刘朋科, 等. 火炮身管寿终机理及寿命预测方法研究综述[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(3): 89-94.
XU Yao-feng, SHAN Chun-lai, LIU Peng-ke, et al. Review of the Research on Failure Mechanism and Life Prediction Method of Gun Barrel[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020, 41(3): 89-94.
- [3] MONTGOMERY R S. Muzzle Wear of Cannon[J]. Wear, 1975, 33(2): 359-368.
- [4] 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.
- [5] SOPOK S, RICKARD C, DUNN S. Thermal-Chemical-Mechanical Gun Bore Erosion of an Advanced Artillery System Part Two: Modeling and Predictions[J]. Wear, 2005, 258(1/2/3/4): 671-683.
- [6] SOPOK S, O'HARA P, PFLEGL G, et al. Unified Computer Model for Predicting Thermochemical Erosion in Gun Barrels[J]. Journal of Propulsion and Power, 1999, 15(4): 601-612.
- [7] 梁文凯. 身管烧蚀磨损问题的分析与研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
LIANG Wen-kai. The Analysis and Investigations on the Problem of Barrel Erosion and Wear[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [8] 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.
YI Huai-jun, LIU Ning, ZHANG Xiang-yan, et al. Prediction of Gun Barrel Wear Based on Improved Non-Equal Interval Grey Model and BP Neural Network[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(12): 2220-2225.
- [9] 杨雕, 陈志坚, 刘朋科, 等. 某迫击炮身管寿命分析及预测[J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38(4): 87-91.
YANG Diao, CHEN Zhi-jian, LIU Peng-ke, et al. Analysis and Prediction of the Service Life of a Mortar Tube[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2017, 38(4): 87-91.
- [10] 焦贵伟, 胡朝根. 火炮身管寿命评估预测[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(5): 66-69.
JIAO Gui-wei, HU Chao-gen. Research of Evaluation and Prediction Technology for Gun Barrel Life[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(5): 66-69.
- [11] MISHRA A, HAMEED A, LAWTON B. A Novel Scheme for Computing Gun Barrel Temperature History and Its Experimental Validation[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(6): 061202.
- [12] TURLEY D M, GUMMING G, GUNNER A, et al. A Metallurgical Study of Erosive Wear in a 105 mm Tank Gun Barrel[J]. Wear, 1994, 176(1): 9-17.
- [13] LAWTON B. Thermo-Chemical Erosion in Gun Barrels[J]. Wear, 2001, 251(1-12): 827-838.
- [14] 刘靖, 黄振亚, 汪俊杰, 等. 三基发射药烧蚀性影响因素的实验研究[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 392-396.
LIU Jing, HUANG Zhen-ya, WANG Jun-jie, et al. Experimental Study on Influence Factors of Triple Base Propellant Erosion[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(3): 392-396.
- [15] 韩寒. 高能低爆温发射药研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
HAN Han. The Development of Propellants with High Energy and Low Explosion Temperature[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [16] 林少森, 闫军, 俞卫博, 等. 身管烧蚀及缓蚀剂作用机理研究现状[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(1): 92-96.
LIN Shao-sen, YAN Jun, YU Wei-bo, et al. Research Status of Gun Barrel Erosion and Inhibitor Mitigation Mechanism[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2016, 37(1): 92-96.
- [17] 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 Erosion Life of a Gun Barrel[J]. Acta Armamentarii, 1995, 16(3): 54-58.
- [18] 孟繁荣, 冯士德, 李宪一. 新型缓蚀添加剂配方设计研究[J]. 弹道学报, 1994, 6(3): 26-30.
MENG Fan-rong, FENG Shi-de, LI Xian-yi. Design and Research of New Type Reduce Erosion Additive Prescription[J]. Journal of Ballistics, 1994, 6(3): 26-30.
- [19] 梁西瑶. 微细滑石粉缓蚀剂降烧蚀性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2000.
LIANG Xi-yao. Study on Ablative Performance of Micro Talc Inhibitor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2000.
- [20] 姬月萍, 张玉祥, 卢先明, 周诚. 新型缓蚀添加剂配方设计研究[J]. 火炸药学报, 2000, 23(4): 39-41.
JI Yue-ping, ZHANG Yu-xiang, LU Xian-ming, et al. Study on Prescription Designed of the New Type Inhibitor[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2000, 23(4): 39-41.
- [21] 曹万有. 高膛压火炮技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
CAO Wan-you. High Bore Pressure Gun Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1989.

- [22] STIEFEL L. Gun propulsion technology[M]. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 1989.
- [23] 樊伟, 崔艳芳, 田甜, 等. 稀土氧化物作为缓蚀添加剂隔热机理研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(5): 62-65.
FAN Wei, CUI Yan-fang, TIAN Tian, et al. Thermal Insulation Mechanism of Rare Earth Oxides as Erosion Reducing Additive[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(5): 62-65.
- [24] 郑双, 刘波, 刘少武, 等. 新型有机硅降蚀剂在小口径武器装药中的应用[J]. 含能材料, 2011, 19(3): 335-338.
ZHENG Shuang, LIU Bo, LIU Shao-wu, et al. Application of a New Agent of Low Erosion in the Small Caliber Weapon[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(3): 335-338.
- [25] 林少森, 闫军, 李洪广, 等. 偏钛酸粉体表面有机包覆及其在身管缓蚀中的应用[J]. 应用化工, 2017, 46(4): 671-673.
LIN Shao-sen, YAN Jun, LI Hong-guang, et al. Surface Modification of Metatitanic Acid Powders and Its Application on Barrel Erosion Inhibitor[J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(4): 671-673.
- [26] 陈永才, 宋迺志, 王建中. 含纳米添加剂发射药的烧蚀性能研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(3): 329-331.
CHEN Yong-cai, SONG Qiu-zhi, WANG Jian-zhong. Thermochemical Erosion of Propellant with Nanometer Additives[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(3): 329-331.
- [27] 曾志银, 高小科, 刘朋科, 等. 炮钢材料动态本构模型及其验证[J]. 兵工学报, 2015, 36(11): 2038-2044.
ZENG Zhi-yin, GAO Xiao-ke, LIU Peng-ke, et al. Dynamic Constitutive Model of Gun Steel Material and Its Verification[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(11): 2038-2044.
- [28] 黄进峰. 枪炮身管损伤行为与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
HUANG Jin-feng. Damage Behavior and Mechanism of Gun Barrel[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [29] 高文, 连勇, 黄进峰, 等. 不同环境温度下典型身管用钢磨损性能研究[J]. 工程科学学报, 2017, 39(11): 1699-1708.
GAO Wen, LIAN Yong, HUANG Jin-feng, et al. Effect of Ambient Temperature on the Wear Performance of Typical Gun Barrel Steels[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(11): 1699-1708.
- [30] 李怀学, 陈光南, 张坤, 等. 30CrNi2MoVA 钢激光淬火区的力学性能研究[C]//第 13 届全国特种加工学术会议论文集. 南昌: [出版者不详], 2009.
LI Huai-xue, CHEN Guang-nan, ZHANG Kun, et al. Mechanical properties of laser-quenched zones of 30CrNi2MoVA steel[C]. Proceedings of 13th National Special Processing Conference. Nanchang: [s. n.], 2009.
- [31] 徐向阳, 张坤, 陈光南, 等. 激光硬化基体对镀铬层组织和结合的影响[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 413-416.
XU Xiang-yang, ZHANG Kun, CHEN Guang-nan, et al. Influence of Laser Hardening Substrate on Microstructure and Bonding of Electroplating Chromium Coating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(3): 413-416.
- [32] 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.
WANG Ru, AN Shi-min. Study of Ablation Resistance of Non Chromium Plated Firearm Tubes Treated by Laser[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1997, 37(2): 222-226.
- [33] CARTER R H, UNDERWOOD J H, SWAB J J, et al. Material Selection for Ceramic Gun Tube Liner[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2006, 21(6): 584-590.
- [34] BOSE A, DOWDING R J, SWAB J J. Processing of Ceramic Rifled Gun Barrel[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2006, 21(6): 591-596.
- [35] 奚兵. 枪管镀铬的发展与实践[J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(3): 131-132.
XI Bing. Development and Practice of Barrel Chrome Plating[J]. Corrosion & Protection, 2000, 21(3): 131-132.
- [36] 杨凤轩. 大口径火炮身管内膛防烧蚀镀铬[J]. 表面技术, 1990, 19(3): 20-24.
YANG Feng-xuan. Researches on the Chromium Plating for the Antiablation in the Internal Bore of Large Calibre Gun with High Pressure[J]. Surface Technology, 1990, 19(3): 20-24.
- [37] 陈光南, 罗耕星, 张坤, 等. 提高镀铬身管寿命的激光强化新方法[J]. 兵工学报, 2003, 24(增刊): 6-10.
CHEN Guang-nan, LUO Geng-xing, ZHANG Kun, et al. A New Method of Laser Strengthening to Improve the Service Life of Chromium Plated Barrel[J]. Journal of Ordnance Engineering, 2003, 24(Supplement): 6-10.
- [38] SHUKLA P, AWASTHI S, RAMKUMAR J, et al. Protective Trivalent Cr-Based Electrochemical Coatings for Gun Barrels[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 768: 1039-1048.
- [39] VIGILANTE G N, MULLIGAN C P. Cylindrical Magnetron Sputtering (CMS) of Coatings for Wear Life Extension in Large Caliber Cannons[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2006, 21(6): 621-627.
- [40] 苏北. 身管内膛磁控溅射 Ta-W 涂层的制备及性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
SU Bei. Preparation and Properties of Ta-W Coating by Magnetron Sputtering on Gun Steel[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020.
- [41] 胡明. 不同制备方法的火炮身管材料 Cr 涂层性能研究

- [D]. 太原: 中北大学, 2019.
- HU Ming. Research on the Properties of Cr Coatings Prepared by Three Methods on the Surface of Gun Barrel Material[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [42] 万轶, 熊党生, 李建亮. 辉光渗钼层的制备与烧蚀性能[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(7): 853-859.
- WAN Yi, XIONG Dang-sheng, LI Jian-liang. Preparation of Glow Discharge Tantalum Coating and Its Ablation Properties[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(7): 853-859.
- [43] GARRETT W, SHERMAN A J, STIGLICH J. Rhenium as a Hard Chrome Replacement for Gun Tubes[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2006, 21(6): 618-620.
- [44] DE ROSSET W S. Processing of Composite Gun Tubes with GLEEM and Hammer Forging[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(10): 1168-1173.
- [45] 王新. 炮钢表面磁控溅射制备 TiAlVN 膜层及性能的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- WANG Xin. Study on the Preparation and Properties of TiAlVN Films by Magnetron Sputtering on the Surface of Gun Steel[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [46] ZHANG Jian, GUO Ce-an, ZHANG Gang, et al. Properties of Sputtered NiCrAlY Used for Protective Gun Tube Coatings[J]. Materials Science Forum, 2011, 686: 613-617.
- [47] 李怀学, 陈光南, 张坤, 等. 身管内膛复合镀铬层的组织退化特征[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(4): 111-115.
- LI Huai-xue, CHEN Guang-nan, ZHANG Kun, et al. Degradation of Microstructure of Duplex Electroplated Chromium Layers in Gun Barrels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(4): 111-115.

责任编辑: 刘世忠