

身管内膛镀铬性能检测研究

张凡凡¹, 张利峰², 李欧², 王威², 杨雕¹

(1.西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099;

2.内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古 包头 014030)

摘要: **目的** 对内膛表面强化层性能进行定量评估, 给后续镀铬层的优化及新型内膛表面强化层技术的优选提供试验方法。**方法** 以成熟度最高、应用最广泛的内膛表面镀铬技术为依据, 开展强化层检测研究, 主要包括硬度、厚度及微观缺陷、结合性能、抗烧蚀性能、抗磨损性能等研究。量化镀铬层抗烧蚀、抗磨损性能, 实现实验室对内膛镀铬层性能的综合评估。**结果** 铬层硬度约为 521.8HV, 高于基体硬度。铬层裂纹初始宽度约为 300 nm, 多数裂纹未连接成“网状”。铬层与基体结合力约为 67.2 N。相同条件下, 相比基体, 镀铬层的烧蚀量和磨损量始终较小。**结论** 镀铬层综合性能优于基体材料。

关键词: 火炮身管; 寿命; 镀铬; 强化层; 烧蚀; 磨损; 性能检测

中图分类号: TJ301

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)07-0018-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.003

Performance Test of Chromium Plating in Body Bore

ZHANG Fan-fan¹, ZHANG Li-feng², LI Ou², WANG Wei², YANG Diao¹

(1. Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Shaanxi Xianyang 712099, China;

2. Norinco Group Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co., Ltd., Inner Mongolia Baotou 014030, China)

ABSTRACT: When an artillery is in lunch process, the barrel is subjected to the coupling effects of various strong loads, resulting in ablative wear of the inner bore until the end of its life. Inner bore surface strengthening is the most direct and effective measure to improve the lifetime of the body tube. The purpose of this paper is to quantitatively evaluate the performance of the reinforcing layer and to provide a test method for the optimization of the chromium coating and the new inner bore surface strengthening technology. Based on the highest maturity and the most widely used technology-chrome plating on inner bore surface, the performance of strengthening layer is tested and studied, including hardness, thickness and micro defects, bonding performance, anti-ablative performance, anti-wear performance and so on. The anti-ablative and anti-wear properties of the chromium coating are quantified, which realized the comprehensive evaluation of the chromium coating performance in the laboratory. The hardness of chromium coating is about 521.8HV, which is higher than that of substrate. The initial crack width of the chromium coating is about 300 nm, and most cracks are not connected into a network. The adhesion between chromium coating and substrate is about 67.2 N. Under the same conditions, the ablation and wear of the chromium coating are always smaller than that of the substrate. The comprehensive performance of chromium coating is better than that of the substrate.

KEY WORDS: gun barrel; life; chromium plating; strengthened layer; ablation; wear; performance test

收稿日期: 2022-05-22; 修订日期: 2022-07-15

Received: 2022-05-22; Revised: 2022-07-15

作者简介: 张凡凡(1994—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为火炮发射动力学及身管寿命。

Biography: ZHANG Fan-fan (1994-), Female, Master, Assistant engineer, Research focus: artillery firing dynamics&barrel life.

引文格式: 张凡凡, 张利峰, 李欧, 等. 身管内膛镀铬性能检测研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 180-025.

ZHANG Fan-fan, ZHANG Li-feng, LI Ou, et al. Performance Test of Chromium Plating in Body Bore[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 180-025.

身管作为火炮武器实现发射与毁伤基本功能的核心载体^[1], 直接影响火炮武器的发射精度、射程射速、火力密度、持续作战等火力打击能力^[2]。身管“寿命終了”意味着装备完全丧失战斗力, 更换身管需要火炮撤出战场, 严重影响火炮武器的持续作战能力^[3-5]。身管寿命是指火炮按规范条件发射, 身管因烧蚀磨损在弹道性能降低到指标规定的允许值前, 所能发射的等效全装药当量射弹总数^[6-8]。火炮发射过程中, 身管承受瞬态高温、高压、高速气固两相流烧蚀、冲刷, 火药燃气化学侵蚀, 弹炮摩擦、碰撞等多种强载荷的耦合作用, 造成内膛烧蚀、磨损、裂纹等, 导致内膛径向尺寸扩大, 影响火炮射程、精度等弹道性能及发射安全性^[9]。

影响身管寿命的因素较多, 与内膛和弹丸结构、身管材料、内弹道及装药结构、表面强化等均有关。基于现役制式炮弹药结构, 身管内膛表面强化是提高身管寿命最直接有效的措施。表面电镀铬技术作为成熟度较高、应用较广泛的内膛强化层之一, 国内身管镀铬工艺源自20世纪90年代引进的国外技术和关键设备, 并建成生产线。多年来, 尽管镀铬技术已应用于坦克炮、榴弹炮、舰炮及小口径火炮身管, 与未镀铬身管相比, 镀铬身管抗磨损和烧蚀能力^[10-12]得到大幅度提高, 身管寿命最高提升1倍。由于身管内膛镀铬表面强化方法是以电镀的方式将铬原子在身管基体上还原生成覆盖层^[13-17], 因此铬层与基体非冶金结合, 在使用过程中存在脱落可能性, 且铬层表面存在较多初始缺陷及裂纹^[18-21], 故现有身管内膛表面镀铬技术还存在较大的发展及改进空间。

文献[22]对镀铬层厚度进行了研究, 提出了调整镀铬层厚度的方法, 并进行了验证。文献[23]对镀铬表面的裂纹失效进行了分析, 探讨了裂纹出现的原因和有效避免缺陷产生扩展的方法。文献[24]对镀铬层的微观形貌和性能做了对比研究, 找出了最满足生产要求的工艺。文献[25]把工艺对镀层形貌和结合力的影响进行了说明, 证实了新工艺镀铬的可实现性。文献[26]对镀铬身管的烧蚀行为进行了研究, 揭示了激光历史预处理对提高镀铬身管寿命的帮助。从已有文献看, 目前对于身管内膛强化层的研究仅是围绕单一的性能开展, 基于实验室的身管内膛表面强化层性能综合检测及评估方法相对较少。

鉴于此, 文中围绕身管内膛强化层性能检测问题, 以内膛镀铬身管为对象, 开展内膛镀铬层性能检测方法研究。围绕身管寿命提升对镀铬层性能的需求, 重点开展硬度、厚度及微观缺陷、结合性能、抗烧蚀性能、抗磨损性能等研究, 建立基于实验室的强化层检测方法, 掌握了镀铬层微观缺陷分布规律, 获得了镀铬层与基体的结合力、镀铬层抗烧蚀磨损性能, 量化了内膛镀铬对身管抗烧蚀磨损性能的提升程度, 为后续镀铬层的优化及新型内膛表面强化层技术

的优选提供试验方法。

1 身管内膛镀铬技术

铬是一种微带蓝色的银白色金属, 密度 $6.98 \sim 7.21 \text{ g/cm}^3$, 熔点为 $1\,875 \sim 1\,920 \text{ }^\circ\text{C}$, 硬度随着温度的升高变化较小, 具有较小的摩擦系数, 较好的抗烧蚀、耐磨损性能。镀铬技术是一种广泛用于钢铁等金属防腐耐磨装饰等方面的通用技术, 通过电化学方法在基体表面沉积铬涂层, 它能使镀液中的金属铬离子, 有序地在镀液和基体接触表面获得电子, 还原成铬原子, 并沉积在基体表面, 形成宏观铬层。

身管镀铬时, 采用阳极插入身管, 使阳极与身管内表面等距离 (阳极位于内孔中心位置)。然后阳极接电源正极, 身管接电源负极, 身管与阳极用工装固定相对位置, 置于镀铬溶液中, 由溶液将阳极与身管连接, 使整个电路形成闭合的回路。当电源按工艺需要通电后, 经过一定时间, 便形成需要厚度的铬层。

身管镀铬的示意图如图1所示。身管膛线截面是多个规则排列的矩形, 阳线是突出的矩形 (近似), 两阳线之间是阴线, 因此阳线是近阴极, 阴线是远阴极, 阳线的棱边会产生对电流密度的集聚效应。镀铬时, 内膛表面存在电场, 该电场电荷集聚情况是: 阳线棱边集聚电荷最多, 其次是阳线正面, 再次是阳线的侧面、阴线正面, 最少是阴角部位。在电荷集聚最多的部位, 电场强度也大, 铬离子优先在高场强处放电, 实现铬的沉积。同时, 阴线夹在阳线的中间, 阴线正面与阳线正面相比, 远离阳极, 电场强度更弱, 铬离子沉积减慢。最终内膛镀铬之后, 铬层沿膛线截面各部位厚度分布不均匀。铬层厚度的不均匀会进一步引起铬层内应力的变化, 使得铬层内部的微裂纹、局部组织、局部硬度等出现一定的偏差。

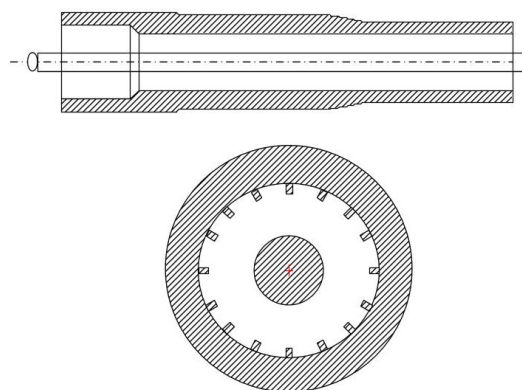


图1 镀铬时阳极与身管直膛部相对位置
Fig.1 Schematic diagram of the relative position of the anode and the straight bore of the body tube during chrome plating

火炮射击过程中, 内膛受到高温、高压、高速火药气体冲刷与烧蚀, 弹带摩擦等作用, 使得身管内膛产生

烧蚀、磨损、裂纹等故障模式,所以需开展防护层-基体系统试验测试技术研究,建立防护层-基体系统综合

性能实验室检测方法,进而为身管故障模式及失效机理分析奠定基础。防护层综合实验测试内容见表1。

表1 防护层综合实验测试内容
Tab.1 Comprehensive experimental test content of the protective layer

测试内容	实验内容	表征参数	测试仪器/仪器型号
硬度及微观性能	硬度	维氏硬度	HTV-PHS30 高温维氏硬度计
	厚度及微观缺陷	厚度及裂纹尺寸	FEI/Q45 型 SEM 扫描电子显微镜
结合性能	划痕试验	结合力	WS-2005 划痕测试仪
	热震试验	裂纹及防护层脱落情况	高温炉
抗烧蚀、磨损性能	烧蚀试验	烧蚀量及熔融时间	氧丙烷火焰烧蚀实验平台
	摩擦磨损试验	磨损量	MMU-10G 微机控制高温端面磨损试验机

2 镀铬层硬度、厚度及微观缺陷研究

依据 GB/T 4340.1—2009《金属维氏硬度试验 第1部分:试验方法》,采用 HTV-PHS30 高温维氏硬度计(如图2所示)进行硬度测试。试验中需将硬度计主机放置在惰性气体保护的气氛室内,以免试样被高温氧化,然后采用高温炉将试样加热至所需温度,测量硬度。首先将基体及镀铬强化层试样加工为 $\phi 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的圆柱(如图3所示),放入气氛室内,并充入氩氢混合气体,然后将温度分别设置为常温和200、300、400、500、600、700℃,最后测量不同温度下试样的硬度。



图2 HTV-PHS30 高温维氏硬度计
Fig.2 High temperature Vickers hardness tester

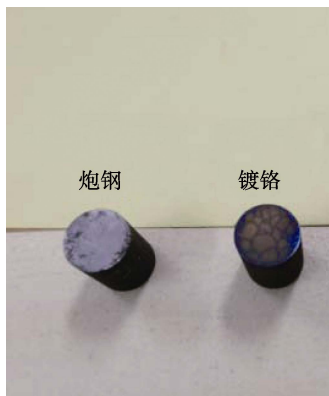


图3 基体和镀铬试样
Fig.3 Substrate sample and chrome plated sample

不同温度下基体材料及镀铬试样铬层高温维氏硬度如图4所示。从测试结果可以看出,镀铬层维氏硬度大于500HV。高温环境下,镀铬层硬度相比基体材料下降缓慢(尤其在600℃以后),700℃下铬层硬度(229.7HV)远高于基体硬度(86.7HV),表明铬层高温力学性能较好,可满足内膛较高的温度环境。

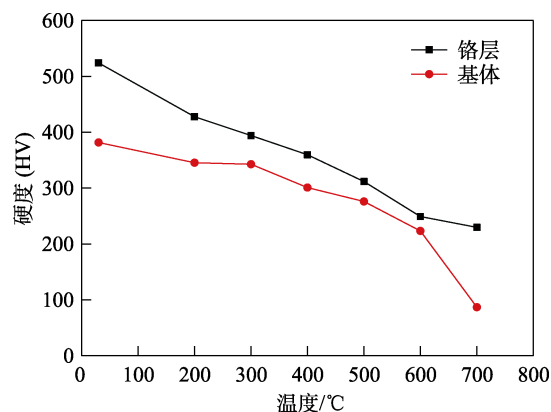


图4 铬层及基体硬度随温度变化曲线
Fig.4 Curve of hardness of chromium coating and substrate with temperature

依据 GB/T 31563—2015《金属覆盖层厚度测量 扫描电镜法》,采用 FEI/Q45 型 SEM 扫描电子显微镜在不同放大倍数下对裂纹及缺陷密度、主要裂纹宽度、主要缺陷面积等进行测量(对防护层截面重点观测铬层与基体结合面位置处)。镀铬试样表面微观形貌及缺陷如图5所示。可以看出,镀铬试样表面有不规则的初始裂纹,裂纹宽度小于1μm。在8000倍放大倍数下,试样局部出现宽度约为300nm的裂纹,但多数裂纹未连接形成“网状”。

镀铬试样防护层厚度、截面微观裂纹尺寸及缺陷如图6、图7所示。铬层与基体分界线明显、铬层厚度约92μm。沿镀层厚度方向上裂纹多为细小的局部裂纹,分布于铬层内。铬层内典型裂纹形式有:直接贯穿铬层的裂纹、未贯穿铬层的裂纹、分别从铬层表面与结合面产生并交汇到一起的裂纹等。

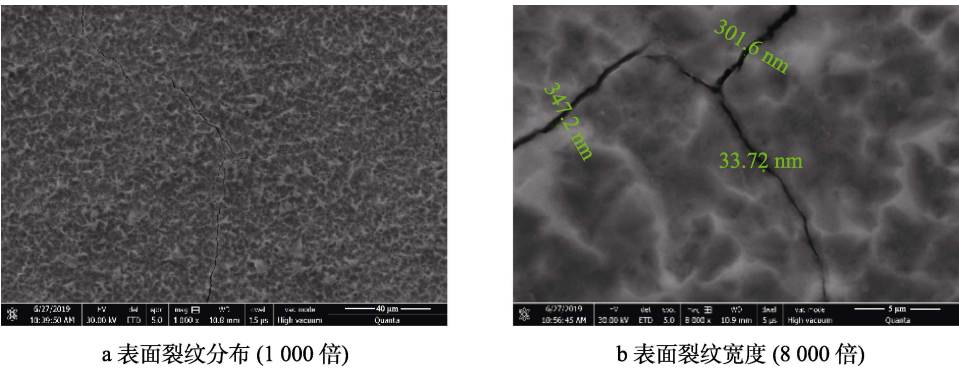


图 5 镀铬试样表面微观形貌及缺陷
Fig.5 Surface morphology and defects of chrome plated samples: a) surface crack distribution (1 000 times); b) surface crack width (8 000 times)

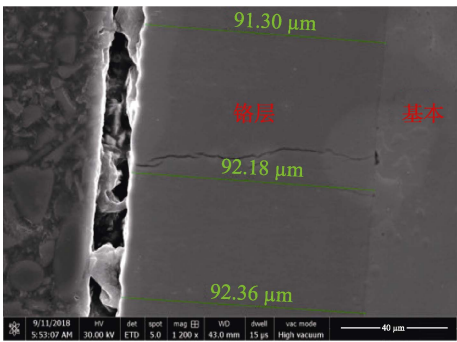


图 6 铬层厚度 (1 000 倍)
Fig.6 Chromium coating thickness (1 000 times)

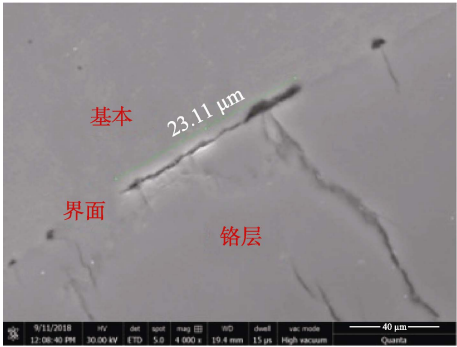


图 7 结合面孔洞及缺陷 (4 000 倍)
Fig.7 Combined face holes and defects (4 000 times)

3 镀铬层-基体结合性能研究

研究采用划痕法对镀铬层-基体结合性能进行检测。划痕法是用划痕测试中使涂层发生剥离的临界载荷去表征强化层与基底间的结合性能,即强化层从基

底剥离时单位面积所需要的力的大小为镀层和基底间的界面结合强度。利用 WS-2005 划痕涂层附着力测试仪进行划痕试验 (最大加载力为 200 N),对镀铬强化层结合力进行测试。获得镀铬强化层结合力图谱如图 8 所示,可以看出,铬层-基体结合力测试结果为 67.2 N。

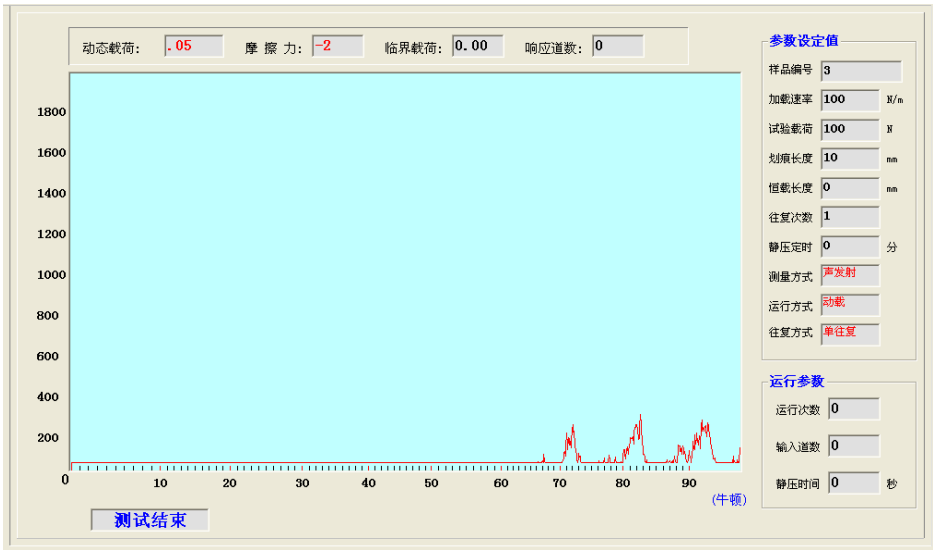


图 8 镀铬强化层结合力图谱
Fig.8 Map of bonding strength of chrome plated reinforcing layer

对镀铬试样采用光学显微镜进行观测, 见图9。试样划痕显微形貌中未发现大面积脆性开裂和

剥落现象, 划痕较为均匀, 划痕两侧未出现开裂和剥离。

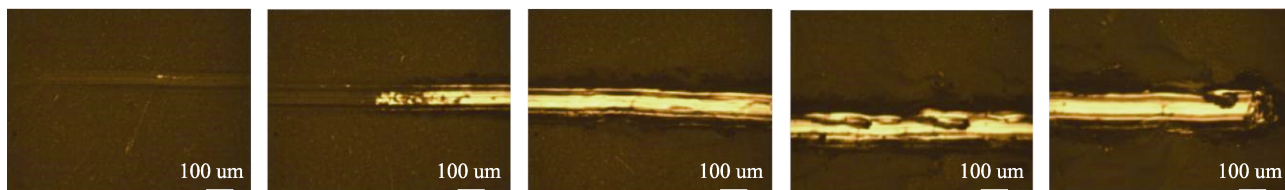


图9 镀铬试样划痕

Fig.9 Scratch diagram of chrome plated sample

4 抗烧蚀性能研究

利用氧丙烷火焰烧蚀实验装置做抗烧蚀性能试验。为模拟气流冲刷作用, 调整试样与火焰喷口的位置以及燃气流量。将氧丙烷火焰出口与试样表面呈45°夹角进行烧蚀, 引入火焰的冲刷效果。试验中采用循环加热模式: 加热至恒温烧蚀5 min, 冷却至室温, 并记录烧蚀质量损失, 再次加热至前一温度状态烧蚀5 min, 如此循环5次, 总烧蚀时间为25 min。同时采用可视化设备获取火焰烧蚀一侧的试样表面状态, 利用蓝光带通滤波片最大程度上消除火焰炬及过曝光对试样表面信息获取的影响。分别记录每次烧蚀后的样品质量, 重复测量3次后取平均值, 并通过式(1)计算材料的质量烧蚀率:

$$R = \frac{m_1 - m_2}{t} \quad (1)$$

式中: R 为材料质量烧蚀率; m_1 和 m_2 分别表示材料烧蚀前后的质量; t 为烧蚀时间。

通过对比相同烧蚀条件下基体、镀铬试样的质量损失、质量烧蚀率, 以及试样表面出现烧蚀的时刻、烧蚀过程中的表面状态演化以及烧蚀结束后表面形貌等, 评估强化层的抗烧蚀性能。基体、镀铬试样, 烧蚀过程质量变化和烧蚀率分别如图10所示。

从图10a可以看出, 烧蚀过程中, 镀铬试样的烧蚀质量明显小于基体试样的烧蚀质量, 且随着时间的增长, 两者差距越来越大。从图10b可以看出, 整体上, 镀铬试样的质量烧蚀率也小于基体的质量烧蚀率。对基体、镀铬试样在烧蚀中的第10、130、170、290 s时表面状态演化及烧蚀结束后表面形貌进行分析, 如图11所示。

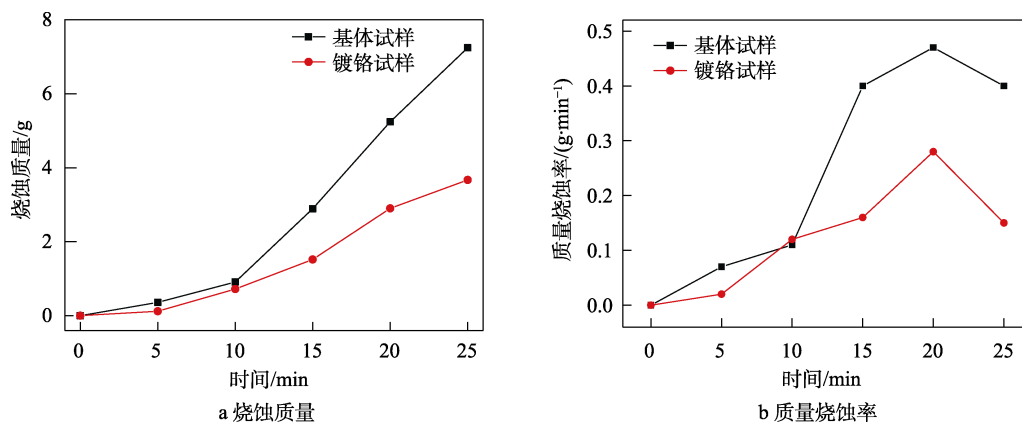


图10 不同试样的烧蚀质量和质量烧蚀率

Fig.10 (a) Ablative quality and (b) mass ablation rate of different samples

从图11可以看出, 基体试样在烧蚀开始后, 烧蚀周边区域迅速氧化变黑。130 s后, 烧蚀中心区域出现烧蚀液滴以及液滴的流动融合, 在烧蚀次中心区域有“鼓泡”现象。烧蚀结束后, 液滴凝固, 并伴随着片层的崩裂和剥落。镀铬试样在300 s内并未出现明显烧蚀现象, 仅在冷却过程中会发现烧蚀中心和次中心区域薄氧化层的产生, 但对其镀层性能影响不大。

从记录的过程图像中可以获得, 经过不同试样开

始烧蚀(即出现熔融液滴)的时刻, 见表2。

表2 不同试样开始出现烧蚀(即出现熔融液滴)时刻表
Tab.2 Schedule of ablation (the occurrence of molten drop-lets) of different samples

试样	出现熔融液滴时刻/s	描述
基体	70~80	未出现熔融, 但烧蚀结束后出现氧化层
镀铬	—	

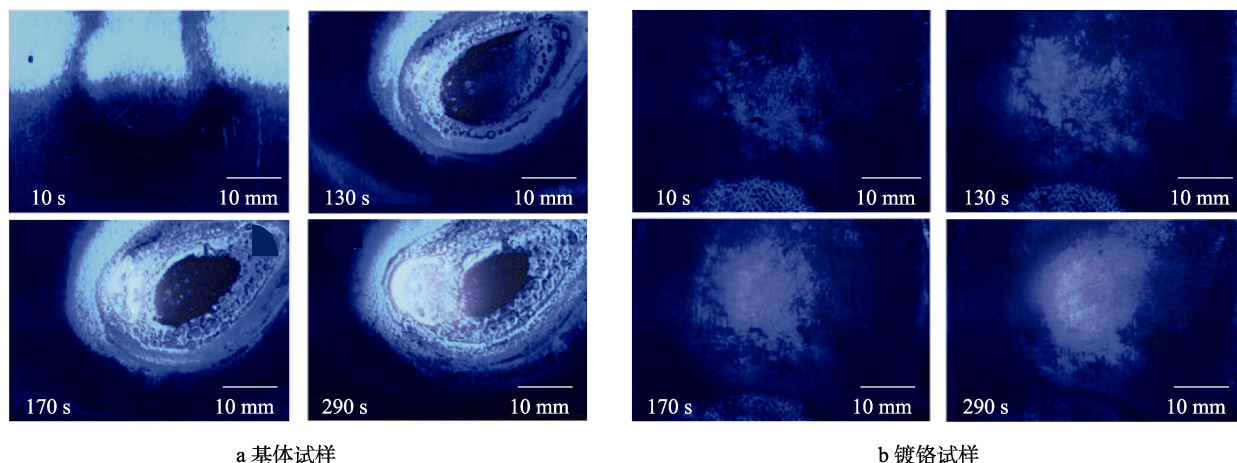


图 11 不同试样烧蚀过程表面演化

Fig.11 Surface evolution of different samples during ablation: a) substrate sample; b) chrome plated sample

通过对上述烧蚀量及烧蚀过程的结果分析可得, 在相同烧蚀条件下, 镀铬层相比于基体其烧蚀量降低 49.31%。同时, 在稳态烧蚀过程中, 镀铬层表面未出现熔融液滴, 因此镀铬抗烧蚀性 > 基体抗烧蚀性。

5 抗磨损性能研究

采用 MMU-10G 微机控制高温端面磨损试验机对不同强化层试样在特定摩擦速度、摩擦压力以及摩擦环境温度下的摩擦磨损性能进行对比, 在保证强化层既有一定的磨损量同时, 又确保强化层未被磨完的情况下, 获得其磨损量, 对不同强化层试样抗磨损能力进行评估。在室温、600 °C 下对无镀层及镀铬试样进行摩擦磨损试验, 评估其抗磨损性能, 不同温度下试样的宏观图片如图 12、图 13 所示。2 种试样的平均磨损量随温度变化如图 14 所示。



图 12 基体试样

Fig.12 Substrate samples: a) room temperature; b) 600 °C

从图 14 可以看出, 镀铬试样的磨损量随着温度的增加逐渐减小。在室温下, 镀铬试样与基体试样磨损量相差 28%; 在 600 °C 下, 2 种试样的磨损量相差 94%。对比基体及镀铬试样, 不同温度下镀铬试样磨损量始终小于基体试样。

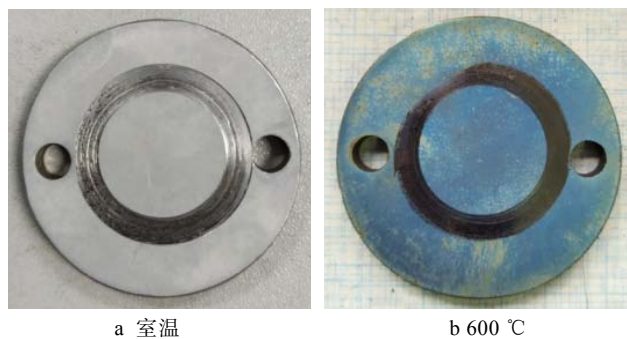


图 13 镀铬试样

Fig.13 Chrome plated samples: a) room temperature; b) 600 °C

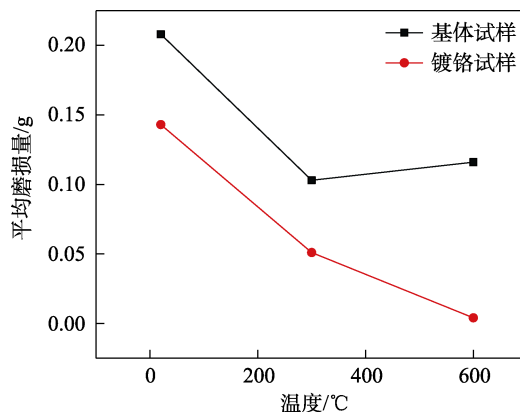


图 14 不同试样平均磨损量对比

Fig.14 Comparison of average wear of different samples

6 结论

基于身管烧蚀机理研究结果, 开展了身管内腔镀铬工艺技术研究, 建立了实验室条件下强化层性能检测方法, 并基于实验室检测结果验证了内腔镀铬强化技术的优势。结果表明, 铬层硬度约为 521.8HV。镀铬层在高温下硬度比基体材料下降缓慢, 高温下铬层硬度远高于基体硬度。铬层裂纹初始宽度约为

300 nm, 多数裂纹未连接成“网状”。铬层与基体结合力约为 67.2 N。相同烧蚀条件下, 镀铬层相比基体烧蚀量降低约 49.31%。镀铬层在烧蚀过程中表面未出现熔融液滴, 而基体在 70~80 s 出现。相同摩擦条件下, 相比基体, 镀铬层的磨损量始终较小。综合以上镀铬层的硬度及微观性能、结合性能、抗烧蚀抗磨损性能等测试结果可得, 镀铬层综合性能优于基体材料。

参考文献:

- [1] 胡献君, 王航宇, 石章松. 火炮射击问题探究[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 34(3): 88-92.
HU Xian-jun, WANG Hang-yu, SHI Zhang-song. Exploration of Gun Firing Problem[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2013, 34(3): 88-92.
- [2] 欧攀, 尉青锋, 陈末然. 基于振动特征的火炮身管打击精度控制仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(6): 18-21.
OU Pan, YU Qing-feng, CHEN Mo-ran. Simulation of Gun Collision Accuracy Control Based on Vibration Characteristics[J]. Computer Simulation, 2021, 38(6): 18-21.
- [3] 杨雕, 刘源远, 黄少保, 等. 冲击载荷下身管延伸体改进设计及疲劳寿命研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(1): 84-88.
YANG Diao, LIU Yuan-yuan, HUANG Shao-bao, et al. Improved Design and Fatigue Life Study of Gun Barrel Extension under Impact Load[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020, 41(1): 84-88.
- [4] 甘霖, 陶凤和, 卢兴华, 等. 火炮身管延寿研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2006, 27(3): 10-14.
GAN Lin, TAO Feng-he, LU Xing-hua, et al. Research on Barrel Life Prolongation[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2006, 27(3): 10-14.
- [5] 蒋泽一, 李强, 薄玉成. 火炮身管寿命研究[J]. 机械工程与自动化, 2014(2): 221-222.
JIANG Ze-yi, LI Qiang, BO Yu-cheng. Study on Life of Gun Barrel[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(2): 221-222.
- [6] 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.
- [7] 许耀峰, 单春来, 刘朋科, 等. 火炮身管延寿方法研究综述[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(4): 90-95.
XU Yao-feng, SHAN Chun-lai, LIU Peng-ke, et al. Review of the Research on Gun Barrel Life-Span Prolongation[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2019, 40(4): 90-95.
- [8] 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, GHEN 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.
- [9] 杨雕, 刘朋科, 宁变芳, 等. 身管材料性能及射击过程多物理场载荷环境研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(4): 1-5.
YANG Diao, LIU Peng-ke, NING Bian-fang, et al. Study of Material Properties of Barrel and Loading Environment of Multiple Physical Fields in Gun Firing Process[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020, 41(4): 1-5.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 黄进峰, 连勇, 张程, 等. 不同表面处理条件下身管烧蚀研究[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(3): 323-327.
HUANG Jin-feng, LIAN Yong, ZHANG Cheng, et al. Study on Erosion of Gun Barrels with Different Surface Treatments[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(3): 323-327.
- [13] 郑毅, 郑卫刚, 吕松. 超音速火焰喷涂碳化钨涂层与电镀硬铬镀层的对比研究[J]. 机械制造, 2013, 51(8): 86-88.
ZHENG Yi, ZHENG Wei-gang, LYU Song. Comparative Study of Supersonic Flame Spraying Tungsten Carbide Coating and Electroplating Hard Chromium Coating[J]. Machinery, 2013, 51(8): 86-88.
- [14] 冯辉, 袁萍萍, 张琳, 等. 脉冲电镀铬的研究现状与展望[J]. 电镀与精饰, 2010, 32(1): 20-23.
FENG Hui, YUAN Ping-ping, ZHANG Lin, et al. Research Status and Future Prospects of Chromium Pulse Electroplating[J]. Plating & Finishing, 2010, 32(1): 20-23.
- [15] 何新快, 侯柏龙, 吴璐烨, 等. 三价铬超声-脉冲电沉积 Ni-Cr/SiC 纳米复合镀层[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(7): 1742-1747.
HE Xin-kui, HOU Bai-long, WU Lu-ye, et al. Pulse Electrodeposition of Nano Ni-Cr/SiC Composite Coatings from Trivalent Chromium Baths in Ultrasonic Field[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(7): 1742-1747.
- [16] 李远会, 陈阵, 陈步明, 等. 三价铬电镀阳极材料的应用与研究进展[J]. 电镀与环保, 2011, 31(3): 1-3.
LI Yuan-hui, CHEN Zhen, CHEN Bu-ming, et al. Application and Research of Anodes in Trivalent Chromium Plating[J]. Electroplating & Pollution Control, 2011, 31(3): 1-3.

- [17] 邓正平, 田志斌, 詹益腾, 等. 代六价铬电镀现状及趋势[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(7): 440-443.
DENG Zheng-ping, TIAN Zhi-bin, ZHAN Yi-teng, et al. Current Status and Development Trends of Alternative Processes to Hexavalent Chromium Electroplating[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(7): 440-443.
- [18] 霍瑞坤, 孙河洋, 周杰, 等. 基于低周疲劳理论的身管横向裂纹萌生研究[J]. 军械工程学院学报, 2014, 26(3): 31-35.
HUO Rui-kun, SUN He-yang, ZHOU Jie, et al. Analysis of the Transversal Crack Initialization of Barrel Based on Low Cyclic Fatigue Theory[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2014, 26(3): 31-35.
- [19] 梁林, 郭昭蔚, 许俊, 等. 热应力对身管铬-钢结合面裂纹扩展的影响[J]. 计算机仿真, 2020, 37(9): 6-10.
LIANG Lin, GUO Zhao-wei, XU Jun, et al. Influence of Thermal Stress on Crack Propagation of Chromium-Steel Interface of Gun Barrel[J]. Computer Simulation, 2020, 37(9): 6-10.
- [20] 杨宇宙, 钱林方, 徐亚栋, 等. 复合材料身管的疲劳裂纹扩展分析[J]. 弹道学报, 2013, 25(2): 100-105.
YANG Yu-zhou, QIAN Lin-fang, XU Ya-dong, et al. Analysis of Fatigue Crack Growth of Composite Barrel[J]. Journal of Ballistics, 2013, 25(2): 100-105.
- [21] 高望, 杭钱君, 周远. 火炮身管复杂缺陷检测仿真[J]. 兵工自动化, 2021, 40(10): 49-51.
GAO Wang, HANG Qian-jun, ZHOU Yuan. Simulation Research on Complex Defect Detection of Gun Barrel[J]. Ordnance Industry Automation, 2021, 40(10): 49-51.
- [22] 刘涛, 龙书林, 康林, 等. 某型自动榴弹发射器身管铬层厚度研究[J]. 兵工自动化, 2012, 31(1): 42-43.
LIU Tao, LONG Shu-lin, KANG Lin, et al. An Automatic Grenade Launcher Barrel Thickness of Chromium[J]. Ordnance Industry Automation, 2012, 31(1): 42-43.
- [23] 黄卫华, 陈星, 夏根杰, 等. 轴、杆镀铬表面微裂纹失效分析[J]. 航空维修与工程, 2015(9): 114-116.
HUANG Wei-hua, CHEN Xing, XIA Gen-jie, et al. Failure Analysis for Surface Micro-Crack on Shaft and Pole Chromium-Plating[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015(9): 114-116.
- [24] 李琼, 忻坚静, 李旭勇, 等. 不同镀铬工艺的铬层微观形貌及性能对比分析研究[J]. 科技创新与应用, 2019(21): 106-108.
LI Qiong, XIN Jian-jing, LI Xu-yong, et al. A Comparative Study of Micromorphology and Properties of Chromium Coating in Different Chromium Plating Processes[J]. Technology Innovation and Application, 2019(21): 106-108.
- [25] 邓艳, 卢建树. 三价铬电镀工艺参数对其电流效率、镀层形貌和结合力的影响[J]. 材料保护, 2012, 45(10): 42-44.
DENG Yan, LU Jian-shu. Effect of Trivalent Chromium Electroplating Parameters on Current Efficiency as Well as Morphology and Adhesion to Substrate of Chromium Coating[J]. Materials Protection, 2012, 45(10): 42-44.
- [26] 张国祥, 程宏辉. 激光离散预处理镀铬身管的基体烧蚀行为研究[J]. 激光技术, 2013, 37(2): 165-168.
ZHANG Guo-xiang, CHENG Hong-hui. Study on the Substrate Ablation Behaviour of Cr-Plated Barrel Treated by Laser Discrete Pre-Quenching[J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 165-168.

责任编辑: 刘世忠