

小口径速射自动炮内膛镶嵌 Ta-10W 内衬的性能试验研究

林圣业¹, 明夏雷¹, 李浩², 王茂森¹, 戴劲松¹

(1.南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094; 2.国营第一五二厂, 重庆 400071)

摘要: 目的 提高小口径速射自动炮内膛易损部位的抗烧蚀磨损性能, 延长炮管使用寿命, 提升小口径速射自动炮的作战效能。方法 研制镶嵌 Ta-10W 内衬的身管衬套和调节塞, 在某小口径导气式转膛自动炮上进行实弹射击试验, 测试弹丸炮口初速、射频以及被试品关键尺寸磨损量, 并与采用全炮钢被试品的试验结果进行对比, 评价内膛镶嵌 Ta-10W 内衬对提升炮管寿命的效果。结果 自动炮镶嵌 Ta-10W 内衬, 在射击 580 发炮弹后, 身管衬套阳线、阴线内表面以及调节塞导气孔直径磨损量分别较全炮钢减小了 57.14%、40.00%、91.23%, 而弹丸初速和射频变化量也分别较全炮钢减小了 82.56%和 93.33%。结论 内膛镶嵌 Ta-10W 内衬的方法克服了钽及其合金炮膛易损部位钢基体表面涂层容易脱落的问题, 能够大幅度提高内膛易损部位的抗烧蚀磨损能力, 为小口径速射自动炮延寿设计提供了新的技术途径。

关键词: 小口径速射自动炮; 身管衬套; 调节塞; Ta-10W; 磨损量; 弹丸初速; 射频

中图分类号: TJ35 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)07-0051-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.007

Experimental Study on Properties of Small-caliber Rapid-firing Automatic Gun Inlaid with Ta-10W Lining

LIN Sheng-ye¹, MING Xia-lei¹, LI Hao², WANG Mao-sen¹, DAI Jin-song¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Jiangsu Nanjing 210094, China;
2. State-owned No. 152 Factory, Chongqing 400071, China)

ABSTRACT: To enhance the ablative resistance, extend the barrel life and improve combat effectiveness of the small-caliber rapid-firing automatic gun, the barrel bushing and adjusting cylinder inlaid with Ta-10W lining are manufactured and applied on the automatic gun. Then the shooting experiment upon a small-caliber gas-driven revolving gun is carried out to measure the muzzle velocity, the firing rate and the abrasion loss of the tested object. The above experiment data are compared with those obtained from the automatic gun with steel parts to evaluate the life-prolonging effect of the

收稿日期: 2022-05-25; 修订日期: 2022-06-23

Received: 2022-05-25; Revised: 2022-06-23

基金项目: 基础加强计划项目 (201XXX135)

Fund: Foundation Enhancement Program (201XXX135)

作者简介: 林圣业 (1987—), 男, 博士, 主要研究方向为火炮自动机技术。

Biography: LIN Sheng-ye (1987-), Male, Doctor, Research focus: automatic mechanism of artillery.

通讯作者: 戴劲松 (1968—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为火炮自动机技术。

Corresponding author: DAI Jin-song (1968-), Male, Doctor, Professor, Research focus: automatic mechanism of artillery.

引文格式: 林圣业, 明夏雷, 李浩, 等. 小口径速射自动炮内膛镶嵌 Ta-10W 内衬的性能试验研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 051-057.

LIN Sheng-ye, MING Xia-lei, LI Hao, et al. Experimental Study on Properties of Small-caliber Rapid-firing Automatic Gun Inlaid with Ta-10W Lining[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 051-057.

proposed method. The results show that, by using the barrel bushing and adjusting cylinder inlaid with Ta-10W lining, the abrasion losses of the land diameter of the barrel bushing, the groove diameter of the barrel bushing and the orifice diameter of the adjusting cylinder decrease 57.14%, 40.00% and 91.23%, respectively, and the variations of the muzzle velocity and the firing rate before and after firing decrease 82.56% and 93.33%, respectively, after 580 firings. The proposed method solves the problem of Tantalum coating peeling off, and thus greatly enhances the ablative resistance of the gun barrel inner bore. This study provides a new technological method for extending the barrel life of the small-caliber rapid-firing automatic gun.

KEY WORDS: small caliber rapid firing automatic gun; barrel bushing; adjusting cylinder; Ta-10W; abrasion loss; muzzle velocity; firing rate

随着现代小口径速射自动炮不断朝着高初速、高射频方向发展,内膛烧蚀越发严重,炮管寿命缩短,制约了其作战效能的发挥^[1-4]。采用传统镀铬工艺生成的镀铬层具有硬度高、耐磨性好、光反射性强等优点,能够有效防止炮管内膛烧蚀磨损,是提升炮管寿命的重要方法。然而,镀铬层脆性大,加之小口径速射自动炮射击时,强冲击载荷以高频率重复进行,导致膛口部阴、阳线交界处的镀铬表面容易出现大量裂纹,并在火药燃气作用下延伸至钢基体,腐蚀镀层与金属界面^[5-7]。随着自动炮不断朝着高初速和高射速方向发展,电镀铬已不能满足现代小口径速射自动炮内膛抗烧蚀磨损的更高需求,迫切需要研究替代传统炮管电镀铬的新方法。

目前,国内外针对提高炮管的寿命问题开展了大量研究,除了传统的镀铬法外,还形成了气体氮化、陶瓷内衬、热熔覆、爆炸包敷焊接、磁控溅射镀膜等方法^[8-12]。气体氮化能够大幅度提高炮钢的硬度、耐磨性、耐蚀性和疲劳强度,但缺点是常规氮化时间长、氮化层脆性大^[13-15];陶瓷材料相较于炮钢具有更高的硬度、更低的密度以及更优良的高温性能,但存在脆性大、塑性变形能力差、抗拉强度低等固有缺陷^[16-18];热熔覆采用涂敷金属和基体金属熔化并融合的方法增强炮膛的耐烧蚀能力,但为防止其与大气发生化学反应,需要保护气体包围在金属熔池周围^[19-20];爆炸包敷焊接技术工艺效率高,无环境污染,但对有膛线结构的炮管很难承受施加在阳线和阴线上的力,其应用还有待进一步研究^[21];磁控溅射镀膜的装置结构简单,便于放置于像炮膛这样的深孔内,且已进入工程阶段,应用前景乐观^[22-25]。上述方法各有优点,均能大幅提升炮管寿命,特别是热熔覆、爆炸包敷焊接和磁控溅射镀膜技术中所用到的钽及其合金材料,较铬具有更高的熔点和更好的韧性,以及抗热冲击性能,近年来受到各国的广泛关注。然而前期试验研究发现,采用磁控溅射镀膜技术直接在钢基体上沉积钽涂层,在膛内易烧蚀磨损部位易出现钽涂层脱落,其根本原因是小口径速射自动炮射频高,炮管沿径向温度梯度大,且钽涂层热膨胀系数远小于钢基体,镀层与金属界面之间出现了很大的热应力。因此,要将钽及

其合金材料应用于小口径速射自动炮还需要进一步深入研究。

面向小口径速射自动炮提高寿命需求,针对钽及其合金在炮膛易损部位钢基体表面涂敷涂层容易脱落的问题,设计了镶嵌 Ta-10W 内衬的身管衬套和调节塞。采用实弹射击的方法获得自动炮弹丸初速、射频以及被试品关键尺寸磨损量,并与全炮钢被试品结果进行对比,从而验证所提方法对提升炮管寿命的效果,为小口径速射自动炮延寿设计提供新的技术途径。

1 被试品制备

某小口径速射自动炮采用导气式转膛自动机原理,在以高射速进行连发射击时,其身管衬套起始膛线是烧蚀磨损最严重的部位。此外,调节塞导气孔在射击过程中频繁受火药燃气冲刷,烧蚀严重,孔径会随射弹数增加而急剧增大,进而影响全炮的后坐力特性。Ta-10W 材料化学性质稳定,几乎可耐所有酸的腐蚀,且具有良好的力学性能。因此,提出在内膛易烧蚀磨损部位局部镶嵌 Ta-10W 内衬提升炮管寿命的方法。对于所研究的某转膛自动机,其身管衬套内膛和调节塞导气孔均为 Ta-10W 内衬,通过热配合过盈安装于钢基体内,如图 1 所示。首先制备出 W

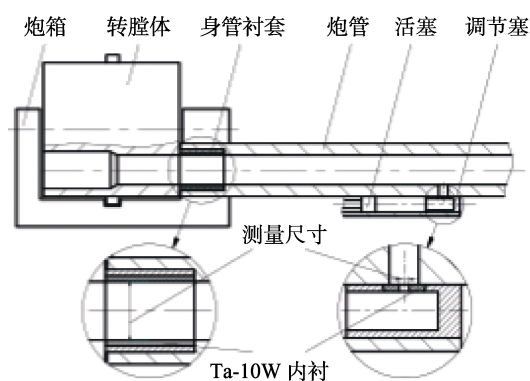


图 1 镶嵌 Ta-10W 内衬的身管衬套及调节塞
Fig.1 Schematic view of the barrel bushing and adjusting cylinder inlaid with Ta-10W lining

含量符合表 1 规定且其他杂质元素含量低于表 1 规定数值的 Ta-10W 材料, 再根据热力学分析, 确定出合适的内衬外形尺寸和过盈量, 采用热配合工艺将 Ta-10W 内衬镶嵌到钢基身管衬套外筒和调节塞扩孔内。对于身管衬套, 为保证其膛线与炮管膛线严格对

齐, 需要研制专用推刀一次性加工出膛线。镶嵌 Ta-10W 内衬的身管衬套如图 2 所示, 尺寸为 (内径×长度×厚度) $\phi 30 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。为验证内膛镶嵌 Ta-10W 内衬对提升炮管寿命的效果, 同时制备了全炮钢材料的身管衬套和调节塞, 用于对比试验。

表 1 Ta-10W 化学成分 (质量分数, %)

Tab.1 Chemical composition of the Ta-10W (mass fraction, %)

W	Fe	Si	Ni	Mo	Ti	Nb	O	C	H	N
9.0~11.0	0.010	0.005	0.010	0.020	0.010	0.100	0.015	0.010	0.001 5	0.010

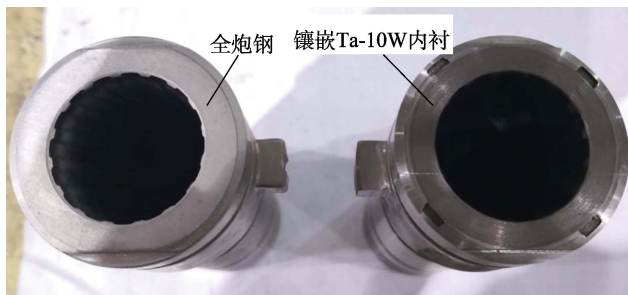


图 2 身管衬套
Fig.2 Barrel bushings

2 实弹射击试验

2.1 试验方案

在某小口径导气式转膛自动炮样机上进行实弹射击试验, 测试弹丸初速、射频和被试品关键尺寸磨损量。针对安装全炮钢和镶嵌 Ta-10W 内衬被试品的自动炮, 分别射击 580 发炮弹, 其中前 40 发测试被试品磨损前的弹丸初速, 中间 500 发同时测试弹丸初速与射频, 后 40 发测试被试品磨损后的弹丸初速。

被试品安装位置及测量尺寸如图 1 所示。具体步骤如下:

1) 安装全炮钢被试品, 射击前采用游标卡尺检测被试品关键尺寸, 包括身管衬套阳线、阴线内径和调节塞导气孔直径。

2) 进行 40 组单发射击试验, 采用测速雷达获得自动炮初始状态的弹丸初速。

3) 进行 50 组 10 连发射击试验, 测试弹丸初速的同时, 采用激光位移传感器测试自动炮连发射击条件下的全炮后坐位移曲线, 再根据射击循环周期计算自动炮射频, 获得自动炮射频随射弹数变化的规律。

4) 进行 40 组单发射击试验, 测试自动炮射击 540 发后的弹丸初速, 并与初始状态的弹丸初速进行对比。

5) 对射击 580 发后的被试品关键尺寸进行检测, 通过与射击前的关键尺寸对比, 获得磨损量。

6) 将全炮钢被试品更换为镶嵌 Ta-10W 内衬的被试品, 重复进行步骤 1) — 5), 获得小口径速射自动炮内膛镶嵌 Ta-10W 内衬的弹丸初速、射频及关键尺寸磨损量, 并与全炮钢试验结果进行对比, 评价内膛镶嵌 Ta-10W 内衬对提升炮管寿命的效果。试验实景如图 3 所示。



图 3 某小口径导气式转膛自动炮实景
Fig.3 Real image of small-caliber gas-driven revolving gun

2.2 试验结果

被试品分别采用全炮钢与镶嵌 Ta-10W 内衬时的弹丸初速如图 4 所示。图 4 中, 区域 I、II 和 III 分别表示前 40 发、中 500 发和后 40 发。自动炮初始状态和射击 540 发炮弹后, 弹丸的初速如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 在射击 540 发炮弹后, 采用全炮钢的自动炮弹丸初速平均值较初始状态降低了 5.16 m/s,

而采用镶嵌 Ta-10W 内衬的弹丸初速仅下降了 0.9 m/s, 弹丸初速变化量较全炮钢减少了 82.56%。自动炮弹丸初速降低的原因主要包括以下 2 个方面: 身管衬套膛线起始部径向磨损导致气密性降低, 以及弹带二次挤进压力减小; 调节塞导气孔直径增大, 引起膛内流向导气室的火药燃气增多。在上述双重因素的联合作用下, 弹底压力减小, 弹丸初速降低。从图 5 还可以看出, 镶嵌 Ta-10W 内衬的自动炮弹丸初速波动

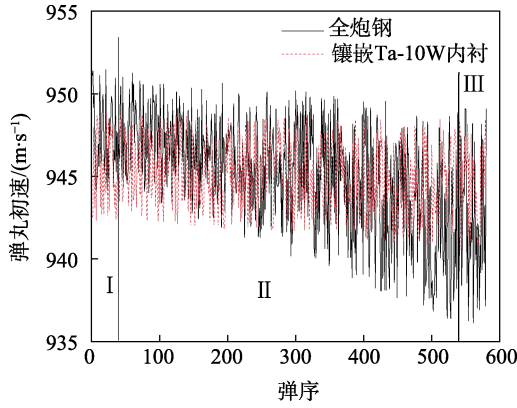


图4 弹丸初速-弹序

Fig.4 Variations of the muzzle velocity with respect to firing sequence

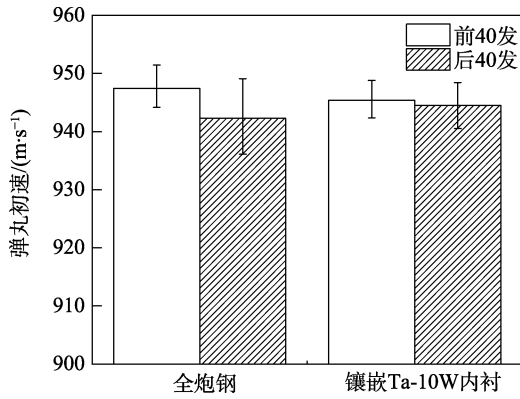


图5 弹丸初速变化情况

Fig.5 Variations of the muzzle velocity

不明显, 说明镶嵌 Ta-10W 内衬能够有效提升小口径

速射自动炮的炮管寿命。

被试品分别采用全炮钢与镶嵌 Ta-10W 内衬时, 自动炮射频随射弹数变化的情况如图 6 所示。其中, 组别与弹序的关系见表 2。从图 6 可以看出, 采用全炮钢时, 自动炮射频随射弹数的增加而增大, 由第 50 组 10 连发射击测得的射频较第 1 组增大了 30 发/min; 采用镶嵌 Ta-10W 内衬时, 自动炮射频仅增大了 2 发/min, 射频变化量较全炮钢减少了 93.33%。上述现象主要是由调节塞导气孔直径增大, 驱动滑板后坐初始冲量增加而导致的。虽然调节塞导气孔直径增大提高了射频, 但也加剧了自动炮各构件的碰撞, 易导致零件损坏和射击密集度降低。从图 6 还可以看出, 镶嵌 Ta-10W 内衬的自动炮射频变化不明显, 也说明镶嵌 Ta-10W 内衬能够有效提升小口径速射自动炮的炮管寿命。

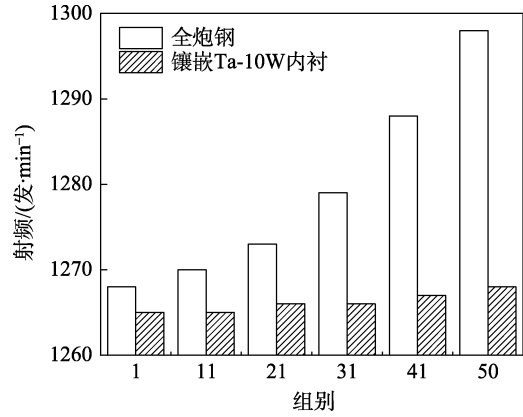


图6 射频变化情况

Fig.6 Variations of the firing rate

表2 组别与弹序的对应关系

Tab.2 Serial numbers of bullets and corresponding group numbers

组别	1	11	21	31	41	50
弹序	41~50	141~150	241~250	341~350	441~450	531~540

完成 580 发炮弹射击后, 分别采用全炮钢和镶嵌 Ta-10W 内衬的身管衬套如图 7 所示, 调节塞如图 8 所示。从图 7、图 8 中可以看出, 采用全炮钢的身管衬套起始部膛线有明显磨损迹象, 调节塞导气孔入口

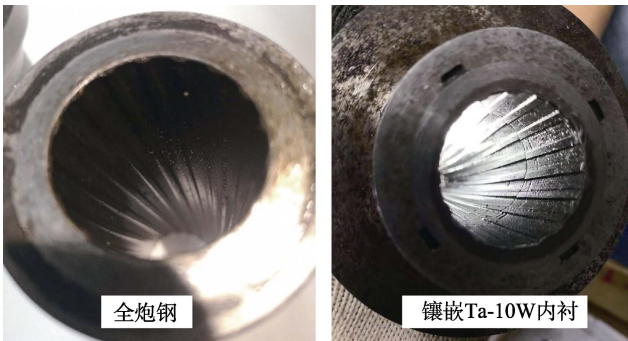


图7 射击 580 发炮弹后的身管衬套
Fig.7 Barrel bushings after 580 firings

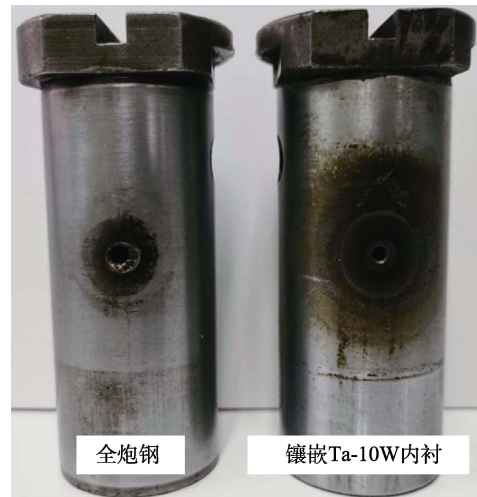


图8 射击 580 发炮弹后的调节塞
Fig.8 Adjusting cylinders after 580 firings

处基体材料出现明显溃陷, 溃陷深度为 0.7 mm, 导气孔孔径出现明显增大; 而镶嵌 Ta-10W 内衬的身管衬套的膛线仍保持完整, 调节塞入口处基体材料出现轻微溃陷, 溃陷深度仅 0.08 mm, 为全炮钢的 11.43%, 导气孔直径轻微扩大。

射击前和射击 580 发炮弹后, 身管衬套阳线、阴

线内径以及调节塞导气孔直径的测量数据见表 3—5。对比结果可知, 小口径速射自动炮内膛镶嵌 Ta-10W 内衬时, 身管衬套阳线、阴线内径以及调节塞导气孔直径磨损量分别较全炮钢减少了 57.14%、40.00%、91.23%。以上分析结果表明, 镶嵌 Ta-10W 内衬能够有效提升小口径速射自动炮的炮管寿命。

表 3 身管衬套阳线内径射击前后测量结果

Tab.3 Land diameter of the barrel bushings before and after firing

测试项目		mm				
		1 组	2 组	3 组	平均值	磨损量
全炮钢	射击前	30.21	30.22	30.20	30.21	—
	射击 580 发炮弹后	30.29	30.27	30.28	30.28	0.07
镶嵌 Ta-10W 内衬	射击前	30.22	30.23	30.24	30.23	—
	射击 580 发炮弹后	30.27	30.26	30.25	30.26	0.03

表 4 身管衬套阴线内径射击前后测量结果

Tab.4 Groove diameter of the barrel bushings before and after firing

测试项目		mm				
		1 组	2 组	3 组	平均值	磨损量
全炮钢	射击前	31.11	31.10	31.11	31.11	—
	射击 580 发炮弹后	31.17	31.16	31.16	31.16	0.05
镶嵌 Ta-10W 内衬	射击前	31.11	31.13	31.12	31.12	—
	射击 580 发炮弹后	31.16	31.15	31.14	31.15	0.03

表 5 调节塞导气孔直径射击前后测量结果

Tab.5 Orifice diameter of adjusting cylinders before and after firing

测试项目		mm				
		1 组	2 组	3 组	平均值	磨损量
全炮钢	射击前	2.31	2.32	2.33	2.32	—
	射击 580 发炮弹后	2.86	2.89	2.92	2.89	0.57
镶嵌 Ta-10W 内衬	射击前	2.32	2.30	2.31	2.31	—
	射击 580 发炮弹后	2.37	2.35	2.36	2.36	0.05

3 结论

1) 提出了内膛镶嵌 Ta-10W 内衬的方法, 克服了钽及其合金直接在炮膛易损部位钢基体表面涂层容易脱落的问题, 为小口径速射自动炮延寿设计提供了新的技术途径。

2) 小口径速射自动炮内膛镶嵌 Ta-10W 内衬, 在相同射弹数条件下大幅度减少了被试品关键尺寸的磨损量。对于本文研究的导气式转膛自动炮, 采用镶嵌 Ta-10W 内衬在射击 580 发炮弹后, 身管衬套阳线内表面、阴线内表面以及调节塞导气孔直径磨损量分别较全炮钢减少了 57.14%、40.00%、91.23%。

3) 调节塞导气孔易受火药燃气烧蚀, 进而影响自动炮射频, 采用镶嵌 Ta-10W 内衬的方法能够大幅度提高调节塞的抗烧蚀能力。对于本文研究的导气式转膛自动炮, 采用镶嵌 Ta-10W 内衬的导气塞, 射击 530 发炮弹后, 自动炮射频变化量较全炮钢减少了

93.33%, 而弹丸初速变化量也较全炮钢减少了 82.56%。

参考文献:

- [1] 朱森元. 小口径速射火炮武器系统发展展望[J]. 兵工自动化, 2008, 27(6): 1-4.
ZHU Sen-yuan. Development Forecasting for Small Caliber Rapid Firing Artillery System[J]. Ordnance Industry Automation, 2008, 27(6): 1-4.
- [2] 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.
- [3] 李鹏辉, 李强, 李世康. 射速和射击方式对速射火炮身管温度的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2017,

- 38(6): 623-627.
LI Peng-hui, LI Qiang, LI Shi-kang. Effects of Firing Rates and Shooting Criteria on the Barrel Temperature of Rapid-Firing Gun[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2017, 38(6): 623-627.
- [4] 张楠, 吕超然, 徐乐. 火炮身管用钢现状及发展趋势[J]. 中国冶金, 2019, 29(5): 6-9.
ZHANG Nan, LÜ Chao-ran, XU Le. Current Status and Development Trend of Gun Barrel Steel[J]. China Metallurgy, 2019, 29(5): 6-9.
- [5] 关山, 张琦, 胡如南. 电镀铬的最新发展[J]. 材料保护, 2000, 33(3): 1-3.
GUAN Shan, ZHANG Qi, HU Ru-nan. Development of Electroplate Chromium[J]. Materials Protection, 2000, 33(3): 1-3.
- [6] WANG L, KIM D S, NAM K S, et al. Microstructure of Electroplated Hard Chromium Coatings after Plasma Nitrocarburizing[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 190(2-3): 151-154.
- [7] LI Huai-xue, CHEN Guang-nan, ZHANG Kun, et al. Degradation Failure Features of Chromium-Plated Gun Barrels with a Laser-Discrete-Quenched Substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(24): 9558-9564.
- [8] 陈永才, 宋迺志, 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.
CHEN Yong-cai, SONG Qiu-zhi, WANG Jian-zhong. New Technologies to Extend the Erosion Life of Gun Barrel[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(2): 330-334.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 姚世睿, 陈永才. 火炮身管内膛涂层制备技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(6): 41-44.
YAO Shi-rui, CHEN Yong-cai. Research Progress of Preparation Technology of Inner Coating of Artillery Gun Barrel[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(6): 41-44.
- [12] 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.
- [13] KING P C, REYNOLDSON R W, BROWNRIGG A, et al. Cr(N, C) Diffusion Coating Formation on Pre-Nitrocarburised H13 Tool Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 179(1): 18-26.
- [14] CASTRO G, FERNÁNDEZ-VICENTE A, CID J. Influence of the Nitriding Time in the Wear Behaviour of an AISI H13 Steel during a Crankshaft Forging Process[J]. Wear, 2007, 263(7-12): 1375-1385.
- [15] 付航涛, 张津, 黄进峰, 等. 热模钢渗氮与30SiMn₂MoVA镀铬性能比较[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 1-6.
FU Hang-tao, ZHANG Jin, HUANG Jin-feng, et al. Comparison of Nitrided Hot Work Tool Steel and Chromium Coated 30SiMn₂MoVA[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 1-6.
- [16] 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.
- [17] 高俣, 顾克秋. 陶瓷内衬多层复合身管结构多目标优化设计[J]. 弹道学报, 2006, 18(4): 72-75.
GAO Yu, GU Ke-qiu. Structural Multiobjective Optimization of Multi-Layer Composite Artillery Barrel with Ceramic Liner[J]. Journal of Ballistics, 2006, 18(4): 72-75.
- [18] 吕彦, 胡俊, 赵鸿雁, 等. 复合材料炮管技术研究概况[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(3): 91-96.
LV Yan, HU Jun, ZHAO Hong-yan, et al. Research Survey of Composite Material Gun Barrel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(3): 91-96.
- [19] 杨艳峰, 郑坚, 狄长春, 等. 火炮用PCrMo钢激光熔覆MoS₂润滑涂层摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(2): 240-246.
YANG Yan-feng, ZHENG Jian, DI Chang-chun, et al. Tribological Properties of MoS₂ Lubricating Coating on Gun Used PCrMo Steel by Laser Cladding[J]. Tribology, 2016, 36(2): 240-246.
- [20] 田雪梅, 姚军, 乔红斌, 等. 热熔覆合金涂层研究进展[J]. 机械工程师, 2017(9): 15-16.
TIAN Xue-mei, YAO Jun, QIAO Hong-bin, et al. Research Progress of Hot Melting Alloy Coatings[J]. Mechanical Engineer, 2017(9): 15-16.
- [21] 袁晓冬, 高灵清, 张海峰. 炮管材料的发展现状与趋势[J]. 材料开发与应用, 2017, 32(5): 98-104.
YUAN Xiao-dong, GAO Ling-qing, ZHANG Hai-feng. Development and Prospect of Gun Barrel Materials[J]. Development and Application of Materials, 2017, 32(5): 98-104.
- [22] VIGILANTE G N, MULLIGAN C P. Cylindrical Magnetron Sputtering (CMS) of Coatings for Wear Life Exten-

- sion in Large Caliber Cannons[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2006, 21(6): 621-627.
- [23] 陈汉宾, 陈大军, 李忠盛, 等. 磁控溅射快速沉积钽涂层的组织及性能[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(11): 156-160.
- CHEN Han-bin, CHEN Da-jun, LI Zhong-sheng, et al. Microstructure and Properties of Ta Coatings Rapidly Deposited by Magnetron Sputtering[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(11): 156-160.
- [24] 郭策安, 周峰, 胡明, 等. CrNi₃MoVA 钢表面磁控溅射 Ta 涂层的摩擦磨损性能[J]. *材料导报*, 2018, 32(18): 3213-3216.
- GUO Ce-an, ZHOU Feng, HU Ming, et al. Performance of Friction and Wear of Magnetron Sputtered Ta Coating on CrNi₃MoVA Steel[J]. *Materials Review*, 2018, 32(18): 3213-3216.
- [25] 苏北, 卢旭东. 钢表面溅射 Ta-W 涂层的烧蚀性能研究[J]. *沈阳理工大学学报*, 2020, 39(2): 60-63.
- SU Bei, LU Xu-dong. Laser Ablative Properties of Ta-W Coating Sputtered on Gun-Steel Surface[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2020, 39(2): 60-63.

责任编辑: 刘世忠