

doi: 10.7690/bgzd.2019.09.001

## 某型舰炮身管表面锈蚀机理

胡浩<sup>1</sup>, 罗耕星<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 92942 部队, 北京 100161; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 针对舰炮身管表面镀铬层出现剥落、散在无规则及深浅不均的锈坑现象, 对舰炮身管表面锈蚀机理进行研究。通过对样件锈蚀表面宏观形貌及微观腐蚀形貌观察, 结合锈蚀坑分布规律统计分析, 得出镀铬层的开裂剥落是造成身管锈蚀的根本原因。实验结果表明: 腐蚀介质抵达基体界面, 形成锈蚀源, 其中氯离子起到先锋作用; 镀铬层鼓泡以及蚀坑扩张时的铬层断裂, 均为固支弯曲断裂模式。该研究可为舰炮身管表面防腐蚀及锈蚀修复方法提供参考依据。

**关键词:** 舰炮身管; 表面锈蚀; 锈蚀机理; 镀铬层

**中图分类号:** TJ391 **文献标志码:** A

## Surface Corrosion Mechanism of Certain Type Naval Gun Barrel

Hu Hao<sup>1</sup>, Luo Gengxing<sup>2</sup>

(1. No. 92942 Unit of PLA, Beijing 100161, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The mechanism of corrosion on the surface of the naval gun barrel was studied in view of the phenomenon that the chromium plating layer on the surface of the gun tube was peeled off, scattered in irregular and uneven depth. Through the macroscopic and microscopic corrosion morphology of the corroded surface of the sample and the statistical analysis of the distribution rules of the corroded pit, it is concluded that the cracking and peeling of the chrome-plated layer is the fundamental reason for the corrosion of the barrel. The experimental results show that the corrosion medium reaches the interface of matrix and forms corrosion source, in which chloride ion plays a pioneer role. The fracture of chromium layer during bubbling and expanding of corrosion pit is a fixed-branch bending fracture mode. This study can provide reference for the surface corrosion prevention and corrosion repair methods of naval gun.

**Keywords:** naval gun barrel; surface rust; corrosion mechanism; chromium plating layer

### 0 引言

钢铁材料浸泡在海水中。由于金属及合金的表面成分、相分布、表面应力以及其他微观不均匀性, 导致金属电极电位分布的微观不均匀, 金属表面上就会形成无数的腐蚀微电池。在阳极区, 由于极性水分子的作用, 呈自由状态的铁离子进入溶液, 与阴极产物氢氧根离子相结合, 生成初步的腐蚀产物氢氧化亚铁, 氢氧化亚铁进一步为溶液中的氧反应, 转变为氧化铁<sup>[1]</sup>。铬层具有很高的硬度、较高的耐磨性和化学稳定性<sup>[2-3]</sup>, 电化学序中铬的电位为-0.74 V, 铬层表面很容易形成钝化膜, 其表面电位迅速变正, 所以钢件镀铬为阴极镀层, 不能起到电化保护作用, 对基体金属主要起到隔离介质的物理保护作用<sup>[4-5]</sup>。

某型舰炮身管采用专用的合金钢制造。为减缓冷却海水对身管腐蚀, 对 2 个锥段外壁及邻近的水套安装配合面进行镀软铬处理。舰炮服役一段时间

后, 其身管表面普遍出现了镀铬层局部或大面积剥落和散在无规则、深浅不均锈坑现象, 严重时会造成身管报废。笔者针对目前对某型舰炮身管在海洋环境和水冷环境下, 表面锈蚀机理和分布规律缺乏明确认识的现状, 开展其身管表面锈蚀机理研究, 可为舰炮身管表面防腐蚀提供原理支撑, 为舰炮身管表面锈蚀修复提供参考依据。

### 1 身管锈蚀表面宏观形貌

笔者的研究对象为一根因锈蚀而报废的身管, 中段沿轴线对剖的一半样件, 长度 1 000 mm。观察样件镀铬层的开裂、鼓泡、剥落, 以及基体的显著锈蚀等宏观特征。

在靠近弹膛高温部位, 发现镀铬层从钢基体表面直接剥落现象如图 1 所示。图中可分为黑色的锈蚀部分、原始的基体表面车刀纹部分、以及凸起的残留镀铬层部分, 其中镀铬层表面的车刀纹是由镀铬仿形沉积形成。

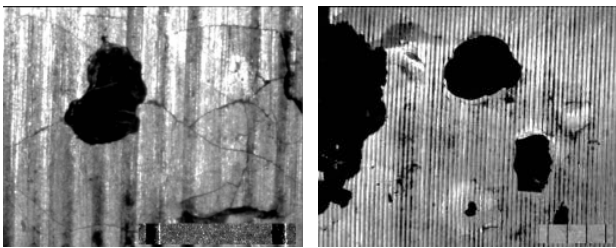
收稿日期: 2019-04-25; 修回日期: 2019-06-08

作者简介: 胡浩(1985—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事舰炮武器系统研究。E-mail: huhao929@163.com。



图 1 镀铬层剥落及局部放大(标尺为 1 mm)

如图 2 所示, 腐蚀产物在镀层与基体之间堆积, 导致镀层发生应力性开裂和鼓泡。镀铬层剥落后, 伴随着边缘铬层的断裂及鼓泡, 钢基蚀坑沿径向和深度方向持续腐蚀。车刀纹残余应力也对镀铬层的开裂和剥落形态造成影响。



(a) 镀铬层开裂 (b) 镀铬层鼓泡

图 2 镀铬层开裂、鼓泡(标尺为 1 mm)

## 2 锈蚀坑分布规律

观察发现样件各锈蚀坑呈不均匀离散分布状态, 将观察样件按 50 mm 间隔在轴向划分为 20 个单元, 通过体视显微镜及千分尺测量每个蚀坑的锈蚀面积和锈蚀最大深度, 并分单元进行统计, 测量结果如图 3、4 所示。

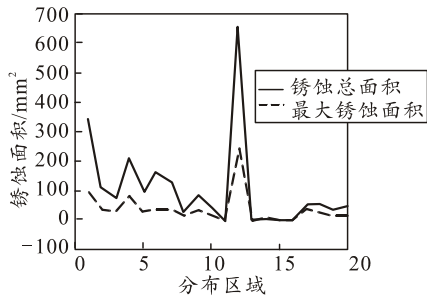


图 3 腐蚀面积分布

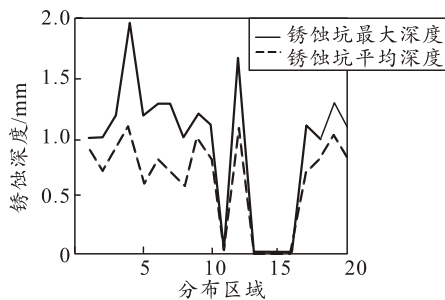


图 4 腐蚀深度分布

上述结果显示, 靠近弹膛部位的锈蚀程度较高, 其根本原因是该部位承受更高的射击温度和膛压, 同时铬层与基体的热膨胀系数及弹性模量存在明显的差异, 造成镀铬层与基体的变形失调更严重, 导致靠近弹膛部位的镀铬层更易开裂与剥落, 使基体更多地暴露于腐蚀介质中, 并在后期存放过程中持续锈蚀。

另外在直线水槽的起始端锈蚀最为严重。除了镀铬层与基体变形失调因素造成铬层开裂外, 该部位冷却流道截面尺寸发生显著变化, 海水与金属表面高速相对运动时, 在局部区域产生涡流, 且伴随着流体中的气泡在金属表面不断地迅速生成和溃灭, 气泡溃灭时的锤击压强可达  $10^3$  MPa, 可造成金属表面的局部压缩破坏, 使其表面粗糙而更易发生气泡。这种过程反复进行, 使金属表面出现大量麻点, 而蚀孔也会越来越深。此外, 在这种气泡中, 氧气比较富集, 也是加速腐蚀的因素之一。

## 3 微观锈蚀特征

### 3.1 锈蚀源的萌生

由于制备缺陷及使用过程(特别是射击)的损伤, 镀铬层存在一定数量的穿透微裂纹。由于氯离子半径小、穿透能力强, 在扩散作用下比其他离子更容易透过镀铬层中的微裂纹, 抵达界面处的钢基体, 并与之作用生成可溶性氯化物(如氯化铁等), 进而在裂纹尖端下基体金属留下微型空腔; 同时腐蚀介质中溶解的氧分子, 顺利抵达钢基体, 在铬层与钢基体界面处生成铁锈; 此时镀铬层表面完整, 厚度约  $40 \mu\text{m}$ 。锈蚀源萌生形貌如图 5 所示, 抵达锈蚀源的微裂纹在图示面上未完全贯穿到铬层上表面, 是由于贯穿微裂纹并非完全直线型。

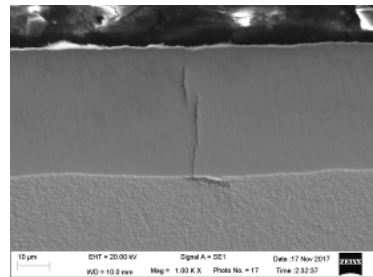


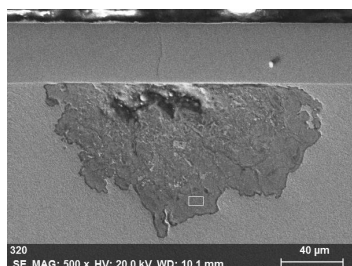
图 5 锈蚀源萌生形貌

### 3.2 锈蚀源的发展

持续观察样件发现, 钢基体靠近界面处存在更大的微型空腔, 锈蚀范围更大, 锈蚀产物断裂裂纹显著, 而此时镀铬层完整, 但相应部位有贯穿微裂

纹存在,而其他地方镀铬层与基体结合紧密,如图6所示。对锈蚀区的扫描电镜能谱显示,Fe元素占65.85%,O元素占13.50%,说明基体金属已经严重腐蚀。

由于镀铬层存在贯穿整个镀层的显微裂纹,海水介质可通过该裂纹进入到基体表面的微型空腔中,而镀铬层属于阴极性镀层,在腐蚀介质作用下,钢基体的腐蚀电位较低,优先发生腐蚀,表面镀铬层基本不参与腐蚀反应。海水腐蚀介质的电阻性阻滞很小,镀铬层与钢基体的接触即造成显著的电偶腐蚀效应<sup>[6]</sup>。



(a) 锈蚀源的发展形貌

El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
C	6	K-series	8.22	8.97	25.05	1.78
O	8	K-series	12.36	13.50	28.29	1.97
Cr	24	K-series	4.94	5.39	3.48	0.18
Mn	25	K-series	1.15	1.26	0.77	0.08
Fe	26	K-series	60.31	65.85	39.54	1.66
Ni	28	K-series	4.60	5.03	2.87	0.20
Total:			91.58	100.00	100.00	

(b) 锈蚀源成分

图6 锈蚀源的发展形貌及成分

### 3.3 锈蚀坑的形成

如图7所示,通过镀铬层贯穿微裂纹,海水腐蚀介质不断地与下方的钢基体产生腐蚀反应,使得基体铁锈不断地扩展,其形成的张应力逐步施加镀铬层上;当对应的镀铬层微裂纹逐渐相互连接,使得该部位与镀铬层本体的联接强度减弱,或独立于镀铬层本体,上述载荷可将该部位从铬层本体上剥离,使钢基体暴露在海水中,同时锈蚀坑形成。

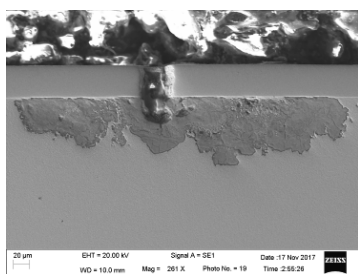


图7 锈蚀坑的形成

### 3.4 锈蚀的加剧

如图8所示,随着钢基体的进一步腐蚀,使蚀

坑边缘处的镀铬层产生断裂—剥落,造成钢基体沿蚀坑的周向及深度方向进一步加剧腐蚀。图中镀铬层断裂解理面与基体表面呈45°夹角,说明其破坏方式类似于:在杆的一端固定支撑,其各方向的位移完全被约束;在垂直于杆的轴线方向施加弯曲载荷(力或弯矩);如果杆在固支端发生断裂,其解理面与杆的轴线约呈45°夹角。在此镀铬层断裂解理部位相当于杆的固支端,断裂铬层下方的锈蚀产物因体积膨胀,对断裂铬层施加弯矩,并造成铬层断裂解理面呈45°夹角形态。

蚀坑边缘镀铬层的持续断裂,基本上为上述破坏模式;实际上,铬层鼓泡是多个铬层断裂破坏的组合,其单个铬层断裂模式仍为45°夹角破坏方式。

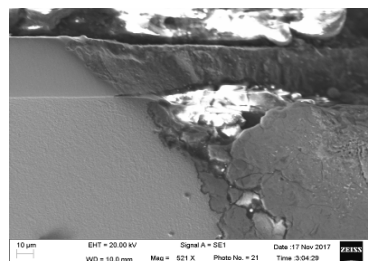


图8 锈蚀的加剧

## 4 结论

1) 舰炮身管外表面镀铬层的主要作用是物理隔离腐蚀介质。镀铬层的开裂剥落是造成身管锈蚀的根本原因。其产生条件可分为2类:①在射击时,铬与钢的热膨胀系数及弹性模量差异,造成镀铬层与基体的变形失调;②在长期存放时,蚀坑中持续生成的锈蚀产物对镀铬层产生的张应力。

2) 对样件表面锈蚀情况的统计结果表明:靠近弹膛部位锈蚀较严重,起因于该部位承受更高的射击温度和射击膛压,使该部位的镀铬层更易开裂与剥落,将更多的基体暴露于腐蚀介质中;而在身管水槽的起始端锈蚀最严重。这是由于该处流动截面尺寸发生显著变化,形成强烈的空泡腐蚀效应所致。

3) 通过观察样件微观腐蚀形貌,获得了锈蚀源从萌生到发展,以及蚀坑形成及扩张等典型特征。由于镀铬层中贯穿微裂纹,使腐蚀介质得以抵达基体界面,形成锈蚀源,其中氯离子起到先锋作用;镀铬层鼓泡及蚀坑扩张时的铬层断裂,均为固支弯曲断裂模式,断裂解理面与基体表面呈45°夹角。

4) 在笔者研究的基础上,可进一步研究舰炮身管腐蚀分布规律、身管锈蚀化学成分,为舰炮身管的合理使用和保存提供依据。

(下转第10页)

### 6 结束语

笔者从分析维修保障效能影响因素入手, 阐述 5 类静态因素和动态因素, 确定从装备遂行任务、维修保障对象完好水平及维修资源保障水平等方面表征航天装备维修保障效能的思想, 提出指标选取与确定的原则和流程。以此为基础, 按照归纳现有效能指标、分析任务单位关注的效能指标、提出面向仿真的效能参数的步骤, 分别确定了由 3 大类别共计 20 项单项参数描述构成的适用于仿真方法求解且满足实际需求的航天装备维修保障效能指标参数体系, 采用熵权法确定了权重, 并利用 C#与 Matlab 混合编程实现了仿真评估基础数据的采集和评估指标参数生成, 为航天装备维修保障效能建设的进一步发展奠定理论基础。

### 参考文献:

[1] 侯兴明, 王保顺. 试验装备保障[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 186-192.

[2] MOORE S C, STOCKFISCH J A, MATTHEW S. Goldberg. Measuring Military Readiness and Sustainability[R]//R-3842-DAG, Santa Monica USA:Rand(0-8330-1058-1), 1991.

[3] Air Force Intruccion 10-602. Dctermining logistics support and readiness requirements[S]. 2001.

[4] 李鑫. 航天试验装备保障效能评估研究[D]. 北京: 装备学院, 2012: 38-40.

\*\*\*\*\*

(上接第 3 页)

### 参考文献:

[1] 苏璐璐. Q235 钢和不锈钢海水腐蚀机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.

[2] 胡金东, 刘希琴, 刘子利, 等. 铬含量对薄壁高强度桩管钢腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(30): 1027-1032.

[3] 徐晋勇, 高清. 表面高铬高碳合金层耐蚀性能的研究

[5] 杜晓明. 基于仿真的装备保障效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 138-141.

[6] 马洪文, 魏俊, 高艳章, 等. 基于模糊综合评判的装备维修保障系统效能评估[J]. 兵工自动化, 2010, 29(7): 32-34.

[7] 于永利, 康锐. 装备综合保障基础理论及技术的若干问题[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(6): 1-8.

[8] 柯宏发. 电子装备体系效能评估理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 41-43.

[9] 尹江丽, 王莉. 军用卫星通信系统效能评估指标体系研究[J]. 兵工自动化, 2008, 37(6): 9-11.

[10] 陈浩光, 秦大国, 李云芝. 军用卫星系统效能评估的基本原则与方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2001, 8(2): 27-30.

[11] 尹江丽, 王莉. 基于 PFT 的航天电子侦察系统作战效能指标体系构建[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(4): 26-30.

[12] 崔凯旋, 石全, 胡起伟, 等. 基于区间数与可拓理论的装备维修保障人员训练效果评估[J]. 兵工自动化, 2013, 32(2): 12-16.

[13] 章文晋, 郭霖瀚. 装备保障性分析技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 58-66.

[14] Sherbrooke Craig C. 装备备件最优库存建模—多级技术[M]. 贺步杰, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 260-261.

[15] 许庆, 侯兴明. 基于 DAF 综合评价法的航天装备维修保障效能评估[J]. 兵工自动化, 2019, 38(1): 48-51.

[1] 腐蚀与防护, 2005, 26(12): 507-509.

[4] 魏开金, 刘大扬, 王建辉, 等. 不锈钢在榆林海域暴露 8 年的腐蚀行为[J]. 材料开发与应用, 1999, 14(5): 5-8.

[5] 林志坚, 庄焱. 不锈钢在厦门海域的长周期腐蚀行为[J]. 材料保护, 2003, 36(7): 6-8.

[6] 黄桂桥, 郁春娟, 李兰生. 海水中钢的电偶腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(1): 46-52.