



# 镀铬枪管的基体初始烧蚀行为

张 坤, 陈光南

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

彭玉春

(中国兵器工业集团第 208 研究所, 北京 102202)

**摘 要:** 为分析某型号机枪枪管的延寿机理, 对 4 种不同工艺制备的镀铬枪管进行了寿命射击实验。通过解剖失效枪管, 发现镀层下基体的初始烧蚀行为存在界面烧蚀、次界面烧蚀和穿透性烧蚀 3 种典型方式, 枪管寿命相应由低到高。

**关键词:** 枪管; 烧蚀; 镀层

**中图分类号:** TJ01

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4012(2006)04-0171-03

## ON THE ORIGIN OF SUBSTRATE EROSION IN CHROMIUM PLATED GUN BARREL

ZHANG Kun, CHEN Guang-nan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

PENG Yu-chun

(China South Industries Group, Beijing Mechanical-Electrical Institute, Beijing 102202, China)

**Abstract:** In order to reveal the relation between the fabrication process and erosion life of chromium plated gun barrel used in model products, the eroded gun barrel with four different fabrication processes have been examined. It has been found that three different erosion modes, i. e. interface erosion, sub-interface erosion and penetrating erosion correspond to the low, medium and high erosion life, respectively.

**Keywords:** Gun barrel; Erosion; Plating

在火药爆燃气体作用下, 身管(枪管/炮管)内膛会发生烧蚀。在无镀层情况下, 内膛用金属材料受高温、高压和高速气体直接作用, 烧蚀较快。为此, 一般在基体金属表面镀覆化学稳定性好的铬层, 实际应用有一定效果。然而, 镀铬层属本征脆性材料, 在高应力作用下容易开裂。当镀层裂纹扩展到镀层/基体界面即成为穿透性裂纹时, 高温气体同样会导致基体烧蚀。基体烧蚀严重时, 镀层甚至会被架空而剥落<sup>[1]</sup>。尽管这一烧蚀行为是局部化的<sup>[2]</sup>, 但大量的局部烧蚀区域的连接最终会导致镀层大面积剥落<sup>[3]</sup>乃至防护作用的完全丧失。因此, 对于镀铬身管而言, 需要研究和控制镀层裂纹处基体的初始烧蚀行为<sup>[1]</sup>。

某新型号大口径机枪枪管采用电镀铬防护工

艺, 但在早期的寿命攻关时一直不能满足定型要求(设计寿命为 3 000 发)。后经基体预处理工艺和镀层制备工艺的多次调整与优化, 寿命不断提高并达到定型要求<sup>[4]</sup>。笔者在建立不同寿命枪管的失效金相图谱时发现, 枪管寿命的提高与镀层裂纹处基体初始烧蚀行为的变化有关。

### 1 试验

选择由不同工艺制造的枪管共 4 根并进行编号, 基材为 30CrNi2MoVA 钢, 其中 3 根枪管按照国军标进行全寿命射击实验, 另 1 根枪管则进行超寿命射击实验。随后沿轴向用线切割方法将整根枪管剖割。

根据工程经验, 该型号枪管中有两个部位(图 1 中的 I 和 II)的破坏会对寿命产生明显影响, 部位 I 是在膛口 300mm 长度段, 部位 II 是自膛线起始处并向膛口方向延伸的 300mm 长度段。在 I 中选取一个特征区域进行取样, 其位置以 A 作为标记。由

收稿日期: 2005-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助(50471087)

作者简介: 张 坤(1968—), 男, 副研究员, 博士。

于膛线起始处的镀层在射击后完全剥落,因此在 II 中选取两个特征区域进行取样,其位置分别以 B 和 C 作为标记,其中 C 区在靠近镀层完全剥落区域(图 1 中的 III)的 15mm 长度段内。这样,对所选枪管, A 区和 B 区在轴向上的位置都是相同的,但由于不同枪管的镀层完全剥落长度大小不一,因此 4 根枪管的 C 区位置实际上是不同的。

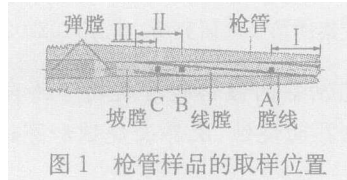


Fig. 1 The axial location of metallographic specimens

另外,前期工作表明,在 II 中,阴线镀层剥落比阳线镀层剥落更加影响枪管的寿命<sup>[4]</sup>(从表 1 中的阴线镀层剥落长度与寿命的关系中也能看出这一点),因此 B 区和 C 区均是在阴线上取样。为了对比, A 区也是在阴线上取样。所有样品沿枪管纵向截取,长度均为 15mm。随后进行磨、抛光处理并在未侵蚀状态下进行金相观察。由于工艺的原因,对于某些枪管,轴向上镀层厚度有不均匀现象,因此在表 1 中还列举了 A, B 和 C 三个区域中的镀层厚度。

表 1 枪管有关参数

Tab. 1 Some parameters related to gun barrels

枪管编号	射弹数 (发)	阴线镀层剥 落长度/mm	镀层厚度 / $\mu\text{m}$	寿命评价
JD-WJG	3 000	219 $\pm$ 37	129, 125, 143	不合格
JD-JG1	3 000	135 $\pm$ 36	164, 171, 168	合格
JD-JG2	3 000	136 $\pm$ 28	168, 210, 182	合格
JS-JG	4 000	69 $\pm$ 4	135, 150, 164	合格

按照内弹道学理论,从 A 区到 B 区再到 C 区,膛内温度由低到高。笔者曾对三个部位铬层的硬度进行测试并与射击前的硬度进行比较,结果发现射击产生的高温明显导致镀层硬度退化<sup>[4]</sup>,而且从 A 区到 B 区再到 C 区,硬度退化的程度越来越大,这从侧面证实了膛内的温度分布。因此,三个特征区域的对比取样能更多地观察与分析基体初始烧蚀行为。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 基体烧蚀微观特征

金相观察的结果显示,对于 4 根枪管,从 A 区到 B 区再到 C 区,由于膛内温度越来越高,镀层开

裂和基体烧蚀都越来越严重,这符合烧蚀的一般规律即烧蚀主要是热作用的结果。但是,枪管制造工艺不同,基体烧蚀状况相应不同。为了对比说明问题,在每一个特征区域选择一个典型的烧蚀点进行分析,枪管烧蚀形貌见图 2~5。

图 2 为寿命不合格枪管 JD-WJG 的烧蚀形貌。就基体烧蚀形状而言, A 区和 B 区有很大相近之

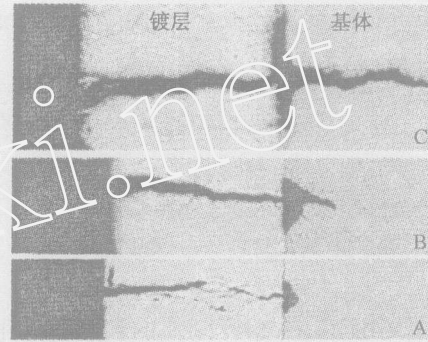


图 2 枪管 JD-WJG 的烧蚀形貌  
Fig. 2 The appearance of substrate erosion in tube JD-WJG

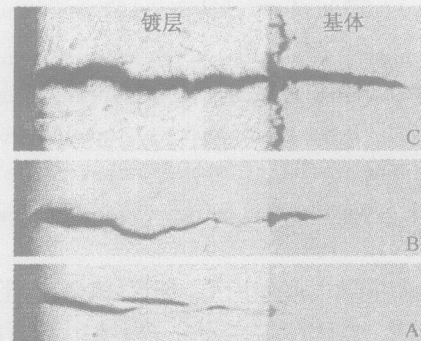


图 3 枪管 JD-JG1 的烧蚀形貌  
Fig. 3 The appearance of substrate erosion in tube JD-JG1

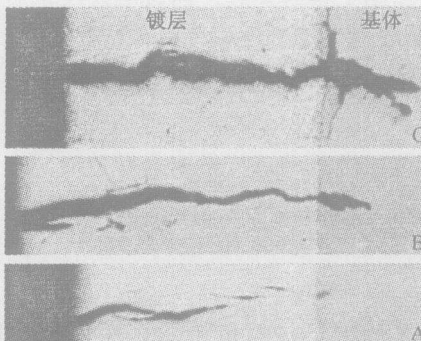


图 4 枪管 JD-JG2 的烧蚀形貌  
Fig. 4 The appearance of substrate erosion in tube JD-JG2

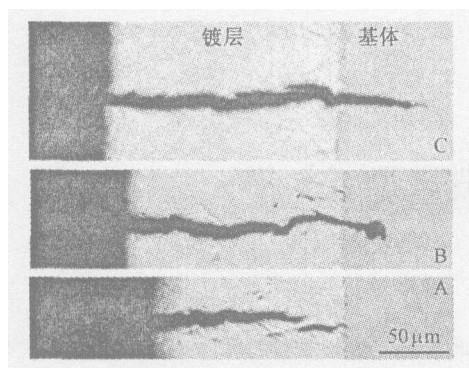


图5 枪管 JS-JG 的烧蚀形貌

Fig. 5 The appearance of substrate erosion in tube JS-JG

处。这种烧蚀形状前人称为倒三角(inverted triangle)或口袋形(pocket)<sup>[1,3,5]</sup>,但B区比A区严重,三角形更大且三角形尖端有加剧烧蚀现象。C区烧蚀更严重,三角形特征已不容易分辨,但烧蚀沿界面发展的特征仍非常明显。

图3为寿命合格枪管JD-JG1的烧蚀形貌。与图2相比,基体同样具有三角形烧蚀的特征,甚至在C区中也可清楚观察到。但烧蚀区域明显变小,特别是在C区中,沿界面方向的烧蚀受到抑制而转为次界面(即平行于界面方向上的基体中)烧蚀。

图4为寿命合格枪管JD-JG2的烧蚀形貌。可以看出,基体无三角形烧蚀特征,即初始烧蚀不是从界面开始。从C区中可以看出,随后的烧蚀在次界面中进行,这与JD-JG1枪管相同。比较B区和C区,笔者把这种初始烧蚀形状称为橄榄形。

图5为超寿命合格枪管JS-JG的烧蚀形貌。可以看出,界面和次界面均无烧蚀现象,基体烧蚀是以镀层裂纹直接穿透基体的方式进行。

## 2.2 分析与讨论

同比国内外身管失效分析结果发现,三角形烧蚀、橄榄形烧蚀或穿透性烧蚀等特征在其它口径的身管上也经常被观察到,如120mm火炮<sup>[1,5]</sup>和155mm火炮<sup>[3]</sup>等。因此,这些烧蚀特征具有普遍性。但由于身管射击时,热、机械和化学作用力共存且不同身管的载荷条件不同,烧蚀机理相当复杂且至今没有定论。

为了揭示载荷因素的作用,国外曾采用激光辐照加热或喷射器等多种模拟方案。某些模拟方案可以再现橄榄形烧蚀特征,某些模拟方案可以再现穿透性烧蚀特征,Cote等人<sup>[2]</sup>曾由此提出基体空洞化(cavitation)机制来解释橄榄形烧蚀成因。但由于

所有的模拟实验都很难再现典型的口袋型烧蚀特征,因此关键的载荷因素仍不清楚。Sopok等人<sup>[3]</sup>曾推测口袋型烧蚀也是由界面孔洞演化而致,但没有说明孔洞成因。但Cote等人证实<sup>[1]</sup>,当基体烧蚀主要以口袋型方式发展时,镀层很容易剥离,这与枪管JD-WJG的情况相符。关于穿透性烧蚀特征的研究不多,但从寿命角度来看,此时可以存在裂纹闭合机制<sup>[6]</sup>,这对降低界面应力和减少烧蚀气氛进入基体大有好处,身管寿命可望较高。枪管JS-JG相对较好的烧蚀寿命数据间接证实了这一点。

从材料因素来看,镀层、界面和基体三者的组织结构和性能都可对烧蚀产生影响。例如,Cote等人<sup>[2]</sup>用激光加热来模拟身管烧蚀时发现,当界面结合不好时,基体烧蚀有从橄榄形向口袋型转化的趋势。但是工程意义上的界面结合性能与物理意义上的界面结合性能有很大差别,前者还包括了镀层性能和基体性能,因此应该系统研究4种枪管中镀层、界面和基体三者的组织结构和性能的差别以揭示烧蚀机理。如果将热、机械和化学等多种作用力统一考虑为某种广义载荷(如定义为烧蚀载荷)而不细分,笔者所观察到的不同烧蚀行为大致可分为3类:①烧蚀主要以垂直界面方向进行即穿透性烧蚀(枪管JS-JG);②烧蚀主要沿界面方向进行即界面烧蚀(枪管JD-WJG);③烧蚀主要沿次界面方向进行即次界面烧蚀(枪管JD-JG1和枪管JD-JG2)。这样的分类与单一载荷作用下镀层中穿透裂纹所诱导的基体破坏分类较为接近,后者正是由于镀层、界面和基体三者性能的不同组合所导致。

值得指出的是,进一步研究必须要关注到在高温作用下镀层、界面和基体三者组织结构发生的变化,因为这也会导致烧蚀特征的变化。例如,Underwood<sup>[7]</sup>采用不同的射击条件(射击温度有很大不同)对135mm火炮进行实验,结果发现,当基体发生相变时,容易出现界面烧蚀;反之,倾向于出现其它破坏方式。

## 3 结论

对某型号机枪枪管来说,实弹射击时基体烧蚀表现出三种典型模式,即界面烧蚀、次界面烧蚀和穿透性烧蚀,枪管寿命相应由低到高。控制制造工艺可以显著改变烧蚀模式和提高枪管寿命。

(下转第196页)

实际上,这些浮游生物易在低 pH 值的水中繁殖,提高局部区域的酸浓度产生很强的腐蚀条件,尤其当它们附着在缝隙内时,其生物副产品在少量水中产生酸性水溶液加速了金属的腐蚀过程。

## 5 结论与建议

(1) 宏观和微观分析表明,黄磷罐的早期失效由坑蚀和缝隙腐蚀造成。

(2) 罐体钢板表面的原生缺陷、轧制鳞皮、工艺污染部位以及焊接喷溅的渣点和高低不平的焊缝金属上的氧化物,都难以通过喷沙彻底清除。未清理干净的部位浸粘性差,在喷涂油漆时可能产生空气穴,而导致漆层气孔或产生漏涂点或漆层剥落<sup>[4]</sup>,漆层很薄的部位容易被擦伤或撞击所破裂,未涂上漆的部位或漆层开裂所暴露的金属相当于周围的表面是阳极。结果在小阳极区发生快速腐蚀,腐蚀优先向基体穿进,从而形成点蚀坑和腐蚀沟槽。

(3) 黄磷罐的设计、制造过程没有注意到卸黄磷后的不可排空性和空罐充分干燥的问题,呈酸性

(pH 在 1.61~1.83)的密封水对罐体水线区间歇润湿和干燥作用加速了腐蚀进程。

(4) 将罐体低位处设计成凹形并安装排放装置,罐内完全排空;或用干燥的氮气或处理过的水充满空罐;或者提高 T-500 防护涂层的质量,都可消除腐蚀条件。采用廉价的工程材料或不锈钢制造黄磷罐既能省去一切清理工序和喷涂油漆工作,又能彻底解决腐蚀问题。

### 参考文献:

- [1] 邹宗伯主编. 资源利用及深加工手册[M]. 北京:中国致公出版社, 1998. 47.
- [2] ASM Committee on Carbon and Alloy Steels. Low-Carbon Steel Sheet and Strip, in Properties and Selection: Irons and Steels Vol1, 9th ed[M]. Ohio: ASM, Metals Park, 1978. 153-155.
- [3] 符若文,朱世平,陆耘,等. 功能纤维双循环冷却水系统中防垢的研究[J]. 中山大学学报, 1996,35(1):64.
- [4] 马庆麟编. 涂料手册[M]. 北京:化工工业出版社, 2001. 37-41.

(上接第 173 页)

### 参考文献:

- [1] Cote P J, Rickard C. Gas-metal Reaction Products in the Erosion of Chromium-plated Gun Bores[J]. Wear, 2000,241(1):17-25.
- [2] Cote P J, Lee S L, Todaro M E, et al. Application of Laser Pulse Heating to Simulate Thermomechanical Damage at Gun Bore Surfaces[J]. J Pressure Vessel Technology, 2003,125(8):335-341.
- [3] Sopok S, Rickard C, Dunn S. Thermal-chemical-mechanical Gun Bore Erosion of an Advanced Artillery System[J]. Wear, 2005,258(1-4):659-670.
- [4] 张坤,罗耕星,陈光南,等. 镀铬枪管内膛的起始烧蚀

行为研究[J]. 理化检验-物理分册, 2005,41(增刊):297-299.

- [5] Cote P J, Kendall G, Todaro M E. Laser Pulse Heating of Gun Bore Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2001,146-147:65-69.
- [6] Underwood J H, Paker A P, Vigilante G N, et al. Thermal Damage, Cracking and Rapid Erosion of Cannon Bore Coatings[J]. J Pressure Vessel Technology, 2003,125(8):299-304.
- [7] Underwood J H, Vigilante G N, Troiano E. Thermochemical Model of Hydrogen Cracking at Heat-affected Cannon Bore Surface[R]. New York: Benet Laboratories, 1999.

(上接第 216 页)

素;目的、方法、结果和结论)和关键词(标引 3~8 条);随稿附上论文题目和作者单位名称的英译名以及作者姓名的汉语拼音。

8. 来稿请勿涉及保密内容,如造成泄密等问题,其责任概由作者自负。

9. 编辑部严格按稿件质量择优录用,来稿一经发表,本刊将赠送样刊,酌付稿酬。本刊未作退稿前请勿一稿两投。

10. 来稿请写明作者姓名、工作单位、电话号码、通信地址及邮政编码。

11. 来稿请寄上海市邯郸路 99 号《理化检验-物理分册》编辑部,邮编:200437,电话:(021)65556775×361,传真:(021)65544911;也可通过 E-mail 投稿,E-mail:ptca-pt@mat-test.com,并注明“投稿”字样。