

身管内膛镀铬层的抗烧蚀性能研究

张坤 胡莹 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 为了给身管内膛镀铬层质量评价方法的建立提供实验依据, 对某型号机枪枪管进行射击实验。通过不同寿命水平条件下枪管内膛不同位置处的镀层裂纹、金相组织、硬度等解剖分析, 发现镀层的性能退化过程和组织退化过程基本上同步进行, 都与内膛温度、温度梯度、射击次数相关。就界面处基体的烧蚀模式而言, 前膛和后膛具有高度相似性, 从中都能区分出界面结合的强弱。

关键词 枪管 烧蚀 镀层

电镀铬是身管(枪管、炮管的统称)内膛常用的防护涂层, 可以提高抗烧蚀能力。但是, 身管内膛载荷条件难以测量且随膛内轴向位置不断变化^[1], 镀层抗烧蚀性能的表征始终存在困难, 导致镀层结构设计和工艺设计一直依赖于经验。国外曾提出过激光烧蚀、燃气烧蚀等模拟实验方案, 发现温度及温度梯度等条件均会影响镀层破坏^[2], 但在表征参量的提取及测试方法的确定方面仍有很多不足之处。例如, 镀层的化学惰性很强, 抗烧蚀能力主要体现在镀层断裂抗力和界面断裂抗力上, 但已有的模拟实验方案难以造成界面断裂^[3], 表明关键的载荷因素仍未能掌握, 这必须依赖于对镀层失效机理的进一步认识。

由于射击成本高, 以往对镀层失效机理的认识往往局限于对寿终身管或某一寿命水平条件下身管的解剖分析, 难以了解性能退化过程。本文介绍了在烧蚀过程方面的初步实验结果, 力图为抗烧蚀能力的实验和理论表征提供依据。

1 试验

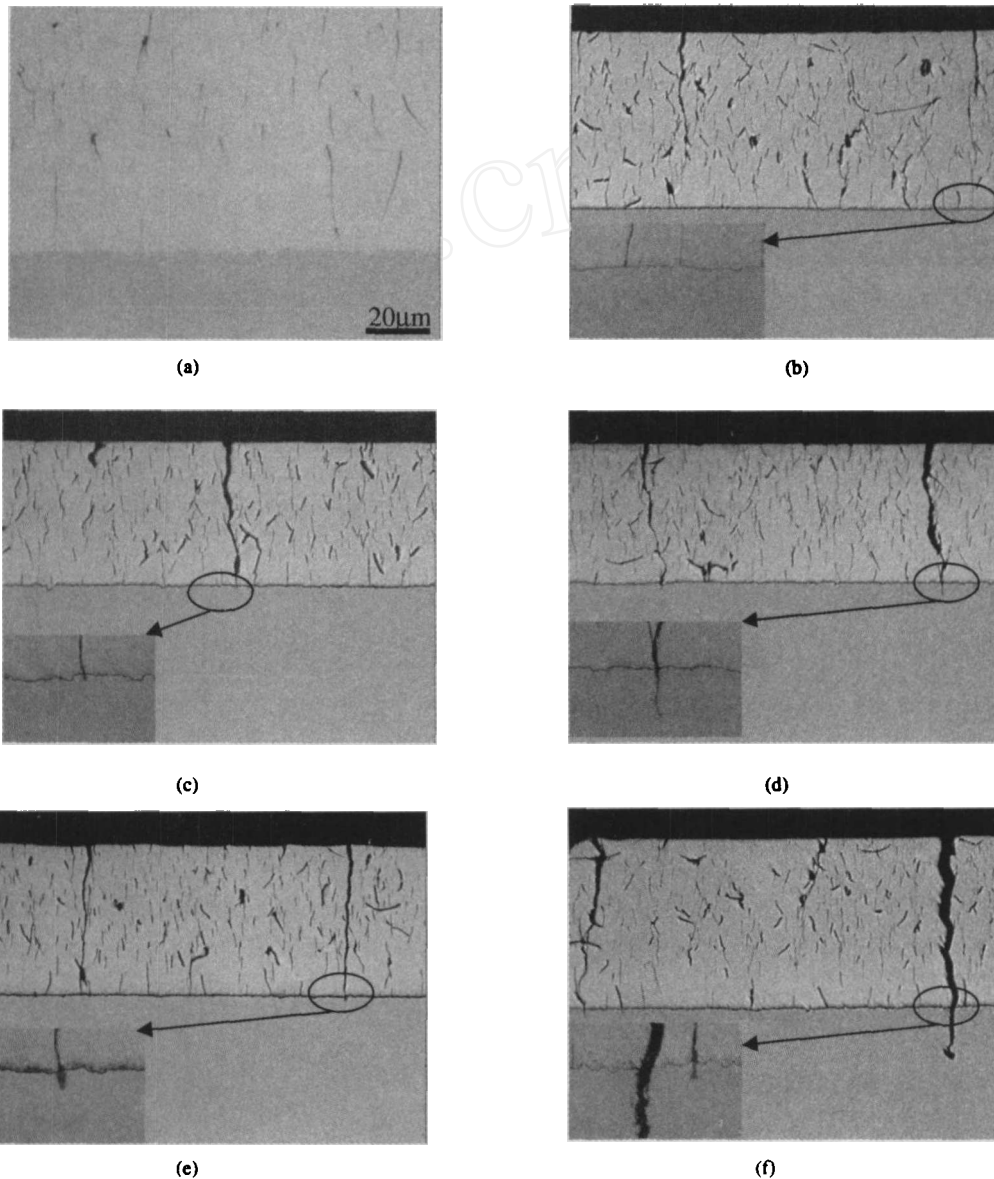
选择现行电镀铬定型工艺制造的机枪枪管共 5 根, 基材为 30CrNi2MoVA, 编号从 1#~5#。1#为原始枪管, 2#进行配枪实验, 3#~5#均进行寿命射击实验, 射弹数/设计寿命之比分别为 20% (部分寿命射击)、100% (全寿命射击)、130% (超寿命射击)。在射击实验完成后, 所有枪管全部沿轴向用线切割方法对剖。

根据工程经验, 该型号机枪枪管的烧蚀自后膛的膛线起始处开始并不断向膛口方向延伸, 当烧蚀长度超过 300mm 时, 弹道性能一般不能满足要求。因此对于寿命射击枪管, 在膛线起始处前方 300mm 位置处取样。作为对比, 在膛口后方 300mm 位置处同时取样, 此处温度相对较低, 一般不出现烧蚀。对于原始枪管和配枪实验枪管, 只在膛口后方 300mm 位置处取样。另外, 为对比方便, 所有样品均取自阴线, 长度均为 15mm, 随后按常规方法进行理化检验。

2 试验结果及分析

2.1 镀层裂纹的演化过程

图1给出了不同状态枪管镀层的光学显微镜照片,其中图(a)显示原始镀层就有群体微裂纹存在,图(b)显示极少量的射弹数(配枪实验)就能造成穿透性主裂纹,但此时主裂纹前方基体还未观察到燃气腐蚀痕迹。图(c)、(e)、(g)分别为前膛在20%、100%、130%寿命水平时的破坏情况,可以看出20%寿命水平时主裂纹前方基体已出现烧蚀,随后烧蚀更加明显,在寿命后期主裂纹明显加宽。图(d)、(f)、(h)分别为后膛在20%、100%、130%寿命水平时的破坏情况,可以看出破坏比前膛严重,这符合烧蚀的一般规律即烧蚀主要是热作用的结果。后膛烧蚀的关键特征包括:基体烧蚀总是比前膛明显;涂层主裂纹具有明显的穿透界面并向基体深处不断扩展的行为;寿命后期主裂纹宽化程度比前膛明显;在130%寿命水平时界面裂纹已经出现。



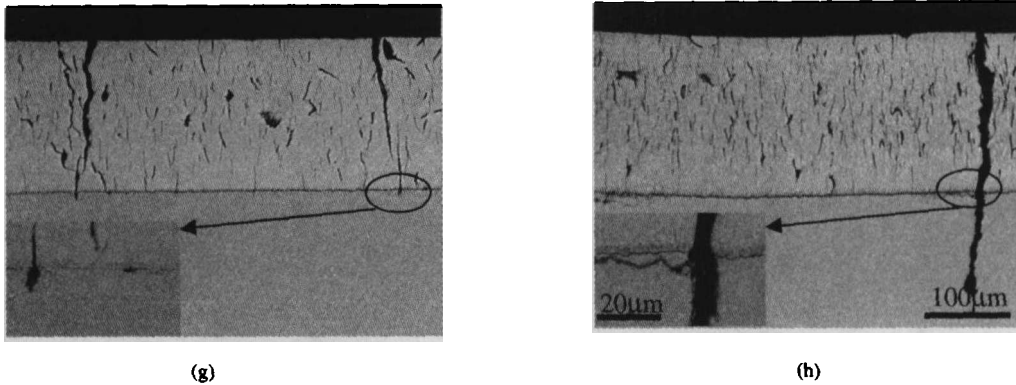


图1 不同状态枪管的镀层裂纹(续)

2.2 镀层硬度及组织退化过程

镀层受热时会发生一系列组织结构变化,包括析氢、再结晶、晶粒长大等^[5],这都会不同程度上造成硬度衰减,因此镀层硬度衰减过程与组织退化过程相关且能部分反映出镀层热历史。其最明显证据是130%寿命时后膛硬度的显著衰减(图2(b))和几乎整个镀层厚度方向上的晶粒长大(图1(h))。其他证据包括:图2列举的所有状态的硬度均沿深度方向上呈现由低到高的变化,表明镀层存在温度梯度;同一寿命水平下后膛硬度总比前膛硬度衰减严重,这显然是由于后膛温度相对较高的缘故;后膛镀层的表面硬度都显著衰减,高倍金相观察时硬度显著衰减层对应于晶粒长大层,说明晶粒长大对硬度改变最为明显(图3给出了晶粒长大层随射弹数变化的关系曲线);增加射弹数,后膛和前膛硬度都不断衰减。从图2还可看出,靠近界面处基体硬度也随射弹数的增加而总体上呈现不断衰减的趋势,后膛硬度一般比前膛硬度低,特别是130%寿命时基体硬度也已明显衰减,这显然也是热作用的结果。

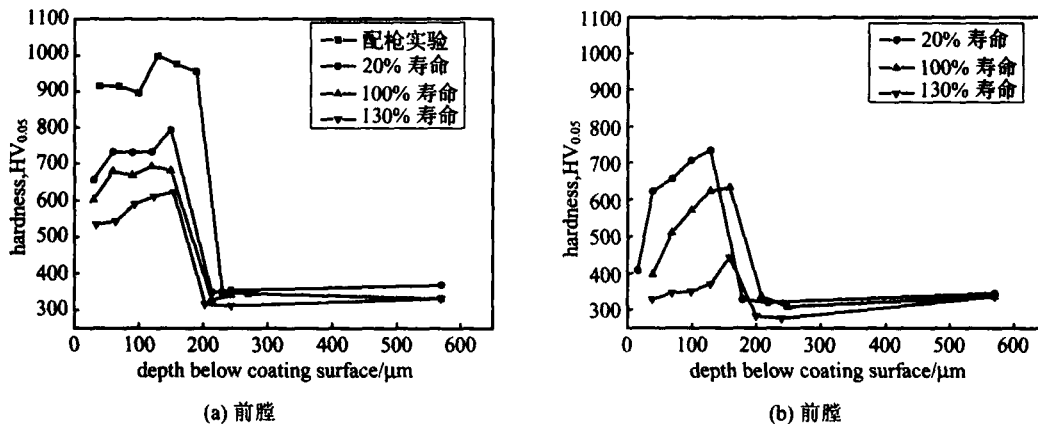


图2 不同状态枪管的镀层硬度

2.3 镀层界面破坏机理分析和模拟方案构思

图1显示镀层中穿透性主裂纹甚至在进行配枪实验时就已形成,这表明评价镀层抗烧蚀能力应该主要关注抗界面断裂抗力而非镀层断裂抗力。对比前膛和后膛的基体破坏行为可以看出,尽管前膛基体烧蚀破坏无明显裂纹扩展行为,但也表现出类似后膛的穿透界面并向基体深处不断扩展行为(图1(e)、(g)),都能显示出该枪管镀层界面属于强结合。笔者以前在实验研究不同镀

层工艺对枪管寿命的影响时也发现, 镀层工艺不同, 基体烧蚀破坏模式相应不同, 显示出界面结合有强有弱, 但前膛和后膛的破坏都有高度相似性, 这意味着: 尽管烧蚀一般发生在后膛而非前膛, 但并不需要完全再现后膛载荷条件也能对镀层的某些抗烧蚀性能如界面结合强度进行表征。

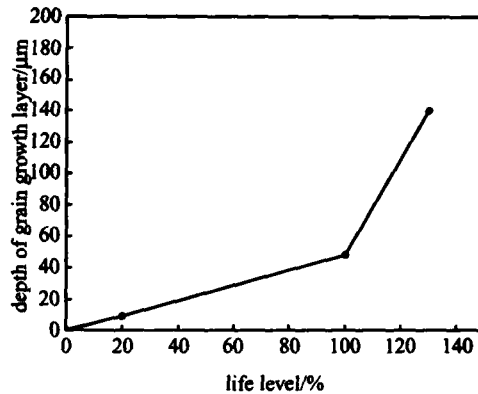


图3 不同寿命水平下后膛晶粒长大层的深度

后膛发生烧蚀的原因在于随射弹数增加镀层界面最终出现破坏(对比图 1 (f) 和 (h)), 但界面破坏机制复杂: (1) 属疲劳破坏。笔者曾对该型号机枪枪管的射击实验进行过半连续的动态监测^[4], 结果发现即使在后膛温度最高处即线膛起始处, 破坏也是发生在 35% 寿命之后。(2) 后膛发生界面破坏时的主裂纹比前膛主裂纹明显宽化, 而不同的主裂纹宽度乃至深度会导致不同的界面应力^[2]。(3) 镀层组织结构和力学性能不断退化, 这也会导致界面应力不断变化。尤其值得关注的是, 在 130% 寿命时, 晶粒长大层深度急剧增加(图 3), 恰恰此时界面也出现破坏(图 1 (h))。尽管还不知道晶粒长大层深度急剧增加的原因, 但这意味着在进一步研究界面破坏机制和考虑模拟方案时应该同时注意到结构破坏与组织退化两个过程。所幸的是, 本文工作证实了这两个过程基本上同步进行。

3 结 论

枪管镀铬层属本征脆性材料, 表面开裂乃至裂纹穿透非常容易, 抗烧蚀能力的高低主要取决于界面断裂抗力。实弹射击过程中, 枪管前膛和后膛的热载荷条件有相似性(例如, 二者都经历相同周次的高温气体作用, 镀层中也都存在温度梯度), 界面处基体的烧蚀模式也具有相似性, 都能定性反映出界面结合的强弱。后膛热载荷条件更为苛刻并最终出现界面破坏, 此时镀层组织基本上也已完全退化(即晶粒长大)。

致谢: 感谢国家自然科学基金面上项目(50471087)、重点项目(50531060)资助。

参 考 文 献

- 1 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(1/4): 659~670
- 2 Underwood J H, Witherell M D, Sopok S, McNeil J C, Mulligan C P, Vigilante, Thermomechanical modeling of transient thermal damage in cannon bore materials [J]. *Wear*, 2004, 257: 992~998
- 3 Cote P J, Lee S L, Todaro M E, Kendall G. Application of laser pulse heating to simulate thermomechanical damage at gun bore

surfaces [J]. Journal of Pressure Vessel echnology, 2003, 125(8): 335~341

- 4 张坤, 罗耕星, 陈光南, 严宏民. 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

作者简介:

张坤 男, 1968 年 11 月出生, 西北工业大学材料加工工程专业博士, 中科院金属所和力学所两站博士后, 从事材料表面工程与力学研究。现力学所副研究员, 中国机械工程学会表面工程分会委员、失效分析分会专家。北京市北四环西路 15 号, 中科院力学所材料工艺中心 (100080)。

电话: 010-62547527-3 (O)

传真: 010-62561284

E-mail: kzhang@imech.ac.cn

www.cnki.net