

# MATLAB 在 Cr 涂层微裂纹组态分析中的应用

胡莹<sup>1,2</sup>, 张坤<sup>1</sup>, 陈光南<sup>1</sup>, 吴臣武<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 镀 Cr 身管在使用时普遍存在涂层剥落问题。本文结合我国某新型号机枪枪管的研制工艺, 对涂层微裂纹组态、控制因素及其与破坏模式的关系进行研究。鉴于微裂纹的纳米级宽度, 本文通过特殊的金相制样方法将其扩宽, 从而得到反映微裂纹组态的低倍照片。应用 MATLAB 对微裂纹特征进行统计分析, 得出微裂纹密度、长度等特征参数与涂层失效模式间的对应关系, 同时证实基体激光离散预处理对微裂纹组态有控制作用。

**关键词:** Cr 涂层; 微裂纹; MATLAB

**中图分类号:** TQ153.1<sup>+</sup>1; TG115.21

## MATLAB Used in Analyzing the Microcracks of Cr Coating

HU Ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>, CHEN Guang-nan<sup>1</sup>, WU Chen-wu<sup>1,2</sup>

(1.Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Cr scaling off is very important for the guns. The experimentation shows that the modes of invalidation are related to microcracks on the Cr. This study wants to do something about the configuration of the microcracks and the relationship between the microcracks and the invalidation of the guns. We got the optical micrographs of the microcracks for a large range by a special method, for the microcracks are too narrow to be showed. We also got the density and length of the microcracks with MATLAB. At the same time, we substantiated that the configuration of the microcracks could be controlled by pretreating the substrate with laser.

**Key words:** Cr coating; microcracks; MATLAB

随着现代战争对枪炮等常规兵器战技指标(如射程、射频和精度等)要求的不断提高, 身管(枪管、炮管的统称)工况条件日趋严酷, 内膛烧蚀问题和寿命问题日益突出。采用电沉积 Cr 涂层可以提高抗烧蚀能力, 但涂层在使用时容易出现剥落现象。美国 Benet 实验室在炮管上的研究证实, 涂层剥落与初始微裂纹密切相关<sup>[1]</sup>。根据电沉积理论, 初始微裂纹受控于沉积工艺、后续热处理工艺以及基体材料状态。本文结合我国某新型号机枪枪管的研制工艺<sup>[2]</sup>, 就微裂纹组态、控制因素及其与破坏的关系进行初步探讨。

尺度, 在常规制样的条件下只能隐约看到微裂纹, 如图 1 (a)。因此, 本文采用特殊的定向研磨的方法, 得到了金相显微镜下扩宽的微裂纹, 并且保持其长度和分布不变, 如图 1 (b), 这样便于统计分析微裂纹密度、平均长度等组态特征。

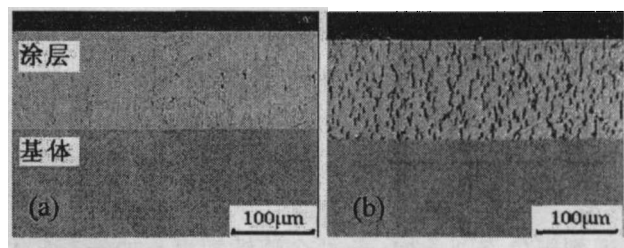


图 1 涂层光学显微照片 (a)常规制样 (b)特殊制样

Fig.1 OM of coating revealed by (a) routine and (b) special sample preparation methods

## 1 样品制备以及分析算法

### 1.1 样品制备

为建立涂层微裂纹与组织结构以及破坏的关系, 本文采用横截面样品。考察微裂纹组态必须在低倍下观察, 但是 Cr 涂层中微裂纹宽度仅在纳米

### 1.2 分析算法

在分析中, 主要关注两个方面: 微裂纹的面密度以及平均长度。

对于微裂纹的面密度, 采用直接统计的方法, 把图片转变成二值图像, 其中微裂纹像素的灰度值为 0, 其余为 255。从中截取要统计分析的部分, 转换乘灰度值矩阵进行计算。基本算法为: 从图像

**作者简介:** 胡莹 (1981.3-), 女, 吉林白城人, 硕士生, 目前主要从事 Cr 镀层微裂纹及微结构的研究。

E-mail: hying320@126.com

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50471087)

左上角开始检验像素的灰度值,一旦遇到黑色像素(P5),则将其灰度值置为150,同时考察其相邻的8个相邻像素,如图2所示。若P1、P2、P3和P4均非150则裂纹条数增加1,否则裂纹条数不变;然后将P1、P2、P3、P4、P6、P7、P8、P9中的黑色像素全部置为150。如此循环,直到检验完整个灰度矩阵。

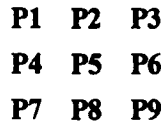


图2 计算单元

Fig. 2 Cell for account

微裂纹特征量面密度统计值计算式为:

$$N=n \cdot (A/a) \dots\dots\dots (1)$$

N—100μm×100μm 面积内的裂纹条数;

n—统计面积内裂纹条数;

A—100μm×100μm 面积内的像素数;

a—统计面积内的像素数。

平均长度统计值计算式为

$$L=S/ (N \cdot W) \dots\dots\dots (2)$$

L—裂纹的平均长度;

S—100μm×100μm 面积内裂纹的像素总数;

N—100μm×100μm 面积内的裂纹条数;

W—微裂纹的平均宽度。

S、N、W 分别测定,再代入(2)式计算得出L。先确定100μm×100μm 面积内以及100μm 长度内的像素总数。对于S的确定,分别统计灰度值为0和灰度值为255的像素总数,得出裂纹所占像素的比例,由此得出100μm×100μm 面积内裂纹所占像素的总数。任取一行,分别统计灰度值为0和灰度值为255的像素总数;计算该行的裂纹条数,具体方法为:任取一行,从一端开始循环,若遇到黑色点则x加一,两个连续黑点y加一,连续三个z加一……x-y+z……微裂纹条数;结合前面得到的微裂纹像素数可推算微裂纹的平均宽度W。

## 2 微裂纹组态分析

### 2.1 不同电沉积工艺下的微裂纹组态

选取两种不同研制工艺下的产品(图3、图4),从微裂纹组态可以明显区分出涂层的双层结构。但对于第一种工艺条件,双层结构更为明显,以横线

为界,表面层(图中以A表示)微裂纹较长较稀,界面层(图中以B表示)反之;而第二种工艺条件下表面层(图中以C表示)的微裂纹较短较密,界面层(图中以D表示)反之。具体统计结果如表1。

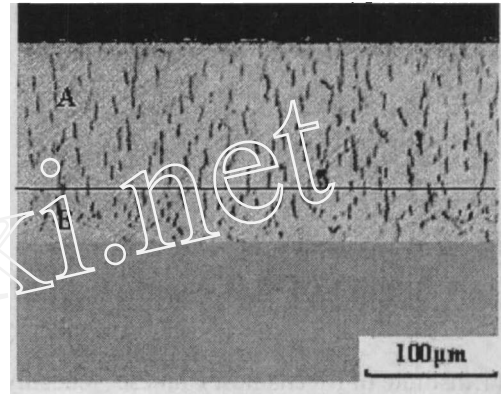


图3 工艺I的OM结构

Fig.3 OM microstructure of the first technics

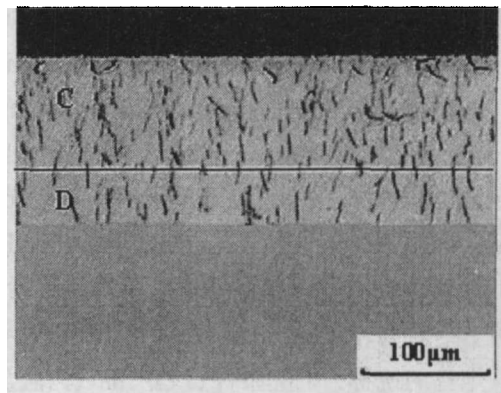


图4 工艺II的OM结构

Fig.4 OM microstructure of the second technics

表1 统计结果

Table 1 The result of account

| 统计范围     | 平均面密度<br>(条/100μm×100μm) | 平均长度(μm) |
|----------|--------------------------|----------|
| 工艺I/表面层  | 108                      | 40.48    |
| 工艺I/界面层  | 171                      | 8.79     |
| 工艺II/表面层 | 148                      | 6.19     |
| 工艺II/界面层 | 73                       | 18.29    |

实际射击证明,对于第一种工艺条件,枪管寿命很低。解剖发现,涂层中主裂纹,即导致破坏的贯穿性长裂纹(图5(a))除向基体延伸外,还沿界面方向长距离扩展,这种沿界面方向扩展的危害很大,界面裂纹相互连通很容易造成涂层的剥落。而对于第二种工艺,主裂纹扩展到界面后直接穿入基体,没有界面方向的扩展,如图5(b),其寿命也相应地长得多。

由此可见,微裂纹组态与主裂纹扩展模式及寿命之间存在对应关系。

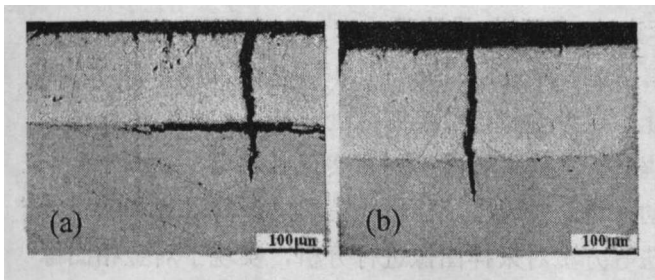


图5 破坏模式 (a)工艺 I (b)工艺 II

Fig.5 Modes of destruction

(a) the first technics (b) the second technics

## 2.2 激光离散处理对微裂纹组态的影响

该型号产品在研制时还引入了基体激光预处理工艺,即在电沉积之前,先用激光束对基体进行离散相变热处理(图6),然后再电沉积 Cr 涂层(图7),结果发现身管寿命得到大幅度提高。与之相关联的一个重要现象是特征微裂纹的出现。

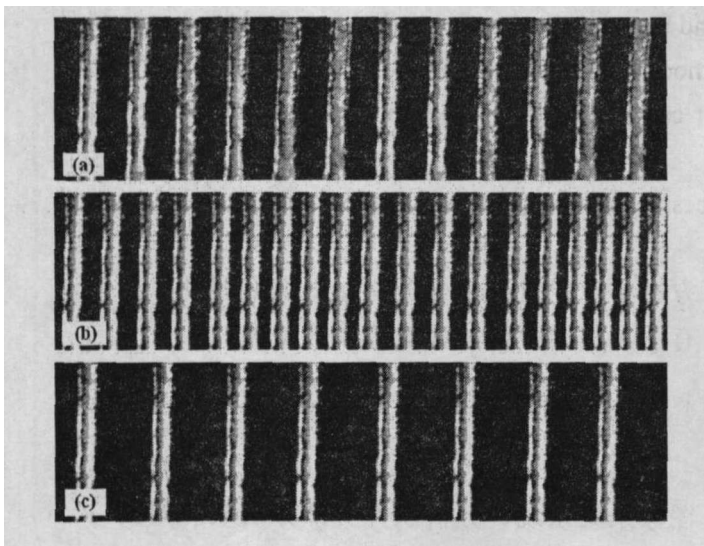


图6 不同离散度的激光处理条带(白色为激光处理区,黑色为未处理区)

Fig.6 Laser discrete treatment for gun barrel

所谓特征裂纹,是指在激光区之间周期性出现的微裂纹,与其他微裂纹相比,这些特征裂纹具有出现位置以及间距相对固定、形态相似、更长更直

### 参考文献

- [1] S. Sopok, C. Rickard, S. Dunn. Thermal-chemical-mechanical gun bore erosion of an advanced artillery system part two: modeling and predictions[J]. Wear, 2005, 258: 671-683
- [2] 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, 2006, 41(增刊): 297-299.

等特点,如图8(a)。取热处理态的样品,可以发现其特征裂纹更加明显,如图8(b)。

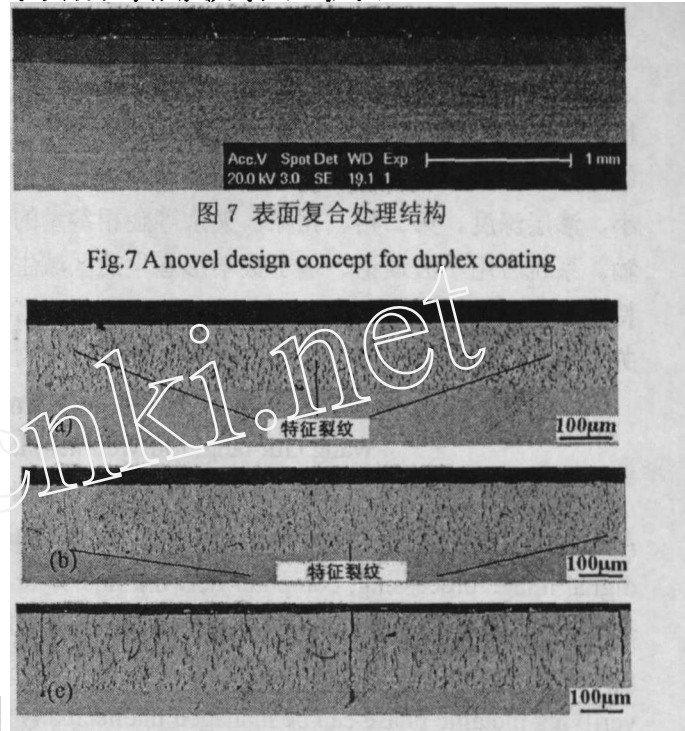


图8 涂层特征裂纹 (a)沉积态 (b)热处理态 (c)服役后

Fig.8 Characteristic cracks in the coating (a) deposit (b) heat treatment (c) used

这种特征裂纹在射击时会进而演化成主裂纹,如图8(c),因此可以将其称为 I 级微裂纹,其它微裂纹可称为 II 级微裂纹。I 级微裂纹的量化分析以及激光预处理对 II 级微裂纹的影响规律有待进一步研究。

## 3 结论

利用特殊的金相制样方法可以在光学显微镜下显示电沉积 Cr 涂层微裂纹组态。

基于 MATLAB 对群体微裂纹特征(面密度、平均长度)的统计分析结果,沉积工艺、微裂纹组态、裂纹扩展模式和寿命之间存在对应关系。

基体激光离散预处理可以以特征裂纹的形式控制 Cr 涂层的微裂纹组态,并影响主裂纹的形成。