

基体激光淬火对镀铬层界面剪切强度的影响*

张国祥^{1,2,3}, 陈光南¹, 张坤¹, 罗耕星¹, 李怀学^{1,3}

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 山东理工大学, 山东淄博 255000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100080)

摘要:针对激光淬火基体后再镀铬复合工艺提高镀铬身管寿命的实际工程问题,采用多裂纹拉伸技术证明该复合镀铬工艺可以提高界面剪切强度,并从材料学角度给予解释。离子冲击技术对界面强度的定性分析表明:激光淬火基体在消除铬层和基体之间过渡层的同时也提高了界面附近材料的强度。化学腐蚀去基体法研究表明,铬层界面材料强度的提高是晶粒细化的结果。因此得出激光淬火基体提高镀铬层界面剪切强度的原因是激光淬火消除了铬层和基体之间的过渡层和增强了界面附近材料的硬度和强度。

关键词:界面剪切强度;镀铬层;激光淬火;材料强度

中图分类号: TN249; TG156.99 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2006)06-0025-04

Effect of Laser-quenched Substrate on Interfacial Shear Strength of Chromium Plated Coatings

ZHANG Guo-xiang^{1,2,3}, CHEN Guang-nan¹, ZHANG Kun¹, LUO Geng-xing¹, LI Huai-xue^{1,3}

(1. Institute of Mechanics, China Academy of Sciences, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing, China 100080; 2. ShangDong University of Technology, Zibo ShangDong, China 255000; 3. Graduate School of China Academy of Sciences, Beijing, China. 100080)

Abstract: Directing against the real working condition of Cr-plated gun bore, the laser-quenching of substrate was adopted. It was indicated by multi-cracks tensile method that the interfacial shear strength was greatly increased, its service life could be obviously improved, and the mechanism was discussed from the materials science. The interfacial strength was evaluated by ion peening technology, the result showed that laser quenching substrate could not only eliminate interlayer between substrate and Cr-coating but also increase the strength of materials near interface. The mechanism of improving strength was due to the refined grain of Cr-coatings interface.

Key words: interfacial shear strength; chromium-plated coatings; laser quenching substrate; strength of materials

0 引言

由于铬的低摩擦因数和高熔点以及耐腐蚀等优点,几十年来,采用镀铬方法对身管基体进行防护成为提高身管寿命的主要手段,延缓铬层从基体上剪切剥落成为提高镀铬身管寿命的关键难题^[1,2]。为了提高某种型号武器镀铬身管的寿命,激光淬火预处理基体后再镀铬复合工艺被提出,并且达到了镀铬身管延寿的目的^[3]。通过利用离子冲击技术研究界面结构^[4]和化学腐蚀去基体法研究铬层界面形貌^[5,6]

表明:激光淬火预处理基体可以消除原始基体与铬层之间的过渡层和得到晶粒细化的铬层界面以及改变了铬层界面裂纹的形貌。

上述探讨激光淬火基体提高镀铬身管寿命机理的工作主要是围绕实际寿命身管^[3]和初始界面结构^[4,5]展开的,二者均笼统地解释了激光淬火可以提高铬层界面结合强度,并没有进行必要的实验室验证。

众所周知:界面结合强度分为界面剪切强度和界面拉伸强度^[7]。对于以热载荷工况为主的镀铬身管而言,铬层与基体的热错配形成了界面剪切应力,该应力导致的界面剪切剥落是铬层失效的主要机制^[1,2]。为了进一步揭示激光淬火基体提高镀铬身管寿

收稿日期:2006-06-18;修回日期:2006-09-14

基金项目:*国家自然科学基金项目(50471087,50531060)

作者简介:张国祥(1963-),男(汉),山东淄博人,副教授,博士生。

命的机理, 鉴于铬层和钢基体分别属于脆性和塑性材料, 利用适用于脆性涂层/塑性基体的多裂纹拉伸技术测量界面剪切强度的实验室方法^[8,9], 对激光淬火和原始基体的镀铬层界面剪切强度进行测量, 并利用离子冲击技术以及化学腐蚀去基体法对影响界面剪切强度的材料因素作以分析。

1 试件制备和主要设备

1.1 试件制备

1.1.1 初始试件制备

试验材料是退火态的 30CrNi2MoVA, 将待处理表面利用水砂纸从 200 # 开始一直研磨到 2000 # 为止, 在表面涂覆吸光材料, 利用 500 W 的 YAG 激光器对其表面进行扫描处理。其处理工艺参数为: 功率 200 W, 扫描速度为 410 mm/min, 光斑直径为 0.5 mm。进行如图 1 所示的搭接扫描处理。对激光淬火后的和原始基体表面再进行水砂纸研磨和抛光, 按照 H/PJ130101-2 标准进行镀前处理和镀铬, 得到厚度为 50 μm 的铬层, 其示意结构如图 1 所示。

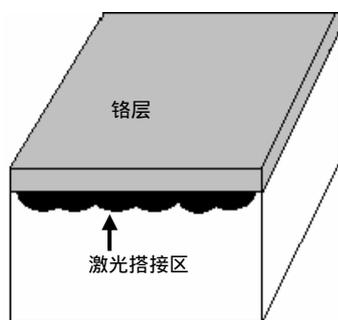


图 1 激光淬火基体镀铬层示意结构

Fig.1 Schematic diagram of structure of Cr-plated coatings on laser quenching substrate

1.1.2 拉伸试件制备

利用线切割设备, 先将试件切割成如图 2 所示的 1.5 mm 厚的板状拉伸试件, 再进行手工磨制到 1 mm, 在制备过程中, 避免试件发生变形和表面损伤。激光淬火基体和原始基体试件每组各 10 个。

1.2 主要试验设备

采用中国科学院力学研究所、型号为 Instron Microtester 5848 微拉伸试验机。将装有试件的拉伸台置于配备 CCD 装置的光学显微镜下进行动态拉

伸试验。

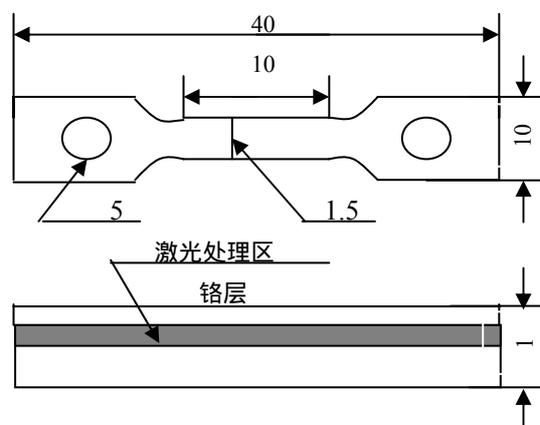


图 2 拉伸试件尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile sample

2 拉伸试验结果

利用上述原位观察微拉伸试验机, 加载方式为控制位移法, 加载速率为 0.1 mm/min。得到如图 3、4 所示的典型拉伸应力 - 应变曲线和表面平行多裂纹形貌。在拉伸过程中, 当原位观察监视器上出现第一条裂纹时, 记录应变和应力值。接着继续拉伸, 当裂纹的条数不再增加时, 即表面裂纹达到饱和时, 停止试验, 将表面裂纹拍摄下来, 统计裂纹间距, 计算平均裂纹间距, 然后再利用如下公式计算最大裂纹间距^[9]。

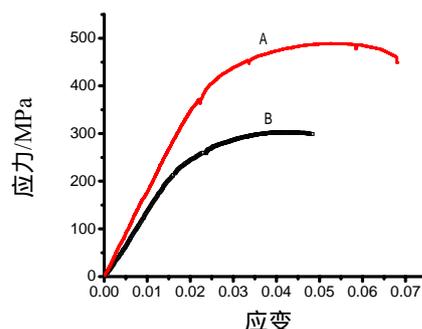


图 3 应力 - 应变曲线: 曲线 A、B 分别对应激光淬火和原始基体

Fig.3 The stress - strain curve A,B corresponding to laser treated and untreated substrate

$$L_{\max} \approx \frac{4}{3} L_{\text{avg}} \quad (1)$$

式中 L_{\max} 、 L_{avg} 分别是最大和平均裂纹间距。其铬层断裂时的应变和饱和裂纹间距见表 1。

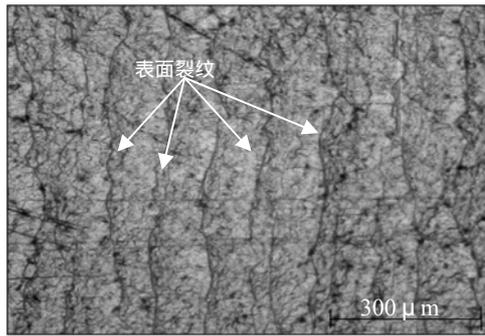


图 4 表面裂纹形貌

Fig.4 Surface crack morphology

表 1 试验数据

Table 1 Experimental data

	/%	$L_{avg}/\mu m$	$L_{max}/\mu m$
激光淬火	0.23	272.3	363
原始基体	0.17	357	476

界面剪切强度的具体计算公式如下^[8]：

$$\tau = \frac{\pi b_c \sigma_f}{L_{max}} \quad (2)$$

式中： b_c 、 σ_f 和 τ 分别为铬层厚度、铬层断裂应力、界面剪切强度。铬层断裂应力利用如下公式计算：

$$\sigma_f = E_c \varepsilon \quad (3)$$

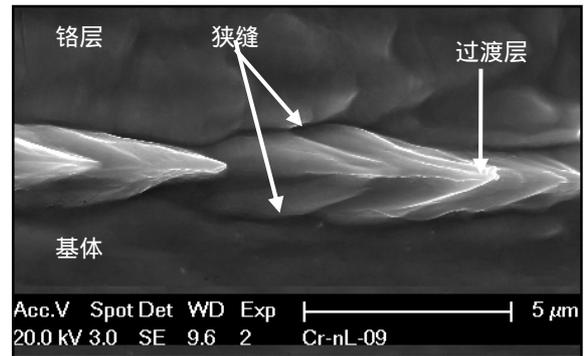
式中 E_c 是铬层的弹性模量，取 $E_c = 280 \text{ GPa}$ ^[10]。

将表 1 中的铬层断裂应变代入公式 (3) 中，得到激光淬火和原始基体铬层断裂应力分别为：644 MPa 和 476 MPa。将铬层厚度和饱和时的最大裂纹间距代入公式 (2) 中，得到了与激光淬火和原始基体相对应的界面剪切强度分别是 234 MPa 和 157 MPa，通过比较发现激光淬火的界面剪切强度提高了 77.7%。

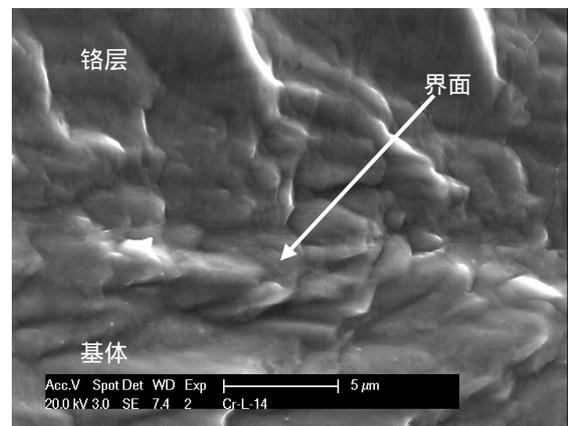
3 影响因素分析

3.1 离子束冲击界面

对与拉伸试验同样的试件进行磨、抛光后，采用与研究界面结构同样的离子冲击参数^[4]，对激光淬火和原始基体的镀铬层界面进行离子束冲击，得到图 5 所示的界面形貌。



(a) 原始基体



(b) 激光淬火基体

图 5 离子冲击后界面形貌比较

Fig.5 Comparison of interface morphologies after ion peening (a) original substrate (b) laser quenched substrate

图 5 (a) 表明：在原始基体和镀铬层之间存在一个过渡层，该过渡层与基体和其它铬层形成了两个界面，在离子冲击作用下，在界面处形成了细小的“狭缝”，这说明在界面附近存在一个弱强度区，该区的材料被具有一定能量的离子剥落掉。图 5 (b) 表明：激光淬火的基体和铬层之间没有过渡层存在，铬层和基体之间仅存在一个界面，并且在界面处，基体和铬层连续过渡，没有形成“狭缝”，这说明激光淬火基体的界面附近不存在弱强度区。

3.2 铬层界面结构分析

为了分析激光淬火基体提高界面附近材料强度的原因，利用化学腐蚀去基体法^[5,6]，对铬层界面结构形貌进行研究，得出图 6 所示的界面形貌。比较图 6 (a) (b) 可知：激光淬火基体可以得到晶粒细化的铬层界面组织结构。统计分析表明：晶粒尺寸分别为 7~12 nm 和 30~40 nm^[5]。

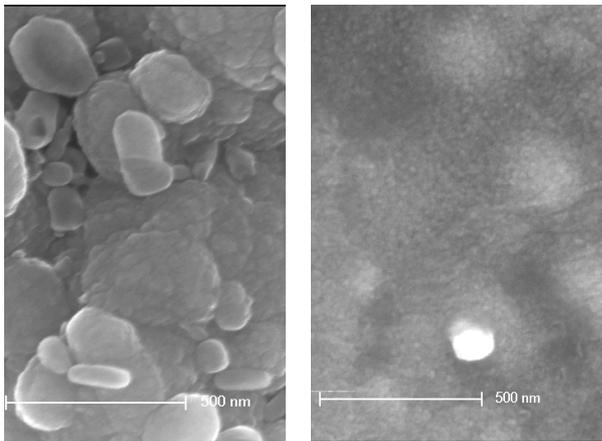
硬度与晶粒尺寸^[11]和硬度与强度^[12]之间存在如下关系:

$$H = a + bd^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\sigma = cH \quad (5)$$

式中 H 、 d 和 σ 分别是材料的硬度、晶粒直径和拉伸强度; a 、 b 和 c 均为常数。

由公式(4)、(5)可知:铬层界面晶粒细化使得铬层界面的材料硬度和强度都得到提高;另一方面,激光淬火基体,也得到了高硬度、强度的马氏体基体表面^[13]。为此,激光淬火基体的界面两侧的材料强度明显高于原始基体的,则在同样条件的离子束冲击作用下,激光淬火基体的界面没有“狭缝”存在。



(a)原始基体的铬层 (b)激光淬火基体的镀铬层

图6 镀铬层界面形貌比较

Fig.6 Comparison of interface morphologies of Cr coating
(a) original substrate (b) laser quenched substrate

3.3 界面材料硬度(强度)对界面剪切强度影响分析

众所周知,界面结合强度除了受到涂层(薄膜)和基体的结合方式影响以外,还和界面两侧的材料组织结构和力学性质有关^[14]。如果利用界面或界面附近材料的硬度简单评价界面剪切强度,则有如下硬度与界面剪切强度的关系式^[2]

$$\tau \approx \frac{1}{6}H(9.8\text{MPa}/(\text{kg}/\text{mm}^2)) \quad (6)$$

公式(6)表明:在不考虑界面结合方式的前提下,提高界面附近材料的硬度(强度)可以提高界面剪切强度。由此可见:激光淬火基体是通过提高界面附近材料的硬度(强度)达到提高界面剪切强度的目的。

通过上述利用离子冲击技术和化学腐蚀去基体法表明:激光淬火基体除了消除中间层以外,不但提高了基体的硬度和强度,而且也通过细化铬层界面晶粒,增强了铬层界面材料的硬度和强度,避免了弱界面区域的形成,进而提高了界面剪切强度。

3.4 讨论

(1) 尽管激光淬火基体可以改变界面的结构和界面附近材料的力学性质,但激光淬火基体是否改变了铬层与基体的结合方式仍然没有作进一步的深入研究,这也是探讨激光淬火基体提高界面剪切强度机理需要开展的下一步工作。

(2) 激光淬火基体所得到的具有残余压应力、高强度的马氏体,其材料力学性质明显不同于原始基体的,除了通过改变界面材料结构提高界面剪切强度以外,激光淬火区和原始基体的力学性质差异对激光淬火提高界面剪切强度的影响将在另一篇文章中进行探讨。

4 结论

通过试验表明:激光淬火基体可以提高镀铬层的界面剪切强度。其提高机理的材料因素是:

- (1) 消除了基体和铬层之间的过渡层。
- (2) 铬层界面的晶粒得以细化。
- (3) 界面附近材料的硬度和强度得以提高。

参考文献:

- [1] John H. Underwood, Edward Troiano. Critical Fracture Processes in Army Cannons: A Review [J]. Journal of Pressure Vessel Technology. 2003, 125: 289-292.
- [2] John H. Underwood, Anthony P. Parker, Gregory N. Vigilante, Paul J. Cote. Thermal Damage, Cracking and Rapid Erosion of Cannon Bore Coatings [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2003, 125: 301-304.
- [3] 陈光南, 罗耕星, 张坤. 激光处理基体提高镀铬身管寿命新方法 [J]. 兵工学报, 2003, 24 (增刊): 6-10.
- [4] 徐向阳, 张坤, 陈光南, 等. 激光硬化基体对镀铬层组织和结合的影响 [J]. 中国激光, 2006, 33(3): 413-416.
- [5] Huaixue Li, Guangnan Chen, Guoxiang Zhang, et al. Characteristics of the interface of a laser-quenched steel substrate and chromium electroplate [J]. Surface & Coatings Technology, 2006(Online).

(下转第34页)

(上接第 28 页)

- [6] 张国祥, 李怀学, 陈光南, 等. 初始镀铬层微裂纹形貌的基体化学腐蚀法研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(4):8-12.
- [7] Richard P. Vinci and Joost J. Vlassak. MECHANICAL BEHAVIOR OF THIN FILMS [J], Annu. Rev. Mater. 1996,26:431-462.
- [8] B.F. Chen, J. Hwang, I.F. Chenb, G.P. Yu, J.-H. Huang. A tensile-film-cracking model for evaluating interfacial shear strength of elastic film on ductile substrate [J]. Surface and Coatings Technology, 2000,126:91-95.
- [9] C. H. HSUEH, M. YANAKA. Multiple film cracking in film/substrate systems with residual stresses and unidirectional loading [J]. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE, 2003, 38:1809-1817.
- [10] Uwe Holzwarth, Hermann Stamm. Mechanical and thermomechanical properties of commercially pure chromium and chromium alloys [J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 300: 161-177.
- [11] T.G. Nieh, J.G. Wang. Hall-Petch relationship in nanocrystalline Ni and Be-B alloys [J]. Intermetallics, 2005, 13:377-385.
- [12] D.tabor. Hardness of metals [M]. London: Oxford at the clarendon press, 1951, 166.
- [13] K. Obergfell, V. Schulze, O. Voehringer. Classification of microstructural changes in laser hardened steel surfaces [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A355:348-356
- [14] A. G. EVANS, J. W. HUTCHINSON and Y. WEI. INTERFACE ADHESION: EFFECTS OF PLASTICITY AND SEGREGATION [J]. Acta mater, 1999, 47(15): 4093-4113.

作者地址 : 北京中关村北四环西路15号 100080

Tel: (010)62547527

E-mail: zgx20021@sina.com