

# 激光淬火基体对镀铬层断裂韧性的影响

张国祥<sup>1,2,3</sup>, 陈光南<sup>1</sup>, 张坤<sup>1</sup>, 罗耕星<sup>1</sup>, 李怀学<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 山东理工大学材料科学与工程学院, 山东 淄博 255000;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100080)

**摘要:**为提高 30CrNi2MoVA 钢镀铬身管的寿命, 采用 YAG 激光器对钢基体进行激光搭接淬火再镀铬的复合工艺。用多裂纹拉伸技术对经激光搭接处理的 30CrNi2MoVA 钢再镀铬后的铬层和普通铬层的断裂韧性进行比较。结果表明, 激光淬火处理基体可以提高镀铬层的断裂韧性。力学模型分析表明, 基体残余压应力以抵抗基体拉伸变形的形式提高了铬层的断裂韧性; 化学去基体法研究铬层界面表明, 激光处理基体以细化基体影响层的晶粒形式提高了铬层的强度和韧性。离子刻蚀横截面对拉伸结果作了进一步验证。

**关键词:** 30CrNi2MoVA 钢; 激光淬火基体; 镀铬; 断裂韧性

**中图分类号:** TN249; TG156.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2007)03-0052-04

## Effect of Laser-Quenching Substrate on the Fracture Toughness of Chromium Plated Coatings

ZHANG Guo-xiang<sup>1,2,3</sup>, CHEN Guang-nan<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>, LUO Geng-xing<sup>1</sup>, LI Huai-xue<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Mechanics, China Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. School of Material Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong 255000, China;  
3. Graduate School of the China Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** In order to improve the life of Cr-plating gun bore made of 30CrNi2MoVA steel, a compound process, firstly laser overlap-quenching by YAG and then Cr-plating, was carried out for the steel substrate. By using multi-crack tensile method, the fracture toughness of Cr-coating produced by the compound process was comparatively analyzed with that of the ordinary Cr plated coating. The results show that the fracture toughness of Cr-coatings is improved by laser quenching substrate. The analysis of mechanical model shows that the fracture toughness is improved by residual compressive stress of substrate surface, which resists the tensile deformation of substrate. The study of Cr-coating interface by chemically removing substrate shows that the strength and toughness of the Cr-coating is improved, due to the grain refining substrate effecting layer caused by laser processing substrate. The toughness improvement is further verified by ion etching of the cross-section.

**Key words:** 30CrNi2MoVA steel; laser quenching substrate; chromium plating; fracture toughness

由于铬的低摩擦系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。但在零件服役期间,镀铬层往往先发生断裂,断裂后形成的镀层表面裂纹进入基体,高温腐蚀火药气体通过裂纹对基体进行烧蚀,在基体与镀层的界面处形成烧蚀坑,烧蚀坑上的镀层剥落<sup>[1]</sup>和相邻的烧蚀坑汇合导致铬层剥落<sup>[2-3]</sup>,为此,延

**作者简介:** 张国祥 (1963—), 男, 山东淄博人, 副教授, 博士研究生, 主要从事涂层制备和破坏力学研究, 发表论文 30 余篇。联系电话: 010-62547527 E-mail: zgx20021@sina.com  
**基金项目:** 国家自然科学基金 (50471087; 50531060)  
**收稿日期:** 2006-08-10

and precipitation kinetics of Al-Cu-Li-(Mg)-(Ag)-Zr-Ti alloys[J]. Acta Mater, 1998, 46(12): 4381-4393

- [7] 陈志国, 范云强, 郑子樵, 等. 微量 Zn 对 Al-Cu-Li-Mg 合金时效特性与微观组织的影响 [J]. 矿冶工程, 2005, 25(1): 56-59.
- [8] 蒋 呐, 向曙光, 郑子樵. CP276 铝锂合金的应变时效工艺 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(4): 694-699.
- [9] Jiang Na and Xiang Shuguang. In: Zheng Ziqiao et al eds. Proceedings of the 2nd China National Conference on Al-Li Alloys[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1993: 43-45.

- [10] Huang B P, Zheng Z Q, Yin D F, et al. Effects of trace Ag and Mg additions on mechanical properties and microstructures of 2195 alloy [J]. Mater Sci Forum, 1996, 217-222: 1239-1224.
- [11] Pickens J R, Heubaum F H, Kramer L S. Ultra-high strength, forgeable Al-Cu-Li-Ag-Mg alloy [J]. Scripta Metall Mater, 1990, 24: 457-462.
- [12] Tack W T, Heubaum F H, Pickens J R. Mechanical property evaluations of a new, ultra-high strength Al-Cu-Li-Ag-Mg alloy [J]. Scripta Metall Mater, 1990, 24: 1685-1690.

缓镀铬层断裂和烧蚀坑的形成成为提高镀铬身管寿命的关键问题<sup>[2-3]</sup>。由此可见,抑制镀铬层断裂也就成为提高镀铬身管寿命的首要问题<sup>[4-5]</sup>。在基体先激光离散淬火再镀铬的复合工艺已在我国某型号武器镀铬身管上采用,达到了镀铬身管延寿的目的<sup>[6]</sup>。为了揭示激光离散淬火基体提高镀铬身管寿命的机理,本文利用多裂纹拉伸技术对激光淬火基体与未处理基体镀铬层的断裂韧性进行比较,旨在解释激光淬火基体对镀铬层断裂的影响也是身管延寿因素之一。并分别从力学和材料学角度出发,就激光淬火基体对镀铬层断裂韧性的影响因素加以探讨。

## 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 某型号武器镀铬身管基体材料为 30CrNi2MoVA 钢,将待处理表面利用水砂纸从 200号开始一直打磨到 2000号为止,在表面涂覆吸光材料,利用 500 W YAG激光器对基体表面进行激光搭接扫描处理。工艺参数为:功率 200 W,扫描速度 410 mm/min,光斑直径  $\phi 0.8$  mm。对激光淬火的和未处理的基体表面再进行水砂纸研磨和抛光,按照 PJ 130101—2标准进行镀前处理和镀铬,得到厚度为 100  $\mu\text{m}$ 的铬层。

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 1所示的 1.5 mm厚的板状拉伸试件,再手工磨到 1 mm,去掉试件夹紧部分的铬层。将激光淬火的和未处理的试件各分一组,每组各 10个。

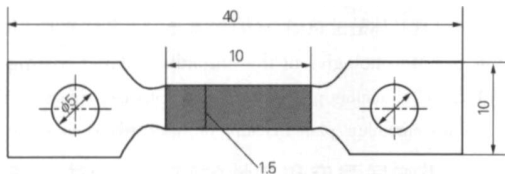


图 1 拉伸试样示意图

Fig 1 Schematic of the tensile sample

### 1.2 试验设备

采用型号为 Instron Microtester 5848原位微拉伸试验机,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原位拉伸试验,采用位移加载方式,加载速率为 0.1 mm/min。

## 2 试验结果

图 2所示为从原位拉伸试验机上得到的典型拉伸应力-应变曲线。拉伸过程中,当原位观察监视器上出现第一条裂纹时,记录该时刻的应变值  $\epsilon_0$ 。经统计分析,激光淬火的和未处理的基体平均应变值分别为 0.23%和 0.17%。

铬层断裂强度  $\sigma_c$  由如下计算公式<sup>[7-8]</sup>给出:

$$\sigma_c = E_C \epsilon_f \quad (1)$$

式中  $E_C$  是铬层的弹性模量,取  $E_C = 280 \text{ GPa}$ <sup>[9]</sup>。

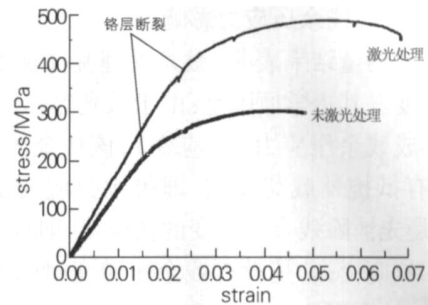


图 2 镀铬试样的应力-应变曲线

Fig 2 The stress-strain curves of the chromium plated sample

将铬层断裂时的应变  $\epsilon_f$  带入公式 (1)中,得到激光淬火处理和未处理基体的铬层断裂强度分别为 644 MPa和 476 MPa。铬层临界能量释放率  $G_C$  和临界应力强度因子  $K_{IC}$  的计算公式<sup>[7-8]</sup>如下:

$$G_C = \frac{c}{E_C} \left[ F \left( \frac{E_C}{E_S} \right) + \frac{c}{\sqrt{3}} \right] \quad (2)$$

$$K_{IC} = \sqrt{G_C E_C} \quad (3)$$

式中  $E_S$ 、 $\sigma_y$  和  $h$  分别是基体弹性模量和基体表面屈服强度和涂层厚度。 $F \left( \frac{E_C}{E_S} \right)$  是与涂层和基体弹性模量比值有关的常数<sup>[8]</sup>,由于基体为钢质材料,则取弹性模量为:  $E_S = 210 \text{ GPa}$ 。利用文献 [8]中的表 1和插值法得:

$$F \left( \frac{E_C}{E_S} \right) = 0.624 \quad (4)$$

利用硬度和屈服强度的关系<sup>[10]</sup>,对激光淬火区和原始基体表面硬度进行测试后,得到激光淬火区和未处理基体表面的屈服强度值分别为:

$$\sigma_L = 2180 \text{ MPa}, \quad \sigma_{YL} = 1180 \text{ MPa} \quad (5)$$

将式 (5)中数据和铬层断裂强度分别带入公式 (2)和 (3)中,计算结果见表 1。

表 1 铬层临界能量释放率  $G_C$  和临界应力强度因子  $K_{IC}$  结果  
Table 1 The critical energy release rate  $G_C$  and critical stress intensity factor  $K_{IC}$  of the chromium coating

性能参数	laser	original	increase
临界能量释放率 $G_C / \text{J} \cdot \text{m}^{-2}$	315.5	177.4	77.8%
临界应力强度因子 $K_{IC} / \text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$	9.4	7.1	32.4%

表 1结果表明,激光淬火基体的临界能量释放率和临界应力强度因子分别提高了 77.8%和 32.4%,说明激光淬火基体可以提高铬层的断裂韧性,即提高了铬层的抗断裂能力。由于基体激光淬火表层为马氏体

组织,这也与铬层最佳匹配的基体材料为马氏体的其它试验方法结论<sup>[11]</sup>一致。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 基体表面残余压应力影响

由以上测量结果表明,激光处理基体能够提高铬层断裂强度。其力学原因是:由于激光淬火作用,在基体表面形成残余压应力(压应变),该残余压应力(压应变)具有抵抗外载荷作用,即等效拉应变由两部分组成,一是先消除残余压应变的拉应变,即将压应变复零的附加拉应变;二是没有残余压应变时的外载拉应变,则等效拉应变为:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_{app} + \epsilon_r \quad (6)$$

式中  $\epsilon_{eff}$ 、 $\epsilon_{app}$  和  $\epsilon_r$  分别为等效拉应变、激光未处理基体的外载拉应变和残余压应变(正值)。在单向拉伸时的残余压应力  $\sigma_r$  和残余压应变  $\epsilon_r$  的关系可表示为:

$$\sigma_r = -\frac{E_s \epsilon_r}{\epsilon_r} \quad (7)$$

在拉伸过程中,涂层和基体在界面处的应变应相等<sup>[7]</sup>,则利用公式(1)可得铬层断裂强度为:

$$\sigma_{c1} = E_c \epsilon_{c1} = E_c \epsilon_{eff} = E_c (\epsilon_{app} + \epsilon_r) \quad (8)$$

将公式(7)带入(8)中,得到如下表达式:

$$\sigma_{c1} = E_c \epsilon_{app} + \frac{E_c}{E_s} \sigma_r \quad (9a)$$

式中  $\sigma_{c1}$  是与激光淬火基体相对应的铬层断裂强度,而对于未激光处理的基体情况,由于没有残余压应力(应变),则公式(9a)变成了公式(9b)。

$$\sigma_c = E_c \epsilon_f = E_c \epsilon_{eff} = E_c \epsilon_{app} \quad (9b)$$

比较公式(9a)、(9b)可知:激光淬火基体的铬层断裂强度要在未激光处理的基础上附加一个残余压应力,故断裂强度得到了提高。由公式(2)可知,进而提高了铬层的断裂韧性。

#### 3.2 基体强韧化效果遗传效应分析

为了分析基体激光强韧化效果对铬层遗传效应影响,利用化学腐蚀去基体法<sup>[12]</sup>,对铬层界面形貌进行分析,得到图3。比较图3a、b可知,激光淬火基体可以得到晶粒细化的铬层界面组织,其原因是激光淬火基体晶粒的细化效应遗传给了镀铬层界面<sup>[12]</sup>。晶粒细化可以提高材料的强度和韧性<sup>[13]</sup>,激光淬火处理钢基体具有强韧化作用的原因之一就是晶粒细化的结果<sup>[14]</sup>,而基体激光淬火区晶粒细化效果遗传给了铬层界面,为此,铬层界面的强韧性也得到了提高。

尽管铬层界面晶粒被细化,但由于电镀层具有沿厚度方向连续延伸性特点<sup>[15]</sup>,那么铬层界面晶粒细化

效果可以延伸到一定的铬层厚度(基体影响层<sup>[15]</sup>),为此,通过遗传基体晶粒尺寸的方式,将基体激光淬火强韧化效果遗传给了基体影响层。镀铬层沿厚度方向可以分为靠近基体的基体影响层、中心层、表层3个部分<sup>[15]</sup>。根据复合材料的混合律原理<sup>[16]</sup>可知,基体影响层的强度和韧性的提高,相应提高了铬层整体的强度和韧性,也就是说,通过将细化的基体晶粒映射到铬层界面的方式,把激光对基体的强韧化效果遗传给了铬层。

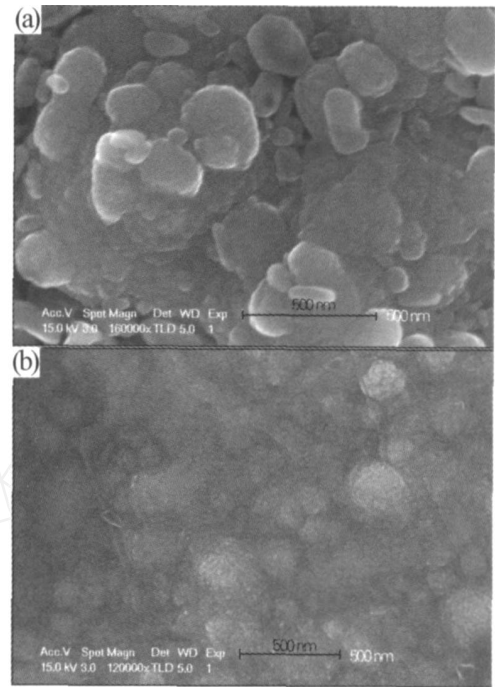


图3 镀铬层表面形貌

(a)未处理基体的镀铬层 (b)经激光淬火基体的镀铬层

Fig.3 Morphologies of the chromium plated coatings

(a) the chromium plated coating on untreated substrate

(b) the chromium plated coating on laser treated substrate

#### 3.3 基体影响层强度和韧性的离子刻蚀法分析

利用离子刻蚀技术研究界面结构的方法<sup>[17]</sup>,对基体影响层的强度和韧性进行定性评价。采用同样的冲击参数,对基体影响层进行离子冲击试验,得到图4所示的基体影响层裂纹形貌。比较图4a、b可知,除了激光淬火基体可以消除铬层和基体之间的中间层<sup>[17]</sup>以外,尽管激光淬火基体和未处理基体的铬层都形成沿厚度方向的裂纹,但激光淬火的明显要细小于未处理基体的。这说明激光淬火基体可以提高基体影响层的强度和韧性,进一步证明了激光淬火基体强韧化效果的遗传性和拉伸测试结果。

经过上述分析可知,基体表面残余压应力和基体激光强韧化遗传性是激光淬火基体提高镀铬层断裂韧性的主要因素,为了进一步分析残余压应力和基体激

光强韧化遗传作用,需要进一步开展以下两项工作:将数值模拟方法与残余应力测量和拉伸试验结合起来,定量分析残余压应力与铬层断裂韧性之间的关系。

对基体影响层的厚度和强度以及断裂韧性进行试验确定,对强韧化遗传效应进行定量描述。

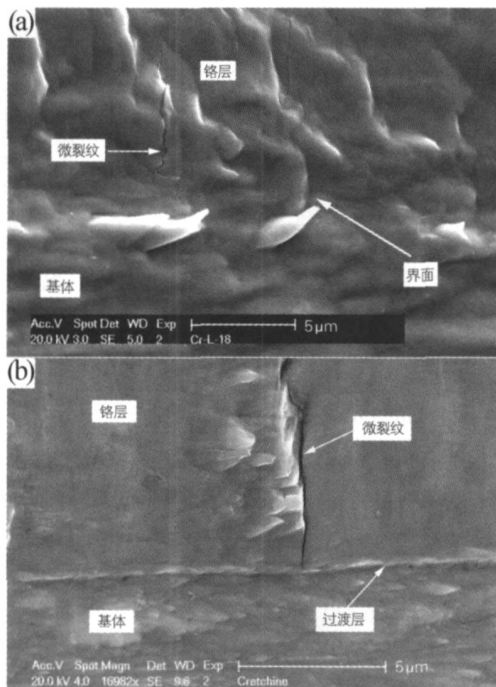


图 4 离子冲击试验后基体影响层的裂纹形貌

(a) 激光处理基体上的铬层裂纹 (b) 未处理基体上的铬层裂纹

Fig 4 The comparison of micro-crack in substrate affected layer after ion beam etching

(a) crack of the chromium plated coating on laser quenched substrate  
(b) crack of the chromium plated coating on untreated substrate

## 4 结论

通过试验表明,激光淬火基体可以提高镀铬层的断裂韧性,其原因是:基体表面存在残余压应力;激光淬火基体的强韧化效果遗传给了镀铬层。

参考文献:

[1] 张喜发,卢兴华.火炮烧蚀内弹道学[M].北京:国防工业出版社,2001:7-8  
[2] 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: 659-670

[3] Sopok S, Rickard C, Dunn S Thermal-chemical-mechanical gun bore erosion of an advanced artillery system part two: modeling and predictions[J]. Wear, 2005, 258: 671-283.  
[4] John H Underwood, Anthony P Parker, et al Thermal damage, cracking and rapid erosion of cannon bore coatings[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2003, 125: 299-304.  
[5] John H Underwood, Edward Troiano Critical fracture processes in army cannons: A Review[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2003, 125: 289-292  
[6] 陈光南,罗耕星,张坤.提高镀铬身管寿命的激光强化新方法[J].兵工学报,2003(增刊):6-10  
[7] Emmanuelle Harry, Michel Ignat André Cracking investigation of W and W(C) films deposited by physical vapor deposition on steel substrates[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 111: 177-183.  
[8] Hu M S, Evans A G The cracking and decohesion of thin films on ductile substrate[J]. Acta Mater, 1989, 37(3): 917-925.  
[9] Uwe Holzwarth, Hermann Stamm. Mechanical and thermomechanical properties of commercially pure chromium and chromium alloys[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 300: 161-177.  
[10] Tabor D. The hardness of metals[M]. London: Oxford University press, 1951: 105.  
[11] Sima J, A spinwall D K Hard chromium plating of EDT mill work rolls[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92-93: 281-287.  
[12] 李怀学,陈光南,张国祥,等.初始镀铬层的基体溶解法研究[J].材料热处理学报,2006,27(2):94-97.  
[13] 孙茂才.金属力学性能[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003:126-129.  
[14] Obergfell K, Schulze V, Vohringer O. Classification of microstructural changes in laser hardened steel surfaces[J]. Materials Science and Engineering, 2003, A355: 348-356  
[15] Pina J, Dias A, Francois M, et al Residual stresses and crystallographic texture in hard-chromium electroplated coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 96: 148-162  
[16] Suresh S, Mortensen A. 功能梯度材料基础[M].李守新,等译.北京:国防工业出版社,2000:91-94  
[17] 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

凡因故漏订 2007年《金属热处理》杂志(全年84元,单价7元)的单位或个人请直接由邮局汇款到本编辑部补订。2006年全年杂志已装订成册,现开始订购(每册100元)。编辑部还有少量1998、1999、2003~2006年合订本,1958~2005光盘版(半价优惠),有需要者请尽快与我们联系。联系电话:010-62935465,地址:北京市海淀区学清路18号《金属热处理》编辑部(100083) E-mail: jsrcl@vip.sina.com