

激光淬火基体对铬层主裂纹在基体内扩展路径的影响*

张国祥^{1,2,3}, 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:提出了先激光离散淬火预处理基体后,再镀铬提高镀铬身管寿命的复合工艺。靶场实验身管解剖表明,激光淬火基体可以控制铬层主裂纹在基体内按原路径扩展,不向界面偏折。其控制机理是由于在原始基体和铬层之间存在一个具有沿原路径方向递减的硬度梯度激光处理层,导致该方向的裂纹驱动力增加,诱导裂纹在基体内按原路径扩展。

关键词:扩展路径;裂纹驱动力;铬层;激光淬火;身管

中图分类号: TB43, TB34 **文献标识码:** A

由于铬层具有耐磨性好、硬度高、摩擦系数低、熔点高等优异的性能,几十年来,镀铬工艺在延缓武器身管寿命方面得到了广泛地应用,但铬层从基体上剥落成为影响镀铬身管寿命的关键问题^[1-2]。其中铬层剥落的一个主要机制^[3]是:在身管服役初期,铬层的原始裂纹演化成的主裂纹,随着射击的进行,这些主裂纹进入基体并且在基体内扩展和向界面偏折,随后沿界面方向进一步扩展,最后这些裂纹贯通,导致铬层剥落。为了解决我国某种型号镀铬身管寿命长期不达标的难题,陈光南等人^[4]提出先激光离散淬火预处理基体后再镀铬、提高镀铬身管寿命的复合工艺,并且达到了预期目标。经初步实验解剖表明^[4-5],激光淬火基体可以提高铬层的抗剥落能力。

为了探讨激光淬火基体提高铬层抗剥落能力的机理,本文对靶场实验的激光离散淬火身管进行解剖,旨在分析铬层主裂纹进入基体后,激光淬火基体对铬层主裂纹在基体内扩展路径的影响,并结合激光淬火钢基体的特点,对影响机理作初步分析。

1 靶场实验身管解剖分析与结果

1.1 激光螺旋线状离散淬火身管基体内表面

对某种型号机枪身管,先利用功率密度为 10^{+6} W/cm² 的 YAG 固体激光器、专用加工设备^[4]对基体内表面进行螺旋式淬火预处理,然后进行镀铬。沿着阳线方向,用线切割设备,取与激光扫描线相垂直的轴向试样,进行磨、抛光,得到了图 1 所示的镀铬层/基体结构扫描电镜轴截面图。图 1 中的椭圆和两个椭圆之间区域分别为激光处理区和原始基体区域。

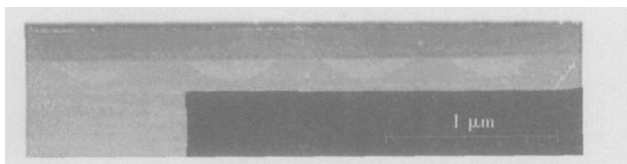


图 1 基体激光预处理镀铬结构的横截面

1.2 实验结果

按照有关射击标准,进行靶场实弹射击,测试上述镀铬身管的技术参数^[4]。由于身管是在热载荷与弹丸挤压联合作用下的特殊部件,沿着弹丸运动方向,弹丸挤压和热载荷作用效果各不相同,例如:枪口部位以弹丸磨损为主,而膛线起始部位以热载荷烧蚀为主,为此形成的镀铬身管烧蚀现象和机理也不同^[6]。为了分析激光淬火基体对铬层主裂纹在基体内扩展路径的影响,本文从距离膛线起始处 250 mm 的位置开始,取宽度为 30 mm 的区域为研究对象,进行失效解剖统计分析。

对试件进行抛光后,用 0.3% 的硝酸酒精溶液(体积比)进行腐蚀,取相邻的激光淬火区和原始区,得到了典型的铬层主裂纹进入基体的形貌图 2。图 2a、b 表明:无论主裂纹在铬层内的形貌如何,都是垂直界面进入基体,即刚进入基体时的路径都是垂直于界面的。当进入基体后,激光处理区内的裂纹仍然按照原路径呈直线状扩展;而原始基体的裂纹则在界面附近偏折,偏折一段距离以后,裂纹开始平行于界面扩展。

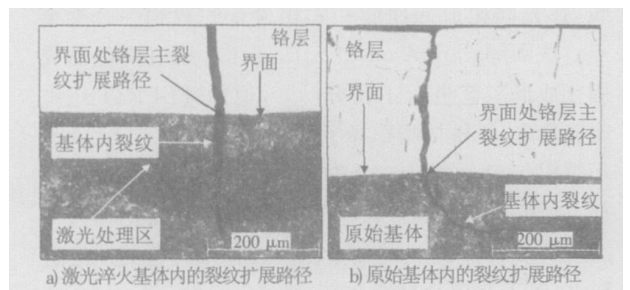


图 2 基体内裂纹扩展路径比较

为了进一步分析激光淬火基体对裂纹扩展路径的影响,取同种型号的没有激光处理的镀铬身管,在同样位置取试样对基体内的裂纹扩展路径进行分析,得到图 3。图 3 表明,没有激光处理身管的裂纹在界面附近同样发生偏折,说明激光处理身管的原始基体裂纹偏折并不是因基体离散处理所造成的。

通过对靶场实验身管解剖分析表明,激光淬火基体具有控制铬层主裂纹在基体内按原路径扩展和不在界面附近偏折的能力。

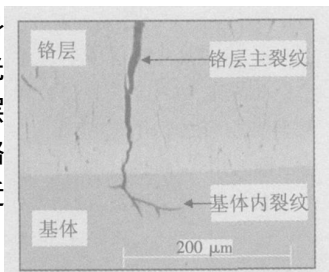


图3 没有激光处理身管的基体内裂纹扩展路径

2 影响机理分析

为了进行影响机理的分析,本文先利用硬度和屈服应力之间的关系^[7],将激光处理区的硬度沿深度变化的特点等效地用屈服应力表征,后对裂纹驱动力的影响进行分析。

2.1 屈服应力梯度特征

对初始试件的激光处理区进行磨、抛光处理后,用3%的硝酸酒精溶液对试件进行腐蚀,利用50g的载荷、保压时间为15s,测量沿深度方向变化的维氏硬度值,测量结果如图4a。图4a表明,在激光处理区内,形成沿深度方向呈递减趋势的硬度梯度。在原始基体内硬度呈常数分布,即没有硬度梯度。根据公式(1)所给出的金属材料维氏硬度和屈服应力之间的关系^[7],将硬度梯度转化成屈服应力梯度,并对其梯度进行线性拟合,得到了图4b所示的屈服应力(σ_y)随x坐标(原点为界面、指向基体)的变化规律。图4(b)表明,激光处理区的屈服应力具有和硬度同样的递减趋势。利用硬度转化方法测得的原始基体屈服应力为1180MPa,与拉伸测量的数值(1260MPa^[8])很接近,说明可以利用公式(1)近似评价激光处理区的屈服应力。这样就把激光处理区硬度梯度问题转化为便于力学分析的屈服应力梯度问题。

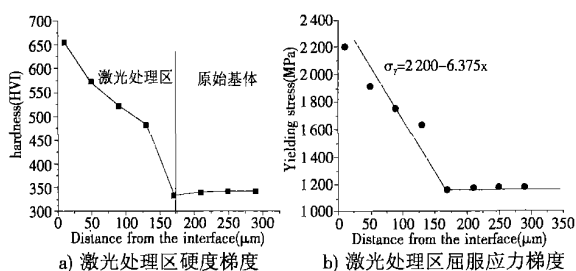


图4 硬度和屈服应力梯度图

结合图2和图4b可知:铬层主裂纹进入基体时的路径与屈服应力递减方向是一致的。

$$H_v = 3 \sigma_y \quad (1)$$

式中 H_v 、 σ_y 分别是维氏硬度和材料的屈服应力。

2.2 基体内主裂纹扩展特性分析

当铬层主裂纹进入基体后,裂纹尖端的塑性场仅仅发生在基体内。根据屈服应力梯度对裂纹驱动

力影响的力学计算模型^[9],则裂纹驱动力计算公式为:

$$C_{eff} = J + C_y \quad (2)$$

式中 C_{eff} 、 J 、 C_y 分别是等效裂纹驱动力、远场裂纹驱动力(外载荷J积分)和屈服应力梯度项。

其中屈服应力梯度项和屈服应力梯度系数(d_y/dx)的关系表示为:

$$C_y = J \frac{r_y}{y} \frac{d_y}{y} \quad (3)$$

式中 r_y 表示裂纹尖端塑性区半径, r_y 的具体数据由公式(4)确定。

$$r_y = \frac{GE}{2y} \quad (4)$$

其中: G 和 E 分别是常数、远场能量释放率和弹性模量。

将图4(b)中的屈服应力与 x 的关系带入公式(3)和(2)中,可得:

$$C_{eff} = J(1 + 6.375 \frac{r_y}{y}) \quad (5)$$

公式(5)表明:由于括号内的第二项是个正数,则等效裂纹驱动力增加。

通过上述理论公式可知:激光处理能够控制裂纹的路径,其原因是:由于在铬层和基体之间增加了一个沿深度方向的硬度梯度(递减方向与裂纹扩展方向相一致)的激光处理层,则沿深度方向上的等效裂纹驱动力大于远场裂纹驱动力(外载荷),起到了对裂纹驱动力放大作用,导致裂纹沿原路径扩展。然而,由于原始基体不存在屈服应力梯度,则公式(3)的 C_y 等于零,它的等效裂纹驱动就是远场的裂纹驱动力,为此,也就不存在对裂纹扩展的诱导作用。

通过上述实验现象和理论分析表明:在同样的载荷作用下,激光淬火基体与原始基体不同的是:裂纹扩展除了受外载荷的影响以外,还受到硬度梯度性质的影响,为此具有控制裂纹按原路径延伸的能力。

3 讨论

1) 通过上述力学理论分析表明,由于激光淬火基体在原始基体和铬层之间形成了沿铬层主裂纹的路径方向呈递减趋势的硬度梯度激光处理层,该层起到对裂纹扩展诱导的作用。从材料抵抗载荷能力上看,由于裂纹扩展方向上的硬度不断减小,抵抗材料变形的能力也随之降低,则有利于裂纹在该方向扩展,避免了向其它方向扩展的可能性。

2) 铬层主裂纹是在激光硬化区上进入基体的,根据激光淬火钢基体特点^[10]可知:在裂纹尖端附近的平行界面方向的硬度没有沿深度方向的变化明显,为此前者的硬度剃度影响远远小于后者,为此前

者的等效裂纹驱动力也小于后者,这也是激光淬火基体控制裂纹按原路径扩展的另一个因素。

3) 尽管本文没有考虑残余应力的影响,但激光淬火钢基体在处理区内也形成沿深度方向减小的残余压应力梯度^[11]。由于残余压应力具有抑制裂纹扩展的作用,则在裂纹扩展方向的残余压应力减小的趋势也导致对裂纹扩展的抑制作用降低,则也就起到了同硬度梯度同样的作用。残余压应力梯度对裂纹扩展路径影响的力学分析模型将是下一步要考虑的问题。

4) 将激光处理区的硬度转化为屈服应力的思路是借助了采用球形压头测量微小区域材料力学性质的压入法^[12],但由于激光处理区的尺寸和球形压头的在一个数量级上,则无法实现用球形压头测量激光处理区的硬度问题,选择一个适当的压头和压入方法精确地测量激光处理区的力学参数、特别是沿深度方向的变化表征,也是将来定量描述激光处理区力学性质要开展的工作。

4 结语

靶场实验镀铬身管解剖表明,激光淬火基体可以控制铬层主裂纹在基体内的扩展路径,避免了裂纹向界面偏折。其机理是,在铬层和原始基体之间形成了沿原路径方向呈递减趋势的硬度梯度激光处理层,其梯度作用是增加了裂纹驱动力,表现为诱导裂纹按原路径扩展。

[参考文献]

[1] Sopok S, Rickard C, Dunnb S. Thermal-chemical-mechanical gun bore erosion of an advanced artillery system part one: theories and mechanisms[J]. Wear, 2005, 258: 259-670.
[2] Sopok S, Rickarda C, Dunnb S. Thermal-chemical-mechanical gun bore erosion of an advanced artillery system part two: model-

ing and predictions[J]. Wear, 2005, 258: 671-683.

[3] 卓穗如. 机枪枪管寿命预测技术论文集[M]. 北京: 中国兵器工业第二零八研究所, 1996: 14.
[4] 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(增刊), 2003, 12: 6-10.
[5] 徐向阳, 张坤, 陈光南, 罗耕星. 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): 414-416.
[6] Turley D M. Erosion of chromium plated tank gun barrel[J]. Wear, 1989, 131: 135-150.
[7] Tabor D. The hardness of metals[M]. London: Oxford University press, 1951.
[8] 张祖贤. 兵器黑色金属材料手册(上册)[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1989: 465.
[9] Kolednik O. The yield stress gradient effect in inhomogeneous materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37: 781-792.
[10] Obergfell K, Schulze V, Vohringer O. Classification of microstructural changes in laser hardened steel surfaces[J]. Materials Science and Engineering, 2003, A355: 348-356.
[11] E. Kennedy, G. Byrne, D.N. Collins. A review of the use of high power diode lasers in surface hardening[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156: 1855-1860.
[12] Takuya Yamamoto, Hiroaki Kurishita, Tetsuya Matsushima, Hideo Kayano. Development of innovative indentation system and its application to cyclic ball indentation test for small-sized specimens[J]. Journal of Nuclear Materials, 1996, 239: 219-227.
* 国家自然科学基金资助项目(50471087, 50531060)

作者简介: 张国祥(1963-), 男, 汉, 副教授, 中国科学院力学研究所博士生, 主要从事涂层制备和破坏力学研究。

收稿日期: 2006年7月11日

责任编辑 刘滨

首届“数字中国 创新年会”创新技术论坛畅谈 IT 技术创新

由中国电子信息产业发展研究院主办的神州数码首届“数字中国·创新年会”创新技术论坛于8月17日在北京举办,围绕NGN(下一代网络技术)和SOA(面向服务的体现架构)等热点话题,进行了深入沟通和交流。

NGN和SOA开放论坛是本次论坛的亮点。NGN,即下一代网络技术,是目前网络通信领域的热点话题,国内有些教学科研机构都在进行深入研究和探讨,并推出了许多新技术和产品。北京邮电大学宋俊德教授、微软亚洲工程院院长张宏江博士、神州数码网络集团CIO向阳朝博士,以及英特尔和Juniper等顶级技术专家,对NGN目前的发展及存在的问题进行了深入探讨。OASIS国际组织的总裁兼首席执行官Patric Gannon先生和IBM中国软件开发中心王云高工、BEM中国有限公司刘松先生、神州数码研究院院长李安渝博士一起,探讨了SOA给中国IT企业带来的机会等热点话题。

另外,Patric Gannon先生还做了“SOA与开放标准”的演讲,神州数码(中国)有限公司总裁郭为对以企业为自主创新主体,打造官产学研结合的技术创新体系发表了看法。

Contents & Abstracts

New Development of Laser Rapid Prototyping Technique

YAN Yongnian, ZHANG Renji, LIN Feng (Key Laboratory for Advanced Manufacturing by Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract: The paper introduces the newest development of laser rapid prototyping technology, including direct prototyping of metal spares, micronano laser tridimensional prototyping, laser vertical tridimensional stacking technology, complex material light solidification prototyping etc. The applications of these high and new technology shall be paid more attentions to promote researches and speed up the development.

Key words: rapid prototyping, laser, tridimensional

Numerical Simulation Research on Laser Tailor-welded Blanks with Different Thickness in Square Cup Stamping

GUO Weigang, CHEN Wei, ZHANG Jiahua, HOU Bo (Institute of mould & die, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, 212013, China)

Abstract: Tailor-welded blanks technique is using in automotive industry widely. The existence of weld beads is a key factor on reducing forming property of tailor-welded blanks. It is very important for control of weld bead moving. By extension stress analysis of square cup stamping, moving regularity of weld beads is obtained. Weld bead model is established exactly based on nonlinear implicit computation, selection of anisotropic yield criterion and usage of stepped blank holders. Numerical simulation is made for square cup drawing. The results show that stress analysis and simulation are correct through analysis of stress, unit thickness analysis, comparing simulation and experimental coincidence degree of analog result.

Key words: tailor-welded blanks square cup, weld bead, finite element

Planning Design and Application of Laser Tailor-welded Production Line

FANG Lingshen, ZHAO Mingyang, XU Zhigang (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Liaoning, Shenyang, 110016, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China)

Abstract: The paper analyses laser tailor-welded products and its

characters, discusses the main problems of production line design including process flow, production planning, production line layout and quality control and related solutions as well as applications of practical production line design.

Key words: laser tailor-welded, production line, layout, quality control

The Effect of Laser Hardened Basal Body on Spread Path of Main Cracks in Chromium Layer

ZHANG Guoxiang, ZHANG Kun, LUO Gengxing, LI Huaixue (1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China; 2. Shandong University of Technology, Zibo, Shandong, 255000, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China)

Abstract: The paper brings out the complex technology which is after laser discrete hardened pretreatment on basal body, chromate treatment can improve the service life of chromium plated gun barrel. Dissection of gun barrel in range test shows that laser hardened basal body can control the spread of main cracks in chromium layer and deviation to boundary layer. The control mechanics is that there is a gradient laser treatment layer between original basal body and chromium layer which is descending on original path direction. Cracks driving force is enhanced and cracks can spread on original path.

Key words: spread path, cracks driving force, chromium layer, laser hardened, gun barrel

The Optimal Design of Automatic Spray Membrane Machine for Battery Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

ZHANG Ling¹, HU Xiaoyan², WANG Qing³ (1. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Province Laboring Vestibule School, Hengshui 053000, China; 3. Beijing Rayleigh Analytical Instrument Corp., Beijing 100016, China)

Abstract: In this paper the 2-stage fuzzy comprehensive evaluation method is used to find the optimal design project of Alkaline-MnO₂ battery machine designs. The results show that this method is efficient to do this work and the optimal design project is found.

Key words: fuzzy comprehensive evaluation, alkaline-MnO₂