

文章编号: 1001-3806(2011)01-0004-03

## Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 40Cr 钢激光表面合金化组织和性能的影响

吴岸琪<sup>1</sup>, 刘其斌<sup>2</sup>, 孙桂祥<sup>2</sup>, 秦水介<sup>1\*</sup>

(1. 贵州大学 贵州省光电子技术与应用重点实验室, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 材料学院, 贵阳 550003)

**摘要:** 为了改善金属卷筒的组织性能, 采用 Mo + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 制成合金粉末, 将粘接剂均匀涂覆在 40Cr 钢基材表面, 用 CO<sub>2</sub> 激光器对材料表面进行了激光合金化处理。利用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、显微硬度计、磨损试验机研究了 Mo + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对合金化层的硬度、耐磨性、组织结构、形成机理的影响。结果表明, 在加入稀土氧化物 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后, 合金层晶粒显著细化, 晶界得到强化, 增加了显微组织的均匀性、致密性, 硬度、耐磨性得到显著提高, 有利于提高金属卷筒表面的硬度和耐磨性。

**关键词:** 激光技术; 40Cr 钢; 激光表面合金化; 稀土氧化物 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**中图分类号:** TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.01.002

### Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on microstructure and property of laser surface alloying on 40Cr steel

WU An-qi<sup>1</sup>, LIU Qi-bin<sup>2</sup>, SUN Gui-xiang<sup>2</sup>, QIN Shui-jie<sup>1</sup>

(1. The Key Laboratory for Photoelectric Technology and Application, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

**Abstract:** Mo + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alloy powders were used to coat uniformly on the surface of 40Cr steel roller substrates by adhesive for the laser surface alloying treatment by a continuous wave CO<sub>2</sub> laser in order to improve the organizational performance of the metal rollers. The effect of the rare earth oxide to the alloy layer on the hardness, wearing resistance, microstructure, and formation mechanism was studied with a scanning electron microscope, X-ray diffractometer, micro-hardness tester, and a wearing tester. Many good consequences were obtained after adding the rare earth oxide Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The crystal grains of the alloy layer were significantly refined. The boundary of crystal grains was strengthened. The uniformity and density of the microstructure were increased. The hardness and wearing resistance the alloy layer were considerably improved. The results show that it helps to improve the surface hardness and wear resistance of metal rollers.

**Key words:** laser technique; 40Cr steel; laser surface alloying; rare earth oxide Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## 引言

40Cr 是一种常用的调质钢, 具有较高的强、韧、塑性, 常被用于生产金属滚筒。目前, 40Cr 钢卷筒的生产是通过离心浇铸而成的, 能获得碳原子的网状共晶和回火马氏体的显微结构, 有助于提高金属的硬度和耐磨性。但金属卷筒工作时承受钢丝强烈的拉拔和挤压作用, 要求有更高的硬度和耐磨性能。一般对高铬钢采用激光表面合金化处理, 可在材料表面形成具有所要求的化学成分和深度的表面合金层, 从而达到表

面改性的目的<sup>[1-3]</sup>。由于稀土元素及其氧化物具有独特的电子层结构、突出的化学活性、大的离子半径等优良的理化性质, 常被作为优良的改性剂用于激光表面处理中, 能起到变质、强化和净化等作用, 有助于提高金属合金层的性能<sup>[4-6]</sup>。本文中采用高功率 CO<sub>2</sub> 激光器在 40Cr 金属卷筒表面进行 Mo + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末的激光表面合金化处理, 研究了加入稀土氧化物 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后合金化层的组织形貌、显微硬度及耐磨性。

## 1 试验材料和实验方法

### 1.1 试验材料

用于金属卷筒激光表面合金化的材料为 40Cr 钢。试样使用前用 400 金相砂纸打磨表面, 再用丙酮清洗备用。合金化用 Mo 粉粉末粒度为 36μm ~ 74μm。通过前期研究结果表明: Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的质量分数在 0 ~ 0.025 变化时, 随着 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加, 合金化层组织逐渐变

基金项目: 贵州省科技厅工业攻关资助项目(黔科合 GY 字[2008]3029)

作者简介: 吴岸琪(1972-), 男, 博士研究生, 现主要从事激光技术应用的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: sjqin@mail.gzst.gov.cn

收稿日期: 2010-04-28; 收到修改稿日期: 2010-05-06

细, $Y_2O_3$  的质量分数在 0.01 时,合金化层组织最细,合金化层具有最高的硬度和耐磨性<sup>[7]</sup>;当  $Y_2O_3$  的质量分数大于 0.01 时,合金化层的组织反而变得粗大,合金化层的硬度和耐磨性随着  $Y_2O_3$  含量的增加反而降低。因此,Mo +  $Y_2O_3$  粉末中  $Y_2O_3$  优化质量分数为 0.01。

## 1.2 实验方法

采用 TJ-HL-5000 型大型工业用激光器对金属卷筒表面进行激光合金化处理,其优化的工艺参量为: $P=2.0\text{kW}$ ,焦距为 300mm,光斑直径为 3mm,扫描速率为 6mm/s。将合金化粉末用聚乙烯醇做粘接剂均匀涂覆在基材表面,预置涂层厚度约为 0.2mm,用 50% 的搭接率分别进行多道扫描。所形成的合金化层厚度约为 0.8mm,合金化处理后卷筒表面较平整,无宏观裂纹产生。

在垂直于扫描速度的方向切割样品,磨样并抛光,用自配的专用腐蚀剂进行侵蚀。采用 MEF4A 型金相显微镜和 EVO 60 扫描电子显微镜对合金化层的横截面进行金相分析。采用 HV-S1000 显微维氏硬度计对合金化层进行硬度对比测试,载荷砝码 200g,加载时间 20s。采用 D/Max-2200 型全自动 X 射线衍射仪对合金化层进行物相分析。采用 MMS-2A 型屏显式摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验,摩擦副材料为 GCr15,硬度约为 HRC59.5,正压力  $p=400\text{N}$ ,加载时间为 180min,转速 200r/min,磨损实验前后均用超声波清洗 15min,用保温箱在 120℃ 恒温烘干 90min,用精度为  $10^{-5}\text{g}$  的分析天平称量试样磨损前后的质量。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 显微结构分析

金属卷筒激光表面合金化处理后,合金化层横截面整体形貌如图 1 所示。合金化层横截面基本形貌

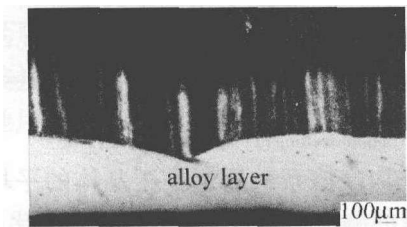


Fig. 1 The profile of the alloying layer

呈“月牙形”,并整体表现为一种宏观的呈周期性出现的组织形态,周期性组织的长度约为 3mm,与激光束斑直径相当。初步分析认为“月牙形”形貌的产生是激光光斑在金属表面能量传导分布的具体反映,激光束中心的能量密度高于周围区域,中间部分能量输入多,透入深度大。边缘部分能量输入少,透入

深度小,以及垂直于扫描速度方向上的不同位置光束与工件的作用时间和工件冷却凝固时间的不同所致<sup>[8]</sup>。对于周期性的组织形态是由于激光表面合金化采用了多道搭接扫描,存在一个搭接区的 2 次加热效应所致。

经过激光表面合金化后,合金化层组织从表面到基体可分为合金化区、热影响区,如图 2 所示。各区

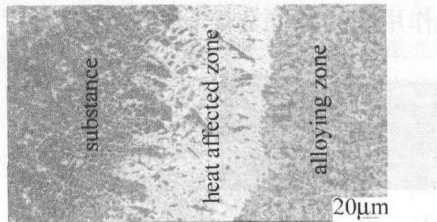


Fig. 2 The configuration of the alloying layer

域的组织形貌存在明显的区别。在激光表面合金化过程中,由于合金熔池中存在温度梯度和晶粒成长速度的差异,使合金化熔池内组织不均匀,横截面出现组织梯度,即沿合金熔池深度方向出现不同的凝固组织形态。在激光加热过程中,激光束快速加热基体表面至奥氏体温度范围,碳化物溶解,奥氏体形成。在冷却过程中,奥氏体完全或部分转变为马氏体,通过自淬火传导进入基体<sup>[9]</sup>。因此,合金化层从表面到基体的组织分别为合金化区的合金碳化物层,过渡到奥氏体组织,接下来为热影响区的针状马氏体。但由于稀土氧化物  $Y_2O_3$  的加入,改善熔化合金的流动性,熔化区微孔结构明显减少,马氏体结构得到细化,使合金层形态规整、分布均匀,合金化层组织没有明显的过渡区形貌特征,致使合金化层与基体结合更加紧密。

图 3、图 4 分别是合金化区金相显微照片和扫描

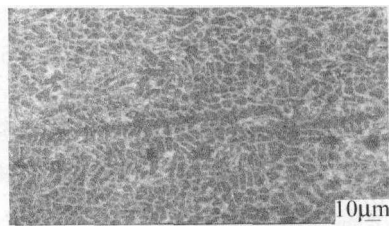


Fig. 3 A microscope photo of the alloying layer

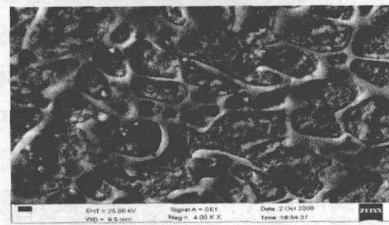


Fig. 4 A scanning electron microscope picture of the alloying layer

电子显微镜照片,照片显示,合金化区组织为细小的胞状晶和枝晶混合组织,其生长方向大致平行于散热方向。在晶粒内弥散分布着凝固结晶析出的合金碳化物,并且合金化区组织的晶粒细小,晶界密度大。这是

由于稀土的微合金化作用和去除晶界杂质的净化作用所致。在激光表面合金化处理后,稀土存在形式主要是氧、硫、硫氧化物,固溶于晶格、晶界及相界中或形成金属间化合物<sup>[10]</sup>。

处于晶格中的稀土能引起晶格较大的畸变,有自动向晶界偏聚的趋势,加之晶界本身也溶有过饱和的稀土,这种稀土在晶界的强烈富集具有强化稀土的微合金化作用和去除晶界杂质的净化作用<sup>[11]</sup>。图5为

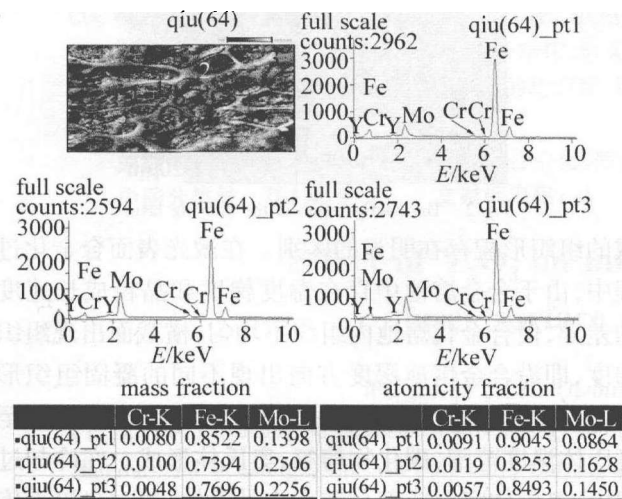


Fig. 5 Energy dispersive spectrometer diagrams of the alloying layer

合金化区能谱图为合金化区能谱图,从图中也可以看出,由于稀土元素的加入,使晶界上的 Mo 元素的含量较晶体内有明显的增加,形成更多的共晶化合物,即稀土具有加强微合金化,强化晶界的作用,这些都使得合金化层的硬度和耐磨性得到改善。

### 2.2 X 射线衍射分析

图6为合金化层近表面的 X 射线衍射仪衍射图。

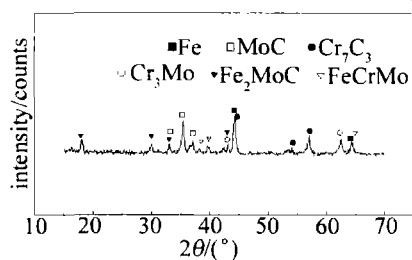


Fig. 6 A X-ray diffraction plot of the alloying layer

可以看到,合金化层的基体相除  $\alpha$ -Fe 外,还有 MoC,  $Fe_2MoC$  等相。稀土氧化物的加入,在合金化层析出少量的 FeCrMo 相。在激光表面合金化过程中,合金粉末中的 Mo,通过原位合成与基体内的 Fe, C 形成置换固溶体或者金属间化合物,这些合金碳化物弥散分布于先析出母体相上,起到了钉扎抑制晶粒滑移的作用。同时,  $Fe_2MoC$ , MoC, FeCrMo 等硬质相的存在,可以保证合金化层具有较好的硬度和耐磨性<sup>[7]</sup>。

### 2.3 显微硬度分析

图7是合金化层显微硬度曲线。从图中可以看

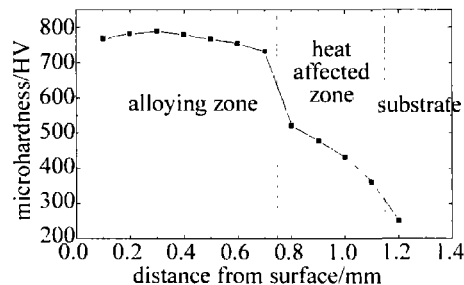


Fig. 7 The micro-hardness versus the depth of the alloying layer

到,经过了激光表面合金化处理后表面显微硬度大幅度提高,在合金化层范围内基本保持水平趋势,波动较小,并且硬化深度也显著提高。这是由于表面加 Mo 熔凝和激冷生成晶粒度很小的合金层,添加稀土氧化物  $Y_2O_3$  后,含稀土氧化物的涂层可使金属材料对激光辐照能量的吸收率大幅度提高,能显著提高激光熔化时合金元素向基体材料溶解的能力,使合金层深度加大、形态规整、分布均匀、结合紧密。

### 2.4 耐磨性

在摩擦磨损试验中,进入正常磨损期试样的平均摩擦系数和磨损量如图8所示。由图8a可见,加入合

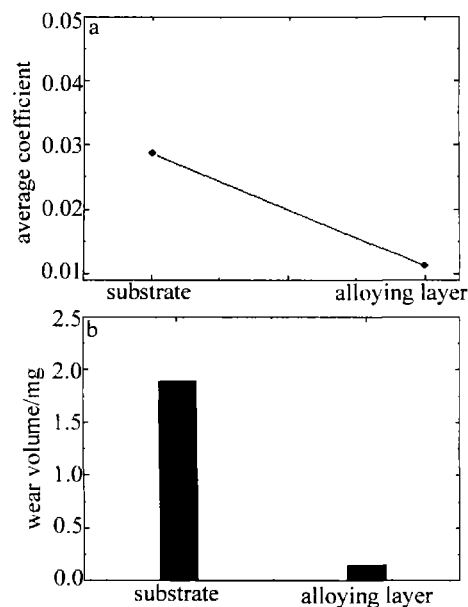


Fig. 8 A comparison of the average friction coefficient and the abrasion loss for the alloying layer and the 40Cr steel substrate

a—the friction coefficient b—the abrasion loss

合金化层的平均摩擦系数远远小于基体的平均摩擦系数。磨损量的测定结果如图8b所示,合金化层的磨损量比基体少了近10倍,表明基材经过添加稀土氧化物激光表面合金化后,在长时间磨损条件工作下,合金化层的抗磨损性能大幅提高。这主要是由于凝固结晶析出的 MoC,  $Cr_3Mo$ ,  $Cr_7C_3$  和  $Fe_2MoC$  等硬质相,在  $Y_2O_3$  对晶粒的细化作用下,具有较高的硬度和耐磨性,磨损表面表现为多次塑变的磨损机制<sup>[12]</sup>。

(下转第93页)

大的轴向区间,会聚球面衍射波提供的  $\bar{U}_{+1}(x, y, z_0)$  项是主要贡献者,其振幅  $A_{+1}(x, y, z_0)$  在  $P_{+1}$  处出现了一个特大的空间脉冲,其余点情况与以上所述相同。

作为一个全息光学元件,组合型余弦光栅具有选频的功能。上述分析已经表明,在  $z = z_0$  附近区域,受限  $\bar{U}_0$  会聚球面衍射波在  $P_0$  处的贡献是主要的。受限  $\bar{U}_{+1}$  会聚球面衍射波在  $P_{+1}$  处的贡献是主要的,其余点情况与以上所述相同。对于不同的空间频率,在两边的会聚点有不同的位置,所以说条形光栅有选频的功能。

考虑到光栅孔径的限制,中心主斑点有一半角宽度,半角宽为  $\Delta\theta_{0x} \approx \lambda/a, \Delta\theta_{0y} \approx \lambda/b$ 。对于平面波照射光栅和圆孔时的菲涅耳衍射场的研究,以往多有论文发表<sup>[6-9]</sup>。

## 5 结论

以球面波照射组合型余弦光栅,用相因子判断法揭示了其衍射场所包含的基元成分,即受限于孔径的会聚球面衍射波,得出了各成分在衍射场的衍射规律,这为组合型余弦光栅作为一种光学器件提供了一个理论基础。

在北京大学访学期间得到了钟锡华教授的精心指

导,在此对钟锡华老师表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] ZHONG X H. Modern fundamentals of optics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 287-289 (in Chinese).
- [2] LIU Y J. Study on Fresnel diffraction fields by a circular cosine-grating[J]. College Physics, 2008, 27(12): 5-9 (in Chinese).
- [3] LIU Y J. Wavefront phase-factor study diffraction fields of slit cosing-grating [J]. Physics and Engineering, 2009, 19(1): 22-25 (in Chinese).
- [4] ZHONG X H. The method of wavefront phase-factors and its applications[J]. College Physics 2007, 26(12): 1-6 (in Chinese).
- [5] ZHONG X H. The diffraction fields at image-plane belong to the Fraunhofer diffraction [J]. College Physics, 2008, 27(1): 1-4 (in Chinese).
- [6] YU L H, ZHAO W Y. Numerical calculation of intensity distribution in circular aperture diffraction[J]. College Physics, 2001, 20(1): 22-23 (in Chinese).
- [7] CHU X X, NI Y Zh, CHEN R P. Characteristics of propagation function of plane wave diffracted by small circular band [J]. College Physics, 2006, 25(12): 39-41 (in Chinese).
- [8] YOU K Ch. The implement of simulative demonstration of Fresnel circular aperture diffraction on computer[J]. College Physics, 2004, 23(5): 43-46 (in Chinese).
- [9] HE X R, ZHANG W P, CHEN M X. Fresnel diffraction of a plane transmission grating[J]. College Physics, 2007, 26(2): 1-4 (in Chinese).

(上接第6页)

## 3 结论

40Cr 金属卷筒在添加稀土氧化物  $Y_2O_3$  的激光表面合金化处理后,可以有效地改变合金化层的显微组织,改善枝晶形态,使晶粒显著细化,晶界得到强化、净化,显微组织的均匀性、致密性得到提高。比未添加稀土氧化物  $Y_2O_3$  的激光表面合金化处理获得的合金化层具有更加优良的显微结构,有利于提高金属卷筒表面的硬度和耐磨性。

## 参 考 文 献

- [1] WEI L, CHEN Q H, LI C J, *et al.* Laser surface alloying of 40Cr steel with carbon[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2001, 26(6): 114-117 (in Chinese).
- [2] LI M Y, WANG Y, HAN B, *et al.* Microstructure and properties of high chrome steel roller after laser surface melting[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(17): 7574-7579.
- [3] ZHANG S C, YAO J Q. Review on laser cladding techniques and cladding alloys design [J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 204-207 (in Chinese).
- [4] SHEN Y F, TONG B Y, FENG Z C, *et al.* Distribution and behaviour of rare earth in laser coating[J]. Journal of Rare Earths, 1997, 15(4): 344-349 (in Chinese).
- [5] ZHAO G M, WANG K L, LI C G. Effect of  $La_2O_3$  on microstructure of laser cladding ferrite-based alloy coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(4): 9-13 (in Chinese).
- [6] XU Y, JI H, WEI Y D. Application of rare earth to laser treatment on metal surface[J]. Chinese Rare Earths, 2001, 22(1): 50-54 (in Chinese).
- [7] LIU Q B, LONG Y. Effect of  $Y_2O_3$  on microstructure and properties of laser clad HT-1 alloy coating on 4Cr5W2SiV mould steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(8): 62-65 (in Chinese).
- [8] SUN G X, LIU Q B, WU A Q. Microstructure and properties of metal wire drawing rolling surface alloyed by laser [J]. Modern Mold & Die, 2009, 52(6): 71-73 (in Chinese).
- [9] TIAN Y S, CHEN C Z. Microstructures and wear properties of in situ formed composite coatings produced by laser alloying technique[J]. Materials Letters, 2007, 61(3): 635-638.
- [10] HUANG A G, WANG Y Y, ZHAO Y, *et al.* Study on laser cladding Al + Y powder on Al-base alloy surface[J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 117-120 (in Chinese).
- [11] ZHU Q J, ZOU Z D, WANG X H, *et al.* Influence of rare earths on Fe-based amorphous composite coatings by laser cladding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(2): 57-60 (in Chinese).
- [12] YUAN J P, ZHANG P, LIANG Z J, *et al.* Effect of Mo and  $CeO_2$  on microstructure and properties of laser cladding nickel-base alloy coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(1): 147-151 (in Chinese).