

表面摩擦与润滑

# AISI316 不锈钢表面等离子渗硼及摩擦磨损性能的研究

尹研, 李翠玲, 刘成松, 吴海波, 贾亚斌, 郭莉莉, 秦林

(太原理工大学 表面工程研究所, 太原 030024)

**摘要:** 目的 改善 AISI316 不锈钢的摩擦磨损性能。方法 采用双辉等离子合金化技术, 以块状 FeB 化合物作为源极材料, 在 AISI316 不锈钢表面制备含硼改性层, 对渗层组织、成分、相结构和显微硬度进行分析, 并研究改性层在干摩擦条件下的摩擦磨损性能。结果 经渗硼处理后, AISI316 不锈钢表面形成了一层连续、致密、均匀的改性层, 主要由  $\text{Mo}_2\text{B}$  和 FeB 相组成。改性层具有较高的硬度 (964HV0.1), 较基体硬度提高了约 3 倍, 且耐磨性较基体有明显提高。结论 通过在 AISI316 不锈钢表面制备渗硼改性层, 可明显提高基体材料的硬度和摩擦磨损性能。

**关键词:** AISI316 不锈钢; 等离子渗硼; 耐磨性

中图分类号: TG174.445

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)02-0043-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.02.009

## Study on Tribological Performance of Surface Plasma Boronized AISI316 Stainless Steel

YIN Yan, LI Cui-ling, LIU Cheng-song, WU Hai-bo, JIA Ya-bin, GUO Li-li, QIN Lin

(Research Institute of Surface Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To improve the tribological performance of AISI316 stainless steel. **Methods** A boron modified layer was successfully prepared on the surface of AISI316 stainless steel using double glow plasma alloying technology with FeB compound solid as the precursor. The microstructure, composition, phase structure and micro-hardness of the boronized layer were characterized, and the friction and wear behavior of the modified layer was investigated under dry sliding friction conditions. **Results** The study showed that, a dense, uniform and continuous modified layer, mainly composed of  $\text{Mo}_2\text{B}$  and FeB phase, was formed on the surface of AISI316 stainless steel after boronizing treatment. The modified layer had higher hardness (964HV0.1), which was 3 times higher than that of the substrate, and the wear resistance was significantly improved compared with the substrate. **Conclusion** Preparation of boron modified layer on the surface of AISI316 stainless steel could significantly improve the hardness and the tribological performance of the substrate material.

**KEY WORDS:** AISI316 stainless steel; plasma boronizing; wear resistance

收稿日期: 2014-08-08; 修订日期: 2014-09-12

Received: 2014-08-08; Revised: 2014-09-12

基金项目: 山西省留学回国人员科研经费资助项目(2013-030)

Fund: Supported by the Shanxi Scholarship Council of China (2013-030)

作者简介: 尹研(1989—), 女, 河南人, 硕士研究生, 主要研究方向为不锈钢表面改性。

Biography: YIN Yan(1989—), Female, from Henan, Master graduate student, Research focus: surface modification of stainless steel.

通讯作者: 秦林(1974—), 男, 四川人, 副教授, 主要从事钛合金表面合金化的研究。

Corresponding author: QIN Lin(1974—), Male, from Sichuan, Associate professor, Research focus: surface alloying of titanium alloys.

AISI316 奥氏体不锈钢凭借其光洁的外观、优异的耐腐蚀性和抗氧化性、良好的塑性和韧性等一系列优良性能<sup>[1-2]</sup>,在餐饮、食品、医疗、航天、化工、汽车、装饰等领域占据着重要的地位。但是 AISI316 不锈钢存在硬度较低(200~250HV)、耐磨性较差的缺陷,特别是极易因产生粘着磨损发生咬死而失效,这一直制约奥氏体不锈钢的应用和发展<sup>[3-5]</sup>,因此提高不锈钢的耐磨性是一个亟待解决的问题。奥氏体不锈钢没有固态相变,不能采用常规的热处理方法来提高其耐磨性,采用表面改性处理既可行,又有效。

近年来,许多学者都致力于奥氏体不锈钢耐磨性能的研究<sup>[6-8]</sup>,研究表明,通过在奥氏体不锈钢表面形成硬质改性层,可以提高其摩擦学性能。在渗碳<sup>[1,9]</sup>、渗氮<sup>[10]</sup>、碳氮共渗<sup>[11]</sup>、离子注入<sup>[12]</sup>、渗硼<sup>[13-14]</sup>等表面改性方法中,渗硼以其较高的硬度、高的耐磨性,特别是良好的耐粘着磨损和磨粒磨损性能,掀起了研究热潮<sup>[15-17]</sup>。作为表面技术的一种,双辉等离子表面合金化技术具有合金元素选择范围广、仪器操作简单、环保高效、结合强度高的优点<sup>[18]</sup>,被广泛应用于多种材料的表面改性中<sup>[19-23]</sup>。文中采用双层辉光等离子表面合金化技术,在 AISI316 奥氏体不锈钢表面制备渗硼改性层,并着重研究改性层对奥氏体不锈钢摩擦磨损性能的影响。

## 1 试验

### 1.1 渗硼

选用块状 FeB 化合物作为源极材料,其主要成分(以质量分数计)为:B 17.38%,Si 0.34%,P 0.02%,S 0.01%,Fe 余量。基材为 AISI316 不锈钢(工件极),其成分(以质量分数计)为:Cr 17.0%,Ni 10.0%,Mn 1.9%,C 0.07%,Si 0.8%,P 0.03%,S 0.02%,Fe 余量。

先将试样加工成  $\phi 15\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  的圆片,经过 360<sup>#</sup>,600<sup>#</sup>,800<sup>#</sup>,1000<sup>#</sup>,1200<sup>#</sup>,1500<sup>#</sup>,2000<sup>#</sup> 水砂纸逐级打磨后,用 0.5  $\mu\text{m}$  的金刚石喷雾抛光剂进行机械抛光,再依次在丙酮、酒精、去离子水中超声清洗 10 min,烘干后,封装待用。

采用自行研制的 LS-450 型双层辉光等离子渗金属真空炉进行渗硼处理,温度测试采用 WDL-31 型光电温度计。选用不锈钢圆筒作为辅助阴极,将基材和 FeB 置于辅助阴极内。渗硼处理的具体工艺参数为:占空比 80%,频率 60 Hz,极间距 15~20 mm,氩气工

作气压 35~45 Pa,保温温度 950  $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间 3 h,源极电压 500~700 V,阴极电压 300~400 V。渗硼处理后,试样随炉冷却至室温。

### 1.2 表征及摩擦磨损性能检测

采用 Axiovert 25CA(Zeiss) 光学图像分析仪观察渗硼改性层的截面显微组织及摩擦磨损试验后的磨痕形貌。采用 Spectro GDA750 型辉光放电光谱成分分析仪(GDOES)分析改性层元素的分布情况。采用 DX-2700 型 X 射线衍射仪表征改性层的物相组成,条件为:Cu-K $\alpha$  靶,加速电压 40 kV,步长 0.02 $^{\circ}$ 。采用 HVS-1000 型显微硬度计测定渗层的表面显微硬度,条件为:载荷 100 g,加载时间 10 s,保载时间 20 s。

采用 MFT-R4000 型往复摩擦磨损试验机测试摩擦磨损性能。测试条件为:温度(25 $\pm$ 2)  $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 RH=(65 $\pm$ 5)%,摩擦副采用  $\phi 5\text{ mm}$  的 GCr15 钢球,载荷 2 N,往复距离 5 mm,频率 2 Hz,摩擦时间 25 min。用 WIVS 白光干涉三维测量仪测量磨痕轮廓,根据所测磨痕的宽度和深度值计算比磨损率,公式如下:

$$K = \frac{Lh}{6PSb} (3h^2 + 4b^2) \quad (1)$$

式中:K 为比磨损率;L,h,b 分别为磨痕的长度、深度、宽度;P 为法向载荷;S 为滑动距离。

## 2 结果与分析

### 2.1 渗硼改性层的组织形貌、成分及结构

将渗硼处理后的试样进行镶嵌,磨抛为金相试样后,用氯化铁盐酸水溶液(5 g FeCl<sub>3</sub>+50 mL HCl+100 mL H<sub>2</sub>O)进行浸蚀,观察到的截面形貌如图 1 所示。经渗硼处理后,试样表面形成了一层白亮层,且改性层分布均匀、连续,组织致密,没有出现明显的裂纹和孔洞,厚度大约为 8  $\mu\text{m}$ 。渗层齿状不明显,与基体有

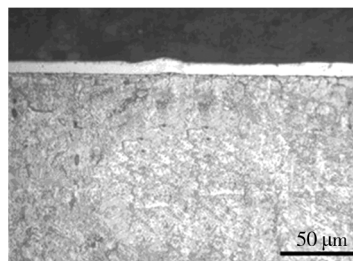


图1 AISI316 不锈钢渗硼处理后截面的金相组织

Fig.1 Metallurgical microstructure of the cross-section of AISI316 stainless steel after boronizing

明显的界面,这与一般合金钢渗硼层呈锯齿状不同,主要归因于 316 不锈钢中 Cr、Ni 及 C 等合金元素阻碍了硼的扩散,削弱了硼化物晶粒的择优取向,这与文献的研究结果吻合<sup>[24-25]</sup>。不过,双辉等离子合金化技术处理后,改性层与基体为冶金结合,不会因渗层变薄,齿状变平坦而增加渗层脆性。

图 2 为 316 不锈钢渗硼处理后,改性层的成分分布曲线。由图 2 可见,由表及里,改性层硼元素的含量先增加,后减小,逐渐趋于稳定。硼元素最高质量分数达 9%,在距表面 0.6 μm 处;随后硼含量呈梯度分布,变化比较平缓,质量分数基本保持在 1% 左右,最深时距表面约为 2 μm。Mo 和 Cr 合金元素的最高质量分数分别达到 38%,35%,可能是由于硼在向内扩散的同时,Mo 和 Cr 合金元素向外扩散,使得向外扩散的 Mo、Cr 原子在基体表面下形成了合金元素富集区。成分分析的结果与金相组织图相吻合。

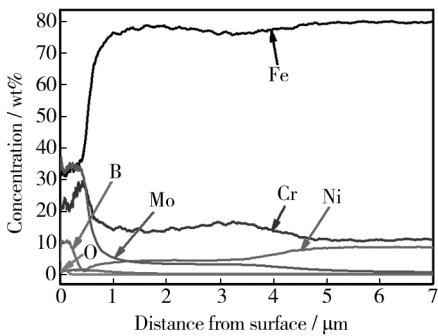


图 2 渗硼处理后渗层中成分分布曲线

Fig.2 Composition distribution curve of elements in the boride layer after boronizing

图 3 为基体和渗硼试样的 XRD 衍射图谱。基体的图谱中只存在 γ 相的衍射峰。结合图 2 成分分析,不锈钢中 Cr 和 Mo 元素的含量比较高,因此渗硼处理后,表面的 XRD 图谱中主要存在 Mo<sub>2</sub>B 和 FeB 衍射峰,此外还存在较弱的 Fe<sub>2</sub>B、CrB 等含硼化合物衍射

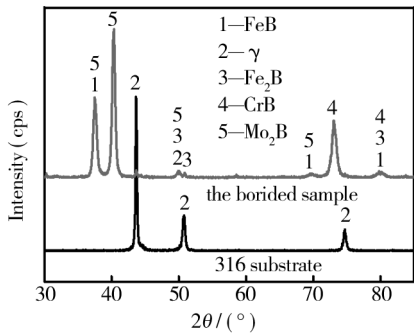


图 3 基体和渗硼层的 X 射线衍射图

Fig.3 XRD profiles of the 316 substrate and the boride layer

峰,并且由于改性层比较薄,仍可以观察到微弱的基体 γ 相衍射峰。

2.2 渗硼改性层的显微硬度及摩擦磨损性能

对 AISI316 不锈钢基体和渗硼试样的表面显微硬度进行测试,结果显示,基体试样的硬度仅为 237HV0.1,渗硼试样的硬度高达 964HV0.1,约为基体的 4 倍。结合表面形貌和 XRD 分析,这主要归因于形成了硬质相——含硼化合物。

图 4 为摩擦磨损试验中,316 不锈钢基体和渗硼试样摩擦系数与滑动时间的关系曲线。基体的曲线中,在开始阶段,摩擦系数从 0.1 急剧上升,最高达到 0.58;经过一段时间的磨损,摩擦系数逐渐达到稳定状态。分析其原因,可能是由于基体表面存在一些微凸,刚开始这些微凸与摩擦副发生剧烈的磨损,所以摩擦系数急剧上升;经过一段时间的磨损,微凸被磨平,摩擦系数下降,最终进入稳定磨损阶段。相较于基体,渗硼试样的摩擦系数基本保持稳定,在 0.17 左右波动。结合表面形貌及表面硬度,认为这主要是由于经过渗硼处理后,表面形成了致密、均匀、无孔洞的改性层,且表面硬度大大提高,从而表面抗粘着能力提高,摩擦系数较基材明显降低。分析表明,渗硼处理对 316 不锈钢有很大的减磨作用。

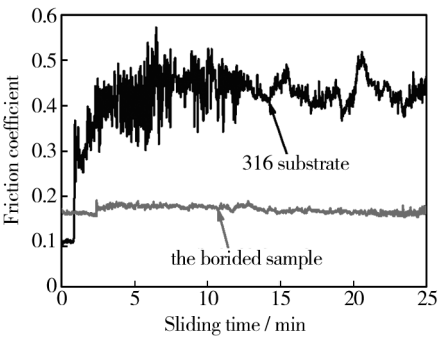


图 4 基体和渗硼试样摩擦系数随滑动时间的变化

Fig.4 Variation of friction coefficient of the 316 substrate and the borided samples with time

对基体和渗硼试样的磨痕形貌进行对比,结果见图 5。如图 5a 所示,基体表面有非常明显的磨痕,磨痕深而宽,并且磨损轨迹上出现了大量粘着堆积物,存在明显的塑性变形,推断其磨损机理为粘着磨损与磨粒磨损。如图 5b 所示,渗硼试样的表面存在“犁沟”状磨痕,磨痕浅而窄,基本没有看到明显的粘着物堆积,推断其磨损机理主要以磨粒磨损为主。这主要是由于经过渗硼处理后,试样表面因形成了组织致

密、硬度较高的渗层而得到了强化<sup>[7]</sup>。通过以上分析可以看出,经过渗硼处理后,试样的耐磨性有明显的提高。

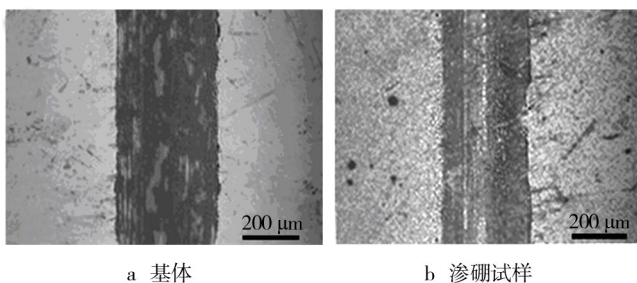


图5 磨痕形貌

Fig. 5 Wear scars: a) substrate, b) the borided sample

图6为基体及渗硼试样的磨痕轮廓。从图6可以明显看出,渗硼试样的磨痕高度和深度都较基体小很多。根据所测的磨痕深度和宽度值算得渗硼试样的比磨损率为  $7.58 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ , 基体的比磨损率为  $7.15 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。渗硼试样的比磨损率比基体小约1个数量级,耐磨性比基体提高了9.4倍。

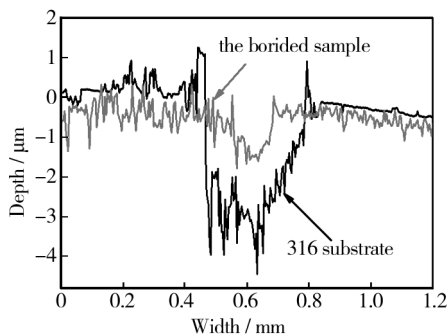


图6 基体与渗硼试样的表面磨痕轮廓

Fig. 6 Wear profiles of the substrate and the treated sample

### 3 结论

1) AISI316 奥氏体不锈钢在 950 ℃ 下,经双辉等离子表面渗硼处理 3 h 后,可形成均匀、连续、致密的改性层,其厚度为 8 μm,主要由 Mo<sub>2</sub>B 和 FeB 相组成,表面硬度高达 964HV0.1。

2) AISI316 不锈钢经渗硼处理后,粘着磨损得到了有效改善,磨损机制变为微磨粒磨损,耐磨性提高 9.4 倍,具有良好的摩擦学性能。

### 参考文献

- [1] 刘伟,窦百香,赵程. 渗碳对 AISI316 不锈钢表面性能影响的研究[J]. 热处理技术与装备,2012,33(5):32—34.
- [2] 王伟伟,郭为民,张慧霞. 不锈钢深海腐蚀研究[J]. 装备环境工程,2010,7(5):79—83.
- [3] 王萌,巩建鸣,荣冬松. 奥氏体不锈钢低温气体渗碳工艺研究现状[J]. 压力容器,2012(6):45—49.
- [4] 薛宗玉,周升,韦习成. 摩擦耦合变形条件下奥氏体不锈钢的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报,2009,29(5):405—411.
- [5] DE LAS HERAS E, EGIDI D A, CORENGIA P, et al. Duplex Surface Treatment of an AISI 316L Stainless Steel: Microstructure and Tribological Behaviour [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(13):2945—2954.
- [6] 张翔宇,唐宾,范爱兰,等. AISI304 不锈钢表面渗 Cu 层对其摩擦学行为的影响[J]. 材料热处理学报,2011,32(9):136—140.
- [7] 王亮,许晓磊,许彬,等. 奥氏体不锈钢低温渗氮层的组织与耐磨性[J]. 摩擦学学报,2000,20(1):67—69.
- [8] 周升,伍婵娟,姜佩璐,等. 渗硼层对 SUS304 不锈钢耦合变形的摩擦行为的影响[J]. 材料热处理学报,2010(6):122—127.
- [9] 李朋,潘邻,张良界,等. 奥氏体不锈钢渗碳层的组织及



- 耐蚀强化性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 69—71.
- LI Peng, PAN Lin, ZHANG Liang-jie, et al. Study on Structure and Corrosion Resistance Analysis of Carburizing Organization of Austenitic Stainless Steel[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 69—71.
- [10] SHEN L, WANG L, WANG Y Z, et al. Plasma Nitriding of AISI 304 Austenitic Stainless Steel with Pre-shot Peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(20): 3222—3227.
- [11] 江亮, 罗厚杉, 赵程. 等温扩散对氮碳共渗不锈钢表面的硬度影响的研究[J]. 热处理技术与装备, 2011, 32(5): 25—27.
- JIANG Liang, LUO Hou-shan, ZHAO Cheng. Study on Effects of Isothermal Diffusion on Surface Hardness of the Nitrocarburized Layer of Stainless Steel[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2011, 32(5): 25—27.
- [12] 陈康, 赵玮霖. 304 奥氏体不锈钢氮离子注入层的组织与性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 18—20.
- CHEN Kang, ZHAO Wei-lin. Study on Organization and Performance of Nitrogen Ion Implantation Layer of 304 Austenitic Stainless Steel[J]. Surface Technology, 2011, 40(2): 18—20.
- [13] GÜNEN A, GÖK M S, ERDOĞAN A, et al. Investigation of Microabrasion Wear Behavior of Boronized Stainless Steel with Nanoboron Powders[J]. Tribology Transactions, 2013, 56(3): 400—409.
- [14] GÜNEN A, KARAKAS M S, KURT B, et al. Corrosion Behavior of Borided AISI 304 Austenitic Stainless Steel[J]. Anti-corrosion Methods and Materials, 2014, 61(2): 112—119.
- [15] 张菁, 董仕节, 黄伦. Cr12MoV 钢渗硼层脆性与耐磨性研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2006, 19(2): 16—19.
- ZHANG Jing, DONG Shi-jie, HUANG Lun. Study of Brittleness and Wear Resistance of Boride Layer to Steel of Cr12MoV[J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2006, 19(2): 16—19.
- [16] TAKTAK S. Some Mechanical Properties of Borided AISI H13 and 304 Steels[J]. Materials and Design, 2007, 28(6): 1836—1843.
- [17] QIN L, YANG K K, LIU C S, et al. Enhanced Plasma Boriding with Molybdenum Using Double Glow Plasma Surface Alloying Technique[J]. Materials Letters, 2012, 82: 127—129.
- [18] XU Z. Method and Apparatus for Introducing Normally Solid Materials into Substrate Surfaces; US, 4520268[P]. 1985-05-28.
- [19] XU Z, LIU X, ZHANG P, et al. Double Glow Plasma Surface Alloying and Plasma Nitriding[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(9): 4822—4825.
- [20] HE Z Y, WANG Z X, WANG W B, et al. Surface Modification of Titanium Alloy Ti6Al4V by Plasma Niobium Alloying Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(9): 5705—5709.
- [21] 陈飞, 周海, 潘俊德. 钛合金表面辉光等离子渗钽的研究[J]. 材料热处理学报, 2009(4): 156—159.
- CHEN Fei, ZHOU Hai, PAN Jun-de. Study on Double-glow Discharge Plasma Tantalizing on Titanium Alloy Surface[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009(4): 156—159.
- [22] 王冰莹, 袁霄梅, 王文慧. 双层辉光等离子表面共渗 Cr-Ni-Mo-Co 工艺研究[J]. 表面技术, 2012, 41(1): 83—85.
- WANG Bing-ying, YUAN Xiao-mei, WANG Wen-hui. Double Glow Plasma Surface Metallurgy Cr-Ni-Mo-Co Technology Research[J]. Surface Technology, 2012, 41(1): 83—85.
- [23] LI Z H, LIU S S, CHEN Z Y. Study on Plasma Discharge Parameters in Double-glow Plasma Surface Alloying Furnace[J]. Vacuum, 2009, 83(5): 801—804.
- [24] OZDEMIR O, OMAR M A, USTA M, et al. An Investigation on Boriding Kinetics of AISI 316 Stainless Steel[J]. Vacuum, 2008, 83(1): 175—179.
- [25] 陈蕴博, 姜超, 张亮, 等. 304 不锈钢硼化层的微观组织结构分析[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(3): 91—94.
- CHEN Yun-bo, JIANG Chao, ZHANG Liang, et al. Microstructure Analysis of Boride Layer of 304 Stainless Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(3): 91—94.

(上接第 28 页)

- [16] 李亨憬, 谢治辉, 余刚, 等. 镁合金无铬前处理直接化学镀镍磷新工艺[J]. 材料保护, 2011, 44(7): 26—29.
- LI Ting-jing, XIE Zhi-hui, YU Gang, et al. Process for Direct Electroless Nickel-Phosphorous Plating of Magnesium Alloy Based on Chromium-free Pretreatment[J]. Materials Protection, 2011, 44(7): 26—29.
- [17] HAN K P, FANG J L. Stabilization Effect of Electroless Nickel Plating by Thiourea[J]. Metal Finishing, 1997, 95(2): 73—75.
- [18] XIE Z H, YU G, LI T J, et al. Dynamic Behavior of Electroless Nickel Plating Reaction on Magnesium Alloys[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2012, 9(1): 107—114.
- [19] 李宁. 化学镀实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- LI Ning. Practical Electroless Plating Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.