

引用格式:王振宇,刘政军,艾星宇,等.  $Y_2O_3$  对等离子堆焊 WC/Ni60 堆焊层组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2024, 53(2): 100-104.  
DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20210387  
http://www.rjggj.net rjggj@vip.163.com

# $Y_2O_3$ 对等离子堆焊 WC/Ni60 堆焊层组织及性能的影响

王振宇, 刘政军, 艾星宇, 刘 峰

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:**利用等离子堆焊在 Q235 钢板上制备镍基复合堆焊层,研究了不同含量的  $Y_2O_3$  对镍基碳化钨堆焊层组织及性能的影响。采用 SEM、XRD 分析了堆焊层的微观组织;使用维氏硬度计和端面高温摩擦磨损试验机对堆焊层进行了硬度和磨损性能测试。结果表明: $Y_2O_3$  的加入促使堆焊层中碳化物规则化,以 WC 为核心向周围生长。堆焊层检测出主要的物相为  $\gamma$ -Ni(Fe)、WC、 $W_2C$ 、 $M_{23}C_6$ 、 $M_6C$ 、 $Cr_7C_3$ 、FeNi<sub>3</sub> 相。添加 1.2% $Y_2O_3$  的堆焊层维氏硬度达到最大值 970 HV0.5,比未加  $Y_2O_3$  的堆焊层硬度高 283 HV0.5,在高温摩擦磨损条件下磨损量最小为 2.8 mg,摩擦系数为 0.32,此时磨损机制为轻微的磨粒磨损。

**关键词:**等离子堆焊;氧化钇;镍基碳化钨堆焊层;微观组织;磨损

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)02-0100-05

## Effects of $Y_2O_3$ on Microstructure and Properties of Plasma Surfacing WC/Ni60 Surfacing Layer

WANG Zhenyu, LIU Zhengjun, AI Xingyu, LIU Zheng

(School of Materials Science & Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** The nickel-based composite surfacing layer was prepared on Q235 steel plate by plasma surfacing, and the effects of different contents of  $Y_2O_3$  on the microstructure and performance of the nickel-based tungsten carbide surfacing layer were studied. The microstructure of the surfacing layer was analyzed by SEM and XRD, and the hardness and wear properties of the surfacing layer were tested by Vickers hardness tester and end-face high temperature friction and wear tester. The results indicate that the addition of  $Y_2O_3$  makes carbide regularization in the surfacing layer, and it grows around with WC as the core. The main phase in the surfacing layer is  $\gamma$ -Ni (Fe), WC,  $W_2C$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$ ,  $Cr_7C_3$  and FeNi<sub>3</sub> phases. The microhardness of the surfacing layer added with 1.2% $Y_2O_3$  reaches the maximum value of 970 HV0.5, which is 283 HV0.5 higher than that of the surfacing layer without  $Y_2O_3$ . Under high temperature friction and wear conditions, the minimum wear amount is 2.8 mg, and the friction coefficient is about 0.32. At this time, the wear mechanism is slight abrasive wear.

**Key words:** plasma surfacing;  $Y_2O_3$ ; nickel-based WC surfacing layer; microstructure; wear

磨损是机械零件常见的失效方式之一。为提高零部件的使用寿命,表面工程技术被广泛的应用于工程实践中<sup>[1-3]</sup>。在零部件表面堆焊一层耐磨堆焊层是最常见的手段,这对于工件安全使用有重要意义<sup>[4]</sup>。金属基陶瓷复合材料目前正被广泛用于材料表面堆焊技术中,其中镍基自熔合金粉末具有优异的综合

性能,可改善材料表面性能<sup>[5-6]</sup>。而在镍基粉末中添加部分陶瓷颗粒可使堆焊层获得更高的硬度、耐磨性、耐蚀性等,WC 是一种常用于金属基复合材料中的硬质相,WC 粉末具有熔点高、硬度高、耐磨性好并且与金属基合金润湿性好,所以 WC 增强镍基合金堆焊层得到了广泛的应用<sup>[7-9]</sup>。稀土元素具有元素活性效应,可将堆焊层中的杂质元素偏析到晶界处,还可抑制柱状晶的生长,细化组织,强化堆焊层的耐磨性<sup>[10-12]</sup>。堆焊层中加入稀土元素还能够提高金属基复合粉末的流动性和润湿性,消除气孔等缺陷,改善焊缝的宏观成形性<sup>[13]</sup>。目前国内外研究者对于稀土改性镍基堆焊层以及 WC 改性镍基堆焊层进行了研究,但关于稀土  $Y_2O_3$  改性镍基 WC 堆焊层的相关报

收稿日期:2021-02-16

作者简介:王振宇(1995-),男,山西大同人,硕士,主要研究方向:焊接冶金及表面强化技术;电话:18640209473;

E-mail: wzy1565458906@163.com

通讯作者:刘政军(1962-),男,黑龙江讷河人,教授,博士生导师,主要从事焊接冶金、焊接材料的开发与研制、金属表面强化技术研究;电话:13804994179;E-mail: liuzhengjun1962@163.com

道较少。本文通过利用等离子堆焊技术,在 Q235 钢板上制备不同含量的  $Y_2O_3$  改性镍基 WC 堆焊层,研究了  $Y_2O_3$  含量对镍基 WC(30%)堆焊层微观组织、显微硬度以及磨损性能的影响规律。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

试验基材为 Q235 低碳钢,其规格为 80mm×20

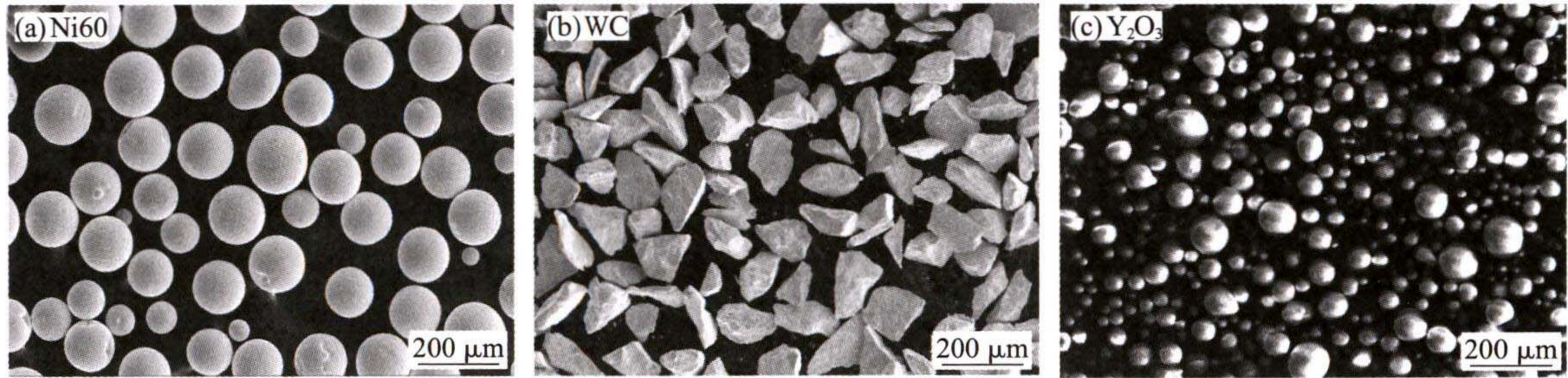


图 1 3 种粉末的形貌图  
Fig.1 Morphologies of three powders

### 1.2 试验方法

试验前先用砂轮机将母材氧化皮打掉,再用丙酮去除油污,最后对母材进行喷砂处理。将  $Y_2O_3$  含量为 0%、0.4%、0.8%、1.2%、1.6% 粉末分别与 30% WC-Ni60 粉末使用混粉机混合,使用行星式球磨机将配置好的 5 种不同粉末球磨 2h,球磨后的粉末放进 150℃ 的烘干箱保温 2h。采用 BX-ZH-400A 等离子堆焊设备来进行试验,本试验工艺参数为:焊接电流 120A、焊速 100mm/min、送粉速度 15g/min、等离子气流量 4L/min、保护气流量 10L/min、喷嘴距试件距离 12mm。使用扫描电镜观察堆焊层微观组织以及磨损后试样的磨损形貌,使用 X 射线衍射仪分析堆焊层物相,对堆焊层进行维氏硬度测试,试验载荷为 0.5kg、加载时间为 15s。使用高温摩擦磨损试验机测试试样的磨损性能,将试样制成  $\phi 4\text{mm} \times 15\text{mm}$  的圆棒,对磨副选择调质后硬度约 61HRC 的 GGr15 圆盘。摩擦磨损试验参数为:加载力 300N、转速 100r/min、时间 30min、温度 400℃。在试验前后分别对磨损试样称重,且使用计算机连接的传感器记录试样试验时的摩擦系数。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 堆焊层物相及微观组织分析

图 2 为添加不同含量稀土  $Y_2O_3$  堆焊层的 XRD 图谱。可看出,有无  $Y_2O_3$  对堆焊层物相组成影响较小。其中堆焊层中主要的衍射峰为  $\gamma\text{-Ni(Fe)}$ ,说明

mm×15mm。试验所用的粉末为 100~300 目的球形 Ni60,其成分见表 1。100~300 目纯度 99.9% 的菱形 WC,以及 300~500 目纯度 99.9% 的  $Y_2O_3$ 。图 1 为试验用粉末的扫描电镜图。

表 1 Ni60 合金粉末的化学成分(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of Ni60 alloy powders(wt%)

C	B	Si	Cr	Fe	Ni
0.7~1.0	3.0~4.5	3.5~4.5	15~17	≤8	余量

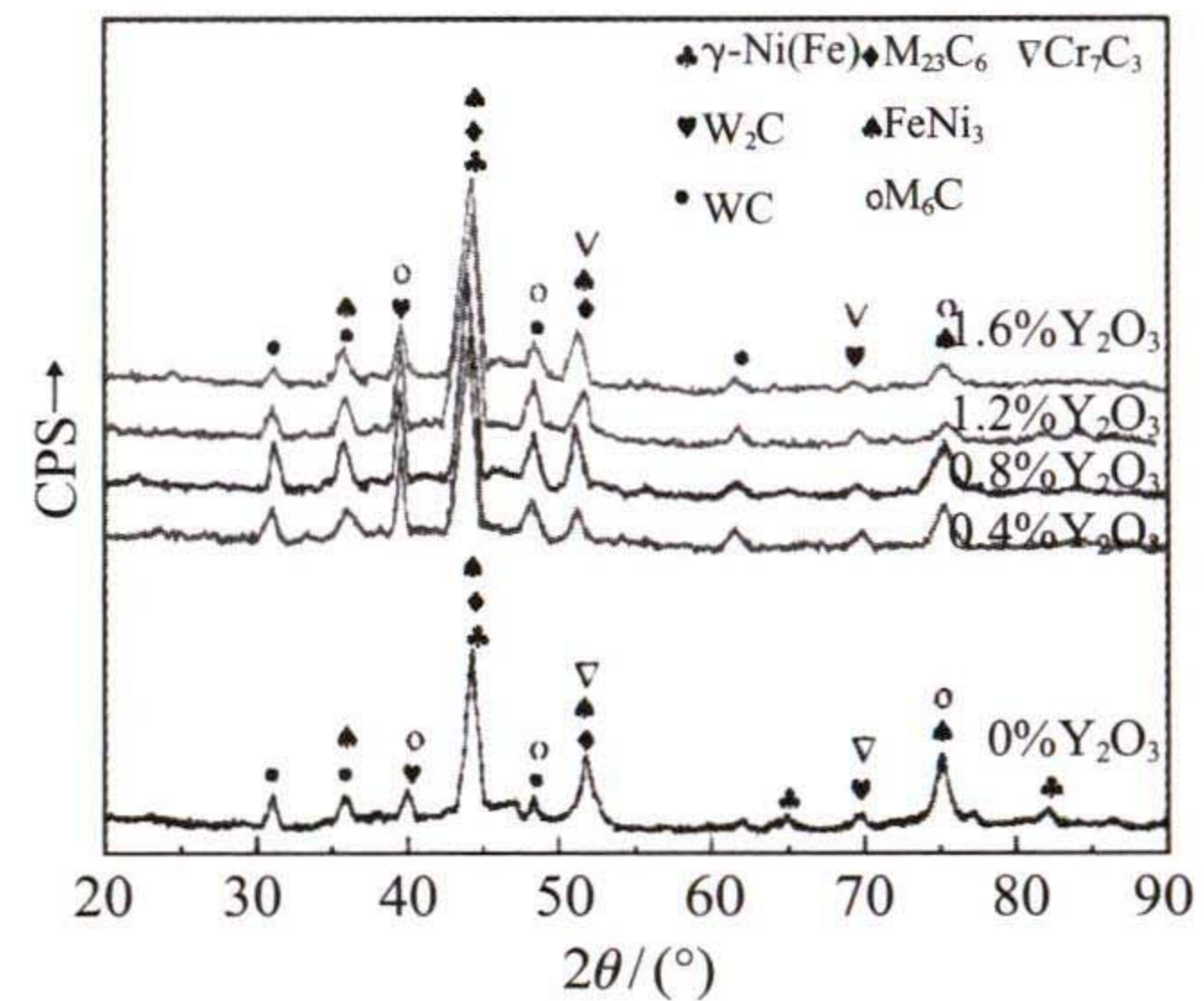


图 2 不同  $Y_2O_3$  含量堆焊层的 XRD 图谱  
Fig.2 XRD pattern of surfacing layer with different  $Y_2O_3$  contents

$\gamma\text{-Ni(Fe)}$  固溶体为基体相;同时还检测到 WC 和  $W_2C$  相,表明堆焊层中有未熔的 WC 粉末,部分 WC 颗粒在高温作用下分解为  $W_2C$ 。XRD 图谱表明:堆焊层中还存在  $M_{23}C_6$ 、 $M_6C$ 、 $Cr_7C_3$  等碳化物以及  $FeNi_3$  等化合物。

图 3 为不同含量  $Y_2O_3$  的堆焊层微观组织 SEM 图。可看到,堆焊层微观组织中均有未完全熔化的 WC,并且随着  $Y_2O_3$  的增加,未熔 WC 周围的结构开始发生变化。当堆焊层未添加  $Y_2O_3$  时,WC 周围呈现不规则的形状区域,包含许多粒状和条状的枝晶。在添加 0.4% $Y_2O_3$  后,堆焊层的微观组织开始发生变化,组织中呈条状的枝晶明显减少,同时可以看到白色的层片状共晶碳化物开始出现。当  $Y_2O_3$  含量增加到 0.8% 后,组织结构分布相对密集,未熔合

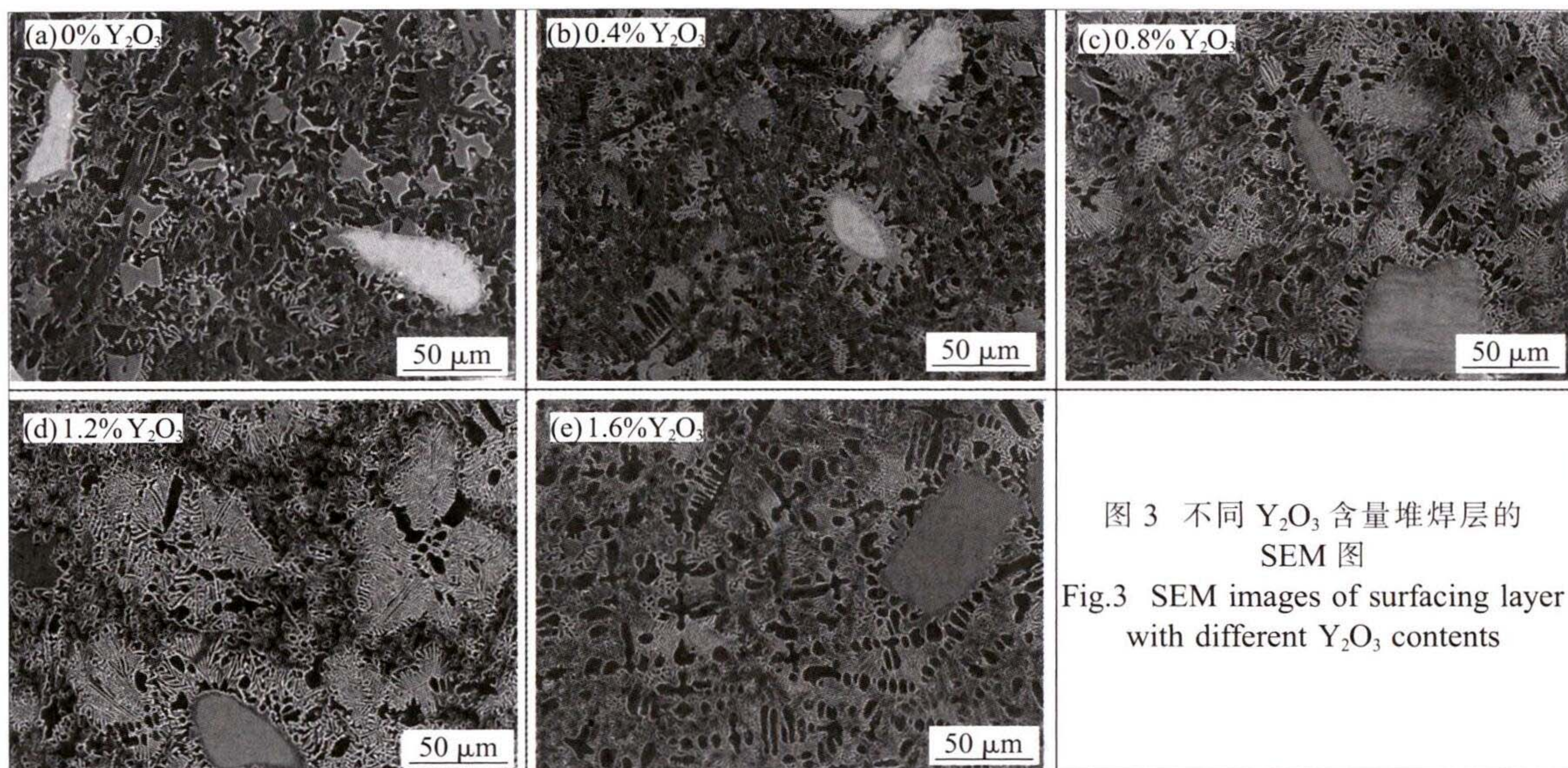


图3 不同  $Y_2O_3$  含量堆焊层的 SEM 图  
Fig.3 SEM images of surfacing layer with different  $Y_2O_3$  contents

WC 周围的共晶碳化物明显增多, 这些碳化物的四周汇集着大量的树突。随着  $Y_2O_3$  添加量达到 1.2% 时, 堆焊层组织更加致密, 层片状共晶碳化物开始增多, 并且这些共晶碳化物开始以未熔的 WC 为核心向周围生长。对应添加 1.6%  $Y_2O_3$  的堆焊层, 可看到, 其结构未发生太多变化, 但是共晶碳化物开始减少, 枝晶尺寸也在增加。这可能是因为加入过量的  $Y_2O_3$  使得熔池流动性有所降低, 导致对流速度减慢, 使得夹杂物、气孔不好排出, 熔池的冷却速度降低, 使这些枝晶尺寸有较长的时间增大。

## 2.2 显微硬度及磨损性能

图 4 为不同  $Y_2O_3$  含量堆焊层的维氏硬度。可看到, 堆焊层的硬度远远高于母材的硬度, 这是由于堆焊层中未熔 WC 的存在以及高硬度碳化物的生成。此外, 随  $Y_2O_3$  添加量的增加, 堆焊层的平均显微硬度先升高后降低。当  $Y_2O_3$  含量为 1.2% 时, 堆焊层的平均维氏硬度达到最高, 为 970 HV0.5, 约为母材硬度 155 HV0.5 的 6.26 倍, 比未加入  $Y_2O_3$  的堆焊层硬

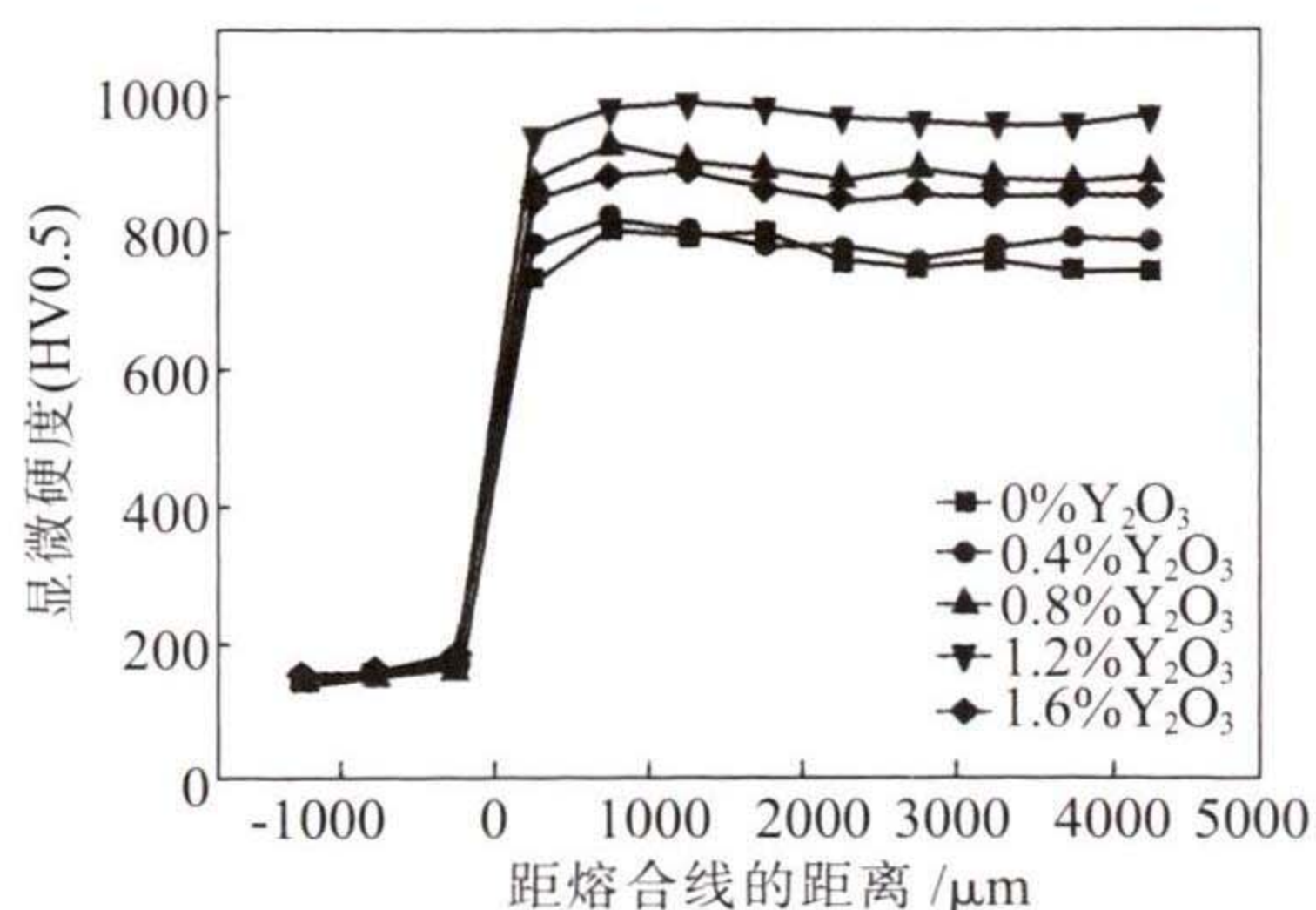


图4 不同  $Y_2O_3$  含量堆焊层的显微硬度  
Fig.4 Microhardness of surfacing layer with different  $Y_2O_3$  content

度高 283HV0.5。这可能是由于稀土的加入促进了堆焊层中碳化物形成过程中的均匀分散, 可以起到弥散强化的作用, 提升了堆焊层的硬度<sup>[4]</sup>。当  $Y_2O_3$  加入过量时, 由于  $Y_2O_3$  熔点较高, 所以堆焊层中可能有一些未熔化的  $Y_2O_3$ , 造成夹杂, 降低了堆焊层硬度。

图 5 为在同一磨损试验参数下不同  $Y_2O_3$  含量的堆焊层的平均失重。结果表明, 未加  $Y_2O_3$  的堆焊层磨损失重体积最大, 随着  $Y_2O_3$  含量的增加, 可看出堆焊层的耐磨性有所改善, 其中添加 1.2%  $Y_2O_3$  的改性金属复合堆焊层失重最低, 为 2.8 mg, 比未添加  $Y_2O_3$  的堆焊层的失重低约 35%。从以上结果可知, 磨损失重的变化趋势与对应的堆焊层硬度变化相一致。

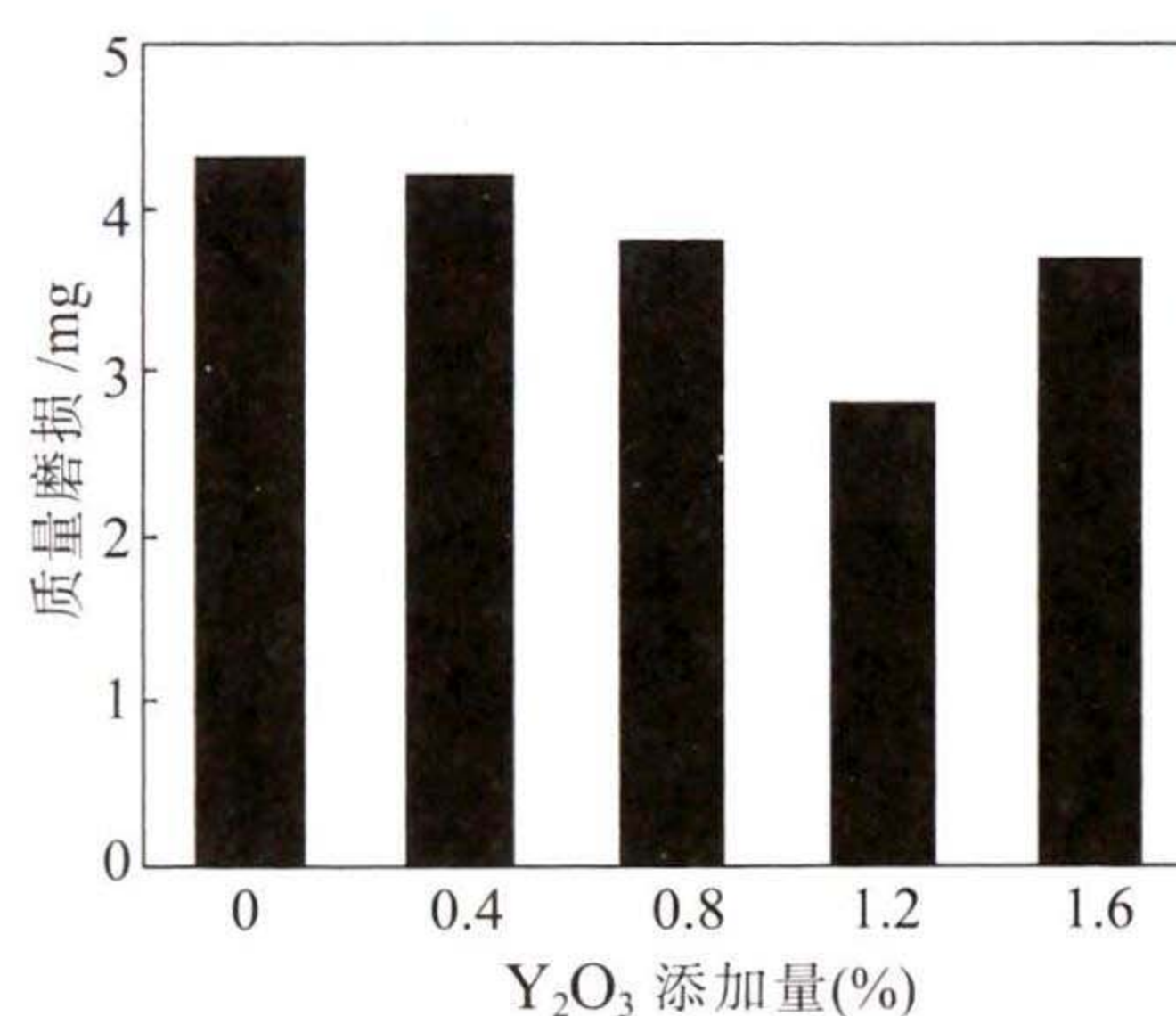


图5 不同  $Y_2O_3$  含量堆焊层的磨损失重  
Fig.5 Wear mass loss of surfacing layers with different  $Y_2O_3$  contents

图 6 为不同含量  $Y_2O_3$  改性堆焊层在 400 °C 条件下的摩擦系数变化曲线图。可看出, 随  $Y_2O_3$  添加量的增加, 堆焊层摩擦系数呈先减小后增大的趋势, 在磨损初期摩擦系数都会出现显著的波动, 这是因

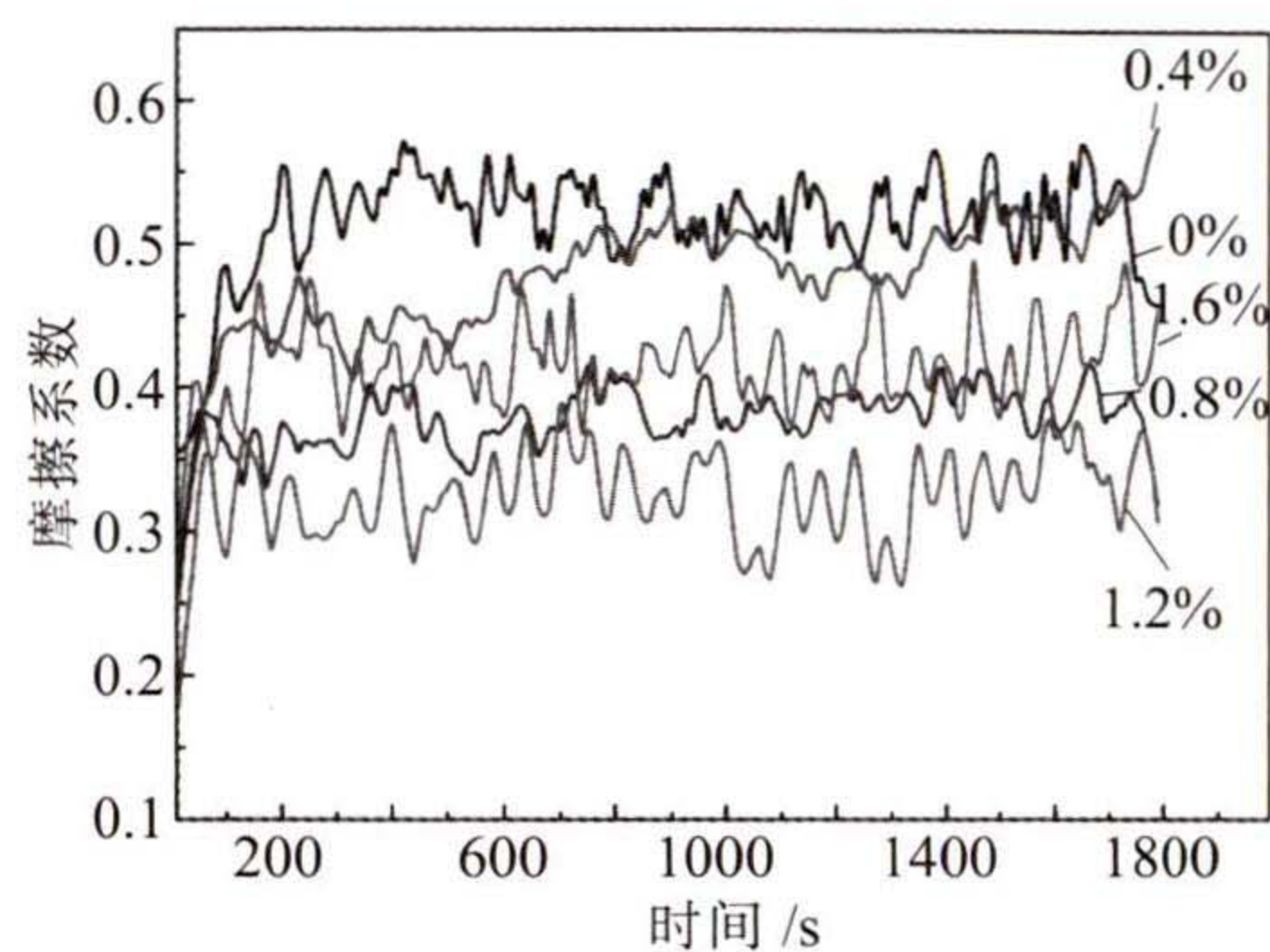


图6 不同  $Y_2O_3$  含量堆焊层的摩擦系数  
Fig.6 Friction coefficient of surfacing layer with different  $Y_2O_3$  content

为在开始阶段还未进入稳定磨损阶段。其中未添加  $Y_2O_3$  的堆焊层摩擦系数最大,达到 0.51。随  $Y_2O_3$  含量增加为 1.2%时,摩擦系数降低到 0.32 左右,并且摩擦系数曲线波动不是很大。这可能是由于加入适量的  $Y_2O_3$  可细化堆焊层的组织,并且使得堆焊中硬质相均匀化分布,所以此时有最佳的磨损性能<sup>[15]</sup>。

图 7 为高温摩擦磨损试验后不同堆焊层的磨损形貌图。可看出,未加  $Y_2O_3$  的堆焊层表面有大量平行的沟槽,部分区域可看到黏着有磨屑,同时堆焊层

表面呈现大量剥落现象,其磨损形式以磨粒磨损、粘着磨损为主。当  $Y_2O_3$  添加量为 0.4%时,堆焊层出现一条白亮色的氧化带,并且伴随着平行的犁沟,磨损形式以磨粒磨损、氧化磨损为主。 $Y_2O_3$  添加量增加到 0.8%时,堆焊层犁沟明显变浅,部分区域出现轻微剥落,这时主要以磨粒磨损为主,伴随轻微的粘着磨损。随着  $Y_2O_3$  含量增加到 1.2%时,磨损面可看到许多硬质相颗粒均匀分布,只有轻微的平行犁沟出现,此时磨损形式为轻微磨粒磨损。这是因为加入适量的  $Y_2O_3$  使堆焊层中的碳化物增多,并呈均匀化分布,提高了堆焊层抵抗塑性变形的能力,使堆焊层获得良好的抵抗磨粒切削的性能。同时稀土还可细化晶粒,阻止产生裂纹扩展倾向,使得堆焊层中硬质相难以剥落下来,增强了堆焊层的磨损性能。当  $Y_2O_3$  含量增加到 1.8%时,堆焊层磨损面的沟槽开始加深;同时表面伴有疲劳破坏,呈现大块剥落现象,磨损面发生严重的塑性变形,堆焊层磨损形式为磨粒磨损、疲劳磨损为主。加入过量的  $Y_2O_3$ ,可能产生大量夹杂物从而影响堆焊层磨损性能。

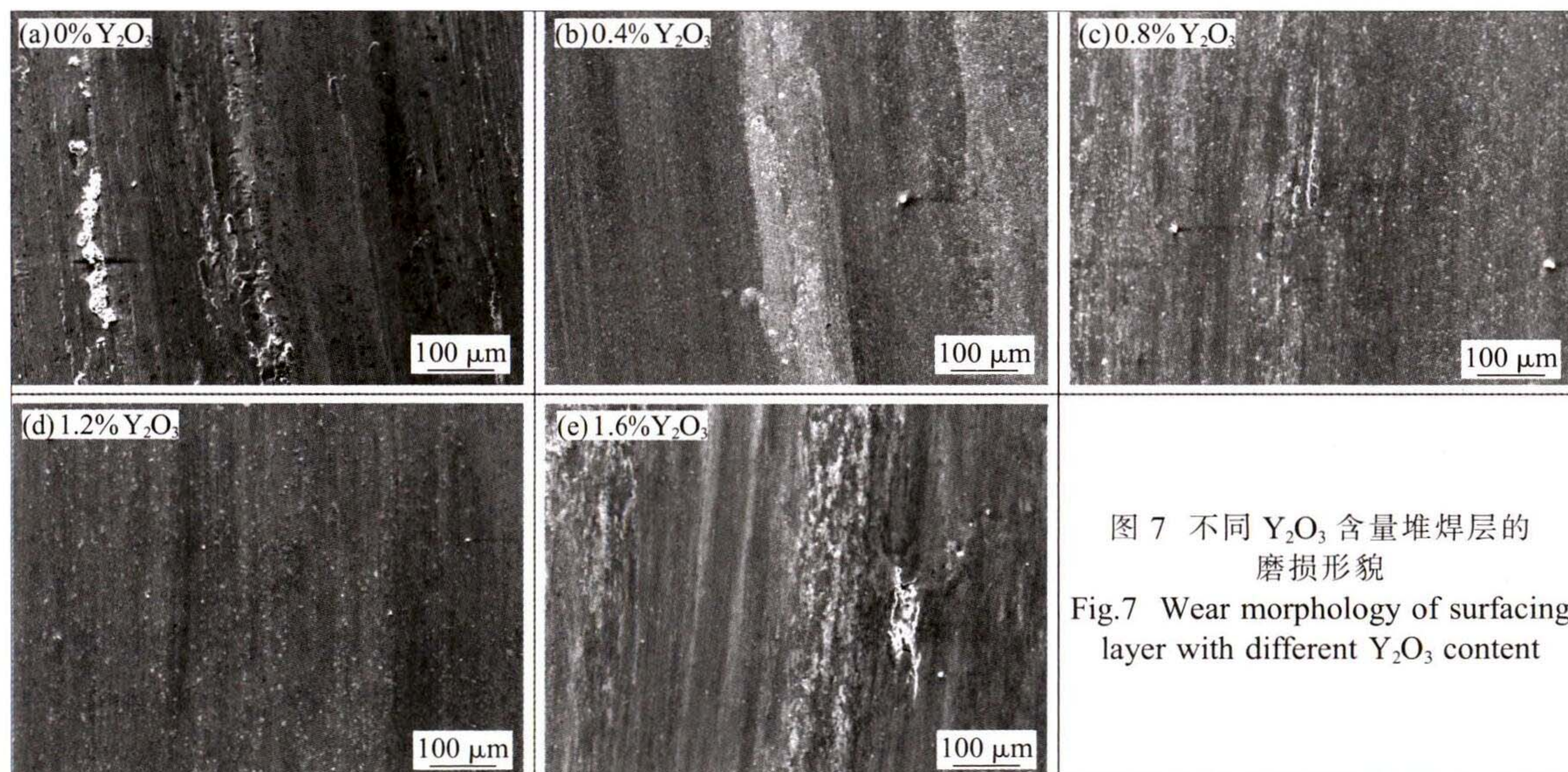


图7 不同  $Y_2O_3$  含量堆焊层的磨损形貌  
Fig.7 Wear morphology of surfacing layer with different  $Y_2O_3$  content

### 3 结论


(1)  $Y_2O_3$  的加入改善了堆焊层的微观组织,适量的  $Y_2O_3$  可使碳化物规则化,以 WC 为核心均匀的生长。堆焊层主要物相为  $\gamma-Ni(Fe)$ 、 $FeNi_3$  固溶体,以及未熔化的 WC 和分解生成的  $W_2C$ , 同时还有  $M_{23}C_6$ 、 $M_6C$ 、 $Cr_7C_3$  等碳化物。

(2)  $Y_2O_3$  的加入显著提高堆焊层的平均硬度。当  $Y_2O_3$  添加量为 1.2%时,堆焊层平均维氏硬度达

到最大,为 970HV0.5。同时通过销盘磨损试验可证实加入适量的  $Y_2O_3$  可使堆焊层耐磨性提高,当  $Y_2O_3$  添加量为 1.2%时,堆焊层耐磨性能最佳,此时的磨损机制为轻微磨粒磨损。

#### 参考文献:

- [1] Lu K, Lu J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2004, 375: 38-45.

- [2] 刘政军,李东芮,王文欣,等. TiN 对 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金组织及耐磨性影响[J]. 焊接学报,2019,40(10):15-19.
- [3] Zhuang M H, Li M Q, Wang J, et al. Microstructures and wear resistance of high boron and low carbon ferroalloy using hybrid powder/wire overlaying method [J]. China Welding, 2016,25(1):57-63.
- [4] 贾华,刘政军,勾健,等. 原位自生 TiC 颗粒对铁基耐磨堆焊金属的影响[J]. 沈阳工业大学学报,2017,39(3):275-279.
- [5] Badisch E, Kirchagassner M. Influence of welding parameters on microstructure and wear behaviour of a typical NiCrBSi hardfacing alloy reinforced with tungsten carbide[J]. Surface & Coatings Technology,2008,202(24):6016-6022.
- [6] Ye F X, Jiao Z P, Zhao L Y. Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition on the microstructure and properties of Ni60 additives by micro-plasma cladding [J]. Materials Research Express,2019,6 (2):7690-7703.
- [7] Chakraborty A, Singh J K, Sen D, et al. Microstructures, wear and corrosion resistance of laser composite surfaced austenitic stainless steel (AISI 304 SS) with tungsten carbide [J]. Optics & Laser Technology,2021,134:106585.
- [8] 贾华,刘政军,李萌,等. 自保护药芯焊丝明弧堆焊 Fe-Cr-C-B-W 合金的组织及性能[J]. 焊接学报,2020,41(3):86-90.
- [9] He X, Song R G, Kong D J. Microstructures and properties of Ni/TiC/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced Al based composite coatings by laser cladding[J]. Optics & Laser Technology,2019,117:18-27.
- [10] 刘旭. 稀土元素 La 对 Cr26 型高铬铸铁组织和耐磨性能的影响[J]. 热加工工艺,2017,46(13):118-121.
- [11] Wang W, Chen Z, Feng S. Effect of CeO<sub>2</sub> on impact toughness and corrosion resistance of WC reinforced Al-based coating by laser cladding[J]. Materials,2019,12(18):2901-2915.
- [12] Zhang Z Y, Lu X C, Han A, et al. Rare earth effect on the microstructure and wear resistance of Ni-based coatings [J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing,2007,454:194-202.
- [13] Singla Y K, Arora N, Dwivedi D K. Dry sliding adhesive wear characteristics of Fe-based hardfacing alloys with different CeO<sub>2</sub> additives-A statistical analysis[J]. Tribology International, 2017,105:229-240.
- [14] Fang Y C, Cui X F, Cai Z B, et al. Influence of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition on nano indentation hardness and residual stress of Stellite 6 coating prepared by plasma cladding [J]. Journal of Rare Earths,2018,36(8):873-878.
- [15] Wang C L, Gao Y, Wang R, et al. Microstructure of laser-clad Ni60 cladding layers added with different amounts of rare-earth oxides on 6063 Al alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds,2018,740:1099-1107. 

(上接第 99 页)合金层主要由纯 Ta 相组成,且 Ta 主要沿(111)和(200)晶面择优生长。随温度升高,衍射峰的位置不会改变,但是衍射峰强度会有所改变。900 °C 合金层对应的 Ta 衍射峰强度最高。

(3) 不同温度参数下 Ta 合金层的自腐蚀电位均高于基材的,而自腐蚀电流密度较低,即 Ta 合金层更难以发生电化学腐蚀反应且腐蚀速率更低。900 °C 合金层的耐蚀性能最佳,腐蚀速率约为基体的 29%,表现出优良的耐腐蚀性能。

#### 参考文献:

- [1] 范景莲,李鹏飞,刘涛,等. 高性能细晶钨及钨合金的研究进展[J]. 中国钨业,2015,30(2):41-48.
- [2] 张存信,秦丽柏,米文字,等. 我国穿甲弹用钨合金研究的最新进展与展望 [J]. 粉末冶金材料科学与工程,2006,11(3):127-132.
- [3] 袁书强,张保玉,陈子明,等. 战斗部用钨合金材料现状及发展状况[J]. 中国钨业,2015,30(2):49-52.
- [4] 吴泽卫,徐英鸽,李明. 高密度钨合金的研究现状[J]. 热加工工艺,2014,33(12):5-7.
- [5] Fan J L, Gong X, Huang B Y, et al. Densification behavior of nanocrystalline W-Ni-Fe composite powder prepared by sols-pray drying and hydrogen reduction process [J]. Journal of Alloys and Compounds,2010,489(1):188-194.
- [6] Xu Z, Liu X P, Zhang P Z, et al. Double glow plasma surface alloying and plasma nitriding [J]. Surface and Coatings Technology,2007,201:4822-4825.
- [7] 徐重,张艳梅,张平则,等. 双层辉光等离子表面冶金技术[J]. 热处理,2009,24(1):7-17.
- [8] 陈嘉林. 基于钽钨合金两段氮碳共渗强化机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2016.
- [9] Wang Y, Zhang P Z, Wu H Y. Microstructure and electrochemical properties of plasma tantalumising on low carbon steel [J]. Surface Engineering,2015,31(8):634-640.
- [10] Wei D B, Chen X H, Zhang P Z, et al. Plasma surface tantalum alloying on titanium and its corrosion behavior in sulfuric acid and hydrochloric acid[J]. 2018,441:448-457. 