

# 含 WC 镍基药芯焊丝 MIG 堆焊层的组织与性能<sup>\*</sup>

田丽纷<sup>a</sup>, 贺定勇<sup>a,b</sup>, 周正<sup>a</sup>, 刘飞<sup>a</sup>, 蒋建敏<sup>a</sup>, 王智慧<sup>a</sup>

(北京工业大学 a. 材料科学与工程学院, b. 北京市生态环境材料及其评价工程技术研究中心, 北京 100124)

**摘 要:** 用 MIG 堆焊的方法, 在 Q235 上制备 WC 颗粒增强镍基耐磨堆焊层, 利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)等方法对堆焊合金的显微组织进行了观察分析, 对堆焊层的硬度和耐磨性进行了测试分析。结果表明: 堆焊层的基体组织为 Ni 基固溶体, 其上分布着 Ni<sub>3</sub>B、Ni<sub>3</sub>Si 等硬质相, 这些硬质相与未熔 WC 颗粒构成了耐磨相, 起到减磨耐磨的作用, 镍基基体起到支撑作用, 使得堆焊层具有良好的耐磨性。WC 含量一定时, 随着热输入的增大, WC 颗粒的溶解使得堆焊层的硬度从 45 HRC 降低至 35.6 HRC; 随着 WC 含量的增加, 堆焊层中 WC 硬质相的体积分数增多, 使其抗磨粒磨损性能较 Ni-B-Si 基体从 7.83 倍提高至 8.7 倍。

**关键词:** 碳化钨; 镍基; 耐磨堆焊; 药芯焊丝; 熔化极惰性气体保护焊(MIG)

**中图分类号:** TG174.455; TG115.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)02-0057-06

## Microstructures and Properties of the Hardfacing with WC/Ni-based Flux Cored Wire Deposited by MIG

TIAN Li-fen<sup>a</sup>, HE Ding-yong<sup>a,b</sup>, ZHOU Zheng<sup>a</sup>, LIU Fei<sup>a</sup>, JIANG Jian-min<sup>a</sup>, WANG Zhi-hui<sup>a</sup>

(a. College of Materials Science and Engineering, b. Beijing Engineering Research Center of Eco-materials and LCA, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

**Abstract:** WC/Ni-based hardfacings were prepared on Q235 using metal inertia gas (MIG) welding, analyzed by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). Abrasion-resistant properties and hardnesses of depositions were also analyzed. The results show that Ni<sub>3</sub>B and Ni<sub>3</sub>Si hard phases are distributed on the surface of Ni matrix, with unmelted WC particles. They constitute rich wear resistance phases, acting as the wearable skeleton. The Ni-based substrate plays a supporting role, showing good wear resistance. When the content of WC is fixed, the hardness of the hardfacing alloy decreases (45-35.6 HRC) with the increasing of welding current. With the increase of the WC content, the abrasion-resistance of the hardfacing increases (7.83-8.70 times).

**Key words:** tungsten carbides; Ni-based; hardfacing; flux cored wire; metal inert-gas welding(MIG)

## 0 引 言

含 WC 颗粒镍基耐磨合金被广泛应用于增强关键零部件表面的耐磨、耐蚀和耐冲击性能<sup>[1-3]</sup>。目前, 国内外这种颗粒增强耐磨合金的制备方法有钨极氩弧焊、MIG、等离子熔覆、氧乙炔焰、激光、高频感应、电子束、热喷涂等, 制备材料主要集中在粉末, 对丝材的研究较少<sup>[4-8]</sup>。近年

来, 国外出现了大量的碳化钨药芯焊丝, 如美国 Polymet 公司的 PolyTung NiBWC 药芯焊丝<sup>[9]</sup> (主要成分, 质量分数/%: 2.81 Si、1.06 B、0.7 Fe、2.81 C、41.02 W、余量 Ni); 德国卡斯特林的 EnDotec DO \* 11 药芯焊丝<sup>[10]</sup> (主要成分, 质量分数/%: 0.4 C、2.5 Si、3.0 Cr、1.5 B、50 WC、余量 Ni), 堆焊合金的硬度达到 52 HRC, 满足工况

收稿日期: 2013-12-16; 修回日期: 2014-02-28; 基金项目: \*北京市教委科技成果转化与产业化项目(JP09012201301)

作者简介: 田丽纷(1987-), 女(汉), 河南新乡人, 硕士生; 研究方向: 表面科学与工程理论

网络出版日期: 2014-03-10 11:07; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140310.1107.001.html>

引文格式: 田丽纷, 贺定勇, 周正, 等. 含 WC 镍基药芯焊丝 MIG 堆焊层的组织与性能 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 57-62.

使用需求。

有文献研究过工艺方法和参数对 WC 颗粒增强 Ni 基合金层特性的演变规律<sup>[1,11-13]</sup>。研究表明铸造 WC 熔点低(约 2 500 ℃)、密度大(约 15.63 g/cm<sup>3</sup>),在 MIG 堆焊的过程中易出现 WC 的溶解和沉降,对堆焊合金的组织及性能产生影响<sup>[1,11]</sup>。文中对 MIG 堆焊过程中焊接参数及 WC 含量对堆焊合金的组织及性能的影响进行了初步的讨论,以获得制备具有优异性能的堆焊合金适合的焊接参数以及 WC 含量。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料及制备

试验采用 Q235 作为母材,焊丝为自行研发的 WC 颗粒增强镍基耐磨堆焊药芯焊丝,直径  $\Phi$  2.4 mm。所添加的铸造碳化钨粒度为 180~300  $\mu$ m。焊丝外皮为 99% 以上的镍带。焊丝药芯中加入的 WC(质量分数)分别为 55% 和 75%,填充率为 38%。熔敷金属主要化学成分(质量分数,%)为:19.2~28.77 W、0.8~1.23 C、2~3.5 Si、1.5~3 B、0.3~0.8 Mn、余量 Ni。

焊接电源型号为 NBC-200 型,选用纯氩气保护,堆焊时同层焊道间相互搭接 1/3,堆焊三层(堆焊合金截面的上、中、下部分别对应堆焊层由表面至底部的第一、二、三层),厚度为 9~10 mm。具体堆焊工艺参数如表 1 所示。

表 1 MIG 堆焊工艺参数

Table 1 Parameters of MIG hardfacing

No.	Current/A	Voltage/V	Gas flow/(L·min <sup>-1</sup> )
1	160-170	19	15
2	190-200	20	15
3	220-230	22	15

### 1.2 分析测试

堆焊试样表面磨平后,采用 HBRV-187.5 电动布洛维硬度计进行硬度测试,测 10 点 HRC,取其平均值。

采用 MLS-225 型湿式橡胶轮磨粒磨损试验机进行磨粒磨损试验,尺寸为 57 mm×25.5 mm×16 mm,橡胶轮转速 240 r/min,橡胶轮直径 176 mm,橡胶轮硬度 60(邵尔硬度),磨料选择为

212~380  $\mu$ m 石英砂,载荷 100 N,预磨 1 000 转,精磨 3 000 转。精磨后,采用日本 HITACHI 的 S-3400N 型扫描电子显微镜观察堆焊合金磨损后表面形貌。

将制得的金相试样抛光后,采用 5% 的三氯化铁溶液腐蚀,在 OLYMPUS-PMG3 型光学显微镜下对堆焊层进行显微分析,采用扫描电子显微镜和 EDS 能谱分析堆焊层成分,利用 SHI-MADZU XRD-7000 型多晶衍射仪(XRD)进行堆焊合金的物相分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 堆焊合金的显微组织

图 1 为焊丝药芯中 WC 质量分数为 75% 的堆焊合金截面及表面的金相组织,图 1(a)、(b)和 (c)分别对应截面的上部、中部和下部,图 1(d)为堆焊合金的表面形貌。由图 1 可以看出,在上部,WC 颗粒数量急剧减少,尺寸也有较明显的减小;中部的 WC 颗粒数量也较少;在下部的 WC 颗粒较完整的保存下来,数量很多。这是由于 WC 的密度大,熔池温度较高、高温停留时间长,冷却速度慢,使得 WC 在冷却凝固的过程中存在沉降、溶解现象。

图 1(d)可以看出,在堆焊层的表面分布着一些棱角分明但不规则的块状组织,结合 X 射线衍射(图 2)和 EDS(表 2)分析可以断定这些块状组织为溶解后重新析出的 WC 颗粒。在焊接热源的作用下,镍基合金粉末首先熔化,由于铸造 WC 的熔点约为 2 500 ℃,熔池的冷却速度较慢,在高温熔池中停留的时间较长,会造成 WC 颗粒的溶解<sup>[14]</sup>,在随后的冷却过程中促使原位生成 WC 颗粒<sup>[7,15-16]</sup>。由图 1(d)还可以看出,WC 颗粒与熔融的镍基合金界面之间具有良好的润湿性,均匀的分布在  $\gamma$ -Ni 基体中。在焊丝药芯中加入的 B 和 Si 在冶金的过程中一方面有脱氧、造渣作用,另一方面 B、Si 的加入除少量固溶于  $\gamma$  镍相,大部分以  $\gamma'$  相即 Ni<sub>3</sub>B 或 Ni<sub>2</sub>B、Ni<sub>3</sub>Si 金属间化合物形式存在。

图 2 为 WC 颗粒增强镍基耐磨堆焊合金的 XRD 图谱。由 XRD 分析可知,基体组织为  $\gamma$ -Ni,硬质相则由白色的 WC 颗粒(未熔的、重新析出的)、Ni<sub>3</sub>B 和 Ni<sub>3</sub>Si 组成。由于在基体合金中并没有添加其他碳化物合成元素,所以在 XRD 数据中没有出现其他的碳化物。

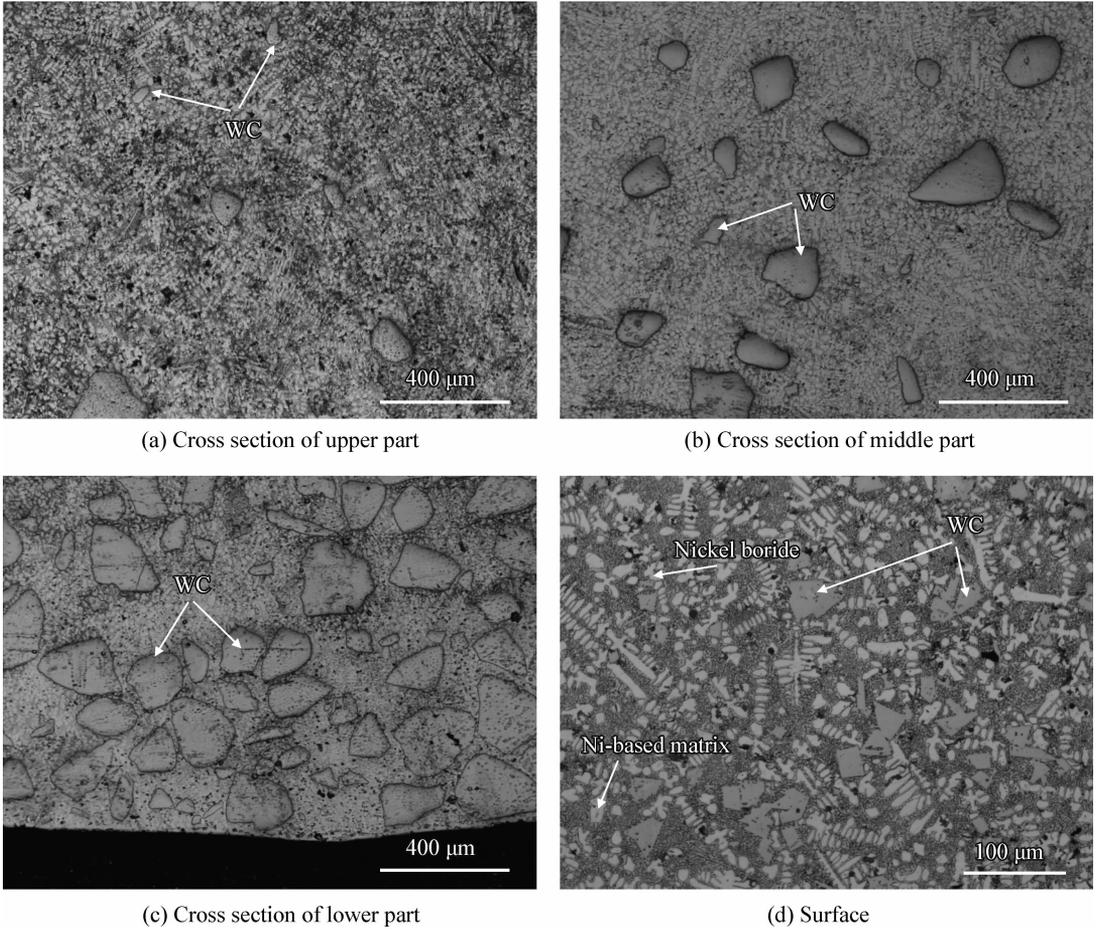


图 1 堆焊合金的截面及表面形貌

Fig. 1 Cross section and surface morphologies of the hardfacing alloy

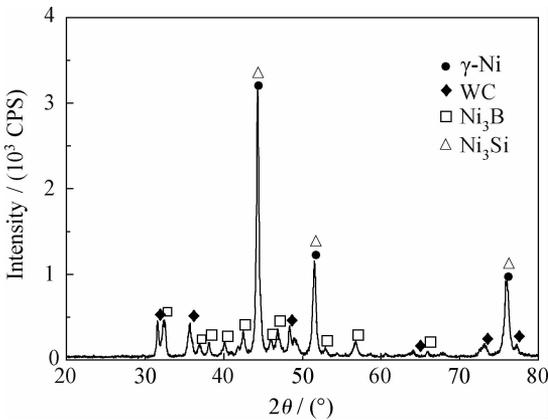


图 2 堆焊合金的 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction spectrum of the hardfacing alloy

表 2 堆焊合金的能谱分析(原子数分数/%)

Table 2		EDS analysis of the hardfacing alloys(a/%)				
No.	Ni	W	C	Mn	Si	
1		89.02	10.98			
2	4.41	81.05	14.54			
3	92.72		6.32	0.96		
4	85.05	7.58	4.98	0.92	1.47	
5	4.68	86.42	8.90			

$$WC = W + C \tag{1}$$

$$W_2C = 2W + C \tag{2}$$

$$2WC = W_2C + C \tag{3}$$

$$W_2C = WC + W \tag{4}$$

图 3 为扫描电镜下观察到的堆焊合金组织。根据 Kirchhoff 定律和各种物质的热力学数据<sup>[17-18]</sup>, 得出 WC 颗粒可能溶解的反应方程式如下:

由吉布斯自由能的热力学计算可知, 在 MIG 堆焊熔池温度下, 这 4 种反应中, 只有(3)分解反应的吉布斯自由能小于零, 其它的分解反应均大于零; 而当熔池温度较低时, 这 4 种反应都不发

生。因此,在堆焊的冶金过程中,熔池中进行(3)的分解反应。镍基合金的熔点约为 1 100 ℃,铸造碳化钨的熔点约为 2 500 ℃,MIG 堆焊熔池的温度较高。在堆焊的过程中,镍基合金熔化成液体,WC 颗粒完全处在熔融的镍基基体溶液中,并开始发生溶解和沉降过程。图 3(a)中标记 1 对应的 WC 根据 EDS 和尺寸分析,其为原始的未完全溶解的 WC 颗粒。标记 2 是溶解的 WC 颗粒的边缘,图 3(c)为 WC 颗粒溶解边缘的放大图。标记 2 处的 EDS 分析结果显示,在高温熔池的作用下,溶解后的碳、钨和基体之间存在一个相互扩散的过程。

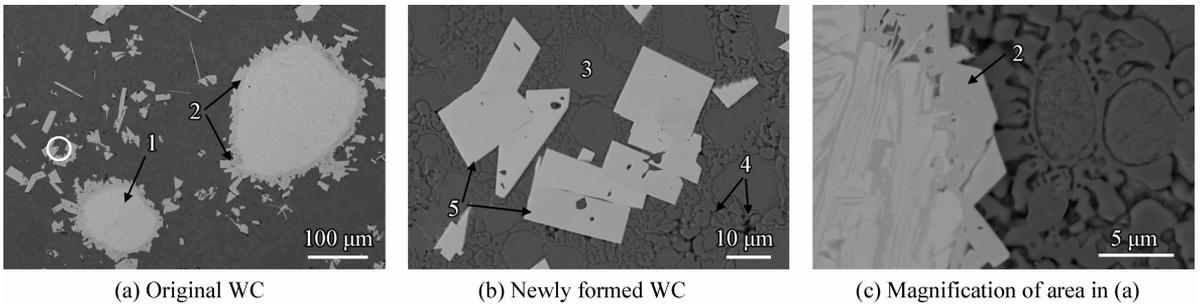


图 3 堆焊合金的组织形貌

Fig. 3 SEM morphologies of hardfacing alloys

## 2.2 堆焊电流对 WC 颗粒增强镍基堆焊合金硬度的影响

在表 1 的焊接参数下,对焊丝药芯中 WC 质量分数为 75% 的堆焊合金的硬度进行研究。结果表明,当堆焊电流从 160 A 增加到 230 A 时,堆焊合金的硬度由 45 HRC 减小到 35.6 HRC,如图 4 所示。这是由于在 WC 含量一定的条件下,随着热输入的增加,WC 增强相周围溶解沉降,甚至出现须状。并且,由于 WC 粒子的溶解使得增强相减少。因此,随着热输入的增大,堆焊合金硬度降低<sup>[7]</sup>。

综上所述,堆焊时的热输入对堆焊合金硬度有明显的影 响,随着热输入的增加,堆焊合金的硬度呈下降的趋势。为降低 WC 颗粒在焊接过程中的溶解,应选择小电流的 MIG 堆焊方法。

## 2.3 磨粒磨损结果与讨论

表 3 和图 5 分别为焊丝药芯中 WC 质量分数为 55% 和 75% 的堆焊合金磨损失重表和磨粒磨损后的表面形貌,由以上结论可知电流小时堆

随着焊接熔池的冷却,WC 颗粒的溶解和扩散速度减小,在冷却的过程中,镍基溶液中碳和钨的溶解度降低,碳和钨从镍基溶液中结晶出来,原位生成 WC 相<sup>[7,15-16]</sup>。图 3(b)中标记 5 处的三角、四角状的白色相,由 EDS 和尺寸分析,确定其为原位生成的 WC 颗粒。

图 3(b)中的标记 4 为分布于晶界处的菊花状和蜂窝状组织,由 XRD 和 EDS 分析结果显示,其主要元素均为 Ni,并且由于 B、C 元素原子序数小,EDS 不能准确测定,因此,其应为镍硼、镍硅固溶体;标记 3 处主要元素含镍,应为镍基基体组织。

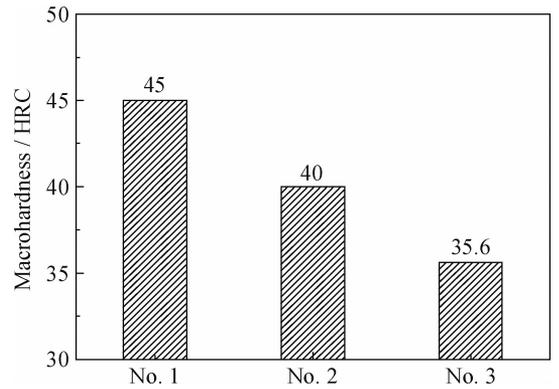


图 4 W75 堆焊层的宏观硬度

Fig. 4 Macrohardness of the W75 hardfacing alloys

焊层的硬度值较高,所以采用 160 A 焊接电流。对比试样为不添加 WC 的 Ni-B-Si 基体,将 Ni-B-Si 基体(即 WC0)的相对耐磨性定义为 1。焊丝药芯中 WC 质量分数为 55%(WC55)时,堆焊合金中形成了 WC 的耐磨骨架,耐磨性较 Ni-B-Si 基体提高了 7.83 倍。当焊丝药芯中 WC 质量分数增加到 75%(WC75)时,堆焊合金的耐磨性持续增加,为 Ni-B-Si 基体的 8.7 倍多。

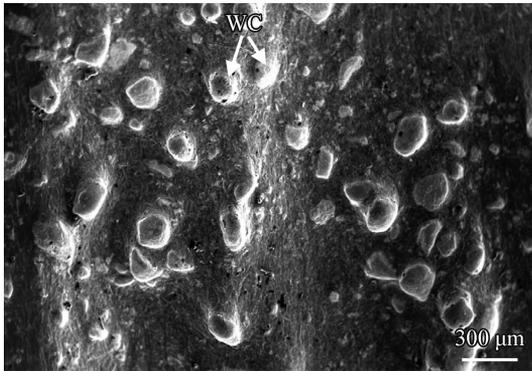
表3 磨粒磨损试验结果

Table 3 Results of abrasive wear test

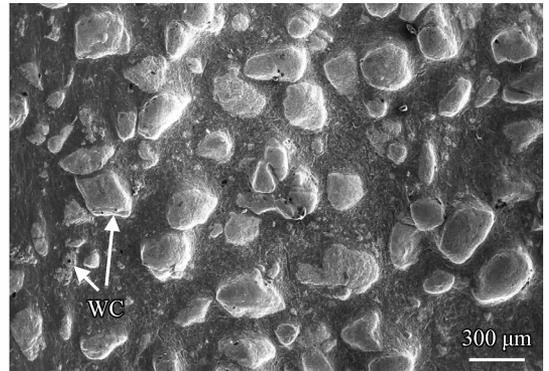
Sample	WC content (w/%)	Wear mass loss/mg	Abrasion resistance
WC0	0	1.083	1.00
WC55	55	0.138	7.83
WC75	75	0.124	8.70

WC 颗粒增强镍基耐磨堆焊合金是由韧性较好的镍基固溶体和大量弥散分布的 WC 硬质相组成。堆焊过程中 B、Si 元素能使镍基基体固溶强化,另外,加入的 WC 硬质相能够对堆焊合金起到弥散强化的作用。这两种强化作用,使得堆焊合金的耐磨性增强。

WC 增强镍基耐磨堆焊合金在磨粒磨损的过



(a) WC55



(b) WC75

图5 堆焊合金的磨损表面形貌

Fig. 5 Worn surface morphologies of the hardfacing alloys

### 3 结论

(1) Ni-B-Si-WC 合金体系的药芯焊丝在 Q235 上以 MIG 堆焊的方法制备出 WC 颗粒增强镍基堆焊合金层,堆焊层中硬质相与镍基基体相之间为冶金结合,无裂纹,气孔等缺陷的堆焊层。

(2) WC 颗粒增强镍基耐磨堆焊合金组织是由 Ni 基固溶体,与  $Ni_3B$ 、 $Ni_3Si$  和白色未熔的、重新析出的 WC 硬质相颗粒组成。

(3) WC 含量一定的条件下,随着热输入的增大,WC 颗粒的溶解使得增强相减少,堆焊层的硬度降低。在相同的热输入下,文中 WC 硬质相的体积分数越高,堆焊层的抗磨粒磨损性能就越强,磨损失重越少。

程中,由于镍基基体的硬度远低于 WC 颗粒的硬度,由图 5 可以看出,镍基基体受磨料尖角的切削作用优先磨损下凹,随着镍基基体的不断流失,表层及次表层的 WC 颗粒便逐渐凸显并裸露出来承受磨料的冲击和切削,这些凸起的 WC 颗粒便产生了“阴影效应”,起到了耐磨骨架的作用,可以有效的保护镍基基体。而镍基基体以其软而韧的特性,对 WC 颗粒起到“支撑效应”,保护 WC 硬质颗粒的存在,提高了材料表层抵抗塑性变形的能力。处在“阴影”中的镍基基体被冲击和切削的几率减小,磨损程度变轻,从而起到耐磨、减摩的作用,使得堆焊合金的抗磨粒磨损性能增强。

从上述试验结果可见,相同的热输入下,WC 硬质相的体积分数越高,堆焊层越耐磨。

### 参考文献

- [1] Katsich C, Badisch E. Effect of carbide degradation in a Ni-based hardfacing under abrasive and combined impact/abrasive conditions [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 206 (6): 1062-8.
- [2] Liyanage T, Fisher G, Gerlich A P. Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni-WC overlays using different Ni-alloy chemistries [J]. *Wear*, 2012, 274: 345-354.
- [3] Ilo S, Just Ch, Badisch E, et al. Effects of interface formation kinetics on the microstructural properties of wear-resistant metal-matrix composites [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(23): 6378-85.
- [4] 郝建军, 赵建国, 彭海滨, 等. 氩弧熔覆 WC 颗粒增强镍基涂层的组织与性能分析 [J]. *焊接学报*, 2009, 30(12): 26-28.

- [5] Just CH, Badisch E, Wosik J. Influence of welding current on carbide/matrix interface properties in MMCs [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(2): 408-414.
- [6] 傅卫, 王惜宝, 陈国喜. 镍基 WC 等离子弧熔敷层的组织和高温磨损性能 [J]. 焊接学报, 2009, 30(5): 65-68.
- [7] Tillmann W, Vogli E, Baumann L, et al. Wear-protective cermet coatings for forming tools [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2010, 41(7): 597-607.
- [8] 袁有录, 李铸国. WC-Ni 增强 Fe 基梯度涂层的制备及组织性能 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 37-44.
- [9] Vespa P, Pinard P T, Gauvin R, et al. Analysis of WC/Ni-based coatings deposited by controlled short-circuit MIG welding [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(6): 865-876.
- [10] Klimpel A, Dobrzanski L A, Kik T, et al. Robotized GMA surfacing of cermetallic layers [J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006, 17(1/2): 361-364.
- [11] Badisch E, Kirchgabner M. Influence of welding parameters on microstructure and wear behavior of a typical NiCrBSi hardfacing alloy reinforced with tungsten carbide [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202: 6016-22.
- [12] 戎磊, 黄坚, 李铸国. 激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基金属涂层的组织和性能 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 40-44.
- [13] Klimpel A, Gorka J. The effect of the GMA cermet-wire surfacing method on the weld quality in multipass welding [J]. Welding International, 2006, 20(3): 206-212.
- [14] 曲仕尧, 王新洪, 邹增大, 等. WC 硬质合金颗粒堆焊烧损的机理 [J]. 焊接学报, 2001, 22(2): 85-88.
- [15] 王淑峰, 李惠琪, 迟静, 等. 等离子原位冶金复合碳化钨合金组织特性与结晶机理研究 [J]. 材料工程, 2011(8): 72-76.
- [16] 柴禄, 李慧琪, 姬强, 等. 原位冶金反应碳化钨增强铁基复合材料 [J]. 材料热处理学报, 2012, 33: 33-36.
- [17] 叶大伦. 实用无机物热力学数据手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 175-1127.
- [18] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学数据手册 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993: 83-419.

作者地址: 北京市朝阳区平乐园 100 号 100124  
北京工业大学材料科学与工程学院  
Tel: (010) 6739 2168  
E-mail: dyhe@bjut.edu.cn

(责任编辑: 常青)

• 本刊副理事长单位介绍 •

大连海事大学董氏镀膜有限公司

大连海事大学董氏镀膜有限公司是应用“铁基合金镀铁再制造技术”修复内燃机车曲轴、船舶柴油机曲轴、直轴以及其它机械设备零件为主导产品的高新技术企业。公司成立于 1992 年,是辽宁省镀铁工程技术中心的依托单位,下属有深圳海安船舶工程有限公司、上海董世机修有限公司、辽宁省镀铁工程技术中心及天津办事处。

公司具有先进完善的镀铁、加工、检测、试验设备和科学合理的管理体系。拥有 4 条镀铁自动控制生产线,5 米、4 米、3 米曲轴磨床,最大可修复长达 8 米,重 10 吨的曲轴、精密龙门铣床、曲轴整体磁粉探伤机、动平衡机、一级检测平台、激光直准仪、大型金相显微镜、疲劳试验机、万能力学试验机、原子火焰光谱监测仪等生产、检测和实验设备。

大连海事大学董氏镀膜有限公司 1994 年获中国船级社工厂认可、铁道部认证,2000 年获英国劳氏船级社工厂认可,2007 年获俄罗斯船级社工厂认可。1999 年获 ISO9000 质量管理体系认证,2003 年获 ISO14000 环境管理体系认证。

大连海事大学董氏镀膜有限公司成立十几年来,在深圳、上海、鞍山等地建立了分公司,服务的客户遍及国内外,已累计修复船舶曲轴 4000 多根,已修复内燃机车曲轴近 2000 多根,并利用自身的技术优势,陆续开发了柴油机连杆、机体、缸套、阀杆等贵重零部件的修理业务,迄今为止已为国内外船舶修复柴油机连杆、机体等机器零件上万件,为用户节约资金近 20 亿余元。

公司核心技术是在“董氏无刻蚀低温镀铁修复技术”基础上发展的“铁基合金镀铁再制造技术”。此技术拥有两项国家专利,获得交通部科技进步一等奖、辽宁省科技进步三等奖、联合国技术信息促进系统中国分部“发明创新科学技术之星”等诸多荣誉。