

# 自保护药芯焊丝明弧堆焊 Fe-Cr-C-B-W 合金的组织及性能

贾华<sup>1,2</sup>, 刘政军<sup>2</sup>, 李萌<sup>1</sup>, 宗琳<sup>3</sup>

(1. 大连海洋大学, 大连, 116300; 2. 沈阳工业大学, 沈阳, 110870; 3. 沈阳化工大学, 沈阳, 110142)

**摘要:** 采用自保护药芯焊丝明弧堆焊技术制备五组不同钨含量的 Fe-Cr-C-B-W 合金. 借助金相显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、洛氏硬度计和磨损试验机分析堆焊合金的组织及性能. 结果表明, 合金的显微组织由马氏体、残余奥氏体、 $M_7(C,B)_3$ ,  $M_3(C,B)$ ,  $Fe_3W_3C$  和 WC 组成. 大部分钨元素被迁移到晶界生成了比 WC 稳定性更好的  $Fe_3W_3C$  缺碳复合相, 堆焊层中没有典型的初生 WC 硬质相颗粒生成. 随着钨添加量的增多, 共晶硬质相  $M_7(C,B)_3$ ,  $M_3(C,B)$  和  $Fe_3W_3C$  随之增多, 间距减小, 呈连续网状均匀分布. 当钨的添加量为 12% 时, 堆焊层的耐磨性达到最佳.

**关键词:** 自保护药芯焊丝; 明弧堆焊; Fe-Cr-C-B-W 合金; 组织及性能

**中图分类号:** TG 455 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190506002

## 0 序言

金属基复合材料具有陶瓷硬质相颗粒和金属基体共同的优点, 在提高材料耐磨性方面具有较大的优势<sup>[1-7]</sup>. 在众多陶瓷硬质相颗粒中, 碳化钨(WC)具有硬度高、熔点(2 800 °C)高、热膨胀系数低、耐磨性和抗热冲击性优良等特点, 并且与基体组织润湿性良好, 从而在颗粒增强金属基复合材料中的应用较为广泛<sup>[8-9]</sup>. 目前关于 WC 增强金属基复合材料性能的研究主要集中在采用激光熔覆的镍基合金和钴基合金<sup>[10-11]</sup>, 或者是直接外加 WC 硬质相颗粒提高金属复合材料性能等方面<sup>[12]</sup>, 而有关采用药芯焊丝明弧堆焊原位生成 WC 陶瓷硬质相颗粒增强铁基合金堆焊层性能的研究报道较少. 因此采用自保护药芯焊丝明弧堆焊制备的 Fe-Cr-B-C-W 堆焊合金为研究目标, 通过改变药芯中钨的添加量, 研究钨对堆焊合金显微组织及其耐磨性影响, 为优化 WC 颗粒增强铁基堆焊合金耐磨性能提供理论依据.

## 1 试验方法

药芯焊丝的钢带为 H08A(尺寸为 16 mm ×

0.3 mm), 药粉由石墨(99.5% C, 质量分数, 下同)、高碳铬铁(60.6% Cr, 8.24% C)、硼铁(19.38% B)和钨粉(98% W)组成, 并添有少量的造渣剂和造气剂(铝粉、CaO,  $Al_2O_3$  和萤石). 固定药粉中铬、碳和硼的含量不变, 在 3%~15% 范围内改变钨的添加量, 不足 100% 的部分由还原铁粉补充, 制备五组不同钨含量的药芯焊丝, 直径为 2.8 mm. 采用明弧堆焊的方法在尺寸为 100 mm × 80 mm × 12 mm 的 Q235 金属表面制备 Fe-Cr-C-B-W 堆焊合金. 堆焊工艺参数为: 电弧电压 25~30 V, 焊接电流 180~200 A, 焊接速度 10 mm/s, 焊丝伸长长度 15 mm. 为满足后续的试验要求并减轻母材金属对堆焊层的稀释作用, 需要堆焊三层合金, 而每层合金均由三道焊缝组成. 堆焊层的化学成分见表 1.

堆焊结束后, 将焊缝表面打磨平整, 沿焊缝横

表 1 不同钨添加量时堆焊层的化学成分(质量分数, %)  
Table 1 Chemical compositions of surfacing layer with different W contents additions

钨添加量w(%)	Cr	C	B	W	Fe
3	13.31	1.47	0.52	0.84	余量
6	13.55	1.52	0.51	1.71	余量
9	12.79	1.54	0.52	2.55	余量
12	12.94	1.51	0.55	3.47	余量
15	13.48	1.54	0.53	4.29	余量

收稿日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51901141); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(QL201914).

断面制作金相试样. 试样经磨制和抛光后采用 4% 硝酸酒精腐蚀, 再用水和酒精依次进行清洗后吹干. 分别用 OMLPUS BX-6 型金相显微镜和日立 S-3400N 型扫描电子显微镜观察显微组织. 采用布鲁克 D8 型 X 射线衍射仪分析物相组成. 采用 HRC-150 型洛氏硬度计测试宏观硬度. 将试样制成尺寸为  $56\text{ mm} \times 27\text{ mm} \times 11\text{ mm}$  的磨损试样, 采用 MLS-23 型橡胶轮式湿砂磨损试验机进行磨损试验. 磨损试验参数为: 石英砂粒度 40~70 目, 胶轮直径 150 mm, 胶轮转速 240 r/min, 胶轮表面压力 1.5 MPa, 磨损时间 3 min. 磨损前用分析天平测量出试样的重量  $G_0$ , 将磨损后试样吹干, 测出磨损后的重量  $G_1$ , 计算出试样被磨损的重量  $\Delta G = G_0 - G_1$ . 磨损试验后, 采用扫描电子显微镜观察磨损试样的磨损形貌.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 堆焊层的 X 射线衍射分析

图 1 是钨添加量为 12% 时堆焊层的 XRD 衍射图谱. 从图中可以看出, 堆焊层的显微组织主要由马氏体、残余奥氏体、 $M_7(C,B)_3$ ,  $M_3(C,B)$ ,  $Fe_3W_3C$  和 WC 组成, 其中 M 代表 Fe, Cr 和 W 元素. 图谱中  $M_7(C,B)_3$  的衍射峰较强, 说明它在组织中的含量

较多. 在图谱中检测到含有 W 元素的物相有 WC 和  $Fe_3W_3C$ , 其中 WC 的衍射峰较弱,  $Fe_3W_3C$  的衍射峰较高, 说明堆焊层中 WC 的生成量较少, 同时也说明 W 元素更倾向于生成复合式碳化物  $Fe_3W_3C$ .

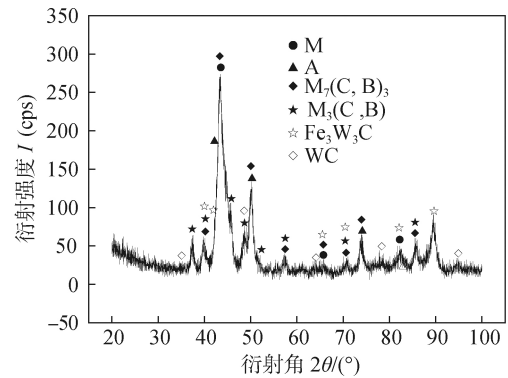


图 1 钨的添加量为 12% 时堆焊层的 XRD 衍射图谱  
Fig. 1 XRD diffraction patterns of surfacing layer with different W contents additions

### 2.2 堆焊层的显微组织分析

图 2 是不同钨添加量时堆焊层的金相组织形貌. 从图中可以看出, 堆焊层为典型的亚共晶组织, 由呈树枝晶的奥氏体初生相和共晶组织 (共晶奥氏体、 $M_7(C,B)_3$ ,  $M_3(C,B)$ ,  $Fe_3W_3C$  和 WC) 组成, 共晶组织呈网状分布在奥氏体初生相的枝晶间. 当钨的添加量为 3% 和 6% 时, 基体组织较多, 晶粒尺寸较大, 而共晶组织相对较少, 如图 2a, 2b 所示. 当钨的

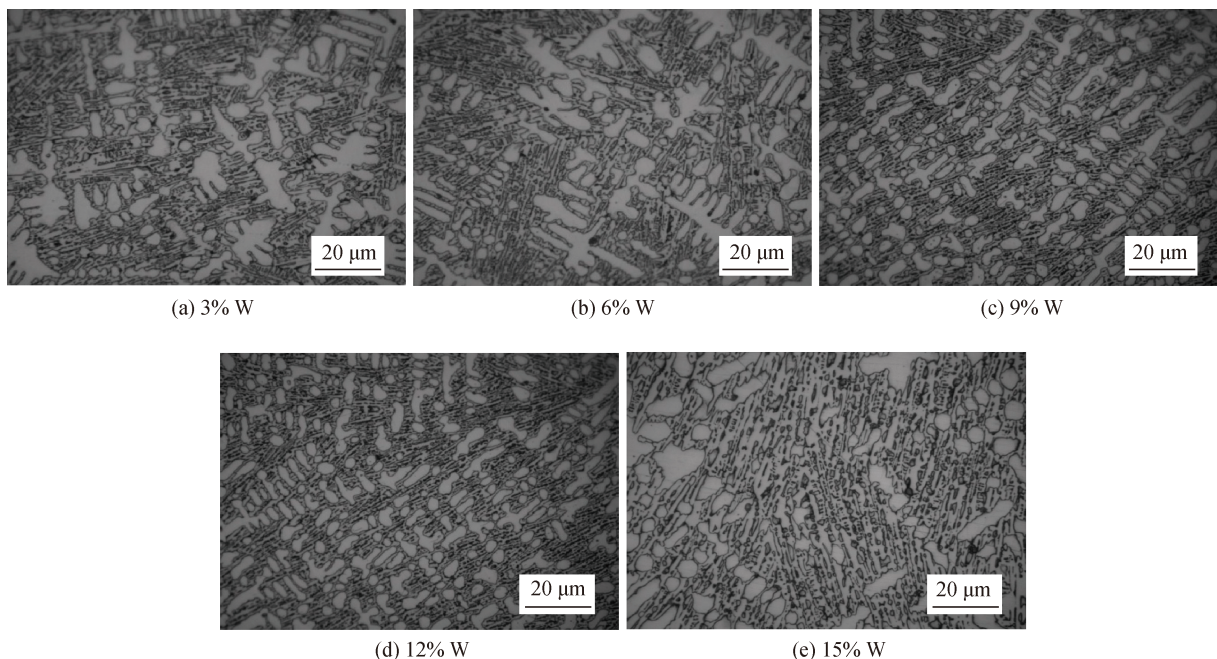


图 2 不同钨添加量时堆焊层的金相组织形貌

Fig. 2 Metallographic structure of surfacing layer with different W contents additions. (a) 3% W; (b) 6% W; (c) 9% W; (d) 12% W; (e) 15% W

添加量为 9% 和 12% 时, 基体组织减少, 晶粒尺寸减小, 共晶组织增多, 间距减小, 呈网状均匀分布在基体组织周围, 如图 2c, 2d 所示. 当钨的添加量为 15% 时, 基体组织的数量最少, 大部分都为共晶组织, 如图 2e 所示. 通过前面的 XRD 分析检测到有 WC, 但是在图 2 中却找不到典型的 WC 硬质相颗粒状, 说明 WC 的生成量较少, 分布在组织中不太容易辨认.

为了研究堆焊层组织中各个元素的分布情况, 对钨添加量为 12% 时的堆焊层进行了面扫描成分分析, 结果如图 3 所示. 图 3a 为堆焊层的扫描组织

形貌, 图 3b ~ 3e 分别为 W 元素、C 元素、Cr 元素和 Fe 元素的分布情况. 由于硼的原子半径小, 元素分布情况不明显, 图中没有列出. 对照各元素在组织中的分布情况可知, 基体组织中主要是 Fe 元素, 并且还有少量的 Cr, C 和 W 元素分布. 这些元素固溶在基体中可产生固溶强化作用, 提高基体组织的硬度. Cr, C, W 和 Fe 元素在共晶组织中均有分布, 结合上面的 XRD 分析可知,  $M_7(C,B)_3$ ,  $M_3(C,B)$  和  $Fe_3W_3C$  相都应分布在共晶组织中. 图中没有显示出 WC 陶瓷硬质相颗粒的组织形貌, 考虑可能与它的含量较少并且颗粒尺寸较小有关.

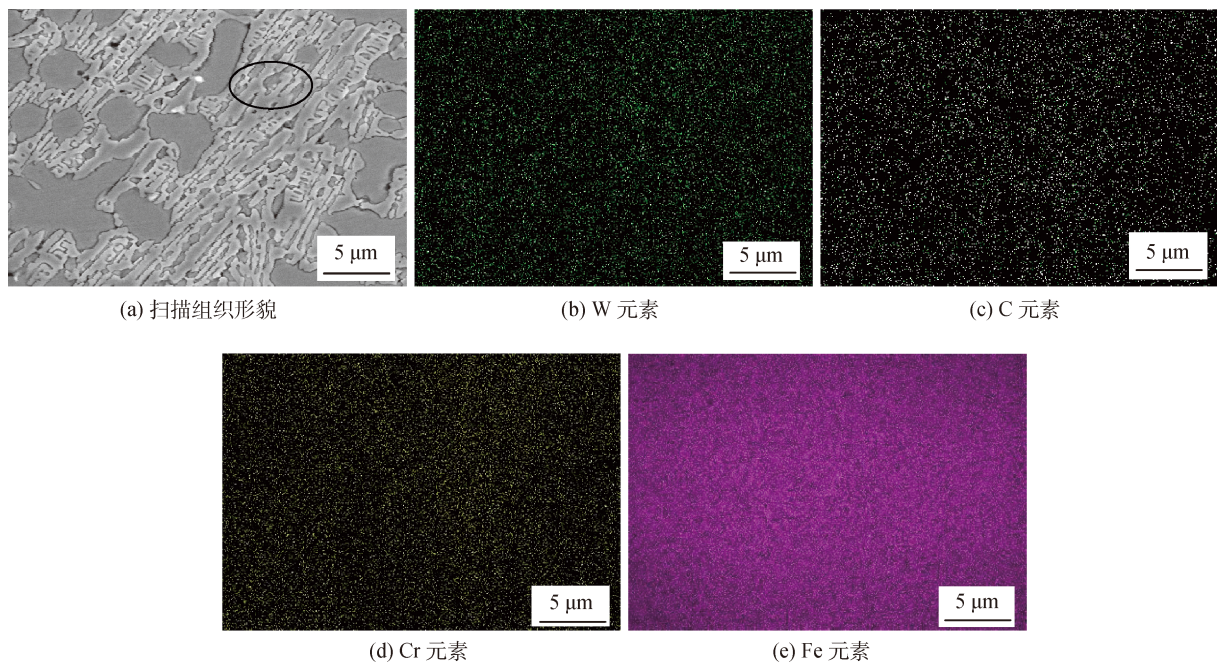


图 3 钨添加量为 12% 时堆焊层的面扫描图片

Fig. 3 Surface scanning image of surfacing layer for W content is 12%. (a) scanning microstructure; (b) W element; (c) C element; (d) Cr element; (e) Fe element

在药芯焊丝的配方中加入钨, 目的是生成 WC 硬质相颗粒, 提高堆焊层的硬度和耐磨性. 虽然通过 XRD 检测到有 WC 的衍射峰, 但是在钨添加量为 12% 时, 将堆焊层的显微组织放大到 2 000 倍也未能找到较明显的 WC 陶瓷硬质相颗粒. 而在图 3a 中标注的位置, 共晶组织的基体上能够看到有很小的颗粒状物质存在. 为了进一步探究共晶组织上小颗粒状物质的微观形貌, 将钨添加量为 12% 的组织放大到 5 000 倍, 发现在共晶组织的基体上确实有白亮的小块状颗粒存在, 结合前面的 XRD 分析可以判断, 该微小亮白的颗粒状物质应该就是 WC, 如图 4 所示.

产生上述现象主要与堆焊层中碳和钨的含量

低有关. 由 W-C 合金相图可知<sup>[13]</sup>, 当碳的质量分数为 3% 时, 碳与钨形成的是  $W_2C$ ; 当碳的质量分数

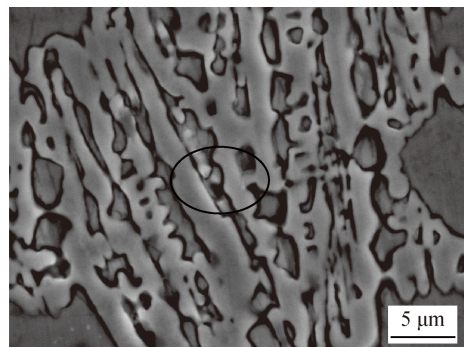


图 4 钨添加量为 12% 时堆焊层的扫描组织形貌

Fig. 4 SEM morphologies of surfacing layer for W content is 12%

为 3.7% 时,碳与钨形成的是  $WC_{1-x}$ ; 只有当碳的质量分数达到 6.13% 时,钨与碳元素才能生成 WC 相。前面测定堆焊层中碳的质量分数为 1.45% ~ 1.55%, 与生成 WC 所要求的质量分数 6.13% 相差较多。而且,堆焊层中还加入了与碳结合力较强的铬元素,这就更进一步降低了生成 WC 的可能性,这是堆焊层组织中没有生成初生 WC 增强颗粒的原因之一。另一个原因是 W 元素在奥氏体中的溶解度较大,最高可达 7% 左右。由于堆焊层中钨含量较少,除了部分钨被固溶在基体组织中,其余部分将随奥氏体初生相的长大被迁移到基体组织周围,与 Fe 和 C 生成比 WC 稳定性更好的缺碳相  $Fe_3W_3C$ ,这也是共晶组织中出现  $Fe_3W_3C$  相的原因。在共晶组织的基体上生成 WC 小颗粒,主要是由于固溶在共晶奥氏体中的碳和钨随着温度降低逐渐析出,当满足 WC 生成的成分条件时,碳与钨元素就相互反应生成了 WC 小颗粒。

### 2.3 堆焊层的耐磨性分析

图 5 是不同钨添加量时堆焊层硬度及磨损量的变化曲线。从图中可以看出,当钨的添加量增多时,硬度增加,磨损量降低,表明堆焊层的耐磨性逐渐改善。当钨的添加量为 12% 时,堆焊层的耐磨性最好,此时硬度从没有添加钨时的 56 HRC 增加到 63 HRC,磨损量从 0.592 3 g 减少到 0.339 5 g。当钨的添加量为 15% 时,硬度降低,磨损量增加,表明堆焊层的耐磨性变差。试验采用明弧堆焊的方法,当钨的添加量较少时,在电弧高温作用下钨烧损较多,过渡系数较小,导致堆焊层中钨的含量较少,作用相对不明显,因此堆焊层的硬度较低,耐磨性较差。随着钨添加量的增多,过渡到堆焊层中的钨含量增加,一方面促进了  $Fe_3W_3C$  和 WC 硬质相

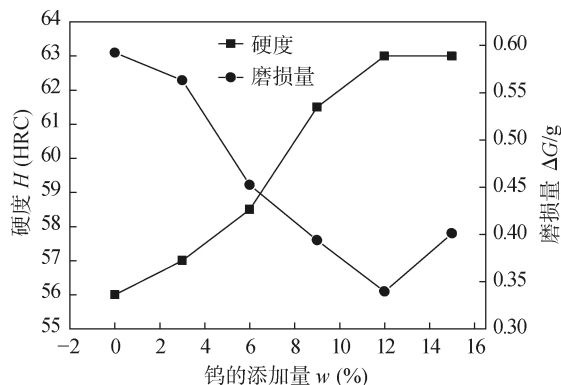


图 5 不同钨添加量时堆焊层硬度和磨损量的变化曲线  
Fig. 5 Variation curves of hardness and wear of surfacing layer with different W contents additions

的形成;另一方面,钨在基体组织中的固溶量增大,所产生的固溶强化作用增强,所以表现为堆焊层的硬度升高,磨损量减少。此后继续增加钨的添加量,堆焊层的硬度降低,磨损量增加,这应该与共晶组织增多导致堆焊层的脆性倾向增加有关。

图 6 是钨添加量为 12% 时堆焊层的磨损形貌。从图中可以看出,在磨损形貌中由磨料磨削作用产生的犁沟数量较少,并且分布比较凌乱,没有连续成片而相互平行的犁沟产生。这表明该堆焊试样的耐磨效果较好,而且通过前面的组织和性能分析也能够证明这一点。

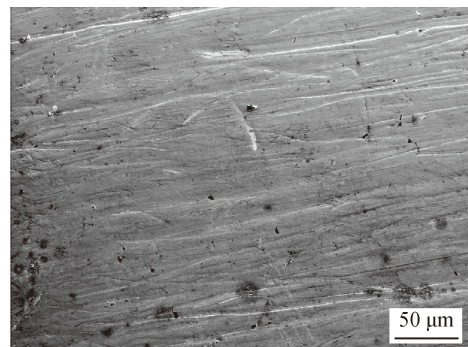


图 6 钨添加量为 12% 时堆焊层的磨损形貌  
Fig. 6 Wear morphologies of Fe-Cr-C-B-W alloy surfacing

## 3 结论

(1) Fe-Cr-C-B-W 堆焊合金的显微组织主要由马氏体、残余奥氏体、 $M_7(C,B)_3$ ,  $M_3(C,B)$ ,  $Fe_3W_3C$  和 WC 组成。原位反应生成的细小 WC 颗粒分布在共晶组织的基体上。

(2) W 元素除了部分固溶于初生奥氏体和共晶奥氏体中,其大部分被迁移到晶界生成了比 WC 稳定性更好的  $Fe_3W_3C$  缺碳复合相,使得堆焊层中没有典型的初生 WC 硬质相颗粒生成。

(3) 随着钨含量的增多,共晶硬质相  $M_7(C,B)_3$ ,  $M_3(C,B)$  和  $Fe_3W_3C$  随之增多,间距减小,呈连续网状均匀分布。当钨的添加量 12% 时,堆焊层的耐磨性达到最佳,此时硬度从没有添加钨时的 56 HRC 增加到 63 HRC,磨损量从 0.592 3 g 减少到 0.339 5 g。

### 参考文献

- [1] 张冀,陈金梅,冉申,等.碳化硅增强金属基复合材料的新型制备工艺[J].航空制造技术,2014(6):109-112.

- Zhang Ji, Chen Jinmei, Ran Shen, *et al.* New preparation technology of silicon carbide particles reinforced metal matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(6): 109–112.
- [2] Tang S L, Gao Y M, Li Y F. Recent developments in fabrication of ceramic particle reinforced iron matrix wear resistant surface composite using infiltration casting technology[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2014, 41(8): 633–640.
- [3] Ma Y P, Li X L, Wang C H, *et al.* Microstructure and impact wear resistance of Ti N reinforced high manganese steel matrix[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2012, 19(7): 60–65.
- [4] 宗琳, 郭宁, 张晓玲. 原位合成 (Ti, V)C 增强铁基耐磨复合材料的研制 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(8): 10–14.  
Zong Lin, Guo Ning, Zhang Xiaoling. Investigation on wear resistance of in-situ (Ti, V)C reinforced Fe-based composite material[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(8): 10–14.
- [5] 刘政军, 勾健, 贾华, 等. Fe-Cr-C-B-Nb 堆焊合金的显微组织和耐磨性 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(3): 75–78.  
Liu Zhengjun, Gou Jian, Jia Hua, *et al.* Microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C-B-Nb hardfacing alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(3): 75–78.
- [6] Liu Z J, Su J G, Liu D, *et al.* Influence of magnetic field on microstructure and properties of Ni60 plasma surfacing layer[J]. *China Welding*, 2005, 14(2): 145–148.
- [7] He Yanan, Song Qiang, Sun Kang, *et al.* Microstructure and properties of in-situ chromium carbide composite coating by laser cladding[J]. *China Welding*, 2018, 27(4): 10–17.
- [8] 王智慧, 杨爱弟, 贺定勇, 等. 真空熔覆镍基合金涂层中碳化钨颗粒转变行为 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(10): 1869–1871.  
Wang Zhuhui, Yang Aidi, He Dingyong, *et al.* The transformation of WC in Ni-based alloy coating by vacuum melting[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(10): 1869–1871.
- [9] 袁有录, 李铸国. 原位自生 WC 增强 Fe 基涂层的组织及干滑动摩擦磨损性能 [J]. *材料工程*, 2016, 44(5): 47–53.  
Yuan Youlu, Li Zhuguo. Microstructure and dry sliding friction and wear properties of in-situ synthesized WC reinforced Fe-based coating[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(5): 47–53.
- [10] 李震, 孙荣禄. 激光功率对 Ni 基 WC 熔覆层组织和性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2016, 41(9): 107–110.  
Li Zhen, Sun Ronglu. Influence of laser power on microstructure and properties of Ni-based WC clad layer[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(9): 107–110.
- [11] 徐卫仙, 张群莉, 姚建华. 热锻模激光熔覆 Co 基 WC 涂层的高温磨损性能研究 [J]. *应用激光*, 2013, 33(4): 370–375.  
Xu Weixian, Zhang Qunli, Yao Jianhua. Research on high-temperature wear resistance of laser cladding Co-based WC composite coating on hot-forging die[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(4): 370–375.
- [12] 吴慧剑, 龚建勋, 刘江晴, 等. WC 含量对明弧堆焊奥氏体合金显微组织及耐磨性的影响 [J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2016, 21(4): 562–568.  
Wu Huijian, Gong Jianxun, Liu Jiangqing, *et al.* Effects of WC content on the microstructure and abrasion wear of open arc hardfacing austenitic alloy[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2016, 21(4): 562–568.
- [13] Berndt A F. Binary phase diagrams[J]. *Journal of Chemical Education*, 2001, 46(46): 3733–3736.

第一作者简介: 贾华, 1983 年出生, 博士, 讲师; 主要从事特种焊接材料、焊接材料冶金及表面强化技术; 已发表论文 10 余篇; Email: [jiahua110023@126.com](mailto:jiahua110023@126.com).  
通信作者简介: 刘政军, 教授; Email: [liuzhengjun1962@163.com](mailto:liuzhengjun1962@163.com).

(编辑: 曲畅)

unmelted defects.

**Key words:** infrared vision; gas metal arc welding; image processing; apparent defect; pattern recognition

**Microstructure and mechanical properties of joints of a new Al-Mg-Mn-Er alloy by TIG welding** WANG Hu<sup>1,2</sup>,

JIN Likun<sup>3</sup>, PENG Yun<sup>2</sup> (1. North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang, 065000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Steel Processes and Products, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing, 100081, China; 3. Beijing Hainachuan Automotive Parts Co., Ltd., Beijing, 100083, China). pp 74-79

**Abstract:** New Al-Mg-Mn-Er alloy sheets were welded by TIG welding with filler wires. The microstructure and mechanical properties of the joints were studied. The results show that the center of the weld seam is mainly composed of equiaxed crystals. There is no typical epitaxial solidification appeared, but a fine-grained zone with width of 100  $\mu\text{m}$  is formed near the fusion line. The recrystallized structure is appeared in the heat affected zone. The precipitates in the weld zone mainly exist in the form of primary  $\text{Al}_3\text{Er}$ . Compared with the base metal, the size of primary  $\text{Al}_3\text{Er}$  in the weld seam is smaller and its distribution is more uniform. The number of secondary  $\text{Al}_3\text{Er}$  in the weld seam is relatively small and the secondary  $\text{Al}_3\text{Er}$  is from the base metal. The microhardness of the weld zone and the heat affected zone are lower than that of base metal, and the microhardness of the weld zone is the lowest. With the increase of the welding heat input, the tensile strength of the joints increases first and then decreases. When the welding heat input is 218 J/mm, the tensile strength of the joint is the highest which is 71.4% of that of the base metal. The fracture of all tensile samples is located at the weld zone, and the fracture morphology shows the typical ductile fracture characteristics.

**Key words:** Al-Mg-Mn-Er alloy; TIG welding; microstructure; mechanical properties

**Study on resistance welding process of PPS/CF composite**

JI Zhaohui, WANG Hongyang, SUN Lingfeng, LU Pengcheng, WANG Zhiping (Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China). pp 80-85

**Abstract:** Using the heat production characteristics of carbon fiber fabrics to study the electrical welding process of PPS/CF laminates. The test proves that the carbon fiber resistance decreases with the increase of the temperature, and the carbon fiber heats up. The reason for the increase in nonlinearity. By the DSC test, the PPS melting temperature

range was obtained. The micro-morphology of the joint was analyzed by LSCM. The LSS test of the joint was obtained. The main welding process parameters of the resistance welding of the PPS/CF laminate were obtained. (Welding temperature, welding pressure and cooling rate) and its influence on the joint forming and mechanical properties. The results show that the optimized process parameters are welding temperature 390  $^{\circ}\text{C}$ , welding pressure 0.6 MPa, and cooling rate 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . At this time, the welded joint has the highest shear strength, which can reach the base material's own shear strength 65%.

**Key words:** thermoplastic composite; carbon fiber; resistance welding; shear strength

**Microstructure and properties of Fe-Cr-C-B-W alloy by self-shielded flux-cored wire open-arc surfacing** JIA

Hua<sup>1,2</sup>, LIU Zhengjun<sup>2</sup>, LI Meng<sup>1</sup>, ZONG Lin<sup>3</sup> (1. Applied Technology College of Dalian Ocean University, Dalian, 116300, China; 2. Shenyang University of Technology, Shenyang, 110870, China; 3. Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang, 110142, China). pp 86-90

**Abstract:** Five Fe-Cr-C-B-W alloy samples with different W contents were prepared by self-shielded flux cored wire arc surfacing technology. Microstructure and properties of surfacing alloys were analyzed by metallographic microscope, scanning electron microscope, X-ray diffractometer, Rockwell hardness tester and wear tester. The results show that the microstructure of the surfacing alloy consists of martensite, retained austenite,  $\text{M}_7(\text{C},\text{B})_3$ ,  $\text{M}_3(\text{C},\text{B})$ ,  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  and WC. Most of W is migrated to the grain boundary to produce  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  C deficiency composite phase which is more stable than the WC. There are no typical primary WC hard phase particles in the surfacing layer. With the increase of W content, the eutectic hard phase  $\text{M}_7(\text{C},\text{B})_3$ ,  $\text{M}_3(\text{C},\text{B})$  and  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  increase, and the spacing decreases. And they are continuous and evenly distributed. When the addition amount of W is 12%, the wear resistance of the surfacing layer is the best.

**Key words:** self-shielded flux cored wire; arc surfacing; Fe-Cr-C-B-W alloy; microstructure and properties

**Effect of weld thermal cycle on low temperature toughness of 09MnNiDR steel heat affected zone** ZHANG

Lihong<sup>1,2</sup>, CHEN Furong<sup>1</sup>, CHANG Jiangang<sup>1</sup> (1. Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, 010051, China; 2. Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Hohhot, 010070, China). pp 91-96

**Abstract:** The effect of welding heat cycle on low temperature toughness of the coarse-grained heat affected zone