

# TIG 焊 FeAlNbB 堆焊层的组织与性能

赵 飞, 周 勇, 党墨含, 邢晓芳

(西安石油大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 采用药芯焊丝 TIG 堆焊方法在 20 钢表面制备了 FeAlNbB 堆焊层。借助光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD) 和显微硬度计对堆焊层的微观组织、相结构、显微硬度等性能进行了测试分析。结果表明: 堆焊层组织均匀, 结构致密, 无气孔及裂纹等缺陷, 与基体实现了良好的冶金结合; 堆焊层组织主要为铁素体基体上弥散分布着金属间化合物, 熔合线附近有少量魏氏体组织形成, 热影响区出现了少量贝氏体组织; 堆焊层主要由  $\alpha$ -Fe、Fe<sub>3</sub>Al、FeAl 相组成, 并含有少量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相; 堆焊层的平均硬度为 736 HV0.1 左右, 较基体有明显提高, 有利于改善材料的耐磨损性能。

**关键词:** TIG 堆焊; FeAlNbB 堆焊层; 组织; 性能

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.20183910

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2020)05-0053-04

## Microstructure and Properties of FeAlNbB Surfacing Layer

### Prepared by TIG Welding

ZHAO Fei, ZHOU Yong, DANG Mohan, XING Xiaofang

(School of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The FeAlNbB surfacing layer was prepared on the surface of 20 steel by flux-cored wire argon tungsten-arc welding. The microstructure, phase structure and microhardness of the surfacing layer were analyzed by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometry (EDS), X-ray diffraction (XRD) and microhardness tester. The results show that the surfacing layer presents uniform and dense microstructure with defect-free of pore and crack, and good metallurgical bond with the substrate. The microstructure of the surfacing layer is mainly ferrite matrix with dispersed intermetallic compounds, and a small amount of widmanstatten structure is generated near the fusion line. A small amount of bainite is found in the heat affected area. The surfacing layer is mainly composed of  $\alpha$ -Fe, Fe<sub>3</sub>Al, FeAl as well as a little Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase. The average microhardness of the surfacing layer is about 736 HV0.1, and its mean microhardness is obviously higher than that of substrate, which can improve the anti-wear property of the material.

**Key words:** TIG welding; FeAlNbB surfacing layer; microstructure; properties

堆焊是利用焊接热源在机械零件表面熔敷一层具有一定性能的材料并形成冶金结合的一种工艺过程,其目的是赋予材料表面优异的耐磨、耐蚀、抗氧化等特殊性能,从而延长零部件的使用寿命,保护设备的安全有效运行<sup>[1-2]</sup>。堆焊作为机械工业中一种重

要的表面改性方法,已经广泛应用在矿山、冶金、电站、铁路、石油、化工设备等制造和维修工作中<sup>[3-4]</sup>。常用的堆焊方法有焊条电弧堆焊、埋弧堆焊、火焰堆焊、等离子堆焊、CO<sub>2</sub> 气体保护堆焊、钨极氩弧堆焊等。其中钨极氩弧焊 (TIG) 在堆焊过程中电弧稳定、热量集中、飞溅少、容易获得优质可靠的焊接质量,尤其适用于有色金属和一些特殊合金钢的零部件堆焊<sup>[5-6]</sup>。

Fe-Al 金属间化合物具有优异的抗氧化性、耐腐蚀性和较高的高温强度等优点,但是其室温脆性大、塑性差、难以加工成型等问题是限制 Fe-Al 金属间化合物向实用化方面发展的主要障碍<sup>[7-9]</sup>。宫文彪等<sup>[10]</sup>用钨极氩弧堆焊方法制备了 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>p/Fe-Al 合金堆焊层,发现堆焊层具有良好的耐高温氧化性能,主

收稿日期:2018-12-13

基金项目:西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(YCS172 1038);西安石油大学《材料科学与工程》省级优秀学科资助项目(YS37020203)

作者简介:赵飞(1994-),男,陕西彬州人,硕士研究生,主要研究方向:石油工程材料的焊接与表面工程技术;电话:15319028934;

E-mail:455723017@qq.com

通讯作者:周勇(1963-),男,上海南汇人,教授,博士,主要研究方向:石油工程材料的焊接与表面工程技术;电话:13892815331;

E-mail:yzhou@xsyu.edu.cn

要由 FeAl、Fe<sub>3</sub>Al、Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>、FeCr 和少量的 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 相组成。邹因素等<sup>[1]</sup>利用 TIG 堆焊方法制备了 Fe 基非晶堆焊层,堆焊层结构均匀致密,具有较高的显微硬度与耐磨性能。这些研究表明,钨极氩弧堆焊技术可以大幅提高 Fe 基合金堆焊层的综合性能。因此,通过钨极氩弧堆焊技术制备 Fe 基合金堆焊层在工业制造领域中具有重要意义。本文利用钨极氩弧堆焊技术在 20 钢基体表面制备了 FeAlNbB 堆焊层,分析了堆焊层的组织结构和物相组成,并对硬度进行了测试。

## 1 试验材料及方法

基体材料选用 20 钢冷却水化学处理标准腐蚀 I 型试片(50 mm×25 mm×2 mm)。堆焊焊丝选用自主设计的含有 Al、Nb、B 粉的药芯焊丝,所填充的 Al、Nb、B 粉的纯度均达到 99.9% 以上,外皮选用 H08C 钢带,药芯焊丝的直径为 2.0 mm。焊丝成分见表 1。

表 1 FeAlNbB 药芯焊丝成分(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of FeAlNbB cored wire(wt%)

Al	B	Nb	Fe
<18	<5	<10	余量

堆焊前将基体表面用粗砂纸打磨,去掉表面的氧化皮和铁锈等污染物,然后用丙酮将基体表面的油污清洗干净。焊前对焊丝进行 200℃×30 min 预热,之后立即进行堆焊。采用欧地希机电(青岛)有限公司生产的 VRTP-400 型直流脉冲焊机进行堆焊,堆焊层数为 1 层,厚度约为 3~4 mm,焊后空冷至室温。其工艺参数见表 2。

表 2 堆焊工艺参数  
Tab.2 Process parameters of surfacing

电流极性	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(mm·min <sup>-1</sup> )	氩气流量 /(L·min <sup>-1</sup> )
直流正接	64	11	86	11

堆焊完成后,利用线切割方法获得不同尺寸的试样备用。将切割的试样进行研磨、抛光、4%硝酸酒精溶液浸蚀后在 Zeiss Axio 光学显微镜上观察金相组织;采用装有 EDS 附件的 JSM6390A 扫描电镜观察堆焊层的组织形貌,并对堆焊层进行能谱分析;采用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪对堆焊层的物相组成进行定性分析;采用 HXD-1000TMC 数字式显微硬度计测量试样自基体至堆焊层方向的硬度分布,

载荷为 100 g,加载时间为 15 s。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 堆焊层组织形貌分析

图 1 为 FeAlNbB 堆焊层截面形貌。从图 1 中可以看出,堆焊接头截面明显分为堆焊层、热影响区和基体 3 个区域,并且 3 个区域边界连续,没有夹杂物、气孔和裂纹等缺陷出现;堆焊层的组织均匀,结构致密;堆焊层与基体金属之间由于原子的互溶扩散以及界面处温度梯度的存在导致了过渡层的形成,从而形成了良好的冶金结合。

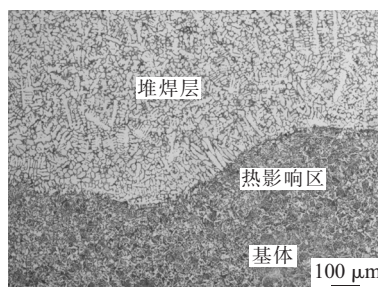


图 1 堆焊层截面形貌

Fig.1 Cross-sectional morphology of surfacing layer

进一步对基体、热影响区和堆焊层进行观察,如图 2 所示。从图 2(a)中可以看出基体主要由铁素体和珠光体组成。图 2(b)热影响区主要由铁素体、珠光体和少量的贝氏体组成,与基体相比,组织成分发生了变化,晶粒也发生了细化。靠近熔合线附近的基体的过热区出现了少量的魏氏体组织,这是由于堆焊时线能量稍大,冷却速度过快引起的。图 2(c)为堆焊层的显微组织,可以看出堆焊层主要组织为铁素体基体上弥散分布着金属间化合物,其主要特征是在垂直熔合线界面上,晶粒呈现柱状排列。这是由于堆焊金属在冷却时,液相中存在一定的过冷度,并在较大温度梯度下,新生晶核沿堆焊层表面冷却速度较大的方向生长,使堆焊层和基体界面处发生联生结晶,从而形成柱状晶。堆焊层晶粒内弥散分布着大量颗粒状析出相,沿晶界也有断续分布的析出物。

图 3 为不同放大倍数下堆焊层截面 SEM 形貌。可以发现,堆焊层组织均匀,结构致密;基体、热影响区、堆焊层三者之间晶界连续,结合良好;堆焊层中弥散分布着大小不等、形状各异的白色片状物质和黑色点状物;基体与堆焊层之间存在明显的过渡区,并且无夹杂物、夹渣、气孔等缺陷。以上现象与金相分析结果一致。从图 3 (b)、(c) 还可以看出,

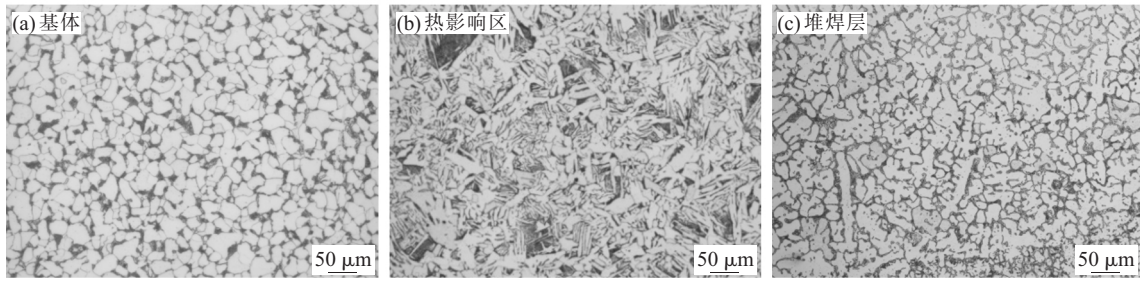


图2 基体、热影响区及堆焊层显微组织形貌  
Fig.2 Microstructure of base material, heat affected zone and surfacing layer

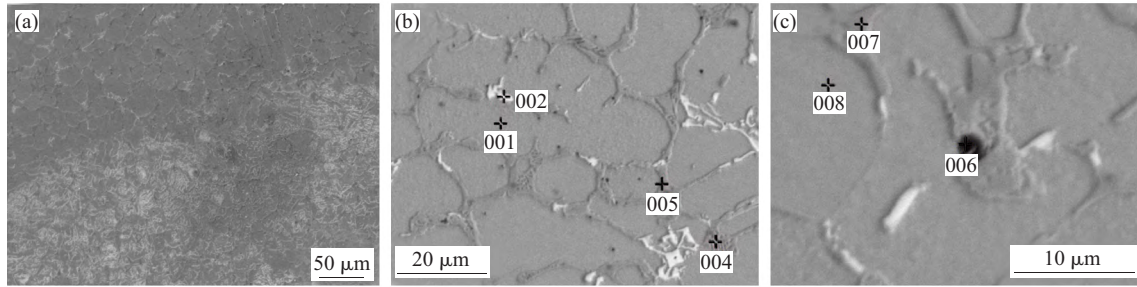


图3 堆焊层截面 SEM 形貌  
Fig.3 SEM morphology of cross-section of surfacing layer

FeAlNbB 堆焊层大致可以分为亮白色、深灰色、淡灰色和黑色点状物 4 个区域。对不同区域进行 EDS 能谱点扫描,分析结果见表 3。从表中可以看出,001 和 008 为浅灰色区域,该区域主要为 Fe、Al 元素,可能形成 FeAl 相;002 亮白色区域,该区域主要为 Fe、Al 和少量的 Nb、B 元素,从元素含量分析可以看出可能形成  $Al_3Nb$  相;004、005 和 007 为深灰色区域,该区域含有大量的 Fe 元素,并含有少量的 Al 元素,其中 005 区域可能形成  $Fe_3Al$  相;006 区域为黑色点状物区域,该区域含有 Fe、Al 和 O 元素,可能为金属氧化物。通过以上分析,可以推断出堆焊层是由金属间化合物、氧化物和部分未溶颗粒组成。

表 3 图 3 中堆焊层微区成分(质量分数,%)  
Tab.3 Composition of micro-zones of the surfacing layer in Fig.3 (wt%)

点区域	Fe	Al	Nb	B	O
001	43.55	54.96	1.23	0.26	-
002	32.09	40.35	14.73	12.83	-
004	98.57	1.43	-	-	-
005	73.51	26.49	-	-	-
006	15.68	35.27	-	-	49.05
007	96.88	3.12	-	-	-
008	97.23	2.77	-	-	-

## 2.2 堆焊层物相结构分析

图 4 为堆焊层的 X 射线衍射图谱。从图谱分析可知,粉芯焊丝经过氩弧加热、熔化和冷却结晶形成

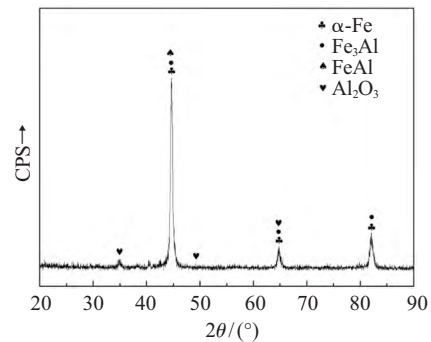


图 4 堆焊层 X 射线衍射图谱  
Fig.4 X-ray diffraction pattern of surfacing layer

了新相  $\alpha$ -Fe、 $Fe_3Al$ 、FeAl 和少量的  $Al_2O_3$ 。其中生成的 FeAl 和  $Fe_3Al$  相可以提高基体的高温抗氧化性能, $Al_2O_3$  相的存在可以提高堆焊层的硬度,同时也说明了在堆焊过程中焊丝中的部分元素被氧化,这与能谱分析的结果一致。

## 2.3 堆焊层的显微硬度分析

在堆焊试样的纵截面沿着基体向堆焊层表面方向进行等距( $50\mu m$ )显微硬度测试,测试结果如图 5 所示。由图 5 可以发现,基体的显微硬度在 160 HV0.1 左右,堆焊层的显微硬度在 736 HV0.1 左右,基体与堆焊层之间的显微硬度呈明显的梯度分布,堆焊层硬度显著高于基体硬度。这一方面是由于基体与堆焊层之间合金含量差异较大;另一方面,堆焊层中存在金属间化合物  $Fe_3Al$ 、FeAl 以及硬质陶瓷

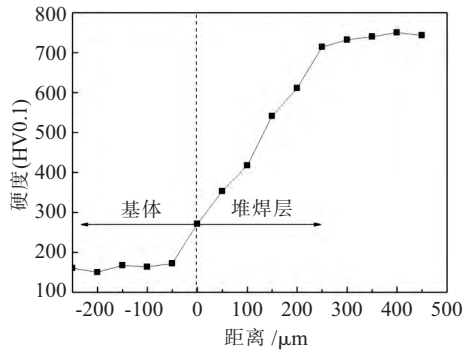


图5 堆焊层截面显微硬度变化曲线

Fig.5 Microhardness change curves of cross-section of surfacing layer

相  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 这些硬质相弥散分布在堆焊层中, 起到弥散强化作用, 从而显著提高了堆焊层的硬度。

### 3 结论

(1) 利用 TIG 焊方法成功地制备了 FeAlNbB 堆焊层, 堆焊层组织均匀, 结构致密, 无气孔及裂纹等缺陷, 与基体实现了良好的冶金结合。堆焊层由金属间化合物、氧化物和部分未溶颗粒组成。

(2) 堆焊层组织主要为铁素体基体上弥散分布着金属间化合物, 熔合线附近有少量魏氏体组织形成, 热影响区出现了少量贝氏体组织。堆焊层主要由  $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Al}$ 、 $\text{FeAl}$  相组成, 并含有少量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相。

(3) 堆焊接头的显微硬度自基体到堆焊层表面呈明显的梯度分布。堆焊层的平均硬度为 736HV0.1

左右, 较基体有明显提高, 有利于改善材料的耐磨损性能。

### 参考文献:

- [1] 班劲明, 刘洪波, 肖景金. 单齿辊碳化钨合金耐磨堆焊[J]. 焊接技术, 2007, 36(5):73-73.
- [2] 王小范, 姚建华, 张群莉. 激光表面堆焊技术的应用及展望[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(4):68-70.
- [3] 刘瑜. 冶金机械设备维修中的堆焊技术分析 [J]. 化工管理, 2015(30):193-193.
- [4] 熊忠琪. 针对腐蚀和磨损的激光堆焊修复技术实验研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [5] 李玉龙, 禹业晓. TIG 堆焊技术研究进展 [J]. 电焊机, 2012, 42(12):70-76.
- [6] 杨凤琦. 钨极氩弧堆焊 Fe 基金粉末熔覆层组织和性能研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2013.
- [7] 汤文明, 唐红军, 郑治祥, 等. Fe-Al 金属间化合物基复合材料的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4):811-826.
- [8] Li C J, Wang H T, Yang G J, et al. Characterization of high-temperature abrasive wear of cold-sprayed FeAl intermetallic compound coating [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(1/2):227-233.
- [9] Xu K, Zhang S Q. Microstructure analysis of laser bonding welding on steel-aluminum [J]. Materials Science Forum, 2018, 911:28-33.
- [10] 宫文彪, 杨帅, 刘威, 等. 氩弧堆焊  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Fe-Al}$  堆焊层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2008(11):66-69.
- [11] 邹因素, 刘俊友, 刘杰, 等. TIG 焊 Fe 基非晶合金堆焊层的组织和性能[J]. 热加工工艺, 2013, 42(1):160-162.

(上接第 52 页)宽, 有效地解决咬边、指状熔深等缺陷, 易于获得大熔宽、小熔深及高熔敷率的焊接。

(3) 旋摆 TIG-MIG 复合热源焊接的熔宽及熔深与 TIG 及 MIG 电流呈现正相关性, 旋摆速度的增加会导致熔深的增加, 而熔宽尺寸则会减小。在旋摆速度一定的情况下, 随着间距的增大, 飞溅数量逐渐增加, 焊缝熔深逐渐由不对称向对称改变。

### 参考文献:

- [1] 孙茂龄, 宋昌洪, 吉荣亮, 等. TIG-MIG 复合焊研究现状与展望[J]. 焊接, 2016(12):33-36.
- [2] 娄小飞, 陈茂爱, 武传松, 等. 高速 TIG-MIG 复合焊焊缝驼峰及咬边消除机理[J]. 焊接学报, 2014, 35(8):87-90.

- [3] 左为. TIG-MIG 复合电弧增材制造散热器用铝合金工艺及组织与性能研究[D]. 太原:太原理工大学, 2018.
- [4] 杨涛, 张生虎, 高洪明, 等. TIG-MIG 复合焊电弧特性机理分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(7):25-28.
- [5] 陈姬, 魏建华, 周倩, 等. 低电流 TIG 电弧辅助 MIG 高速焊咬边缺陷抑制机理及措施的研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(2):55-61.
- [6] 王军, 冯吉才, 何鹏, 等. TIG-MIG 间接电弧焊工艺[J]. 焊接学报, 2009, 30(2):145-148.
- [7] 石玟, 石铭霄, 薛诚, 等. 双旁路耦合电弧 MIG 焊工艺研究[J]. 电焊机, 2010, 40(6):30-33.
- [8] Miao Yugang, Xu Xiangfang, Wu Bintao, et al. Effects of bypass current on the stability of weld pool during double sided arc welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8):1590-1596.