

Fe-Cr-C-Ti 堆焊合金组织及耐磨性能

王智慧¹, 冯 萌¹, 贺定勇¹, 陈 勇², 边汉民²

(1. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124; 2. 天津水泥工业设计研究院有限公司, 天津 300400)

摘要: 采用药芯焊丝气体保护堆焊方法, 在 Q235 钢表面制备不同 Ti 含量的 Fe-Cr-C-Ti 系堆焊层金属, 利用扫描电镜 (SEM) 及 XRD 对堆焊层的组织进行了观察分析. 在 MLS-225 型湿式橡胶轮磨粒磨损试验机上进行磨粒磨损试验, 通过对磨损试样表面扫描电子显微镜观察分析并结合能谱成分分析探讨了磨损机理. 结果表明, 在 Fe-Cr-C-Ti 耐磨堆焊合金中, 随着 w_{Ti} 的增加, 合金组织中 TiC 硬质相增多; 当 $w(Ti) = 7.5\%$ 时, 部分 TiC 聚集呈雪花状形貌; $w(Ti) = 5.5\%$ 时, 合金表现出优良的抗磨损性能.

关键词: TiC 颗粒; 堆焊; 组织; 耐磨性

中图分类号: TH 117.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)02-0275-05

The Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C-Ti Handfacing Alloy

WANG Zhi-hui¹, FENG Meng¹, HE Ding-yong¹, CHEN Yong², BIAN Han-min²

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Tianjin Cement Industry Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300400, China)

Abstract: Fe-Cr-C-Ti hardfacing alloys with different Ti contents were prepared by gas-shielded flux cored arc welding on Q235 steel. The microstructures were investigated by SEM, XRD and EPMA. The abrasive wear resistance performance of the welded surfacing layers was evaluated on the MLS-225 grain-abrasion testing machine. The abrasive wear mechanics was studied on the observation of surface topography by the micro examination and energy spectrum analysis. It is indicated that with the increasing of Ti content, the content of TiC increases. The carbides distribute more symmetrical, but significantly decrease when Ti content is up to 7.5%. The results show that the alloy with 5.5% Ti has better wear resistance.

Key words: TiC; hardfacing; microstructure; wear resistance

在常规 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金中, 利用 M_7C_3 硬质相可以获得良好的耐磨粒磨损堆焊层. 但是这种堆焊材料脆性较大, 不适合在具有较高冲击工况条件下使用. 为了应对高冲击载荷的工况条件, 以 TiC 为增强相的耐磨堆焊合金受到关注^[1]. 由于 TiC 硬质相硬度高达 HV3200, 且尺度较 M_7C_3 细小, 对改善铁基堆焊合金的耐冲击性能有利, 是一种具有很好应用前景的耐磨堆焊合金^[1-4].

目前 TiC 颗粒增强材料主要以粉末冶金、铸造

等方法获得. TiC 堆焊合金大多是以 WC、VC、NbC 为主要增强相的堆焊合金^[5], 对以 TiC 为主要硬质相的堆焊合金的研究还不够深入. 尤其是在没有其他增强相存在的条件下, Ti 含量对堆焊合金的组织及耐磨性能的影响还需要展开深入研究. 作者设计了 3 种 w_{Ti} 的 Fe-Cr-C-Ti 堆焊合金, 采用气保护药芯焊丝堆焊方法, 制备出含有 TiC 增强相的堆焊层, 分析和讨论了在堆焊条件下, Ti 含量对合金组织形态、硬度及抗磨损性能的影响.

收稿日期: 2010-12-03.

基金项目: 北京市教委科技资助项目 (J5009012201201).

作者简介: 王智慧(1956—), 男, 教授, 主要从事材料表面工程方面的研究, E-mail: zhwang@bjut.edu.cn.

1 试验材料及方法

采用药芯焊丝气体保护堆焊法,在 $200\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的 Q235 试板上制备堆焊层. 焊丝直径 1.6 mm , 焊接工艺参数为: 焊接电流 $160 \sim 170\text{ A}$; 焊接电压 $30 \sim 33\text{ V}$; 焊接速度 220 mm/min . 堆焊 4 层, 堆焊合金成分见表 1 所示.

表 1 堆焊合金名义成分

Table 1 Designed Chemical composition of the overlayer

焊丝编号	w_{C}	w_{Ti}	w_{Cr}	w_{Mo}
1#	1.6	2.5	6.5	0.9
2#	1.6	5.5	6.5	0.9
3#	1.6	7.5	6.5	0.9

进行洛氏硬度测试时,每个试样测 5 点,取平均值. 磨粒磨损试验在 MLS-225 型湿式橡胶轮磨粒磨损试验机上进行,橡胶轮直径 176 mm , 转速 240 r/min , 橡胶轮硬度 60(邵尔硬度), 载荷为 100 N , 磨料为 $40 \sim 70$ 目石英砂,水砂质量比为 $1:1.5$. 取 3 个试样的平均失重值为磨损量^[6]. 磨损试验后,在试样中部的磨损痕迹处用线切割切出 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 试样,用无水乙醇清洗后在扫描电镜下观察形貌并进行能谱分析.

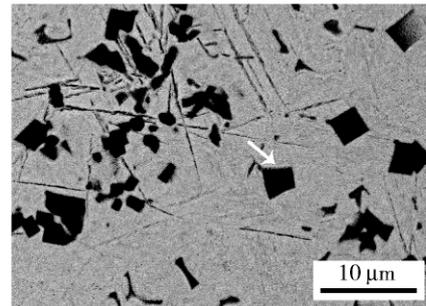
2 试验结果及分析

2.1 Fe-Cr-C-Ti 耐磨合金组织

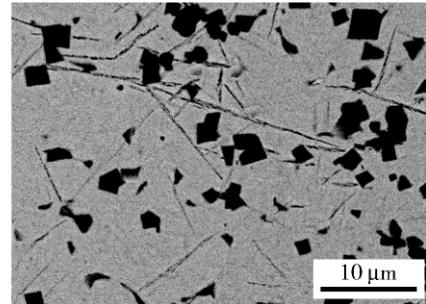
图 1 为 3 组合金扫描电镜显微组织图片,基本形态为基体组织上分布着一些黑色物相(图 1 中箭头所示). 当 $w(\text{Ti}) = 2.5\%$ 时,黑色相分布比较均匀,多数呈四边形,边长约 $4\text{ }\mu\text{m}$; $w(\text{Ti}) = 5.5\%$ 时,黑色相颗粒数目增多,尺寸略有减小;当 $w(\text{Ti}) = 7.5\%$ 时,组织中黑色相尺寸增大,部分黑色相呈雪花状(图 1(c) 中箭头 a 所示),尺寸达到 $16\text{ }\mu\text{m}$ 以上,部分黑色相颗粒聚集分布(图 1(c) 中箭头 b 所示). 对组织中黑色相进行能谱分析,结果 w_{Ti} 为 $54.73\% \sim 66.63\%$, w_{C} 为 $21.38\% \sim 24.3\%$.

对 3 组试样进行 XRD 物相分析,图 2 为 1#合金 X 衍射分析图谱,从衍射分析结果可见,除了铁素体(应该是铁素体与马氏体的混合组织)和残余奥氏体外,只有 TiC 相. 其余 2 组试样的衍射相相同. 结合能谱分析,可以证明组织中黑色相为 TiC.

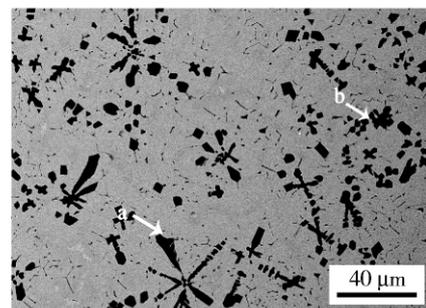
图 3 为 $w(\text{Ti}) = 7.5\%$ 时雪花状组织的放大图



(a) $w(\text{Ti})=2.5\%$



(b) $w(\text{Ti})=5.5\%$



(c) $w(\text{Ti})=7.5\%$

图 1 Fe-Cr-C-Ti 耐磨合金显微组织(BSE)

Fig. 1 Microstructures of Fe-Cr-C-Ti hardfacing alloy

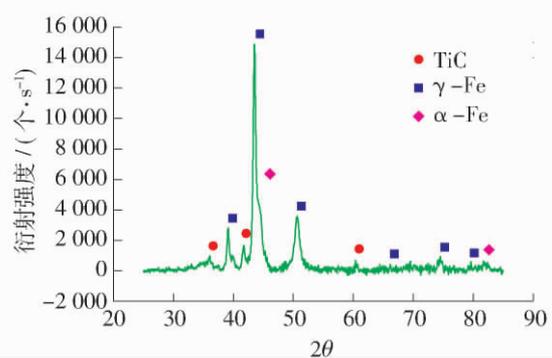


图 2 1#合金 X 射线衍射分析

Fig. 2 X ray diffraction pattern analysis of the 1# alloys

片,可以看出 TiC 相中间轴线处有树枝晶的形貌(图中箭头 a 所示),边缘成台阶状形貌(箭头 b 所示),b 所示的侧枝台阶是从主干上侧向生长的分支. 箭头 c 处的台阶状组织,从形貌上看,是独立生长的

TiC 颗粒在侧方向与主干积聚而成. 从形态上看,箭头 d 处呈脊骨状的组织是由多个颗粒合并而成. 从雪花状组织的形貌可以看出,雪花状组织可以沿着一个主干生长而成,也可由多个颗粒合并而成.

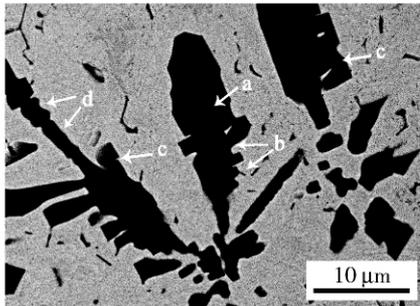


图3 雪花状 TiC 相组织放大图片(BSE)

Fig.3 Magnified microstructure of snowflake TiC phase

2.2 w_{Ti} 对合金宏观硬度影响

表2为3组合金堆焊熔敷层硬度测试结果,从表中可看出,随 w_{Ti} 增加,合金宏观硬度逐渐增大,3#合金宏观硬度比1#合金提高了9%. 从结果可看出,随合金中 w_{Ti} 增加,基体组织显微硬度变化不大,表明 TiC 颗粒增多是合金宏观硬度增大的主要原因.

表2 基体组织与碳化物硬度

Table 2 The hardness of carbides and matrix

焊丝编号	显微硬度/HV		宏观硬度/ HRC
	碳化物	基体	
1#	2 770	650	55
2#	2 800	680	58
3#	2 880	700	60

2.3 w_{Ti} 对合金耐磨粒磨损性能的影响

3组合金磨损失重如图4所示,由结果可见,随堆焊层中 w_{Ti} 提高,磨损失重先减小,当 w_{Ti} 增加到7.5%时,磨损失重反而增大. 对照表2可看出,硬度最高的3#合金抗磨损性能低于2#合金,说明硬度与抗磨损性能不成正比例关系.

图5为3组堆焊合金经过磨损试验后试样表面扫描电镜图片. 由图可见,3组焊丝磨损形式都是以犁沟式显微切削为主. 磨损面上的黑色颗粒(图5(a)中箭头所示)经能谱分析表明, w_{Ti} 为45%~62%,可知磨损面上黑色物相为 TiC 颗粒. 从图中可看出,碳化物和基体上均有磨损痕迹,有些划痕遇到 TiC 颗粒即终止(图5(b)箭头 a 所示),有些划痕通过 TiC 颗粒继续磨削基体(图5(b)箭头 b 所示).

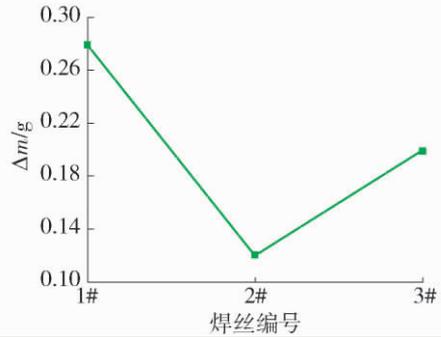
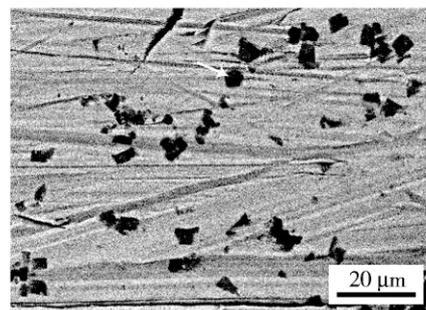


图4 3组合金磨损失重量

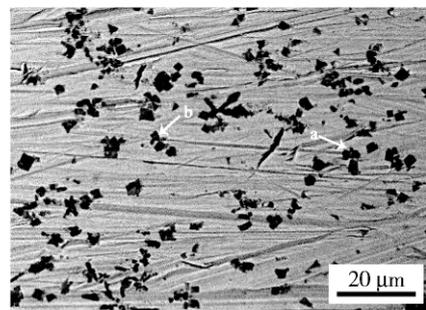
Fig.4 The mass loss of the three groups of alloys

对比 TiC 颗粒上的磨损沟痕,基体磨痕深且宽. 总体来说, TiC 颗粒抗磨损性能优于基体组织,可以阻止基体的磨损. 由表2可以看出, TiC 硬度是基体的4倍多,在磨损过程中 TiC 是主要的抗磨骨架.

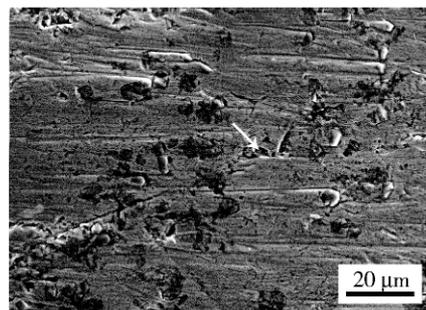
由图5可见, $w(Ti) = 2.5\%$ 时,磨损面上划痕



(a) $w(Ti)=2.5\%$



(b) $w(Ti)=5.5\%$



(c) $w(Ti)=7.5\%$

图5 磨损表面形貌(BSE)

Fig.5 Morphology of the worn surface

深且宽 $w(\text{Ti}) = 5.5\%$ 时, 磨损面上划痕逐渐断续, $w(\text{Ti}) = 7.5\%$ 时, 磨损面上除了切削沟槽外, 出现了许多剥落坑(图5(c)箭头所示). 对剥落坑处进行能谱测试, 测试结果表明 $w(\text{Ti}) = 56\%$, $w(\text{C}) = 22\%$. 从成分上分析, 剥落坑应该是 TiC 颗粒断裂或剥落形成的. 1#合金 w_{Ti} 低, TiC 颗粒含量少, 组织中缺少耐磨硬质相, 磨损面上划痕深且长, 磨损较严重. 随着 w_{Ti} 增加, TiC 颗粒增多且分布均匀, 弥散分布的 TiC 颗粒使得磨粒的切割阻力增加, 故 2#合金磨损面上的划痕变得断续, 抗磨损性能提高. 当 w_{Ti} 增加到 7.5% 时, 磨损面上出现碳化物剥落坑, 合金耐磨性反而降低. 在磨损过程中, 因为 TiC 颗粒抗磨损性能优于基体组织, 所以基体组织首先磨损, 使得 TiC 颗粒微凸于基体, 在随后的磨损中, 凸出基体表面的 TiC 颗粒先和磨粒接触, 所受到的载荷应力较大, 一旦裂纹萌生, 会在较大应力下迅速传播, 一个或多个裂纹在 TiC 颗粒上扩展合并, TiC 颗粒即逐渐破碎进而剥落. TiC 颗粒破碎产生大量碎屑, 会充当硬的磨粒, 加速材料磨损. 图6为3#合金磨损面扫描组织放大图片, 从图中可以看出, TiC 剥落后在基体上留下深的孔洞(图中箭头所示), 磨粒推碾基体产生的皱褶与孔洞相连(图中箭头所示), 此时磨粒会沿着孔洞底部更深层切割基体, 加速材料的磨损. 故3#合金抗磨损性能降低.

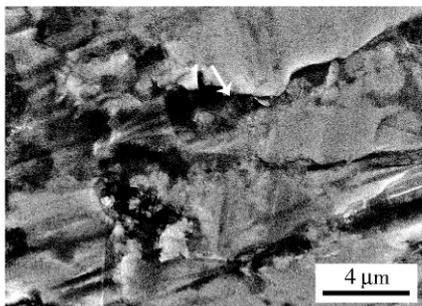


图6 3#合金磨损表面形貌(SEM)

Fig. 6 The worn surface of the 3# alloy

3 讨论

$w(\text{Ti}) < 5.5\%$ 时, 堆焊层中 TiC 主要以四边形状出现, 这与熔铸法所制备的 TiC 的形貌一致^[4,7-9]. 在本试验中 $w(\text{Ti}) = 7.5\%$ 时, 组织中有雪花状 TiC 组织出现. 熔铸法制备 TiC 颗粒增强金属基复合材料中没有这种组织出现, 堆焊条件下也未有这种组织出现^[1-2]. 但文献[1-2]描述的合金 w_{Ti} 低于 5%. 这说明 TiC 生长形貌与制备方法及 Ti 含量有关, 即

焊接条件下, 随着 Ti 含量的提高, TiC 具有不同的生长倾向. 由于堆焊过程极不平衡, 使得合金元素起伏偏聚倾向增大, 在熔池某些部位, Ti 与 C 成分起伏增大, 形成成分过冷区, 在 TiC 晶核形成后, 便以枝晶形式长大, 出现了图1(a)箭头所示的树枝状形貌. 当 w_{Ti} 提高时, 由于 TiC 的合成成为放热反应^[10], 大量 TiC 生成, 使得 TiC 颗粒周围温度增高, Ti、C 原子向已有颗粒的扩散能力增强进而使得颗粒长大. 同时放热反应也使得熔池存在时间增长, TiC 颗粒合并长大, 使得颗粒进一步增大. 3#合金中部分 TiC 相聚出现, 尺寸达到其他 2 组合金的 4 倍多. 组织中出现大尺寸雪花状 TiC 相, 且部分 TiC 颗粒聚集存在, 使其周围基体产生较大的畸变, 造成局部应力集中. 在磨损过程中, TiC 颗粒边缘由于应力集中产生微裂纹, 在应力的作用下, 微裂纹将会扩展为宏观裂纹, 发生碳化物的剥落.

4 结论

1) 在 3 组 Fe-Cr-C-Ti 耐磨堆焊合金中, w_{Ti} 对 TiC 的组织形貌有显著的影响, 当 w_{Ti} 较低时, TiC 主要为四边形颗粒形貌, 随着 w_{Ti} 增加, TiC 相含量增多, 当 w_{Ti} 达到 7.5% 时, 堆焊层中出现呈“雪花状”的 TiC 组织形貌, TiC 颗粒的尺寸也显著增大.

2) 随 w_{Ti} 增加, 合金宏观硬度增加, 当 w_{Ti} 从 2.5% 增加至 7.5% 时, 合金宏观硬度从 55 HRC 提高到 60 HRC.

3) w_{Ti} 为 5.5% 时, 合金具有最佳耐磨粒磨损性能, 当 w_{Ti} 增大至 7.5% 时, 由于发生碳化物的脆性剥落, 导致抗磨损性能降低.

参考文献:

- [1] 张元彬, 任登义. 堆焊层中钛的碳化物[J]. 焊接学报, 2002, 23(5): 38-40.
ZHANG Yuan-bin, REN Deng-yi. Study on carbides in surfacing layer [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2002, 23(5): 38-40. (in Chinese)
- [2] MODI O P, PRASAD B K, JHA A K, et al. Effects of material composition and microstructural features on dry sliding wear behaviour of Fe-TiC composite and a cobalt-based satellite [J]. Tribology Letters, 2004, 17(2): 129-137.
- [3] 邹增大, 王新洪, 杨尚磊, 等. TiC-VC 耐磨堆焊焊条 [J]. 材料科学与工艺, 2001, 9(4): 397-401.
ZOU Zeng-da, WANG Xin-hong, YANG Shang-lei, et al. Development of TiC-VC wear resistant surfacing electrode

- [J]. *Materials Science and Technology*, 2001, 9(4): 397-401. (in Chinese)
- [4] 严有为,魏伯康,傅正义,等. TiC 颗粒含量及尺寸对原位 TiC/Fe 复合材料耐磨性的影响[J]. *摩擦学学报*, 1999, 19(3): 193-197.
YAN You-wei, WEI Bo-kang, FU Zheng-yi, et al. Effect of the volume fraction and size of TiC particles on the abrasive wear resistance of insitu TiCp/Fe composites[J]. *Tribology*, 1999, 19(3): 193-197. (in Chinese)
- [5] 汤文博,郭云刚,魏建军,等. NbC-TiC 耐磨高抗裂堆焊焊条的优化设计[J]. *表面技术*, 2008, 37(6): 36-38.
TANG Wen-bo, GUO Yun-gang, WEI Jian-jun, et al. Optimum design of NbC-TiC surfacing electrode with anti-wearing and anti-cracking[J]. *Surface Technology*, 2008, 37(6): 36-38. (in Chinese)
- [6] 王智慧,俞长丽,贺定勇. 焊后热处理对 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金组织和磨损性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2009, 30(4): 77-80.
WANG Zhi-hui, YU Chang-li, HE Ding-yong. Effect of post heat treatment on microstructure and abrasive wear property of Fe-Cr-C hardfacing alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2009, 30(4): 77-80. (in Chinese)
- [7] 金云学,郭宇航. 原位 TiC 颗粒增强铁基复合材料的磨粒磨损性能研究[J]. *江苏科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 22(5): 22-27.
JIN Yun-xue, GUO Yu-hang. Research on abrasive wear performance of in situ TiC particle reinforced ferrous matrix composites[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natur Science Edition*, 2008, 22(5): 22-27. (in Chinese)
- [8] BERNS H, WEWERS B. Development of an abrasion resistant steel composite with in situ TiC particles[J]. *Wear*, 2001, 251: 1386-1395.
- [9] 孙建荣,孙扬善,闵学刚. TiC_p/3Cr13 复合材料显微组织及耐磨性的研究[J]. *铸造*, 2001, 50(1): 25-28.
SUN Jian-rong, SUN Yang-shan, MIN Xue-gang. A study on microstructure and wear-resisting properties of casting in situ TiCp/3Cr13 composites[J]. *Foundry*, 2001, 50(1): 25-28. (in Chinese)
- [10] 冯可芹,杨屹,沈保罗,等. 大热流量条件下原位合成 Fe-TiC 复合材料的研究[J]. *钢铁钒钛*, 2003, 24(3): 22-25.
FENG Ke-qin, YANG Yi, SHEN Bao-luo, et al. In situ synthesis of Fe-TiC composites under great thermal flux[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2003, 24(3): 22-25. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)

(上接第 274 页)

- [9] PARK Seong-Jun, HONG Byung-hee. Finite element analysis of hot rolled coil cooling[J]. *ISIJ International*, 1998, 38(11): 1262-1269.
- [10] AHMAD Saboonchi, SAEID Hassanpour. Heat transfer analysis of hot-rolled coils in multi-stack storing[J]. *Materials Processing Technology*, 2007, 182: 101-106.
- [11] 卢小节. 热轧管线钢轧后快冷中温度场、相变和应力场的研究[D]. 北京: 北京科技大学材料科学与工程学院, 2010.
LU Xiao-jie. Study of temperature field, phase transformation and stress field in rapid cooling of hot rolled pipeline steel[D]. School of Materials Science and Engineering of University of Science and Technology Beijing, 2010. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)