

高铬铸铁芯焊条堆焊层组织分析

徐锦锋¹, 唐 楨^{1,2}, 任永明¹, 翟秋亚¹

(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048; 2. 西安远东进出口有限公司, 西安 710077)

摘要: 基于焊芯过渡合金元素的技术思路, 研制了高铬合金铸铁同质堆焊焊条. 分析了不同药皮堆焊焊条的堆焊层组织及性能, 定量表征了合金元素的过渡系数. 结果表明, 通过焊芯过渡合金元素的高铬合金铸铁堆焊焊条可获得组织和性能均匀的堆焊层. 合金过渡系数高于85%. 碱性药皮堆焊焊条堆焊层为亚共晶成分高铬合金铸铁, 组织由奥氏体 γ + 马氏体 M + 碳化物 Cr_7C_3 组成. 堆焊层硬度为 44.5 ~ 56.5 HRC. 碱性石墨化型药皮堆焊焊条堆焊层组织由初生碳化物 Cr_7C_3 + 马氏体 M + 碳化物 Fe_7C_3 + 少量石墨 G 组成, 堆焊层硬度可达 59 ~ 67 HRC.

关键词: 高铬合金铸铁; 堆焊焊条; 合金过渡系数; 堆焊层组织

中图分类号: TG422.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2012)08-0057-03



徐锦锋

0 序 言

料钟和料斗是高炉炼铁的主要给料设备, 常年处于高温之下, 并受到矿石原料的频繁撞击、热煤气流的冲刷以及料钟、料斗之间的摩擦磨损, 使用寿命非常有限^[1-3]. 为提高高炉料钟、料斗的耐磨性能, 延长其使用寿命, 可采取在料钟、料斗表面堆焊耐磨层的方法. 高铬合金铸铁具有优异的高温耐磨性能, 因而被广泛应用于堆焊高炉料钟、料斗等工件. 现有高铬合金铸铁堆焊焊条一般采用低碳钢或不锈钢作为焊芯材料, 外涂合金化药皮制成堆焊焊条, 通过药皮向堆焊层过渡合金元素, 合金过渡系数较低而难以获得高质量的高铬合金铸铁堆焊层. 为解决这一技术难题, 文中拟通过焊芯过渡合金元素方法制备高铬合金铸铁同质堆焊焊条^[4,5], 以期提高合金过渡系数, 获得组织与性能满足高炉料钟、料斗耐磨性要求、降低堆焊成本的高铬合金铸铁堆焊层.

制备两种不同焊条, 为便于区分起见, 将碱性药皮焊条命名为焊条 I, 石墨化型药皮焊条命名为焊条 II. 两种焊条的药皮组分见表 2.

表 1 铁液目标成分(质量分数, %)

Table 1 Designed compositions of melt iron

C	Cr	Si	Mn	Mo
2.6 ~ 2.8	24 ~ 28	0.8 ~ 1.0	1.0 ~ 1.2	1.0 ~ 1.2
B	P	S	Fe	
0.6 ~ 1.2	<0.01	<0.06	余量	

表 2 堆焊焊条药皮组分配比(质量分数, %)

Table 2 Ingredients of hardfacing electrode coating

	CaCO ₃	CaF ₂	SiO ₂	45Si-Fe	30Mn-Fe
焊条 I	45	28	6	3	5.5
焊条 II	40	26	6	3	5.5
35Ti-Fe	TiO ₂	NaCO ₃	Al	石墨	
3.5	3	6	0	0	
3.5	3	5	3	5	

1 试验方法

直径 4 mm 焊芯采用自有专利装置通过铸造方法制备而成. 使用 25 kg 中频感应电炉熔炼高铬合金铸铁铁液, 铁液的目标成分见表 1. 用 JHY-25 型液压涂粉机外涂碱性药皮和碱性石墨化型药皮分别

选用 BX3-350 型交流电焊机在 Q235A 试板上进行堆焊. 两种焊条都采用小电流 ($I = 120$ A) 打底, 大电流 ($I = 180$ A) 连续焊接工艺^[6]堆焊 4 层, 堆焊层厚度约为 10 ~ 15 mm. 焊后用光谱仪分析堆焊层的化学成分, X 射线衍射 (XRD) 分析堆焊层中的物相组成. 截取堆焊层制备金相试样, 用光学显微镜观察堆焊层的组织. 并用 150 型硬度计测定堆焊层硬度.

收稿日期: 2011-09-05

基金项目: 陕西省教育厅产业化资助项目 (09JC09); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目

2 试验结果及讨论

2.1 堆焊层成分及合金过渡系数

使用焊条 I 和焊条 II 施焊后获得的堆焊层成分见表 3. 堆焊层具有高铬合金铸铁成分特征. 根据高铬合金铸铁共晶碳量估算式 $C_E = 4.40 - 0.054(\text{Cr})^{[7]}$, 焊条 I 堆焊层为亚共晶成分高铬合金铸铁, 焊条 II 堆焊层为过共晶成分高铬合金铸铁.

表 3 堆焊层成分(质量分数, %)

Table 3 Compositions of hardfacing layers

	C	Cr	Si	Mn
焊条 I	2.3	22	1.2	0.9
焊条 II	3.6	23	1.0	1.0
Mo	B	P	S	Fe
0.9	0.8	<0.01	<0.06	余量
0.9	1.0	<0.01	<0.06	余量

焊条合金过渡系数可用下式进行计算^[8], 即

$$\mu = \frac{[X]_d}{[X]} \quad (1)$$

式中: μ 为合金过渡系数; $[X]_d$ 为堆焊层中某元素 X 质量分数; $[X]$ 为某元素 X 的原始质量分数.

在高铬合金铸铁中, C, Cr 元素为决定合金组织与性能的主要元素. 根据式(1)分别估算焊条 I 和焊条 II 相对应的堆焊层中 C, Cr 元素的合金过渡系数. 由于焊条 I 选用的药皮成分中不含 C, Cr 元素, 可直接引用焊条 I 堆焊层中碳、铬成分进行计算; 而焊条 II 选用了石墨型药皮, 药皮中含有石墨, 堆焊层中产生了一定程度的增碳, 因此只计算焊条 II 堆焊层中 Cr 元素的过度系数, 计算结果见表 4.

表 4 合金元素 C 与 Cr 的过渡系数

Table 4 Transfer efficiency of carbon and chrome

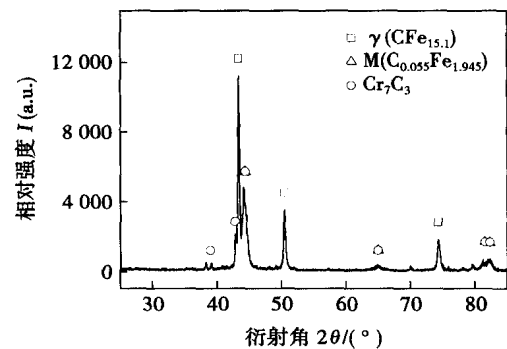
	C 元素的过渡系数 μ_c	Cr 元素的过渡系数 μ_{Cr}
焊条 I	0.884	0.916
焊条 II	—	0.920

从表 4 可以看出, C, Cr 元素在两种不同药皮堆焊焊条中合金过渡系数大致相当, 都可达到 85% 以上的过渡水平. 由此可知, 通过高铬合金铸铁同质焊芯过渡合金元素, 能够有效避免堆焊过程中的合金元素烧损, 有效提高合金元素利用率, 从而较大幅度提高合金过渡系数.

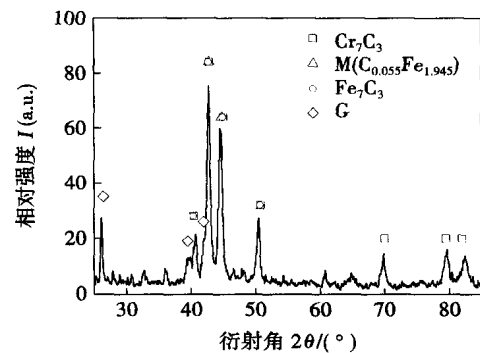
2.2 堆焊层组织特征

图 1 为堆焊层 XRD 图谱. 图 1a 为焊条 I 堆焊

层 XRD 图谱, 图 1b 为焊条 II 堆焊层 XRD 图谱. 可以看出, 焊条 I 堆焊层由奥氏体 γ + 马氏体 M + 碳化物 Cr_7C_3 组成, 堆焊层中奥氏体 γ 为面心立方结构的 $\text{CFe}_{15.1}$, 马氏体 M 为体心四方结构的 $\text{C}_{0.055}\text{Fe}_{1.945}$, 而碳化物则是六方结构的碳化物 Cr_7C_3 . 焊条 II 堆焊层中则由初生碳化物 Cr_7C_3 + 马氏体 M + 碳化物 Fe_7C_3 + 少量石墨 G 组成. 碳化物 Cr_7C_3 较 Fe_7C_3 含量相对较多. 电弧焊条件下堆焊层冷却速率较大, 且焊芯中添加了合金元素 Mo, 提高了堆焊层的淬透性, 焊态条件下堆焊层基体形成了硬度较高的马氏体组织. 而由于药皮中石墨的添加, 堆焊层中产生了少量增碳.



(a) 焊条 I 堆焊层 XRD 图谱



(b) 焊条 II 堆焊层 XRD 图谱

图 1 堆焊层 XRD 图谱

Fig. 1 XRD spectrum of hardfacing

图 2 为堆焊层组织形貌. 从图 2a 中可以看出, 焊条 I 堆焊层组织由初生奥氏体 γ + 共晶组织组成. 这是由于焊条 I 施焊后的堆焊层属于亚共晶高铬合金铸铁成分, 因此在堆焊层熔池凝固过程中先析出大量初生奥氏体 γ , 随凝固过程中铁液成分的变化, 发生了相应的三相平衡转变 $L \rightleftharpoons \gamma\text{Fe} + \text{M}_7\text{C}_3$, 从而形成奥氏体 γ + 碳化物 M_7C_3 的共晶团, 共晶团内碳化物 Cr_7C_3 尺寸细小且弥散分布, 在碳化物间隙充满着共晶奥氏体. 由于晶粒尺寸过于细小, 图 2a 中已经不可辨认. XRD 结果表明, 焊条 I 堆焊

层中含有马氏体,而采用 4% 硝酸酒精浸蚀后并未显示出马氏体组织,因此采用王水浸蚀显示了堆焊层中的马氏体组织,如图 2b 所示. 从图 2b 中可以看出,堆焊层中含有透镜状高碳马氏体以及一定数量的残余奥氏体. 这是由于堆焊层在凝固过程中,冷却速度较大,发生了奥氏体的马氏体转变,而未转

变部分则以残余奥氏体保留在堆焊层组织中. 图 2c 为焊条 II 堆焊层组织形貌,从图 2c 中可见组织中分布大量板片状初生碳化物 Cr_7C_3 以及围绕初生碳化物周围的共晶组织. 这是由于焊条 II 堆焊层成分属于过共晶高铬合金铸铁,其初生相为碳化物,因而组织中含有大量板片状初生碳化物. 与焊条 I 堆焊层中共晶团不同的是焊条 II 堆焊层中共晶团中心经常可以观察到六方形的初生碳化物,如图 2d 所示.

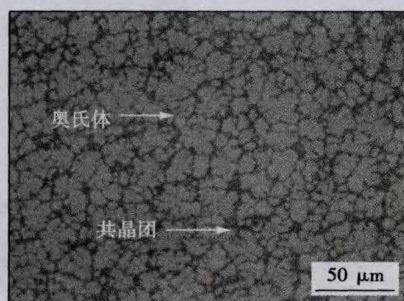
2.3 堆焊层硬度测定

硬度是反映材料耐磨性能的重要指标,为考察堆焊层的耐磨性能,在距离堆焊层表面不同位置选取 5 个点测定堆焊层硬度. 硬度测试结果列入表 5. 可知焊条 I 堆焊层硬度可达 44.5 ~ 56.5 HRC,平均硬度为 50.3 HRC,焊条 II 堆焊层硬度可达 59 ~ 67 HRC,平均硬度为 62.8 HRC. 焊条 II 堆焊层硬度明显高于焊条 I 堆焊层硬度. 这主要与焊条 II 堆焊层金属中马氏体含量、 Cr_7C_3 碳化物数量及其分布形态有关.

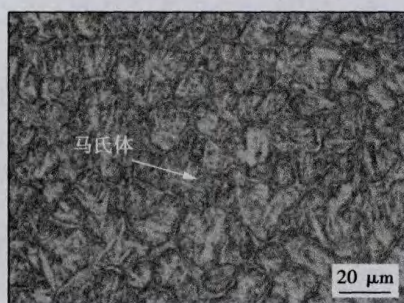
表 5 堆焊层硬度 (HRC)

Table 5 Hardness of hardfacing layers

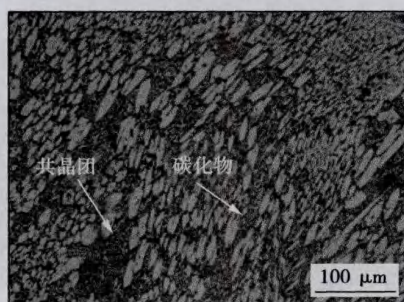
	1	2	3	4	5
焊条 I 堆焊层	47.5	56.5	52.5	44.5	50.5
焊条 II 堆焊层	62.0	62.0	67.0	64.0	59.0



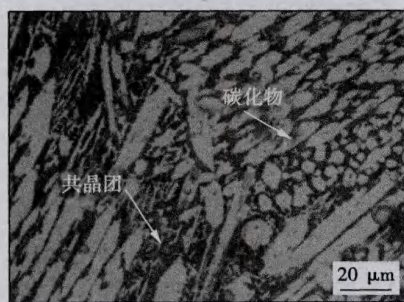
(a) 4%硝酸酒精浸蚀焊条 I 堆焊层组织



(b) 王水浸蚀焊条 I 堆焊层组织



(c) 4%硝酸酒精浸蚀焊条 II 堆焊层组织



(d) 焊条 II 堆焊层中的碳化物

图 2 堆焊层组织形貌

Fig. 2 Microstructure of hardfacing layer

3 结 论

(1) 通过焊芯过渡合金元素的高铬合金铸铁堆焊焊条,可较大幅度提高焊条的合金过渡系数,获得组织和性能均匀的堆焊层.

(2) 碱性药皮堆焊焊条堆焊层组织由初生奥氏体 γ + 马氏体 M + 碳化物 Cr_7C_3 组成. 堆焊层硬度为 44.5 ~ 56.5 HRC.

(3) 碱性石墨化型药皮堆焊焊条堆焊层组织由初生碳化物 Cr_7C_3 + 马氏体 M + 碳化物 Fe_7C_3 + 少量石墨 G 组成. 堆焊层硬度可达 59 ~ 67 HRC.

参考文献:

- [1] 陈 波, 王国栋, 李迎春. 高炉装料设备用 D-298 焊条的研制 [J]. 焊接, 2003(7): 21 - 23.
Chen Bo, Wang Guodong, Li Yingchun. Development of D-298 electrode for blast furnace charging equipment [J]. Welding & Joining, 2003(7): 21 - 23.
- [2] 孟戈戈, 逯允龙, 李 丹. 耐高温磨损堆焊焊条的研制 [J]. 焊接, 2005(4): 27 - 32.

增加了热裂纹产生的倾向性. 由于常规 MIG 焊采用型材原有坡口(图 7a), 该坡口的坡口角度较大, 需要较大的填充金属填充, 从而使得 MIG 焊缝中母材金属的比例降低, 形成焊缝金属的热裂纹倾向性较小.

解决上述热裂纹问题的最简单有效的方式就是重新设计复合焊的坡口形状及尺寸. 后续试验研究结果表明, 将图 7b 中的 I 形坡口更改为具有一定角度的 V 形坡口, 有效地解决了激光 - MIG 复合焊缝背面的热裂纹问题.

3 结 论

(1) 高速列车用 6005A 铝合金型材的脆性温度区间为 550 ~ 640 °C, 跨度约为 90 °C, 具有相对较高的热裂敏感性.

(2) 采用 I 型(无间隙)坡口, 利用激光 - MIG 复合热源焊接可以实现 6005A 铝合金型材的高速焊接, 焊接速度可达 4.5 m/min, 焊缝成形良好, 获得复合焊接头(焊态)的抗拉强度可达到母材强度的 83%.

(3) 采用 I 型(无间隙)坡口, 利用激光 - MIG 复合热源焊接 6005A 铝合金型材时, 由于坡口形状及尺寸的改变, 使得复合焊缝中母材在焊缝中的稀释率增大, 增加了焊缝的热裂纹敏感性, 致使焊缝背面局部区域可能会产生垂直于焊缝的结晶裂纹.

(4) 采用小角度的 V 形坡口可以消除激光 - MIG 复合热源焊接过程中焊缝背面出现的焊接热裂纹.

参考文献:

- [1] 王炎金, 丁国华. 铝合金车体制造关键技术研究[J]. 焊接, 2008(7): 12 - 16.
Wang Yanjin, Ding Guohua. Key manufacture technology of aluminum alloy car body[J]. Welding & Joining, 2008(7): 12 - 16.
- [2] 雷 祥, 单际国, 郑世卿, 等. 焊接工艺对 6005A 铝合金激光 - MIG 复合焊缝成形的影响[J]. 焊接, 2008(7): 25 - 32.
Lei Xiang, Shan Jiguo, Zheng Shiqing, et al. Influence of laser-MIG hybrid welding process on weld formation of 6005A aluminum alloy[J]. Welding & Joining, 2008(7): 25 - 32.
- [3] Katayama S, Uchiumi S, Mizutani M, et al. Penetration and porosity prevention mechanism in YAG laser-MIG hybrid welding[J]. Welding International, 2007, 21(1): 25 - 31.
- [4] 牛济泰. 材料和热加工领域的物理模拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [5] Hu B, Richardson I M. Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2006(15): 287 - 294.
- [6] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] 王炎金. 铝合金车体焊接工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [8] Cicalà E, Duffeth G, Andrzejewski H, et al. Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding-operating parameters and their effects[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 395: 1 - 9.

作者简介: 张 健, 男, 1985 年出生, 硕士研究生. 主要研究方向为铝合金的激光复合焊接工艺. 发表论文 1 篇. Email: zhangjian1984666@yahoo.com.cn

通讯作者: 王旭友, 男, 研究员. Email: wang_xuyou@tom.com

[上接第 59 页]

- Meng Gongge, Lu Yunlong, Li Dan. Research on high temperature hardfacing electrode[J]. Welding & Joining, 2005(4): 27 - 32.
- [3] 刘政军, 卢大勇, 尹奕君, 等. 抗冲击耐磨堆焊材料的耐磨行为[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(1): 28 - 31.
Liu Zhengjun, Lu Dayong, Yin Yijun, et al. Wear resistant behavior of deposit material with impact wear-resistance[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(1): 28 - 31.
 - [4] 徐锦锋. 药芯耐磨堆焊电焊条: 中国, ZL200910307935.3[P]. 2012 - 03 - 21.
 - [5] 徐锦锋, 翟秋亚, 唐 祯. 高铬铸铁耐磨堆焊电焊条: 中国, ZL200910307934.9[P]. 2011 - 10 - 05.

- [6] 翟秋亚, 翟 波, 唐 祯. 微合金化铸铁同质焊条焊接工艺[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 20 - 24.
Zhai Qiuya, Zhai Bo, Tang Zhen. Welding process of micro-alloying cast iron electrode[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 20 - 24.
- [7] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册铸铁卷[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [8] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

作者简介: 徐锦锋, 男, 1963 年出生, 博士, 教授. 主要从事凝固技术与焊接新材料研究. 发表论文 90 余篇. Email: jin Fengxu@xaut.edu.cn