doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2014.03.015

铁基硬面堆焊药芯焊丝的开发及应用

刘振英,张 丽

(北京嘉克新兴科技有限公司,北京100084)

摘 要:为解决水泥、电力、冶金、矿山等行业立磨、辊压机、耐磨板等耐磨部件的耐磨损问题,对铁基硬面 堆焊药芯焊丝进行了研究。通过调整药芯焊丝中碳、铬含量以及一种或多种强化合金元素种类与含量,制备 了碳含量4%~6%,铬含量20%~35%,其他合金元素含量小于10%的铁基硬面堆焊合金,分析了堆焊合金 显微组织和硬度,对合金中硬质碳化物面积百分比、碳化物尺寸进行了定量分析,对堆焊合金的耐磨性进行 了试验。结果表明:堆焊合金的主要组织为初生碳化物(Cr,Fe),C₃、共晶碳化物(Cr,Fe),C₃、残余奥氏体及 少量其他碳化物;随合金中初生碳化物的增加,合金硬度和耐磨性增加,但碳化物过多时,硬度继续增加,耐 磨性反而下降;适量合金元素 Nb、Mo等的加入,在合金中以固溶体和细小弥散分布的硬质相的形式存在,有 利于提高合金的耐磨性。通过配方设计和应用试验,成功开发出6种硬面堆焊用药芯焊丝。

关键词:铁基硬面堆焊;高碳;高铬;耐磨损;药芯焊丝

中图分类号: TG445 文献标志码: A 文章编号: 1007-9289(2014)03-0086-09

Development and Application of Iron-based Hardfacing Flux-cored Wire

LIU Zhen-ying, ZHANG Li

(Beijing ARC Xinxing Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100084)

Abstract: To solve the wear resistance of wear parts involving vertical mill, squeeze roller, and wear resistant plate used in cement, power, and metallurgical and mining industries, the iron-based flux-cored wire for hardfacing was developed. The hardfacing alloys with carbon (4%-6%), chromium (20%-35%) and other alloy elements of no more than 10% were prepared with the method of overlaying welding by designing different proportion of graphite, chromium carbide-iron powder and some additive agents of flux-cored wire. The microstructure and hardness of hardfacing alloy were tested and analyzed. The percentage of area and size of carbides in hardfacing alloy were determined. The wear resistance of alloys was evaluated. The results show that the microstructures of hardfacing alloys consist of primary carbide (Cr, Fe)₇C₃, eutectic carbide (Cr, Fe)₇C₃, residual austenite and other trace amount of carbide. The more the amount of primary carbides is, the higher the hardness of hardfacing alloys is. The mass loss increases first, and then decreases. Proper additional elements such as Nb, and Mo can improve wear resistance of hardfacing alloy by forming solid solutions and producing fine and dispersed hard carbides. Six types of flux-cored wires are successfully developed by designing and expermenting.

Key words: iron-based hardfacing; high carbon; high chromium; microstructure; wear resistance; fluxcored wire

0 引 言

在硬面堆焊制造和再制造中,大多选用硬面

堆焊合金,铁基硬面堆焊合金是应用最广泛的一 种堆焊合金,因为其价格低廉、经济性好,且其组

收稿日期:2013-11-07;修回日期:2014-04-30

作者简介:刘振英(1963-),男(汉),辽宁凝源人,高级工程师,博士;研究方向:焊接材料、焊接设备及焊接工艺

网络出版日期: 2014-05-12 15:38; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140512.1538.011.html 引文格式: 刘振英,张丽. 铁基硬面堆焊药芯焊丝的开发及应用 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(3): 86-94.

织中含有大量的碳化物,因此具有较高的耐磨 性^[1-5]。通常采用药芯焊丝熔敷过渡生成铁基硬 面堆焊合金。因药芯成分可以灵活改变,因此合 金的强度、硬度、韧性、耐磨性等性能可在很大范 围内改变。同时,合金元素的加入,如W、Mo、V、 Nb、B、Ti等,会使堆焊层在耐磨性、韧性、抗裂性 等方面产生不同程度的强化作用^[6-12]。

采用硬面堆焊技术制造高碳高铬铁基耐磨 合金,将高铬铸铁应用到粉磨设备耐磨件堆焊制 造和再制造方面,可大幅提高部件的耐磨性,增 加其使用寿命,克服大型高碳高铬铸件难以铸造 的问题。在韧性优良的铸钢基体上,如 Q235、 ZG20SiMn等,可以制造硬面层厚度从 1.5 mm 到 50 mm 的堆焊层,并能节约大量贵重金属材 料,同时堆焊再制造技术的应用也能大幅减少产 品生产时间和停机时间。

近年来国内进行耐磨件堆焊修复及制造时, 焊材多用手工焊条,很少使用药芯焊丝。而在使 用药芯焊丝方面,多使用进口焊材,如英国、德国 和美国产焊材,而国产焊材质量与进口焊材质量还 存在明显的差距。加之水泥电力等行业耐磨件堆 焊制造和再制造属于近十年才发展起来的产业,技 术成熟度不够,耐磨件堆焊制造或修复后常出现堆 焊层脱落或者不耐磨的非正常失效问题。

通过此研究工作,期望解决以下问题:开发 较完整的可用于自动堆焊的硬面药芯焊丝系列, 并成功应用于水泥、电力等行业大型耐磨件的堆 焊制造及再制造;以堆焊制造和再制造立磨耐磨 件方法,降低磨机系统因高铬铸铁耐磨件整体断 裂失效造成的磨机运行风险;大幅减少堆焊耐磨 件常见的堆焊层脱落和耐磨性不足的问题,提升 国产自主品牌硬面堆焊材料质量,替代价格高昂 的进口硬面堆焊焊材;更好的推广资源节约、成 本经济以及高效的硬面堆焊制造和再制造方法 在水泥、电力等行业的应用。

文中设计了 Fe-Cr-C 自保护药芯焊丝配 方^[13],调整 C、Cr、Si、Mn、V、B、Mo、Nb 等元素的 含量(质量分数),采用明弧自保护电弧堆焊技术 制备了碳含量4%~6%、铬含量20%~35%的铁 基堆焊合金,通过分析合金组织、初生碳化物尺 寸、初生碳化物面积百分含量、硬度,并进行磨料 磨损试验,运用综合评价,开发具有优异性能的 明弧自动焊用硬面堆焊药芯焊丝。采用自动焊 技术和自行研发设计的 ARC-NMG7-1/2 自动 堆焊设备,在水泥、电力、冶金、采矿等行业耐磨 件上进行了堆焊制造和再制造应用。

1 材料与方法

1.1 硬面堆焊合金的制备

按自保护焊丝药芯配方的主元素 Fe、Cr 及 C 和强化合金元素 Mo、Nb、B、V 等含量(质量分 数)的不同分5个组,共设计27个试样,如表1所 示。所有试样熔敷金属为含高铬(20%~35%)、 高碳(4%~6%)铁基合金,除第 I 组外, II - V 组 依据不同应用要求添加10%以下的一种或多种 上述强化合金元素。同时加入国外某公司硬面 堆焊药芯焊丝 V1、V2、V3 及 ZX 进行对比。其 中 V2 和 V3 熔敷金属中含添加的微量元素。

表 1 试样编号和分类

or

Classification	Samples number					Quantity*			
Ι	1	2	3	4	5	6	7	8	0
II	9	10	11	12	13				1
Ш	14	15	16	17	18	19	20		1
IV	21	22	23	24					2
V	25	26	27						3
Control samples	V1	V2	V3	ZX					

* Note: Quantity of added alloy elements, alloy elements refer to Mo, Nb, B, V by less than 10\% except for Fe, Cr, C, Si, Mn.

将不同配方系列制成直径 3.2 mm 的药芯焊 丝。采用北京嘉克新兴科技有限公司研发设计 的 ARC-NMB7-1 耐磨板自动堆焊设备,堆焊工 艺参数如表 2 所示。堆焊基体钢板材质为厚度 20 mm 的 Q235。焊后垂直于堆焊面加工出一块 长 50 mm,宽 100 mm 的试样,将试样堆焊层面预 磨抛光至镜面。

表 2 堆焊工艺参数

Table 2 Parameters of the welding technology

Parameters	Values
Diameter of wire/mm	3.2
Current/A	380-400
Arc voltage/V	28-30
Welding position	РА
Welding layers	4

1.2 表征

用 HR-150A 型洛氏硬度计测量堆焊层表面 的硬度,载荷 150 kg。用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀 后,再用 XJP-3 金相显微镜和 KH-1000 显微分 析仪、JEOL 6301F 扫描电子显微镜分析合金微 观组织,用扫描电镜能谱分析成分。

采用 IPP6.0 软件计算初生碳化物晶粒尺寸 和面积百分含量,选取典型组织的5张不同位置 的视场图片分析。用扫描电镜能谱仪和 PHIL-IPHS APD-10 X 射线衍射仪分析组织的物相和 相组成。堆焊合金的耐磨性试验在 MSL-225 磨 料磨损试验机上进行,采用湿砂橡胶轮,试样磨 损前后称重,得出磨损前后重量差值,以质量损 失的倒数来表征耐磨性指数。

焊丝的工业应用试验采用北京嘉克新兴科 技有限公司专利技术制造的 ARC-NMG7-1/2 立磨磨辊/盘瓦自动明弧离线堆焊机,在型号 HRM3700、Polysius57/28、ZGM95G、UBE50.4、 MLS3626、ATOX50的磨辊/磨盘瓦、辊压机挤压 辊等耐磨件上进行。

2 结果与讨论

2.1 堆焊合金的宏观形貌

所有配方的堆焊合金均产生横向裂纹,其宏 观形貌如图 1 所示。此类裂纹主要是高碳高铬 堆焊合金焊后应力大所致。此类裂纹并不一定 减少耐磨零件的寿命,实际上作为堆焊后合金的 应力释放,有时候会对合金使用性能产生有利作 用,但堆焊层过多的裂纹将影响硬面堆焊合金材 料的连续性,易导致堆焊层从基体剥离失效。部 分堆焊合金试样断面上能观察到数量较多的纵 向裂纹和较大的孔洞,典型的堆焊层裂纹过多的 试样为:4、5、25 及 V3;熔敷金属层孔洞多的试样 为:1、4、5、7 及 V3。

2.2 堆焊合金的显微结构

堆焊合金典型显微组织见图 2。从堆焊合金 显微组织来看:试样为典型的过共晶组织^[5,14],主 要由六角纤维杆状、板片状初生碳化物和周围呈 菊花状、放射状的共晶碳化物以及少量残余奥氏 体等组成。据 Fe-Cr-C 相图研究发现^[5],当含铬 量大于 11%,且铬/碳大于 3.5 时,组织中出现 M₇C₃ 型碳化物(M 指 Fe,Cr,Mn 等一种或多种),



图 1 堆焊合金的宏观形貌 Fig. 1 Surface morphology of the hardfacing alloy

随着铬碳比的提高, M₇C₃型碳化物将被 M₂₃C₆型 碳化物替代。文中所研究合金的铬/碳均大于 3.5,因此合金中碳化物主要以 M₇C₃型存在。

图 3 为堆焊合金试样 24 平行于堆焊层表面 的显微组织,由图可见初生碳化物和共晶碳化物 截面形貌。图 4 为试样 15 垂直于焊缝的截面显 微组织。由图 3 和图 4 可知:金相组织为初生碳 化物纤维杆状结构断面,碳化物的主要生长方向 垂直于等温线,即高碳含量的堆焊合金中碳化物 沿垂直于堆焊层表面的方向生长。初生碳化物 周围有大量菊花状和放射状共晶团,该种组织不 成连续网状,不破坏基体的连续性,裂纹较难沿 碳化物连续扩展。当初生碳化物垂直于堆焊面 生长时,一方面强化了基体与碳化物的结合,使得 碳化物与基体不易剥离,显示出良好的韧性;另一 方面,堆焊合金中初生碳化物的六角横截面硬度 (1 700~1 900 HV_{0.2})高于纵断面硬度(1 400 HV_{0.2}), 工作时能获得更高的耐磨性。

根据金相分析,试样 3、4、6、8、11、20、25 和 26 有较多晶粒的生长方向不垂直于堆焊面,部分 初生碳化物呈短棒状或条状,如试样 V3。试样 11、20 和 26 金相显微结构不均匀程度大,初生碳 化物分布不均匀。

2.3 堆焊合金的成分和物相

通过初步的宏观和显微结构分析,文中对典型的合金试样的初生碳化物和基体的显微组织进行了成分和物相的半定量分析。图 5 和表 3 为试样 13 六角初生碳化物(深灰色)和基体(浅灰色)组织成分扫描结果。其中,深色六角碳化物为 M₇C₃ 型初生碳化物,浅色部分主要成分为铁



图 2 硬面堆焊合金的典型显微组织 Fig. 2 Typical microstructure of the hardfacing alloys



图 3 试样 24 的二次电子形貌 Fig. 3 SE morphology of the sample 24



图 4 试样 15 的初生碳化物纤维杆状结构 Fig. 4 Fiber rod primary carbide optical microscope of the sample 15



图 5 试样 13 背散射电子形貌 Fig. 5 BSE morphology of sample13

表 3 试样 13 的 EDS 结果(原子数分数/%)

Table 3 EDS results of the sample 13(a/%)

Element		С	Si	Cr	Fe
Content	Dark zone	31.63		41.65	26.72
	Light gray zone	11.22	2.77	13.50	72.52

和铬,该相为铁铬固溶体基体,在合金中对碳化 物起韧性支撑作用,以增加合金韧性。

图 6 和表 4 为对合金中共晶碳化物附近的成 分分析结果,可知合金中存在 Mo 元素。



图 6 试样 19 的二次电子形貌 Fig. 6 SE morphology of the sample 19

的 EDS 结 Ξ (**百** 7 粉 八 粉 (0/)

1X T	瓜什 19 日	J LD5 和本	(尔)女力:	\$X//0/
Table	4 EDS re	esults of th	e sample 19	(a/%)
Element	С	Cr	Fe	Mo
Content	25 26	21 E0	20 20	4 0 4

对试样 19 进行成分面扫描分析,如图 7 所示。由图 7 可知:白亮位置为相应元素富集区, Mn 和 Cr 富集于先析出的初生碳化物中,Si 和 Fe 主要富集于奥氏体中。图中可看到 Mo 偏析 在共晶碳化物附近。合金中 Mo 一般有 3 种存在 形式:固溶于奥氏体及其转变产物、固溶于铬碳 化物中以及形成钼的碳化物^[5,11]。合金中超过 75%的 Mo 是以铬碳化物和钼碳化物形式存在 的^[5],这种存在形式有助于改善堆焊合金的耐 磨性。

图 8 为试样 24 的背散射电子形貌,表 5 为图 8 白色区域的能谱分析结果。合金中的 Nb 主要以 NbC 的形式弥散分布于合金中,NbC 的显微硬度 为 2 400 HV_{0.2},高于 M₇C₃ 型碳化物的硬度 1 410 HV_{0.2},也高于 M₂₃ C₆ 型碳化物的硬度 1 140 HV_{0.2},硬质 NbC 颗粒的存在有助于改善堆 焊合金的耐磨性。图 9 为试样 24 堆焊合金的 XRD 物相分析结果,证实合金中存在 NbC 和 M₇C₃。





2.4 堆焊合金的初生碳化物尺寸和面积百分比

因为铁基硬面堆焊合金的耐磨性与合金中 初生碳化物尺寸、分布和数量密切相关。试样11 和20合金金相组织因均匀性和(或)方向性差而 未计算。文中用 Image Pro-Plus 软件计算出了 其它试样的组织中初生碳化物尺寸和初生碳化 物面积百分比。表 6 为计算结果。图 10 为初生 碳化物面积百分数和耐磨性指数。



图 8 试样 24 的背散射电子形貌 Fig. 8 BSE morphology of sample 24

表 5 试样 24 白色区域的 EDS 结果(原子数分数/%)

Table 5 EDS results on white zone of sample 24(a/%))
---	------	---

Element	С	Cr	Fe	Nb
Content	53.57	3.33	1.25	41.85



图 9 试样 24 的 XRD 图谱 Fig. 9 XRD pattern of the sample 24

一般来说,当堆焊合金中存在合适的能支撑 硬质颗粒的韧性基体时(铁铬固溶体),硬质碳化 物数量越多,晶粒越细小,合金耐磨损能力则越 强,这类合金更有可能表现出更好的耐磨损性 能。由表6可知:堆焊合金试样的初生碳化物尺

衣 0 便 圆 堆 岸 旨 金 试 件 的 初 生 咴 化 初 尺 寸 和 囬 枳 日 ケ

Table 6 Mean grain size and area fraction of primary carbides in hardfacing alloy

		0							•••		
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Average grain/µm	15.87	12.34	17.01	13.59	12.72	12.17	13.11	18.82	6.02	9.63	
Area fraction/ $\frac{0}{0}$	7.14	41.09	27.56	33.74	16.40	19.27	22.33	30.39	19.71	25.38	
No.	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Average grain/ μ m	7.01	8.51	11.94	11.35	9.80	6.75	12.22	7.18		8.50	6.20
Area fraction/ $\frac{0}{0}$	19.72	31.93	28.90	30.45	24.62	22.91	31.91	33.44		20.73	20.19
No.	23	24	25	26	27	V1	V2	V3	ZX		
Average grain/ μ m	14.71	10.10	12.08	13.26	7.29	10.01	13.02	21.53	12.06		
Area fraction/ $\frac{0}{0}$	35.09	37.41	39.33	46.76	36.73	28.14	25.46	43.72	29.77		

寸大小范围为 $6.02 \sim 21.53 \ \mu m$,初生碳化物面积 百分含量范围在 $7.14\% \sim 46.76\%$;含碳量低 $(4.0\% \sim 4.5\%)$ 的试样 1 初生碳化物面积最少。 试样 2 较试样 3 碳含量高 0.5,铬含量相同,但初 生碳化物面积百分含量由 27.56%增加到 41.09%,增加幅度为 49%,增幅明显,可见碳含 量变化对合金中初生碳化物的数量影响较大;试 样 II、III、IV和 V的堆焊合金组织中初生碳化物 数量众多,且普遍晶粒较细,可见添加的合金元 素对合金中初生碳化物的晶粒有不同细化作用。 试样 8 和试样 V3 组织中初生碳化物晶粒较粗。 试样 21 和 22 合金中初生碳化物面积百分比低的 主要原因是合金显微组织中除了细小的初生碳 化物外,共晶碳化物和残余奥氏体占的面积百分 比较高,并有硬质相 NbC 弥散分布于组织中,有 助于增加合金的耐磨性。

图 10 为硬面堆焊合金初生碳化物面积百分数和耐磨性指数。从图 10 可以看出:当初生碳 化物面积百分数超过 35%后,合金试样的耐磨性 指数不再提高,之后下降。

2.5 堆焊合金的硬度和磨损性能

铁基堆焊合金的耐磨性主要依靠其中耐磨 硬质碳化物^[5],因此对合金硬度的检测成为选择





图 10 堆焊合金初生碳化物面积百分数和耐磨性指数 Fig. 10 Area fraction of primary carbide and wear resistance index for hardfacing alloys

耐磨材料的一个重要指标。对合金试样的耐磨 性以质量损失的倒数来评价。质量损失 ΔM 定 义为磨损前的质量 M_1 与磨损后的质量 M_2 之 差,即: $\Delta M = M_1 - M_2$ 。每个试样进行3次磨损试 验,3次磨损失重总和用来评价比较。

图 11 为所有试样的硬度一耐磨性比较图。 由图可知:试样硬度值均大于 617 HV_{0.15}。初生 碳化物面积最少的试样 1 和试样 3 的硬度值低于 655 HV_{0.15};硬度值最高的为试样 4,其次为试样 V3,两个试样均含有同一微量元素 B,虽然 B 的 添加对试样 4 硬度贡献较大,但同时合金中产生 较多裂纹和孔洞,可能是因为添加量不适当,影 响了合金熔液的流动性。

初生碳化物最少的试样 1 磨损失重最大,其 次是试样 V2,初生碳化物晶粒大小为 6.2 μm、初 生碳化物百分数为 20.19%的试样 22 磨损失重 最小,该试样添加了两种一定数量的强碳化物形 成元素,可见合金元素的添加对合金显微组织和 性能影响明显。硬度最高的试样 4 磨损失重处 于第三位,说明堆焊合金的硬度越高,合金的耐 磨性不一定越好。从图 11 看出,在同样试验条 件下,所研制的绝大部分型号焊丝堆焊合金的磨 损失重低于对照型号 V1、V2、V3 以及 ZX。

同时,从图 11 中并未发现两者线性相关,当 硬度由 617 HV_{0.15} 增加时,合金耐磨性呈增加趋势,当硬度增加至 739 HV_{0.15}以上之后,合金的耐 磨性呈下降趋势。一个原因是,碳化物数量过多 且晶粒偏大,即缺少足够的韧性基体支撑,在磨 料磨损时更易磨损脱离。





3 牌号优选

结合试验分析结果,排除合金宏观质量差的 试样 1、4、5、7 和 25,对剩余 22 个试样以合金耐 磨性为主要筛选指标,结合初生碳化物晶粒度细 小、百分含量大的原则选择,最后对照堆焊合金 的显微组织筛选,同时考虑到添加合金的经济 性,在此基础上,进行再次验证,同时也加入国外 某品牌焊丝 V1、取自某国外生产的铸造高铬铸 铁磨辊辊套 HCWI1 以及取自某国产铸造高铬铸 铁磨辊辊套 HCWI2 这 3 种试样比较,最终选定 以下牌号:2、13、15、19、22 和 24。将新牌号命名 为 ARCFCW1015、ARCFCW9024、ARCFCW9061、 ARCFCW9996、ARCFCW9066、ARCFCW9993。 图 12 为新牌号磨损失重数据绘制的失重比较图



图 12 试样与高铬铸铁和国外典型焊丝的磨损结果 比较

Fig. 12 Abrasive wear test comparison of the new grades with high chromium cast iron and V1

(磨损一次)。以 ARCFCW9066 焊丝为例,比国 产高铬铸铁材质 HCWI2 耐磨性提高 106%,比 国外高铬铸铁材质 HCWI1 耐磨性提高 64%,比 国外某品牌焊丝 V1 耐磨性提高 36%。

以上新牌号按 EN 14700-2005 标准^[15]归类 于 Fel4-Fel6 范围。

4 应 用

采用明弧自保护电弧堆焊技术,将新牌号焊 丝在立磨、煤磨磨辊/磨盘上进行堆焊应用。所 用焊机为北京嘉克新兴科技有限公司研发的 ARC-NMG7-1/2 磨辊/磨盘自动明弧离线堆焊 机。图 13(a)为 ARCFCW9061 牌号焊丝堆焊磨 盘使用效果,图 13(b)为水泥挤压辊堆焊再制造 后使用1年的效果,硬面层所用焊材为 ARCF-CW9996,仍可见清晰完好的条纹耐磨层,耐磨件 抗磨损性能良好,无堆焊层脱落。2011年在四川



(a) ATOX50 segments in service



(b) Squeeze roller in service for one year

图 13 使用了新牌号的耐磨件运行一段时间后的磨损 表面状况

Fig. 13 Surface condition of the worn components after running for some time



(a) Vertical grinding roller of UBE/LM



(b) Tire-shaped grinding roller of PLOYSIUS

图 14 堆焊制造后的磨辊 Fig. 14 Wear components after hardfacing

某水泥厂的一台 HRM3700 水泥原料磨的磨辊 上,应用了优选新牌号的焊丝,同时还使用了德 国某知名品牌的焊丝进行应用对比试验。试验 结果显示,在连续运行 12 个月后,该优选牌号的 焊丝实际耐磨寿命比德国品牌焊丝高出 25%以 上。图 14 为新型焊材堆焊制造/再制造的部分 耐磨部件。大量的工业应用反馈效果表明,新牌 号抗磨损效果良好,无堆焊层脱落和耐磨性不足 的问题,满足水泥电力行业不同耐磨设备的 需要。

目前新牌号硬面堆焊药芯焊丝年产达到 4 000吨以上,在国内电力、水泥、冶金行业的 1 300多家企业中用于中速磨煤机、立式水泥生料 磨、熟料磨、矿渣磨、辊压机挤压辊、耐磨衬板等 耐磨部件的堆焊制造和在线/离线堆焊再制造 中,都取得了很好的效果。

5 结 论

(1) 高碳(4%~6%)高铬(20%~35%)铁基 堆焊合金显微结构为典型的过共晶组织,主要包括3种相:六角纤维杆状、板片状初生碳化物 (Cr,Fe)₇C₃和周围呈菊花状、放射状的共晶碳化 物(Cr,Fe)₇C₃以及少量残余奥氏体等组成。

(2) 堆焊合金硬度值在 617~820 HV_{0.15}之 间,一般初生碳化物所占面积百分比增加,合金 硬度和耐磨性增大,但初生碳化物所占面积百分 数达到一定程度后,耐磨性反而降低。碳含量对 奥氏体的形成和碳化物百分含量起着最重要的 影响;添加 10%以内的合金元素 Nb、Mo,提高了 合金的硬度和耐磨性。

(3) 成功开发出 6 种硬面堆焊用药芯焊丝, 各系列牌号为: ARCFCW1015, ARCFCW9024, ARCFCW9061, ARCFCW9996, ARCFCW9993 及 ARCFCW9066,新牌号归类于 EN 14700 标准 中 Fe14-Fe16。研发的新型堆焊材料耐磨性高 于铸造高铬铸铁。

(4)采用明弧自保护电弧堆焊技术,优选的 新系列硬面堆焊焊丝,堆焊耐磨件耐磨性比进口 的同种工况用焊丝提高 25%以上。

参考文献

- Chatterjee S, Pal T K. Wear behaviour of hardfacing deposits on cast iron [J]. Wear, 2003, 255(1/2/3/4/5/6): 417-425.
- Buchely M F, Gutierrez J C, Le'on L M, at al. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys
 [J]. Wear, 2005, 259(1/2/3/4/5/6): 52-61.
- [3] Fan C, Chen M C, Chang C M, et al. Microstructure change caused by (Cr, Fe)₂₃C₆ carbides in high chromium Fe-Cr-C hardfacing alloys [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201 (3/4): 908-912.
- [4] Chotěborsky R, Hrabě P, Müller M, et al. Abrasive wear

of high chromium Fe-Cr-C hardfacing alloys [J]. Journal of agricultural engineering research, 2008, 54 (4): 192 -198.

- [5] 郝石坚.高铬耐磨铸铁 [M].北京:煤炭工业出版 社,1993.
- [6] Correa E O, Alca⁻ Ntara N G, Tecco D G, et al. The relationship between the microstructure and abrasive resistance of a hardfacing alloy in the Fe-Cr-C-Nb-V system [J]. Mtallurgical and Materials Transactions Ransactions, 2007, 38(8): 1671-80.
- [7] 龚建勋,李煌,肖逸锋,等.Fe-C-Cr-V-B系高铬堆焊合 金的显微组织及耐磨性[J].材料工程,2009(5):22-25.
- [8] Li B Q, Li X Y. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloys [J]. Welding Journal, 2010, 89(7): 133-139.
- [9] Zhou Y F, Yang Y L, Li D, et al. Effect of titanium content on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C hardfacing layers [J]. Welding Journal, 2012, 91(8): 229-235.
- [10] Jeong W Y, Seong H L, Chong S. Yoon, et al. The effect of boron on the wear behavior of iron-based hardfacing alloys for nuclear power plants valves [J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 352(1/2/3): 90-96.
- [11] Wang X H, Han F, Liu X M, et al. Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe - based hardfacing coatings [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 489(1/2): 193-200.
- [12] Liu D S, Liu R P, Wei Y H, et al. Microstructure and wear properties of Fe-15Cr-2. 5Ti-2C-xB wt. % hardfacing alloys [J]. Applied Surface Science, 2013, 271(4): 253-259.
- [13] 张清辉. 焊接材料研制理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业 出版社, 2002.
- [14] 周继扬. 铸铁彩色金相学 [M]. 北京: 机械工业出版 社, 2002.
- [15] EN 14700-2005. Welding consumables-welding consumables for hard-facing [S].

作者地址:北京市海淀区清华园1号 100084 清华大学基础工业训练中心 Tel: (010) 6278 1265

E-mail: arc139@126.com

(责任编辑:黄艳斐)