

Nb 在高铬铸铁型堆焊金属中的作用

潘 川, 吴智武, 王移山, 柳小坚, 何志勇

(中国钢研科技集团有限公司 安泰科技股份有限公司, 北京 100081)

摘 要: 在高铬铸铁型堆焊金属中,用 7% 的铌元素取代相同摩尔数的铬元素,制成含铌的明弧自保护药芯焊丝。运用彩色金相分析、扫描电镜及能谱分析、X 射线物相分析、洛氏硬度测试等技术,研究了铌在高铬铸铁型堆焊金属中的作用,分析了线能量对高铬铸铁型堆焊金属组织和硬度的影响。结果表明:铌元素能够优先与碳结合,形成弥散分布的碳化铌结晶核心,阻止初生碳化物的生长,具有明显的细化晶粒作用。不论是否添加铌元素,同种堆焊金属线能量越小,碳化物尺寸越细小;裂纹数量越多,裂纹分布越均匀,且裂缝间隙越小。可以通过控制线能量来控制焊缝的裂纹分布,防止堆焊层脱落。改变线能量以及用 7% 的铌元素取代相同摩尔数的铬元素,其洛氏硬度值基本保持不变,均在 60 HRC 左右。

关键词: 高铬铸铁; 铌; 堆焊金属; 碳化物; 线能量

中图分类号: TG143.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)01-0104-06

The Role of Niobium in the High Chromium Cast Iron Hardfacing Metal

PAN Chuan, WU Zhi-wu, WANG Yi-shan, LIU Xiao-jian, HE Zhi-yong

(Advanced Technology and Materials Co Ltd, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081)

Abstract: In this paper, self-shielded flux cored wire including niobium for open arc welding was prepared with 7% niobium element to replace the same number of moles of chromium element in the high chromium cast iron hardfacing metal. The role of niobium in the high chromium cast iron hardfacing metal was studied, the effect of heat input on microstructure and hardness of the high chromium cast iron hardfacing metal was analyzed, by means of color metallography, SEM, EDS, XRD and testing Rockwell hardness techniques. The results showed that niobium element can preferentially combined with carbon to form dispersion distribution of NbC crystal core, to prevent the growth of primary carbides, thus plays a significant role of grain refinement. The heat input in the same hardfacing metal is smaller, whether or not to add niobium element, the size of carbides is finer, the number of cracks is greater, its distribution is more homogeneous and its gap was smaller. The crack distribution can be controlled by adjusting heat input in order to prevent hardfacing layer falling off. No matter changing heat input or replacing the same number of moles of chromium element with 7% niobium element in hardfacing metal, its Rockwell hardness basically remained constant, both in the 60 HRC or so.

Key words: high chromium cast iron; niobium; hardfacing metal; carbide; heat input

0 引 言

高铬铸铁型硬面材料具有优异的耐磨性、耐热性和耐蚀性,同时价格低廉,广泛应用于冶金、电力、矿山、农机等领域,是目前用量最大的硬面

材料之一。由于这种材料合金元素含量高,冷热加工性能很差,一般不适宜直接加工成丝材。药芯焊丝是将各种合金元素以金属粉末的形式包裹在低碳钢带中制成的,它具有材料利用率高、能源消耗量小、生产效率高、可以实现自动化连

续生产等优点,尤其是自保护药芯焊丝还具有不需要焊剂或保护气体,制造成本低,生产工艺简单,操作方便等优点,因此将高铬铸铁型堆焊材料制造成自保护药芯焊丝应用前景广阔。

铌是一种极其重要的微合金化元素,但在铸铁领域的应用还属于一项新技术^[1]。本文设计了不含铌和含铌的两种高铬铸铁型自保护药芯焊丝,通过三种不同线能量,研究了铌在高铬铸铁型堆焊金属中的作用,并分析了线能量对两种高铬铸铁型堆焊金属组织和硬度的影响。

1 试验焊丝和试验方法

试验焊丝是自行研制的自保护药芯焊丝。自保护药芯焊丝的生产过程是采用有缝药芯焊丝的生产方式,即采用一定宽度和厚度的钢带作为焊丝外包裹材料,将其轧制成 U 形,然后将混合好的合金粉末通过适当的添加方式,均匀地添加到 U 形槽中,再将 U 形钢带槽轧制成 O 形,将粉末包裹在钢带中,最后通过拉拔工艺,使之达到合适的最终尺寸^[2-3]。试验设计了不含铌和含铌的两种高铬铸铁型自保护药芯焊丝,在含铌的焊丝中用质量分数为 7% 的铌替代了不含铌焊丝中相同摩尔数的铬,其设计成分见表 1。

表 1 高铬铸铁型堆焊金属的化学成分(质量分数/%)

Table 1 The chemical composition of the high chromium cast iron hardfacing metal ($w/\%$)

Serial number	C	Si	Mn	Cr	Nb
1X	5.0	1.0	0.9	25.0	0
2X	5.0	1.0	0.9	21.1	7.0

采用药芯焊丝明弧堆焊的方式,焊丝 $\Phi 2.8$ mm,干伸长 40 mm,电流 $I=400$ A,电压 $U=30$ V,层间温度 ≤ 120 °C。堆焊分小、中、大三种线能量,小线能量焊接速度 $V=980$ mm/min,机头不摆动;中线能量焊接速度 $V=370$ mm/min,机头不摆动;大线能量焊接速度 $V=150$ mm/min,机头摆动宽度 30 mm,摆动速度 2.4 m/min。不含铌的堆焊金属按照小、中、大线能量依次编号为 11 号、12 号、13 号,含铌的堆焊金属按照小、中、大线能量依次编号为 21 号、22 号、23 号。

用 Axiovert-200-MAT 型光学显微镜观察分析了堆焊金属的彩色金相组织。彩色金相试

样的腐蚀采用二步法,即先用能很好区别铌的碳化物的腐蚀液(铁氰化钾 10 g+氢氧化钾 10 g+水 100 mL)腐蚀出碳化铌颗粒,然后用 5% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀。用 JSM-6380LV 型扫描电镜对堆焊金属组织进行了分析,用 GENESIS 2000 能谱仪对微区成分进行了测定。宏观硬度在 HR-150DT 型洛氏硬度试验机上进行,测试 5 点取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

为研究堆焊金属的显微组织,采用扫描电子显微镜对不含铌堆焊金属 11 号试样和含铌堆焊金属 21 号试样进行了显微组织分析和能谱分析,并对含铌金属 21 号试样进行了彩色金相分析。11 号试样的扫描电镜照片见图 1,21 号试样的扫描电镜照片以及 Nb 元素的面扫描照片见图 2,21 号试样的彩色金相照片如图 3 所示。11 号试样的 EDS 能谱分析及各代表性区域化学成分分析见图 4 和表 2,21 号试样的 EDS 能谱分析及各区域化学成分分析见图 5 和表 3。

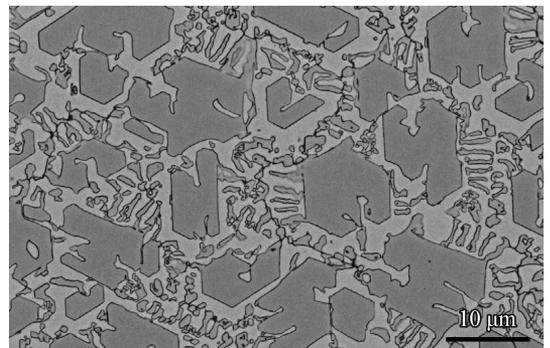


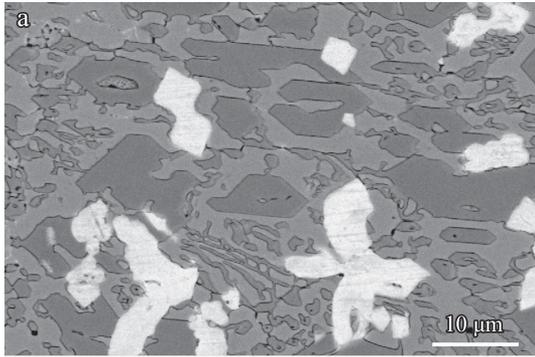
图 1 不含铌堆焊金属 11 号的扫描照片

Fig.1 SEM micrographs of the hardfacing metal No. 11 excluding Niobium

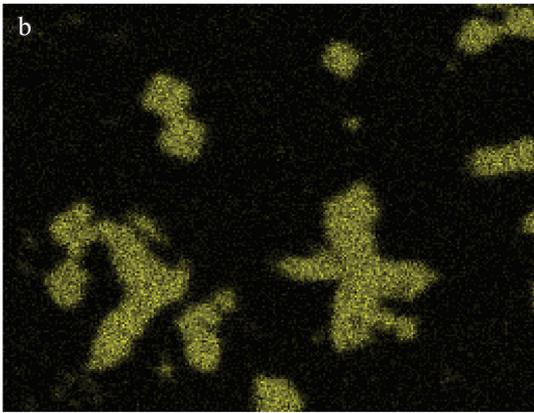
为了分析显微组织中的相组成以及比较含铌堆焊金属与不含铌堆焊金属的组织区别,对不含铌堆焊金属 11 号和含铌堆焊金属 21 号试样进行了 X 射线衍射分析。X 射线衍射图如图 6 所示。

结合图 1、图 4、图 6(a)和表 2 可看出,不含铌的高铬铸铁型堆焊金属的组织为典型的过共晶组织^[2-5]。基体为奥氏体组织,在图 1 中呈灰色,它的化学成分以铁为主(由于碳的原子序数较小,分析结果不准确),铬含量很少。在奥氏体

基体上分布着大量的初生碳化物和共晶碳化物, 这些碳化物在图 1 中呈深灰色, 其化学成分中铬含量最高, 同时也含有较多的铁, 为 $(Cr, Fe)_7C_3$ 。初生碳化物是六方棱柱体形貌, 彼此孤立地、均匀地分布在基体上。共晶碳化物呈颗粒状、条虫状, 晶粒尺寸较小, 弥散分布于基体上。



(a) Backscatter electron image



(b) Map scanning of Nb

图 2 含铌堆焊金属 21 号的扫描电镜照片

Fig. 2 SEM micrographs of the hardfacing metal No. 21 including Niobium

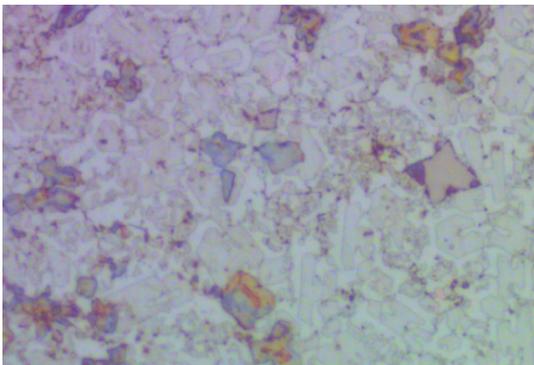


图 3 含铌堆焊金属 21 号的彩色金相照片

Fig. 3 Colour micrographs of the hardfacing metal No. 21 including Niobium

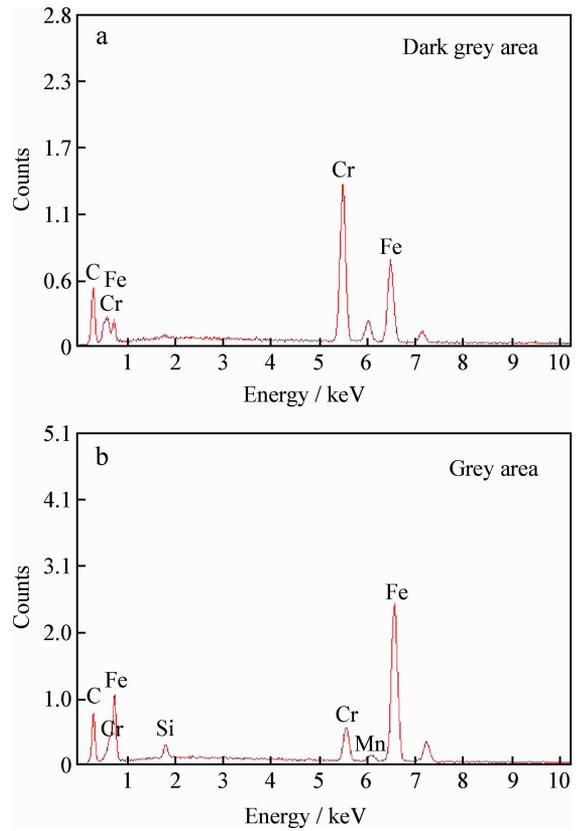


图 4 不含铌堆焊金属 11 号代表性区域的 EDS 能谱分析
Fig. 4 EDS analysis of tipic areas in the hardfacing metal No. 11 excluding Niobium

表 2 不含铌堆焊金属 11 号各区域化学成分分析 (质量分数/%)

Table 2 The composition analysis of each area in the hardfacing metal No. 11 excluding Niobium ($w/\%$)

Area	C	Cr	Fe	Si	Mn
Dark grey	31.19	37.45	31.36		
Grey	32.04	7.24	58.34	1.60	0.78

表 3 含铌堆焊金属 21 号各区域化学成分分析 (质量分数/%)

Table 3 The composition analysis of each area in the hardfacing metal No. 21 including Niobium ($w/\%$)

Area	C	Cr	Fe	Nb	Si	Mn
White	26.13	2.32	2.08	69.47		
Dark grey	20.76	43.33	35.91			
Grey	13.33	8.82	74.55		2.20	1.10

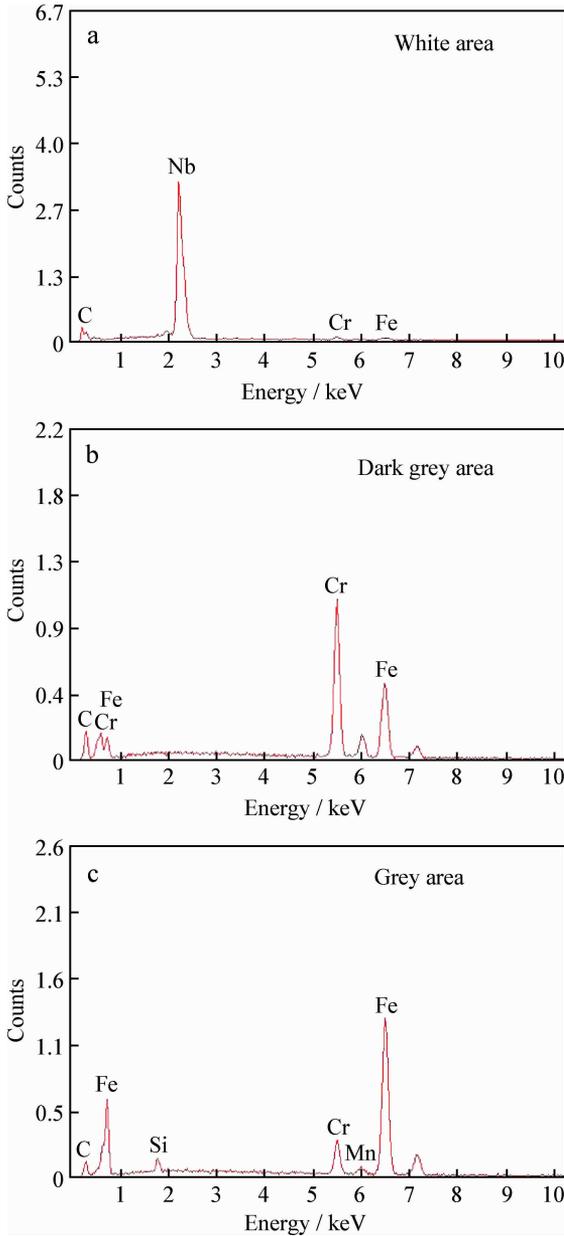


图 5 含铌堆焊金属 21 号代表性区域的 EDS 能谱分析
Fig. 5 EDS analysis of tipic areas in the hardfacing metal No. 21 including Niobium

结合图 2、图 5、图 6(b)和表 3 可以看出,含铌堆焊金属的微观组织为在过共晶组织的基础上弥散分布着菱形状的白色析出物,这些析出物铌含量很高,铬和铁含量都很低,可以判定是 NbC 颗粒。

在彩色金相照片图 3 中,含铌堆焊金属中不同碳化物,也可以清晰分辨出。结合含铌堆焊金属背散射电子的扫描电镜照片(图 2(b))。可以看出:彩色金相中,基体的颜色较白,深灰色组织为初生碳化物(Cr、Fe)₇C₃,色彩斑斓的彩色颗粒

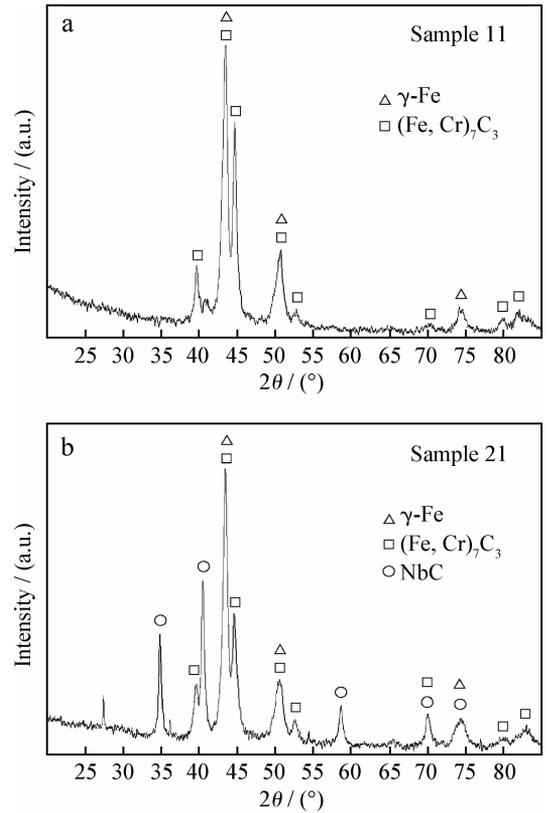


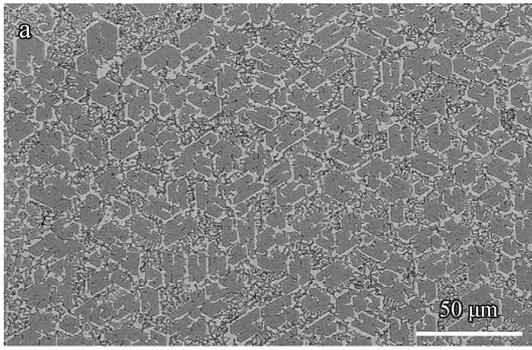
图 6 堆焊金属 X 射线衍射分析

Fig. 6 X-ray diffraction pattern of the hardfacing metal

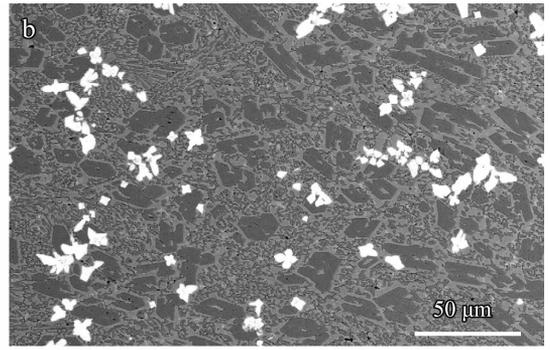
为 NbC。NbC 颗粒分布于初生碳化物(Cr、Fe)₇C₃ 之间或镶嵌在(Cr、Fe)₇C₃ 中。

为研究各种线能量下铌对微观组织的影响,对不含铌的金相试样 11 号、12 号、13 号和含铌的金相试样 21 号、22 号、23 号采用扫描电子显微镜进行了对比分析。其背散射电子的扫描电镜照片如图 7 所示。从图 7 可以看出,不含铌堆焊金属 12 号和 13 号的微观组织与 11 号基本相同,都为典型的过共晶组织。但是随着线能量的增大,初生碳化物(Cr、Fe)₇C₃ 的晶粒明显增大。添加 Nb 元素的堆焊金属 22 号和 23 号的微观组织与 21 号基本相同,都为在过共晶组织基础上弥散分布着白色的 NbC。随着线能量的增大,NbC 逐渐合并长大,开始呈现树枝状。同时初生碳化物(Cr、Fe)₇C₃ 的晶粒也有所增大,但不如不含铌的堆焊金属明显。

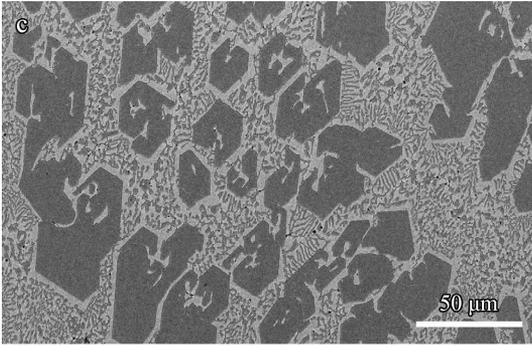
相同线能量下,对比不含铌和含铌的堆焊金属(11 号与 21 号对比、12 号与 22 号对比、13 号与 23 号对比)的微观组织,可以看出:铌的添加,对组织的细化作用非常明显。这是因为铌是比铬更强的碳化物形成元素,在焊缝凝固过程中,



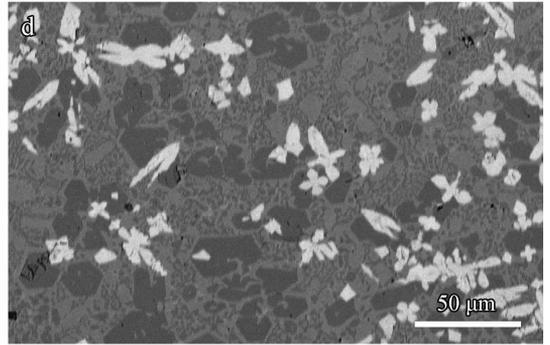
(a) Hardfacing metal No.11 excluding Nb



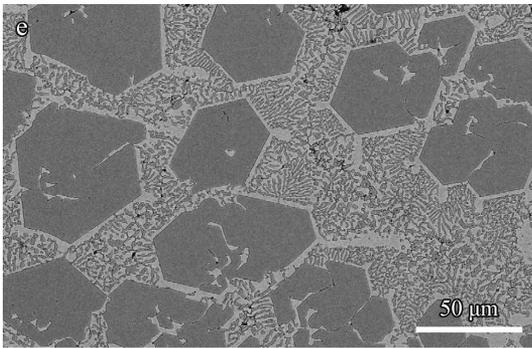
(b) Hardfacing metal No.21 including Nb



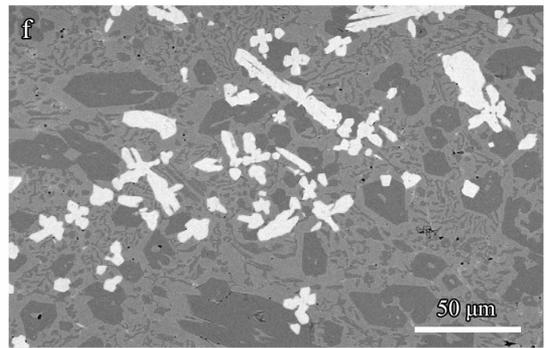
(c) Hardfacing metal No.12 excluding Nb



(d) Hardfacing metal No.22 including Nb



(e) Hardfacing metal No.13 excluding Nb



(f) Hardfacing metal No.23 including Nb

图7 堆焊金属背散射电子的扫描电镜照片

Fig. 7 BES micrographs of the hardfacing metal

钨优先与碳结合,形成了弥散分布的 NbC 结晶核心,阻止了初生碳化物的生长。

2.2 宏观裂纹和宏观硬度

从堆焊试样的表面,可以观察到裂纹的大致分布情况,长度为 180 mm 的焊缝中出现的裂纹数量见表 4。对堆焊金属表面进行了洛氏硬度测试,测试结果也见表 4。

从表 4 和对试样的实际观察可知,同种堆焊金属在不同线能量下,线能量越小,裂纹数量越多,分布越均匀,且裂缝间隙越小;不同堆焊金属

在相同线能量下,含钨堆焊金属的裂纹数量略多于不含钨堆焊金属的裂纹数量。对照微观组织的研究结果可知,线能量越小,碳化物尺寸越细小,裂纹源越多,同时线能量小,堆焊金属的冷却速度快,焊接应力变化速度快,因此容易形成焊接裂纹。堆焊高铬铸铁型材料的主要问题是防止堆焊层脱落,而堆焊层的脱落与单位长度焊缝上的裂纹数量密切相关,裂纹数量过多或过少都容易造成堆焊层脱落,从表 4 的试验结果可以看出,通过控制焊接线能量可以有效地控制单位长度焊缝上的裂纹分布,防止堆焊层脱落。

表 4 高铬铸铁型堆焊金属的裂纹数量和洛氏硬度

Table 4 The crack amount and Rockwell hardness of the high chromium cast iron hardfacing metal

Sample number	11	12	13	21	22	23
Crack amount	24	14	9	27	15	10
Rockwell handness/HRC	59.8	60.6	60.5	60.8	60.9	61.2

从表 4 还可以看出,不同线能量下的堆焊金属洛氏硬度值基本保持不变,同时含铌与不含铌的堆焊金属洛氏硬度值也基本保持不变,他们都在 60HRC 左右。对比微观组织的结果可知,焊接线能量对碳化物尺寸有明显影响,但此时的金属洛氏硬度值不变,这说明碳化物尺寸对洛氏硬度值基本没有影响,影响洛氏硬度值的是碳化物的总量。

另外,虽然 NbC 的显微硬度比 $(Cr, Fe)_7C_3$ 要高一些^[5],但由于 NbC 的数量较少,又是彼此孤立分布的,它不足以影响宏观硬度,同时两者的碳化物总量基本是相同的,因此含铌与不含铌的堆焊金属洛氏硬度值能够基本保持不变,均在 60HRC 左右。尽管如此,从实际使用情况看,不含铌的高铬铸铁型焊丝一般用于对耐磨性要求不高的煤磨,而含铌的高铬铸铁型焊丝多用于对耐磨性要求较高的矿渣磨。

3 结 论

(1)高铬铸铁型堆焊金属中,铌优先与碳结合,形成了弥散分布的 NbC 结晶核心,阻止了初

生碳化物的生长,具有明显的细化晶粒作用。

(2)高铬铸铁型堆焊金属中,不论是否添加铌元素,同种堆焊金属线能量越小,碳化物尺寸越细小,裂纹数量越多,裂纹分布越均匀,且焊缝间隙越小,可以通过控制线能量来控制焊缝的裂纹分布,防止堆焊层脱落。

(3)高铬铸铁型堆焊金属中,改变线能量,以及用少量 Nb 元素取代相同摩尔数的 Cr 元素,其洛氏硬度值基本保持不变,均在 60 HRC 左右。

参考文献

- [1] 朱洪波,周文彬,华勤,等.高铬铸铁中铌的研究综述[J].上海金属,2010,32(1):43-46.
- [2] 田大标.铌在高铬铸铁堆焊层中的存在状态[J].中国表面工程,2008,21(6):37-40.
- [3] 田大标.钼在高铬铸铁堆焊层中的存在状态[J].中国表面工程,2011,24(4):51-54.
- [4] Zhi Xiaohui, Xing Jiandong, Fu Hanguang, et al. Effect of niobium on the as-cast microstructure of hypereutectic high chromium cast iron [J]. Materials Letters, 2008, 857-860.
- [5] 王智慧,贺定勇.NbC 增强 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金组织与磨粒磨损性能[J].焊接学报,2007,28(2):55-58.
- [6] 王清宝,白波,刘景凤,等.Nb 和 Mo 对高碳自保护药芯焊丝熔敷性能[J].焊接学报,2009,30(1):81-84.

作者地址:北京市海淀区学院南路 76 号

100081

安泰科技股份有限公司 焊接分公司

Tel: (010) 6218 8297

E-mail: panchuannet@163.com

• 学术动态 •

第十一届中国表面工程·电镀与精饰年会将在重庆召开

中国表面工程协会电镀分会将联合重庆市科学技术协会于 2012 年 4 月 19 日~22 日在重庆举办“第十一届中国表面工程·电镀与精饰年会”。主要议题有中国制造业的未来及表面工程技术发展趋势、表面工程行业面临的机遇与挑战、航空航天领域的表面处理工艺、电子电镀及线路板表面处理、国防装备表面处理工艺、电镀新工艺新技术、轻金属表面精饰技术、环境保护与清洁生产等。同期举行的活动包括中国表面工程协会电镀分会第七届会员代表大会、中国电镀行业协会工作成就奖颁奖仪式、2012 中国·重庆第八届表面工程技术学术论坛等。

(王文字 供稿)