

## NbC-TiC 耐磨高抗裂堆焊焊条的优化设计

汤文博<sup>1</sup>, 郭云刚<sup>1</sup>, 魏建军<sup>2</sup>, 黄智泉<sup>2</sup>

(1. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州机械研究所, 河南 郑州 450001)

**[摘要]** 为了提高材料表面的耐磨料磨损性能, 对自制的 NbC-TiC 系堆焊焊条进行了正交优化设计。采用光谱仪、洛氏硬度计、光学显微镜、扫描电镜、EDAX 能谱以及磨损试验机分析了堆焊层的成分、组织和性能, 结果表明, 优化焊条的堆焊层成分为: 0.6% C、3.0% Cr、1.5% Nb、0.4% Mo, 硬度达到 HRC59.1, 堆焊层组织为混合型马氏体和少量残余奥氏体 + 弥散分布的 NbC-TiC。该焊条具有高抗裂性, 焊前不预热, 焊后不缓冷, 连续堆焊不产生裂纹的特点。

**[关键词]** 堆焊; 优化设计; 抗裂性; 耐磨性

**[中图分类号]** TG422.1

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2008)06-0036-03

### Optimum Design of NbC-TiC Surfacing Electrode with Anti-wearing and Anti-cracking

TANG Wen-bo<sup>1</sup>, GUO Yun-gang<sup>1</sup>, WEI Jian-jun<sup>2</sup>, HUANG Zhi-quan<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450001, China)

**[Abstract]** To improve the abrasive grain wearability of materials, the orthogonal design has been applied to the self-designed NbC-TiC series surfacing electrode. The microstructure and properties were analyzed by means of OE, rockwell hardness meter, OM, SEM, EDAX and sand paper abrasion test. The results show that the content of the deposited metal of optimization electrode is C0.6%, Cr3.0%, Nb1.5%, Mo0.4%, and hardness up to HRC58.9. The microstructure is the mixed martensite and a little retained austenite with NbC-TiC which are dispersively distributed in the matrix. A kind of surfacing electrode with anti-wearing and anti-cracking has been developed, which the surfacing metal is crack-free even under the conditions of non-preheating and non-postheating.

**[Key words]** Hard-facing; Optimum design; Anti-cracking; Wear resistance

## 0 引言

随着工业技术的迅速发展, 机械设备和零件存在着严重的磨损问题, 造成生产设备提早损坏而停机检修或更换, 由此造成的经济损失不可估量<sup>[1]</sup>。目前, 国内外开发了一些高硬度耐磨堆焊焊条用于修复受损的机械设备或恢复工件的原始尺寸, 如 HF-950(日本)、OKE4-60s(瑞典)、FACEWELD12(美国)、GRIDU36(德国)、我国的 D667 和 D618 等<sup>[2]</sup>。但部分研究片面地追求高硬度, 堆焊层硬度甚至达到 HRC70 以上, 实际用于生产修复时, 反而出现耐磨性降低和严重的裂纹缺陷。

为了解决上述问题, 本文对抗磨料磨损堆焊材料进行了研究, 在限定的合金成分范围内 ( $C \leq 1.5\%$ 、 $Si \leq 4.0\%$ 、 $Mn \leq 2.0\%$ 、 $Cr \leq 8.0\%$ 、 $Mo \leq 1.0\%$ 、 $Nb \leq 1.5\%$ ), 通过正交优化设计确定合金成分的最佳配比, 找出合金元素对堆焊层组织性能的影响规律, 研制了一种 NbC-TiC 耐磨高抗裂堆焊焊条。

## 1 试样材料及试验方法

### 1.1 试验材料

试验焊条采用直径 4mm 的 H08A 焊芯。药皮由石墨、钨铁、45# 硅铁、锰铁、高碳铬铁、钼铁、镍粉、钛铁、萤石、碳酸盐、硅酸盐、钠水玻璃等组成, 呈碱性。堆焊基体材料为 Q235 钢板, 尺寸为 100mm × 100mm × 20mm。堆焊规范参数为: 直流反接, 电流为 140 ~ 180A, 电压为 25 ~ 30V, 焊接速度 100 ~ 150mm/min。

### 1.2 试验方法

用 MEF4A 型金相显微镜观察堆焊层的显微组织, Thermo ARL3460 OE 光谱仪测定堆焊层成分, HR-150 型数显洛氏硬度计测试宏观硬度, Quanta-200 扫描电镜和 EDAX 能谱进一步分析堆焊层组织结构和物相, 使用着色渗透探伤检查裂纹情况。磨损试验在 ML-100 销盘型回转式磨料磨损试验机上进行, 试样制成  $\phi 5\text{mm} \times 25\text{mm}$ , 试验前磨损面用 100#、200#、400#、600#、800# 砂纸打磨光整, 丙酮清洗并吹干。磨粒材料为 180# SiC 金相砂纸。转盘旋转速度 60r/min, 旋转直径 70 ~ 220mm, 径向进给量 1mm/r, 载荷 15N, 转数 300r。用 TG328B 光电分析天平 (感量为 0.1mg) 称取试样在磨损试验前后的质量, 求得磨损量。

**[收稿日期]** 2008-09-01

**[作者简介]** 汤文博 (1965-), 男, 河南睢县人, 副教授, 硕士, 研究方向为耐磨焊接材料。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 堆焊合金成分的设计

合金元素含量是影响焊条性能的主要因素,其中最为重要的是 C、Nb、Mo 和 Cr 的含量。选取 4 因素 3 水平的正交试验方案  $L_9(3^4)$  进行 9 组试验<sup>[3]</sup>,对 A(C)、B(Nb)、C(Mo)、D(Cr)4 个因素各取 3 个水平,正交设计方案见表 1。用光谱仪测定堆焊层的实际成分,用洛氏硬度计测试堆焊层的硬度,结果见表 2。可见,堆焊层的实际成分与设计含量比较接近,其误差是由焊条制备和堆焊工艺的特性造成的。

表 1 堆焊层合金成分设计含量  
Table 1 Design content of deposited alloy

水平	因素/%			
	A	B	C	D
1	0.4	0.5	0.4	1.6
2	0.6	1.0	0.6	2.3
3	0.8	1.5	0.8	3.0

表 2 堆焊层的主要成分和硬度  
Table 2 Content and hardness of specimens

编号	成分/%				HRC
	C	Nb	Mo	Cr	
1 <sup>#</sup>	0.33	0.63	0.68	2.60	45.9
2 <sup>#</sup>	0.54	0.68	0.35	1.77	55.0
3 <sup>#</sup>	0.74	0.65	0.49	3.34	55.2
4 <sup>#</sup>	0.39	1.04	0.54	1.84	46.4
5 <sup>#</sup>	0.57	1.09	0.73	3.02	55.5
6 <sup>#</sup>	0.78	1.17	0.40	2.31	58.4
7 <sup>#</sup>	0.45	1.53	0.37	3.03	55.8
8 <sup>#</sup>	0.61	1.54	0.59	2.37	58.9
9 <sup>#</sup>	0.75	1.53	0.76	1.51	57.0

注:洛氏硬度 HRC 为 5 点的平均值。

试验焊条以堆焊层硬度和磨损量、裂纹情况为考核指标,硬度和磨损量可以共同衡量在中等应力作用下的耐磨性。从实用角度出发,采用综合评分,综合指标的评分关系式如下:

$$\text{总分} = 3 \times (\text{HRC} - 40) - \text{磨损量} \times 100 - \text{裂纹度} \times 2$$

其中,裂纹度为单位面积上堆焊层表面的裂纹长度。由于各试样的硬度值较大,把每个值减去 40,以使计算简便。

### 2.2 正交试验结果和分析

正交试验结果见表 3。表中 K1 这一行的 4 个数分别是因素 A、B、C、D 的第 1 水平所在的试验中对应的综合评分之和,类似地,可得 K2、K3。 $k_1$  这一行的 4 个数,是对应 K1 这一行 4 个数分别除以各水平出现的次数 3 所得的结果,也就是 1 水平所对应的平均值,类似地,可得  $k_2$ 、 $k_3$ 。

考虑到试验误差的影响,要对试验结果进行方差分析,结果见表 4。因为因素 C、D 影响很小,可以当作试验误差处理,用来检验 A、B 因素影响的显著性。由于  $F_A > F_{0.01}(2,4)$ ,说明因素 A 是显著的,其可信度为 0.99,而  $F_B > F_{0.05}(2,4)$ ,说明因素 B 基本显著,可信度为 0.95。

表 3 正交试验极差分析结果

Table 3 Extreme analysis result of orthogonal experiments

编号	A	B	C	D	HRC	磨损量/g	裂纹度	综合评分
1 <sup>#</sup>	1	1	3	2	45.9	0.139	0	3.8
2 <sup>#</sup>	2	1	1	1	55.0	0.136	0	31.4
3 <sup>#</sup>	3	1	2	3	55.2	0.108	0	34.8
4 <sup>#</sup>	1	2	2	1	46.4	0.142	0	5
5 <sup>#</sup>	2	2	3	3	55.5	0.126	1	31.9
6 <sup>#</sup>	3	2	1	2	57.6	0.103	0	42.5
7 <sup>#</sup>	1	3	1	3	54.5	0.137	2	25.8
8 <sup>#</sup>	2	3	2	2	58.9	0.101	0	46.6
9 <sup>#</sup>	3	3	3	1	61.0	0.109	3	46.1
K1	39.60	70.00	104.7	82.50				
K2	109.9	79.40	86.40	92.90				
K3	123.4	123.5	81.80	97.50				
$k_1$	13.2	23.33	34.90	27.50				
$k_2$	36.63	26.47	28.80	30.97				
$k_3$	41.1	41.17	27.27	32.50				
极差	83.8	53.50	22.90	15.00				最佳组合为 A2B3C1D3

表 4 方差分析

Table 4 Variance analysis

方差来源	离差平方和 S	自由度 $\gamma$	均方	F 值	影响	临界值
A	1 349.64	2	674.821	19.67	高度显著	$F_{0.01}(2,4) = 18$
B	543.936	2	271.968	7.930	基本显著	$F_{0.05}(2,4) = 6.9$
C	97.829 0	2	48.914 4			
D	39.368 9	2	19.684 4			
误差 $S_E$	137.20	4	34.299 4			
总和 T	2 030.77	8				

从表 3 中可以看出,A 因素的极差最大,是对试验影响最大的因素,取第 2 水平为好;B 因素的极差较 A 的极差小,对试样影响小于 A,B 取第 3 水平为好;C、D 因素的极差最小,是影响最小的因素,分别取第 1、第 3 水平为好。在已做的试验中,效果最好的是 8<sup>#</sup>试样 A2B3C2D2,而最佳组合为 A2B3C1D3。因此可再做一次 8<sup>#</sup>试验和最佳组合 A2B3C1D3 的试验(编号为 10<sup>#</sup>),以验证正交试验是否正确,并确定最优方案。按照 8<sup>#</sup>和 10<sup>#</sup>方案做出的性能试验结果见表 5,两者结果十分接近。由于 C、D 为非显著影响因素,因此 8<sup>#</sup>和 10<sup>#</sup>是比较接近的方案。综合考虑,最优方案确定为 A2B3C1D3,堆焊层成分为:0.6% C、3.0% Cr、1.5% Nb、0.4% Mo。试验表明,优化的焊条焊接工艺性能很好,不仅具有高的硬度和耐磨性,还具有高抗裂性,焊前不预热,焊后不缓冷,连续堆焊不产生裂纹。

表 5 8<sup>#</sup>和 10<sup>#</sup>方案性能结果比较

Table 5 Property comparison of 8<sup>#</sup> and 10<sup>#</sup>

编号	硬度 HRC	磨损量/g	裂纹度
8 <sup>#</sup>	58.9	0.085	0
10 <sup>#</sup>	59.1	0.086	0

### 2.3 堆焊层的组织和性能

图 1 是 10<sup>#</sup>试样的金相组织照片。可以看出,基体是非常细

小的针状马氏体、成束的低碳马氏体,其间弥散分布少量残余奥氏体和碳化物颗粒。液态金属中首先析出一次碳化物,碳化物的大量析出使得基体“贫碳”<sup>[4]</sup>,为低碳马氏体的形成创造了条件。整个焊缝组织晶粒细小,晶界数量较多,加之残余奥氏体内分布的渗碳体薄片<sup>[5]</sup>在组织中能起到缓和冲击和降低应力

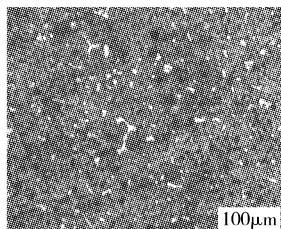
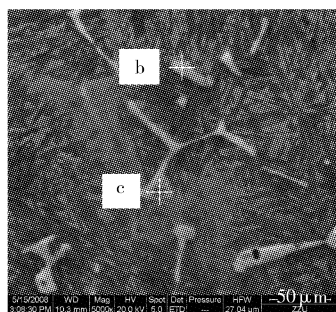
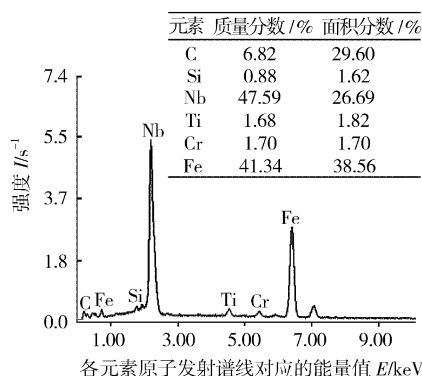


图1 堆焊层的显微组织

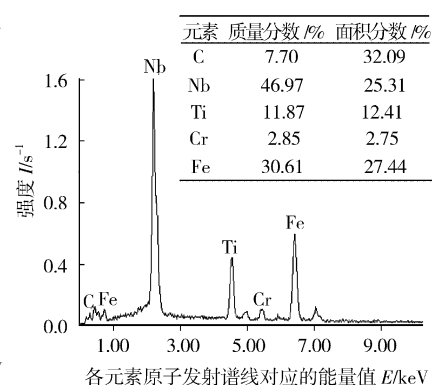
Figure 1 Microstructure of surfacing layer



a 10# 试样的扫描电镜组织



b 白色颗粒能谱分析图



c 黑色核心能谱分析图

图2 10#试样堆焊层 SEM 组织和 EDAX 能谱分析图

Figure 2 SEM and EDAX analysis of specimen 10#

### 3 结论

1) 利用正交优化试验方法,确定焊条最优方案为 A2B3C1D3,堆焊层成分为:0.6%C、3.0%Cr、1.5%Nb、0.4%Mo,硬度达到 HRC59.1。优化焊条不仅具有高的硬度和耐磨性,还具有高抗裂性,焊前不预热,焊后不缓冷,连续堆焊不产生裂纹。

2) 堆焊层组织为混合型和少量残余奥氏体+弥散分布的 NbC-TiC, NbC-TiC 硬质相分布于基体之间或镶嵌在基体中,强韧的马氏体基体提供了支撑作用,使耐磨性得到提高。

3) 在保证抗裂性的前提下,要进一步提高硬度和耐磨性,需要添加更多的 Nb、V、Ti 以增加碳化物数量,高强韧的混合型马氏体基体上弥散分布着相当多的硬质相是最合理的组织。

### [参考文献]

- [1] 刘雪梅,张彦华. 高能束粉末堆焊技术[J]. 表面技术, 2005, 34(4): 9-11
- [2] 李强,汤文博,郭云刚. 含硼耐磨抗裂堆焊焊条的优化设计[J]. 热加工工艺, 2008, 37(15): 1-3
- [3] 马成良,张海军,李素平. 现代试验设计优化方法及应用[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2007. 121-159
- [4] 李午申,张炳范,徐凯龄,等. 免预热耐磨堆焊焊条的研究[J]. 焊接学报, 1997, 18(2): 1-5
- [5] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 240-244
- [6] 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
- [7] 徐国财. 纳米 SiO<sub>2</sub> 在紫外固化涂料中的应用[J]. 涂料工业, 1999, 29(7): 3-6
- [8] 柯博,黄志杰,左美祥,等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 在涂料中的应用[J]. 涂料工业, 1998, 28(12): 29-30
- [9] 邝少林,暨调和. 电镀理论与工艺[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1993. 15-36
- [10] 高学敏,黄世德,李全. 粘接和粘接技术手册[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990. 17-50
- [11] 丛巍巍,周康健,宋书香,等. 纳米填料对环氧涂料防腐耐磨性能影响的研究[J]. 表面技术, 2008, 37(1): 71-74
- [12] 刘竞超,李小兵,张华林,等. 纳米二氧化硅增强增韧环氧树脂的研究[J]. 胶体与聚合物, 2000, 18(4): 15-17
- [13] Mannling H D, Patil D S, Moto K, et al. Thermal stability of superhard nanocomposite coatings consisting of immiscible nitrides [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, (146/147): 263-267
- [14] 黄水华,肖卫东,何培新,等. 环氧树脂聚酰胺固化物的热裂解反应研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 1995, 17(4): 363-367

(上接第 35 页)