

超高硬度堆焊材料的硬度及耐磨性

王宝森, 李午申, 冯灵芝

(天津大学 材料科学与工程学院 天津 300072)



王宝森

摘 要: 通过在堆敷合金系统中添加多种强碳化物形成元素, 在焊接热循环作用下或随后的回火过程中以弥散碳化物形式析出。弥散碳化物的析出既可以在强化堆敷金属的同时, 提高堆敷层抗磨损的能力, 又可以降低基体组织中的碳含量, 增加基体的韧性。利用上述思想, 以 C、Cr、Mo、W、V 作为基础合金系统, 采用二次旋转回归设计方法设计试验方案, 建立了超高硬度堆敷金属的硬度、耐磨性与合金元素间的数学模型, 并研究了药芯焊丝中合金元素对堆敷金属硬度及耐磨性的定量影响规律。

关键词: 堆焊材料; 超高硬度; 耐磨性; 析出碳化物

中图分类号: TG423 文献标识码: A 文章编号: 0253—360X(2003)01—01—04

0 序 言

从目前国内外高硬度堆焊材料的研究状况来看, 超高硬度(大于 60 HRC)耐磨合金多为高铬铸铁型合金系统<sup>[1,2]</sup>, 采用该合金系统虽然能获得很高的硬度, 但其堆敷金属由于脆性很大极易导致开裂。在对堆敷金属强韧性有严格要求的情况下, 例如高速钢零部件、热剪刀和冷轧辊的堆焊修复, 采用高铬铸铁合金系统是不可行的。为此, 研制一种超高硬度、耐磨性优良、抗裂性高的堆焊材料具有很大的现实意义。

1 试 验

1.1 试验设计

1.1.1 合金系统的选择

为避免堆焊过程中产生裂纹, 并使堆敷金属具有超高硬度和优良的耐磨性, 应采用降碳、多种元素合金化的方法, 既要避免在堆敷金属中出现过多的脆性共晶碳化物, 又要通过碳化物形成元素的定碳作用, 降低马氏体基体的含碳量, 从而在保证基体韧性的条件下, 寻求堆敷金属实现超高硬度和耐磨性的合金化配比。根据上述设计思想, 采用基体钢(C—Cr—Mo—W—V 合金系统)作为研究的合金系统。

1.1.2 试验设计方法及试验方案

焊接材料的设计是一个多因子试验设计问题, 各因子之间存在着复杂的交互作用和非线性效应,

传统的材料设计采用的是“经验法”和“单因子轮换法”。这些方法往往带有经验性、局限性, 尤其在开发新材料时盲目性大, 会造成人力、物力和财力的浪费。而且传统方法也只能进行定性研究而不能量化。为避免传统试验方法的缺陷, 采用目前先进的试验优化技术, 利用二次通用旋转回归设计方法设计 32 次试验, 重点考察 C、Cr、Mo、W、V 等元素对堆敷金属硬度及耐磨性的定量影响规律。为了实现试验方案的旋转性, 必须将各元素的自然因子水平进行编码<sup>[3]</sup>, 见表 1。由于二次通用旋转回归设计具有旋转优良性, 因此, 采用该方法设计试验, 不仅可考察因子本身的作用, 而且还可以考察因子本身的非线性作用和各因子间的交互效应, 并根据试验结果建立高精度数学模型, 从而使堆焊材料的设计实现由定性到定量的发展。

表 1 试验因子的水平及编码

Table 1 Level and coding of trial factor

Level of coding factor ( $X_j$ ) $j=1\cdots5$	Level of nature factor				
	C( $X_1$ )	Cr( $X_2$ )	Mo( $X_3$ )	W( $X_4$ )	V( $X_5$ )
Upper limit; 2	0.660	8.000	2.000	12.000	1.000
1	0.585	6.850	1.600	10.250	0.750
Zero; 0	0.510	5.700	1.200	8.500	0.500
-1	0.435	4.550	0.800	6.750	0.250
Lower limit; -2	0.360	3.400	0.400	5.000	0.000
Variation range; $\Delta$	0.075	1.150	0.400	1.750	0.250

1.2 试验材料

试验焊丝采用药芯焊丝计算机辅助设计的方法<sup>[4]</sup>进行设计, 用 0.5 mm 厚的低碳钢带轧制成  $\phi 3.0$  mm 的药芯焊丝。匹配焊剂选用熔炼焊剂

HJ107, 其碱度为 1.04, 同广泛应用的 HJ260、HJ431 相比, 具有合金元素氧化损失小, 过渡系数高, 焊缝成形好, 压坑少, 易脱渣的优点。

1.3 试验方法

采用 MZ-1000 自动埋弧焊机, 直流反接的方式进行堆焊试验, 具体的焊接工艺参数为焊接电流 380~400 A, 焊接电压 30~32 V, 焊接速度 30~32 cm/min, 干伸长 32 mm。

焊后热处理设备选用 SX3-12-12 型箱式电阻热处理炉及数字式控温箱。

在规格为 200 mm×100 mm×30 mm 的 Q235 板进行堆焊试验, 每道长度不少于 190 mm, 堆焊 5 层, 焊后立即放到热处理炉进行 550℃×4 h 回火处理。

用线切割机沿焊道横向切出 10 mm 厚的硬度试件, 用 HR-150A 型洛氏硬度计按 GB 984-85 测量各堆敷金属的硬度, 每层测量 5 点, 取其平均值。

在表面上切取 7 mm×7 mm×25 mm 的磨损试件 3 块, 在磨床上对磨损试件表面进行加工, 使其表面粗糙度达到 0.8。在 MM-2 型磨损试验机进行磨损试验, 试验时, 施加 75 kg 的压力, 采用体积法对磨损体积进行计算, 试验原理及计算公式见文献[5], 取 3 块试件磨损体积的平均值。

2 硬度、耐磨性与合金元素间数学模型的建立

根据对 32 种试验药芯焊丝的试验结果, 利用天

津大学自行设计开发的“WMCAD95”软件, 建立了硬度、耐磨性与 C、Cr、Mo、W、V 各元素间的回归方程, 见式(1)、(2)。

$$y_{HRC} = 58.030 - 0.683X_1 - 1.092X_2 + 0.433X_3 + 1.600X_5 + 1.175X_1X_5 + 0.438X_2X_3 + 0.208X_1^2 + 0.233X_3^2 - 0.342X_5^2, \quad (1)$$

方差:  $\sigma = 1.67$       置信度: 90%

$$y_{MS} = 0.112 + 0.027X_1 + 0.025X_2 - 0.016X_3 - 0.024X_5 + 0.045X_1X_2 - 0.007X_1X_5 - 0.019X_2X_4 - 0.008X_2X_5 - 0.011X_3X_5 - 0.004X_3^2, \quad (2)$$

方差:  $\sigma = 0.0776$       置信度: 95%

式中:  $y_{HRC}$ 、 $y_{MS}$  分别为硬度和磨损体积;  $X_i$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) 为相应自然因子 (C、Cr、Mo、W、V) 的编码因子,  $-2 < X_i < 2$ 。

3 相关性分析

由式(1)、(2)可以看出, 堆敷金属的硬度与耐磨性不仅与各因子的含量有关, 而且与因子间的交互作用和非线性效应强烈相关。这主要是由于堆焊过程是一个高温反应的冶金过程, 因子之间存在着复杂的交互作用造成的。

为了直观定量地分析合金元素对堆敷金属硬度及耐磨性的影响, 利用“WMCAD95”软件, 绘制了单元函数图、二元等值函数图, 如图 1、2、3 所示, 图中除了所考察的因子外, 其余的编码因子取值为零点水平。

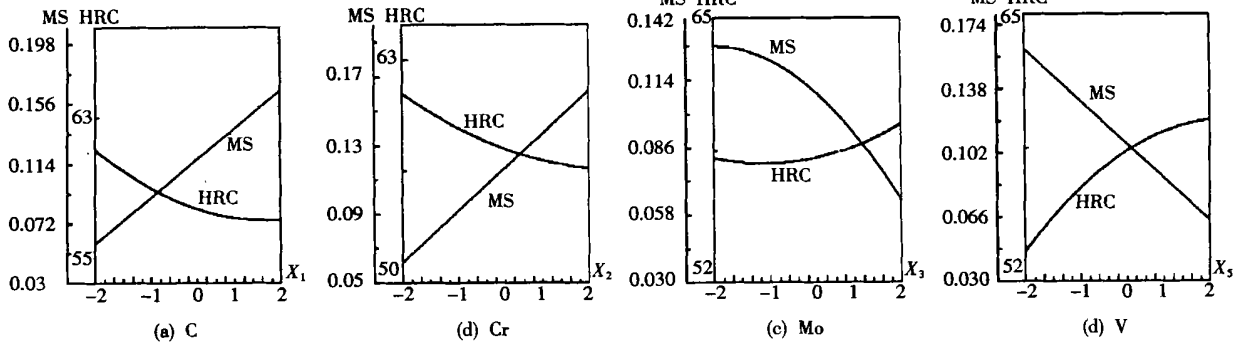


图 1 单因子对堆敷金属硬度和耐磨性的影响  
Fig. 1 Effect of single factor on hardness and wear resistant of hardfacing metal

3.1 单因子对硬度和耐磨性能的影响

图 1 示意出 C、Cr、Mo、V 对堆敷金属硬度 (HRC) 和耐磨性 (MS) 的影响规律, 如下。

C: 随着碳含量的增加, 堆敷金属的硬度呈下降的趋势, 磨损体积呈上升趋势, 即堆敷金属的耐磨性能下降。这是因为随着碳含量的增加, 将使 MS 点

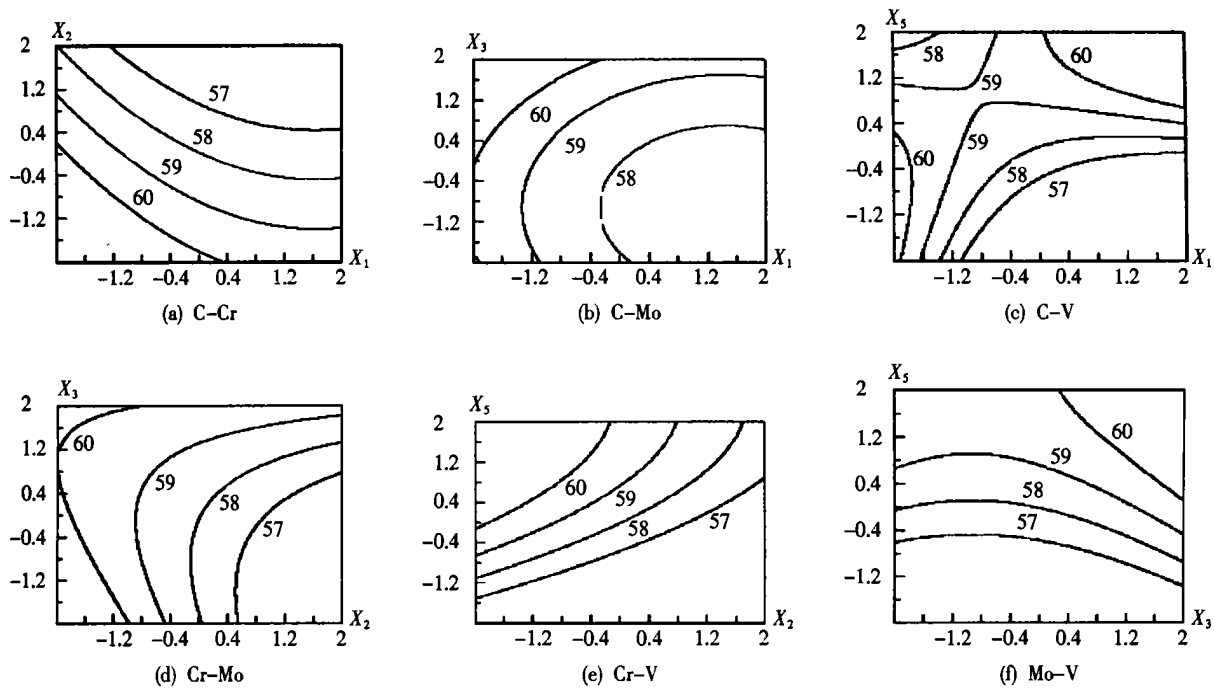


图 2 因子间的交互作用对堆敷金属硬度的影响

Fig. 2 Effect of factorial interaction on hardfacing hardness (HRC)

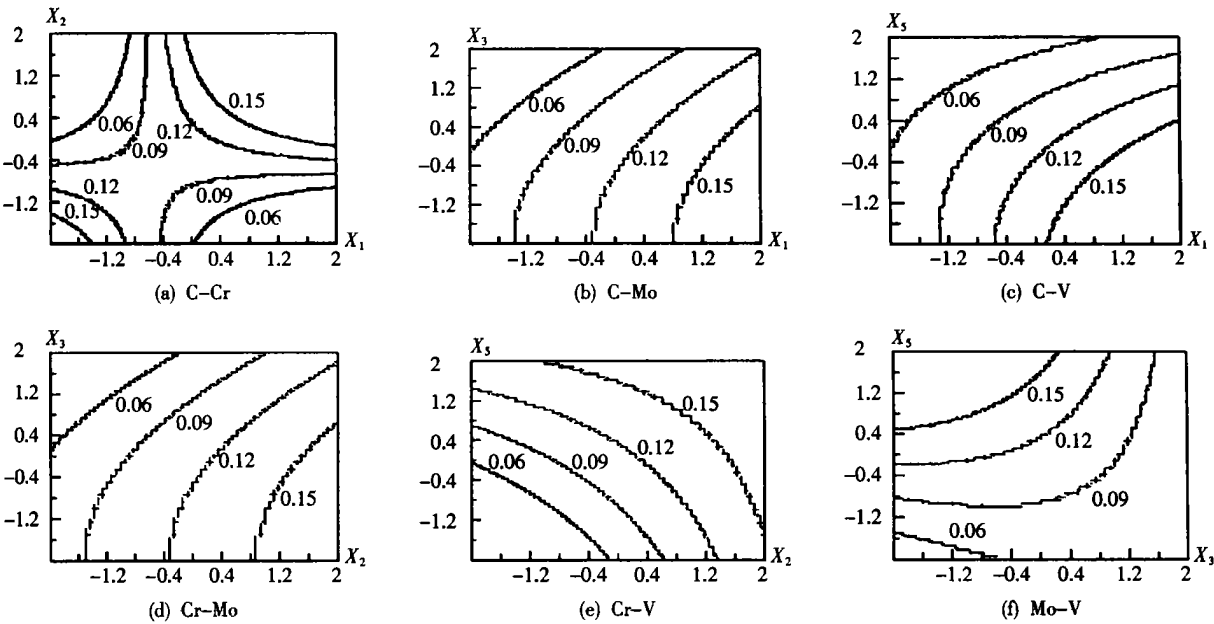


图 3 因子间的交互作用对堆敷金属耐磨性的影响

Fig. 3 Effect of factorial interaction on hardfacing wear resistant ( $\text{mm}^3$ )

急剧降低, 结果会使残余奥氏体的含量增加, 马氏体的含量减少<sup>[6]</sup>。由于马氏体的硬度及耐磨性比奥氏体高得多, 两者含量的相对变化将导致堆敷金属硬度和耐磨性的降低。这说明堆敷金属中碳含量(质量分数, %)大于 0.435 以后, 随着 C 含量的进一步增加, 硬度及耐磨性未必增加, 这与 C 引起堆

敷金属的组织变化有关。

Cr: 随着铬含量的增加, 堆敷金属的硬度下降, 磨损体积上升, 使堆敷金属的耐磨性能下降。此现象并不说明 Cr 降低堆敷金属的硬度和耐磨性, 而是由于在该合金系统中, 有多种碳化物形成元素 (Cr、Mo、V、W 等) 共存, 铬含量的增加, 将使  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  等铬

的碳化物增多,而 Mo、W、V 的碳化物相对减少。由于  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (1 000 ~ 1 520 HV)、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (1 820 HV) 要比 VC (2 500 ~ 2 800 HV)、 $\text{Mo}_2\text{C}$  (1 800 ~ 2 200 HV)、WC (2 400 ~ 2 740 HV) 等碳化物的硬度值都低,将导致碳化物的二次硬化作用减弱,因此使堆敷金属的硬度及耐磨性下降,表明在复杂合金系统中仅提高单一元素含量其硬度和耐磨性未必增加。

Mo: 当 Mo 含量的编码因子大于 -1 之后,随着 Mo 含量的增加,堆敷金属的硬度提高,磨损体积则随着 Mo 含量的增加而下降,改善堆敷金属的耐磨性能。Mo 在堆敷金属中的作用一方面有固溶强化,提高堆敷金属的淬透性的作用,另一方面还会形成  $\text{Mo}_2\text{C}$ , 增进堆敷金属二次硬化效果,因此堆敷金属硬度和耐磨性能提高。

V: 随着钒含量的增加,堆敷金属具有与 Mo 同样的变化趋势,但变化更加急剧。从机理而言,V 在堆敷金属中具有与 Mo 类似的作用,但 V 的二次硬化效果比 Mo 大,因此其作用更为突出。

### 3.2 因子间的交互作用对硬度、耐磨性的影响

采用单因子分析法虽然简便直观,但在多元合金系统中,由于因子间的交互作用非常复杂,单因子函数图不能反映出因子间的交互作用对堆敷金属性能的影响,图 2、3 (图中坐标为各因子的编码因子) 给出了各因子间的交互作用对堆敷金属硬度、耐磨性影响的二元等值线图。

#### 3.2.1 硬度相关性分析

从图 2a、b、c 由 C 与 Cr、Mo、V 间的二元等值线图可以看出,随着碳含量的增加,堆敷金属硬度值下降,这同碳单因子的影响规律相吻合。从图 2d、e、f 可以看出,Mo、V 对堆敷金属硬度的贡献较大。但各元素间的交互作用呈强烈的非线性效应,其硬度的取值取决于各元素间的配比。

#### 3.2.2 耐磨性相关性分析

从图 3 可以看出,合金元素间的交互作用对堆敷金属的耐磨性具有强烈的非线性效应。对比图 2、3 中的变化规律可以看出,C—Mo、Cr—Mo 对

耐磨性的影响与对硬度的影响趋势是一致的,而 C—Cr、C—V、Cr—V、Mo—V 的交互作用对耐磨性的影响与对硬度的影响并不一致,这说明堆敷金属耐磨性与其硬度之间并不一定成正比关系。这主要与金属的组织 and 二次硬化相的种类、大小、及分布有关。

## 4 结 论

(1) 通过二次通用旋转回归设计方法建立了 C—Cr—Mo—W—V 合金系统与堆敷金属硬度、耐磨性之间的数学模型,使堆焊材料的开发与研究从定性化走向量化。

(2) 利用所建立的数学模型,可对由 C、Cr、Mo、W、V 合金系统的堆敷层硬度和耐磨性进行预测、分析,为新材料的开发奠定基础。

(3) 研究表明,堆敷金属中合金元素之间的交互作用对硬度与耐磨性的影响不存在简单的对应关系,耐磨性能好,硬度并不一定高。

### 参考文献:

- [1] 崔占全. 一种新型锻钢冷轧工作辊材料[J]. 钢铁, 2000, 35(6): 54 ~ 56.
- [2] 刘海峰, 刘耀辉, 于思荣. 高碳高钒系高速钢的耐磨性研究[J]. 摩擦学学报, 2000 12(6): 401 ~ 406.
- [3] 茆诗松, 丁元, 周纪芑, 等. 回归分析及其试验设计[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1986. 191 ~ 218.
- [4] 李午申, 巩孝军, 冯灵芝. 药芯焊丝的计算机辅助设计[J]. 机械工程学报, 2001, 37(7): 44 ~ 46.
- [5] 李午申, 宋炳章, 冯灵芝, 等. 高硬度耐磨抗裂堆焊焊条的研制[J]. 中国机械工程, 1999 10(11): 1305 ~ 1305.
- [6] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 280 ~ 285.

作者简介: 王宝森, 男, 1972 年出生, 博士研究生。研究方向为定量冶金及焊接材料等。发表论文 3 篇。

Email: baosenwang@163.com