

耐磨焊条中铁、石墨和碳化硼的优化设计

李慕勤, 张更林, 孙大波

(佳木斯大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007)

摘要: 堆焊焊条设计试验采用L9(3⁴)式正交表设计, 以石墨、碳化硼和铁粉 3 个因素为变量, 通过工艺性能定性分析, 硬度值正交回归, 最优化计算, 得到优化试验配方和建立堆焊层金属硬度的回归方程, 从而找到药皮主要成分石墨、碳化硼、铁粉对堆焊金属硬度、耐磨性等性能的影响规律。其中, 碳化硼影响最大, 铁粉次之, 最小是石墨。随着碳化硼、铁粉、石墨增加硬度与耐磨性提高。铁粉量增加焊缝成型好, 飞溅小。而石墨增加焊缝成型不好。碳化硼增加, 飞溅加大。得到的最佳堆焊焊条配方, 其焊接工艺性能优良, 硬度值达 68~71 HRC。

关键词: 耐磨焊条; 优化设计; 硬度; 耐磨性

中图分类号: TG422.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)03-0036-04

Optimizing Design of Fe- graphite-B₄C in Wearable Welding Rod

LI Mu-qin, ZHANG Geng-lin, SUN Da-bo

(School of Materials Science & Engineering Jiamusi University, Jiamusi 154007)

Abstract: L9 (3⁴) orthogonal form was applied in overlaying welding rod design. Fe, graphite, B₄C three factors were used as variables. Through optimizing design and regression equation of metal hardness the influencing rules of Fe, graphite and B₄C on metal hardness and wear-resistance in overlaying were found. The results indicated that the effect was reduced from B₄C, Fe to graphite. Metal hardness and wear-resistance were increased with the increase of B₄C, Fe and graphite. The welding line showed good moldability and little splashing when Fe was increased. But welding line had bad moldability when graphite was increased, and great splashing happened when B₄C waqs increased. 68~71 HRC of metal hardness and the best performance of overlaying welding were obtained by optimizing design

Key words: wear-resistant welding rod; optimizing design; hardness; wear-resistance

0 引言

制砖机搅刀在搅拌料浆时, 由于砂石粘土等磨料磨损, 造成搅刀严重磨损。堆焊是修复搅刀的一种经济而快速的工艺方法。很多研究者采用不同合金系统进行设计其修复用焊条, 并用于生产^[1,2]。目前, 使用的焊条, 有的耐磨性良好, 但有的焊条工艺性能较差, 焊后焊缝表面不平整光滑、波纹不细密美观, 需要焊后用砂轮磨平。

碳化硼是一种高耐磨材料, 但由于焊接过程易发生分解, 另外, 对焊接工艺性能也有一定影响。本试验采用C-Cr-Mn为主要成分, 通过正交设计方法, 对还原铁粉、石墨、碳化硼成分进行优化设计^[3], 加之稀土硅铁、钛铁作为脱氧剂, 采用还原

铁粉改善焊条工艺性能, 以获得良好的焊条工艺性及耐磨性。

1 试验材料及方法

预试验表明, 石墨、碳化硼对耐磨性影响较大, 还原铁粉可改善工艺性能和增加熔化速率。因此, 以石墨、碳化硼和铁粉 3 个因素为变量, 试验采用 L9(3⁴)式正交表, 以焊条工艺性能、硬度及耐磨性能为研究目标。焊条药皮类型为碱性, 焊条药皮成分大理石 12%~16%, 莹石 10%~12%, 锆英砂 4%~5%, 云母 4%、长石 2%为造渣、造气、成型剂, 以锰铁 12%~16%, 钛铁 10%~13%、硅铁 6%~8%、铬铁 20%~25%为脱氧剂和合金剂, 稀土硅铁 2.5%~3.0%为脱氧剂和细化晶粒元素。焊芯为 ϕ 4, 型号为H08A。以表 1 和表 2 设计焊条

收稿日期: 2006-04-09; 修回日期: 2006-04-27

作者简介: 李慕勤(1955-), 女(汉), 黑龙江绥化人, 教授, 院长。

药皮配方，采用抽签的方法进行随机化试验。

焊条工艺性能评定标准以经验焊工目视观察为准，评定5个级别。采用H150-A测定堆焊层的洛氏硬度。通过多功能磨粒磨损试验机进行堆焊层的磨粒磨损试验，对磨副为124 μm (120目) 刚玉砂布，正压力为1.96 MPa，磨损行程150 m，用万分之一天平称出磨损前后的重量变化为失重量。

表1 因子和水平取值

Table 1 Values of factor and level

水平和因素	F1	F2	F3
1	0	30	15
2	4	10	10
3	8	20	5

2 试验结果及分析

2.1 焊条工艺性能分析

焊条工艺性能测定结果如表3。焊条的工艺性能测定主要以稳弧性、成型、脱渣性、飞溅、烟尘5项指标。在相同焊接工艺因素下，主要比较药皮组成物对工艺性能影响。此次试验电弧稳定性处于中等水平的是1、3、4组，主要表现为电弧飘移或偏吹，熔滴以大颗粒向熔池过渡。配方1中石墨与铁粉含量为高水平，应提高电弧稳定性，但药皮中大理石/莹石<1.2，莹石较多，致使电弧稳定性降低。其它组电弧稳定性均为良好以上。主要石墨、铁粉和碳化硼三成分相互配配，其他影响焊条药皮稳定性的成分大理石/莹石比值接近1.6。

表2 不同因素和不同水平变化的正交水平表

Table 2 Orthogonal form of different factors and levels

序号	1	3	4	2
1	1	1	1	
2	1	2	2	
3	1	3	3	
4	2	2	3	
5	2	3	1	
6	2	1	2	
7	3	3	2	
8	3	1	3	
9	3	2	1	

表3 焊条的工艺性评定结果

Table 3 The evaluation of welding rold technical properties

序号	稳弧性	成型	脱渣性	飞溅	烟尘
1	C	B	C	C	C
2	A	C	B	D	D
3	C	C	B	C	C
4	C	B	B	D	E
5	A	C	B	A	B
6	B	B	B	A	B
7	B	B	B	B	B
8	B	A	A	B	B
9	A	C	B	B	B

堆焊焊条由于合金量较多，药皮熔点较高，要获得良好的焊缝成型，需调整合金及药皮组成物，以获得适当的熔渣凝固温度、高温熔渣的粘度、表面张力以及密度等。配方中成型不好2、3、5、9组，主要是铁粉量在低、中水平。可以看出随铁粉量增加焊缝成型变得越来越好。石墨量的增加焊缝成型不好，碳化硼对焊缝成型影响不是很大。熔渣中加入高熔点的碱性氧化物过多，2、9组大理石/莹石>1.2，使熔渣粘度过大，熔渣表面张力较大，具有离子键的物质，如氧化钙其键能较大，钙等阳离子的综合矩较大，焊缝成型不好。

影响脱渣性的因素主要是熔渣的线膨胀系数、熔渣的氧化性和熔渣的松脆性。低氢型焊条熔渣与低碳钢的线膨胀系数相差较小，脱渣性较差。本实验主要从熔渣的氧化性考虑，绝大多数药皮中脱氧成分都比较适当。1组分析焊缝脱渣不好的原因是铁粉过多，导致脱氧成分相对较少，易氧化生成FeO，Cr₂O₃氧化物，与焊缝金属的体心立方晶格相似，这层氧化膜牢固地粘在焊缝金属表面上，导致脱渣困难。

堆焊焊条产生的飞溅的主要因素是熔渣粘度、过渡方式及合金量过多等。配方1、3组不好，主要是由于熔渣中加入高熔点碱性氧化物过多使熔渣粘度过大，以大颗粒和短路过渡为主，造成飞溅。配方2、4组主要是铁粉过少，熔渣熔点较大，熔滴以大颗粒过渡。铁份量对飞溅影响较大，随加入量增大飞溅变小，碳化硼增加也加重飞溅。铁粉量处于低水平而碳化硼处于中、高水平，飞溅都会加大。

在焊接电弧的高温作用下，在弧柱区焊条端部

的药皮中大量合金及液态铁和熔渣激烈蒸发。由于蒸发而发生的高温蒸汽，从电弧区被吹出后迅速被氧化和冷凝，变为细小的固态粒子。这些微小的粒子飘浮与空气中，弥散于电弧周围就形成了焊接烟尘。其中配方 1~4 烟尘较大。

2.2 堆焊层硬度值和耐磨性分析

试验以硬度为目标函数，硬度值与耐磨性虽然不成正比，但某种程度硬度越大耐磨性越好。测定 9 组试样其 HRC 见表 4。其 HRC 范围在 32~67 之间，差异较大，这说明石墨、碳化硼、还原铁粉对硬度影响较大。配方中对工艺性能良好的试样进行磨损试验，结果见表 4。

根据正交设计中数据的综合分析方法、步骤进行试验数据综合分析。计算出洛氏硬度所有数据的总平均值，将所有数据的总平均值记为 $F(X)$ ， $F(X_i)$ 是第 i 次试验结果 ($i=1, 2, 3, \dots, 9$)。 $F(X)=53.06$ 。算出 F_i 各水平的平均值 (F_i 是因素)， F_i 是 i 因素 j 水平的水平平均值，算出各因素的极差， i 因素的极差记为 ΔF_i 。

$$\Delta F_i = \text{Max}(F_i) - \text{Min}(F_i)$$

$$\Delta F_1 = 66.72 - 42.83 = 23.89$$

$$\Delta F_2 = 58.94 - 45.17 = 13.77$$

$$\Delta \Delta F_3 = 57.33 - 50.06 = 7.27$$

表 4 堆焊层的洛氏硬度和磨损重量

Table 4 HRC and wearing weight loss of overlaying layers

序号	洛氏硬度	磨损重量
1	45	
2	32	
3	51.5	0.00887
4	36.33	
5	59.83	0.00657
6	52.67	0.0058
7	67.5	
8	65.5	0.00573
9	67.17	0.00473

通过以上分析可以得出以下结论：

(1) 每因素各水平对目标函数影响的好坏顺序 (根据水平平均值 F_i) 分别为：因素 F1：3 水平最好，2 水平次之，1 水平最差。因素 F2：3 水平

最好，1 水平次之，2 水平最差。因素 F3：1 水平最好，3 水平次之，2 水平最差。

(2) 各因素对目标函数影响顺序是 (根据 ΔF_i)：因素 F1 最大，因素 F2 次之，因素 F3 最小。

(3) 试验的最佳组合应为 (3, 3, 1) 即因素 F1 取第 3 水平，因素 F2 取第 3 水平，因素 F3 取第 1 水平。由正交表可以看出 (3, 3, 1) 这种组合在试验中并未做到，只做了比较接近的 $F(X_5)(2, 3, 1)$ 、 $F(X_8)(3, 3, 2)$ 、 $F(X_9)(3, 2, 1)$ 3 种组合。而这 3 种组合工艺性能都比较好，从而确定 (3, 3, 1) 这种最佳组合的可信度，通过焊缝金相组织分析试验和磨损试验可进一步确定。堆焊层洛氏硬度测定，其值分别 5 组为 59.83 HRC，8 组为 65.5 HRC，9 组为 67.17 HRC。工艺性能与硬度值都很好的还有配方 6、7。通过正交设计试验得到的最佳堆焊焊条配方，其焊接工艺性能优良，硬度值达 68~71 HRC。

在试验中随着石墨量的增加焊缝组织硬度迅速提高，堆焊层的耐磨性增加。试验表明当碳含量在 0.8%~1.5% 时，低碳钢及低合金钢堆焊层可获得最大硬度，其耐磨性接近或达到最大值。3、5、6、8、9 组中均加入相当多的铬铁，其药皮百分含量分别为 17.25%、15%、14.42%、15.4%、16.13%。铬是提高淬透性的元素，也是碳化物形成元素。在一定范围内，铬含量增加，堆敷金属产生马氏体的数量增加，使堆焊层硬度增加，耐磨性增加。随着碳化硼量增加，堆焊层硬度增加，耐磨性增加。磨损表面形貌观察见图 1，磨损表面塑变的犁沟较深的是 3 组和 5 组，脱落物质较多，并发生开裂。6 组试样磨损较为平滑，产生较为浅的犁沟，未见裂纹，说明该组配方设计硬度适中。8 组和 9 组试样裂纹较多，犁沟浅，是以脆性断裂为主体。

从这 3 个方面综合分析，可以得到以下结论：硬度值从小到大排序：3、6、5、8、9 组。磨损量从大到小顺序：3、5、6、8、9 组。硬度和耐磨性大体对应。

2.3 堆焊层金相分析

对部分试样进行金相观察见图 2。3 组试样可以看到灰色奥氏体基体上弥散的碳化物呈小颗粒状，由于碳化物的存在，使 3 组的硬度大大提高，组织耐磨性也较好。5 组中可以看到白色残余奥氏体、珠光体、马氏体及块状碳化物，堆焊层组织硬度比 3 组高，耐磨性也比 3 组好。6 组中可以看到

