

电弧喷涂工艺参数对 JCW-B 涂层性能的影响*

吴 林¹, 王 勇¹, 董立先¹, 邓化凌²

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061; 2. 山东电力研究院, 山东 济南 257032)

摘 要: 采用正交设计方法和通过极差分析研究了电弧喷涂工艺参数对 JCW-B 涂层结合强度和耐磨性的影响。结果表明, 影响涂层性能的工艺参数主要是电弧电流, 其次是喷涂距离和雾化空气压力。涂层结合强度值随电弧电流的增大而增加。涂层中的孔隙率是影响涂层结合强度的主要因素, 氧化物含量是影响涂层耐磨性能的主要因素, 采用适中的电弧电流可减少涂层中的孔隙率和氧化物数量, 有利于提高涂层的结合强度和耐磨性, 获得具有良好综合性能的涂层。

关键词: 电弧喷涂; JCW-B 管状丝材; 结合强度; 耐磨性;

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2005)05-0047-04

Influence of Arc Spraying Parameters on the Properties of JCW-B Coating

WU Lin¹, WANG Yong¹, DONG Li-xian¹, DENG Hua-ling²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in the University of Petroleum, China, Dongying 257061; 2. Research institute of electric power, China Jinan 257032)

Abstract: The influence of arc spraying parameters on the adhesive strength and wear-resistance of JCW-B coating was studied by orthogonal design test and extreme analysis. The results showed that the main parameters influencing the coating properties are the arc current, spraying distance and air pressure. The adhesive strength increased along with the arc current. The porosity in the coating was the main reason influencing the adhesive strength of coating. The oxide was the main reason influencing its wear-resistance. Selecting a moderate arc current can decrease the porosity and oxide, and increase the adhesive strength and wear-resistance of the coating.

Key words: arc spraying; JCW-B flux cored wire; adhesive strength; wear-resistance;

0 引 言

循环流化床锅炉是近几年发展起来的新一代高效、低污染清洁型的燃烧锅炉。在电力、供热、化工生产等行业中得到越来越广泛的应用, 但其炉管的高温腐蚀磨损问题严重, 尤其是随着大量劣质低品位煤在工业火力发电上的应用使得磨损问题日益突出, 严重影响了循环流化床锅炉的安全经济运行^[1~3]。工业上一般采用如热喷涂、堆焊等表面防护的方法来延长炉内金属件的使用寿命。其中用电弧喷涂技术喷涂 JCW-B 管状丝材制备的涂层具有表面洛氏硬度高、结合强度高、耐磨粒磨损、粘着磨损性能优越等特点, 可用于磨损

非常严重的循环流化床锅炉受热面管道以及风机叶轮等零部件的磨损防护。然而涂层质量直接影响涂层的使用寿命, 电弧喷涂工艺参数的变动对涂层质量影响较大, 文中研究了电弧喷涂工艺参数波动对 JCW-B 涂层的结合强度和耐磨性的影响, 并采用极差分析法对试验结果进行分析, 以探寻工艺参数对涂层性能影响的规律, 为获得优质涂层提供参考。

1 试验材料及方法

试验所选用的基体材料为 45 钢, 其表面经喷砂粗化处理后, 使用 CMD-AS1620 型电弧喷涂设备进行电弧喷涂。喷涂材料为北京有色金属研究总院金甲喷涂公司提供的直径 $\phi 2$ mm 的 JCW-B 管状丝材。药芯成分为 Fe-B 系合金, 表皮为低碳钢带轧制

收稿日期: 2005-09-06; 修回日期: 2005-09-22

基金项目: *山东电力集团公司资助项目(2004A-32)

作者简介: 吴林(1982-), 男(汉), 湖南岳阳人, 硕士生。

而成。

参考 GB-9796-88 规定的对偶试验方法在 WE-10A 万能材料试验机上作拉伸试验。在经过预处理的圆柱端面上喷涂涂层,同经过喷砂处理的对偶件用 E-7 胶进行对心粘接,在 100 ℃保温 3 h 后进行拉伸试验。试样尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。利用金相显微镜和 QUANTA-200 型扫描电镜 (SEM) 对涂层微观结构进行观察并拍照。

采用 MPX-200 型盘销式磨损试验机测试涂层的耐磨性,试样涂层厚度约 1.5 mm。摩擦副试样材料为 45 号钢,经调质处理后在表面渗氮。摩擦速度 200 r/min,载荷 100 N,摩擦时间 0.5 h。圆盘试样尺寸为 $\phi 34 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,摩擦副试样尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。采用精度为 0.1 mg 的 BS210S 型电子天平称重。根据磨损前后试样失重 ΔW 来评价涂层的耐磨性。

表 1 JCW-B 涂层喷涂工艺参数正交设计试验方案

Table 1 Orthogonal design of arc spraying parameters for JCW-B coating

编号	电弧电流 I/A	电弧电压 U/V	喷涂距离 L/mm	空气压力 P/MPa
1 [#]	1(200)	1(39)	1(200)	2(0.5)
2 [#]	1(200)	2(37)	2(180)	1(0.6)
3 [#]	1(200)	3(35)	3(160)	3(0.4)
4 [#]	2(160)	1(39)	2(180)	3(0.4)
5 [#]	2(160)	2(37)	3(160)	2(0.5)
6 [#]	2(160)	3(35)	1(200)	1(0.6)
7 [#]	3(120)	1(39)	3(160)	1(0.6)
8 [#]	3(120)	2(37)	1(200)	3(0.4)
9 [#]	3(120)	3(35)	2(180)	2(0.5)

采用正交设计原理选择 JCW-B 涂层的喷涂工艺参数,根据 $L_9(3^4)$ 正交表^[4],建立正交设计方案,如表 1 所示。考察的工艺参数分别是:电弧电流、电弧电压、喷涂距离和雾化空气压力。对每个工艺参数,分别选取 3 个水平。

2 试验结果及分析

涂层结合强度和磨损失重的分析结果见表 2。由表 2 可见,按 k_1 、 k_2 、 k_3 数值确定的各因数水平组合行为不同。按涂层结合强度确定各因数主次顺序为 I-P-L-U; 按磨损失重确定各因数主次顺序为

I-L-P-U。在两种组合中,电流均占据了首要位置,电压均处于次要位置,而喷涂距离和空气压力两个因数排列顺序不同。说明喷涂距离和空气压力之间存在一定的交互影响作用。

按 k_{1AV} 、 k_{2AV} 、 k_{3AV} 数值确定的各因数最佳水平组合行为也不同。按涂层结合强度确定各因数最佳水平组合为 $I_1P_1L_1U_2$,按磨损失重确定各因数最佳水平组合为 $I_2L_1P_1U_3$ 。可见,喷涂距离和雾化空气压力对 2 个性能指标最佳水平均为 L_1 、 P_1 。电弧电压根据涂层结合强度指标,最佳水平为 U_2 ,而根据磨损失重指标,最佳水平为 U_3 。电弧电流根据涂层结合强度指标,最佳水平为 I_1 ,而根据磨损失重指标,最佳水平为 I_2 。在确定工艺参数时,既要考虑到涂层具有良好的结合性能,又要兼顾到涂层的耐磨性能。综合考虑涂层的服役条件,按具有良好综合性能的 6[#] 试验选取 I_2 水平和 U_3 水平。综上所述,使涂层具有良好综合性能的喷涂工艺参数最佳水平组合为 $I_2L_1P_1U_3$,即电弧电流 160 A,喷涂距离 200 mm,雾化空气压力 0.6 MPa,电弧电压 35V。

3 讨论

3.1 喷涂工艺参数对涂层结合强度的影响

由上述极差分析可知,影响涂层结合强度值的原因主要有两方面。一方面是电弧电流的影响。当电流较小(120 A)时,结合强度较低,平均结合强度仅为 21.12 MPa。当电流增大为 160 A 时,平均结合强度值增加为 26.90 MPa。当电流增至 200 A 时,结合强度值最高,平均结合强度为 29.06 MPa。可见随电弧电流增大,涂层结合强度值增加。另一方面是喷涂距离与空气压力两个因数组合方式的影响。当较大的喷涂距离和较小的空气压力组合时,必然会严重削弱粒子的飞行速度,从而降低粒子的动能,粒子所堆积形成的涂层结构就会疏松,从而降低涂层的结合强度。反之,当较小的喷涂距离和较大的空气压力组合时,由于喷涂距离较近,必然会大大提高粒子的飞行速度,从而增加粒子的动能,粒子所堆积形成的涂层结构就会致密,但同时也必然会加大电弧对涂层的烧烤氧化力度,对涂层的结合强度产生不利影响。

图 1 是涂层拉伸断口 SEM 组织形貌。从图 1 中可以明显看出,涂层中孔隙数量较多。大多聚集在层状粒子交界处,裂纹容易在孔隙聚集处形成。

表 2 喷涂工艺参数试验方案、结果及极差分析

Table2 Result of experiment design and extreme analysis of arc spraing psrameters

编号	电弧电流 I/A	电弧电压 U/V	喷涂距离 L/mm	空气压力 P/MPa	平均强度 $\bar{\sigma}_{AV}/\text{MPa}$	平均失重 $\Delta W_{AV}/\text{mg}$
1 [#]	1(200)	1(39)	1(200)	2(0.5)	29.64	7.29
2 [#]	1(200)	2(37)	2(180)	1(0.6)	31.01	8.89
3 [#]	1(200)	3(35)	3(160)	3(0.4)	26.52	7.28
4 [#]	2(160)	1(39)	2(180)	3(0.4)	25.61	6.72
5 [#]	2(160)	2(37)	3(160)	2(0.5)	26.45	4.23
6 [#]	2(160)	3(35)	1(200)	1(0.6)	28.63	3.21
7 [#]	3(120)	1(39)	3(160)	1(0.6)	21.72	10.62
8 [#]	3(120)	2(37)	1(200)	3(0.4)	20.01	11.67
9 [#]	3(120)	3(35)	2(180)	2(0.5)	21.63	11.99
结 合 强 度	k ₁	87.17	76.97	78.28	81.36	主→次 影响主次: I-P-L-U 最佳水平: I ₁ P ₁ L ₁ U ₂
	k ₂	80.69	77.47	78.25	77.72	
	k ₃	63.36	76.78	74.69	72.14	
	k _{1AV}	29.06	25.66	26.09	27.12	
	k _{2AV}	26.90	25.82	26.08	25.91	
	k _{3AV}	21.12	25.59	24.90	24.05	
	R	7.94	0.21	1.19	3.07	
磨 损 失 重	k ₁	23.46	24.63	22.17	22.72	主→次 影响主次: I-L-P-U 最佳水平: I ₂ L ₁ P ₁ U ₃
	k ₂	14.16	24.79	27.60	23.51	
	k ₃	34.28	22.48	22.13	25.67	
	k _{1AV}	7.82	8.21	7.39	7.57	
	k _{2AV}	4.72	8.26	9.20	7.84	
	k _{3AV}	11.43	7.49	7.38	8.56	
	R	6.71	0.72	1.82	0.99	

注: k₁——水平 1 三次试验结果之和, k_{1AV}= k₁/3;
k₂——水平 2 三次试验结果之和, k_{2AV}= k₂/3;
k₃——水平 3 三次试验结果之和, k_{3AV}= k₃/3;
R——极差, R=K_{max} - K_{mix}

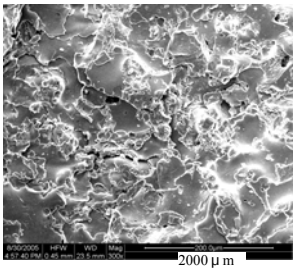


图 1 涂层断口 SEM 组织形貌

Fig.1 The SEM morphology of the cross-section of coating

从断裂的迹象看, 断裂主要发生在孔隙聚集处。这说明层状粒子交界处是涂层结合最薄弱的地方。由此可见孔隙是导致涂层结合强度降低的主要原因。

3.2 喷涂工艺参数对涂层耐磨性的影响

由表 2 可以看出, 电弧电流对涂层耐磨性的影响较大。从总体趋势上看, 当电弧电流为 120 A 时, 涂层的磨损失重较多; 当电流为 160 A 时, 涂层的磨损减少; 说明涂层抗磨损能力增强。但当增加到 200 A 时, 涂层的磨损失重反而增多, 说明过大的电流会削弱涂层的耐磨损能力。

继续对不同电弧电流的涂层形貌进行观察并比较 3 种不同电弧电流时涂层截面形貌。如图 2 所示。照片中黑色相为孔隙, 灰色相为氧化物, 是由氧化物药芯在基体上沉积而成。亮白色相为涂层金属。是管状丝材表皮金属在基体上沉积而成。涂层均为结合致密的层状结构。当电弧电流为 120 A 时, 涂层中的孔隙数量较多; 这是因为小电流在喷涂时提供的热量不够, 使粒子熔化不够充分, 在基体上

沉积时来不及与周围粒子充分反应就已经凝固,因此孔隙的数量明显增多,从而导致结合强度下降,耐磨损能力下降。当电流为 160 A 时,涂层中的孔隙和氧化物的数量减少,而且层状结构中的亮白色金属带相互衔接较好。当增加到 200 A 时,涂层的结合强度值增加,但是涂层中的氧化物数量明显增加。这是因为过大的电流会导致对飞行粒子的烧烤力度过大,因此氧化物的数量明显增多,从而导致耐磨损能力下降。

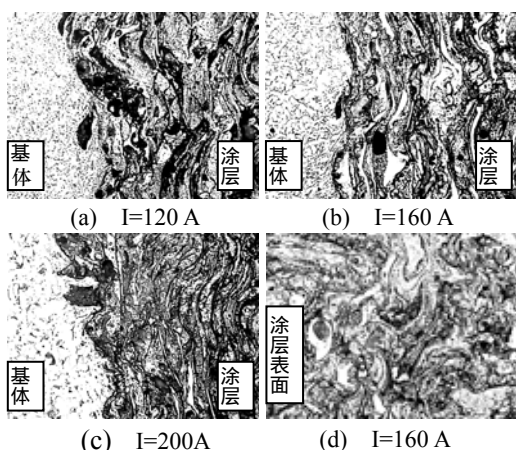


图 2 不同电弧电流的涂层形貌 $\times 400$

Fig.2 Surface morphologies of coating deposited under different arc current conditions $\times 400$

由此可见,孔隙和氧化物是造成涂层磨损失重的主要原因。而孔隙率是影响涂层结合强度的最重要的因素。采用适中的电弧电流可减少涂层中孔隙率和氧化物数量,从而提高涂层的结合强度和耐磨性,获得具有良好综合性能的涂层。

4 结 论

(1) 影响涂层结合强度的工艺参数主要是电弧电流,其次是喷涂距离和雾化空气压力,电压的影响较小。在本试验条件下,使涂层具有良好综合性能的喷涂工艺参数最佳水平组合为 $I_2L_1P_1U_3$,即电弧电流 160 A,喷涂距离 200 mm,雾化空气压力 0.6 MPa,电弧电压 35 V。

(2) 增大电弧电流,涂层结合强度值增加,但电弧电流过大,涂层的耐磨损性能却有所下降。涂层中的孔隙和氧化物是影响涂层性能的主要原因。采用适中的电弧电流可减少涂层中的孔隙率和氧化物数量,有利于提高涂层的结合强度,增强涂层的耐磨性能。

参考文献:

- [1] 刘德昌,吴正舜,张世红,等.我国循环流化床锅炉的发展现状和建议 [J]. 动力工程, 2003,23(6): 2377-2379.
- [2] 马增益,严建华,潘国清,等.惯性分离器对循环流化床顶部受热面磨损的影响 [J]. 锅炉技术, 2000, 3(6):12-13.
- [3] 王新宇.循环流化床锅炉的磨损及防止方法 [J]. 中氮肥, 2001,(4):54-55.
- [4] 栾军.现代试验设计优化方法 [M]. 上海:上海交通大学出版社. 1995.

作者地址: 中国石油大学(华东)机电工程学院 257061

材料研究所 Tel: 13954638482 (0546)8393907

E-mail: wlin8284@163.com

• 学术动态 •

可持续制造国际研讨会在上海召开

2005 年 10 月 12~14 日,“可持续制造国际研讨会”在上海交通大学隆重召开。这次会议的成功举办意味着中国成为全球首个承办可持续制造与再制造领域顶级会议的发展中国家。

来自中国、美国和德国自然科学基金委员会的领导,以及中国、美国、德国、英国、韩国和巴西等国家可持续制造与再制造领域的院士、专家、企业家及学者 100 余位代表出席了会议。

在大会报告上,各国政府官员和专家学者分别介绍了各国及欧洲、全球的可持续制造和再制造的发展现状、政策及关键技术。中国自然科学基金委员会工程与材料学部机械学科主任雷源忠教授代表中国基金委作了题为《发展再制造工程,构建循环经济,建设节约型社会》的主旨报告。

在企业家论坛中,来自美国卡特皮勒公司,德国拜耳公司、西门子公司、盖德梅斯公司,英国利斯特派特公司,以及中国重型汽车集团公司等国内外知名企业的老总和代表报告了各自企业在可持续制造与再制造方面取得的经验。

会议还进行了分组交流与自由讨论,就再制造中共同关心的问题交换了意见,并参观了上海大众发动机再制造厂和上海汽车回收与再制造示范工程。

(王海斗)

