

钢基表层复合材料制备及其磨损性能研究

邵建敏, 裴旭明, 刘建秀, 宁向可, 刘永军

(郑州轻工业学院机电工程学院, 450002, 郑州)

摘要: 在确定钢基表层复合材料组分的基础上, 通过磨损试验得到了不同配方表层复合材料的磨损量. 采用正交试验法优化了配方, 确定的最佳组分为: SiC 粒度约 80 μm , 体积分数 40%; Cr 粉粒度 60 μm , 体积分数约 1.5%; 聚苯乙烯(EPS)颗粒余量. 分析了各组分对复合层磨损性能的影响, 结果表明: Cr 粉的加入可使试样的耐磨性显著提高; SiC 的含量及粒度对试样的耐磨性均有较大影响. 表层显微组织分析表明, 利用优化配方得到的表层复合材料的组织对复合材料整体性能的提高非常有利.

关键词: 表层复合材料; 碳化硅颗粒; 正交试验; 耐磨性

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0081-05

Preparation of Steel-Based Surface Composites with Wear Resistance

SHAO Jianmin, PEI Xuming, LIU Jianxiu, NING Xiangke, LIU Yongjun

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: By determining the components of steel-based surface composites, the wear resistance of the composites with different formulas was obtained by wear test. The formulas were optimized by orthogonal test, and the optimum components were obtained: about 40% (volume fraction) of SiC particles in 80 μm dimension, about 1.5% (volume fraction) of Cr powder in 60 μm dimension, and EPS particles as the remainder. The analysis indicates that the wear resistance of the steel-based surface composites can be obviously improved by Cr powder, and significantly influenced by SiC content and granularity. Investigation to the microstructure of the surface layer shows that the wear resistance of the steel-based surface composite can be significantly improved with the formula.

Keywords: surface composite; SiC particle; orthogonal test; wear resistance

在表层耐磨复合材料的制备过程中, 耐磨涂料配方对表面复合层的耐磨损性能具有决定性的作用. 李彦明等人利用铸渗工艺, 采用膏块法制备了 WC/低 Cr 铸铁复合铸渗层试样, 通过金相观察及磨损试验, 表明随着膏块中 WC 颗粒含量的增加, 渗层中的硬质相也相应增加, 在 WC 的质量分数为 50% 时渗层质量最好, 磨损量最小^[1-2]; Uskov 等人进行了铁碳合金铸件的表层复合材料和表面合金化研究, 结果发现以 SiC 为涂层组元制作表层复合材料时, 铸件的耐磨性能提高了 2.9 倍, 用 Cr 合金为涂层组元进行表面合金化时, 铸件的耐磨性能提高

了 3.2 倍^[3]. 文献[4]通过铸渗工艺在钢锭模上形成了 0.2~0.6 mm 厚的 Al 合金化抗热涂层, 使模具的高温抗磨损能力提高了 7%~20%. 近年来, 研究人员在表面铸渗工艺研究方面做了不少工作, 但实际上只是处于试验阶段, 在大批量生产中, 依然存在很多问题.

本文以对钢基表层复合材料铸渗复合层耐磨性能影响较大的 3 个因素——增强体颗粒粒度、增强体颗粒含量和合金元素含量作为试验的研究目标, 通过耐磨涂料配方正交试验获得了优化配方, 并对表层复合材料的显微组织以及各成分对耐磨性能的

影响进行了分析.

1 钢基表层复合材料的制备

1.1 试验组分的确定

基体材料选择常用的 35 钢. 选择 SiC 颗粒作为抗磨硬质相, 粒度分别为 80、10 和 2.5 μm , 这样既不会因粒度过大使复合材料产生脆性裂纹, 也不会因粒度过小导致熔解严重, 且颗粒间的孔隙可保证金属液能够渗透进去. 考虑到材料的耐磨性要求, SiC 颗粒的含量不能太少, 一般以体积分数 30%~50%为宜, 因此本试验的耐磨涂料中 SiC 颗粒的体积分数取为 30%、40%和 50%.

Cr 能形成耐磨性高的合金碳化物, 并能固溶于钢基体而提高基体的强度、硬度和蠕变抗力, 因此选择 Cr 粉作为耐磨涂料中的合金粉末. 试验发现, Cr 粉含量过少会使增强颗粒在基体中的固溶性变差, 复合层的强度与耐磨性下降, 但是加入量过多时, 又会使粘结剂的含量下降, 增强颗粒在外力作用下易脱落, 从而导致复合层耐磨性下降, 因此试验中取其体积分数为 1%、1.5%和 3%, 粒度为 60 μm .

聚苯乙烯(EPS)小颗粒气化有助于金属液的渗入, 使高温金属液与 SiC 颗粒和 Cr 粉充分接触, 发生冶金化学反应, 因此在耐磨涂料中加入了不同含量的 EPS 小颗粒.

1.2 制备工艺流程

真空实型铸渗工艺是先用 EPS 泡沫塑料制备试样模型, 然后按照表 1 所示的正交试验耐磨涂料配方将各固体粉末称量后均匀混合, 加入粘结剂制成耐磨浆料, 并均匀地涂刷在试样模型的表面, 涂刷时要求 SiC 颗粒能附着在试样模型表面不脱落. 试验中采用人工二次涂刷法, 此法操作简单、方便, 一次涂刷厚度在 0.7 mm 左右, 干燥后涂层的厚度约为 1.3~2.0 mm. 将刷好涂料的试样模型烘干后埋入干砂中振实, 在真空状态下浇注. 浇注时试样模型在高温下分解气化, 产生的气体在负压的抽力作用下逸出, 而金属液与试样模型表面的耐磨涂层产生热作用, 互相扩散、渗透, 随着金属液的凝固成型, 在其表面就形成了耐磨复合材料层. 整个工艺流程如图 1 所示, 2 号复合材料试样在磨损试验前的扫描电镜照片见图 2.

1.3 正交试验及结果分析

为优化耐磨涂料配方, 采用正交试验法进行配方试验, 表 1 为耐磨涂料正交因素水平表, 正交试验方案及试验结果见表 2, 其中磨损系数 $M=1/\Delta m$,

Δm 为磨损前、后的质量差(质量损失).

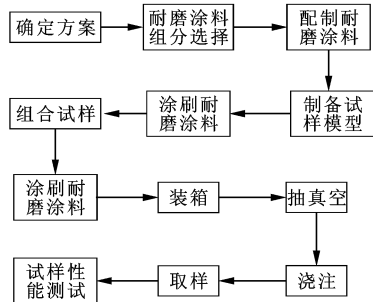


图 1 试验工艺流程图

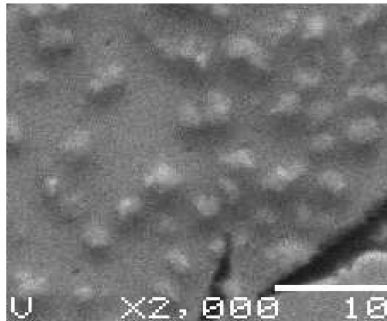


图 2 2 号表层复合材料原始试样的扫描电镜照片

表 1 耐磨涂料正交因素水平表

水平	因素		
	A/ μm	B/%	C/%
1	80	30	1.0
2	10	40	1.5
3	2.5	50	3.0

注:因素 A 为 SiC 颗粒的粒度;因素 B 为 SiC 颗粒的体积分数;因素 C 为 Cr 粉的体积分数.

表 2 正交试验方案及试验结果

试验号	A/ μm	B/%	C/%	M/ g^{-1}
1	80	30	1.0	7.692
2	80	40	1.5	9.901
3	80	50	3.0	8.065
4	10	30	1.5	8.130
5	10	40	3.0	8.621
6	10	50	1.0	7.545
7	2.5	30	3.0	7.634
8	2.5	40	1.0	7.246
9	2.5	50	1.5	9.101
基体 1				3.367
基体 2				3.322

表 3 中列出了磨损系数 K_{ij} 、 k_{ij} 以及极差 R_j 的计算值. 通过对正交试验结果进行计算,能够找出最佳的耐磨涂料配方,也能估计出各因素影响的重要程度^[5].

表 3 正交试验参数计算结果

磨损参数	对应 A	对应 B	对应 C
K_1/g^{-1}	25.650	23.456	22.483
K_2/g^{-1}	24.296	25.768	27.132
K_3/g^{-1}	23.980	24.711	24.320
k_1/g^{-1}	8.553	7.819	7.494
k_2/g^{-1}	8.099	8.589	9.044
k_3/g^{-1}	7.994	8.237	8.107
R/g^{-1}	0.559	0.770	1.550
因素主→次: C→B→A; 优化方案: A ₁ B ₂ C ₂			

下面给出因素 A 的 K_{ij} 、 k_{ij} 、 R_j 计算过程,其他因素的计算过程相同.

(1) K_{ij} 表示表 2 第 j 列中对应水平 i 的试验指标数据之和. 在因素 A 所在的第 1 列上,1、2、3 号试验的 A 取水平 1,所以 K_{11} 为 1、2、3 号试验结果(磨损系数 M)之和

$$K_{11} = 7.692 + 9.901 + 8.065 = 25.658 (\text{g}^{-1})$$

在因素 A 所在的第 1 列上,4、5、6 号试验中 A 取水平 2,所以 K_{21} 为 4、5、6 号试验结果之和

$$K_{21} = 8.130 + 8.621 + 7.545 = 24.296 (\text{g}^{-1})$$

在因素 A 所在的第 1 列上,7、8、9 号试验中 A 取水平 3,所以 K_{31} 为 7、8、9 号试验结果之和

$$K_{31} = 7.634 + 7.246 + 9.101 = 23.981 (\text{g}^{-1})$$

(2) k_{ij} 表示表 2 中任一列上因素取水平 i 时所得试验结果的算术平均值. $k_{ij} = K_{ij}/s$,其中 s 为任一列上各水平出现的次数. 在本试验中, $s=3$,在因素 A 所在的第 1 列中

$$k_{11} = K_{11}/s = 25.658/3 = 8.553 (\text{g}^{-1})$$

$$k_{21} = K_{21}/s = 24.296/3 = 8.099 (\text{g}^{-1})$$

$$k_{31} = K_{31}/s = 23.981/3 = 7.994 (\text{g}^{-1})$$

(3) R_j 表示极差,在表 3 的任一列中

$$R_j = \max\{K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}\} - \min\{K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}\}$$

或

$$R_j = \max\{k_{1j}, k_{2j}, k_{3j}\} - \min\{k_{1j}, k_{2j}, k_{3j}\}$$

在因素 A 所对应的第 1 列中

$$R_1 = 8.553 - 7.994 = 0.559 (\text{g}^{-1})$$

极差 R 表明各因素的水平改变对试验结果的

影响,极差越大,表示该列因素的数值在试验范围内的变化会导致试验指标在数值上有更大的变化,所以极差最大的那一列,就是因素的水平对试验结果影响最大的因素,即最大因素. 从表 3 可以看出, $R_C > R_B > R_A$,因此各因素从主到次的顺序为: C(Cr 粉体积分数) > B(SiC 体积分数) > A(SiC 粒度).

试验过程中考核的指标是磨损参数,指标值越大越好,所以应挑选因素 K_1 、 K_2 、 K_3 (或 k_1 、 k_2 、 k_3) 中最大的值对应的那个水平. 因为

A 因素列 $K_1 > K_2 > K_3$

B 因素列 $K_2 > K_3 > K_1$

C 因素列 $K_2 > K_3 > K_1$

由此得出耐磨涂料的最优方案为 $A_1B_2C_2$,即 SiC 粒度为 $80\text{ }\mu\text{m}$, SiC 体积分数为 40%, Cr 粉体积分数为 1.5%.

2 磨损试验

试验采用 ML-100 型磨粒磨损试验机进行,工作原理如图 3 所示. 对表 2 中的 9 种配方各浇注出 2 个样品,选择铸渗效果好的进行耐磨性试验. 将样品加工成 $\varnothing 6\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的圆柱试样,试验前用酒精溶液在超声波清洗器中清洗,自然晾干后用 BS210S 型电子天平称量,磨损后再次清洗、称量,通过比较磨损量来判断试样耐磨性的优劣.

试验采用粒度为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的 SiC 砂纸,更换试样的同时也更换砂纸,以保证每个试样具有相同的试验条件. 试验工作参数为:工作载荷 18 N,圆盘转速 60 r/min,进给量 4 mm/r,进给循环 20 次.

为比较试样与钢基体的耐磨性,切割出 2 组基体试样同时进行试验. 试验结果见表 2,表中基体的数据为每组试样的平均值.

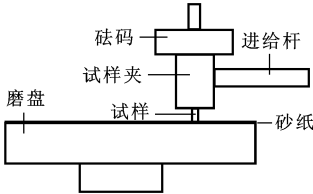


图 3 ML-100 型磨粒磨损试验机工作原理图

3 复合层成分对磨损性能的影响

通过表 2 可知:钢基复合材料的磨损系数明显高于基体,说明配方的各成分对耐磨涂料的磨损性能影响显著. 下面对此进行详细分析.

3.1 Cr 粉含量的影响

由图 4 可见,Cr 粉含量对钢基表层复合材料的耐磨性影响极为显著.随着 Cr 粉含量的增加,试样的耐磨性提高.当耐磨涂料中 Cr 粉体积分数达到 1.5%(水平 2)时,磨损系数达到最高值.但是,Cr 粉含量并不是越多越好,当 Cr 粉含量继续增加时,复合层的耐磨性又呈现下降的趋势.因此,Cr 粉体积分数在 1.5%左右比较适宜.

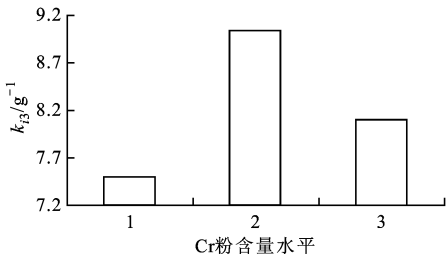


图 4 耐磨涂料中 Cr 粉含量对耐磨性的影响

3.2 SiC 含量的影响

SiC 的含量对试样表层耐磨性的影响如图 5 所示,可以看出当 SiC 含量增加时,试样的耐磨性显著提高,但是当耐磨涂料中 SiC 的体积分数超过 40%时,随着 SiC 含量的增加,复合层的耐磨性反而降低.因此, SiC 的体积分数在 40%左右比较适宜.

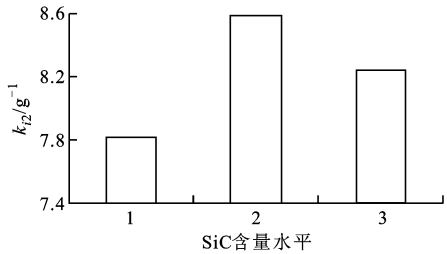


图 5 耐磨涂料中 SiC 含量对耐磨性的影响

3.3 SiC 粒度的影响

SiC 的粒度对试样表面耐磨性的影响如图 6 所示,可看出随着 SiC 粒度的减小,复合层的耐磨性逐渐降低.文献表明,当磨粒作用在复合材料表面时,首先是软相脱离基体,随着磨损的进行,表面只剩下孤立的浮雕状硬粒子,这些孤立的硬粒子可以对基体磨损起到屏蔽作用,即产生所谓的“阴影效应”^[6]. SiC 颗粒的粒度越大,则其能够屏蔽的面积也越大,因此“阴影效应”越明显,材料的耐磨性也就越高.所以,较粗 SiC 颗粒制备的表层复合材料具有较佳的耐磨性.但是, SiC 颗粒太粗也会影响材料的均匀性并导致脆性.从试验和理论分析的结果来看, SiC 粒度在 80 μm 左右比较适宜.

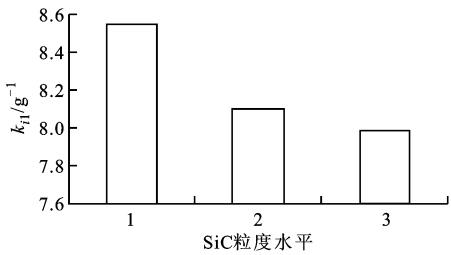


图 6 耐磨涂料中 SiC 粒度对耐磨性的影响

4 复合层显微组织分析

对获得的钢基表层复合材料取样,用金相砂纸打磨,采用金刚石抛光膏抛光处理,经过体积分数为 4%的硝酸酒精溶液腐蚀后,进行金相显微镜和扫描电镜观察,得到复合层的显微组织和增强颗粒照片,见图 7、图 8 和图 9.

从图 7 和图 8 可见,复合层组织较为致密,与基体的交界处有一条黑色阴影,经分析,这条阴影的形状及是否出现与抽真空的方向有关.从图 9 可以看出, SiC 颗粒分布在指纹状的珠光体组织上,尽管有一定程度的熔解,但是对颗粒的体积分数影响不大,且颗粒依然保持完整,对基体的强化作用比较明显,因此对复合材料整体性能的提高非常有利.

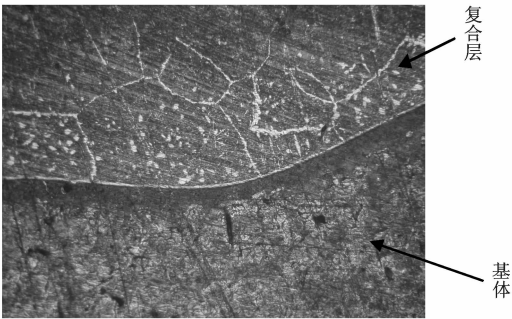


图 7 2 号试样复合层的显微组织

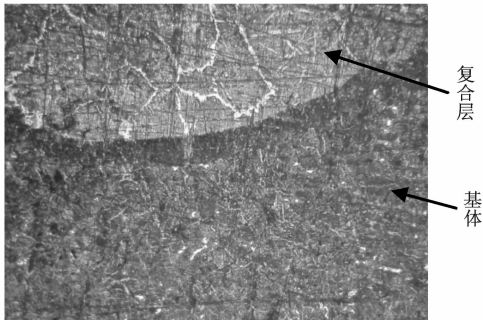


图 8 3 号试样复合层的显微组织

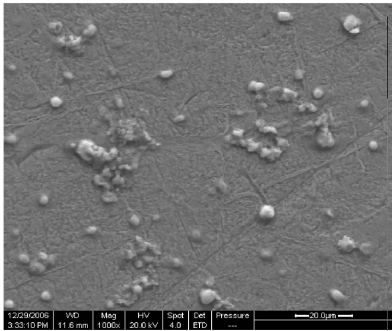


图 9 2 号试样复合层的扫描电镜照片

5 结 论

本文通过计算和试验分析,得到以下结论.

(1)利用正交试验得到的配方数据是可靠的.

(2)耐磨涂料中 Cr 粉含量对钢基表层复合材料的耐磨性影响十分显著. Cr 粉的加入可以明显提高表层材料的耐磨性,其在耐磨涂料中的体积分数在 1.5%左右比较适宜.

(3)SiC 含量对表层复合材料耐磨性的影响也较为显著. 随 SiC 含量的增加,试样的耐磨性显著提高,其体积分数以 40%左右为宜. SiC 的粒度对表层复合材料的耐磨性也有影响,粒度取 80 μm 比较适宜.

参考文献:

[1] 李彦明,刘忆,时海芳,等. 低铬铸铁铸渗 WC 颗粒的工艺研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(3): 93-95.

LI Yanming, LIU Yi, SHI Haifang, et al. Research on process of casting-penetrating WC particles into low-Cr cast iron [J]. Hot Working Technology, 2008, 37(3): 93-95.

[2] 宁爽,边秀房,田永生,等. WC 对铁基激光熔覆层微观组织与磨损性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(6): 422-424.

NING Shuang, BIAN Xiufang, TIAN Yongsheng, et al. Effects of WC on the microstructure and wear resistance of Fe-based laser-cladding coating [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008, 28(6): 422-424.

[3] USKOV I V, KRUSHENKO G G, SHENIN A B. Improving the wear resistance of steel castings by strengthening the surface with silicon-carbide and chromium-carbide powders [J]. Soviet Journal of Friction and Wear, 1989, 10(2): 124-126.

[4] Anon. Surface alloying the operating layer of ingot molds [J]. Mezhdunarodnaya Kniga, 1998(3): 78-81 (in Russian).

[5] 郑少华. 试验设计与数据处理[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2004.

[6] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京:冶金工业出版社, 2001.

(编辑 葛赵青)