

SHS 反应火焰喷涂 Al_2O_3 陶瓷涂层修复工艺研究*

叶明慧, 郭焕升, 杜心康, 王建江

(军械工程学院先进材料研究所, 石家庄 050003)

摘要: 利用自蔓延(SHS)反应火焰喷涂技术, 以 $(\text{CuO}-\text{Al})$ 为反应主体系, 设计了具体工件表面修复 Al_2O_3 陶瓷涂层的工艺。通过对陶瓷涂层的孔隙率、结合强度、耐磨损性能测试及实际应用表明, 该工艺能够满足工件表面修复技术的需要, 为该技术在具体工件上的实际运用提供了借鉴。

关键词: SHS 反应火焰喷涂; 工艺; 陶瓷涂层; 性能测试

中图分类号: TB39

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)05⁺-0187-03

Research on the Repairing Technology of the SHS Reaction Flame Spraying to Prepare Al_2O_3 Ceramic Coating

YE Ming-hui, GUO Huan-sheng, DU Xin-kang, WANG Jian-jiang

(Institute of Advanced Materials, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, 050003)

Abstract: The technology was designed that Al_2O_3 ceramic coating was prepared to repair the specific workpiece surface through the SHS reaction flame spraying with $\text{CuO}-\text{Al}$ being the main reaction system. The performance test of porosity, bond strength, microhardness and abrasability and the practical applications showed that the technical requirements of surface repairing were satisfied. And many references were provided for the practical applications.

Key words: SHS reaction flame spraying; technology; ceramic coating; performance test

0 引言

在高温、磨损、腐蚀、热冲击等恶劣环境下服役的零部件和构件表面极易出现磨损失效和腐蚀失效等问题, 陶瓷材料具有优良的耐高温、耐磨损、耐腐蚀及隔热的特性, 是在恶劣环境条件下应用的理想材料之一, 因而在金属表面涂覆陶瓷涂层技术受到世界各国的广泛重视。但因陶瓷材料韧性差, 不易合成与加工, 且成本较高等缺点, 极大地限制了其实际应用。为解决这一问题, 利用自蔓延(Self-propagating High-temperature Synthesis, 缩写 SHS)化学反应自身放热特点, 可将燃烧合成技术与氧-乙炔火焰热喷涂技术相结合, 即 SHS 反应火焰喷涂技术, 在钢件表面形成了结合强度较高、耐磨性能良好的陶瓷涂层。自蔓延火焰喷涂陶瓷涂层技术, 以其生产过程简单、成本低、能量高且利用充分, 易产生亚稳相, 可原位生成传统火焰喷涂难以得到的陶瓷涂层, 将易加工成型的基体与性能优异的陶瓷表层合成为一体, 显示出巨大的发展潜力和

广阔的应用前景^[1,2]。

本研究基于 SHS 反应火焰喷涂技术, 为实际使用工件的表面修复, 设计并总结出一套较完整的表面喷涂涂层工艺流程, 对工业上易磨损、易腐蚀、易高温失效的零部件修复提供了新的技术工艺借鉴。

1 工件及加工条件和设备

1.1 工件及材料:

由某厂提供表面磨损材料为 ZG40Cr28Ni48 W5 的煤粉燃烧器喷嘴整流板、材料为 40Cr 的水液压柱塞泵柱塞及矿山用引风机与排粉机叶片等, 并分别用相同材料做出测试试验用标准试件。

1.2 喷涂反应体系:

以 $\text{CuO}-\text{Al}$ 为燃烧反应主体系, 辅以 $(\text{Ti}+\text{B}_4\text{C}+\text{C})$ 添加剂组成反应体系。底衬材料为镍铝自熔合金粉^[3]。

1.3 加工及检测设备:

压力式喷砂机、改制 CSFS-I 型高能火焰喷枪、氧、氩气及乙炔供气系统、箱式电阻炉、GJ328A 分析天平、Instron1195 电子拉伸试验机、MM-200 型磨损试验机等。

2 SHS 反应火焰喷涂工艺

收稿日期: 2006-08-01

修回日期: 2006-09-01

基金项目: *国家自然科学基金资助项目(50272084)

作者简介: 叶明慧(1956-), 男, 高级工程师。

2.1 待修复工件表面的预处理

为了提高涂层与基材间的结合强度,对待修复工件表面的进行预处理,其工艺流程包括:喷砂除锈、溶剂除油、砂磨粗化和镍丝拉毛粗化。喷砂预处理磨料材料:60#棕刚玉;喷砂方式:高效压力式;工艺设备:压力式喷砂机;工艺参数:气体压力 ≥ 0.6 MPa,气体流量 $5\sim 6\text{ m}^3/\text{min}$,喷砂距离 $150\sim 200\text{ mm}$,喷砂角度 $\geq 75^\circ$ 。喷砂结束时工件表面出现新鲜的金属表面,无锈迹。喷砂完毕尽快实施下一步工序,其间隔时间不宜超过 2 h ^[4]。由于需要修复的工件均为黑色金属,采用两步擦拭除油法,其步骤为:第一步,配制碱液除油剂。其配方是:氢氧化钠(10%)、碳酸钠(5%)、磷酸钠(5%)、焦磷酸钠(8%)、雕牌洗衣粉适量(活性剂),溶剂配好后用洁净干布蘸液擦拭。第二步,直接用温水清洗,不但去除残余碱液,而且加速干燥。为了增加工件与涂层间的结合面积,控制涂层和基材冷却时应力的发生程度,缓和涂层内部应力,采用了使工件本体表面粗化的方法。用角向砂轮机轻蹭工件表面。使工件表面出现横向、纵向错落不一的粗纹,以达到一定的粗化,本工序结束时再次清洁工件表面。为了使粗化效果显著,再用镍丝(焊条)作电极,待喷涂工件表面为另一电极,采用手弧焊电源进行轻微焊接,使待喷涂工件表面形成很多小的凹凸点,以凸点高度不超过 0.5 mm 为宜,拉毛后即刻进行喷涂。

2.2 喷涂粉料的制备

反应原料选用纯度较高的工业纯 Al 粉和工业纯 CuO 粉,配以适量添加剂,其反应喷涂用粉体的制备流程如下:

原始粉料处理 → 配料 → 机械混合 → 烘干 → 破碎 → 筛分 → 喷涂用粉料

2.2.1 粉料的配备

采用 CuO-Al 为主燃烧体系,体系中的铝过量 6% ^[5]。在主燃烧体系中加入 25% 添加剂($\text{Ti}+\text{B}_4\text{C}+\text{C}$)。由于原始粉料混合后直接用于喷涂时,在送粉气的强气流作用下,容易被吹散开来,使参加反应的两种粒子不能充分接触,反应转化率很低,因此,喷涂之前要将原始粉制成团聚粉^[6],其配系主要按照喷涂的化学热反应摩尔比进行。

2.2.2 粉料的制备

原料粉体经研磨后,采用湿环境下机械混合。用适量酒精将 $6\sim 10\%$ 酚醛树脂调成乳状,加入具

有固定化学配比且混合均匀的反应原始粉料,用电动搅拌机充分搅拌后,置于 100°C 左右烘箱烘干。

混合烘干后的粉料呈块状,然后以万能破碎机进行机械破碎,筛分出 $43\sim 61$ 微米粒度范围的团聚粉进行喷涂。

2.3 工件的 SHS 火焰喷涂加工

待修复工件在外表面形态虽然有较大的区别,但各种工艺的工序流程是大体上相同的,基本上包括工件和粉料的准备、喷涂施工、涂层冷却处理,其工件涂层的喷涂加工流程如下:

预热及工件的安装 → 喷涂粘结底层 → 喷涂工作涂层 → 覆砂缓冷

2.3.1 工件、粉料喷涂前准备

在这一步骤中主要包括粉体、工件的预热及夹具、工件的安装。所需粉体经制备过筛后,取出 $43\sim 61\text{ }\mu\text{m}$ 粒度范围,静置于烘箱中进行粉体预热前的除湿处理。若出现结块,应立即碾碎等待预热喷涂。底层粉体、Al-CuO、 $\text{Ti}+\text{B}_4\text{C}+\text{C}$ 均定为 200°C 若干分钟预热即可。工件的预热温度根据工件材料与尺寸大小而定。对于煤燃烧器整流板来说,它的尺寸大、线膨胀系数小,矿山用引风机与排粉机叶片材质较硬,热胀冷缩系数较小,故预热温度可稍高;但是对于柱塞零件来说,为了防止出现较大的变形,预热温度不能太高。

考虑到待修复工件中,煤燃烧器喷嘴整流板和叶片表面均为平板状,采取直接倚靠在工作台上垂直喷涂,而柱塞表面为圆弧状,需要夹持在手动旋转三爪卡盘上进行喷涂。

2.3.2 喷涂施工

采用自行改制的 CSFS-I 型高能火焰喷枪,用氧、乙炔作辅助外界能源,根据喷枪自身功率和其他性能指标,并考虑 Al-CuO 反应喷涂粉料的燃烧性能,氧气压力和乙炔压力分别固定为 0.6 MPa 和 0.11 MPa ,并且在喷涂过程中保持中性焰。采用氩气作为送粉气和保护气氛。正常喷涂过程中,送粉气压力保持在 0.5 MPa 左右。矿山用引风机与排粉机叶片待加工表面相对较平整,作定势垂直恒定距离喷涂,煤燃烧器整流板因煤粉有特定的流向,需要特别注意迎粉面重点加工,对凸起部进行横距离走枪喷涂,而对于柱塞工件,首先用三爪卡盘固定柱塞一端,施工持枪时定势恒距离喷涂,辅助者匀速转动转盘,保持柱塞作匀速转动,以确保喷涂涂层

的质量。

2.3.3 喷涂后的冷却

喷涂后工件埋于砂堆中冷却，防止因热应力产生变形和裂纹。

2.4 工件涂层的后期处理

经过 SHS 热喷涂的工件还不是成品，其涂层具有一定的孔隙率，对要求防腐蚀性能的涂层表面来说，孔隙是极为有害的，特别是那些互相连接并且从表面延伸到基体的孔隙，会使腐蚀介质透过这些孔隙腐蚀基体材料。因此，可采取了不同的后期处理，对于柱塞样进行机加工后封孔处理，而对于煤燃烧器喷嘴整流板、叶片进行扩散处理^[7]。

柱塞的机加工和封孔处理是紧接着喷涂施工之后进行的。在机加之前，先用固态的微晶石蜡封孔剂借助喷涂工件的余热使其熔化而将涂层孔隙封闭。其目的是防止磨粒或碎屑嵌入涂层孔隙损伤涂层。车、磨削机加工后，涂层中原有的部分盲孔暴露出来成为开孔，再次进行封孔处理。再次封孔处理后，将乙烯树脂涂刷于柱塞表面，放置于空气中干燥。

对于煤燃烧器喷嘴整流板、叶片根据其使用要求，只进行扩散强化处理。具体步骤为：将喷涂后的整流板和叶片用沥青铝封孔剂处理涂层，以防涂层氧化，再在箱式电阻炉中加热到 788 ℃，并保温 3 h，结束后清理表面。

3 测试结果

对主燃烧体系 CuO+Al(过量 6%)相同条件下制成的试件进行测试，其结果如下：

孔隙率的测定采用浮力法^[4]：将刚喷涂完的试

样投入水中，使涂层在急冷条件下从基体脱落，在 110 ℃温度下干燥 2 h 后，用细金属丝吊起，分别测定其在空气和水中的重量。喷涂层的孔隙率由下式计算：

$$P = \left[1 - \frac{\frac{W_z}{\rho_z}}{\frac{(W - W')}{\rho_w} - \frac{W_c}{\rho_c}} \right]$$

式中：

P —涂层的孔隙率 (%)； W_z —涂层在空气中的重量 (g)； W_c —浸入蒸馏水部分的金属丝重量 (g)； W —涂层、金属丝的总重量 (g)； W' —由金属丝吊挂的涂层在蒸馏水中的重量 (g)； ρ_z —涂层材料的密度 (g/cm³)； ρ_c —金属丝的比重 (g/cm³)； ρ_w —蒸馏水的密度 (g/cm³)。

根据 GB / T8642-1988(热喷涂涂层结合强度的测定)规定的涂层结合强度测定方法测定工件涂层结合强度，结合强度计算公式： $P=N/S$ ，其中： N —拉力 (kN)； S —试件横截面积 (mm)。

耐磨损测试中，对比试样采用 45 钢 840~860 ℃淬火后 200 ℃回火，硬度为 53~58 HRC。试验时使喷有陶瓷涂层的试样固定，且与对比试样啮合，在两试样间加上压力载荷 $N_0=490(N)$ ，电机带动对比试样绕轴向转动，使对比试样以 400 r/min 与陶瓷涂层进行滑动摩擦。对比试样转动 1 h 约 24000 转 (机器上可读出转数 Z)。通过称量喷涂陶瓷层的试样磨损试验前的质量 (W_0) 和试验后的质量 (W_1)，求出质量差 ($W_k=W_0-W_1$)，通过比较 W_k 的大小来定性反映陶瓷涂层的耐磨性， W_k 越小说明耐磨性越好^[5]。对涂层的测试结果见表 1。

表 1 涂层测试结果
Table 1 Coating test result

测试项目	强度试验				磨损试验				
	内容	孔隙率/%	拉力/kN	实际结合面积/mm	强度/MP	W_0/g	N_0/N	$Z/\text{转}$	W_1/g W_k/g
数据及结果		10.5	13.3	0.9S *	31.61	91.5283	490	24007	91.5002 0.0281

* S 为试件横截面积 (mm)。

表中实验数据均为 5 次实验的平均值。

(下转第 202 页)