

文章编号: 1001-3849(2005)03-0015-04

# 铁基电弧喷涂铝层的高频感应重熔工艺

王继东

(燕山大学 材料科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 利用高频感应重熔工艺对铁基电弧喷涂铝层进行处理。分析了工作电流、感应时间对涂层组织的影响,并做出了感应重熔过程中平均功率和温度的分布情况。结果表明,铁基电弧喷涂铝层的重熔先从界面开始,然后向表层推进,处理后的喷涂层与基体之间形成了铁铝金属间化合物,达到了冶金结合,当感应电流为 300 A,感应时间为 35 s时,所获得的重熔涂层质量最好。

**关键词:** 重熔; 电弧喷涂; 铝涂层; 冶金结合

**中图分类号:** TG174.445 **文献标识码:** A

## High Frequency Induction-remelting of Arc-spraying Aluminum Coating on Iron Substrate

WANG Ji-dong

(Material Science &amp; Engineering College, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract** The arc-spraying aluminum coating on iron substrate was treated by induction remelting. The influences of induction current and induction time on the quality of the coating after remelting were analysed. The distribution of average power and temperature during the induction process were also deduced. The results show that, during the remelting, the interface of the coating and substrate was firstly remelted, then the remelting zone advanced towards the outside direction. Fe-Al intermetallic compounds were formed between the aluminum coating and the steel substrate after remelting. When induction current is 300 A and induction time is 35 s, the best quality of remelting coatings can be obtained.

**Keywords** remelting; arc-spraying; aluminum coatings; metallurgical bonding

### 引言

电弧喷涂技术是 20 世纪 80 年代兴起的热喷涂技术新秀。这项技术是将两根丝状金属喷涂材料在喷枪端部短路产生的电弧为热源,将熔化的金属丝用压缩空气气流雾化呈微熔滴,高速喷射到工件表面形成喷涂层的一种工艺。由于其具有应用领域广、涂层性能好、节能、经济、安全等特点而日益受到重视<sup>[1]</sup>。但是由于粒子喷射速度有限且氧化程度严重,

使电弧喷涂的涂层质量受到影响,存在一定量的夹杂和气孔,降低了涂层的耐腐蚀性能。另外,就结合强度而言,电弧喷涂涂层和基体之间的结合力虽然优于氧气乙炔火焰喷涂涂层,但是终究属于机械结合,结合力较弱,因而不能承受载荷、不耐磨粒磨损和冲蚀磨损。近些年来有人采用普通箱式高温炉高温扩散的方法来促进涂层和基体之间铁铝金属间化合物的形成<sup>[2,3]</sup>,借此来改善涂层性能和结合强度,由于这种工艺对工件采用整体加热,反应过程难以

收稿日期: 2004-04-22

基金项目: 原机械工业技术发展基金(95JA0507)和河北省科学技术研究与发展计划(01212210D)

作者简介: 王继东(1975-),男,吉林长春人,燕山大学材料科学与工程学院硕士研究生。

控制,存在对基体的热影响过大的缺陷,而且不适合对工件某个部位的单独处理。

高频感应重熔是一种应用电磁场感应加热的方法对预先制备好的喷涂层进行处理,来提高涂层致密性和与基体结合强度的工艺。本文采用高频感应技术对电弧喷涂铝层的重熔处理进行初步研究探讨。

表 1 电弧喷涂丝材的化学成分

元素名称	Al	Cu	Fe	Si	Fe+ Si	其它杂质
质量分数 /%	99.7	0.01	<0.16	<0.16	<0.26	单个 0.03

### 1.2 电弧喷涂工艺

将铁基体表面经喷砂后除去氧化皮、疲劳层、有机污染层等,并使表面得以粗化、净化,增大金属表面晶粒的塑性变形,造成晶格缺陷,使基体表面处于易于发生反应的状态,有助于喷涂层与基体之间的

表 2 喷砂和电弧喷涂参数

电弧喷涂设备	喷砂类型 矿渣 / $\mu\text{m}$	喷涂电流 / A	喷涂电压 / V	空气压力 / MPa	喷涂距离 / mm	送丝速度 / ( $\text{m}^{\circ}\text{min}^{-1}$ )
XDP系列	100~125	80	32	0.55	150	1.5

### 1.3 高频感应重熔工艺

为防止在感应重熔过程中氧气透过涂层通孔渗入氧化基体和熔融铝,在喷涂完成后对试样使用涂料为水玻璃和高铝 625水泥混合涂料进行保护。重熔后涂料自行脱落。采用 SP-25型高频感应加热设备,高频感应重熔装置如示意图 1 感应重熔工艺参数见表 3

表 3 感应重熔工艺参数

感应重熔设备	输入电压 / V	移动速度 / ( $\text{mm}^{\circ}\text{s}^{-1}$ )	升降温方式	感应线圈材料	感应线圈内径 / mm
SP-25	380	3	缓升缓降	$\varnothing$ 6紫铜管	22

### 1.4 分析方法

截取试样的中间部位作为分析对象,在 Nephot-21 型光学显微镜下观察试样的显微结构,测量涂层厚度;在 D/max  $\gamma$  B 型 X 射线衍射仪上分析涂层不同深度的相组成。

## 2 实验结果和分析

### 2.1 工作电流对重熔的影响

感应加热所产生的热量  $Q$  与工作电流  $I$  之间的关系式为<sup>[4]</sup>:

## 1 实验过程

### 1.1 实验材料

试样为  $\varnothing 14\text{mm} \times 100\text{mm}$  的钢棒。采用电弧喷涂的方式在铁基体上预制铝喷涂层。喷涂丝材为工业纯铝,丝材直径为 3 mm,化学成分见表 1

快速结合。喷砂后表面外观灰暗色,无光亮反射斑、亮线。然后在尽量短的时间内实施电弧喷涂,以免基体再次被污染。喷涂层厚度约为 0.7~0.8 mm。喷砂和电弧喷涂工艺参数见表 2

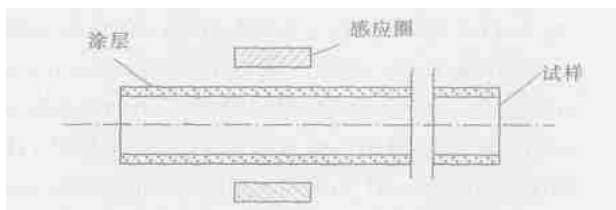


图 1 感应重熔装置示意图

$$Q = I^2 R t$$

式中:  $Q$  为热量, J;  $I$  为电流, A;  $R$  为电阻,  $\Omega$ ;  $t$  为时间, s

即感应加热所产生的热量随工作电流的增加而增加,因此工作电流是影响重熔效果的一个重要工艺参数。我们在实验中选用范围在 180~450 A 的工作电流,观察各工作电流条件下涂层的重熔情况。

实验发现,当电流超过 350 A 时,温度升高过快,铝涂层很快熔化流淌,但是在截取试样时发生涂层崩落现象,这表明涂层与基体形成良好的冶金层;

实验还发现当工作电流较高时,虽然涂层表面熔融流淌,但是涂层中间部位相对于原始状态变化很小,或者根本没有进行重熔,仍有大量气孔和夹杂存在。当工作电流小于 250 A 时,热量积累较慢,铝层不能很好的熔化,难以向铁基体扩散,并且增大了试样被氧化的几率。本文经过尝试性实验后,发现当工作电

流处于 250~350 A 时,重熔效果相对好一些,因此选定感应电流为 300 A。

## 2.2 感应时间对重熔涂层组织的影响

我们采用 300 A 的感应电流对试样进行了时间分别为 10、20、30、35 s 的重熔处理。图 2 反映了不同重熔时间条件下喷涂层的组织变化情况。

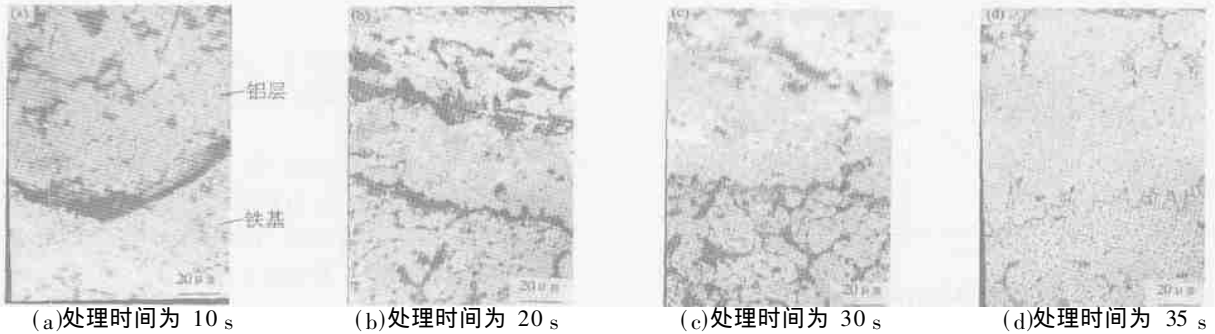


图 2 重熔过程中涂层的组织形貌

感应重熔初期,铝涂层与基体之间界线非常分明,无明显的扩散过渡层,如图 2(a)所示。由于加热时间较短,涂层大部分仍保持原貌,仅仅是消失了层状的搭嵌结构,但仍存在一定量的气孔和渣类夹杂。随着加热时间的延长,界面附近以及涂层内部开始发生变化,如图 2(b)所示,在界面处有铝向铁基体渗入的趋势,原先在界面处存在较多的渣类有所减少,并向涂层表层方向推进汇集。与基体相邻的铝涂层开始呈现单一的致密结构。

图 2(c)为感应时间 30 s 的涂层组织形貌。界面处的涂层已经与基体较好的结合在一起,涂层组织在重熔后显得更为均匀致密,气孔和渣类继续聚集并向外层推出。当感应时间继续增加到 35 s 时,涂层重熔的区域继续增大,见图 2(d)。一方面在界面处铝向铁基体渗透,在光学显微镜下可以看到大约为 100 μm 宽的较为明显的明亮带,经 X 射线衍射证明为铁铝化合物。这表明涂层和基体的结合方式已经由机械结合转变为冶金结合;另一方面,涂层本身也更加致密,在一定的深度范围内已经观察不到气孔和夹杂的存在,气孔和渣类几乎全部被推向涂层顶部。

由于感应重熔属于热量随时间积累的过程,因此感应时间也不宜过长,实验证明感应时间在 35 s 左右比较合适。否则将发生“过烧”,使涂层熔融流淌,影响工件尺寸,破坏工件的表面形状。

对涂层各个深度的 X 射线衍射分析表明,涂层由表及里的分布依次是: Al-Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>-FeAl-Fe。成功的利用高频感应重熔工艺在喷涂层和基体之间形成了冶金结合的铁铝化合物,并有效地提高了涂层本身的致密性,排出了由于电弧喷涂工艺原因在涂层内部引入的气孔和夹杂。

## 2.3 重熔平均功率分布和温度分布

根据电磁学理论,当线圈中通过交变电流时,在线圈内部及其周围会产生交变的磁场。置于线圈内的工件就会被这个交变磁场的磁力线切割,在工件上产生感应电势。感应电势的存在使工件表面薄层形成封闭的电流回路,即涡流。由于工件具有一定的电阻率,因此由欧姆定律我们可以知道,涡流回路中会产生大量的热,感应加热的热量由此而生。根据文献 [4] 做出重熔过程中平均功率和温度的分布趋势如图 4 及图 5。

高频感应重熔过程中,由于涂层与基体相对磁导率和电阻率的差异,温度最高值出现在涂层与基体的界面附近,涂层的熔化是由内至外进行的,涂层表面处于次高温区。这与我们在重熔过程中所看到的现象以及对涂层的显微组织观察是一致的。这种功率和温度分布很适合涂层和基体材料相对磁导率和电阻率有所差异的工件的重熔处理。

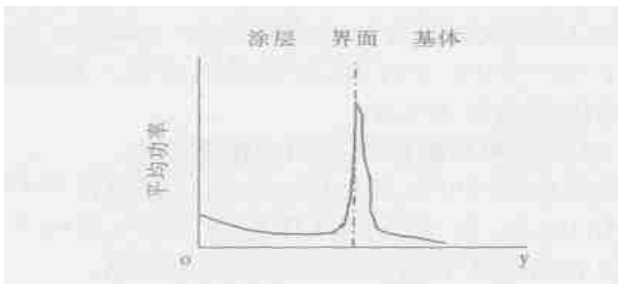


图 4 重熔时的平均功率分布

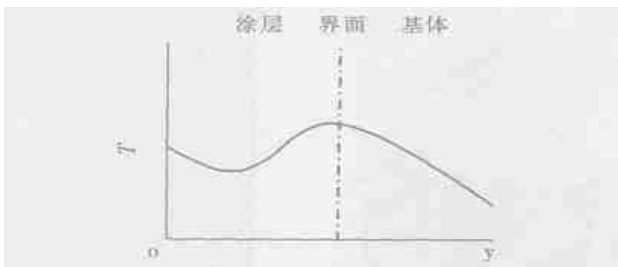


图 5 重熔时的温度分布

### 3 结 论

1)高频感应重熔技术可以在铁基体上获得呈冶金结合、均匀致密的铝涂层,对基体热影响小,可操作性强。

2)工作电流、感应时间是影响涂层重熔效果的主要因素。本实验条件下,当感应电流为 300 A,感应时间为 35 s时,所获得涂层的重熔效果最好。

3)根据电磁学基本原理给出了涂层感应重熔过程中涂层和基体平均功率和温度分布趋势,表明涂层与基体界面处的功率最大,温度最高,这与实验现象相符合。

#### 参考文献:

- [1] 徐滨士,马世宁,张振学. 高效优质的防腐蚀新技术——高速电弧喷涂技术 [J]. 腐蚀与防护, 2000, 21 (10): 455-457.
- [2] 王灿明,孙宏飞,万殿茂,等. 高温扩散法制备铁铝金属间化合物涂层 [J]. 材料保护, 2003, 36(3): 35-37.
- [3] 刘明辉,陈洪玉,魏文志. 热喷涂铝涂层高温扩散及抗氧化性的研究 [J]. 煤炭技术, 1999, 18(5): 29-30.
- [4] John Davies, Peter Simpson. 感应加热手册 [M]. 张淑芳,柳祥川,蔡慰望译. 北京: 国防工业出版社, 1985. 363-374.
- [5] 张增志. 高效快速感应熔涂技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001. 38-41.

## 电镀车间危险物质的种类和特性

电镀车间使用许多化学药品,其中易燃易爆 爆炸物质可分为 6类,它们的特性载于下表  
危险物质的种类和特性

种类	名称	特性	灭火物	备注
1	氯酸盐,高氯酸盐,过氧化物,硝酸盐,高锰酸钾	杂质混入遇撞击会爆炸,起火	水、砂	爆炸性
2	黄磷、红磷、硫化磷、硫磺、金属粉	黄磷在 30℃即起火,金属粉遇水氧化,自起火	水、砂	在空气中自燃
3	钙、钠、碳化物、生石灰、磷石灰	钙、钠遇水起火、爆炸,碳化物、磷石灰遇水可生成可燃气体,生石灰遇水放热	砂	遇水自燃
4	乙醚、二硫化碳、丙酮、乙醇类	都为液体,蒸发的气体和空气混合发生爆炸	用发泡型灭火剂、气体灭火剂或砂等隔断空气	易燃
5	硝酸酯、赛璐璐、硝基化合物	有起火、燃烧性、撞击或与火接触应注意	水、砂	易燃性混合物爆炸性
6	硝酸、硫酸、铬酐、氯磺酸	把水加入其中将发热	砂、气体灭火剂	腐蚀性 (HF KOH NaOH 也相同)

碌 碌