

文章编号: 2095—0411 (2014) 03 - 0074 - 04

## 低碳钢节能高效表面的渗铝技术<sup>\*</sup>

闫梦龙<sup>1</sup>, 谢 飞<sup>1</sup>, 潘建伟<sup>2</sup>

(1. 常州大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 怀德学院, 江苏 常州 213016)

**摘要:** 通过自行设计的交流电场增强装置强化粉末法渗铝。该装置通过渗罐壁电极和置于渗罐中央的柱状电极, 对置于两极之间的试样与渗剂施加交流电场。对低碳 20 钢进行中低温下的交流电场增强粉末法渗铝试验, 研究新渗铝技术的特性。结果表明: 施加适当的交流电场可以显著促进低碳 20 钢在中低温外热条件下的渗铝过程, 改善渗层表层相结构; 在低至 600℃ 的外热温度时, 施加 2A 电流的交流电场, 渗铝层厚度可达到 130 $\mu\text{m}$  以上。

**关键词:** 粉末法渗铝; 交流电场; 节能

中图分类号: TG 156

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095—0411.2014.03.015

## Energy-Saving and Highly-Efficient Pack Aluminizing Technology for Low-Carbon Steel

YAN Meng-long<sup>1</sup>, XIE Fei<sup>1</sup>, PAN Jian-wei<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Huaide College, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** Pack aluminizing was carried out with a help of a self-designed alternating current field (ACF) apparatus. The ACF was applied to the treated sample and the aluminizing agent with a column-shaped electrode located at the center of a pack container and another electrode on the wall of the container. The alternating current field enhanced pack aluminizing (ACFPA) was employed to low carbon 20 steel at low and medium temperature. Characterizations of the new technology were investigated. The results showed that applying proper ACF could significantly accelerate the pack aluminizing process and improve phase structure of the surface layer. When aluminized for 4h with an ACF current of 2A, an aluminizing case of more than 40 $\mu\text{m}$  could be formed at 600℃.

**Key words:** pack aluminizing; alternating current field; energy saving

钢铁材料的渗铝是一种通过物理或化学的方法, 在零部件表面形成一种含铝合金层的表面改性工艺。通过渗铝, 赋予零部件高的抗高温氧化、耐硫化氢、硫酸等介质腐蚀的性能。常见的渗铝工艺方法有粉末包埋法 (简称粉末法)、热浸扩散法、

真空蒸镀法、热喷涂法、感应加热料浆法等<sup>[1]</sup>。其中粉末法渗铝因具有对处理设备要求不高、操作简便、工艺较易控制、渗层质量好等优点而得到广泛应用<sup>[2]</sup>。但传统粉末法渗铝处理尚存在处理温度较高、渗铝保温时间长、能耗高、渗层表面易形成铝

\* 收稿日期: 2014 - 04 - 09。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51171032)。

作者简介: 闫梦龙 (1989—), 男, 湖南岳阳人, 硕士生。通讯联系人: 谢飞 (1964—), E-mail: xiefei@cczu.edu.cn

含量高的脆性相等缺点。针对这些问题, 研究人员开展了一些研究<sup>[2-4]</sup>。本课题组提出的一种直流电场加速固体粉末法渗铝的方法, 通过在渗铝过程中施加适当的直流电场达到促渗, 具有很好的节能高效效果<sup>[2]</sup>。既为促进粉末法渗铝过程, 达到节能高效目的, 也为适宜于处理整体表面需均匀渗铝的零件, 及进一步简化直流电场增强渗铝设备, 本研究以交流电场替代直流电场, 研究开发一种新的交流电场增强粉末法渗铝工艺, 对新技术的特性开展初步研究。

### 1 试验方法

研制的交流电场增强粉末法渗铝装置图 1。在渗罐中央设置一个圆形柱状电极作为交流电场的另一个电极, 以渗罐壁作为电场的另一个电极。样品与渗铝剂置于两电极之间, 其中样品两侧面与两极等距。以耐火泥密封渗罐。渗罐随炉加热到预定温度后, 在两电极间施加适当参数的工频 (50Hz) 交流电场。渗铝保温结束后, 渗罐随炉冷却至室温, 取出试样进行分析。为对比采用相同渗铝剂, 分别在 650、700、750、800℃进行常规渗铝。

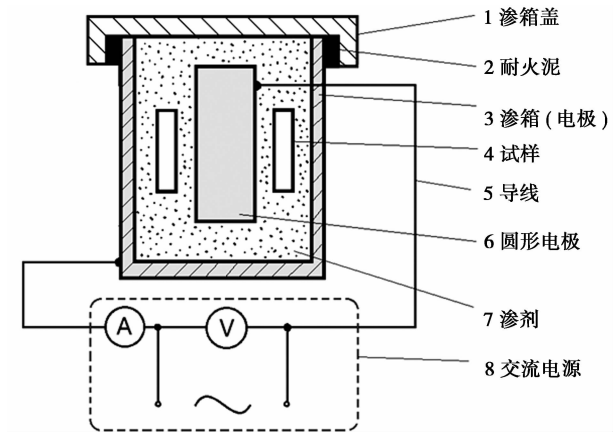


图 1 试验装置简图

Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

试样材料为热轧态 20 钢, 试样尺寸为 10mm×10mm×5mm。渗铝前, 对试样依次以 400 目水砂纸、600、800 和 1 000 目金相砂纸预磨。粉末渗铝剂由铝粉 (供铝剂)、氯化铵 (活化剂)、木炭 (疏松剂) 和绿碳化硅 (填充剂) 组成。根据前期试验结果<sup>[5]</sup>, 将渗剂中氯化铵含量定为 1%、木炭含量定为 1%; 渗剂中铝粉含量则通过选择 2%、4% 和 6% 3 中含量进行试验来确定。主要试验参数详列于表 1 (其他成分为 1%NH<sub>4</sub>Cl+1%木炭+余量 SiC, 保温时间为 4h)。

表 1 试验工艺参数

Table 1 Process parameters

工艺编号	铝粉含量/%	加热温度/℃	电流/A
ACFPA - 01	2	800	2.0
ACFPA - 02	4	800	2.0
ACFPA - 03	6	800	2.0
ACFPA - 04	2	750	2.0
ACFPA - 05	2	700	0.5
ACFPA - 06	2	700	1.0
ACFPA - 07	2	700	2.0
ACFPA - 08	2	700	4.0
ACFPA - 09	2	600	2.0
ACFPA - 10	2	550	2.0
ACFPA - 11	2	500	2.0
CPA - 01	2	650	
CPA - 02	2	700	
CPA - 03	2	750	
CPA - 04	2	800	

说明: ACFPA 表示交流电场增强渗铝, CPA 表示常规渗铝。

采用金相显微镜观察分析渗铝层组织及测量渗层厚度; XRD 分析渗铝层物相结构 (Cu 靶, K $\alpha$ , 100mA 靶电流); 以维氏显微硬度计测量渗层硬度, 测量载荷为 100g, 加载 15s。

### 2 试验结果及分析

#### 2.1 渗层厚度

图 2 给出了 800℃时交流电场增强渗铝 (2A, 4h) 渗层厚度与渗剂中铝粉含量的关系曲线。800℃时在含 6% 铝粉的渗剂中进行电场电流为 2A、保温 4h 的渗铝可形成厚达~380 $\mu$ m 的渗铝层; 试样面向中央电极侧的渗层比面向罐壁侧的厚。观察发现渗层外观质量随渗剂中铝粉含量增加而逐渐变差, 表面变得较粗糙。综合考虑渗铝层厚度、表面质量及渗剂成本, 确定后续试验的渗铝剂中 Al 粉含量为 2%。

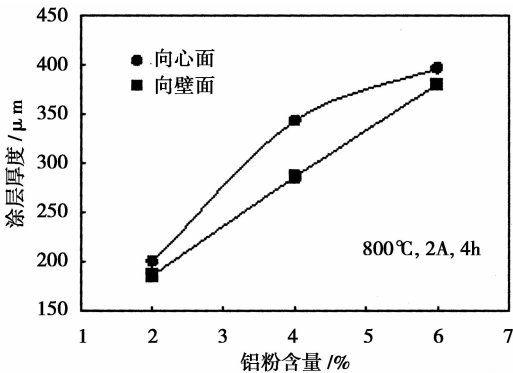


图 2 电场增强渗铝层厚度与渗剂铝粉含量关系

Fig. 2 Al content versus case thickness

由于渗剂中供铝剂含量低且渗铝温度低，20 钢在 700℃ 常规粉末法渗铝后基本观察不到渗铝层；但施加电场后，电场增强渗铝渗层厚度随电场电流增大而增加，在电流小于等于 1A 时渗层厚度增加较快，电流大于 1A 后渗层厚度增加有所趋缓（图 3）。与图 2 的结果类似，从图 3 还可看出：同一试样的面向渗罐中央电极一侧的渗铝层厚度也比面向罐壁一侧的渗铝层要厚。当电场电流提高至 4A 时，700℃ 时的渗铝层厚度已达 230 $\mu\text{m}$  以上。

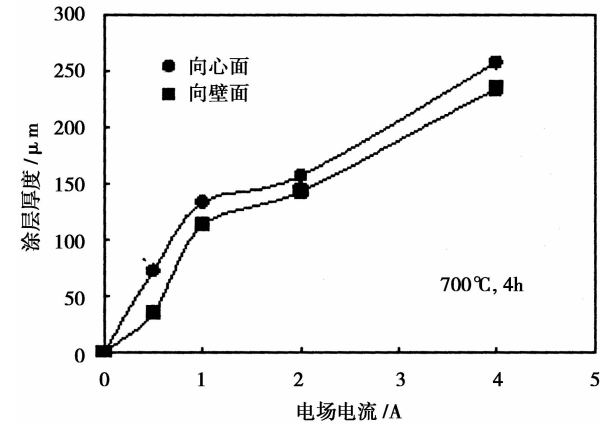


图 3 渗铝层厚度与交流电场电流关系曲线  
Fig. 3 ACF current versus case thickness

图 4 给出了不同外热温度下（500~800℃）保温 4h 常规粉末法渗铝和交流电场增强渗铝（电场电流为 2A）的渗铝层厚度。从中可见，当渗铝温度低于 700℃ 时，经过 4h 保温，常规粉末法渗铝几乎难以形成渗铝层；但在施加了电流为 2A 的交流电场作用下，即使在 500℃，也可形成 40 $\mu\text{m}$  以上厚度的渗铝层；随渗铝温度提高，交流电场增强渗铝渗层厚度增加，当渗铝温度达 800℃ 时，经过 4h 保温，20 钢渗铝层的厚度达 180 $\mu\text{m}$  以上，而相

应常规粉末法渗铝层的厚度还不到 30 $\mu\text{m}$ 。所有温度时，交流电场增强渗铝试样的面向渗罐中央电极一侧的渗铝层厚度比面向罐壁一侧的渗铝层要厚。

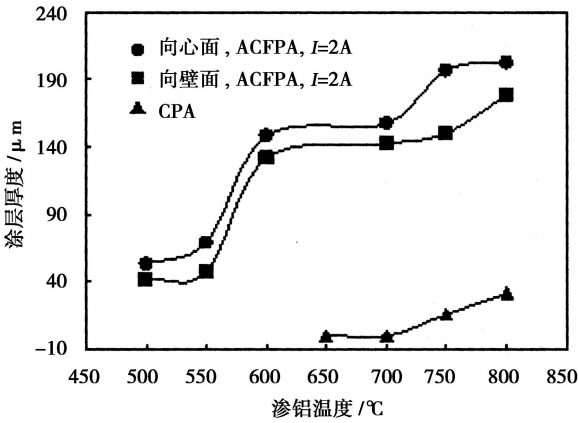


图 4 渗铝温度与渗铝层厚度的关系  
Fig. 4 Case thickness versus aluminizing temperature

2.2 渗层组织

采用本研究的渗铝配方，在 700℃ 及其以下温度进行常规渗铝，以金相显微镜难以观察到渗铝层形成。而施加了 0.5A 的交流电场后，在 700℃ 时就能形成与 800℃ 常规渗铝相当厚度的渗铝层，但两者在组织形态上存在一定差异：800℃ 常规渗铝层表层存在一层富铝相（图 5（a）），渗铝层下的贫碳区较宽，无明显富碳区；交流电场增强渗铝层表层未发现富铝相，渗铝层下的贫碳区较窄，贫碳区下有明显富碳区（图 5（b）），随电场电流增加或渗铝温度提高，贫碳区减小、富碳区特征变得更为明显（图 5（c）），在 800℃ 施加电流为 2A 的交流电场增强渗铝层下基本无贫碳区，富碳区珠光体显著增加（图 5（d））。

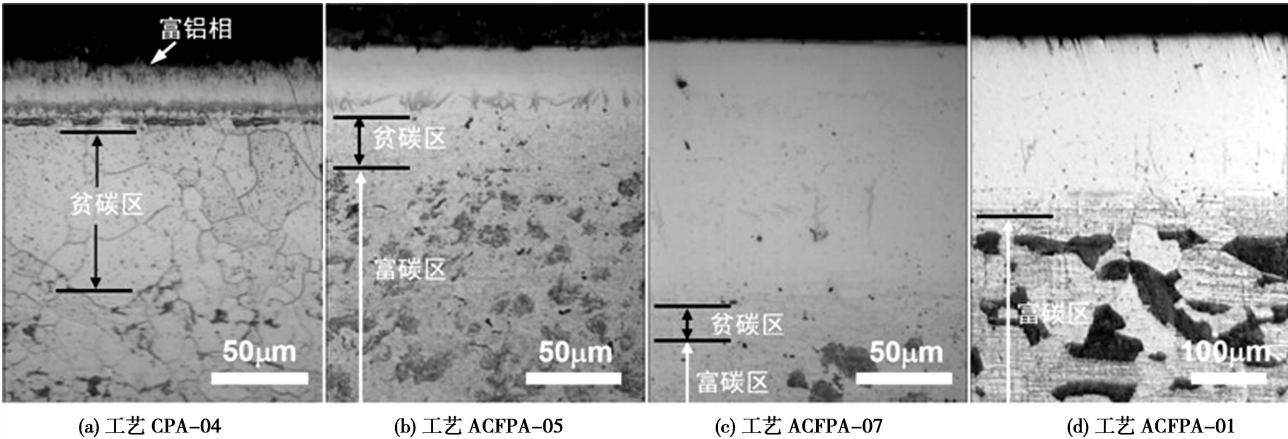


图 5 典型渗铝层组织  
Fig. 5 Microstructures of typical aluminizing cases

## 2.3 相结构

图 6 给出了几种不同条件渗铝试样表层的 XRD 结果。衍射分析表明: 对于 700℃ 常规渗铝样 (工艺 CPA-02),  $\alpha$ -Fe 的衍射峰十分强, 基本看不出明显的含铝相的衍射峰, 隐约出现的一些弱小衍射峰对应的为含铝量较高的  $\text{FeAl}_2$ 、 $\text{Al}_5\text{Fe}_2$  相 (图 6), 说明在 700℃ 采用常规方法渗铝难以形成渗铝层; 750℃ 常规渗铝样 (工艺 CPA-03) 表层主要由  $\text{FeAl}_2$ 、 $\text{Al}_5\text{Fe}_2$  相构成, 出现的较弱的  $\alpha$ -Fe 衍射峰应该是由渗铝层下的基体而来; 在 700℃ 下施加 2A 交流电场 (工艺 ACFPA-07), 渗铝层表层均无含铝量较高的  $\text{FeAl}_2$ 、 $\text{Al}_5\text{Fe}_2$  相, 而是含铝较低的  $\text{AlFe}_3$ , 且具有明显的择优取向。衍射结果表明交流电场增强渗铝具有促进渗铝, 避免渗铝表层形成富铝相的作用。衍射结果与金相观察一致。

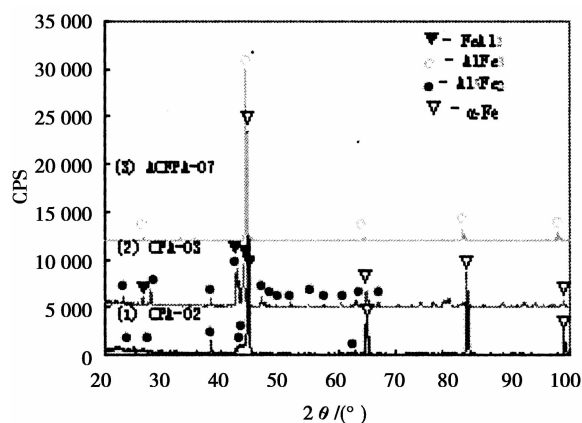


图 6 渗铝层 XRD 分析结果

Fig. 6 XRD results for aluminizing cases

## 2.4 分析讨论

以往的研究表明常规粉末法渗铝一般是在 750℃ 以上进行, 这样才能得到有效渗铝层<sup>[1-3]</sup>。虽有报道通过采用特殊活化剂将渗铝温度降低到 650℃, 但经过 8h 渗铝, 在合金钢 T22 (2.25Cr-1Mo) 上的渗铝层厚度仍小于 36μm<sup>[4]</sup>。

上述试验结果表明: 施加适当的交流电场可以大幅度促进 20 钢在中低温外热条件下的渗铝过程, 不仅能得到较相应常规渗铝更厚的渗层, 还可改善渗层表层相结构, 避免形成  $\text{FeAl}_2$ 、 $\text{Al}_5\text{Fe}_2$  等富铝相。这些富铝相硬度较高、脆性较大, 会对钢渗铝后的综合机械性能带来一定程度的负面影响。交流电场的促渗应该与交流电场在粉末法渗铝中的多重

作用有关。首先, 交流电场直接施加在渗剂上, 电流通过渗剂电阻, 具有一定的电阻加热作用, 故能促进渗剂间的化学反应; 其次, 交变电场的电磁作用会使渗铝剂分子的热振动加剧, 促进渗铝剂的电离分解, 强化渗铝剂各组成间的化学反应, 从而增加活性铝原子或含铝活性基团的产率与活性, 克服了常规粉末法渗铝单纯依赖渗剂受热分解产生活性铝原子之不足。交变电场的直接加热作用与电磁搅拌作用结合, 将显著增强活性铝原子及含铝活性基团在渗箱内的扩散, 使其更快到达被渗试样表面。另外, 交变电场在被渗试样中的电磁感应作用也使得试样表层原子的热振动加剧, 应有利于在试样表层形成诸如空位之类的点缺陷, 从而大大促进铝在试样内的扩散, 这不仅增加渗层厚度, 还防止由气氛而来的活性铝原子在试样表层富集, 降低表层铝含量, 避免或减少脆性富铝相的形成。

## 3 结 论

①在粉末法渗铝过程中施加 0.5~4A 的交流电场可以显著促进 20 钢在中低温 (500~800℃) 下的渗铝过程; ②500℃ 时在含 2% 铝粉的渗剂中对 20 钢进行交流电场电流为 2A、保温 4h 的渗铝, 可形成约 40μm 的渗铝层; 800℃ 时在含 6% 铝粉的渗剂中进行电场电流为 4A、保温 4h 的渗铝, 可形成厚达 ~380μm 的渗铝层; ③所研究的交流电场增强渗铝新技术可明显降低 20 钢粉末法渗铝工艺的处理温度, 缩短渗铝工艺周期, 节约能源, 降低渗铝成本。

## 参考文献:

- [1] 胡传析. 表面处理手册 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2004: 308-313.
- [2] Xie F, Hu J, Zhou Z H, et al. Effects of direct current field on powder - pack aluminising [J]. Surface Engineering, 2011, 27 (2): 134-138.
- [3] Zhan Z L, He Y D, Wang D R, et al. Low - temperature processing of Fe - Al intermetallic coatings assisted by ball milling [J]. Intermetallics, 2006, 14 (1): 75-81.
- [4] Xiang Z D, Datta P K. Pack aluminisation of low alloy steels at temperatures below 700℃ [J]. Surface & Coating Technology, 2004, 184: 108-115.
- [5] 潘建伟, 谢飞, 孙力, 等. 耐热钢 HP40Nb 的中温粉末法渗铝及其抗渗碳特性 [J]. 金属热处理, 2012, 32 (12): 89-92.