

## 表面强化及功能化

## 碳钢表面粉末包埋法渗铝的实验研究

张冀翔, 徐修炎, 钱程, 王长发

(中国石油大学(北京) 过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京 102249)

**摘要:** **目的** 解决粉末包埋渗铝过程中渗剂粘结导致渗铝层表面质量差的问题, 在无惰性气体保护气氛中, 在 Q235 钢表面制备出耐高温氧化、耐高温硫化和耐腐蚀的渗铝层。**方法** 采用粉末包埋渗铝法, 通过改变渗剂中填充剂的成分, 解决渗剂粘结导致表面质量变差的问题, 研究渗铝温度、保温时间对渗层试样表面质量及渗铝层厚度的影响, 确定最佳渗铝条件。使用电子显微镜观察渗铝层表面质量并测定渗铝层厚度, 采用能谱仪分析渗铝层主要元素分布, 采用 X 射线衍射仪分析渗铝层物相组成, 采用显微硬度计检测渗铝层硬度变化。**结果** 采用成分为 15% 铝粉+5% 氯化铵+75% 氧化铝+5% 石墨粉的渗剂, 在无惰性气体保护下 900 °C 保温 4 h, 获得渗铝层厚度约为 370 μm 的渗铝试样。渗铝层由外向内依次为铝化物层、过渡层和基体, 铝化物层主要含有 Al、Fe 两种元素, 原子百分比保持在 7:3 左右, 主要物相为 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, 硬度达到 896HV<sub>0.1</sub>, 远高于基体硬度。**结论** 渗剂中添加适量的石墨粉能够改善渗铝层表面质量, 增加渗层厚度, 过多的石墨粉反而不利于表面质量改善和渗铝层厚度的增长。渗铝层厚度随渗铝温度的升高先增大后减小, 与保温时间呈抛物线关系。

**关键词:** 碳钢; 包埋渗铝; 渗铝层; 铝化物层; 石墨粉; 硬度

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0068-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.010

## Experimental Study on Aluminizing of Carbon Steel Surface by Pack Cementation

ZHANG Ji-xiang, XU Xiu-yan, QIAN Cheng, WANG Chang-fa

(Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

**ABSTRACT:** The work aims to overcome the short comings of poor surface quality of aluminized layer and powder boning during aluminizing process and prepare an aluminized layer resistant to high temperature oxidation, high temperature sulfurization and corrosion on the surface of Q235 steel in an atmosphere not protected by inert gas. Aluminizing by powder pack cementation was adopt to change the filler constituent of aluminizing medium to solve the problem of poor surface quality caused by bonding of aluminizing medium. The effect of aluminizing temperature and holding time on the surface quality and thickness of aluminized layer was studied to determine the best aluminizing condition. The surface quality and the thickness of the aluminized layer were observed by electron microscope. The distributions of main elements on aluminized layer were analyzed by energy spectrometer. The phase composition of aluminized layer was studied by XRD. The hardness change in the aluminized

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-08-21

**Received:** 2018-04-10; **Revised:** 2018-08-21

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (21406265)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (201406265)

**作者简介:** 张冀翔 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向生物质燃料与金属腐蚀防护。邮箱: zhjx916@163.com

**Biography:** ZHANG Ji-xiang(1986—), Male, Doctor, Assistant professor, Research focus: biomass fuel and metal corrosion protection. E-mail: zhjx916@163.com

layer was detected by microhardness tester. An aluminized layer with a thickness of about 370  $\mu\text{m}$  was prepared by the powder composed of 15% aluminum powder, 5% ammonium chloride, 75% alumina and 5% graphite under 900  $^{\circ}\text{C}$  for 4 hours in a non-protective atmosphere. The aluminized layer was aluminide layer, transition layer and matrix from outside to inside. The aluminide layer mainly contained two elements including Al and Fe and the atomic ratio remained at 7:3. The main phase was  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  and the hardness of aluminide layer reached 896HV<sub>0.1</sub> which was much higher than that of the substrate. Adding some graphite in the powder can improve the surface quality of the aluminized layer and increase the thickness of the layer, while excessive graphite powder is not beneficial to the improvement of surface quality and the thickness growth of aluminized layer. The thickness of the aluminized layer increases first and then decreases with the increasing of the aluminizing temperature and has a parabolic relationship with the holding time.

**KEY WORDS:** carbon steel; pack aluminizing; aluminized layer; aluminide layer; graphite powder; hardness

铁铝化合物具有良好的抗高温氧化<sup>[1-2]</sup>、抗高温硫化<sup>[3]</sup>和耐腐蚀性能<sup>[4-6]</sup>,与不锈钢相比,具有低成本、低密度、高强度等优点。渗铝是一种通过物理或化学手段在钢材表面进行渗金属的热处理方法,在钢材表面形成铁铝化合物层,改变钢材的表面特性,使其具有耐氧化、耐腐蚀等性能<sup>[7-8]</sup>。目前有多种渗铝工艺方法<sup>[9]</sup>,如热浸镀、热喷涂、粉末包埋、气相沉积等,可以在钢材表面制备铁铝化合物层,保护基体免受腐蚀,而粉末包埋渗铝因其对设备要求不高、成本低、操作方便而得到广泛采用<sup>[10]</sup>。

国内外许多学者对粉末包埋渗铝过程进行大量研究,主要集中在渗铝机理及通过物理或化学方法降低渗铝温度等方面。Y. Q. Wang<sup>[11]</sup>采用多孔氧化铝纸包覆试样,使之不与粉末渗剂直接接触,结果表明渗铝过程中存在气相沉积过程。F. J. Pérez<sup>[12]</sup>通过实验进行化学气相沉积渗铝,提出了渗铝过程反应步骤模型。Z. D. Xiang<sup>[13]</sup>通过改变渗剂中催渗剂的成分,实现了 700  $^{\circ}\text{C}$  以下渗铝。王修春<sup>[14]</sup>通过采用自制的机械能助渗装置,实现了 600  $^{\circ}\text{C}$  以下渗铝。经查阅文献<sup>[7,15-17]</sup>知,粉末包埋法制备渗铝层存在表面粗糙、渗剂容易出现粘结、渗铝周期长、需要惰性气体保护的问题,而对于如何改善渗剂粘结、渗层表面质量,提高渗铝效率的报道较少。本文通过改变渗剂中填充剂的成分,改善渗剂粘结情况,以提高渗层表面质量,并在无惰性气体保护气氛下实现快速渗铝。

# 1 试验材料及方法

## 1.1 试验材料及渗剂配方

本文采用粉末包埋法在碳钢表面制备渗铝层,渗剂材料为:铝粉氧化铝粉、石墨粉、氯化铵粉。渗铝试验材料为 Q235 钢,试样尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm。粉末渗铝的渗剂各组分为供铝剂、催渗剂和填充剂。其中,常用的供铝剂为铝粉,催渗剂为氯化铵,填充剂为氧化铝和石墨。根据文献[15],添加石墨可以改善粉末包埋渗铝时出现的渗剂粘结、渗铝试样表面质量差等现象。实验中采用表1的5种渗剂配方。

表 1 粉末渗铝剂成分  
Tab.1 Chemical compositions of aluminizing powder  
wt%

Pack mixture	Aluminum	Ammonium chloride	Alumina	Graphite
1#	15	5	80	0
2#	15	5	75	5
3#	15	5	70	10
4#	15	5	60	20
5#	15	5	50	30

## 1.2 渗铝层的制备

Q235 试样经表面处理除去表面的油污、铁锈和氧化皮,暴露出金属活性表面<sup>[17]</sup>。将试样和配制好的渗剂装入坩埚中,保证试样与坩埚壁不接触,渗剂完全包覆试样,密封坩埚。在加热炉中加热至 900  $^{\circ}\text{C}$  并保温 4 h,随炉冷却至室温,实验过程中不需要保护性气氛。

## 1.3 渗铝层的分析与表征及性能评价

采用 Quanta200F 型扫描电镜、D8Focus 型 X 射线衍射仪、金相显微镜、显微硬度计,分别对渗铝层表面与截面形貌、物相组成、组织、截面硬度进行分析,利用扫描电镜附带的能谱分析仪对渗铝层的化学元素进行分析,探讨最佳渗铝工艺。显微硬度测量条件为:载荷 0.98 N (100 g),保荷时间 10 s。

# 2 结果与分析

## 2.1 填充剂石墨粉对渗层形貌的影响

不同渗剂组成得到的渗铝试样截面和表面形貌如图 1 和图 2 所示,可以看出所有试样的渗铝层具有表面附着物层、铝化物层和基体结构。不添加石墨粉时,试样表面布满空隙、裂纹、孔洞及点状凹坑,部分区域附有颗粒状粉末,铝化物层厚度不均匀,最大厚度约为 193  $\mu\text{m}$ ,如图 1a 和图 2a 所示。添加 5%石墨粉后,试样表面呈块状区域分布,区域间存在台阶

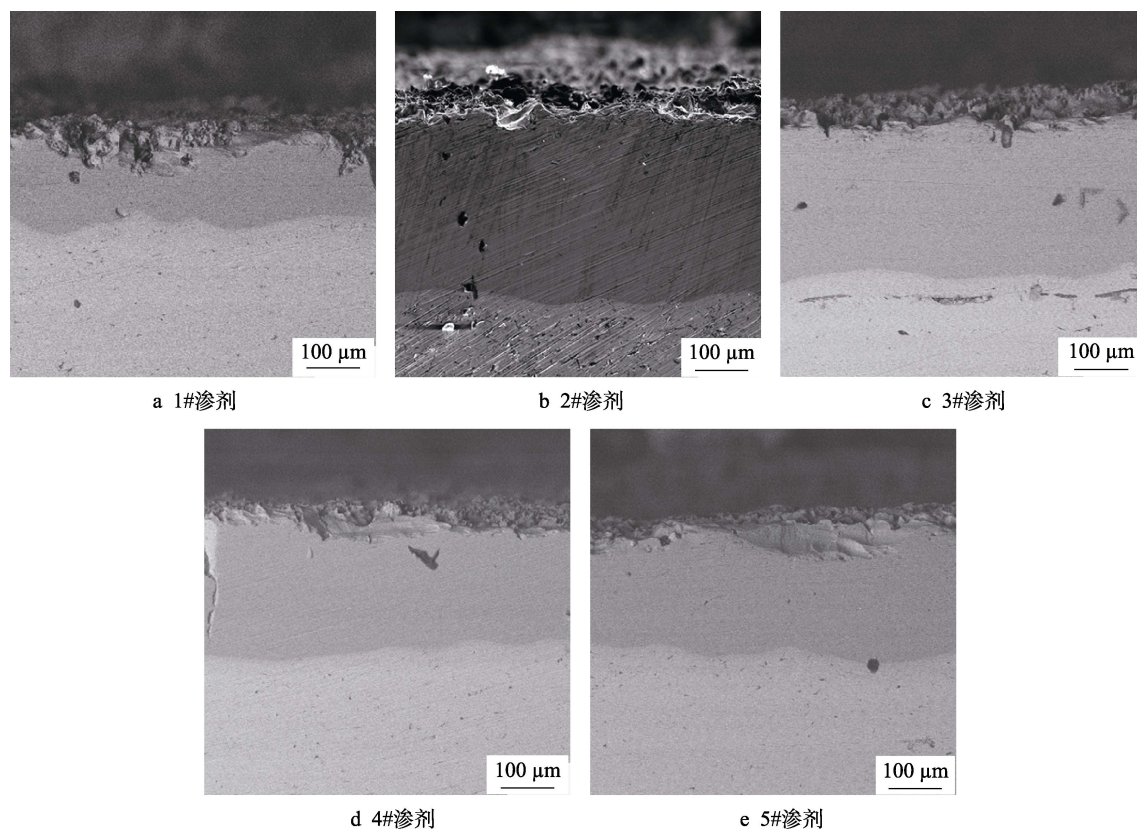


图1 不同渗剂渗铝试样在电镜下的截面形貌

Fig.1 Cross-sectional SEM images of aluminizing specimens formed in difference aluminizing powders: (a) powder mixture 1; (b) powder mixture 2; (c) powder mixture 3; (d) powder mixture 4; (e) powder mixture 5

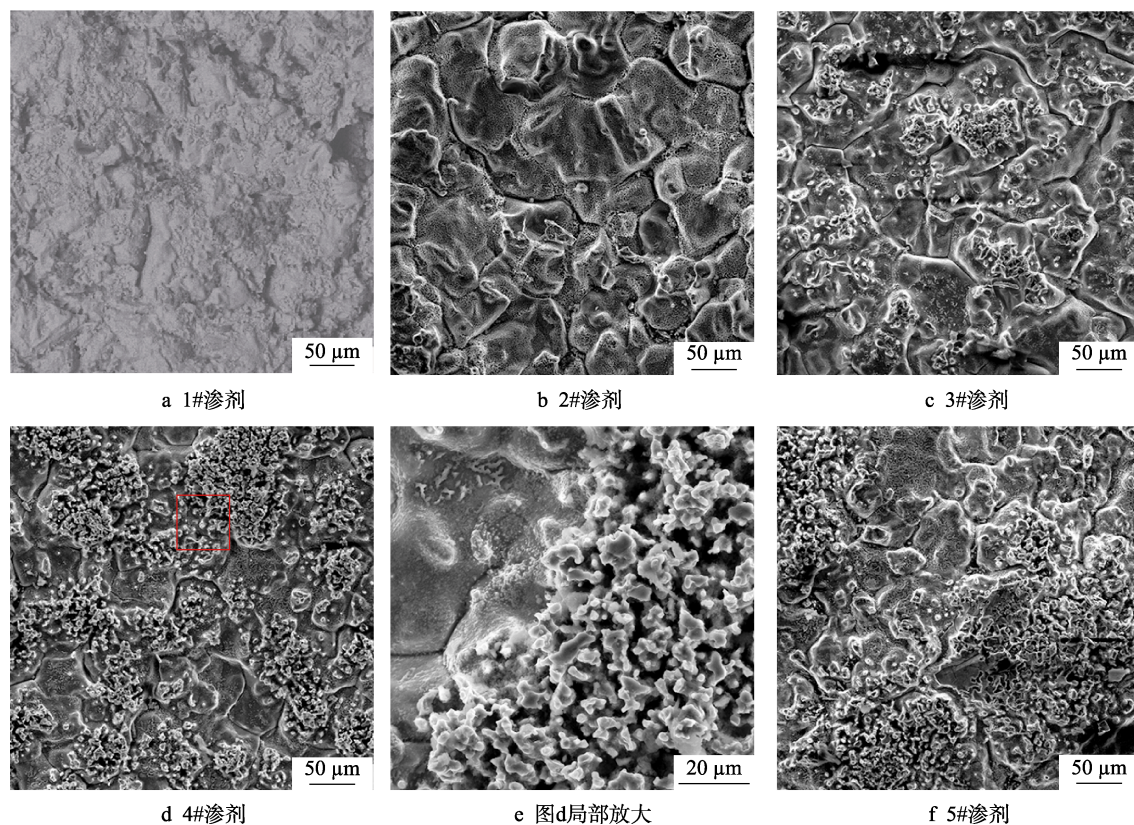


图2 不同渗剂渗铝试样的表面形貌

Fig.2 Surface morphology of aluminized specimens formed in difference aluminizing powders: (a) powder mixture 1; (b) powder mixture 2; (c) powder mixture 3; (d) powder mixture 4; (e) magnification of fig.d; (f) powder mixture 5



状边界, 区域内表面完整, 无疏松小孔、点状凹坑等缺陷, 铝化物层厚度均匀, 达到约  $370\ \mu\text{m}$ , 如图 1b 和图 2b 所示。进一步增加石墨粉含量, 试样铝化物层厚度逐渐降低, 如图 1c—e 所示, 铝化物层厚度分别为  $357$ 、 $264$ 、 $245\ \mu\text{m}$ ; 试样表面质量逐渐变差, 出现疏松且孔隙较大的簇状物, 如图 2c—f 所示。观察发现, 在不添加石墨粉时, 渗剂粘结成块现象严重, 与文献[16]描述一致。

根据图 1 和图 2 可以看出, 渗剂中石墨的添加对渗层厚度、表面质量均有影响。在不添加石墨粉时, 渗剂出现粘结, 导致渗剂利用率低, 渗铝效率低, 渗铝质量差, 氧化铝粉作为单一填充剂, 比重大, 蓬松性差, 不利于活性铝原子的转移。添加石墨粉起到了一定的稀释作用, 提高了渗剂的疏松性, 不仅改善了渗剂粘结的情况, 也有利于试样表面的气相沉积过程, 提高了活性铝原子迁移到试样表面的速率。此外, 石墨粉与残留氧气反应, 避免了试样表面被氧化, 保护了试样的表面活性。然而, 石墨粉含量过大会导致铝化物层厚度减小, 表面质量下降, 这是由于渗剂过于蓬松使得各成分接触不充分, 阻碍了气相沉积过程, 从而降低了渗铝效率。综上, 选择石墨粉含量为 5% 的 2# 渗剂进行后续渗铝实验。

## 2.2 保温温度

采用 2# 渗剂在不同温度下保温 4 h, 渗铝试样铝

化物层厚度与温度的关系见图 3。可知在  $800\sim 900\ ^\circ\text{C}$  内, 铝化物层厚度随着保温温度的升高而快速增加; 当温度超过  $900\ ^\circ\text{C}$  后, 增长变慢并出现下降趋势; 温度为  $1000\ ^\circ\text{C}$  时, 铝化物层厚度反而低于  $850\ ^\circ\text{C}$  的铝化物层厚度。

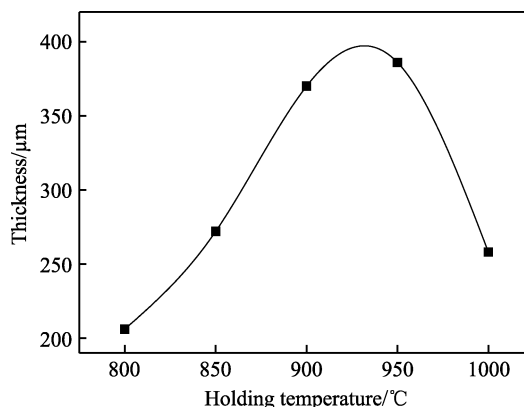


图 3 渗铝温度对渗铝层厚度的影响  
Fig.3 Effect of aluminizing temperature on the thickness of aluminized layer

图 4 是不同温度下制备的渗铝试样表面形貌。 $800\ ^\circ\text{C}$  下获得的渗铝试样表面疏松, 布满孔洞和碎屑, 表面质量较差;  $850\ ^\circ\text{C}$  下获得的渗铝试样表面呈块状分布, 部分块状区域表面附有大量的疏松簇状物;  $900\ ^\circ\text{C}$  下获得的渗铝试样表面呈块状分布, 单个

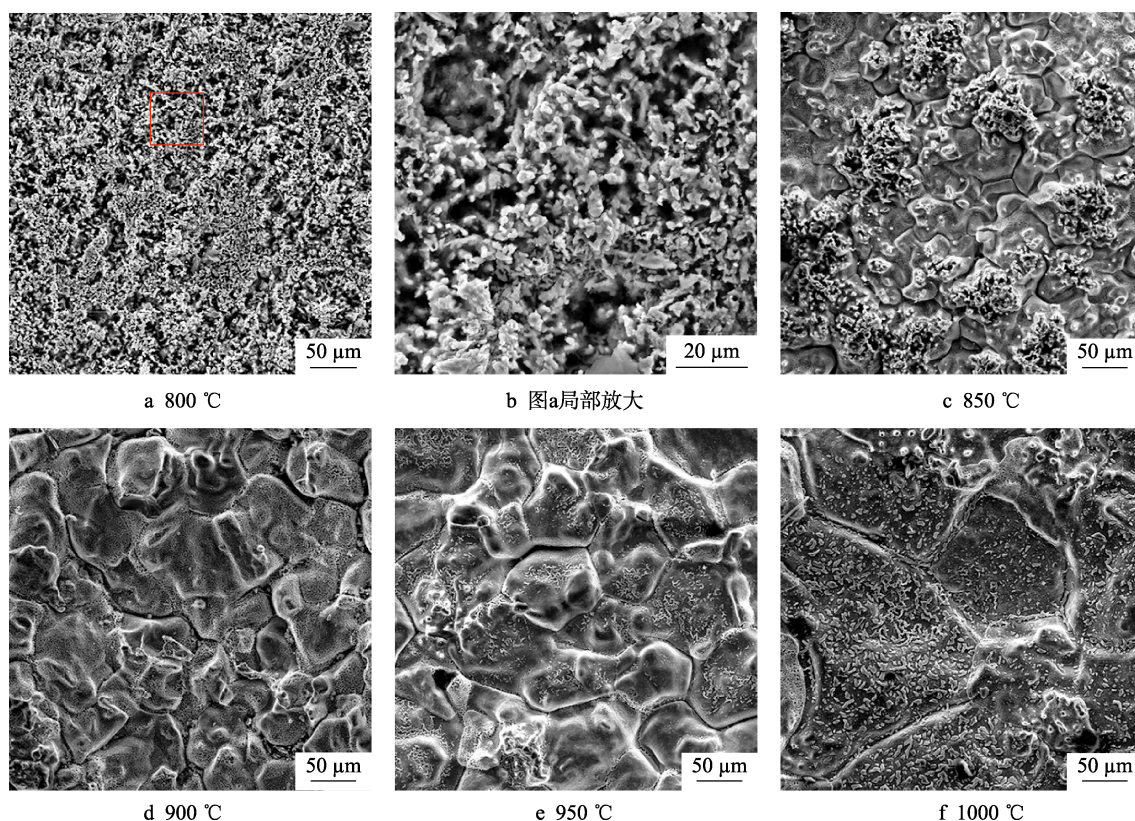


图 4 不同温度下获得的渗铝试样表面形貌

Fig.4 Surface morphology of aluminized specimens formed at difference aluminizing temperature (fig.b is magnification of fig.a)

块状区域表面致密、光滑、完整,块与块之间呈现出台阶起伏状边界,无疏松状小孔、点状凹坑等缺陷;950℃下获得的渗铝试样表面呈块状分布,与900℃下制备的试样相比,块状区域面积变大,部分块状表面附有大量的鼓泡;1000℃下获得的渗铝试样表面平整,单个块状区域面积较大,部分块状区域表面存在细小颗粒,整个区域内表面附着大量细小鼓泡。

渗铝过程包括气相沉积过程和热扩散过程<sup>[11]</sup>,温度对热扩散过程有重要影响。原子在基体中的扩散途径和方式会因温度的不同而有所不同,在高温环境,即 $t \geq (1 \sim 0.7)T_f$  ( $T_f$ 为熔点),原子扩散以在点阵中进行为主;在 $t < 0.5T_f$ 时,原子扩散主要在表面和晶界进行<sup>[18]</sup>。基体试样 Q235 的熔点在 1495℃左右,实验中的加热温度为 800~1000℃,介于 $0.5T_f \sim 0.7T_f$ 之间,扩散方式包括表面扩散、晶界扩散。热扩散过程中,渗剂铝原子在高温下不断向基体内部扩散,同时基体中的铁原子向外部扩散,使铝化物层厚度不断增长。原子间的扩散遵循 Fick 定律<sup>[18]</sup>:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

式中:  $J$  为单位时间通过单位面积内的扩散物质的物质的量 ( $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ );  $D$  为扩散物质在基体中的扩散系数;  $dC/dx$  为物质在  $x$  方向上的浓度梯度。其中扩散系数  $D$  与温度存在以下关系<sup>[18]</sup>:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中:  $D_0$  为扩散常数;  $Q$  为扩散激活能;  $R$  为气体常数;  $T$  为渗铝温度。扩散系数  $D$  与渗铝温度  $T$  呈指数关系,当温度  $T$  升高时,扩散系数快速增大,图 3 中 800~900℃渗铝试样铝化物层厚度的快速增加则印证这点。而 950、1000℃渗铝试样渗层厚度出现异常,则是由于试样表面发生氧化,在试样表面有氧化膜形成,降低了试样表面活性,阻碍了铝原子向基体扩散,从而降低铝化物层厚度。因此,在 900℃下制备的渗铝试样的铝化物层厚度和表面质量最佳。

## 2.3 保温时间

图 5 中 a 曲线显示,铝化物层厚度随保温时间的延长而增加,但是铝化物层厚度  $h$  与保温时间  $t$  并不呈简单的线性关系。在 2~8 h,铝化物层厚度增加较快;在 8~10 h,铝化物层厚度增长缓慢。假设保温时间  $t$  与铝化物层厚度  $h$  的关系一一对应,然后对曲线进行一阶求导,结果如图 5 曲线 b 所示,显示铝化物层的生长速度随保温时间的延长而不断降低,随着保温时间的延长,保温时间对渗层厚度的影响越来越弱,说明当保温时间达到一定数值后,靠单一延长保温时间来增加铝化物层厚度的效果差,降低了渗铝效率。

保温时间主要通过影响活性铝原子在基体中的扩散距离而影响渗铝层厚度,而扩散距离与扩散时间的关系为:

$$x = C \times \sqrt{D \times t} \quad (3)$$

式中:  $x$  为平均扩散距离;  $C$  为常数;  $t$  为扩散时间;  $D$  为扩散系数<sup>[19]</sup>。可知渗铝保温时间  $t$  与平均扩散距离  $x$  的平方成正比,随着保温时间的增加,所得铝化物层的厚度越来越大。

对保温时间的开方  $t^{1/2}$  与对应的铝化物层厚度  $h$  进行拟合,获得如图 6 所示的  $t^{1/2}$  与  $h$  的线性关系:

$$h = 172.834t^{1/2} + 20.83 \quad (4)$$

与公式 (3) 相近,说明活性铝原子在基体中扩散遵守公式 (3) 的规律,而偏移值 20.83  $\mu\text{m}$  则是由升温 and 降温过程中试样发生渗铝引起的。此关系与文献[13]中低合金钢上铝化物层与保温时间的关系相近。

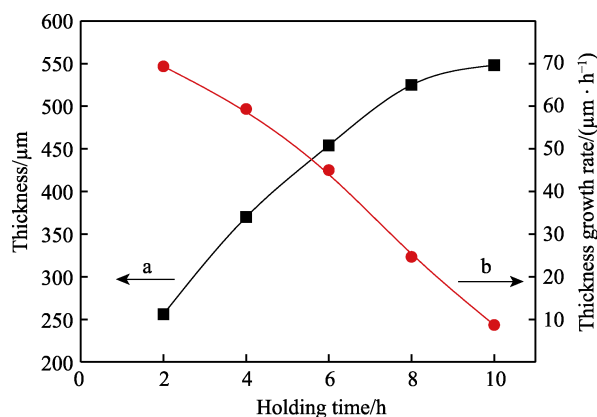


图 5 保温时间对渗铝层厚度的影响  
Fig.5 Effect of holding time on the thickness of aluminized layer

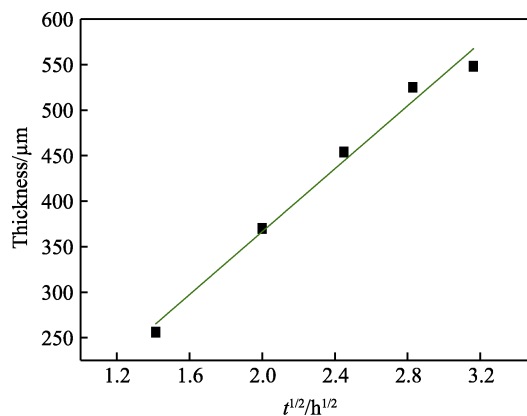


图 6 渗铝层生长动力曲线  
Fig.6 Kinetics of aluminized layer

图 7 是 900℃下不同保温时间试样的表面形貌。保温 2 h 时,试样表面呈块状分布,在块状表面布满疏松状颗粒,表面质量较差;保温 4、6、8、10 h 时,试样具有相似的表面形貌,呈块状分布,单个块状区域表面致密、光滑、完整,块与块之间呈现出台阶起伏状边界,无疏松状颗粒、点状凹坑等缺陷。保温 6 h 时,试样表面呈部分块状区域,表面存在少量颗粒状物质,而保温时间在 4、8、10 h 时获得的渗铝试样表面质量相近。考虑到渗铝层厚度和渗铝效率,保温 4 h 为最佳的保温时间。



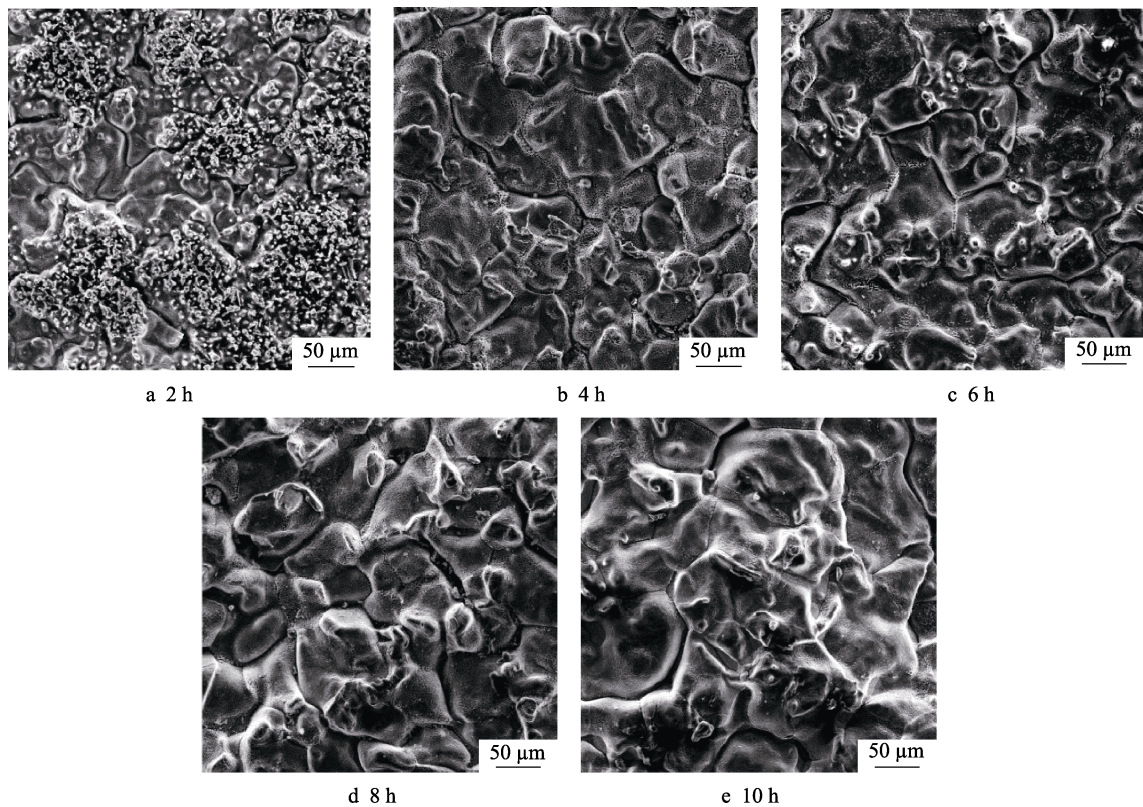


图 7 900 °C 下不同保温时间试样的表面形貌  
Fig.7 Surface morphology of aluminized specimens formed under 900 °C for difference holding time

2.4 渗铝层的表征与分析

Q235 试样经渗铝后，表面状态发生变化，由金属色光泽变为银灰色，光滑表面变为由细小颗粒紧密聚积的非光滑表面，如图 8 所示。通过宏观检测，发现试样渗铝后在几何尺寸上发生变化，渗铝试样的长度、宽度和厚度与未渗铝前相比都有一定的增大。

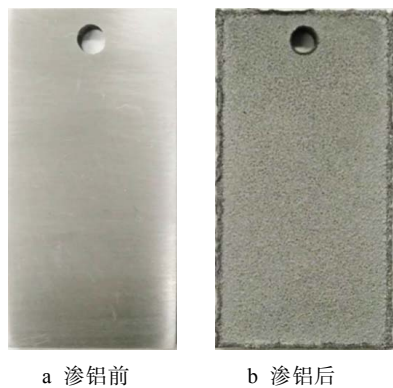


图 8 试样宏观形貌  
Fig.8 Macro morphology of specimens:  
(a) before aluminizing; (b) after aluminizing

图 9 是渗铝试样截面经 4 mL HNO<sub>3</sub>+96 mL C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 硝酸酒精溶液<sup>[20]</sup>浸蚀后的金相照片，可以看出渗铝层包括铝化物层和过渡层，渗铝层均匀、连续、致密，与基体边界清晰。在边界处有呈现三层结构的过渡层。由图 9 中可以看出，过渡层 1 与铝化物层相

互结合，边界处整齐均匀，渗铝层光滑平整。过渡层 1 组织单一，与铝化物层组织相似且明亮光滑，厚度接近 10 μm。过渡层 1 与过渡层 2 的结合处边界清晰，过渡层 2 内混合有多种组织，存在柱状镍向基体方向的组织，厚度在 15 μm 左右。过渡层 3 组织与基体相似，与过渡层 2 呈交错状结合。过渡层的存在增强了铝化物层与基体的结合力，使铝化物层更牢固地附着在基体上。

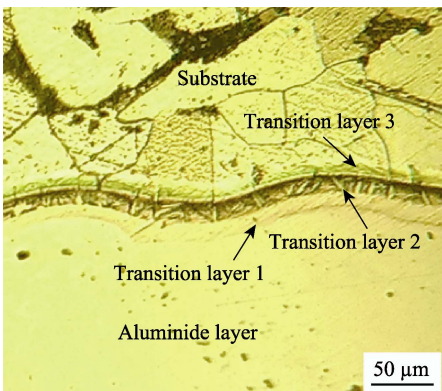


图 9 渗铝试样断面金相图片  
Fig.9 Optical micrograph for section of aluminized specimen

图 10 为采用 2#渗剂在 900 °C 下保温 4 h 获得的试样截面形貌，可知渗铝层致密均匀，与基体紧密结合。在渗铝层的横向和纵向都不存在漏渗区域，且无裂纹、孔隙，渗铝质量较好。利用 EDS 对渗铝试样

截面进行线扫描, 获得线扫描照片如图 11 所示, 铁、铝元素在渗铝层中均匀分布, 在过渡层与铝化物层边界处出现突变, 铝元素强度突变至一定数值后开始缓慢降低, 最终强度变为零。铝元素强度逐渐降低的区域即为过渡层, 与浸蚀金相观察结果一致, 这种缓慢变化增强了渗层与基体的结合。

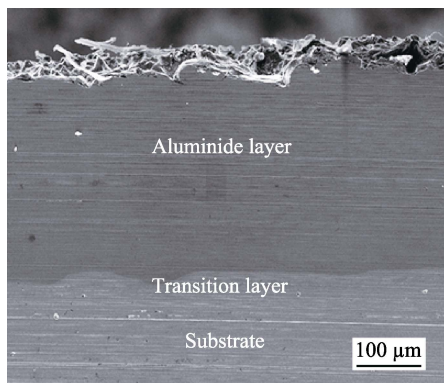


图 10 电子显微镜下的渗铝试样截面形貌

Fig.10 Cross-sectional SEM images of aluminized specimen

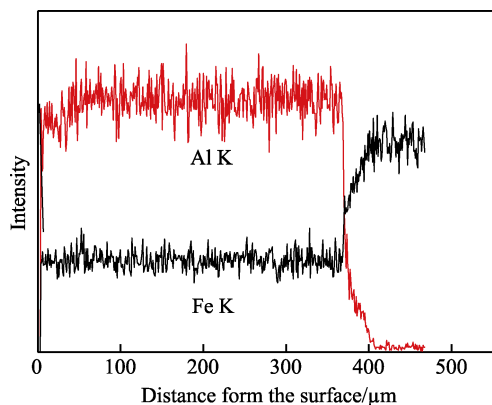


图 11 渗铝试样中主要元素沿截面分布

Fig.11 Distribution of major elements along the cross-section in an aluminized specimen

为了精确获取渗铝层中主要元素的含量, 沿渗铝层由外向内取 10 个点, 测量这些点的元素含量, 并根据每个点的铝铁原子百分比绘制曲线, 如图 12 所示,

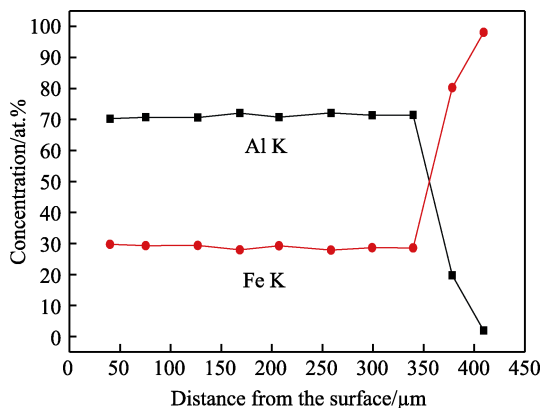


图 12 渗铝试样中主要元素的含量

Fig.12 Concentration of the major elements in an aluminized specimen

可以看出铝原子在铝化物层中的浓度基本不变, 与铁原子的浓度比保持在 7 : 3 左右, 在过渡层处, 铝原子数分数开始减小, 铁原子数分数开始增加, 在过渡层与基体界面处, 铝原子数分数降至零。根据 Fe-Al 平衡相图<sup>[21]</sup>知, 随着铝元素含量的降低, 铁铝间存在稳定相, 有  $\text{FeAl}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 、 $\text{FeAl}_2$ 、 $\text{FeAl}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Al}$  等多种组织, 而铝化物层中, 铝铁原子数分数之比接近 2.33, 则极有可能是两种或多种相的混合组织, 而接近这一比率的相则有  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 、 $\text{FeAl}_2$ 。为了进一步确定铝化物层相组成, 需要对渗铝试样进行 XRD 检测。

图 13 是采用 2# 渗剂在 900 °C 下保温 4 h 制备的渗铝试样表面经 X 射线衍射的分析结果, 可知衍射图只有一个衍射峰, 说明铝化物层只存在单一的  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  相, 不存在其他相的铁铝间金属化合物, 这与元素分析结果(渗层中铁铝元素比保持恒定)相一致。

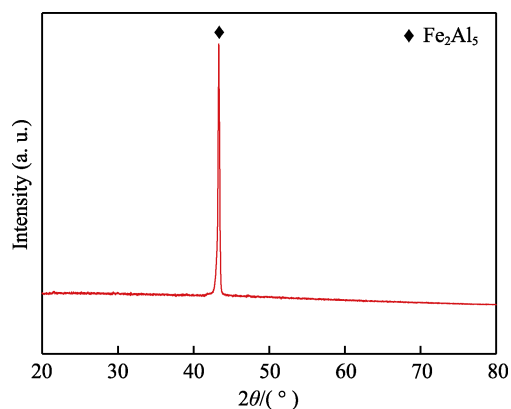


图 13 渗铝 Q235 试样表面 X 射线衍射谱

Fig.13 X-rad diffraction spectrum of the surface of aluminized Q235 specimen

图 14 为渗铝层截面硬度变化曲线, 铝化物层的硬度值集中在 865~896HV<sub>0.1</sub>。在过渡层中, 硬度降为 348HV<sub>0.1</sub>; 在基体中, 硬度为 105HV<sub>0.1</sub>。试样渗铝后, 铝化物层硬度远高于基体硬度, 提高了试样的耐磨性能。过渡层将高硬度铝化物层与基体进行衔接, 有利于铝化物层与基体结合, 防止铝化物层在正压力的作用下脱落。

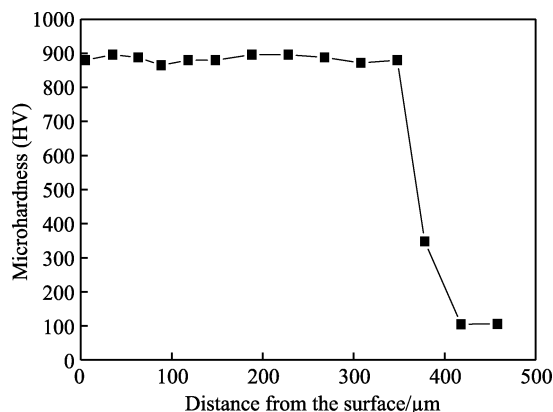


图 14 渗铝试样截面显微维氏硬度变化

Fig.14 Variation of Vickers microhardness along the cross-section of aluminized specimen

### 3 结论

1) 渗剂中添加适量石墨, 能够解决渗剂粘结问题, 改善渗铝层表面质量, 增加渗铝层厚度。渗剂中添加 5% 的石墨粉, 在 900 °C 保温 4 h 获得的渗铝试样, 铝化物层的厚度约为 370 μm。石墨含量过高, 出现渗铝层表面质量变差和渗铝层厚度减薄的现象。渗铝层厚度随渗铝温度的升高而先增大后减小, 与保温时间呈抛物线关系。

2) 综合渗铝层表面质量和渗铝层厚度, 确定最优渗铝工艺参数: 900 °C, 4 h, 渗剂成分为 15% 铝粉+5% 氯化铵+75% 氧化铝+5% 石墨。

3) 渗铝层由外向内分别是铝化物层、过渡层和基体。铝化物层主要含 Al、Fe 两种元素, 原子比保持在 7:3 左右, 主要物相为 Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>。铝化物层硬度远高于基体, 达到 896HV<sub>0.1</sub>。

#### 参考文献:

- [1] HMSOLIM A N, KEMOHAM E D, EL-AZIM M, et al. Oxidation resistance of the aluminide coating formed on carbon steels[J]. Journal of materials science & technology, 1997, 13(5): 383-388.
- [2] HOUNGIOU C, CHEVALIER S, LARPIN J P. High temperature oxidation behavior of iron aluminide diffusion coatings[J]. Oxidation of metals, 2006, 65(5): 409-439.
- [3] TORTORELLI P F, NATESAN K. Critical factors affecting the high-temperature corrosion performance of iron aluminides[J]. Materials science & engineering A, 1998, 258(1-2): 115-125.
- [4] HU G, XU Z, LIU J, et al. Microstructure and corrosion resistance of simultaneous Al-Fe coating on copper by pack cementation[J]. Surface & coatings technology, 2009, 203(22): 3392-3397.
- [5] PEI Y, ZHOU C. Improved hot corrosion resistance of Dy-Co-modified aluminide coating by pack cementation process on nickel base superalloys[J]. Corrosion science, 2016, 112: 710-717.
- [6] 黄敦伟, 胡爱萍, 张宏伟, 等. 热浸渗铝 X70 管线钢扩渗工艺研究[J]. 表面技术, 2013, 42 (4): 72-75.  
HUANG Dun-wei, HU Ai-ping, ZHANG Hong-wei, et al. Research on hot diffusion aluminizing process of X70 pipe line steel[J]. Surface technology, 2013, 42(4): 72-75.
- [7] 颀向旭, 王宇. 碳钢渗铝工艺研究进展[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(5): 1-5.  
XIE Xiang-xu, WANG Yu. Research progress on aluminizing process of carbon steel[J]. Heat treatment technology and equipment, 2010, 31(5): 1-5.
- [8] 张冀翔, 徐修炎, 宋健斐, 等. 钢的渗铝工艺技术及性能研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47 (2): 218-224.  
ZHANG Ji-xiang, XU Xiu-yan, SONG Jian-fei, et al. Research progress of steel aluminizing technology and performance[J]. Surface technology, 2018, 47(2): 218-224.
- [9] XIANG X, WANG X, ZHANG G, et al. Preparation technique and alloying effect of aluminide coatings as tritium permeation barriers: A review[J]. International journal of hydrogen energy, 2015, 40(9): 3697-3707.
- [10] GEIB F D, RAPP R A. Simultaneous chromizing: Aluminizing coating of low-alloy steels by a halideactivated pack-cementation process[J]. Oxidation of metals, 1993, 40(3-4): 213-228.
- [11] WANG Y Q, ZHANG Y, WILSON D A. Formation of aluminide coatings on ferritic-martensitic steels by a low-temperature pack cementation process[J]. Surface & coatings technology, 2010, 204(16-17): 2737-2744.
- [12] PEREZ F J, HIERRO M P, TRILLEROS J A, et al. Iron aluminide coatings on ferritic steels by CVD-FBR technology[J]. Intermetallics, 2006, 14(7): 811-817.
- [13] XIANG Z D, DATTA P K. Pack aluminisation of low alloy steels at temperatures below 700 °C[J]. Surface & coatings technology, 2004, 184(1): 108-115.
- [14] 王修春, 李木森, 董瑞华, 等. 机械能助渗铝组织与性能研究[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(6): 118-122.  
WANG Xiu-chun, LI Mu-sen, DONG Rui-hua, et al. Study on mechanical energy aided aluminizing an cold-rolled 08F steel sheet[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2007, 28(6): 118-122.
- [15] 赵延灵, 李国成, 李文戈. 碳钢粉末渗铝试验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(1): 57-59.  
ZHAO Yan-ling, LI Guo-cheng, LI Wen-ge. Experimental study on powder aluminizing cementation of carbon steel [J]. Journal of the university of petroleum china (edition of natural science), 2003, 27(1): 57-59.
- [16] 张超, 宋义全. 碳钢渗铝的组织与腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺, 2015(2): 178-181.  
ZHANG Chao, SONG Yi-quan. Experimental study on microstructure and corrosion behavior of carbon steel after aluminizing[J]. Hot working technology, 2015(2): 178-181.
- [17] 盛长松, 晁君瑞, 苏文志. 渗铝、共渗技术及钢材防腐蚀[M]. 北京: 中国石化出版社, 2015.  
SHENG Chang-song, CHAO Jun-rui, SU Wen-zhi. Aluminizing and copenetration technology and steel corrosion protection [M]. Beijing: Sinopec Press, 2015.
- [18] 戚正风. 固态金属中的扩散与相变[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
QI Zheng-feng. Diffusion and phase transition in solid metal[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1998.
- [19] 徐恒钧. 材料科学基础[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.  
XU Heng-jun. Material science foundation [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2001.
- [20] ZHU Xiao-lin, YAO Zheng-jun, GU Xue-dong, et al. Microstructure and corrosion resistance of Fe-Al intermetallic coating on 45 steel synthesized by double glow plasma surface alloying technology[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2009, 19(1): 143-148.
- [21] 唐仁政, 田荣璋. 二元合金相图及中间相晶体结构[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009.  
TANG Ren-zheng, TIAN Rong-zhang. Binary alloy phase diagrams and crystal structure of intermediate phase[M]. Changsha: Central South University Press, 2009.