

钢的渗铝工艺技术及性能研究进展

张冀翔, 徐修炎, 宋健斐, 严超宇, 魏耀东

(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: 钢材渗铝是通过化学和物理的方法将铝原子渗入钢材表面形成微合金层, 改变钢材的表面化学成分和特性的热处理工艺。渗铝处理可以提高钢材耐氧化性能、耐腐蚀性能和硬度, 作为一种简单有效的表面化学热处理工艺得到研究者的关注。简要介绍了当前常见的渗铝工艺, 如热浸渗铝、热喷涂渗铝、粉末包埋渗铝、料浆渗铝, 总结了常见渗铝工艺的特点与不足, 随后介绍了研究人员开发出的新型渗铝工艺, 如机械辅助渗铝、电场辅助渗铝、流化床气相沉积渗铝和离子电镀渗铝。论述了渗铝钢的显微结构和渗层的生长机理, 对渗铝后的渗铝钢具有耐氧化、耐腐蚀性能的机理进行了讨论说明。最后, 对渗铝工艺的发展趋势进行了探讨和展望。

关键词: 渗铝钢; 热处理工艺; 显微结构; 耐氧化; 耐腐蚀; 氧化膜

中图分类号: TG156.8+6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0218-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.034

Research Progress of Steel Aluminizing Technology and Performance

ZHANG Ji-xiang, XU Xiu-yan, SONG Jian-fei, YAN Chao-yu, WEI Yao-dong

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

ABSTRACT: Steel aluminizing is a kind of heat treatment process which infiltrates aluminum atoms into steel surfaces in chemical and physical methods to form microalloy layer, and changes surface chemical composition and characteristics of steels. Oxidation resistance, corrosion resistance and hardness of the steels could be improved by aluminizing treatment. As a simple and effective surface chemical heat treatment process, aluminizing has received attention of researchers. Current common aluminizing processes, such as hot dip aluminizing, thermal spraying aluminizing, pack cementation aluminizing and slurry aluminizing, were briefly introduced. Characteristics and disadvantages of the processes were summarized. Then, new aluminizing processes developed by the researchers, such as mechanical energy aided aluminizing, electric field aided aluminizing, chemical vapor deposition aluminizing in fluidized bed reactors and ion plating aluminizing, were introduced. Then microstructure of aluminized steels and growth mechanism of aluminized layer were discussed, oxidation resistance and corrosion resistance mechanisms of the aluminized layer were explained, and finally development trend of the aluminizing process was discussed and prospected.

KEY WORDS: aluminized steels; heat treatment process; microstructure; oxidation resistance; corrosion resistance; oxide film

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-10-20

Received: 2017-08-10; Revised: 2017-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21406265)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (21406265)

作者简介: 张冀翔 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为生物质燃料与金属腐蚀防护。

Biography: ZHANG Ji-xiang (1986—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: biomass fuel and metal corrosion protection.

渗铝技术最早出现于 19 世纪末期, 自 1893 出现第一个热浸渗铝专利后, 渗铝技术就得到了不断的发展^[1]。美国等工业发达国家在 20 世纪 30 年代对渗铝工艺进行了大量研究, 取得了重要成果, 并将渗铝技术应用到工业生产中。我国从 20 世纪 50 年代末开始研究渗铝技术^[2]。目前已经研究出的渗铝工艺有: 热浸渗铝、热喷涂渗铝、粉末包埋渗铝、料浆渗铝和气相沉积渗铝等。钢材进行渗铝处理后, 表面形成的铁铝合金层的耐高温氧化和耐硫化能力好^[3-4]。经过渗铝工艺处理的普通碳钢可以代替不锈钢在特定条件下使用, 具有巨大的经济价值, 目前渗铝钢已在石化、电力、航空等行业得到应用^[5-7]。渗铝钢在一些重要项目中具有良好的应用前景, 如在国际热核聚变实验堆计划中可以作为阻隔氦渗透层应用在聚变反应堆中^[8], 超临界发电设备中耐蒸汽氧化性优秀的渗铝钢代替铬钢^[9]等。

1 常见渗铝工艺

1.1 热浸渗铝

热浸渗铝工艺是将工件浸入 700 ~ 800 °C 的熔融铝液中, 保温 3 ~ 15 min 后, 取出在空气中冷却, 再放入 600 ~ 1050 °C 环境中进行热扩散^[10-12]。热浸渗铝工艺流程为^[13]: 工件表面预处理 (包括除油、除锈) → 助镀 → 烘干 → 热浸镀 → 热扩散渗铝 → 冷却 → 检查质量。热浸渗铝工艺的优点是设备简单, 渗层综合性能优异, 适于连续生产和小批量生产; 缺点是能耗高, 铝消耗量大, 浸镀层厚度不均匀且比较难控制^[13-14]。热浸渗铝钢的应用受高温限制, 当环境温度高于 500 °C 时, 热浸渗铝钢表面的纯铝会持续向基体扩散, 导致表面抗氧化性能降低^[15]。

1.2 热喷涂渗铝

热喷涂渗铝工艺是利用不同热源 (如电弧、等离子体、燃烧火焰等), 将预喷涂的粉末或丝状金属铝加热至熔化或者熔融状态, 借助高速气流雾化形成“微粒雾流”, 以一定速度沉积在已预先处理好的工件试样表面, 形成与基体紧密结合的堆积状涂层, 并在高温下形成热扩散合金层^[16-18]。热喷涂工艺流程为^[19]: 工件表面预处理 (工件表面净化 → 表面预加工 → 表面粗化 → 预热) → 喷涂过程 (喷涂底层 → 喷涂工作层) → 喷涂后处理 (机械加工 → 封孔)。热喷涂工艺的优点是取材广泛、功效高、成本低, 被喷涂工件尺寸不受限制, 涂层厚度容易控制, 特别适合大型设备表面处理, 操作方便, 经济效益显著; 缺点是热效率低、材料利用率低、浪费大、涂层与基体结合力较低、孔隙率较高等^[20]。

1.3 粉末包埋渗铝

粉末包埋渗铝工艺是将渗铝工件装入含有渗铝剂粉末的渗箱中, 密封渗箱并加热至 900 ~ 1150 °C, 保温 4 ~ 16 h 后, 在工件表面形成一定厚度的铁铝合金层^[21-24]。粉末包埋渗铝工艺流程如下^[25]: 钢材构件表面除油 → 除锈 → 水中冲洗 → 干燥 → 配制渗剂 → 粉末渗剂包埋构件 → 加热保温扩散 → 自然降温出箱 → 表面清理。粉末包埋渗铝工艺优点是设备简单、成本低, 操作方便, 可以同时多个零件进行渗铝, 渗铝剂原料来源广泛, 渗剂配比容易调节; 缺点是渗铝剂粉末与被渗工件直接接触, 粉末容易进入渗层表面而影响工件表面粗糙度, 不能用于复杂工件、缝隙和精细工件, 处理时间长、操作环境差, 不适于大型工件渗铝^[26]。

1.4 料浆渗铝

料浆渗铝是渗铝剂与溶剂混合形成料浆悬浮液, 在工件表面涂刷渗铝料浆, 干燥后, 在惰性气体保护下将工件加热至 700 ~ 1100 °C 除去溶剂, 形成料浆层, 保温 4 ~ 10 h 后, 在工件表面形成铁铝合金层^[27-29]。料浆渗铝工艺流程^[30-31]: 试样预处理 → 配制料浆 → 渗剂料浆的涂刷与干燥 → 料浆渗铝 → 后处理。料浆渗铝工艺具有操作简单、节省渗剂、表面光洁度高、可进行局部扩散渗铝处理且不受工件形状限制等优点。

2 渗铝工艺的新发展

针对以上渗铝工艺普遍存在的渗铝温度高、能耗大、材料利用率低等缺点, 研究人员正在开发渗铝温度相对较低、材料利用率更高的新型渗铝工艺, 如机械能辅助渗铝、电场辅助渗铝等。机械能辅助渗铝是将试样与渗剂装入渗箱中, 利用机械能辅助装置或通过喷丸处理, 使试样表面活性增加, 从而实现 650 °C 下渗铝^[32-35]。孙希泰等^[32]利用小型机械装置使粉末渗剂冲击试样表面, 将渗铝温度由常规的 900 ~ 1050 °C 降低到 600 °C 以下, 渗铝时间缩短至 4 h, 能耗仅为常规渗铝的 1/3 ~ 1/5, 观察结果显示, 20# 钢渗层厚度可达 60 ~ 100 μm。高温氧化实验表明, 800 °C 以下渗铝钢的耐腐蚀性能优于 Cr18Ni9Ti 不锈钢。

流化床气相沉积渗铝是将渗剂和试样装入特制的流化床反应器中, 在气体的吹动下, 渗剂颗粒悬浮于运动气体中, 并在反应器中进行循环, 渗剂颗粒混合均匀并反应充分, 渗剂反应产生的活性物与试样表面反应生成铁铝间化合物, 进而形成渗铝层^[36-39]。Pérez 等^[36]采用流化床气相渗铝法在 525 °C 下加热 0.5 h, 在 304 不锈钢表面制备出厚度 2.7 μm 的渗层, 加热 2 h 制备出厚 12.5 μm 的渗层, 与常规渗铝法相

比,流化床渗铝法降低了渗铝温度,缩短了渗铝时间。Sánchez 等^[39]采用流化床气相沉积渗铝法,以铁素体 P122 钢为基体,实现 550 °C 下渗铝,流动气体为 Ar+HCl+H₂ 混合气体,并指出混合气体中 HCl 含量会影响渗层厚度。

电场辅助渗铝是在渗铝过程中加入外电场,使带电金属离子的无序流动变为定向流动,提高了渗铝效率^[40-41]。有研究者在对 45# 钢进行粉末渗铝的同时施加直流电场^[40,42]和交流电场^[43],实验结果显示,当直流电流超过“阈值”3 A 时,才具有促进渗层增长的效果。渗铝条件为直流电流 4 A、温度 750 °C、保温 4 h 时,渗层厚度超过 180 μm,所得试样在 750 °C 以下的氧化环境中能够长期工作;交流电流 2 A、保温时间 4 h 时,即使渗铝温度低至 500 °C,也可形成 40 μm 的渗层;当交流电流提高至 4 A、渗铝温度为 700 °C 时,渗层厚度达到 190 μm,900 °C 下经 100 h 氧化试验后,试样渗铝层与基体结合良好,仅表面有少量氧化现象。

离子电镀渗铝是先在试样表面电镀一层纯铝薄层,然后进行扩散热处理而获得渗铝层的方法^[44-46]。韦航标等^[44]采用离子电镀渗铝法,在 P110 钢表面电镀铝层,热处理温度为 540~640 °C,时间为 4~24 h,实验表明热处理温度在 590 °C 以上时扩散速度快,高于 620 °C 时,基体硬度快速下降。18 μm 镀铝层试样在 620 °C 下热处理 4 h,获得厚度为 12 μm 的渗层。王文轩^[46]采用离子电镀渗铝法,以 CLAM 钢为基体,电镀 16 μm 厚的铝层,在 750 °C 下热处理 4 h,获得 38~40 μm 厚具有三层结构的渗层,主要相成分从外向内依次为(FeCr)₂Al₃、(FeCr)Al₂、(FeCrMn)Al。

3 渗铝层的组织结构

不同渗铝工艺得到的渗层具有相似的结构,只在渗层表面存在细微差别,如表面附着物、表面光滑度等。由表面向基体依次为外粘附铝层、合金层(富铝金属间化合物层)和扩散层(低铝金属间化合物层)^[47]。下面就以工业上常用的两种渗铝工艺为例,说明渗层的组织结构及其形成过程。

3.1 热浸渗铝钢的渗层结构及形成机理

热浸渗铝钢在热浸镀后、热处理前,渗层只有外粘附铝层和合金层,如图 1a 所示^[12]。富铝金属间化合物层包括外粘附铝层下很薄的 FeAl₃ 层和下方的 Fe₂Al₅ 层,这两种相组织的硬度高、脆性大,对渗层的保护作用不利,需要经过热处理转变为韧性好的低铝合金相,如 FeAl、Fe₃Al 等。热处理后,舌状 Fe₂Al₅ 相转变成 FeAl₂、FeAl、Fe₃Al 相,如图 1b 所示^[14]。热处理形成的扩散层可以增强渗层与基体的连接强度。

热浸渗铝时发生复杂的物理化学过程,不仅存在液态铝与固态铁间的相互吸附、浸润、溶解和反应,还存在不同元素间的化学作用和物理扩散^[48]。渗铝层的形成包括两个过程:熔融铝与合金层界面的向外迁移,合金层与基体钢界面的向内迁移。Heumann 等^[49]对热浸渗铝钢渗层的形成机理进行了阐述:固态铁与液态铝接触时,钢材表面存在铁铝原子的相互扩散和界面反应,形成铁铝金属间化合物层。铁原子向铝液中扩散,局部浓度增加到一定程度,在铁、铝界面处形成铁铝二元合金相中铁含量最低的 FeAl₃ 相,同时由于合金层中铁铝原子浓度不均匀,会形成微小区域的 Fe₂Al₅ 相。这是因为一方面,FeAl₃ 相层与基体接触的一侧由于铁原子扩散速率快于铝原子,铁原子浓度增加,FeAl₃ 相转变成 Fe₂Al₅ 相;另一方面,铁原子穿过 FeAl₃ 相层向铝液中扩散,不断形成新的 FeAl₃ 相。铁原子在合金层中的扩散以及 Fe₂Al₅ 相的长大就是渗层的形成机理。

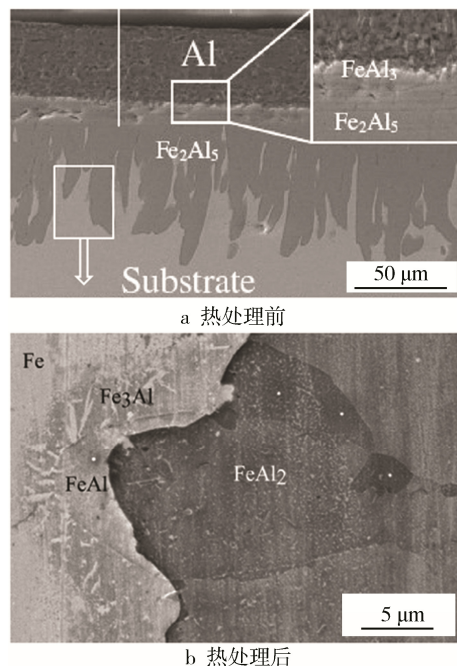


图 1 热浸渗铝钢热处理前后的层组织结构^[12,14]
Fig.1 Microstructure of hot dip aluminized steels before (a) and after (b) heat treatment

3.2 粉末包埋渗铝钢的渗层结构及形成机理

粉末包埋渗铝工艺生产的渗铝钢,渗层表面由于存在比较粗糙的渗剂颗粒,渗层结构包括合金层和扩散层,如图 2 所示。合金层中的铝含量较高,主要为 FeAl、Fe₃Al 相,扩散层中铝含量随着渗层深度的增加而逐渐下降,基体中铝含量降为 0^[50]。合金层中的铁铝相组成依赖于渗剂的铝活性以及渗铝温度:渗剂中铝活性高时,合金层主要是 FeAl、Fe₃Al 相及少量 FeAl₃、Fe₂Al₅ 相^[15];铝活性、渗铝温度低时,合金

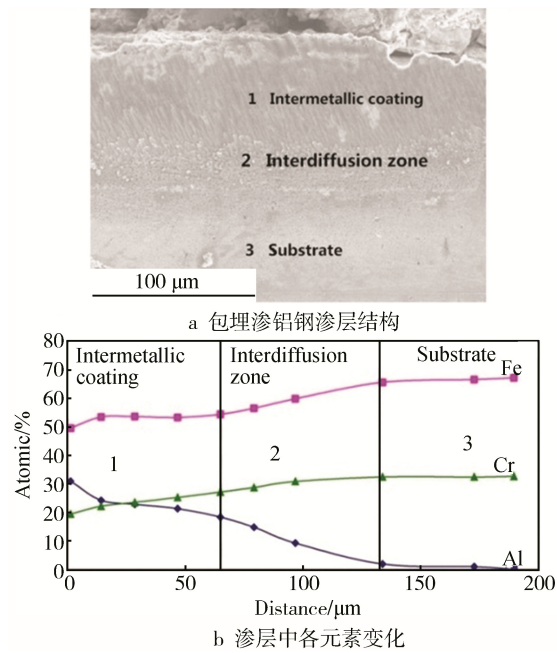


图 2 包埋渗铝钢渗层结构渗层中 Fe、Cr 和 Al 元素浓度变化^[50]

Fig.2 Concentration variations of Fe, Cr and Al in aluminized layer of packed aluminized steels^[50]: (a) layer structure of packed aluminized steels, (b) Concentration variations of aluminized layer

层为 Fe_2Al_5 相^[51]。基体中合金元素同样会对合金层相成分产生影响^[50]。

粉末包埋渗铝工艺中，渗层的形成机制包括气相沉积和热扩散两类过程。Wang 等^[52]在进行粉末包埋渗铝实验时，将试样用多孔氧化铝纸包覆，使其不与渗剂直接接触，结果显示试样表面同样能够形成渗铝层，验证了气相沉积过程的存在。Pérez 等^[38]提出了气相渗铝过程模型，如图 3 所示。高温下，渗剂中的铝和活化剂（ AlCl_3 或者 NH_4Cl ）反应生成铝的氯化物 Al_xCl_y ，并迁移、沉积到试样表面； Al_xCl_y 在试样表面发生歧化反应生成活性铝原子和易挥发物质（ AlCl_3 ），易挥发物质向外部逃逸；活性铝原子与铁原子接触并反应生成金属间化合物层，之后的扩散过程与热浸渗铝相似^[53]。而渗层的生长主要受扩散过程控制，由扩散定律可知影响扩散过程的主要因素是温度^[54]，但是温度太高会对基体的力学性能产生不利影响。

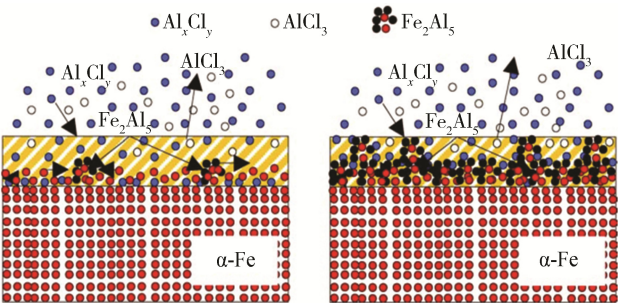


图 3 渗铝过程中气相沉积过程^[38]

Fig.3 Vapor deposition process during aluminization process^[38]

4 渗铝钢的特性

4.1 抗氧化性能

渗铝首先可以提高钢材的抗氧化性能。文献[55-58]对渗铝钢试样与未渗铝试样、不锈钢试样进行氧化对比试验，结果都显示渗铝后试样的抗氧化性能提高 4~64 倍，在一定条件下，试样的抗氧化性能优于 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢。氧化过程遵循抛物线生长规律：

$$\Delta W = K_p t^{1/2} \quad (1)$$

式中： ΔW 为氧化增重； K_p 为抛物线系数； t 为氧化时间^[57-59]。

文献[2,57]对铝层的抗氧化机理进行了解释：氧化初始阶段，在渗铝层表面形成的致密 Al_2O_3 膜阻止基体进一步氧化，氧气只能通过 Al_2O_3 膜的破裂和缺陷处进入到渗层内部与铁原子反应，因此连续完整的 Al_2O_3 膜对基体的保护作用非常重要。 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 相呈现多孔、脆性大等特点，而 FeAl 和 Fe_3Al 相延展性好且与基体结合牢固，是渗铝的目标金相^[60]。王豫等^[61]对 20[#]钢、T10 钢、HT150 铸铁进行 740 ℃ 下的热浸渗铝实验，然后对获得的渗铝试样进行 850 ℃ 下的氧化实验，指出高温下表面铝原子向基体内部扩散，当表面铝质量分数低于 8% 时，渗层的保护作用消失。

4.2 耐腐蚀性能

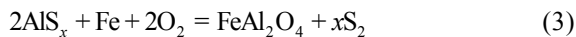
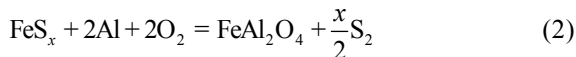
钢材渗铝后得到的渗铝钢在含有氯离子、硫化物环境中的耐腐蚀性能得到提高^[62-64]。Zhan 等^[55]以碳钢和 Fe-5Cr-Mo 合金钢为基体进行渗铝，对渗铝试样和未渗铝试样进行硫化腐蚀实验（温度 600 ℃、腐蚀时间 50 h、10% SO_2 +Ar 的混合气体），实验结果如表 1 所示。渗铝碳钢腐蚀增重仅为 0.13 mg/cm^2 ，是未渗铝碳钢增重的 1/140，是 304 不锈钢腐蚀增重的 1/50；Fe-5Cr-Mo 合金钢在硫化环境中腐蚀严重，增重达到了 138 mg/cm^2 ，而渗铝后合金钢的腐蚀增重仅为 0.04 mg/cm^2 ，相差 4 个数量级，渗铝试样表面均未出现腐蚀剥落现象。王豫等^[61]实验表明，在 500 ℃ 含 H_2S 气体氛围中渗铝后，20[#]钢、T10 钢的耐腐蚀性分别提高 27 倍、29 倍。

表 1 试样在 600 ℃ 混合气体(10% SO_2 +Ar)中暴露 50 h 后的腐蚀情况^[55]

Tab.1 Corrosion conditions of testpieces exposed to 10% SO_2 +Ar gas mixture for 50 h at 600 ℃^[55]

mg/cm ²					
试样	碳钢	渗铝碳钢	Fe-5Cr-Mo 合金钢	渗铝 Fe-5Cr-Mo 合金钢	304 不锈钢
增重	18.64	0.13	137.98	0.04	6.31
剥落量	56.44	<0.01	8.86	<0.01	6.62

文献对耐腐蚀性机理的解释为^[65-66]: 在氧化硫化环境中, 铝、铁原子与硫反应生成 AlS_x 、 FeS_x , 可能存在反应 (2) 和 (3), 在氧化腐蚀环境中存在反应 (4) 和 (5)。



FeAl_2O_4 具有尖晶石结构, 非常致密。 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 具有相似的晶体结构, 都是六方最密堆积。这三种铝铁氧化物覆盖在渗铝层表面相当于一层保护膜, 其致密的晶体结构阻止腐蚀介质对基体的持续腐蚀。渗铝层的保护性能不仅取决于腐蚀环境中反应的热力学稳定性, 还取决于界面保护膜的完整性、形貌物理和化学特性, 以及合金强度和渗铝层的元素组成^[67]。

5 结语

渗铝钢因其具有耐高温氧化、耐硫化物腐蚀、耐磨损、易于制造、成本低等特点, 已经在火电厂、石化炼厂、输油管道等方面得到应用。但是渗铝工艺仍然存在一些需要解决的问题: 如渗铝温度高会使基材的力学性能受到影响; 渗铝在高温下进行能耗大、材料利用率低; 渗铝过程耗时长、渗铝效率低等。目前研究工作者已经针对上述问题展开研究, 开发出多种新型渗铝工艺。未来渗铝钢的研究主要集中在两个方面: 一是以解决渗铝温度过高导致基材的力学性能下降、能耗大、材料利用率低、耗时长、渗铝效率低的问题为目的, 研究新型渗铝工艺; 二是优化改进已有的渗铝工艺, 以适合工业应用。

参考文献:

- [1] 刘邦津. 钢材的热浸镀铝[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [2] 罗宏, 尹显飞. 低碳钢和不锈钢粉末渗铝研究进展[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2008, 21(2): 97-100.
- [3] ZAMANZADE M, BARNOUSH A, MOTZ C. A Review on the Properties of Iron Aluminide Intermetallics[J]. Crystals, 2016, 6(1): 5698-5711.
- [4] ZHONG C, LIU F, WU Y, et al. Protective Diffusion Coatings on Magnesium Alloys: A Review of Recent Developments[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2012, 43(17): 11-21.
- [5] 熊林. 碳钢渗铝钢管在汽提装置的应用[J]. 环境科学与技术, 2001, 24(S1): 62-63.
- [6] XIONG Lin. Application of Carbon Steel Aluminized Steel Pipe in Stripping Device[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 24(S1): 62-63.
- [7] 蔡志刚, 谢涛. 锅炉管的高温腐蚀及渗铝防护[J]. 热力发电, 1996(1): 3-13.
- [8] CAI Zhi-gang, XIE Tao. High Temperature Corrosion and Aluminizing Protection of Boiler Tubes[J]. Thermal Power Generation, 1996(1): 3-13.
- [9] 李克, 张莉, 王广生. 航空发动机涡轮叶片气相渗铝工艺[J]. 金属热处理, 2013, 38(9): 42-45.
- [10] LI Ke, ZHANG Li, WANG Guang-sheng. Vapor Aluminizing Process of Gas-turbine Blade for Aero-engine[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(9): 42-45.
- [11] 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.
- [12] XIANG Z D, ZENG D, ZHU C Y, et al. Steam Oxidation Resistance of Ni-aluminide/Fe-aluminide Duplex Coatings Formed on Creep Resistant Ferritic Steels by Low Temperature Pack Cementation Process[J]. Corrosion Science, 2011, 53(1): 496-502.
- [13] RICHARDS R W, JONES R D, CLEMRNTS P D, et al. Metallurgy of Continuous Hot Dip Aluminizing[J]. International Materials Reviews, 1994, 39(5): 191-212.
- [14] ZHANG W, FAN Z K, GUO X J. Summary of Coating Formation Mechanism and Microstructure during Hot Dip Aluminizing on Steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(1): 9-12.
- [15] SAMSU Z, OTHMAN N K, DAUD A R, et al. Properties and Growth Rate of Intermetallic Al-Fe through Hot Dipped Aluminizing[J]. Advanced Materials Research, 2014, 980: 3-7.
- [16] 郑毅然, 高文禄. 热浸镀铝钢材的应用与发展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1999, 20(3): 179-184.
- [17] ZHENG Yi-yan, GAO Wen-lu. Application and Development of Hot-dip Aluminized Steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1999, 20(3): 179-184.
- [18] WANG D. Phase Evolution of an Aluminized Steel by Oxidation Treatment[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(10): 3026-3032.
- [19] BAHADUR A, MOHANTY O N. Aluminium Diffusion Coatings on Medium Carbon Steel[J]. Materials Transactions, 1995, 36(9): 1170-1175.
- [20] 徐滨士, 李长久, 刘世参, 等. 表面工程与热喷涂技术及其发展[J]. 中国表面工程, 1998(1): 3-9.
- [21] XU Bing-shi, LI Chang-jiu, LIU Shi-can, et al. Surface Engineering and Thermal Tpraying Technology and Their Developments[J]. China Surface Engineering, 1998(1): 3-9.
- [22] PAREDES R S C, AMICO S C, D'OLIVEIRA A S C M. The Effect of Roughness and Pre-heating of the Substrate on the Morphology of Aluminium Coatings

- Deposited by Thermal Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(9): 3049-3055.
- [18] SASAKI T, YAGI T, WATANABE T, et al. Aluminizing of TiAl-based Alloy Using Thermal Spray Coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(13-14): 3900-3904.
- [19] 国洪建, 贾均红, 张振宇, 等. 热喷涂技术的研究进展及思考[J]. 材料导报, 2013, 27(3): 38-40.
GUO Hong-jian, JIA Jun-hong, ZHANG Zhen-yu, et al. Research Status and Prospects of Thermal Spraying Technology[J]. Materials Review, 2013, 27(3): 38-40
- [20] 王永兵, 刘湘, 祁文军, 等. 热喷涂技术的发展和应
用[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(7): 52-55.
WANG Yong-bing, LIU Xiang, QI Wen-jun, et al. Development and Application of Thermal Spraying Technology[J]. Electroplating & Finishing, 2007, 26(7): 52-55.
- [21] MOLLARD M, RANNOU B, BOUCHAUD B, et al. Comparative Degradation of Nickel Aluminized by Slurry and by Pack Cementation under Isothermal Conditions[J]. Corrosion Science, 2013, 66(1): 118-124.
- [22] KUNG S C, RAPP R A. Fundamental Kinetic Study of Aluminization of Iron by Pack Cementation at 900 °C[J]. Surface & Coatings Technology, 1987, 32(1-4): 41-56.
- [23] 张超. 渗铝层碳钢在弱酸性盐溶液中的腐蚀行为研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
ZHANG Chao. Corrosion Behavior of Aluminized Layer of Carbon Steel in Weak Acid Salt Solution[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014.
- [24] GEIB F D, RAPP R A. Simultaneous Chromizing-Aluminizing Coating of Low-alloy Steels by a Halide-activated, Pack-cementation Process[J]. Oxidation of Metals, 1993, 40(3): 213-228.
- [25] 莫利明, 段滋华, 高原. 碳钢表面粉末渗铝试验及其性能研究[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(3): 342-345.
MO Li-ming, DUAN Zi-hua, GAO Yuan. An Experimental Study on Pack Aluminization of Carbon Steel and Its Properties[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(3): 342-345.
- [26] 范凯平. CVD 法渗铝设备及工艺研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2014.
FAN Kai-ping. Research on CVD Aluminizing Equipment and Technology[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science & Technology, 2014.
- [27] BOUCHAUD B, RANNOU B, PEDRAZA F. Slurry Aluminizing Mechanisms of Ni-based Superalloys Incorporating an Electrosynthesized Ceria Diffusion Barrier[J]. Materials Chemistry & Physics, 2013, 143 (1): 416-424.
- [28] DORCHEH A S, GALETZM C. Slurry Aluminizing: A Solution for Molten Nitrate Salt Corrosion in Concentrated Solar Power Plants[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2016, 146: 8-15.
- [29] PEDRAZA F, PROY M, BOULESTEIX C, et al. Slurry Aluminizing of IN-800HT Austenitic Stainless Steel and Pure Nickel Correlations between Experimental Results and Modelling of Diffusion[J]. Materials & Corrosion, 2016, 67(10): 1059-1067.
- [30] 任有才. 料浆感应渗铝工艺及渗层的主要特性研究[J]. 炼油技术与工程, 2003, 33(8): 33-36.
REN You-cai. Study on Induction Aluminizing Process and the Features of Aluminized Layer[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2003, 33(8): 33-36.
- [31] 刘梅静. 料浆渗铝的工艺研究[J]. 金属加工: 热加工, 2015(S2): 178-180.
LIU Mei-jing. Study on Aluminizing Process of Slurry[J]. Metal Working: Hot Processing, 2015(S2): 178-180.
- [32] 孙希泰, 付建设, 徐英, 等. 机械能助渗铝的研究[J]. 金属热处理, 2000(7): 21-23.
SUN Xi-tai, FU Jian-she, XU Ying, et al. Study on Mechanical Energy Aid Aluminizing[J]. Heat of Treatment of Metals, 2000(7): 21-23.
- [33] XIANG Z D, DATTA P K. Shot Peening Effect on Aluminide Diffusion Coating Formation on Alloy Steels at Low Temperatures[J]. Scripta Materialia, 2006, 55(12): 1151-1154.
- [34] ZHAN Z, HE Y, WANG D. Low-temperature Processing of Fe-Al Intermetallic Coatings Assisted by Ball Milling[J]. Intermetallics, 2006, 14(1): 75-81.
- [35] 王吉会, 张兴华, 张跃. 机械能助渗铝工艺与渗层性能研究[J]. 热处理, 2010(6): 22-25.
WANG Ji-hui, ZHANG Xing-hua, ZHANG Yue. Aluminizing Process Aided by Mechanical Energy and Properties of Aluminized Case[J]. Heat Treatment, 2010(6): 22-25
- [36] PEREZ F J, PEDRAZA F, HIERRO M P, et al. Adhesion Properties of Aluminide Coatings Deposited via CVD in Fluidised Bed Reactors (CVD-FBR) on AISI 304 Stainless Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2000, S133-134(1): 338-343.
- [37] VOUDOURIS N, CHRISTOGLOI C, ANGELOPOULOS G N. Formation of Aluminide Coatings on Nickel by a Fluidised Bed CVD Process[J]. Surface & Coatings Technology, 2001, 141(2): 275-282.
- [38] 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.
- [39] SANCHEZ L, BOLIVAR F J, HIERRO M P, et al. Effects of Reactive Gaseous Mixture and Time on the Growth Rate and Composition of Aluminium Diffusion Coatings by CVD-FBR on 12Cr-ferritic Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(18): 7626-7634.
- [40] ZHOU Z, XIE F, HU J. A Novel Powder Aluminizing Technology Assisted by Direct Current Field at Low Temperatures[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 203(1-2): 23-27.
- [41] XIE F, HU J, ZHOU Z H, et al. Effects of Direct Current Field on Powder Pack Aluminizing[J]. Surface Engineering, 2011, 27(2): 134-138.
- [42] 周正华, 谢飞, 胡浩波, 等. 直流电场对粉末法渗铝的影响[J]. 材料热处理学报, 2008(6): 154-157.
ZHOU Zheng-hua, XIE Fei, HU Hao-bo, et al. Influence of Direct Current Field on Powder Aluminizing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008(6): 154-157.

- [43] 闫梦龙, 谢飞, 潘建伟. 交流电场对 45 钢粉末法渗铝的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(2): 203-208.
YAN Meng-long, XIE Fei, PAN Jian-wei. Effects of Alternating Current Field on Pack Aluminizing of 45 Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(2): 203-208.
- [44] 韦航标, 王宇, 李文川, 等. P110 钢表面韧性 FeAl 渗层的低温制备[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(S1): 166-169.
WEI Hang-biao, WANG Yu, LI Wen-chuan, et al. Preparation of FeAl Coating on P110 Steel at Low Temperature[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(S1): 166-169.
- [45] 韦航标. FeAl 渗层的低温制备及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
WEI Hang-biao. Low Temperature Preparation of FeAl Coating and Investigation of Its Mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [46] 王文轩. CLAM 钢表面 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeAl}$ 防氚渗透膜层制备[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2015.
WANG Wen-xuan. Preparation of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeAl}$ Coating as Tritium Permeation Barrier Coating on CLAM Steel Surface[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2015.
- [47] KOBAYASHI S, YAKOU T. Control of Intermetallic Compound Layers at Interface Between Steel and Aluminum by Diffusion-treatment[J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 338(1): 44-53.
- [48] 张伟, 范志康, 郭献军. 热浸镀铝钢渗铝层的微观组织及其形成机理研究现状[J]. 机械工程材料, 2006, 30(1): 9-11.
ZHANG Wei, FAN Zhi-kang, GUO Xian-jun. Summary of Coating Formation Mechanism and Microstructure During Hot Dip Aluminizing on Steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(1): 9-11.
- [49] HEUMANN T, DITTRICH S. Structure Character of the Fe_2Al_3 Intermetallics Compound in Hot Dip Aluminizing Process[J]. Journal of Coatings, 2013(1-2): 240-256.
- [50] HOUNGNINOU C, CHEVALIER S, LARPIN J P. Synthesis and Characterisation of Pack Cemented Aluminide Coatings on Metals[J]. Applied Surface Science, 2004, 236: 256-269.
- [51] XIANG Z D, DATTA P K. Pack Aluminisation of Low Alloy Steels at Temperatures Below 700 Degrees[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 184(1): 108-115.
- [52] 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.
- [53] BANGARU N V, KRUTENAT R C. Diffusion Coatings of Steels: Formation Mechanism and Microstructure of Aluminized Heat-resistant Stainless Steels[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1984, 2(4): 806-815.
- [54] 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.
- [55] ZHAN Z, LIU Z, LIU J, et al. Microstructure and High-temperature Corrosion Behaviors of Aluminide Coatings by Low-temperature Pack Aluminizing Process[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(12): 3874-3879.
- [56] 魏无际, 丁毅, 石焕荣. Q235 钢热浸渗铝层的组织分析和性能[J]. 南京工业大学学报(自科版), 2000, 22(6): 10-13.
WEI Wu-ji, DING Yi, SHI Huan-rong. Investigation in Microstructure and Properties of Hot-dip Aluminizing Layer of Q235 Steel[J]. Journal of Nanjing University of Chemical Technology, 2000, 22(6): 10-13.
- [57] HMSOLIMAN, KEMONAMED, 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.
- [58] SON Y I, CHUNG C H, GOWKANAPALLI R R, et al. Kinetics of Fe_2Al_3 Phase Formation on 4130 Steel by Al Pack Cementation and Its Oxidation Resistance[J]. Metals and Materials International, 2015, 21(1): 1-6.
- [59] XIANG Z D, ROSE S R, DATTA P K. Low-temperature Formation and Oxidation Resistance of Nickel Aluminide/Nickel Hybrid Coatings on Alloy Steels[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(1): 99-102.
- [60] IVANOV E. Volume Relations in Aluminum Coatings[J]. Prot Met(USSR), 1983, 19(1): 124-128.
- [61] 王豫, 马玉明, 赵明琦. 含碳量对渗铝层组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 1997(10): 17-20.
WANG Yu, MA Yu-ming, ZHAO Ming-qi. Effect of Carbon Content on the Structures and Properties of Aluminizing Layer[J]. Heat Treatment of Metals, 1997(10): 17-20.
- [62] ZHU X L, YAO Z J, XUE G U, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Fe-Al Intermetallic Coating on 45 Steel Synthesized by Double Glow Plasma Surface Alloying Technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (English), 2009, 19(1): 143-148.
- [63] 廖丽华. 渗铝钢耐腐蚀性能试验[J]. 腐蚀与防护, 1998(6): 259-262.
LIAO Li-hua. Test of Corrosion Resistance of Aluminized Steel[J]. Corrosion & Protection, 1998(6): 259-262.
- [64] SHEN T H, TSAI C Y, LIN C S. Growth Behavior and Properties of ZnAl Pack Cementation Coatings on Carbon Steels[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 84: 129-149.
- [65] LEE W H, LIN R Y. Oxidation, Sulfidation and Hot Corrosion of Intermetallic Compound Fe_3Al at 605 °C and 800 °C[J]. Materials Chemistry & Physics, 1999, 58(3): 231-242.
- [66] POTER B, STEIN F, WIRTH R, et al. Early Stages of Protective Oxide Layer Growth on Binary Iron Aluminides[J]. Zeitschrift Für Physikalische Chemie, 2005, 219(11): 1489-1503.
- [67] 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.