

文章编号:2095-0411(2017)01-0001-06

热浸镀 Al-10Si-1Ce 的 HP40Nb 钢微观组织及 高温氧化行为研究

王芝秀,朱 凡,李 海

(江苏省材料表面科学与技术重点实验室,江苏 常州 213164; 常州大学 材料科学与工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:采用 SEM、EDS 和 XRD 等方法,研究了 HP40Nb 钢热浸镀 Al-10Si-1Ce 合金的初始镀层、扩散处理渗层、高温氧化渗层的微观组织特征和抗高温氧化性能。结果表明:热浸镀层由初生 α -Al, (α -Al+Si) 共晶组织的外层和 (Fe,Cr,Ni)₂(Al,Si)₅ 相的内层组成。热浸镀试样分别在 800、900、1 000℃ 下进行 4h 扩散处理后,渗层中各层呈现不同的显微组织特征,且表面生成了不同氧化物: θ -Al₂O₃, θ -Al₂O₃ + α -Al₂O₃, α -Al₂O₃。不同温度扩散处理的试样经 1 000℃/360h 高温氧化后,渗层均由外层(NiAl+Cr₃Si)和内层(σ , α +Ni₃Al)组成。1 000℃/4h 扩散处理的试样在高温氧化过程中平均氧化速率最小、抗氧化性能最好,其原因是表面致密的单一 α -Al₂O₃ 阻碍了氧化的进行。

关键词: HP40Nb 钢; 热浸镀; 高温氧化; 微观组织

中图分类号: TQ 31

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2017.01.001

Microstructure and Oxidation Resistance Behavior of Hot Dip Al-10Si-1Ce Aluminized Coating on HP40Nb Steel

WANG Zhixiu, ZHU Fan, LI Hai

(Jiangsu Key Laboratory of Materials Surface Technology, Changzhou University, Changzhou 213164, China; School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to improve the high temperature oxidation and carburization resistance of HP40Nb steel, experiment of steel was coated by hot-dipping into a molten bath containing Al-10Si-Ce. The effect of diffuse treatment on hot-dip aluminizing steel microstructure and oxidation resistance behavior at high temperature was studied by means of SEM, EDS and XRD. The results show that after hot-dip Al-10Si-1Ce treatment, the coating layer consisted of inner layer[(Fe,Cr,Ni)₂(Al,Si)₅] and outer layer[primary α -Al, (α +Si) eutectic structure]. After diffusion at 800, 900, 1 000℃ for 4h, the coatings had different microstructure characteristics, different oxides were formed on the surface: θ -Al₂O₃, θ -Al₂O₃ + α -Al₂O₃, α -Al₂O₃. After the cyclic oxidation test at 1 000℃ for 360h, the coatings consisted of outer layer(NiAl+Cr₃Si) and inner layer(σ , α +Ni₃Al). In the oxidation, the hot dipped Al-10Si-1Ce HP40Nb steel with the diffuse treatment of 1 000℃ / 4h had the minimum oxidation rate and best oxidation resistance. The reason was that the compact α -Al₂O₃ layer of the coating surface hindered the continuous oxidation.

收稿日期: 2016-04-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51671038)。

作者简介: 王芝秀(1976—), 女, 四川江安人, 博士, 副教授, 主要从事金属材料研究。

Key words: HP40Nb steel; hot dipping; high temperature oxidation; microstructures

随着乙烯裂解技术的发展,对炉管的高温抗氧化、抗渗碳和抗结焦等性能提出了更高的要求。在烃类热裂解时,大多数金属对焦的形成都有催化效应,催化结焦速率按下列顺序递减: $r(\text{Ni}) > r(\text{Fe}) > r(\text{Zn}) > r(\text{Cu}) > r(\text{Ti}) > r(\text{Cr}) > r(\text{Al}_2\text{O}_3) > r(\text{Si}) > r(\text{SiO}_2)$ ^[1]。目前 HP40 系列钢具有较高的 Ni 含量会催化焦的形成,除焦过程中的不均匀燃烧会导致炉管局部过热,引起热疲劳,同时还会出现严重的渗碳腐蚀现象^[2]。渗碳会导致炉管性能恶化,使炉管脆化、断裂。研究表明,在炉管内壁形成致密稳定的氧化物薄膜可以提高材料的高温抗氧化性能和抗渗碳结焦性能^[3]。

目前使用的 HP40 系列钢的抗氧化和抗渗碳结焦性能主要依赖于 Cr_2O_3 氧化膜的形成,但在高温下 Cr_2O_3 易挥发使氧化膜变薄,从而其抗氧化和抗渗碳结焦性能变差。而 Al、Si 元素对焦的催化效率最低,也是耐热钢中重要的抗渗碳元素^[4-6],且 Al 元素能在耐热钢表面形成比 Cr_2O_3 膜抗氧化性能更优越更稳定的致密 Al_2O_3 保护膜。Si 元素除了能提高合金的抗结焦渗碳能力外,在热浸镀过程中还能控制合金层厚度^[7-9]以及提高镀铝层抗热腐蚀能力^[10]。而适量的稀土元素能使热浸镀层组织均匀细化,提高镀层高温抗氧化性能以及镀层表面 Al_2O_3 氧化膜的塑性抗剥落性能等^[11-14],在热浸镀中得到广泛应用,但其作用机理有待进一步研究。

基于以上原因,为改善 HP40Nb 耐热钢的高温抗氧化性能和抗结焦渗碳能力,本实验在其表面热浸镀 Al-10Si-1Ce 合金,通过 SEM,EDS 和 XRD 等分析了试样表面镀层的组织结构,以及镀层经扩散处理后的组织结构变化,研究了钢经扩散处理后的高温氧化行为、组织演变过程以及高温抗氧化性的机理。

1 实验材料和方法

实验材料为 HP40Nb 耐热钢,其质量分数为 0.37~0.43 C,24~28 Cr,34~37 Ni,<1.5 Mn,1.5~2.0 Si,1.0~2.0 Nb。试样加工成 20mm×8mm×4mm 的片状,镀前处理流程:热水浸泡→脱脂(碱洗)→清洗→除锈(酸洗)→清洗→钝化处理(3%的铬酐水溶液)→烘干。试样处理完毕后,在 730℃的 Al-10Si-1Ce 合金熔体中浸镀 10min。热浸镀处理试样分别经 800℃/4h、900℃/4h 及 1000℃/4h 扩散处理后,再进行 1000℃/360h 高温氧化。用 S-3400 型扫描电镜及能谱进行镀层显微组织观察和化学成分分析,通过 D/max 2500 PC 型 XRD 对镀层进行物相分析。

2 实验结果和分析

2.1 热浸镀 Al-10Si-1Ce 铝合金镀层组织

图 1(a)为 730℃/10min 热浸镀 Al-10Si-1Ce 试样显微组织,镀层由内层和外层组成。内层厚度为 20μm 左右。内层的 EDS 结果显示 $w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni}):w(\text{Ce})=58.9:10.8:10.0:16.5:1.2:$

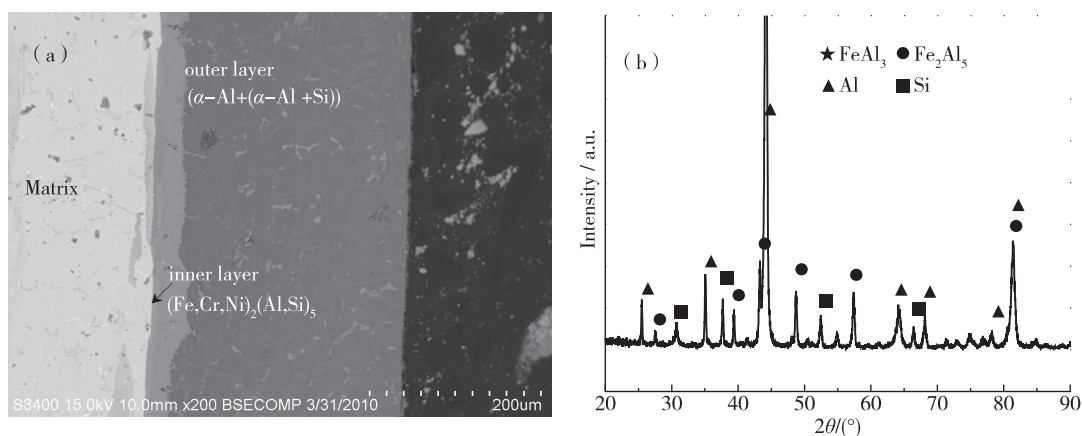


图 1 HP40Nb 钢热浸镀 Al-10Si-Ce 的镀层显微组织以及镀层 XRD 分析结果

2.6,再经图 1(b)XRD 分析可知其物相为 $(\text{Fe,Cr,Ni})_2(\text{Al,Si})_5$ 相。热浸镀初期,镀液中的 Al、Si 原子向基体中固溶,基体中的合金元素向镀液中溶解,根据 Fe-Al 相图,其界面优先形成 FeAl_3 ,随着时间推移,基体中的合金原子持续向 FeAl_3 中溶解,使 FeAl_3 向 Fe_2Al_5 转变^[15]。 $(\text{Fe,Cr,Ni})_2(\text{Al,Si})_5$ 相硬而脆,为了改善镀层的性能,必须要控制它的生长。由于内层中 Si 原子含量较多,由此推断 Si 占据了晶格中的空位堵塞了 Al 原子及基体中合金原子的扩散通道并形成 $(\text{Fe,Cr,Ni})_2(\text{Al,Si})_5$,且阻碍了该合金层的生长。Ce 原子占据 Fe_2Al_5 相的 C 轴空位,从而能抑制它沿 C 轴选择性的生长,故内外层界面较为平整。外层为镀液冷却后的组织为初生 $\alpha\text{-Al}+(\alpha\text{-Al}+\text{Si})$ 共晶组织。Ce 的加入还细化了镀层组织,从而改善了镀层的性能^[12,14]。

2.2 扩散处理后渗层组织

图 2 为不同温度扩散处理后的热浸镀 Al-10Si-1Ce 试样的显微组织。图 2(a)为 $800^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理后的渗层组织,渗层由厚约 $5\mu\text{m}$ 的内层、 $16\mu\text{m}$ 的中间层和外层组成。通过 EDS 和 XRD(图 3a)对渗层物相进行分析,内层由 $\text{NiAl}(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni}):w(\text{Ce})=29.2:4.6:12.8:27.1:25.6:0.8)+$ 颗粒状的 $\text{Cr}_3\text{Si}(w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe})=15.6:78.3:6.1)$ 相组成。内层与中间层交界处存在大量白色颗粒的 Cr_3Si 相。中间层的主要物相为 $\text{Fe}_2\text{Al}_5(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni}):w(\text{Ce})=54.0:6.3:10.7:17.7:8.7:2.6)+\text{Ni}_2\text{Al}_3(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni})=45.6:3.7:4.9:7.4:38.4)$ 相。外层物相为单一的 $\text{FeAl}_3(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni}):w(\text{Ce})=59.5:5.1:9.9:15.9:9.0:0.6)$ 相。由以上 EDS 结果发现,中间层富集了大量的 Ce 元素,Ce 元素会占据中间层 Fe_2Al_5 相 C 轴方向的空位,从而阻碍了渗层中 Al 原子由中间层向基体扩散,故 Ce 元素的存在抑制了扩散过程中镀层内层和中间层的长大。

图 2(b)为 $900^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理渗层组织,渗层由厚约 $10\mu\text{m}$ 的内层和外层组成。由 EDS 和 XRD(图 3(b))结果显示,内层物相为固溶了大量 Fe、Cr 原子的 $\text{NiAl}(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni}):w(\text{Ce})=29.2:3.3:7.2:29.2:29.1:2.0)+\text{Cr}_3\text{Si}(w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe})=15.4:78.5:6.1)$ 相组成,渗层外层由 $\text{Fe}_2\text{Al}_5(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni}):w(\text{Ce})=49.3:4.6:8.7:24.5:12.3:0.6)+\text{Ni}_2\text{Al}_3(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni})=36.4:2.3:1.0:2.9:57.3)$ 相组成。内外层交界处也有颗粒状 Cr_3Si 相生成。随扩散温度的升高导致渗层中的 Al 原子向内扩散速度加剧,故渗层的内层厚度明显大于经 $800^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理后的内层,且与图 2(a)的中间层相比外层中的 Ni_2Al_3 尺寸增大、数量增多。由内层 EDS 结果看出,内层中富集了约 2.0% 的 Ce 原子,说明 $900^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理后 Ce 原子已经扩散到渗层内层。由于 Ce 原子半径较大,会导致渗层内层产生较大的畸变区,从而增加了空位数量,形

为了其他原子的扩散通道^[16-17],使得基体中的 Al 等合金元素容易向渗层中扩散,故渗层外层产生大量的

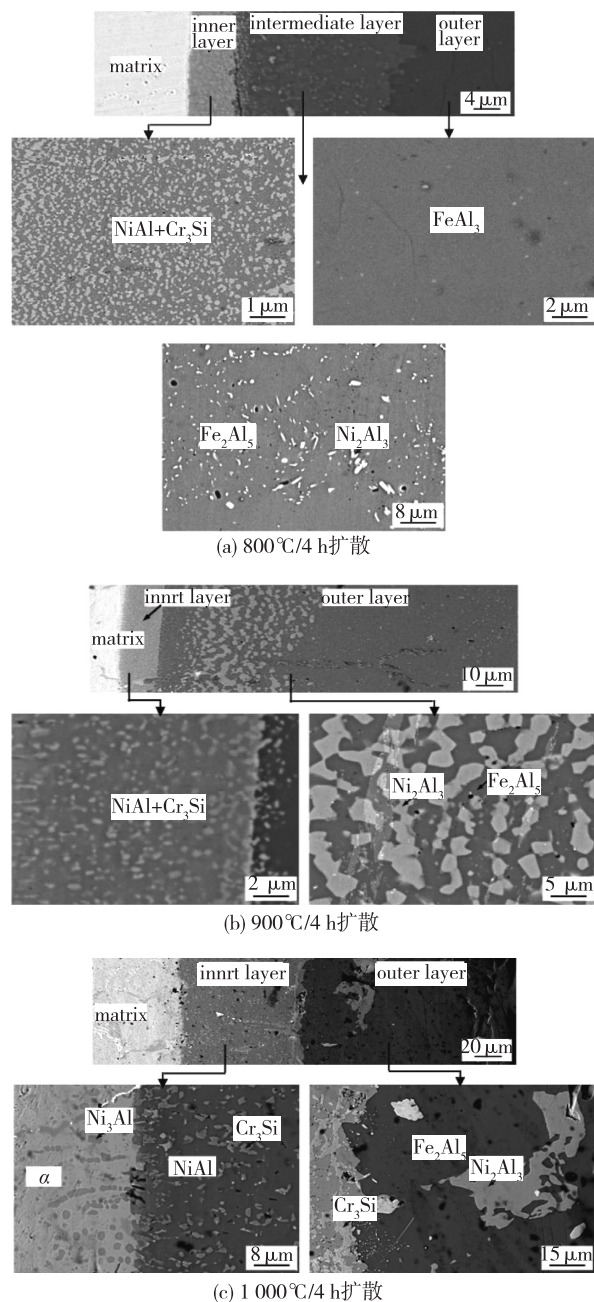


图 2 不同扩散工艺处理热浸镀 Al-10Si-1Ce 试样的渗层组织

Ni_2Al_3 。图 2(c) 为 $1\,000^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理后渗层组织。渗层内层与基体交界处生成厚约 $20\,\mu\text{m}$ 的 α 相。这是因为渗层含有大量的 Si 元素,随着 Si 向基体中扩散,促进了 α 相的生成。在 α 相中有颗粒状析出物,EDS 结果显示 $w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Mn}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni}):w(\text{Ce})=18.4:1.3:3.7:1.9:18.4:55.5:1.2$,结合 Ni-Al 相图及 XRD(图 3(c))分析可知为 $(\text{Ni},\text{Fe})_3\text{Al}$ 相。在其中发现了 Ce 原子,说明 Ce 原子已经扩散至 α 相中。由于稀土 Ce 元素的催渗作用,也会导致 α 相进一步长大,使得 Al 原子向基体中扩散加快,导致了 $(\text{Ni},\text{Fe})_3\text{Al}$ 相的生成。由 EDS 和 XRD(图 3(c))分析发现渗层外层由 Ni_2Al_3 和 Fe_2Al_5 相组成,并没有生成 FeAl 和 NiAl 相。由组织观察(图 2(c))可知,在渗层内外层交界处生成一层厚约 $2\,\mu\text{m}$ 的 Cr_3Si 相,阻碍了基体中的合金元素向渗层外层中扩散,从而阻碍了 Ni_2Al_3 和 Fe_2Al_5 相向 NiAl 和 FeAl 的转变。由图 2 还可以看出,随扩散温度升高,渗层中的第二相越粗大。

由图 3 的 XRD 结果可知,热浸镀 HP40Nb 钢经不同扩散工艺处理渗层表面已经生成不同类型的 Al_2O_3 。 $800^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理,渗层表面生成了单一相 $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$, $900^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理,渗层表面生成了 $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 两种相, $1\,000^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理,渗层表面生成单一相 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

2.3 扩散渗 Al-10Si-1Ce HP40Nb 钢的 $1\,000^\circ\text{C}$ 高温氧化性能及渗层组织

图 4 为热浸镀 Al-10Si-1Ce 的 HP40Nb 钢经不同温度扩散处理后在 $1\,000^\circ\text{C}$ 氧化时的氧化动力学曲线。表 1 为 $1\,000^\circ\text{C}$ 不同扩散处理渗层平均氧化增重速率。由图 4 和表 1 可知,随着扩散温度的升高,高温抗氧化性能越好,平均氧化速率越低。这是由于不同扩散工艺处理渗层表面生成不同类型的 Al_2O_3 相所致。 $800^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理后渗层生成了不致密 $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$,高温下 $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的生长主要依赖于 Al 原子的向外扩散,主要是因为 $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 疏松且存在面缺陷^[18-19],为 Al 原子向外扩散提供了短路通道,使得渗层内 Al 原子快速向表面扩散导致氧化初期氧化增重较快,达到 $0.121\,9\,\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$,但当渗层氧化 48h 后, $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 完全转变为连续致密稳定的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 后将会阻碍 Al 原子向外扩散和 O 原子向内扩散,使平均氧化速率急剧下降,仅为原来的 2.9%。而 $900^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理后渗层表面生成部分致密的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$,故其抗氧化性能优于 $800^\circ\text{C}/4\text{h}$ 。而 $1\,000^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理后渗层表面生成单一的致密 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$,故其抗氧化性能最好,平均氧化速率最小。

图 5 为不同扩散工艺处理 HP40Nb 经 $1\,000^\circ\text{C}/360\text{h}$ 氧化后的渗层组织。由 EDS 和 XRD(图 6)对渗层物相进行分析,从基体到渗层物相依次是 $\alpha(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Mn}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni})=2.2:3.3:30.1:1.2:48.9:14.3)+\text{Ni}_3\text{Al}(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Mn}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni}):w(\text{Ce})=18.3:0.9:4.9:1.6:15.1:56.6:2.6),\sigma(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Mn}):$

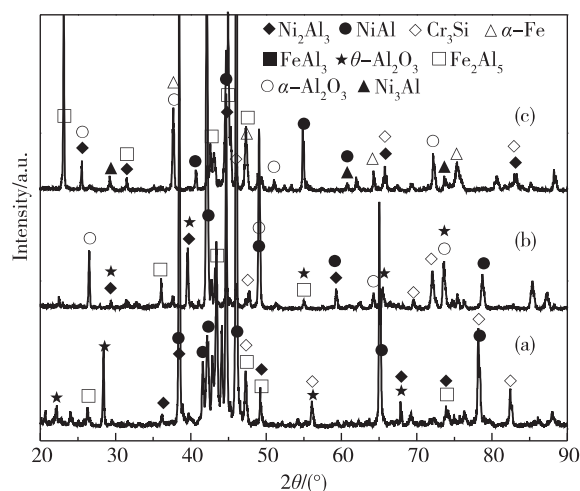


图 3 不同温度扩散处理后的试样 XRD 结果

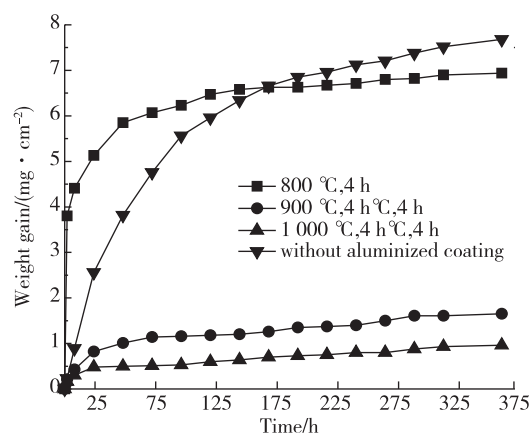


图 4 不同扩散工艺热浸镀 Al-10Si-1Ce 试样与未浸镀试样 $1\,000^\circ\text{C}$ 氧化动力学曲线

表 1 不同扩散处理热浸镀 Al-10Si-1CeHP40Nb 钢的 $1\,000^\circ\text{C}/360\text{h}$ 抗高温氧化性能比较

扩散处理条件	各时间段内平均氧化速率 $\text{mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$		
	0~48 h	48~360 h	0~360 h
$800^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散	0.121 9	0.003 5	0.019 3
$900^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散	0.021 0	0.002 1	0.004 6
$1\,000^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散	0.010 4	0.001 5	0.002 7
未浸镀试样	0.079 6	0.012 4	0.021 3

$w(\text{Fe}):w(\text{Ni})=0.7:9.8:42.3:1.1:42.0:4.1$, $\text{NiAl}(w(\text{Al}):w(\text{Si}):w(\text{Cr}):w(\text{Fe}):w(\text{Ni})=31.3:6.2:30.9:31.6)+\text{Cr}_3\text{Si}(w(\text{Al}):w(\text{Cr}):w(\text{Si}):w(\text{Fe})=0.7:15.3:78.1:5.9)$ 相。

图 5(c) 中 α 相的厚度明显大于图 5(a) 和图 5(b)。这是因为经 $1\,000^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散后, 基体中已经形成一定厚度的 α 相, 随着氧化时间的延长, α 相不断增厚。由 EDS 结果发现, 渗层中的 NiAl 中没有检测出 Si 元素的存在。这是由于除了形成 Cr_3Si 相外, Si 元素在 Ce 的催渗作用下不断向基体中扩散, 使渗层中生成大量的 σ 相。

通过 XRD 对经扩散处理后的热浸镀 Al-10Si-1Ce 试样的高温氧化物相分析(图 6)发现, 渗层表面生成单一的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 具有刚玉结构, 晶格常数 $a=0.79\text{nm}$, 熔点为 $2\,050^\circ\text{C}$, 化学性质稳定, 致密性好, 具有良好的高温抗氧化和抗热腐蚀能力^[20-21], 能阻止氧原子对渗层的进一步氧化, 对渗层有良好的保护作用。另外, 渗层中出现的 NiAl 、 Ni_3Al 、 Cr_3Si 等金属间化合物, 它们的结构也非常致密, 具有良好的抗高温腐蚀能力。它们不但能阻碍氧化, 还能阻止 Fe 、 Ni 原子与其他腐蚀介质的原子接触, 阻碍化学反应的产生, 从而起到了保护作用。

3 结 论

1) 热浸镀 Al-10Si-1Ce 的 HP40Nb 钢的镀层由内层和外层组成: 外层为初生 $\alpha\text{-Al}+(\alpha+\text{Si})$ 共晶组织; 内层 $(\text{Fe}+\text{Cr}+\text{Ni})_2(\text{Al}+\text{Si})_5$ 相。

2) 热浸镀 Al-10Si-1Ce 的 HP40Nb 钢经 $800^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理渗层由内层 $(\text{NiAl}+\text{Cr}_3\text{Si})$ 、中间层 $(\text{Fe}_2\text{Al}_5+\text{Ni}_2\text{Al}_3)$ 和外层 FeAl_3 组成; $900^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理渗层由内层 $(\text{NiAl}+\text{Cr}_3\text{Si})$ 和外层 $(\text{Fe}_2\text{Al}_5+\text{Ni}_2\text{Al}_3)$ 组成; $1\,000^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理, 渗层由内层 $(\alpha+\text{Ni}_3\text{Al})$ 、 $\text{NiAl}+\text{Cr}_3\text{Si}$ 和外层 $(\text{Ni}_2\text{Al}_3+\text{Fe}_2\text{Al}_5)$ 组成。

3) 热浸镀 Al-10Si-1Ce 的 HP40Nb 钢经不同温度的扩散处理后, 渗层表面生成不同类型的 Al_2O_3 保护膜。 $800^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理, 渗层表面生成了 $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$; $900^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理, 渗层表面生成了 $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; $1\,000^\circ\text{C}/4\text{h}$ 扩散处理, 渗层表面生成单一相 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

4) 经 $1\,000^\circ\text{C}/360\text{h}$ 氧化后, 不同扩散处理的渗层从外到内由 $\text{NiAl}+\text{Cr}_3\text{Si}$ 、 σ 、 $\alpha+\text{Ni}_3\text{Al}$ 相组成, 且表面都生成了单一的连续致密 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相, 使 HP40Nb 钢具有良好的高温抗氧化和抗热腐蚀能力。随着扩散温度的升高, 高温抗氧化性能越好, 平均氧化速率越低。

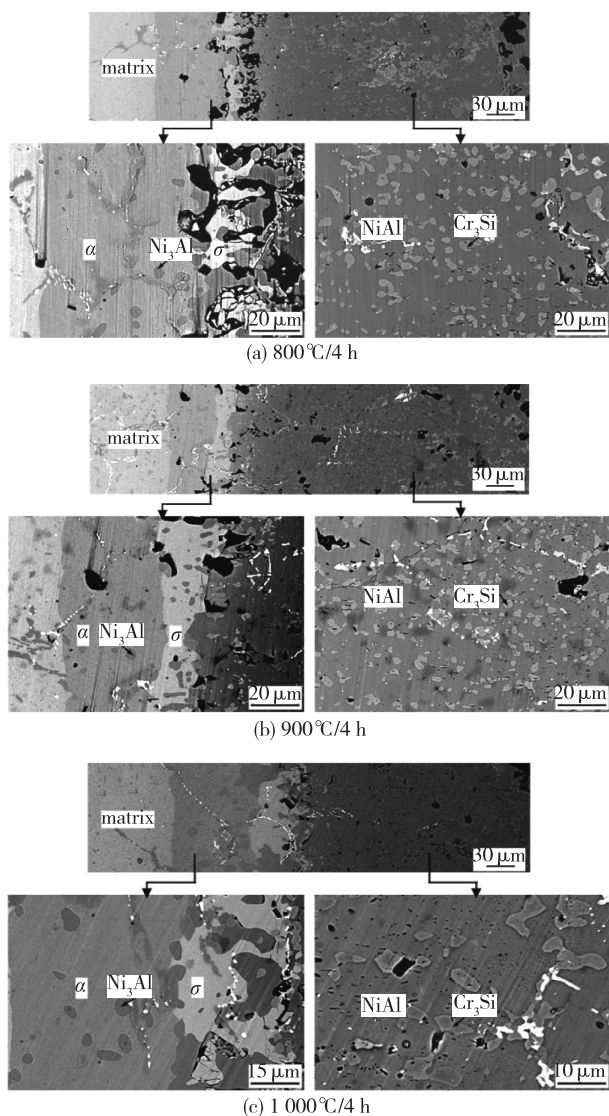


图 5 不同扩散工艺处理热浸镀 Al-10Si-1Ce 试样经 $1\,000^\circ\text{C}$, 360h 氧化后渗层组织

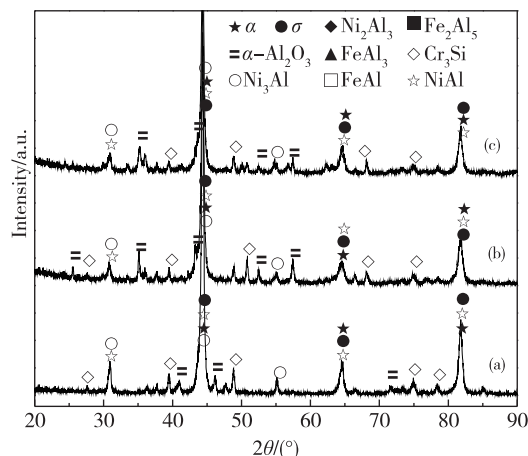


图 6 不同扩散工艺处理热浸镀 Al-10Si-1Ce 试样 $1\,000^\circ\text{C}$, 360h 氧化后 XRD 结果

参考文献:

- [1]喇培清,曾丽,刘致远,等. Al 对 HP40 合金显微组织的影响[J]. 铸造,2008,57(5):487-490.
- [2]李处森,杨院生,吴欣强. HP 耐热钢结焦、渗碳的原因分析[J]. 中国腐蚀与防护学报,2002,22(5):286-289.
- [3]黄志荣. 乙烯裂解结焦机理及结焦抑制技术进展[J]. 江苏石油化工学院学报,2000,12(2):36-39.
- [4]BRIL U, KLWER J. Corrosion behavior of high silicon alloys in carbon-bearing and high sulfur atmosphere[J]. Materials at High Temperatures,1993,11:151-158.
- [5]KLWER J. High temperature corrosion behavior of iron aluminides and iron-aluminium-chromium alloys[J]. Materials and Corrosion, 1996,47:685-694.
- [6]KANE R H. Effects of silicon and oxidation potential on the earburization of centrifugally cast HK-40[J]. Corrosion,1981,37(4): 187-199.
- [7]刘连涛,孙勇. 镀液合金元素对钢镀铝界面组织的影响[J]. 金属热处理,2009,34(2):25-29.
- [8]韩石磊,李华玲,王树茂,等. 不锈钢热浸镀铝中温度及合金元素对膜厚的影响[J]. 表面技术,2009,38(4):20-22.
- [9]HWANG S H, SONG J H, KIM Y S. Effects of carbon content of carbon steel on its dissolution into a molten aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering A,2005,390:437-443.
- [10]WANG K L, CHEN F S, LEU G S. The aluminizing and Al-Si codeposition on AISI HP alloy and the evaluation of their carburizing resistance[J]. Materials Science and Engineering A,2003,357:27-38.
- [11]张伟,张战营,徐国辉,等. 稀土对渗铝层/基体界面空洞生长和抗高温剥落性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2005,15(10):1584-1587.
- [12]黄亲国,钟华仁. 稀土对热浸镀层组织和性能的影响[J]. 南昌航空工业学院学报,1999,13(2):31-34.
- [13]张伟,刘龙,催新安,等. 稀土对镀铝钢扩散层生长影响的研究[J]. 特种铸造及有色合金,2007,27(6):472-474.
- [14]于升学,夏原,姚枚. 稀土铈对热浸镀铝层组织和性能的影响[J]. 机械工程材料,2006,30(6):77-79.
- [15]KOBAYASHI Shigeaki, YAKOU Takao. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment[J]. Materials Science and Engineering A,2002,338:44-53.
- [16]余瑞璜. 固体与分子经验电子理论-等效价电子假定[J]. 科学通报,1981,26(4):204-209.
- [17]刘正,吕振家. 稀土表面处理的空位机制[J]. 科学通报,1991,36(12):951-954.
- [18]SCHUMANN E, YANG J C, RÜHLE M, et al. High-resolution SIMS and analytical TEM evaluation of alumina scales on β -NiAl containing Zr or Y[J]. Oxidation of Metals,1996,46(1-2):37-49.
- [19]PRESCOTT R, MITCHELL D F, GRAHAM M J, et al. Oxidation mechanisms of β -NiAl+Zr determined by SIMS[J]. Corrosion Science,1995,37(9):1341-1364.
- [20]杨元政,刘正义,庄育智. 等离子喷涂 Al_2O_3 陶瓷涂层的结构与组织特征[J]. 兵器材料科学与工程,2000(3):7-11.
- [21]卢国辉. 爆炸喷涂 Al_2O_3 陶瓷梯度涂层的组织与性能[J]. 材料工程,2000(4):30-33.

(责任编辑:李艳)