

Al、Ni 对 1Cr9Al(1-3)Ni(1-7)WVNbB 合金 相变与性能的影响

赵媛媛¹, 国栋^{1,2}, 秦森¹, 冯捷¹, 代永娟¹

(1. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018)

(2. 天津职业技术师范大学 机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 为了研究 Al 对铁素体耐热钢相变与性能的影响规律, 通过在已有合金 T92 的成分基础上进行 Al 元素的添加及改性添加剂 Ni 的调整制备出了新型高铝铁素体耐热钢, 研究了不同 Al 元素含量的加入及热处理工艺下铁素体耐热钢相变温度与淬火组织晶粒尺寸、硬度及抗氧化性的关系。结果表明, 实验钢的平衡相变点随着 Al 元素含量的增加而升高, 且实验钢的奥氏体晶粒尺寸越大, 起始温度 (A_{c1}) 和终止温度 (A_{c3}) 越高; 钢中添加的 Al、Ni 元素总量在 2.4% (质量分数) 时, 淬火后的奥氏体晶粒尺寸最小, 且硬度最大; 在 650 °C 环境下, 钢中添加 3%Al 比添加 1%Al 的抗高温氧化性能强; 在 750 °C 环境下, 钢中所含改性添加剂 Ni 起到了一定的作用, Al-Ni 比越大, 钢便表现出了较强的抗氧化性。

关键词: 铁素体耐热钢; Al 含量; 平衡相变温度; 晶粒尺寸; 硬度

中图分类号: TG142.13; TG142.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)08-2823-08

T92 钢是 20 世纪 80 年代由日本开发出的一种新型 9% Cr 铁素体耐热钢, 其优异的抗蠕变性能及良好的高温持久强度使其广泛应用于再热器的制造和超超临界锅炉过热器^[1-4]。现如今, 国内外对 T92 钢的微观组织、高温抗蠕变性能、耐腐蚀性能及焊接工艺等有了深入的研究^[5-8], 但随着超超临界发电技术的发展, T92 钢的性能还有待提高。然而当下通过改进 T92 钢成分及含量而增强性能的研究并不是很多, 不同的元素对钢的影响也不相同。例如 Al、Ni 元素, 研究发现^[9-13], Al 会与钢中的非金属元素发生反应形成化合物, 也能与 Mn、Cr 等元素形成比较复杂的化合物, 并且还会提高钢的抗氧化性能; Ni 元素的提高会扩大钢中奥氏体相区, 加强其固溶强化的效果, 从而提高钢的塑性及韧性^[14-18]。另外, Ni 的原子直径比 Fe 的原子直径小, 就会缩小 Fe-Ni 置换固溶体的间隙, 从而使溶碳量有所降低, 增强其高温持久强度^[19,20]。因此, 为了进一步提高钢的综合性能, 在铁素体耐热钢的成分基础上添加 Al 元素, 并对 Ni 元素含量进行适当的调整是一种值得探索的手段。

本研究主要通过 T92 钢成分基础上添加 Al 元素, 并对 Ni 元素进行适当的调整, 制备 1Cr9AlNi4WVNbB、1Cr9AlNiWVNbB、1Cr9Al3Ni7WVNbB、1Cr9Al3Ni-

4WVNbB 4 种高铝铁素体耐热钢。从保温时间及淬火方式 2 个方面入手, 研究 Al 对 1Cr9Al(1-3)Ni(1-7)-WVNbB 合金钢相变点及淬火组织的影响, 进而研究其相变温度与晶粒度、硬度之间的关系以及钢的高温抗氧化性能, 从而获得性能更加优异的铁素体耐热钢, 满足当下我国火力发电的要求。

1 实验

实验钢采用 ZG-25F 真空感应熔炼炉冶炼, 浇注出 4 个 $\Phi 120$ mm 的圆柱体铸锭, 其化学成分如表 1 所示。将圆柱体铸锭锻造成横截面尺寸为 30 mm \times 70 mm 的长方体钢锭, 并对其进行固溶处理, 固溶处理工艺为: 1050 °C/3 h+1000 °C/0.5 h, 最后迅速水冷至室温, 其组织如图 1 所示。

利用线切割从固溶处理后的钢锭上切取 $\Phi 10$ mm \times 50 mm 的线膨胀试样及 10 mm \times 10 mm \times 20 mm 的热处理试样, 利用 ZRPY-1400 材料相变分析仪对 4 组钢进行相变行为分析; 利用 1400 °C(36 L)KSL-1400X-A4 型箱式热处理炉对 4 组钢进行热处理, 热处理工艺参数为: 以 10 °C/min 的升温速率将试样加热至 1050 °C, 保温 1 h, 后迅速水冷至室温; 另取保温 2 h 试样炉冷至 980 °C 保温 0.5 h, 然后利用水淬、油淬、空冷 3 种

收稿日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51774108, 51874116, 52074193)

作者简介: 赵媛媛, 女, 1993 年生, 硕士, 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018, E-mail: ZMM9979@163.com

表 1 实验钢化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental steel ($\omega/\%$)

Samples	C	N	Si	Mn	Cr	Mo
A#	0.13	0.048	0.33	0.87	9.21	0.28
B#	0.13	0.049	0.34	0.51	9.08	0.26
C#	0.09	0.045	0.24	0.52	9.13	0.19
D#	0.10	0.044	0.25	0.53	9.13	0.20
	Ni	Al	Nb	V	W	B
A#	3.64	0.89	0.080	0.21	1.41	0.002
B#	1.39	1.00	0.081	0.21	1.45	0.001
C#	7.09	2.93	0.074	0.19	1.30	0.002
D#	3.67	2.86	0.074	0.20	1.29	0.002

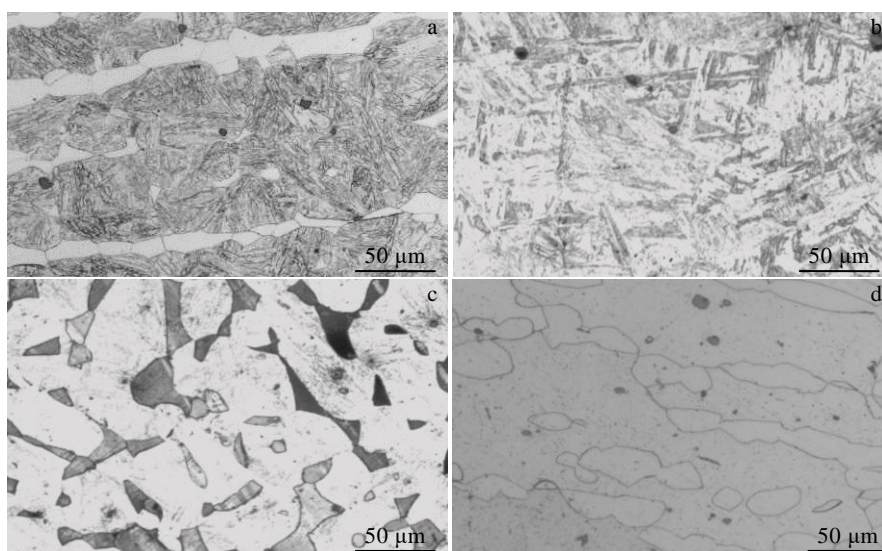


图 1 不同 Al 含量铁素体耐热钢的固溶态组织

Fig.1 Solid solution microstructures of ferritic heat resistant steels with different Al contents: (a) A#, (b) B#, (c) C#, and (d) D#

方式进行冷却。对固溶处理后的钢锭进行热轧处理，热轧工艺参数为：在加热炉内加热到 1200 °C 后进行轧制，初轧温度 950 °C，终轧温度 850 °C，厚度 4 mm，并利用线切割从热轧钢板上切取 10 mm×10 mm 的高温氧化试样；对高温氧化试样进行打磨、抛光与称重，然后利用箱式电阻炉对其进行高温氧化实验，氧化温度分别为 650 和 750 °C，氧化时间为 168 h，期间每隔 12 h 取出试样，空冷冷却至室温后将其放在精密天平上进行称重，并记录数据，待高温氧化实验结束后，根据所称重的数据，绘制出铁素体耐热钢高温氧化的氧化增重曲线；收集实验钢在高温氧化实验后脱落的氧化皮粉末，并利用日本 Rigaku D/MAX-2500 X 射线衍射仪对其相组成进行分析。

对淬火试样进行打磨、抛光及腐蚀，腐蚀剂为干燥苦味酸+浓盐酸+乙醇，用 AxioVEert.A1 型蔡司金相显微镜进行显微组织观察；然后利用 Image pro 图像分析软件对金相图进行分析，通过截点法测量出淬火试样的平均晶粒尺寸大小；利用 VEGA3 LM 钨丝扫描电镜对淬火后的试样进行 SEM 观察。

2 结果与分析

2.1 实验钢的平衡相变温度测定

实验钢中含有的合金元素较多，且 Cr、Nb 等元素属于强碳化物生成元素，因此，为了使合金元素在实验钢中奥氏体晶粒没有发生粗化时充分固溶，而将热膨胀实验的奥氏体化温度设置为 1050 °C，加热速度为

15 °C/min, 保温时间为 10 min, 然后炉冷至室温。

通过对 4 组钢的相变行为分析, 得出 4 组钢的奥氏体化起始温度 (A_{c1}) 和终止温度 (A_{c3}), 如表 2 所示。由表 2 可以看出, 实验钢的各成分中 Al 含量对其奥氏体化过程 A_{c1} 和 A_{c3} 产生了较大影响, 呈现随 Al 的增加而升高的趋势。

2.2 保温 1 h 的显微组织观察

图 2 为 4 组实验钢在 1050 °C 下保温 1 h 水冷后得到的显微组织。其中, A#钢的组织为下贝氏体 (B) + 铁素体 (F); 降低钢中 Ni 含量, B#钢的组织变为板条状马氏体, 且随着保温时间的延长, 得到的马氏体组织增多; C#钢的组织为马氏体 (M) + 铁素体 (F) + 渗碳体 (Cm); D#钢组织主要呈岛状分布, 该组织为马氏体 (M) 和残余奥氏体 (Ar) 的结合体, 简称“马奥岛”, 白色块状组织为铁素体组织 (F), 黑色颗粒状组织为碳化物 (C)。从图中还可以看出, 当 Ni 含量在 3.9% (质量分数) 左右时, 添加 3%Al 的钢中晶粒尺寸要比添加 1%Al 的粗大。

2.3 Al 对实验钢力学性能及组织的影响规律

图 3 为 4 组实验钢在 980 °C 保温 0.5 h 下不同淬火方式的晶粒尺寸变化及洛氏硬度变化, 从图中可以看出, 实验钢在 3 种淬火方式下的晶粒尺寸大小浮动在 2.564~14.882 μm 范围内, 在原始状态及 3 种淬火方式下的硬度大小浮动在 1.9~11.8 HRC 范围内, 综合来说, 水淬后得到的试样硬度最大, 油淬后得到的试样硬度相对较小, 因为油淬后的试样当中存在一定数量

的软质相—残余奥氏体, 软质相的存在会大大降低试样的硬度^[21]。

由图 3 中的晶粒尺寸变化可以看出, 在 3 种淬火方式下, 晶粒尺寸由大到小依次为 D#钢、A#钢、C#钢、B#钢。D#钢的奥氏体晶粒尺寸最大。Ni 元素属于奥氏体形成元素, 能够扩大奥氏体相区, 而 B#钢中所含 Ni 最少, 因而 B#钢的奥氏体晶粒尺寸最小。另外, 实验钢的奥氏体晶粒尺寸越大, 钢中铁素体完全转换成奥氏体的温度越高, 钢的平衡相变温度越高, 由此可得, 铁素体耐热钢的平衡相变温度与奥氏体晶粒大小成正比例关系。

由图 3 中的硬度变化可以看出, 在原始状态及相同淬火方式下, B#钢、C#钢的硬度要比 A#钢、D#钢的硬度大, 这也很好地对应了晶粒细化有助于硬度提高。首先, B#钢中 Ni 元素含量最少, 使得 C 原子得不到有效的扩散, 导致发生无扩散性相变, 生成板条状马氏体, 而马氏体的硬度相比较于铁素体来说大得多, 所以, B#钢的硬度很大。其次, C#钢中加入的 Al、Ni 元素最多, 铁素体含量较大, 且析出了较多的合金渗碳体, 获

表 2 实验钢奥氏体化起始温度 (A_{c1}) 和终止温度 (A_{c3})
Table 2 Temperatures for the onset (A_{c1}) and end (A_{c3}) of the austenization process of experimental steel (°C)

Steel	A#	B#	C#	D#
A_{c1}	723	738	727	856
A_{c3}	760	753	750	905

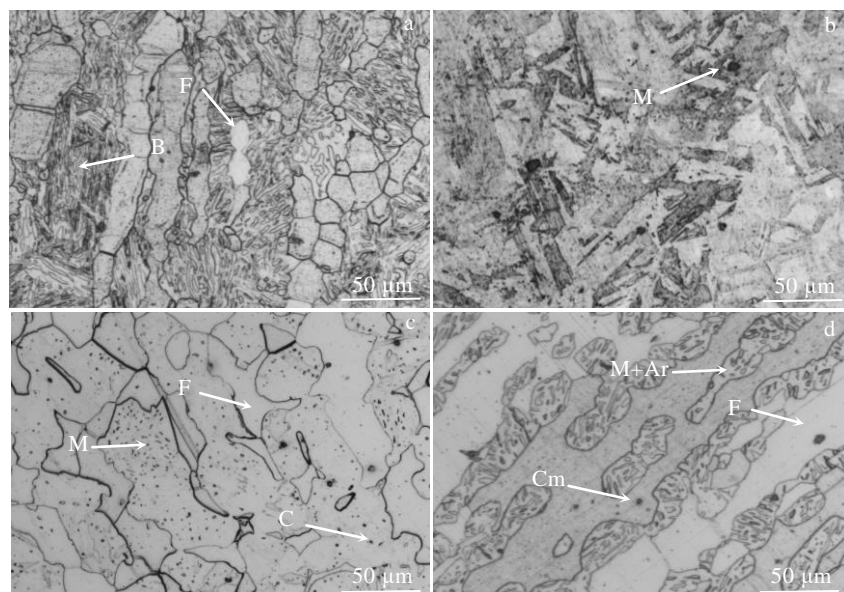


图 2 不同 Al 含量铁素体耐热钢在 1050 °C 下保温 1 h 的显微组织照片

Fig.2 Microstructures of ferritic heat resistant steels with different Al contents at 1050 °C for 1 h: (a) A#, (b) B#, (c) C#, and (d) D#

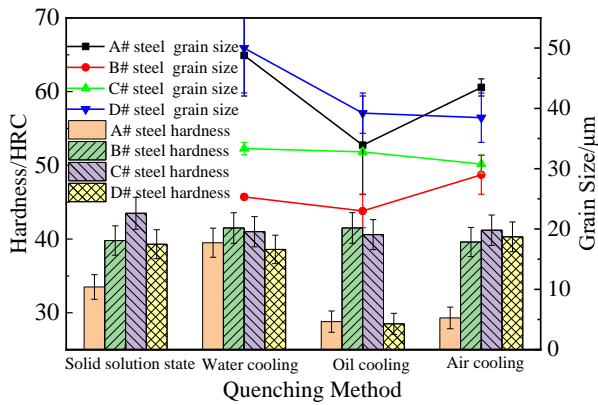


图 3 不同淬火方式下试样的晶粒尺寸和硬度

Fig.3 Grain size and hardness of samples under different quenching methods

得了明显的第二相强化作用，因此，C#钢的硬度也较大。另外，A#钢的硬度最小，因为A#钢中析出的第二相微乎其微，并且在贝氏体中还掺杂着少量的铁素体组织，导致亚晶界强化效果受到了严重的破坏。结合实验钢的平衡相变温度来说，铁素体耐热钢的硬度与其平衡相变温度成反比例关系。

图 4、图 5 分别为实验钢在水淬工艺下的金相显微组织与 SEM 微观组织形貌，相比较于其他二者淬火方式而言，水淬后得到的组织具有较好的均匀化程度，且

晶粒较为清晰，马氏体组织尺寸较小。这是由于水淬比油淬、空冷的冷却速度要快得多，而冷却速度越快，得到的马氏体组织尺寸越小。在 3 种不同的淬火方式下都可以明显地看到，A#钢的组织为贝氏体 (B) + 铁素体 (F) + 残余奥氏体 (Ar)；B#钢的组织为马氏体 (M)，在水淬下的组织为板条状马氏体；D#钢的水淬组织为马氏体 (M) + 残余奥氏体 (Ar) 呈岛状分布在铁素体 (F) 基体中。

2.4 Al 对实验钢高温抗氧化性能的影响规律

图 6 为实验钢在 650 及 750 °C 环境下的氧化增重曲线。从图中可以看出，保温时间越长，4 组实验钢的质量均变大，在氧化过程的前 12 h 内，钢的增重现象非常明显，也具有最快的增重速率；此时，4 组钢在 650 °C 氧化 0~12 h 增重曲线的斜率分别为 70.167、71.5、68.5、68.167，在 750 °C 氧化 0~12 h 增重曲线的斜率分别为 70.083、67.917、69.583、67.083，且均表现出抛物线的规律，由此可知，4 组钢在 650 及 750 °C 环境下的氧化符合 Wagner 的高温氧化抛物线规律。在 12 h 后，钢的增重较为缓慢。这说明钢中 Al、Cr、Ni 在氧化过程的前 12 h 与 O₂ 发生反应，在钢表面生成一层致密的氧化薄膜，阻断了钢与 O₂ 的大面积接触，极大程度地降低了钢被氧化的速率。

从图 6a 可以看出，在 650 °C 氧化 168 h 后，4 组实验钢的增重依次为：851、856、842、822 mg。由此可

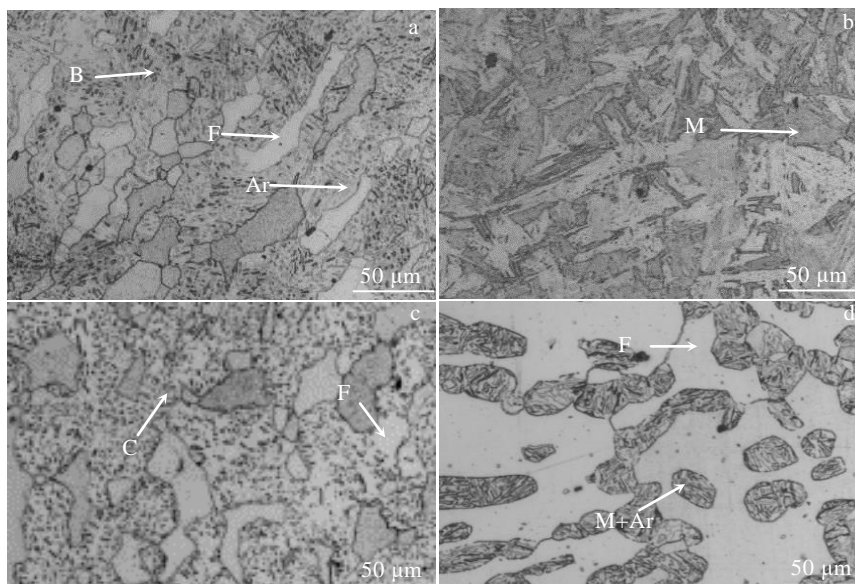


图 4 不同 Al 含量铁素体耐热钢在水淬工艺下的显微组织对比

Fig.4 Microstructure of ferritic heat resistant steels with different Al contents under water quenching process: (a) A#, (b) B#, (c) C#, and (d) D#

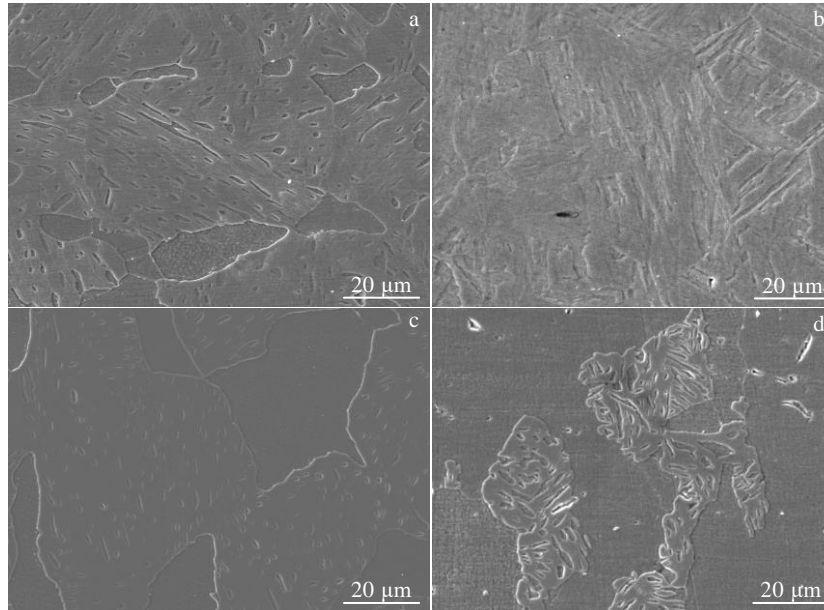


图 5 不同 Al 含量铁素体耐热钢在水淬工艺下的 SEM 照片

Fig.5 SEM microstructures of ferritic heat resistant steels with different Al contents under water quenching process: (a) A#, (b) B#, (c) C#, and (d) D#

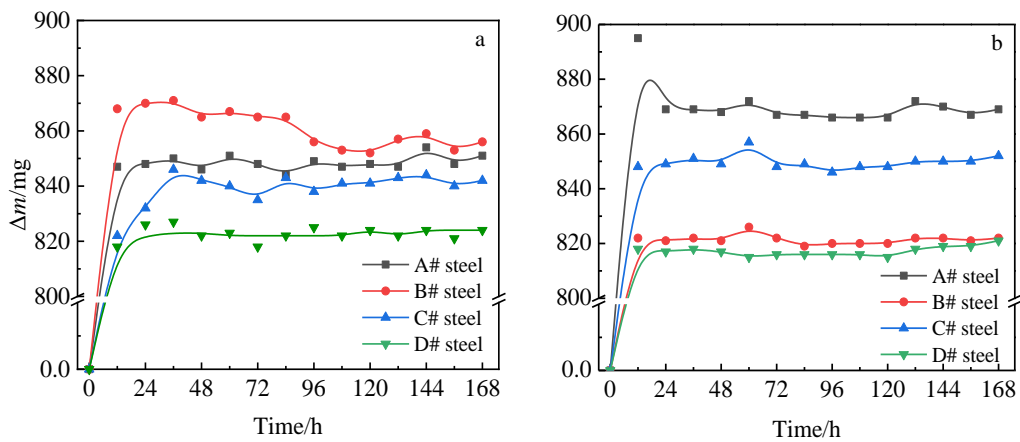


图 6 不同 Al 含量铁素体耐热钢的氧化增重 (Δm) 曲线

Fig.6 Oxidation mass gain (Δm) curves of ferritic heat resistant steels with different Al contents at 650 °C (a) and 750 °C (b)

得, 在 650 °C 环境下, D# 钢的抗氧化性能最强, B# 钢的抗氧化性能最弱, 4 组实验钢的抗氧化性能由强到弱排列为 D# 钢 > C# 钢 > A# 钢 > B# 钢。从图 6b 可以看出, 在 750 °C 氧化 168 h 后, 4 组实验钢的增重依次为: 869、822、852、821 mg。由此可得, 在 750 °C 环境下, D# 钢的抗氧化性能最强, A# 钢的抗氧化性能最弱, 4 种试样的抗氧化性能由强到弱为 D# 钢 > B# 钢 > C# 钢 > A# 钢。

综合 650 和 750 °C 实验钢的氧化增重曲线来看, 在

650 和 750 °C 环境下, D# 钢的抗氧化性最强。

图 7 为 650 °C 下实验钢氧化皮的 XRD 图谱, 从图中可以看出, A# 钢和 B# 钢的氧化皮相组成中含量较多的有 Fe₂O₃、Fe₃O₄、Cr₂O₃, C# 钢和 D# 钢的氧化皮相组成中含量较多的有 Fe₂O₃、Fe₃O₄、Al₂O₃, 由此可知, 当钢中加入 3% Al 时, 氧化层中有 Al₂O₃ 生成。其次, C# 钢与 D# 钢的氧化皮 XRD 图谱显示出了非晶态组织特征, 其中, D# 钢更为明显。另外, 结合图中各相峰

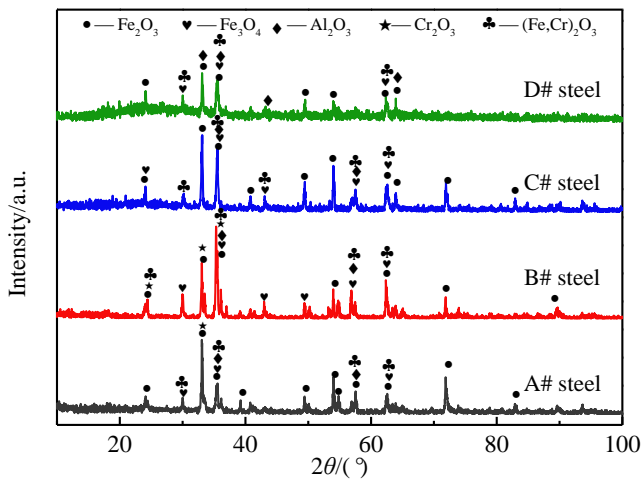


图 7 实验钢氧化皮的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of experimental steel scale

值面积大小得出, D#钢氧化皮中各相的面积最小, 说明在 168 h 的高温氧化中, D#钢所生成的氧化物最少, 即 D#钢具有最强的抗氧化性能。由此可得, 钢中 Al、Ni 含量的增高使钢的抗氧化性得到了明显的提高, 因此, 向钢中加入 3%Al 时可以有效提高钢的抗氧化性。

图 8 为实验钢在 650 °C 环境中氧化 168 h 后的表面形貌 SEM 照片。由图 8a、8b 可以看出, A#钢表面已经出现了部分氧化现象, 且部分氧化膜发生了破裂, 钢基体中的 Fe 出现了被氧化的现象, 在钢表面产生大量铁氧化物毛刺。由图 8c、8d 可以看出, B#钢表面的氧

化层与钢基体的结合情况较差, 没有形成致密保护膜, 属非保护性氧化膜, 且已经发生破裂, 另外钢基体也出现了较为严重的被氧化现象。由图 8e、8f 可以看出, C#钢氧化薄膜发生的破裂程度较低, 内部被氧化程度也较低, 其氧化薄膜发生破裂后, Fe 与 O₂ 接触生成了 Fe 的氧化物毛刺, 由新的颗粒状晶粒生成, 说明 C#钢基体也出现了部分被氧化现象。由图 8g、8h 可以看出, D#钢表面被氧化的面积较小且程度较低, 氧化层也与基体较为紧密地结合在一起, 但氧化薄膜也有一部分发生了破裂, Fe 被氧化, 表面生出少量毛刺。

图 9 为实验钢在 750 °C 环境中氧化 168 h 后表面形貌的 SEM 照片。由图 9a、9b 可以看出, A#钢表面形成的氧化薄膜发生破裂的情况较为严重, 部分氧化薄膜发生了脱落, 且表面生出了较长的铁的氧化物毛刺, 说明 A#钢内部被氧化的情况较为严重。由图 9c、9d 可以看出, B#钢表面的氧化薄膜大部分都断断续续存在, 而且发生破裂的氧化薄膜面积也较大, 表现出即将脱落的状态, 并伴随有较短且密的毛刺生成。由图 9e、9f 可以看出, C#钢表面形成的氧化薄膜几乎看不出发生脱落的地方, 且氧化膜与钢基体较为紧密地结合在一起, 但放大至 3000 倍后观察得知, C#钢的内部已经出现了严重的氧化, 而且生出了较长铁的氧化物毛刺, 并伴随有颗粒状晶体出现。由图 9g、9h 可以看出, D#钢表面的氧化膜表现出了不被破坏的致密性, 几乎无氧化膜脱落的地方, 从放大之后的图中也可看出, D#钢表面被氧化的面积很小, 说明 D#钢几乎没有被氧化。

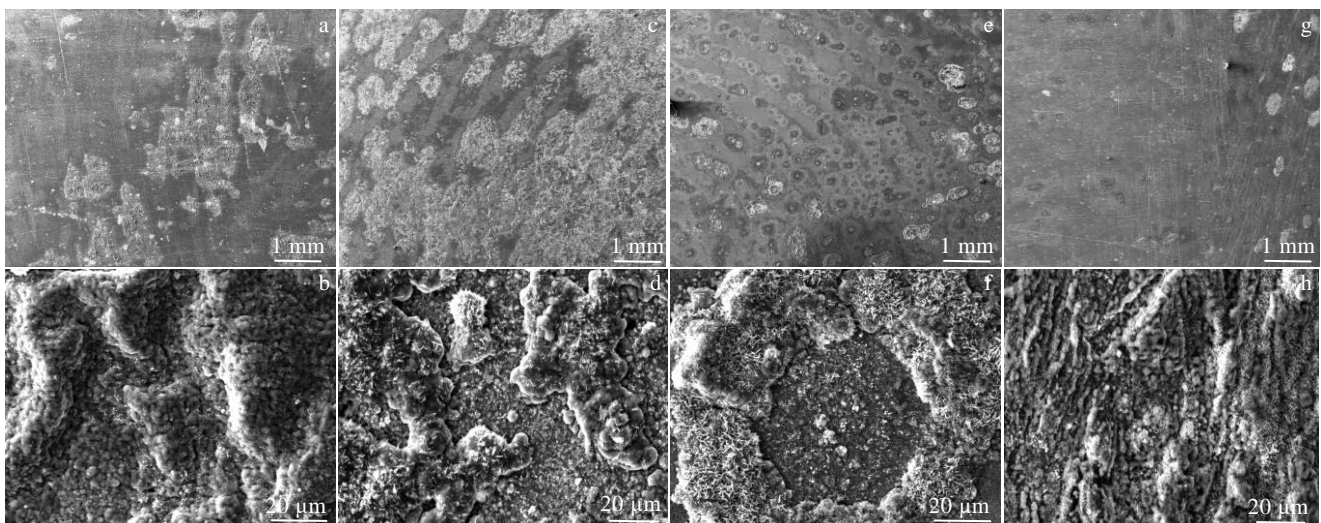


图 8 实验钢在 650 °C 下高温氧化 168 h 的氧化层 SEM 形貌

Fig.8 SEM morphologies of high temperature oxide layer of experimental steel at 650 °C for 168 h: (a, b) A#, (c, d) B#, (e, f) C#, and (g, h) D#

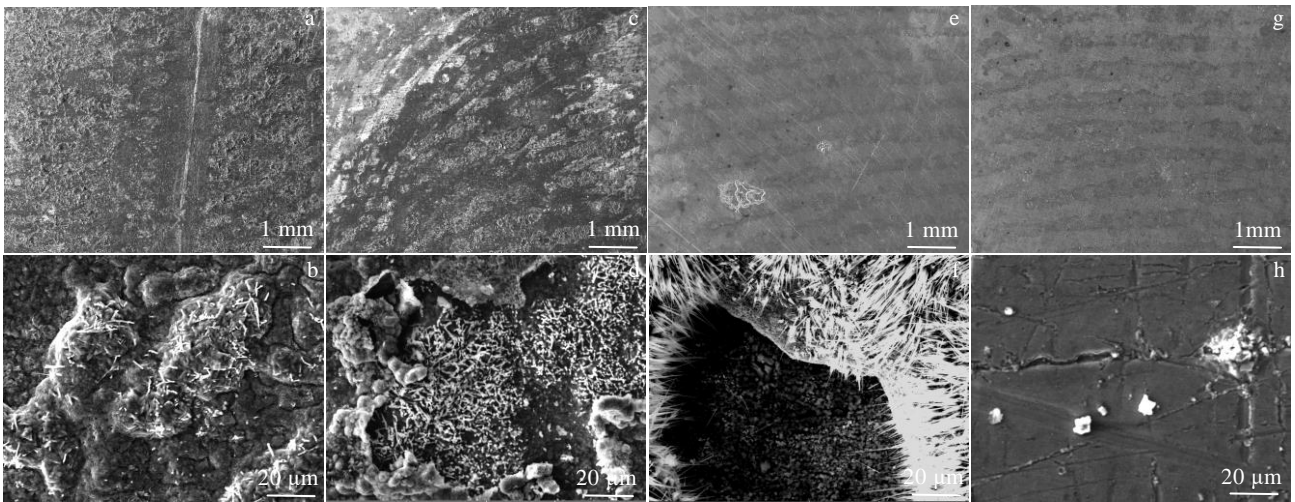


图 9 实验钢在 750 °C 下高温氧化 168 h 的氧化层 SEM 形貌

Fig.9 SEM morphologies of high temperature oxide layer of experimental steel at 750 °C for 168 h: (a, b) A#; (c, d) B#; (e, f) C#; and (g, h) D#

3 结 论

1) 实验钢在一定热处理工艺条件下, 晶粒尺寸大小依次为 D#钢、A#钢、C#钢、B#钢, 说明钢中 Al 和 Ni 的添加在一定程度上细化了晶粒尺寸。

2) 实验钢的平衡相变点随着 Al 元素的增加而升高; 实验钢的奥氏体晶粒尺寸越大, A_{c3} 温度越高, 钢的硬度越小, 且随着钢中 Al 含量的增多, 得到的马氏体组织尺寸也有所增大。

3) 在 650 °C 环境下, 钢中添加 3% Al 比添加 1% Al 的抗高温氧化性能强; 在 750 °C 环境下, 钢中所含改性添加剂 Ni 起到了一定的作用, Al-Ni 比越大, 钢便表现出了较强的抗氧化性。

参考文献 References

- [1] Liu Zhuhan, Ning Zhiyuan, Luo Qinlan *et al.* *Materials and Corrosion*[J], 2021, 72(3): 495
- [2] Li Linping(李林平), Liang Jun(梁 军), Zhao Lei(赵 雷) *et al.* *Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2019, 44(2): 68
- [3] Rajesh Kannan P, Muthupandi V, Arivazhagan B *et al.* *High Temperature Materials and Processes*[J], 2017, 36(8): 771
- [4] Muhammad Ali Abro, Junhee Hahn, Dong Bok Lee. *Metals and Materials International*[J], 2018, 24(3): 507
- [5] Xu Hong, Liang Zhiyuan, Ding Jianliang *et al.* *High Temperature Materials and Processes*[J], 2018, 37(8): 733
- [6] Li Jiansan(李建三), Liu Yang(刘 洋), Yuan Zhou(袁 周). *Corrosion & Protection*(腐蚀与防护)[J], 2018, 39(6): 437
- [7] Xiao Yun(肖 芸). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015
- [8] Hou Shuzeng(侯书增), Bao Chonggao(鲍崇高), Fu Ge(付 鹤). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(7): 2364
- [9] Li Jiansan, Wei Haitong, Yuan Zhou. *Journal of Failure Analysis and Prevention*[J], 2019, 19(3): 802
- [10] Xu Xupeng(许旭鹏), Liu Shouping(刘守平), Han Xiaoyu(韩校宇) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2017, 38(1): 106
- [11] Liu Ning(刘 宁), Zhong Lang(仲 浪), Chen Chen(陈 晨) *et al.* *Journal of Jiangsu University of Science and Technology, Natural Science Edition*(江苏科技大学学报, 自然科学版)[J], 2019, 33(2): 27
- [12] Wu K, Li C C, Cheng F P *et al.* *Corrosion Science*[J], 2017, 121: 116
- [13] Wang Sheng(王 胜). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019
- [14] Li Qiangfeng(李强锋), Zhao Hongjin(赵鸿金), Yang Yanli(杨延丽) *et al.* *Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2019, 31(7): 668
- [15] Wang S B, Chang X F, Key J. *Materials Characterization*[J], 2017, 127: 1
- [16] Wang M, Liu Z Y, Li C G. *Acta Metallurgica Sinica, English Letters*[J], 2017, 30(3): 238
- [17] Klueh R L, Hashimoto N, Maziasz P J. *Scripta Materialia*[J], 2005, 53(3): 275

- [18] Jiang Xin(江 心), Zhou Yajun(周亚军), Mao Daheng(毛大恒) *et al.* *Iron Steel Vanadium Titanium*(钢铁钒钛)[J], 2019, 40(04): 164
al. Hot Working Technology(热加工工艺)[J], 2019, 48(8): 17
- [19] Ning Ke(宁 可), Zhang Luan(张 峦), Zhang Heng(张 衡) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2018, 47(16): 188
- [20] Xie Fenghu(谢凤虎), Yang Huiping(杨会平), Cao Xiaoen(曹晓恩) *et al.* *Iron Steel Vanadium Titanium*(钢铁钒钛)[J], 2019, 40(04): 164
- [21] Wang S B, Liu J Z, Qi Q *et al.* *Journal of Alloys and Compounds* [J], 2017, 693: 264

Effect of Al and Ni on Phase Transformation and Properties of 1Cr9Al(1-3)Ni(1-7)WVNbB Alloy

Zhao Manman¹, Guo Dong^{1,2}, Qin Sen¹, Feng Jie¹, Dai Yongjuan¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

(2. College of Mechanical Engineering, Tianjin Vocational and Technical Normal University, Tianjin 300222, China)

Abstract: To study the effect of Al on the phase transformation and properties of ferritic heat resistant steel, a new type of high aluminium ferritic heat resistant steel was prepared by adding Al element and adjusting additive Ni on the basis of T92 alloy composition. The relationship between the phase change temperature of ferritic heat resistant steel with different Al contents under heat treatment processes and quenching organization grain size, hardness and oxidation resistance was studied. The results show that the equilibrium phase transition point of the experimental steel increases with the increase of Al content, and the A_{c1} and A_{c3} temperature of the experimental steel becomes higher with the austenite grain size becoming larger. When the total amount of Al and Ni elements added in steel is 2.4wt%, the grain size of austenite after quenching is the smallest and the hardness is the largest. Adding 3wt% Al makes the steel has stronger high temperature oxidation resistance than adding 1wt% Al at 650 °C. At 750 °C, the modified additive Ni plays a certain role. The larger the Al-Ni ratio, the stronger the oxidation resistance of the steel.

Key words: ferritic heat-resistant steel; Al content; equilibrium phase transition temperature; grain size; hardness

Corresponding author: Guo Dong, Ph. D., Professor, College of Mechanical Engineering, Tianjin Vocational and Technical Normal University, Tianjin 300222, P. R. China, E-mail: guodongbill@163.com