

· 产品研发 ·



稀土 Ce 对 441 铁素体不锈钢碳氮化物析出的影响与控制

谢康¹, 莫金强², 张威², 王丽君¹

(1 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083;

2 山西太原钢铁股份有限公司技术中心, 太原, 030003)

摘要:通过高温热态模拟实验和热力学计算,考察了不同 Ce 含量微合金化对 441 铁素体不锈钢中碳氮化物特征的影响规律。结果表明,无 Ce 添加的 441 铁素体不锈钢中碳氮化物主要有两种类型:单独析出的碳氮化物和异质形核的复合碳氮化物。钢中加入稀土后,碳氮化物形核氧化物中的 Al 逐渐被 Ce 取代,改性顺序为 $Al_2O_3 \cdot Ti_2O_3 \rightarrow Al-CeO_3 \cdot Ti_2O_3 \rightarrow Ce_2O_3 \cdot Ti_2O_3$ 。改质形成的 Ce_2O_3 与碳氮化物的错配度较高,形核能力减弱,这既使形貌由全包裹向半包裹结构转变,又造成了单独析出碳氮化物析出加剧。高含量稀土添加后,CeN 会逐渐出现,TiN 的析出过程受到抑制,降低了碳氮化物的析出面积,碳氮化物逐渐转化为类球形形貌。通过对比不同 Ce 含量试样,当稀土添加量为 0.007%,与原始铸态的碳氮化物相比,增加了异质形核的数量密度,碳氮化物的数量密度由 66.7 个/ mm^2 上升到 74.5 个/ mm^2 ,平均尺寸集中在 1~3 μm ,细化晶粒效果最好。

关键词:441 不锈钢;凝固过程;稀土含量;碳氮化物;稀土夹杂物

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00073 **中图分类号:**TG142.1

The Effect and Control of Rare Earth Ce on Carbonitrides Precipitation in 441 Ferritic Stainless Steel

Xie Kang¹, Mo Jinqiang², Zhang Wei², Wang Lijun¹

(1 The Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Technology Center, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Taiyuan 030003, Shanxi, China)

Abstract: This article investigates the influence of microalloying with different Ce contents on the precipitation of carbonitrides in 441 ferritic stainless steel through high-temperature thermal simulation experiments and thermodynamic calculation. The results indicate that there are two main types of carbonitrides in 441 ferritic stainless steel without rare earth Ce addition: separately precipitated carbonitrides and heteronucleated composite carbonitrides. After adding rare earth elements to the steel, Al in the nucleation oxide of carbon nitride is gradually replaced by Ce, and the modification order is $Al_2O_3 \cdot Ti_2O_3 \rightarrow Al-CeO_3 \cdot Ti_2O_3 \rightarrow Ce_2O_3 \cdot Ti_2O_3$. After modification, the mismatch between Ce_2O_3 and carbonitrides is higher, resulting in a weakened nucleation ability. This not only transforms the morphology from fully encapsulated to semi-encapsulated structure, but also intensifies the precipitation of individual carbonitrides. With the addition of high content rare earth elements, CeN gradually precipitates in the steel, and the precipitation process of TiN is inhibited, reducing the precipitation area of carbonitrides and gradually spheroidizing the morphology of carbonitrides. As high content rare earth elements are added, CeN gradually precipitates in the steel. The precipitation process of TiN is inhibited during this process, reducing the precipitation area of carbonitrides and gradually spheroidizing their morphology. By comparing different Ce samples, the rare earth addition amount is 0.007%, which increase the density of heterogeneous nucleation compared to the original cast carbonitrides. The density of carbonitrides increases from 66.7 number/ mm^2 to 74.5 number/ mm^2 , with an average size concentration of 1-3 μm . The best effect is to refine the grain size.

Key Words: 441 Stainless Steel; Solidification Process; Rare Earth; Carbonitrides; Rare Earth Inclusions

含 Cr 9%~20% 的铁素体不锈钢由于其良好的抗氧化性、高蠕变强度已被认为是许多耐热关键部件的首选材料。而铁素体晶粒粗大以及高 Cr 碳化物过量析出造成的晶界脆性,又是影响材料性能和

服役周期的重要因素^[1-2]。目前,工业冶炼采用 Ti、Nb 元素稳定 C、N 间隙元素来避免晶界处 Cr 的贫化,已经成为解决上述问题的有效途径,同时细小的 Ti、Nb 碳氮化物可起到细化铁素体晶粒的作

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(FRF-BD-23-02),山西省重点研发计划项目书计划任务书(202202050201019)

作者简介:谢康(1998—),男,硕士; **E-mail:**m202111285@xs.ustb.edu.cn; **收稿日期:**2024-03-26

通信作者:王丽君(1979—),女,博士,教授; **E-mail:**lijunwang@ustb.edu.cn

用^[3-5]。然而,此类碳氮化物在钢中固溶度积较小且容易依附在脱氧产物上,其尺寸极易发生显著粗化,进而造成严重的蠕变损伤和裂纹源的产生^[6]。若钢中生成细小(1~3 μm)且弥散分布的碳氮化合物,并发挥其细化铁素体晶粒和改善凝固组织的作用^[7],则是研究者们追求的终极目标^[8-10]。因此,国内外研究人员对钢铸坯中碳氮化物的尺寸和数量的控制进行深入研究,例如,调整钢基体的成分^[11-14]、锻造工艺^[15-16]、热处理工艺^[17]和凝固冷却速率^[18-21]等,并且取得一定进展。

稀土 Ce 广泛应用于钢液净化和凝固组织控制方面,对碳氮化物尺寸控制效果已在多个钢种中得到证实。张阳阳^[22]在微合金钢中加入 $w[\text{Ce}]$ 0.002 7% 时,钢中长条状的 TiC 和立方块状的 Ti(C, N) 转变为近球形的 $\text{CeAlO}_3\text{-TiC}$ 、 $\text{CeAlO}_3\text{-Ti(C, N)}$ 。稀土处理的 H13 钢中 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物发生改性,减少了碳化物的聚集和生长,细化了碳氮化物的尺寸^[23]。稀土处理还显著细化了高速钢的奥氏体晶粒组织。共晶结构中的片状碳化物变得更短、更细,经过热处理后,大多数共晶碳化物变成球形^[24]。稀土元素易在偏析晶界处,降低界面能,进而改变碳化物在基体中的形态与分布^[25-26]。

本文主要研究了不同 Ce 含量对 441 铁素体不锈钢中 Ti、Nb 碳氮化物的析出规律的影响,明确 Ce 在 441 铁素体不锈钢中的合理添加量,为有效控制不锈钢中碳氮化物的尺寸和数量等提供理论指导。

1 试验材料及方法

将 400 g 441 铁素体不锈钢铸坯样品放入刚玉坩埚中,使用 MoSi_2 耐高温立式炉,通入 Ar 升温至 1 600 °C。待钢液澄清后保温 30 min,使用插入法向钢液中加入 0.05、0.1、0.2 g 的纯金属 Ce 并保温 10 分钟。随后将钢样快速冷却,得到不同稀土含量的实验试样。采用实验室直读光谱仪(CX-9800(T))对端点试样检测化学成分,并使用氧氮分析仪检测 N 和 O 元素。测得的不锈钢钢样成分见表 1。试验钢的稀土收得率为 55%~60%。取试样内弧的 1/4 位置砂磨和抛光,使用扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)观察和分析钢中碳氮化物的种类、分布和形貌,并使用热力学软件 FactSage 进行了热力学理论计算。

2 试验结果与讨论

2.1 碳氮化物的形貌

不同稀土 Ce 含量 441 铁素体不锈钢的典型碳

表 1 不同 Ce 含量 441 铁素体不锈钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of 441 ferritic stainless steel with different Ce contents %

编号	C	P	Nb	Ti	S	N	Al	O	Ce
0 [#]	0.0123	0.02	0.427	0.161	0.001	0.0151	0.070	0.0056	0
1 [#]	0.0126	0.02	0.429	0.163	0.001	0.0153	0.070	0.0054	0.007
2 [#]	0.0124	0.02	0.429	0.162	0.001	0.0152	0.067	0.0060	0.019
3 [#]	0.0125	0.02	0.430	0.161	0.001	0.0153	0.069	0.0051	0.031

氮化物形貌如图 1 所示。如图 1(a)~(c)可知,铸态 441 铁素体不锈钢中存在的碳氮化物的种类主要为两种:(1)方形(Ti, Nb)N 外包裹片状(Nb, Ti)C 的单独析出类型;(2) Al_2O_3 或 Al-Ti-O 外包裹碳氮化物的复合析出类型。核心氧化物的元素组成如图 2(a)所示。进一步得出 Al/Ti 比为 0.4~0.6,可推测 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ti}_2\text{O}_3$ 是 0[#] 试样中碳氮化物的主要异质形核核心。

由图 1(d)~(f)可知,在稀土添加量为 0.007% 的 1[#] 试样中,同样发现了与 0[#] 试样中形貌和成分相同的单独析出类型。Ce 的添加参与碳氮化物形核氧化物的改质过程,碳氮化物的形核核心也发生了变化,由大尺寸 Al-Ti-O 夹杂物改质为小尺寸 Ce-Al-Ti-O 夹杂物以及 Al-Ti-O 夹杂与 Ce-Al-O 夹杂的共生相。从图 1(e)可以清晰观察到 Al-Ti-O 向 CeAlO_3 的转变过程,中间浅色部分为 CeAlO_3 , Ce、Al、O 原子个数比约为 1:1:3,被外层 Al、Ti、O 均匀包裹。

由图 1(g)~(i)可知,在稀土添加量为 0.019% 的 2[#] 试样中,发现了颗粒聚集的单独析出类型,形貌变为不规则状。随着稀土的加入,复合碳氮化物的形核核心全部被改质为 Ce-Al-Ti-O,尺寸增大迅速,甚至超过 0[#] 的尺寸。在所观察的视场内,碳氮化物以颗粒聚集在稀土氧化物的边缘部分,形貌出现全包裹型和半包裹型两种结构。

由图 1(j)~(l)可知,在稀土添加量为 0.031% 的 3[#] 试样中,发现了类球状的单独析出类型,逐渐失去了棱角形貌。碳氮化物的形核核心 Al-Ti-O 中的 Al 元素进一步被 Ce 代替,如图 1(l)所示,出现了以 Ce-Ti-O 为核心的复合碳氮化物,平均尺寸达到 3 μm。如图 2(b)所示,外层碳氮化物析出面积厚度逐渐减小,以片状依附在氧化物外层,形貌完全变为半包裹碳氮化物的形貌。

对添加不同 Ce 含量试样中夹杂物的形貌和组成分析可知,稀土 Ce 逐渐将 Al-Ti-O 转变为 Ce-Al-Ti-O 和 Ce-Ti-O,并且成为碳氮化物的形核质点,主要改变了复合碳氮化物的析出形貌,由全包裹演变为半包裹形貌。然而,半包裹碳氮化物表面的不均

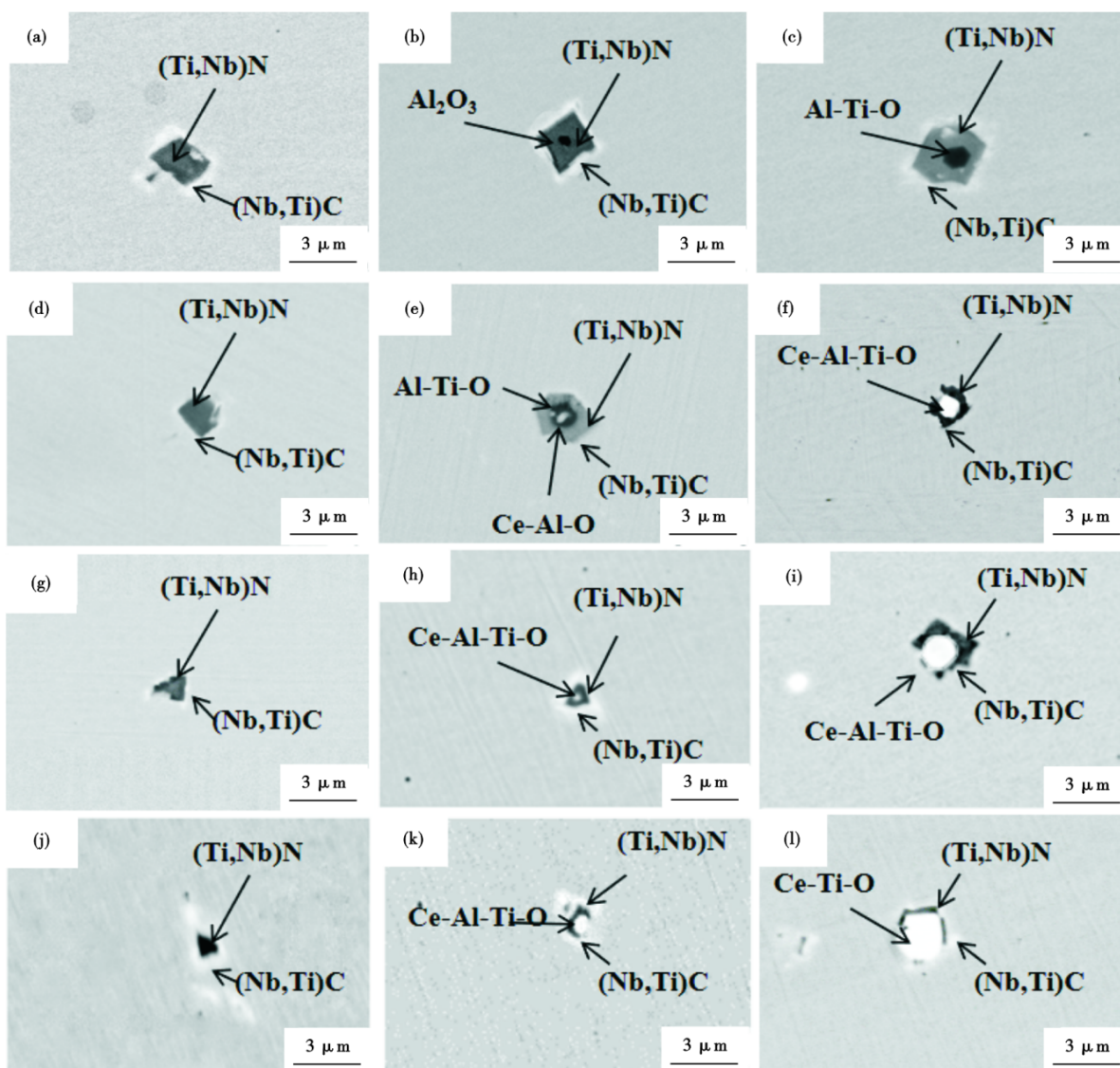


图 1 不同 Ce 含量试样中碳氮化物的形貌:(a)~(c)0[#]试样;(d)~(f)1[#]试样;(g)~(i)2[#]试样;(j)~(l)3[#]试样

Fig. 1 Morphology of carbonitrides in samples with different Ce contents : (a)~(c) 0[#] Sample ; (d)~(f) 1[#] Sample ; (g)~(i) 2[#] Sample ; (j)~(l) 3[#] Sample

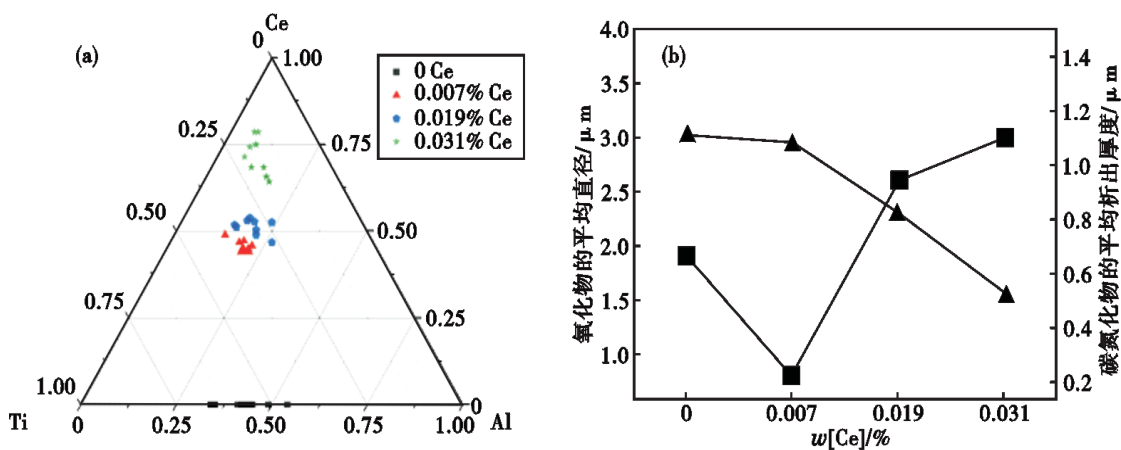


图 2 (a)核心氧化物的化学组成,(b)平均直径及外层碳氮化物析出面积厚度的变化

Fig. 2 Changes in chemical composition of core oxides (a), average diameter and area thickness of outer carbonitride precipitation (b)

匀成分以及与基体之间的润湿性差异,这都不利于铁素体晶粒的细化和均匀分布。显然,较高的稀土添加,反而起不到改善碳氮化物析出形貌和提升钢种性能的作用。

2.2 碳氮化物数量统计

统计各组试样中碳氮化物的数量分布如图 3 所示。随着稀土的逐渐增加,碳氮化物的数量呈现先升高后下降的趋势,其数量密度分别为 66.7、74.5、50.2、47.8 个/mm²。统计各组试样中不同种类碳氮化物的数量分布,如图 4 所示。相较于 0# 试样,钢中添加 $w[\text{Ce}]0.007\%$ 后,大量的钛铝氧化物被稀土改质,96% 碳氮化物均以复合类型析出,如图 5 所示。同时,其数量密度由 26.3 个/mm² 提升到 53.8 个/mm²,这说明 Ce 元素不仅参与了钛铝氧化物的改质,还单独形成异质核心促进了碳氮化物的析出。整体碳氮化物的尺寸分布明显改善,大尺寸粒子显著减少,整体尺寸集中在 1~3 μm。而在 Ce 含量进一步添加的 1# 和 2# 试样中,复合析出类型所占比例明显下降,两种析出类型的碳氮化物都有不同程度的粗化作用。碳氮化物的尺寸向大于 3 μm 的尺寸趋势移动,同时,1 μm 以下的粒子数量也明显提高。可见,随着 Ce 含量的提升,钢中碳氮化物的尺寸分布变得越来越不均匀。从统计结果分析可知,研究范围内 $w[\text{Ce}]$ 添加量为 0.007% 时,碳氮化物呈现小尺寸弥散分布,细化晶粒效果更好。

2.3 稀土 Ce 对碳氮化物的改质研究

基于 Scheil 凝固模型,采用 FactSage 热力学软件计算了本文 4 个实验样品的非平衡凝固过程。结果见表 2, Al₂O₃ 和 Ti₂O₃ 在凝固时很容易作为形核核心,形成复合碳氮化物。Ce 添加后改变了凝固过程中氧化物的析出顺序,并且会率先与钢液中 Al、O 元素发生还原反应生成 AlCeO₃。对比式 (1) 和 (2),在相同的 Al 含量下,钢中会生成更多

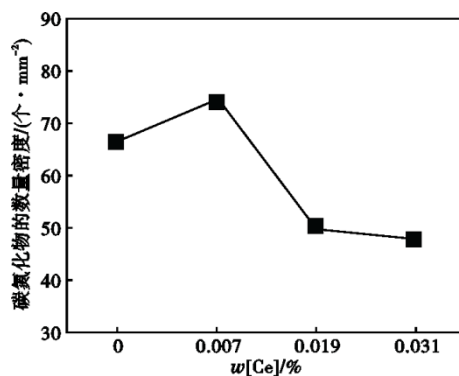
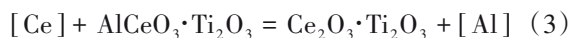
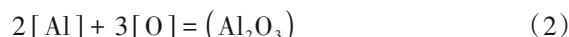


图 3 不同 Ce 试样中碳氮化物的数量分布

Fig. 3 Quantity distribution of carbonitrides in different Ce samples

数量的 AlCeO₃。后续析出的 Ti₂O₃ 会依附其上,两者复合弥散分布在钢液中。AlCeO₃ 和 Ti₂O₃ 与 TiN 的错配度 < 12%^[27],都可以起到参与碳氮化物异质形核的作用。稀土改质后的小尺寸弥散分布形核质点,有利于提高碳氮化物的析出数量和减小析出尺寸。



随着 Ce 含量的增加,更多 Ce 原子向钢液中氧化物夹杂的高氧势界面扩散。这使得稀土元素可以进一步与较强氧化物性的 Al 元素发生还原反应,从而加深了氧化物的改质程度。主要涉及到的反应方程式如式 (3) 和式 (4)。钛铝氧化物会直接改质为 Ce₂O₃·Ti₂O₃。相较于 AlCeO₃ 和 Ce₂O₃ 参与碳氮化物异质形核能力,Ce₂O₃ 与各类型碳氮化物具有较大的错配度^[26],碳氮化物无法趋向于 Ce₂O₃ 上富集形核,只能在残留的 Ti₂O₃ 上形核长大,从而逐渐演变为半包裹形貌。同时,异质核心数量会大量减少,碳氮化物选择均质形核的形式

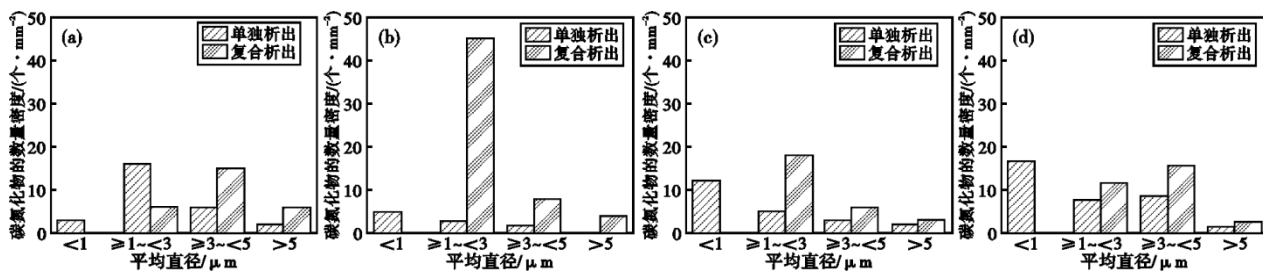


图 4 不同 Ce 试样碳氮化物的尺寸分布:(a) 0# 试样,(b) 1# 试样,(c) 2# 试样,(d) 3# 试样

Fig. 4 Size distribution of carbonitrides in different Ce samples : (a) 0# Sample, (b) 1# Sample, (c) 2# Sample, (d) 3# Sample

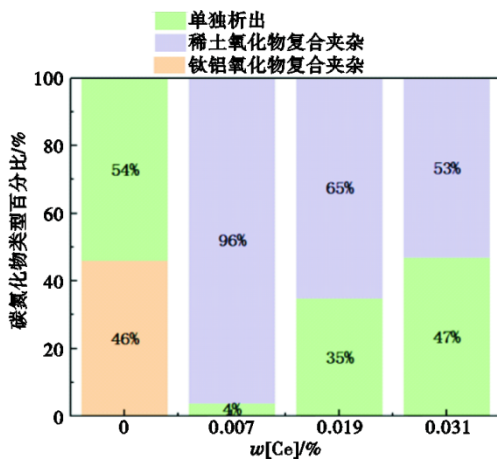


图 5 不同 Ce 试样中碳氮化物类型的分布图

Fig. 5 Distribution map of carbonitride types in different Ce samples

表 2 试验钢的非平衡凝固路线

Table 2 Non-equilibrium solidification route of experimental steel

样品	凝固路线
0#	$L \rightarrow Al_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 + \alpha - Fe \rightarrow Al_2O_3 + Ti_2O_3 + \alpha - Fe \rightarrow Al_2O_3 + Ti_2O_3 + \alpha - Fe + (Ti, Nb)(C, N)$
1#	$L \rightarrow AlCeO_3 \rightarrow Al_2O_3 + AlCeO_3 + \alpha - Fe \rightarrow Al_2O_3 + AlCeO_3 + Ti_2O_3 + \alpha - Fe \rightarrow Al_2O_3 + Ti_2O_3 + \alpha - Fe + (Ti, Nb)(C, N) + AlCeO_3$
2#	$L \rightarrow AlCeO_3 \rightarrow \alpha - Fe + AlCeO_3 + Ti_2O_3 \rightarrow AlCeO_3 + \alpha - Fe + (Ti, Nb)(C, N)$
3#	$L \rightarrow Ce_2O_3 \rightarrow Ce_2O_3 + \alpha - Fe \rightarrow CeS + Ce_2O_3 + \alpha - Fe + (Ti, Nb)(C, N) + Ti_2O_3$

析出, 进而使大量小尺寸颗粒弥散在钢中。大量的 Ce_2O_3 存在凝固末期狭窄钢液中, 更容易加剧各类型碳氮化物的碰撞过程, 这也会造成碳氮化物尺寸的进一步增大。软件的计算结果与实际观察的结果基本吻合。

2.4 稀土 Ce 对碳氮化物的类球形演变分析

统计各组试样中碳氮化物的析出面积、圆形度

和化学组成如图 6 所示。夹杂物的长宽比代表穿过夹杂物质心的最长轴和与最长轴垂直的短轴的比值, 长宽比越小代表夹杂物越趋于球状; 夹杂物的圆形度越接近 1, 代表碳氮化物的形状越接近球形。相较于 0# 试样, 随着钢中 Ce 的添加, 钢中碳氮化物的析出面积更少, 圆形度更小。表明稀土的加入可以抑制碳氮化物的析出, 并且改善了不规则夹杂物的形貌, 使边缘变得更加光滑。采用 EDS 对不同试样中碳氮化物的化学组成分析, 结果如图 6(c) 所示。随着 Ce 含量的上升, 碳氮化物中的 Ti/Nb 比和 Ti/N 比出现明显下降。根据居里乌尔夫原理^[28], 碳氮化物的形态生长是由比表面能最小的晶面所决定, 也即 $TiN \{111\}$ 晶面的生长速率。TiN 在碳氮化物的含量越少, 外延生长越差, 碳氮化物就会向类球形形貌演变^[29-30]。

为揭示 Ce 含量对碳氮化物中元素变化的根本原因, 通过 FactSage 计算四种试样的平衡过程中析出相质量的变化, 如图 7 所示。由 $w[Ce]$ 添加含量为 0.019% 和 0.031% 红色和绿色计算曲线可知, Ce 的过量添加, 在 1 500 °C 条件下钢中开始析出 CeN。随着温度的下降, CeN 由于化学性质的不稳定性而分解, CeN 中的 Ce 元素转入到其他的存在中, N 元素进入到 TiN 中, 从而使在平衡凝固冷却结束后, TiN 的总析出量并没有因为添加稀土产生变化。但考虑到本试验冷却速度较快, CeN 与 TiN 之间的转变不完全, 从而使 CeN 少量在基体中沉积。随着 Ce 含量的提升, 钢中大量析出的 Ce_2O_3 也为 CeN 的析出提供了过饱和 Ce 浓度和形核质点, 这使得 CeN 在钢中更容易析出。CeN 依附在 Ce_2O_3 形成 CeN- Ce_2O_3 复合夹杂如图 8 所示。由计算可得 CeN 和 TiN 的析出温度都在 1 500 °C 左右, 并且在固液两相区析出。CeN 的产生势必与 TiN 析出形成竞争关系, 从而抑制碳氮化

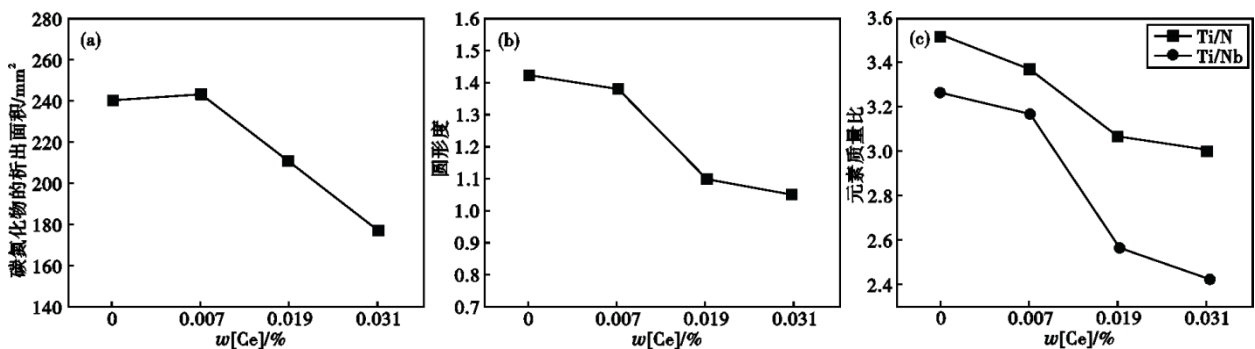


图 6 不同 Ce 试样中碳氮化物的析出面积(a)、圆形度(b)和化学成分(c)

Fig. 6 Precipitation area (a), circularity (b), and chemical composition (c) of carbonitrides in different Ce samples

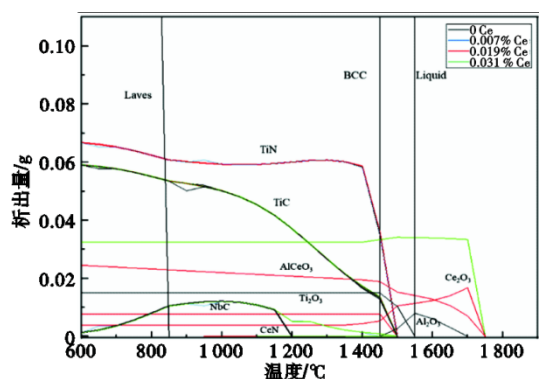


图 7 0~3# 试样的热力学析出曲线

Fig. 7 Thermodynamic precipitation curves of samples 0~3 #

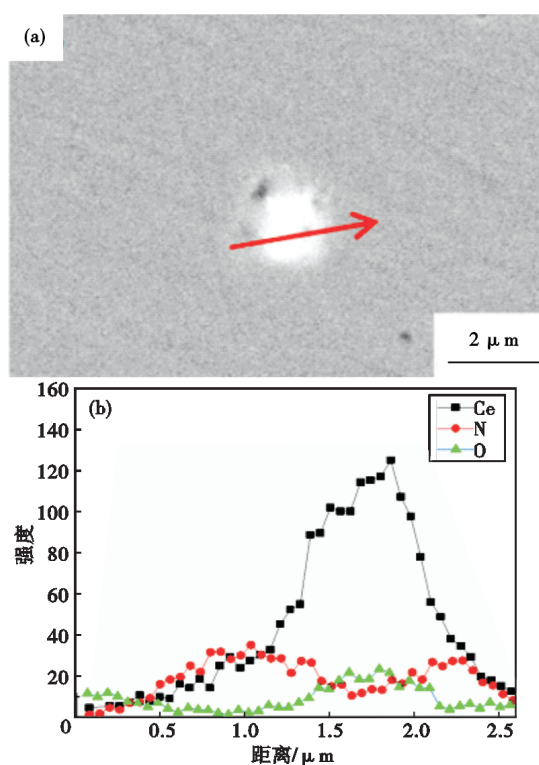


图 8 Ce-N-O 复合夹杂物:(a)形貌图,(b)线扫描结果

Fig. 8 Ce-N-O complex inclusions: (a) morphology, (b) line scanning results

参考文献

- [1] Hongyun B I, Zhiyu W, Xin L I, et al. Stainless steels for automotive exhaust system and pipes welding [J]. World Iron & Steel, 2011, 11(5): 1-9.
- [2] Kim J K, Kim Y H, Uhm S H, et al. Intergranular corrosion of Ti-stabilized 11 wt% Cr ferritic stainless steel for automotive exhaust systems [J]. Corrosion Science, 2009, 51(11): 2716-2723.
- [3] Ali-LoeytyH, JussilaP, JuutiT, et al. Influence of precipitation on initial high-temperature oxidation of Ti-Nb stabilized ferritic stainless steel SOFC interconnect alloy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(19): 14528-14535.
- [4] 李鑫, 毕洪运, 张志霞. 宝钢汽车排气系统高温端用铁素体不锈钢开发[J]. 宝钢技术, 2013(5): 15-21.
- [5] M. Strangwood, C. L. Davis. Effect of TiN Particles and Grain Size on the Charpy Impact Transition Temperature in Steels [J]. Journal of Materials Science Technology, 2012, 28(10): 878-888.
- [6] 刘斌, 王以增, 陆世英. 高纯Cr18Mo2铁素体不锈钢脆性断裂机制的研究[J]. 钢铁研究学报, 1987(S1): 5-10.
- [7] Sobotka E, Kreyca J, Fuchs N, et al. The role of MX carbonitrides for the particle-stimulated nucleation of ferrite in microalloyed steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2023, 54(7):

物的析出和粗化。从热力学计算图中未看到NbN的析出,本文中的(Ti,Nb)N形成可能是Nb元素偏析在TiN的低表面能上,相互固溶析出。随着Ce含量的上升,TiN析出受到抑制,造成碳氮化物中Ti/Nb比下降,这也解释了形貌更接近球形生长的现象。

3 结论

(1)无稀土Ce添加的441铁素体不锈钢中碳氮化物主要有两种类型:单独析出的碳氮化物和异质形核的复合碳氮化物。钢中加入稀土后,Ce使Al-Ti-O改质为Ce-Al-Ti-O,并且成为碳氮化物的形核质点,该过程既增加了碳氮化物的尺寸,还使析出形貌由全包裹向半包裹结构转变。同时随着Ce进一步添加,单独析出的碳氮化物向小颗粒球形转变。

(2)添加稀土后,碳氮化物形核氧化物中的Al逐渐被Ce取代,改性顺序为 $Al_2O_3 \cdot Ti_2O_3 \rightarrow AlCeO_3 \cdot Ti_2O_3 \rightarrow Ce_2O_3 \cdot Ti_2O_3$,改质后的 Ce_2O_3 与碳氮化物的错配度较高,形核能力减弱。因此,会出现半包裹形貌和小尺寸颗粒析出的情况,实验观察与热力学软件计算结果基本一致。

(3)添加稀土后,碳氮化物中Ti/Nb比和析出面积都会减少,碳氮化物呈现类球形演变。主要因为CeN的产生与TiN的析出产生争夺,抑制了TiN的析出。

(4)在钢中添加 $w[Ce]0.007\%$,析出大量小尺寸的 $AlCeO_3$,增加了异质形核的数量密度,碳氮化物的数量密度由 66.7 个/ mm^2 上升到 74.5 个/ mm^2 ,其平均尺寸集中在 $1\sim 3 \mu m$,小尺寸弥散分布更有利于细化晶粒。随着稀土含量的进一步添加,碳氮化物尺寸分布向大尺寸和小于 $1 \mu m$ 的趋势移动。碳氮化物尺寸分布不均匀,优化效果减弱。

- 2903-2923.
- [8] Roy T, Latu-Romain L, Guillothe I, et al. Modeling of trilayered oxide thermally grown on 441 ferritic stainless steel at 900 °C in synthetic air[J]. Oxidation of Metals, 2021, 96(1): 31-41.
- [9] Fujita N, Ohmura K, Kikuchi M, et al. Effect of Nb on high-temperature properties for ferritic stainless steel[J]. Scripta Materialia, 1996, 35(6): 705-710.
- [10] Zhang Y H, Yang J. Formation of Nb(C, N) carbonitride in cast austenitic heat-resistant steel during directional solidification under different withdraw rates[J]. Materials, 2018, 11(12): 2397.
- [11] 王飞, 王瑞, 李建新, 等. Nb对Cr-Co-Ni-Mo系超高强度齿轮钢组织和力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2018, 39(3): 59-61.
- [12] Pei Y K, Ma D S, Liu B S, et al. Effect of Forging Ratio on Microstructure and Mechanical Property of H13 Steel [J]. Iron & Steel, 2012, 47(2):81-86.
- [13] 毛明涛, 郭汉杰, 孙晓林, 等. 基于原位观察的H13钢中液析碳化物高温行为研究[J]. 工程科学学报, 2017, 39(8): 1174-1181.
- [14] Di T, Ai-Min Z, Hui-Bin W U, et al. New Rolling Technology of Flat-Rolling Steel and Product Development [J]. Iron & Steel, 2012, 47(11):1-8.
- [15] 蒋乔, 张健, 倪燕红. 中碳CrMo钢中Ti、Nb液析形貌及生成机理分析[J]. 特殊钢, 2024, 45(2): 18-23.
- [16] 王洪, 张艳艳, 刘小林, 等. 轧制工艺对微合金钢EH420变形奥氏体中碳氮化物析出的影响[J]. 特殊钢, 2006, 27(4): 16-18.
- [17] 刘英义, 李维娟, 王长顺. 温度和形变对V-Ti微合金钢中碳氮化物溶解与析出的影响[J]. 热加工工艺, 2006, 35(8): 58-61.
- [18] O'Dell S P, Ding G L, Tewari S N. Cell/dendrite distribution in directionally solidified hypoeutectic Pb-Sb alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30(8): 2159-2165.
- [19] Terry B S, Chinyamakobvu O S. Dispersion and reaction of TiC in liquid iron alloys[J]. Materials Science and Technology, 1992, 8(5): 399-405.
- [20] Ma D S, Zhou J, Zhang Z K, et al. Effect of the melting rate of ESR on the microstructure and impact properties of H13 steel [J]. Iron and Steel, 2010, 45(8): 80-84.
- [21] Mao M T, Guo H J, Wang F, et al. Effect of cooling rate on the solidification microstructure and characteristics of primary carbides in H13 steel [J]. ISIJ International, 2019, 59(5): 848-857.
- [22] 张阳阳. 稀土对钛微合金钢中TiC析出影响[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
- [23] Huang Yu, Xie You, Cheng Guoguang, et al. Formation mechanism and control of Mg Al O inclusions in H13 steel [J]. Iron and Steel, 2017, 52(6): 34-39.
- [24] 蒋志强, 冯锡兰, 符寒光. 稀土对高碳高速钢组织和性能的影响[J]. 航空材料学报, 2007, 27(1): 6-10.
- [25] Song M M, Song B, Xin W B, et al. Effects of rare earth addition on microstructure of C-Mn steel [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2015, 42(8): 594-599.
- [26] Nuri Y, Ohashi T, Hiromoto T, et al. Solidification macrostructure of ingots and continuously cast slabs treated with rare earth metal [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1982, 22(6): 408-416.
- [27] 张肖遥. 稀土Ce对Ti微合金钢中TiN析出的影响[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
- [28] 秦善. 晶体学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.
- [29] 孙文, 秦学智, 郭永安, 等. Nb/Ti比对铸造镍基高温合金长期时效组织演化的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(6): 744-752.
- [30] 薛润东, 赵志毅, 谢建新, 等. 加热温度对钛铌微合金钢中未溶颗粒形貌和成分的影响[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(4): 80-84+94.

“讲文明树新风”公益广告

绿色环保

人人有责