

镁处理对TiN液析行为的影响

张永余^{1,2}, 马崑^{1,2}, 闵义^{1,2}, 刘承军^{1,2}

(1. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为研究镁处理对钛微合金钢在凝固过程中TiN液析行为的影响,采用真空感应炉冶炼了试验钢. 利用SEM-EDS结合图像处理软件,分析铸坯径向不同位置处镁处理钢对比非镁处理钢中夹杂物的成分和尺寸变化,并用FactSage软件对夹杂物的形成和析出进行了计算. 结果表明:钢中TiN夹杂均在凝固前沿的液相中生成. 氮含量增加,凝固过程中TiN的析出温度升高和析出量增加,并对后续Ti₄C₂S₂和MnS的析出产生影响. 非镁处理条件下,铸坯1/4处和中心处TiN夹杂的平均粒径分别为2.48和2.11 μm,镁处理后,尺寸分别降为1.50,1.45 μm和1.48,1.38 μm,数密度也有所增大. 添加微量Mg, MgO·Al₂O₃即可稳定存在于钢中并在钢液降温过程中成为TiN的凝固核心,促使TiN夹杂分布弥散,减少了大尺寸TiN的生成.

关键词: 镁处理; 钛微合金钢; TiN; 析出; 热力学

中图分类号: TF 704.7

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)07-0967-07

Effect of Magnesium Treatment on Liquid Precipitation Behavior of TiN

ZHANG Yong-yu^{1,2}, MA Kun^{1,2}, MIN Yi^{1,2}, LIU Cheng-jun^{1,2}

(1. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Ores (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: MIN Yi, E-mail: miny@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To investigate the effect of magnesium on TiN liquid precipitation in titanium microalloyed steel, the steel was melted in a vacuum induction furnace. The changes in inclusion composition and size in magnesium-treated steel at different billet positions were analyzed by SEM-EDS and imaging software and were compared with untreated steel. FactSage software was used to calculate inclusion formation. The results revealed that TiN inclusions form in the liquid phase at the solidification front. Higher nitrogen content increases TiN precipitation temperature and amount, and affects Ti₄C₂S₂ and MnS precipitation. Without magnesium treatment, the average sizes of TiN are 2.48 and 2.11 μm in the quarter and center of slab, respectively. After magnesium treatment, the sizes decrease to 1.50, 1.45, 1.48, and 1.38 μm, respectively, with increased number density. Traces of Mg enable the stable existence of MgO·Al₂O₃, serving as TiN solidification cores, aiding dispersion and reducing the formation of large-size TiN during steel cooling.

Key words: magnesium treatment; titanium microalloyed steel; TiN; precipitate; thermodynamics

钛微合金钢是在普通碳钢或低合金钢中添加微量钛元素,并在热加工中通过TMCP来调控碳氮化物的析出行为,达到提高性能的目的,其

在抗拉强度、屈服强度、塑性、韧性、可焊接性等方面均优于普通碳钢,广泛应用于造船、汽车、桥梁、工程机械等领域^[1-4]. 钛微合金钢的强韧化机

收稿日期: 2023-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974075).

作者简介: 张永余(1996-),男,辽宁营口人,东北大学硕士研究生; 闵义(1972-),男,辽宁海城人,东北大学教授,博士生导师; 刘承军(1974-),男,河南获嘉人,东北大学教授,博士生导师.

理为钛与钢中的碳、氮元素结合析出第二相粒子,细小弥散析出的第二相能够起到细晶强化和沉淀强化,在不同阶段对钢进行强化^[5-9].但是在凝固过程中,钢中的钛、氮元素会在凝固前沿产生偏析富集^[10],超过该温度下的平衡钛氮积,生成大颗粒的液析 TiN.液析 TiN 有尖利的棱角且不易变形,经轧制和热处理后也不会消失,且会聚集在晶界处成为裂纹扩展源,不但起不到强化作用,还会消耗钢中的“有效钛”,恶化高强钢的性能^[11-13].凝固过程中 TiN 的液析往往无法避免,是个有待解决的问题.

钢液镁处理作为变质非金属夹杂物的有效手段之一,特别是对于铝脱氧产物 Al_2O_3 ,可将其变质为细小的 Mg-Al-O 复合夹杂弥散分布在钢中^[14-17],镁铝氧化物的高温稳定性好,不易反应,能够作为良好的异质形核剂,来调控钢中夹杂物的尺寸和分布,而且镁铝氧化物与 TiN 的晶格错配度低,可作为其形核核心^[18-20].本文主要研究 Mg 处理对钛微合金钢在凝固过程中 TiN 液析行为的影响,研究结果可为高钛钢种的开发和应用提供基础.

1 试验方法

试验原料为工业纯铁、铝线、试剂纯碳粉、钛铁和含镁包芯线,原料化学成分如表 1 所示.试验在 50 kg 真空感应炉内进行,全程通氩气保护,共进行三炉冶炼试验,其中第 1 炉钢无镁处理,第 2 炉与第 3 炉钢进行镁处理.按照图 1 所示流程进行熔炼,出钢浇铸环节在炉内保护性气氛下进行,浇铸成型的钢锭转移炉外空冷至室温.铸锭尺寸为 $\phi 120$ mm 的圆坯,在铸坯底部切出厚 20 mm 的圆饼从中取样进行化学成分检测,分别在截面的边部、1/4 处以及中心处切取 10 mm×10 mm×12 mm 的试样,用来分析铸坯凝固过程中夹杂物的析出规律.试样经砂纸打磨抛光后,利用 Phenom 台式扫描电镜对其中夹杂物的成分和形貌进行分析,利用扫描电镜的连续拍照功能,在 5 000 倍下连续拍摄,每个试样取 5 mm×0.5 mm 扫描区域,共计约 1 360 个视场,然后采用 IPP 6.0 软件统计夹杂物的数量与粒径.采用 ICP 检测钢中碳、钛、铝、镁含量,采用 ONH-3000 氧氮分析仪分析钢中的氧、氮含量.

表 1 原料化学组成(质量分数)
Table 1 Chemical compositions of raw materials(mass fraction)

原料	Fe	C	Si	Mn	S	Al	Mg	Ti	其他
工业纯铁	99.9	0.002	0.01	0.03	0.007	0.001	—	—	0.05
含镁包芯线	49.21	—	32.41	—	—	10.60	7.78	—	—
钛铁	27.10	0.08	0.20	0.10	0.005	1.60	—	70.90	0.01

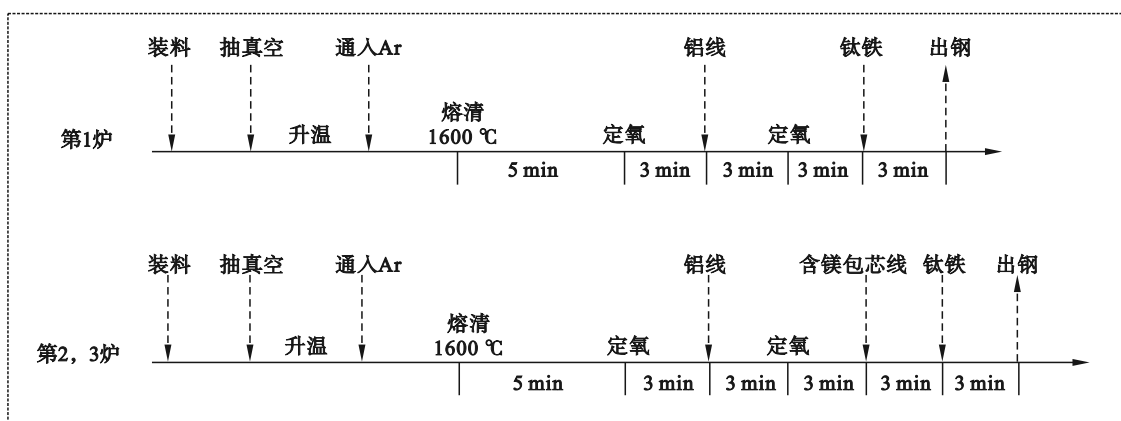


图 1 冶炼流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of smelting process

2 试验结果与讨论

2.1 试验钢的化学成分

试验钢的化学成分如表 2 所示.第 2 炉与第 3

炉中 $w(Mg)=5\times 10^{-6}$.

2.2 镁处理对夹杂物成分和形貌的影响

在钢坯上取样,用 SEM-EDS 分析试样中夹杂物的成分和形貌.3 炉钢中典型夹杂物的成分

及形貌如图2所示,由图2a可知,第1炉钢中夹杂物分为两类,一类是均一相的TiN和Al₂O₃单夹杂, TiN夹杂为带棱角的规则四方形, Al₂O₃夹杂则是呈现不规则形状;另一类是以近球形Al₂O₃为核心外围包裹TiN的复相夹杂.经过镁处理的

第2,3炉钢,其中典型夹杂物的成分及形貌如图2b和图2c所示,两炉钢中夹杂物类型相同,主要是单相的TiN, MgO·Al₂O₃夹杂,以MgO·Al₂O₃为核心外围包裹TiN的复相夹杂.

表2 试验钢化学成分(质量分数)
Table 2 Chemical compositions of steels(mass fraction)

炉次	C	Ti	Al(s)	Mg	O	N	%
1	0.049	0.037	0.025	—	0.003 4	0.003 4	
2	0.051	0.026	0.028	0.000 5	0.001 1	0.006 6	
3	0.047	0.028	0.058	0.000 5	0.000 8	0.009 1	

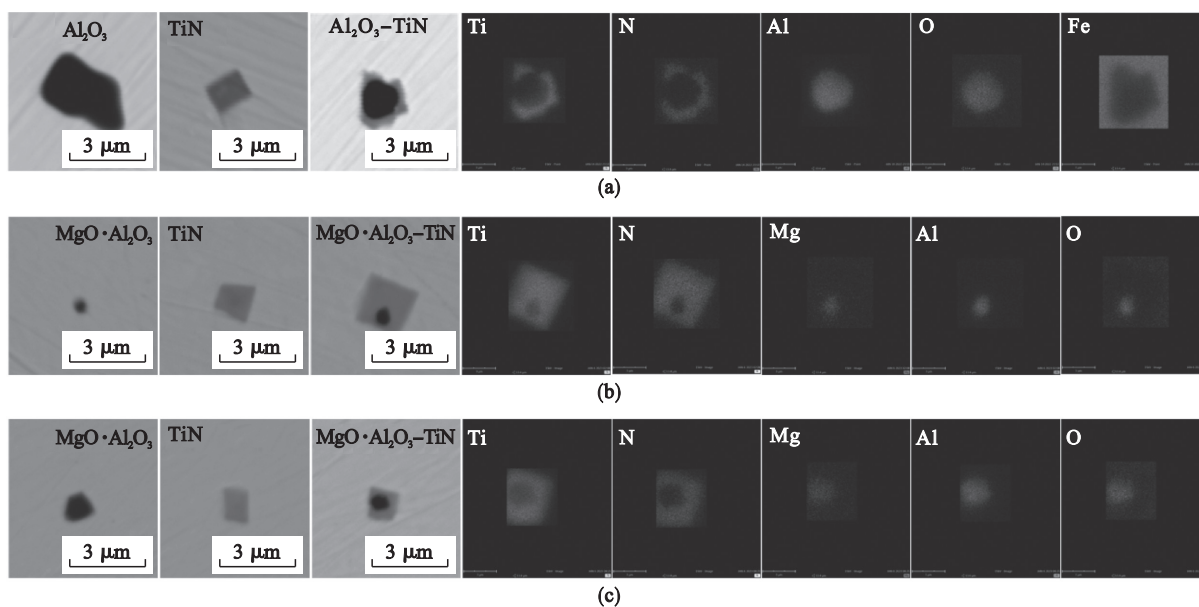


图2 三炉钢中夹杂物的成分及形貌

Fig. 2 Composition and morphology of inclusions in three furnace steels

(a)—第1炉; (b)—第2炉; (c)—第3炉.

利用热力学计算软件FactSage 8.1的相图模块,对Fe-Al-Ti-O和Fe-Al-Ti-Mg(5×10^{-6})-O体系在1600℃不同氧势下进行计算,结果如图3所示.从图3a可以看出,Fe-Al-Ti-O体系内存在Ti₂O₃, Ti₃O₅, Al-Ti-O(液相)和Al₂O₃四个稳定相,而从图3b可以看出,Fe-Al-Ti-Mg(5×10^{-6})-O体系中只存在两个稳定相,分别为Al-Ti-Mg-O(液相)和MgO·Al₂O₃相.对于第1炉钢的成分,在图3a中对应的平衡物相为Al₂O₃相;加入金属镁后,对于第2炉和第3炉钢所对应的成分,钢中平衡物相控制为MgO·Al₂O₃尖晶石相,如图3b所示.也就是说,经过镁处理后,可将体系中的Al₂O₃相变质为MgO·Al₂O₃相,而液相中生成的高熔点氧化物Al₂O₃和MgO·Al₂O₃为TiN的形核提供了有利条件,遂形成了以高熔点氧化物为核心外围包裹TiN的复相夹杂.

2.3 镁处理对夹杂物数量和尺寸的影响

利用扫描电镜结合IPP软件,对铸坯横截面边部、1/4处和中心处试样中夹杂物的数量和尺寸进行统计,从第1炉钢所浇铸锭中取样统一标记为1号试样(共3枚),2,3炉钢所浇铸锭中取样分别标记为2,3号试样(各3枚).统计结果如图4所示,在铸坯边部夹杂物的数量最多,但尺寸较小,都在1μm左右;在铸坯1/4处和中心处夹杂物的数量明显减少,但夹杂物的尺寸相对增加.1号试样在铸坯1/4处和中心处夹杂物的平均粒径分别为2.46, 2.03 μm, 2号试样在同位置处夹杂物的平均粒径分别为1.41, 1.39 μm, 3号试样在同位置处夹杂物的平均粒径分别为1.34, 1.26 μm.

对3组试样不同位置处平均粒径小于2 μm的夹杂物数量进行了统计,结果如图5所示.由图可知,2,3号试样在铸坯1/4处和中心处尺寸小于

2 μm 的夹杂物数量占比可达到 80% 以上, 明显高于 1 号试样. 可以看出, 镁处理后在铸坯不同位

置处夹杂物的数量密度增加, 平均粒径明显减小, 钢中夹杂物分布呈现弥散化.

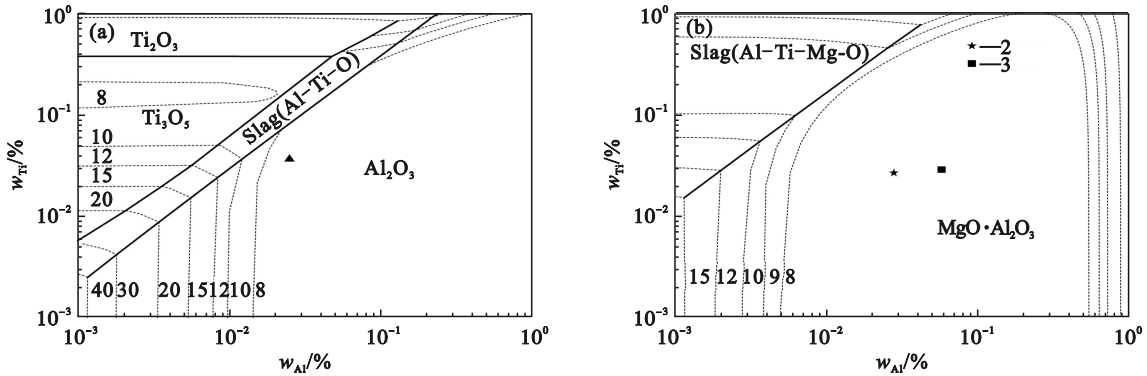


图 3 不同钢液体系夹杂物优势区域图
Fig. 3 Dominant area map of inclusions in different molten steel systems
(a)—Fe-Al-Ti-O; (b)—Fe-Al-Ti-Mg(5×10^{-6})-O.

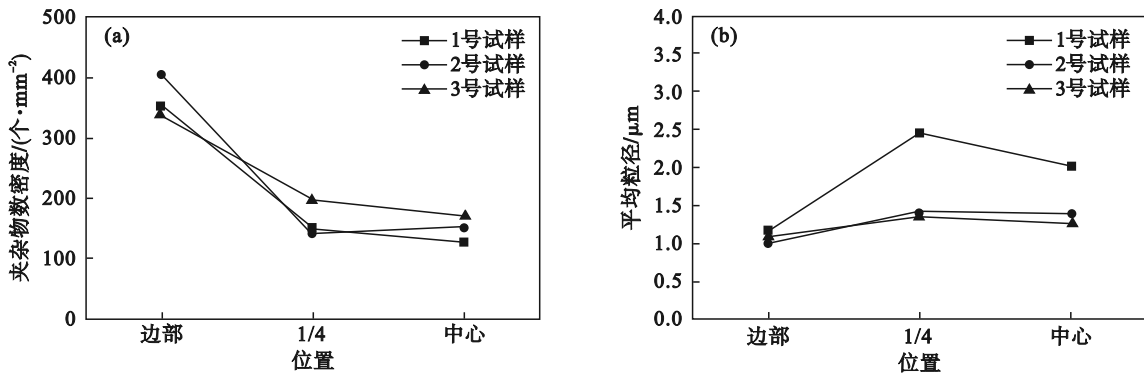


图 4 夹杂物数密度和平均粒径随位置变化
Fig. 4 Variation of inclusion density and average grain diameter with position
(a)—夹杂物数密度; (b)—夹杂物粒径.

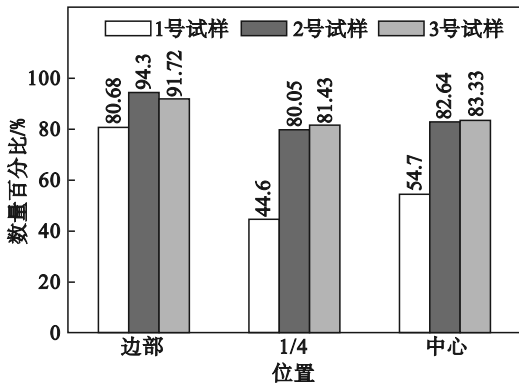


图 5 不同位置处尺寸小于 2 μm 夹杂物所占比例
Fig. 5 Percentage of inclusions less than 2 μm at different positions

2.4 镁处理对 TiN 析出行为的影响

考虑到向钢液中添加 Mg 后, 有可能会对钢中 [Ti], [N] 活度产生影响, 进而影响 TiN 的析出, 所以基于实验钢成分利用 FactSage 8.1 软件中的平衡模块, 计算在 1 600 °C 以溶质元素纯物质系统选定相为标准态, 考察 Mg 含量变化对钢

中 [Ti], [N] 活度的影响, 结果如图 6 所示. 由图可知, 向钢液中添加 Mg 后对 [Ti], [N] 活度几乎没有影响, 所以后续讨论中不再考虑这部分因素.

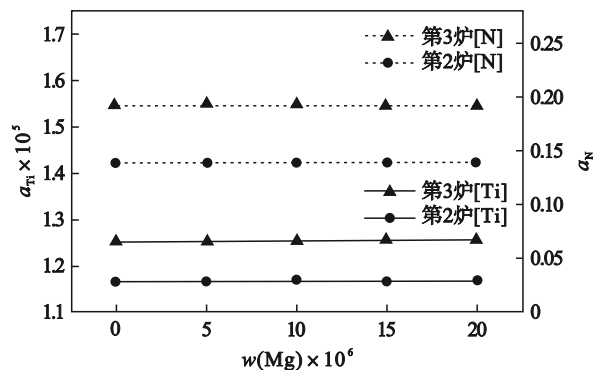


图 6 Mg 含量对 [Ti] 和 [N] 活度的影响
Fig. 6 Effect of Mg content on [Ti] and [N] activities

继续用软件的平衡模块分别计算 3 炉钢在凝固过程中夹杂物的析出情况, 结果如图 7 所示, 图 7a 展示了第 1 炉钢凝固过程中析出相含量随温度的变化情况, Al₂O₃ 在高温液相中生成, 降温过程

中其含量基本保持不变; TiN 的析出温度为 1 516.2 °C, 介于液相线温度和固相线温度之间, 说明 TiN 是在凝固前沿的液相中开始析出; $Ti_4C_2S_2$ 在 1 338 °C 从奥氏体中析出, 说明钢中的钛过量, 没有充足的氮与之结合. 第 2 炉钢的凝固过程如图 7b 所示, 镁处理后高温液相中的 Al_2O_3 变质为 $MgO \cdot Al_2O_3$, 随温度降低其含量保持不变; TiN 的析出温度为 1 520 °C, 介于液相线温度和固相线温度之间, 同样是在凝固前沿的液相中析出; 随温度降低 $Ti_4C_2S_2$ 和 MnS 分别在 1 174 °C 和 1 056 °C 从奥氏体中析出. 第 3 炉钢的凝固过程如图 7c 所示, 高温液相中生成的 $MgO \cdot Al_2O_3$ 在凝固降温过程中稳定存在; 在 1 524 °C, TiN 于凝固前沿的液相中析出; 随温度降低 MnS 在 1 414 °C 从奥氏体中析出. 第 2 炉和第 3 炉钢的成分相近, 但是氮质量分数有明显差别, 当钢中 N 从 66×10^{-6} 升高到 91×10^{-6} , 第 3 炉钢在 1 000 °C 以上无 $Ti_4C_2S_2$ 析出, 说明钢中 Ti 和 N 的结合能力要强于 C, S, 从而生成更加稳定的 TiN, 这也导致 TiN 的析出温度升高和析出量增加, $Ti_4C_2S_2$ 中被 N 取代的这部分 S 与 Mn 结合, 因此 MnS 的析出温度升高和析出量增加.

由试验钢凝固过程热力学计算结果可知, 3 炉钢中的 TiN 均是在凝固前沿的液相中析出, 对 3 组试样中不同尺寸的 TiN 在铸坯不同位置的分布进行统计, 结果如图 8 所示. 由于在铸坯的不同位置钢液的冷却速度不同, 铸坯边部冷却速度快, 能够快速达到 TiN 的析出浓度积, 此时 TiN 会大量形核析出, 由于温度低, TiN 没有足够的时间长大, 因此在铸坯边部会生成大量小尺寸的 TiN, 3 组试样中在铸坯边部, 尺寸介于 0~2 μm 的 TiN 数量占比均达 90% 以上. 随着钢液凝固的进行, 一方面冷却速度降低, 夹杂物的形核过冷度变小, TiN 的凝固速度和形核率会降低, TiN 的数量会有所减少; 另一方面, 由于溶质元素在固液相中的溶解度不同, Ti 和 N 会在凝固前沿的液相中不断偏析富集, 这样势必会超过该温度下平衡的钛氮积, 生成大颗粒的液析 TiN. 因此, 在铸坯的 1/4 处和中心处 TiN 的数量减少, 尺寸有所增加, 但是从图 8 中可以看出, 2, 3 号试样在铸坯 1/4 处和中心处大尺寸 TiN 夹杂的数量, 明显少于未经镁处理的 1 号试样. 3 组试样在铸坯 1/4 处, TiN 的平均粒径分别为 2.48, 1.50, 1.48 μm ; 3 组试样在铸坯中心处, TiN 的平均粒径分别为 2.11, 1.45, 1.38 μm .

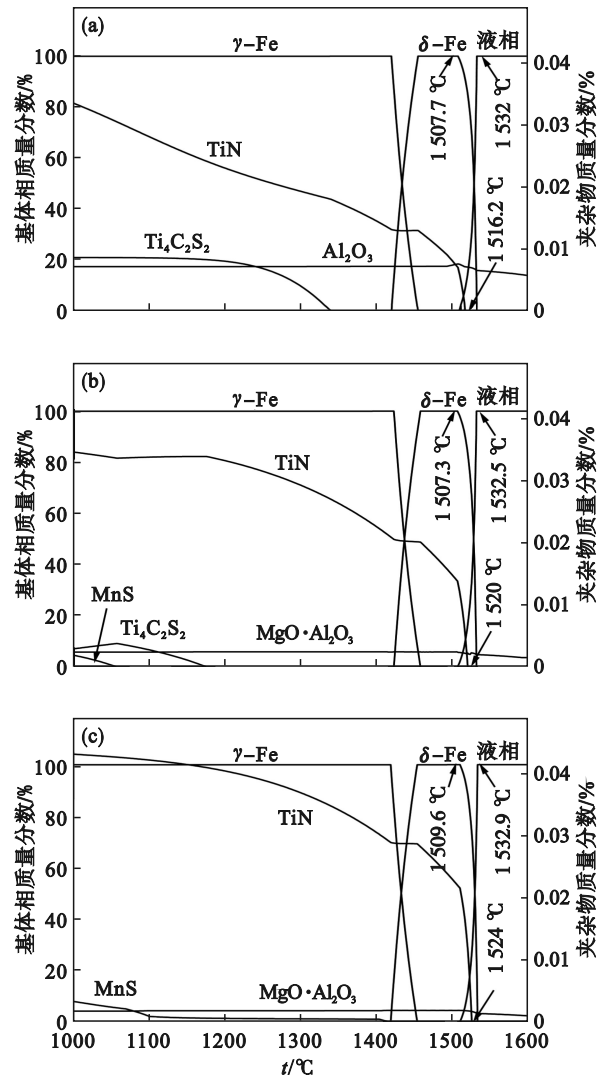


图 7 3 炉钢凝固过程平衡析出相图
Fig. 7 Equilibrium precipitation phase diagrams of three furnace steels during solidification
(a)—第 1 炉; (b)—第 2 炉; (c)—第 3 炉.

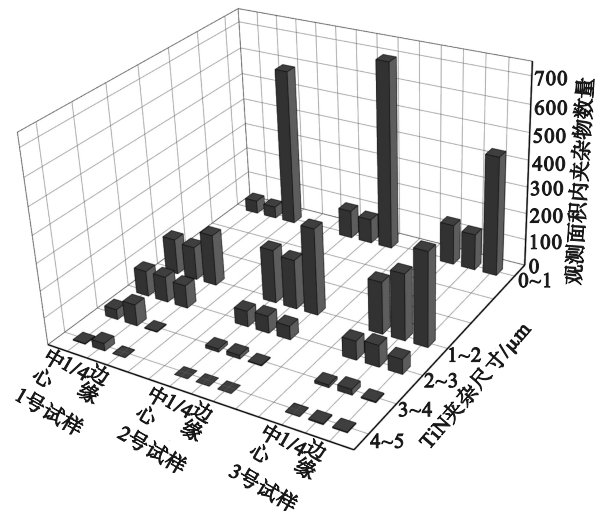


图 8 3 组试样中不同位置处不同尺寸 TiN 夹杂的数量
Fig. 8 The content of TiN inclusions with different sizes at different positions in three groups of samples

根据以上研究内容可知,镁处理后钢中夹杂物的数密度增加,平均粒径减小.究其原因,向钢液中添加 Mg 可以使钢中的 Al_2O_3 夹杂变质为小尺寸的 $MgO \cdot Al_2O_3$,而 $MgO \cdot Al_2O_3$ 在钢液中有不易聚合、分布弥散的特点,此外其与 TiN 的晶格错配度为 5.02%,晶格错配度小于 12% 均被认为是有效形核范围^[18],故钢液在凝固过程中 TiN 会更加趋向于以 $MgO \cdot Al_2O_3$ 异质基底为核心进行形核析出.同样作为高熔点夹杂的 Al_2O_3 ,其与 TiN 的最小错配度为 11.7%,属于有效形核范围,因此钢液中的 Al_2O_3 夹杂也可作为 TiN 的形核核心^[21],但是错配度越小,新相与基底相的相似度越高,形核需要克服的能垒越小,越容易相互结合.

3 组试样在不同位置处夹杂物的特征值如表 3 所示,对不同位置处不同类型夹杂物的数量占

比进行统计,结果如图 9 所示.3 组试样中各位置处夹杂物的总数量分别为 1 944, 2 008, 2 063, TiN 夹杂的总数量分别为 1 569, 1 743, 1 763. 3 号试样无论是夹杂物总数量还是 TiN 夹杂总数量都是最多,并且在铸坯 1/4 处和中心处夹杂物的数量最多,这是由于 3 号钢中的 N 偏高导致的.通过以上统计数据结合图 9,可以发现,2,3 号试样在夹杂物易聚合长大的铸坯 1/4 处和中心处,夹杂物总数量和 TiN 夹杂总数量均高于 1 号试样;夹杂物平均粒径和 TiN 夹杂平均粒径均小于 1 号试样;夹杂物中复相 TiN 数量占比均高于 1 号试样.可以认为,向钢液中添加 Mg 以后,将钢中的 Al_2O_3 变质为 $MgO \cdot Al_2O_3$, $MgO \cdot Al_2O_3$ 作为钢液降温过程中 TiN 凝固的析出核心,使 TiN 夹杂尺寸减小、分布弥散化,能够在一定程度上缓解 TiN 的液析问题.

表 3 钢中全部夹杂物特征统计结果
Table 3 Statistical results of characteristics of all inclusions in steel

试样	位置	夹杂物数量	数密度/(个·mm ⁻²)	平均粒径/μm	平均面积/μm ²
1	边部	1123	449.2	1.17	1.51
	1/4	417	166.8	2.46	3.14
	中心	404	161.6	2.03	2.83
2	边部	1122	448.8	1.00	1.04
	1/4	431	172.4	1.41	2.03
	中心	455	182.0	1.39	2.01
3	边部	954	381.6	1.08	1.24
	1/4	587	234.8	1.34	2.00
	中心	522	208.8	1.26	1.74

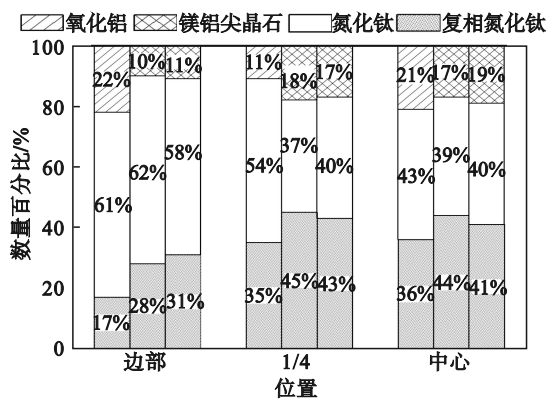


图 9 3 组试样中不同位置处不同类型夹杂物所占比例
Fig. 9 Percentage of different types of inclusions at different positions in three groups of samples

3 结 论

1) 热力学计算结果表明,钢中 TiN 夹杂均在凝固前沿的液相中生成.钢中氮含量增加,钢液

凝固过程中 TiN 的析出温度升高和析出量增加,并对后续 $Ti_4C_2S_2$ 和 MnS 的析出产生影响.

2) 在非镁处理条件下,铸坯 1/4 处和中心处 TiN 夹杂的平均粒径分别为 2.48 和 2.11 μm,镁处理后,尺寸分别降为 1.50, 1.45 μm 和 1.48, 1.38 μm,数密度也有所增大.

3) 添加微量 Mg, $MgO \cdot Al_2O_3$ 即可稳定存在于钢中并在钢液降温过程中成为 TiN 的凝固核心,促使 TiN 夹杂分布弥散,减少了大尺寸 TiN 的生成.

参考文献:

[1] Huo X D, Xia J N, Li L J, et al. A review of research and development on titanium microalloyed high strength steels [J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(6): 62002.
[2] Baker T N. Titanium microalloyed steels [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2019, 46(1): 1-55.
[3] 陈波涛, 张泽峰, 邢立东, 等. 含钛微合金钢凝固过程中

- TiN的析出行为分析[J].连铸,2021(3):28-34.
(Chen Bo-tao, Zhang Ze-feng, Xing Li-dong, et al. Analysis of TiN precipitation behavior in titanium-bearing microalloyed steel during solidification [J]. *Continuous Casting*, 2021(3):28-34.)
- [4] Wang S Z, Gao Z J, Wu G L, et al. Titanium microalloying of steel: a review of its effects on processing, microstructure and mechanical properties [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022, 29(4): 645-661.
- [5] Peng Z W, Li L J, Gao J X, et al. Precipitation strengthening of titanium microalloyed high-strength steel plates with isothermal treatment [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, 657: 413-421.
- [6] Medina S F, Chapa M, Valles P, et al. Influence of Ti and N contents on austenite grain control and precipitate size in structural steels [J]. *ISIJ international*, 1999, 39(9): 930-936.
- [7] Wu S W, Liu Z Y, Zhou X G, et al. Precipitation behavior of Ti in high strength steels [J]. *Journal of Central South University*, 2017, 24(12): 2767-2772.
- [8] Charleux M, Poole W J, Militzer M, et al. Precipitation behavior and its effect on strengthening of an HSLA-Nb/Ti steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32: 1635-1647.
- [9] Sun M X, Xu Y, Du W B. Influence of coiling temperature on microstructure, precipitation behaviors and mechanical properties of a low carbon Ti micro-alloyed steel [J]. *Metals*, 2020, 10(9): 1173.
- [10] 屈天鹏,王德永,徐周,等.含Nb-Ti微合金钢连铸过程中TiN析出行为研究[J].连铸,2017,42(2):32-38.
(Qu Tian-peng, Wang De-yong, Xu Zhou, et al. Study on TiN precipitation behavior during continuous casting of Nb-Ti microalloyed steel [J]. *Continuous Casting*, 2017, 42(2): 32-38.)
- [11] 杨俊,王新华,龚志翔,等.超低氧车轮钢中TiN夹杂析出的热力学分析及控制[J].北京科技大学学报,2010,32(9): 1138-1143.
(Yang Jun, Wang Xin-hua, Gong Zhi-xiang, et al. Thermodynamic analysis and control of TiN inclusion precipitation in ultra-low oxygen wheel steel [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2010, 32(9): 1138-1143.)
- [12] 郑万,瞿勇,付学好,等.含钛高强钢中夹杂物析出行为研究[J].武汉科技大学学报,2017,40(3):161-166.
(Zheng Wan, Qu Yong, Fu Xue-hao, et al. Study on precipitation behavior of inclusions in titanium-bearing high-strength steel [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2017, 40(3): 161-166.)
- [13] Xing L D, Guo J L, Li X, et al. Control of TiN precipitation behavior in titanium-containing micro-alloyed steel [J]. *Materials Today Communications*, 2020, 25: 101292.
- [14] Wang H, Li J, Shi C B, et al. Evolution of Al₂O₃ inclusions by magnesium treatment in H13 hot work die steel [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2017, 44(2): 128-133.
- [15] Jiao W C, Li H B, Feng H, et al. Significant improvement of cleanliness and macro/microstructure of as-cast AISI M42 high-speed steel by Mg treatment [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2022, 53(2): 1196-1211.
- [16] Saxena S K. Using magnesium treatment to produce super clean steel with excellent mechanical property [J]. *Southeast Asia Iron and Steel Institute*, 1997, 7: 42-52.
- [17] Kimura S, Nakajima K, Mizoguchi S. Behavior of alumina-magnesia complex inclusions and magnesia inclusions on the surface of molten low-carbon steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2001, 32(1): 79.
- [18] 王德永,屈天鹏.镁洁净钢新技术发展与展望[J].炼钢, 2020, 36(5): 1-13.
(Wang De-yong, Qu Tian-peng. Development and prospect of new technology for clean magnesium steel [J]. *Steelmaking*, 2020, 36(5): 1-13.)
- [19] Kim H S, Chang C, Lee H. Evolution of inclusions and resultant microstructural change with Mg addition in Mn/Si/Ti deoxidized steels [J]. *Scripta Materialia*, 2005, 53(11): 1253-1258.
- [20] Kim J Y, Oh N R, Oh Y H, et al. Hetero-epitaxial nucleation of ferrite at a TiN encapsulating MgAl₂O₄ during rapid solidification in a newly developed ferritic stainless steel [J]. *Materials Characterization*, 2017, 132: 348-353.
- [21] 李宁,薛正良,王璐.SWRH 92A帘线钢中异相形核TiN复合夹杂析出机制[J].钢铁研究学报,2022,34(10): 1118-1126.
(Li Ning, Xue Zheng-liang, Wang Lu. Precipitation mechanism of heterogeneous nucleation TiN complex inclusions in SWRH 92A cord steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022, 34(10): 1118-1126.)