

钛微合金化高强钢凝固过程中钛夹杂物的析出行为研究^①

刘爱华¹, 孔令男¹, 李春辉², 齐江华², 陈志国¹, 阳宇晨¹, 李菲¹

(1.湖南人文科技学院 能源与机电工程学院, 湖南 娄底 417000; 2.湖南华菱涟源钢铁有限公司, 湖南 娄底 417009)

摘要: 通过热力学计算结合显微分析的方法,研究了钛微合金化高强钢中 Ti、N 元素对钢液凝固过程中 TiN 夹杂物析出行为的影响。热力学计算结果表明:TiN 夹杂物在钢液凝固前沿的析出行为是无法避免的,但可以通过减小 $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 的值来延缓 TiN 夹杂物析出;TiN 夹杂物最终尺寸主要受钢液中初始 N 含量的影响,减小初始 N 含量可以缩小 TiN 夹杂物的尺寸。显微分析结果显示,Ti 和 N 元素含量(质量分数)由 0.12% 和 0.005% 分别减小到 0.08% 和 0.003% 时,TiN 夹杂物的数密度和平均尺寸分别下降了 27.1% 和 50.2%,进一步证实了热力学的计算结果。

关键词: 微合金化; 高强钢; 热力学; 夹杂物; TiN; 析出行为; 钛; 氮

中图分类号: TG335

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.031

文章编号: 0253-6099(2025)03-0185-06

Precipitation Behavior of Ti-Containing Inclusions During Solidification of Ti Microalloyed High-Strength Steel

LIU Aihua¹, KONG Lingnan¹, LI Chunhui², QI Jianghua², CHEN Zhiguo¹, YANG Yuchen¹, LI Fei¹

(1.School of Energy and Electromechanical Engineering, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, Hunan, China; 2.Hunan Valin Lianyuan Iron and Steel Co., Ltd., Loudi 417009, Hunan, China)

Abstract: Effects of elements Ti and N on the precipitation behavior of TiN inclusions during the solidification of Ti-microalloyed high-strength steel were studied by thermodynamic calculation and microscopic analysis. Thermodynamic calculation results indicate that the precipitation of TiN inclusions is unavoidable at the solidification front, but can be delayed by reducing the value of $w(N)_0 \times w(Ti)_0$. The final size of TiN inclusions is mainly affected by the initial nitrogen content in molten steel, and TiN inclusions can be smaller by reducing the initial nitrogen content. Microscopic analysis shows that with the contents (mass fraction) of Ti and N decreasing from 0.12% and 0.005% to 0.08% and 0.003%, respectively, the number density and average size of TiN inclusions can be decreased by 27.1% and 50.2%, which also confirms the thermodynamic calculation results.

Key words: microalloying; high-strength steel; thermodynamics; inclusion; TiN; precipitation behavior; titanium; nitrogen

低成本高强钢的使用对船舶、高层建筑、桥梁、汽车、工程装备等轻量化有着重要意义。为了获取低成本高强钢,在通过控轧控冷技术生产的同时辅以向钢中添加一种或多种微合金元素,可以获取更小的晶粒尺寸和更优异的综合力学性能^[1-2]。目前使用较多的微合金元素为 Nb、V 和 Ti,单独或组合添加都可以在钢中形成相对稳定的氮化物、碳化物或碳氮化物,这些

析出物会起到细晶强化、位错强化和第二相强化等作用^[3-6]。其中,Ti 元素易与 C、N 原子组合形成 TiN 和 TiC,TiN 产生的沉淀强化效果很好,通过钉扎作用缩小奥氏体尺寸^[7]。然而,Ti 元素性质活泼,在高温下易与钢中的 O、N、C 结合生成较大的带有棱角的夹杂物,影响钢基体的连续性,对钢材的抗疲劳性能、延性、韧性、焊接性能及耐腐蚀性能都有不利影响^[5,8-10]。因

① 收稿日期: 2024-12-25

基金项目: 湖南省自然科学基金(2023JJ50481); 湖南人文科技学院研究生科研创新项目(ZSC2023Y37, ZSC2023Y46)

作者简介: 刘爱华(1987—),女,吉林长春人,硕士研究生,主要研究方向为高强钢的组织与力学性能。Email:329935812@qq.com

通信作者: 孔令男(1986—),男,吉林长春人,博士,副教授,主要研究方向为高强钢、耐磨钢等先进钢铁材料的组织与性能调控。Email: unhyde@163.com

此,为了确保钢的性能和质量,需要控制钢中的钛夹杂物数量和尺寸。本文从大尺寸 TiN 夹杂物产生的源头入手,借助热力学计算并结合显微分析,对凝固过程中的元素偏析、夹杂物析出和长大过程进行分析,明确 TiN 夹杂物析出的影响因素,可为提高高强钢性能提供理论参考。

1 实验材料及方法

实验原料为 LG700T 钛微合金化高强钢。首先,通过理论计算,明确 TiN 夹杂物析出的热力学条件及其最终尺寸的影响因素。然后,在某钢企采用 200 t 顶底复吹转炉熔炼实验用钢,经过炉外精炼后浇铸成连铸坯。最后,在连铸坯相同位置取样,使用直读光谱仪 (MAXX07-F) 分析实验用钢的化学成分。并经过切割、研磨和抛光后,采用全自动夹杂物分析系统扫描电镜 (EVO18) 进行夹杂物的物相分析。

2 实验结果与分析

2.1 钢中 Ti 和 N 元素的偏析

计算所用钢的化学成分如表 1 所示。

表 1 计算所用钢化学成分 (质量分数)

C	Si	Mn	Al	Ti	Nb
0.071	0.13	1.85	0.03	0.10	0.05
Cr	Mo	N	P	S	Fe
0.23	0.21	0.006	0.01	0.000 5	余量

根据表 1 数据,计算得到相应的液相线、固相线温度分别为:

$$T_l = 1811 - \sum \Delta t_{l(i)} \cdot w[i]_0 \quad (1)$$

$$T_s = 1811 - \sum \Delta t_{s(i)} \cdot w[i]_0 \quad (2)$$

式中: T_l 为液相线温度, K; T_s 为固相线温度, K; $\Delta t_{l(i)}$ 和 $\Delta t_{s(i)}$ 分别为液态和固态温度因数, 具体数值^[11]见表 2; $w[i]_0$ 为溶质 i 的初始含量 (质量分数), %。

表 2 $\Delta t_{l(i)}$ 和 $\Delta t_{s(i)}$ 值

Table 2 $\Delta t_{l(i)}$ and $\Delta t_{s(i)}$ values

元素	$\Delta t_{l(i)}$	$\Delta t_{s(i)}$
C	65	175
Mn	5	30
Si	8	20
Ti	20	40
N	90	—
P	30	280
S	25	575

随着钢液凝固, 溶质元素扩散能力逐渐减弱。此时, 可通过 Ohnaka 方程计算溶质 i 的偏析比:

$$\frac{w[i]}{w[i]_0} = \left[1 - \left(1 - \frac{\beta_{[i]} k}{1 + \beta_{[i]}} \right) \cdot g \right]^{\frac{k-1}{1 - \beta_{[i]} k / (1 + \beta_{[i]})}} \quad (3)$$

式中: $w[i]$ 为溶质 i 在钢液凝固前沿的实际含量 (质量分数), %; $\beta_{[i]}$ 为逆扩散系数, cm^2/s ; k 为溶质 i 的平衡分配系数; g 为凝固分数。

根据表 1 数据:

$$\beta_{[i]} = \frac{4D(T_l - T_s)}{(169.1 - 720.9 \times w[i]_0)^2 R_c^{0.013}} \quad (4)$$

式中: D 为溶质 i 在固相中的扩散系数, cm^2/s ; R_c 为冷却速率, K/s 。

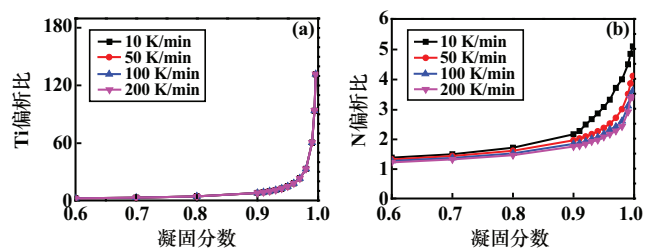
各元素的平衡分配系数和扩散系数^[12]见表 3。其中 R 为理想气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为温度, K。

表 3 各元素的平衡分配系数和扩散系数

Table 3 Equilibrium distribution coefficient and diffusion coefficient of each element

元素	k	$D/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
C	0.34	$0.0761 \exp[-143511/(RT)]$
Si	0.52	$0.30 \exp[-251458/(RT)]$
Mn	0.78	$0.055 \exp[-249366/(RT)]$
P	0.13	$0.010 \exp[-182841/(RT)]$
S	0.035	$2.4 \exp[-223425/(RT)]$
N	0.48	$0.91 \exp[-168600/(RT)]$
Ti	0.30	$0.15 \exp[-250000/(RT)]$

根据式 (1) ~ (4) 计算钢液凝固过程中 Ti 和 N 在不同冷却速率下的偏析比, 结果如图 1 所示。



(a) Ti; (b) N

图 1 钢中 Ti 和 N 元素在不同冷却速率下的偏析比

Fig. 1 Segregation ratios of elements Ti and N in steel at different cooling rates

由图 1 可知, 在钢液凝固初、中期, Ti 和 N 偏析较轻微。钢液凝固分数超过 0.95 时, Ti 和 N 的偏析急剧增加。并且, 冷却速率小于 200 K/min 时, Ti 的偏析行为基本不随冷却速率变化而变化, 但 N 的偏析却随着冷却速率减慢而明显增强。Ti 和 N 的偏析行为使大

量 Ti 和 N 在凝固前沿发生聚集,不可避免地析出 TiN 夹杂物。

2.2 TiN 夹杂物析出热力学条件

TiN 夹杂物析出时对应的平衡活度积 K_{TiN} 为:

$$\lg K_{TiN} = 5.63 - \frac{15\,208.68}{T_{s-1}} \quad (5)$$

式中 T_{s-1} 为凝固前沿温度, K。

$$T_{s-1} = 1\,181 - \frac{1\,181 - T_1}{1 - g \frac{T_1 - T_s}{1\,181 - T_s}} \quad (6)$$

在凝固过程中, Ti 和 N 因偏析发生聚集, 此时, TiN 的实际活度积 Q_{TiN} 为:

$$Q_{TiN} = f_{Ti} \cdot f_N \cdot w(Ti)_0 \cdot w(N)_0 \cdot \frac{(1-g)^{-0.67}}{1-0.52g} \quad (7)$$

式中 f_{Ti} 和 f_N 分别为 Ti 和 N 的活度系数, 满足:

$$\lg f_{Ti} = \left(\frac{2\,557}{T_{s-1}} - 0.365 \right) \lg \left(\sum e_{Ti}^i w[i] \right) \quad (8)$$

$$\lg f_N = \left(\frac{3\,280}{T_{s-1}} - 0.75 \right) \lg \left(\sum e_N^i w[i] \right) \quad (9)$$

式中 e_{Ti}^i 和 e_N^i 分别为 Ti 和 N 与钢中元素之间的相互作用系数, 具体数值^[13]见表 4。

表 4 Ti 和 N 与各元素的相互作用系数

Table 4 Interaction coefficients of Ti and N with each element

元素	与各元素的相互作用系数									
	C	Si	Mn	P	S	N	Ti	Cr	Al	
N	0.13	0.047	-0.02	0.045	0.007	0	-0.53	-0.047	-0.028	
Ti	-0.19	2.1	-0.43	-0.0064	-0.11	-2.03	0.013	0.055	—	

将式(5)~(6)、式(7)~(9)分别联立, 可得到 N 和 Ti 对 TiN 夹杂物析出热力学条件的影响, 如图 2 所示。由图 2 可知, 随着钢液凝固过程的推进, 由于偏析作用, TiN 的实际溶度积发生较大变化, 当 TiN 的实际溶度积与平衡溶度积相等时, TiN 夹杂物析出。即使钢液中 Ti 和 N 含量控制在很低的水平 (Ti 0.05%, N 0.002%), 仍然有 TiN 夹杂物析出。因此, TiN 夹杂物在钢液凝固前沿析出行为是无法避免的。并且, 随着 Ti 和 N 含量增加, TiN 夹杂物更易析出。

图 3 为钢中初始 N 和 Ti 含量对钢液凝固分数的影响。由图 3 可以看出, 钢中 N 和 Ti 任一元素含量增加都会使钢液凝固分数减小, 这意味着 TiN 夹杂物析出时间提前。并且, 对比钢液凝固分数与 N 和 Ti 含量的比值发现, N 对凝固分数的减小作用约为 Ti 对凝固分数减小作用的 10.5 倍。因此, 通过控制初始 N 含量来延缓 TiN 夹杂物析出时间的作用会更明显。

图 4 为初始 N、Ti 含量对 TiN 夹杂物析出温度的影响

影响。由图 4 可见, 钢中 N 或 Ti 任一元素含量增加都会使 TiN 夹杂物析出温度升高。因此, 可以适当控制

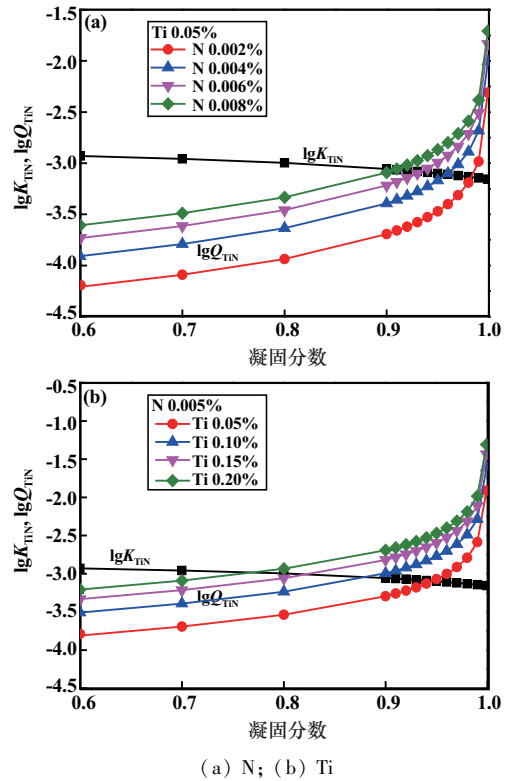


图 2 N 和 Ti 对 TiN 夹杂物析出热力学条件的影响
Fig. 2 Effects of N and Ti on thermodynamic conditions for precipitation of TiN inclusions

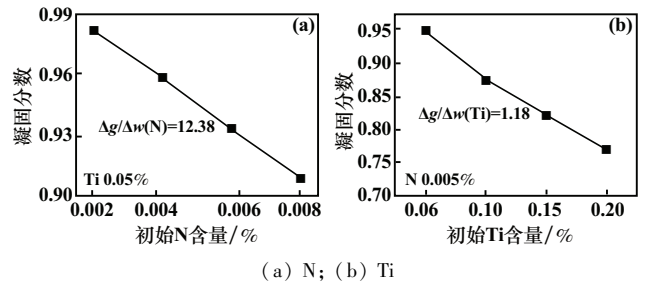


图 3 钢中初始 N 和 T 含量对钢液凝固分数的影响
Fig. 3 Effect of initial N and T contents in steel on solid fraction of molten steel

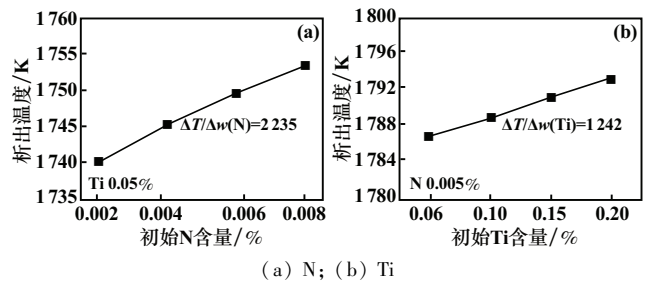


图 4 初始 N、Ti 含量对 TiN 夹杂物析出温度的影响
Fig. 4 Effects of initial N and Ti contents on precipitation temperature of TiN inclusions

钢液中 N 和 Ti 的初始含量,从而降低 TiN 夹杂物析出温度,推迟 TiN 夹杂物的析出时间,以便减小其尺寸及析出数量。此外,从 TiN 析出温度对 N 和 Ti 的比值可看出,N 对析出温度的影响几乎是 Ti 对析出温度影响的 2 倍,严格控制初始 N 含量对延迟 TiN 夹杂物析出时间的作用更显著。

2.3 凝固过程中 TiN 夹杂物的长大

TiN 夹杂物析出后将进入长大过程,其半径 r 计算公式为:

$$r = 10^4 \times \sqrt{\frac{M_{TiN} \cdot \rho_m D_N}{50 M_{Fe} \cdot \rho_{TiN}} \cdot \frac{(w(N) - w(N)_e) \cdot (T_1 - T_s)}{R_c}} \quad (10)$$

式中: r 为夹杂物半径, μm ; M_{TiN} 和 M_{Fe} 分别为 TiN 和 Fe 的摩尔质量, kg/mol ; ρ_{TiN} 和 ρ_m 分别为 TiN 和钢液的密度, kg/m^3 ; D_N 为钢液中 N 的扩散系数, cm^2/s ; $w(N)_e$ 为 N 析出时的平衡质量分数, $w(N)_e = \frac{K_{TiN}}{f_{Ti} \cdot f_N \cdot w(Ti)}$ 。

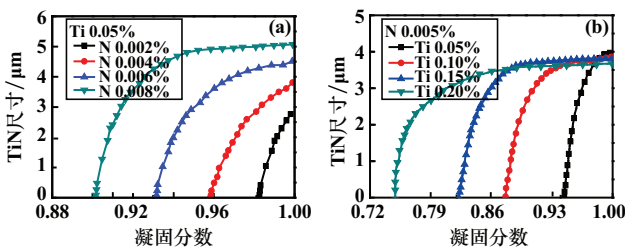
计算 TiN 夹杂物长大所需部分参数如表 5 所示。

表 5 计算 TiN 夹杂物长大所需部分参数

Table 5 Parameters for calculating growth of TiN inclusions

$M_{TiN}/$ ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$)	$\rho_{TiN}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$M_{Fe}/$ ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$)	$\rho_m/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
0.062	5 394	0.056	7 070

初始 N 和 Ti 含量对 TiN 夹杂物尺寸的影响如图 5 所示。由图 5 可知,随着 N 含量增加,TiN 夹杂物尺寸明显增大;而初始 Ti 含量对 TiN 夹杂物尺寸的影响很小。由此可知,降低初始 N 含量可有效减小 TiN 夹杂物的最终尺寸。



(a) N; (b) Ti

图 5 初始 N 和 Ti 含量对 TiN 夹杂物尺寸的影响

Fig. 5 Effects of initial N and Ti contents on TiN inclusion size

2.4 初始 $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 积对 TiN 夹杂物析出的影响

为了进一步明确 N 和 Ti 含量对 TiN 夹杂物的析

出热力学条件的影响,N 含量 0.005%、Ti 含量 0.04%~0.20%时, $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 积对 TiN 夹杂物析出的影响如图 6 所示。由图 6 可知,随着初始 $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 积增加,凝固分数逐渐减小,TiN 夹杂物越早析出。

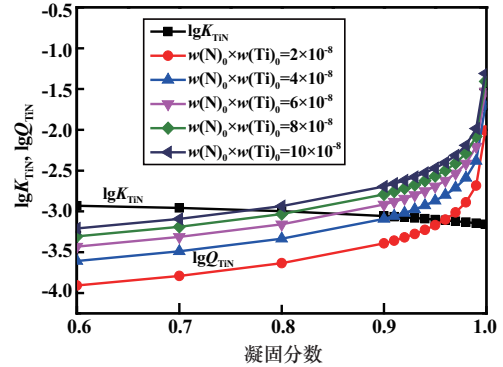


图 6 $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 积对 TiN 夹杂物析出的影响

Fig. 6 Effect of $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ on precipitation of TiN inclusions

不同 $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 积条件下,分别计算了 N 含量 0.002%~0.008%、Ti 含量 0.05%~0.20%时 TiN 夹杂物在凝固前沿析出时所对应的凝固分数,结果如表 6 所示。在所讨论范围内, $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 积增大,凝固分数减小,意味着 TiN 夹杂物越容易析出。因此,影响 TiN 夹杂物析出的决定性因素为 $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 积,而非单一的 Ti 或 N 元素含量。

表 6 不同初始 N 含量和 Ti 含量时 TiN 夹杂物的凝固分数

Table 6 Solid fraction corresponding to TiN inclusions at different initial N and Ti contents

元素	初始含量/%	不同初始 $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 积下的 TiN 夹杂物凝固分数				
		2×10^{-8}	4×10^{-8}	6×10^{-8}	8×10^{-8}	10×10^{-8}
N	0.002	0.958 8	0.907 7	0.853 7	0.811 2	0.768 9
	0.004	0.958 4	0.907 9	0.853 4	0.811 6	0.768 2
	0.005	0.958 5	0.907 8	0.853 6	0.811 9	0.768 9
	0.006	0.958 8	0.908 2	0.853 4	0.811 8	0.768 6
	0.008	0.958 6	0.908 2	0.853 2	0.811 5	0.768 6
Ti	0.05	0.958 9	0.908 3	0.853 3	0.811 4	0.768 8
	0.10	0.958 8	0.908 4	0.853 5	0.811 9	0.769 1
	0.12	0.958 9	0.908 3	0.853 5	0.811 5	0.768 6
	0.15	0.958 7	0.908 1	0.853 4	0.812 1	0.768 7
	0.20	0.958 8	0.907 9	0.853 6	0.811 7	0.768 6

2.5 铸态下钢中夹杂物的显微分析

为进一步验证上文热力学的计算结果,在某钢企连铸连轧生产线试制了 2 批实验用钢,其具体化学成分如表 7 所示。

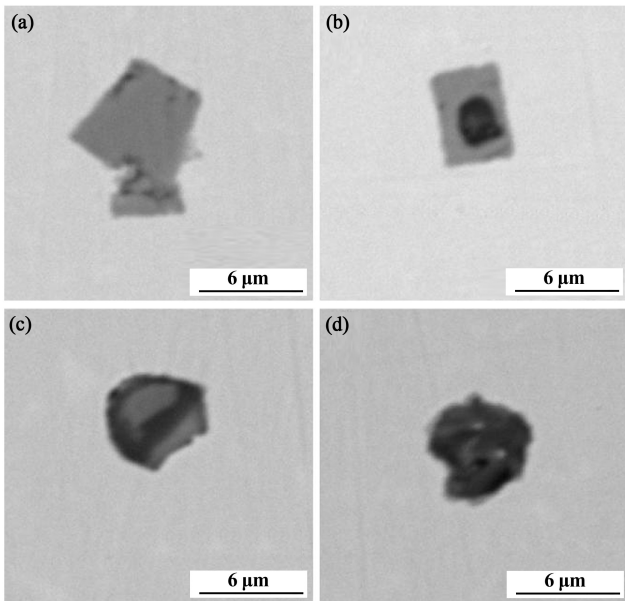
铸坯中各类夹杂物的形貌图如图 7~8 所示。从图 7 可知,1#铸坯中纯 TiN 夹杂物整体呈灰色,形状呈不规

表7 实验用钢化学成分(质量分数)

Table 7 Chemical composition of experimental steels %

编号	C	Si	Mn	Al	Ti	Nb
1#	0.071	0.12	1.83	0.03	0.12	0.05
2#	0.071	0.14	1.84	0.03	0.08	0.05

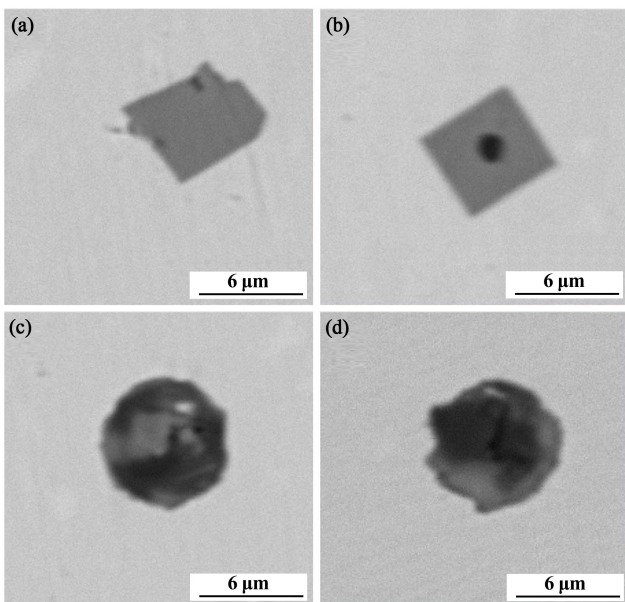
编号	Cr	Mo	N	P	S	Fe
1#	0.26	0.19	0.005	0.01	0.0005	余量
2#	0.24	0.19	0.003	0.01	0.0005	余量



(a) 纯 TiN 夹杂物; (b), (c) TiN+氧化物/硫化物复合型夹杂物; (d) 氧化物/硫化物夹杂物

图7 1#铸坯中各类夹杂物对应形貌图

Fig. 7 Corresponding morphology of various inclusions in 1# as-cast



(a) 纯 TiN 夹杂物; (b), (c) TiN+氧化物/硫化物复合型夹杂物; (d) 氧化物/硫化物夹杂物

图8 2#铸坯中各类夹杂物对应形貌图

Fig. 8 Corresponding morphology of various inclusions in 2# as-cast

则多边形,边界光滑,棱角分明,存在多处尖角;TiN+氧化物/硫化物复合型夹杂物又包含两小类,一类是TiN 包覆氧化物/硫化物型夹杂物,此时氧化物/硫化物夹杂物在中心,呈黑色,TiN 在外层,呈灰色,同样棱角分明;另一类为氧化物/硫化物包覆 TiN 型夹杂物,此类夹杂物 TiN 在中心,氧化物/硫化物夹杂物在外层,整体呈类球形,边界较为圆润,基本没有尖角存在;氧化物/硫化物夹杂物为黑色,呈类球形。由图8可知,2#铸坯中夹杂物同样可以分为三大类,并且各类夹杂物表现出与1#铸坯基本相同的形貌特征。这意味着,钢中初始 Ti 和 N 含量由 0.12% 和 0.005% 分别减小到 0.08% 和 0.003% 时,并未改变钢中夹杂物的种类。

表8为1#、2#铸坯中夹杂物统计表,其中数密度为夹杂总数/扫描面积,平均尺寸为(所有夹杂物的平均面积 $\times 4/3.14$)^{0.5}。由表7和表8可以发现,Ti 和 N 元素含量由 0.12% 和 0.005% 分别减小到 0.08% 和 0.003% 时,TiN 夹杂物数密度由 9.78 个/mm² 减小到 7.13 个/mm²,平均尺寸由 6.14 μm 减小到 3.06 μm,分别减小了 27.1% 和 50.2%,这充分证实了热力学计算结果。

表8 1#、2#铸坯中夹杂物统计表

Table 8 Inclusions in 1# and 2# as-cast

铸坯编号	夹杂物类型	扫描面积/mm ²	夹杂总数	数密度/(个·mm ⁻²)	平均尺寸/μm
1#	总夹杂物	35.57	850	23.90	5.46
	TiN	35.57	348	9.78	6.14
	复合型	35.57	477	13.41	4.97
	氧/硫化物	35.57	25	0.70	6.40
2#	总夹杂物	44.46	731	16.44	3.51
	TiN	44.46	317	7.13	3.06
	复合型	44.46	336	7.56	3.60
	氧/硫化物	44.46	78	1.75	4.53

3 结论

1) 随着冷却速度加快,N 的偏析逐渐减弱,而 Ti 的偏析行为变化不大。并且,钢液凝固过程中 Ti 和 N 的偏析使 TiN 夹杂物在凝固前沿析出行为无法避免。

2) $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 积决定了 TiN 夹杂物的析出行为,且 $w(N)_0 \times w(Ti)_0$ 积越大,TiN 夹杂物越早析出,降低初始 N 含量可以减小 TiN 夹杂物的最终尺寸。

3) 钢中初始 Ti 和 N 含量由 0.12% 和 0.005% 分别减小到 0.08% 和 0.003% 时,并未改变钢中夹杂物的种类,但使 TiN 夹杂物数密度和平均尺寸分别减小了 27.1% 和 50.2%。

参考文献(References):

[1] 张金城,孙胜辉,蔡明晖,等. 控轧控冷对 Ti-Mo-Nb 复合微合金化

- 低碳钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2023,48(1):155-162.
- ZHANG Jincheng, SUN Shenghui, CAI Minghui, et al. Effect of TM-CP on microstructure and mechanical properties of Ti-Mo-Nb microalloyed low carbon steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2023,48(1):155-162.
- [2] 史术华,高擎,钱亚军. 低温回火对低碳马氏体超高强钢组织及力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):174-178.
- SHI Shuhua, GAO Qing, QIAN Yajun. Effect of low-temperature tempering on microstructure and mechanical properties of low-carbon martensitic ultra-high strength steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):174-178.
- [3] BIKMUKHAMETOV I, BELADI H, WANG J T, et al. Interface characteristics and precipitation during the austenite-to-ferrite transformation of a Ti-Mo microalloyed steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022(893):162224.
- [4] 张超铸,杨龙,高兴健,等. 卷曲温度对含 Nb 微合金高强度钢力学性能波动的影响[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):138-142.
- ZHANG Chaozhu, YANG Long, GAO Xingjian, et al. Effect of curling temperature on fluctuation in mechanical properties of Nb-bearing high-strength low-alloy steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(6):138-142.
- [5] 宋丽英,王明明,邢俊芳,等. 钛微合金化 700 MPa 级高强耐候钢组织和性能研究[J]. 钢铁研究学报, 2022,32(12):1447-1456.
- SONG Liying, WANG Mingming, XING Junfang, et al. Study on microstructures and properties of 700 MPa Ti-microalloyed high strength weathering steels[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022,32(12):1447-1456.
- [6] 梁佰战,赵刚,徐浩,等. 轧后控制冷却对非调质钢 F45MnVS 组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):176-179.
- LIANG Baizhan, ZHAO Gang, XU Hao, et al. Effect of controlled cooling after hot rolling on microstructure and properties of non-quenched and tempered steel F45MnVS[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):176-179.
- [7] 杨跃标,李宗强,邓深,等. 热轧钛微合金化高强度钢低温冲击韧性的控制[J]. 钢铁, 2021,56(3):41-50.
- YANG Yuebiao, LI Zongqiang, DENG Shen, et al. Low temperature impact toughness controlling for Ti-microalloyed high strength steel[J]. Iron and Steel, 2021,56(3):41-50.
- [8] 王德军,王彤. 基于不同焊材的超高强钢与 BS700 高强度钢焊接接头裂纹的试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):176-181.
- WANG Dejun, WANG Tong. Experimental study on cracks in welding joints of ultra-high strength steel and BS700 high strength steel with different welding materials[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):176-181.
- [9] 周建川,李红俊,李静,等. 夹杂物对高强度钢冲击性能影响及优化分析[J]. 四川冶金, 2022,44(2):52-55.
- ZHOU Jianchuan, LI Hongjun, LI Jing, et al. Influence of inclusions on impact properties of high strength steel and optimization analysis[J]. Sichuan Metallurgy, 2022,44(2):52-55.
- [10] WANG P, WANG B, LIU Y, et al. Effects of inclusion types on the high-cycle fatigue properties of high-strength steel[J]. Scripta Materialia, 2022,206:114232.
- [11] MAUGIS P, GOUNÉ M. Kinetics of vanadium carbonitride precipitation in steel: A computer model[J]. Acta Materialia, 2005,53(12):3359-3367.
- [12] 邓永康. BOF-LF-VD-CC 流程生产 20CrMnTi 钢的工艺优化研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
- DENG Yongkang. Study of production optimization of 20CrMnTi steel during BOF-LF-VD-CC process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [13] 郭伟,龙木军,吴家璐,等. 22MnB5 钢溶质分配系数及 TiN 析出对微观偏析的影响[J]. 钢铁, 2022,57(3):44-54.
- GUO Wei, LONG Mujun, WU Jialu, et al. Effect of solute partition coefficient and TiN precipitation on micro-segregation of 22MnB5 steel[J]. Iron and Steel, 2022,57(3):44-54.
- 引用本文:刘爱华,孔令男,李春辉,等. 钛微合金化高强度钢凝固过程中钛夹杂物的析出行为研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):185-190.
- LIU Aihua, KONG Lingnan, LI Chunhui, et al. Precipitation behavior of Ti-containing inclusions during solidification of Ti microalloyed high-strength steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):185-190.

(上接第 184 页)

- [17] BOONPRACHAI R, AUTTHAWONG T, NAMSAR O, et al. Natural porous carbon derived from popped rice as anode materials for lithium-ion batteries[J]. Crystals, 2022,12(2):223.
- [18] SUN N, GUAN Z, ZHU Q, et al. Enhanced ionic accessibility of flexible MXene electrodes produced by natural sedimentation[J]. Nano-Micro Letters, 2020,12:89.
- 引用本文:白世伟,唐正芳,蔡向兵,等. MXene 负载棉花生物炭作为锂离子电池负极材料的电化学性能[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):180-184.
- BAI Shiwei, TANG Zhengfang, CAI Xiangbing, et al. Electrochemical performance of MXene-coated cotton-derived biochar as anode material for lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):180-184.