

含硼钢连铸冷却过程氮化物竞争析出规律

张浩浩¹, 何 春¹, 高 琦², 吴 娇³, 龙俨丽³, 张晏铭¹, 龙木军^{1*}, 陈登福¹

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 中国重型机械研究院股份公司炼钢事业部, 陕西 西安 710018;
3. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 重庆 401147)

摘 要: 含硼钢连铸冷却过程中 BN 析出不仅会减少钢中有效硼含量, 削弱硼合金化的有益效果, 而且还会导致铸坯裂纹敏感性增强。探明氮化物的竞争析出规律对含硼钢连铸冷却过程 BN 析出相的精准调控具有重要的意义。针对含硼钢连铸冷却过程, 通过热力学计算研究了 BN、TiN、AlN 间的竞争析出行为, 并探究了钢中 Ti、Al、N 含量对 BN 析出抑制效果的影响规律。结果表明, 随着钢中 Ti、Al 含量增高, TiN、AlN 析出时机提前, 增大到一定程度时 TiN、AlN 会先于 BN 析出, 从而抑制 BN 析出; 进一步提高钢中 Ti、Al 含量, 最终使得 BN 完全不析出; 相较于 Al 元素, 通过调节钢中 Ti 元素含量来调控 BN 析出行为更为经济可靠; 抑制 BN 完全不析出的临界钛添加量与钢中硼、氮元素含量的关系式为: $w_{\text{Ti}(\text{no BN})} = (3.3w_{\text{N}} + 3.22)w_{\text{B}} + 3.36w_{\text{N}}$, 临界钛添加量 $w_{\text{Ti}(\text{no BN})}$ 随钢中氮、硼元素含量的增大而增大。研究结果为含硼钢成分设计和连铸坯质量控制提供了重要的理论依据。

关键词: 含硼钢; 氮化物竞争析出; 热力学; 临界钛添加量

中图分类号: TF777, TG161

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)03-0149-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.03.021

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Competitive precipitation law of nitrides during continuous casting cooling process of boron-containing steel

ZHANG Haohao¹, HE Chun¹, GAO Qi², WU Jiao³, LONG Yanli³, ZHANG Yanming¹,
LONG Mujun^{1*}, CHEN Dengfu¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. China National Heavy Machinery Research institute Co., Ltd., Xi'an 710018, Shaanxi, China; 3. Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Chongqing 401147, China)

Abstract: During continuous casting cooling process of boron-containing steel, the precipitation of BN not only reduces the effective boron content, weakening the beneficial effects of boron alloying, but also increases the crack sensitivity of the as-cast billet. Clarifying the competitive precipitation law of nitrides is crucial for precise control of BN precipitation during the continuous casting cooling process of boron containing steel. This study focuses on the continuous casting cooling process of boron containing steel, and investigates the competitive precipitation behavior among BN, TiN, and AlN through thermodynamic calculations. The influence of Ti, Al, and N content in steel on the suppression effect of BN precipitation is also explored. The results indicate that as the content of Ti and Al in steel increases, the

收稿日期: 2024-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(52274321); 重庆市技术创新与应用发展专项重大项目(CSTB2023TIAD-STX0033)。

作者简介: 张浩浩, 1994 年出生, 男, 甘肃定西人, 博士研究生, 主要从事钢连铸冷却过程铸坯组织及第二相调控方面的研究工作, E-mail: 201909021107@cqu.edu.cn; * 通讯作者: 龙木军, 1982 年出生, 男, 广东廉江人, 博士, 教授, 主要从事钢液连铸均匀冷却及均质化研究。Email: longmujun@cqu.edu.cn。

timing of TiN and AlN precipitation advances. When the content reaches a certain level, TiN and AlN precipitate before BN, thereby inhibiting BN precipitation. Further increasing Ti and Al content in the steel ultimately prevents the precipitation of BN completely. Compared to Al element, regulating the precipitation behavior of BN by adjusting Ti content in steel is more economical and reliable. The critical Ti addition that completely suppress BN precipitation follows the relationship: $w_{\text{Ti}(\text{no BN})} = (3.3w_{\text{N}} + 3.22)w_{\text{B}} + 3.36w_{\text{N}}$, where the critical Ti addition $w_{\text{Ti}(\text{no BN})}$ increases with higher nitrogen and boron content in the steel. The results provide an important theoretical basis for the compositional design of boron-containing steel and quality control of continuous casting billets.

Key words: boron containing steel, competitive precipitation of nitrides, thermodynamics, critical Ti addition

0 引言

含硼钢以其优异的力学性能和广泛的应用领域成为现代工业中不可或缺的重要材料。在钢中加入极少量的硼元素 (0.000 5% ~ 0.003 0%) 即可显著提高钢的淬透性^[1], 其作用相当于锰、铬、镍等合金元素的几百倍。在钢中添加硼元素能提高耐热钢的高温强度、蠕变强度^[2], 改善高速钢的红硬性和刀具的切削能力等, 因此含硼钢被广泛应用于桥梁、汽车以及航空设备等多个领域^[3-6]。钢中固溶的微量硼元素易在奥氏体晶界处偏聚, 降低了奥氏体的晶界能, 抑制了铁素体在晶界上的优先形核, 从而提高钢的淬透性^[7]。因此, 这部分固溶硼通常被称为“有效硼”。然而硼作为强烈的表面活性元素, 与 N 元素有很强烈的亲和力, 易以 BN 的形式在奥氏体晶界处析出, 从而使这部分硼元素失去提高钢淬透性的作用, 减少了钢中的“有效硼”含量^[8]。而且析出的 BN 颗粒会促进铁素体形核, 进一步降低了钢的淬透性。此外, 一部分学者认为连铸冷却过程奥氏体晶界处析出大量细小 BN 颗粒会导致铸坯裂纹敏感性增大^[9-10]。学者们普遍认为大量细小的 BN 颗粒在晶界析出, 钉扎在晶界, 从而阻碍了晶界的相对滑移, 在应力的作用下容易使铸坯产生裂纹。因此, 在含硼钢连铸生产过程如何避免或减少 BN 析出是提高钢淬透性和铸坯质量的关键。

研究发现^[11-12], 在含硼钢中添加一定的钛元素, 形成的 TiN 析出相会消耗钢中大量的氮元素, 有效地减少 BN 析出, 显著提高含硼钢的淬透性和改善铸坯表面裂纹问题。然而, 如何确定含硼钢中钛元素的添加量一直困扰着冶金学者。龙木军等学者^[13-14]研究发现, 钛元素添加过多会在钢中形成大于 1 μm 的 TiN 颗粒, 其尖锐的形貌以及较高的硬度会导致铸坯裂纹的萌生, 影响铸坯质量。而钛元素添加过少, 又不能很好抑制 BN 析出。陈继林等学者^[15]探究了含硼钢中 Ti/N 比 (质量分数) 对淬火

组织及有效硼含量的影响, 认为含硼钢中 Ti/N 比应控制在 6 及以上才能有效避免 BN 析出。金光秀等^[16]对含硼铝镇静钢、Ti-B 和 Ti-Nb-V-B 系微合金钢中各种析出相的析出关系和析出量及其对奥氏体中固溶硼质量分数的影响进行了热力学分析, 研究结果表明抑制 BN 形成所需加入的 Ti 随着钢中氮的质量分数的增加而线性增大, 约为氮质量分数的 3.4 ~ 3.8 倍。以上这些学者的研究虽然确定了基于钢中氮元素含量的钛元素添加制度, 但是 BN 是否析出并不只取决于钢中残余的氮元素含量, 钢中硼元素含量对其析出行为同样有重要的影响。因此这些研究结果中钛元素的添加制度只适用于特定的硼含量情况下, 若钢中硼含量不同, 则该制度可能并不适用。此外, 一些学者的研究发现^[11,17], 钢中的铝元素含量较高时, 也可一定程度上抑制 BN 析出, 提高含硼钢的淬透性, 但是对于钢中铝元素含量对 BN 析出的抑制效果并不明确。

因此, 笔者针对含硼钢连铸冷却过程, 通过热力学计算研究了 BN、TiN、AlN 间的竞争析出行为, 探究了钢中 Ti、Al、N 含量对 BN 析出抑制效果的影响规律, 获得了抑制 BN 完全不析出临界钛添加量与钢中硼元素和氮元素的对应关系, 并与学者们的表征结果进行了充分对比验证。

1 氮化物竞争析出行为

BN、TiN、AlN 是含硼钢中最主要的析出相, 它们在奥氏体中的溶度积分别为^[18-19]:

$$\lg K_{\text{BN}} = \lg([\text{B}] \cdot [\text{N}]) = 5.24 - 13\,970/T \quad (1)$$

$$\lg K_{\text{TiN}} = \lg([\text{Ti}] \cdot [\text{N}]) = 0.32 - 8\,000/T \quad (2)$$

$$\lg K_{\text{AlN}} = \lg([\text{Al}] \cdot [\text{N}]) = 1.79 - 7\,184/T \quad (3)$$

式中, $\lg K_{\text{BN}}$ 、 $\lg K_{\text{TiN}}$ 、 $\lg K_{\text{AlN}}$ 分别为 BN、TiN、AlN 在奥氏体中的固溶度积; $[\text{B}]$ 、 $[\text{Ti}]$ 、 $[\text{Al}]$ 、 $[\text{N}]$ 为钢中硼元素、钛元素、铝元素、氮元素的固溶量, %; T 为温度, K。

如图1所示,三者中AlN在奥氏体中的固溶度最高,TiN和BN在奥氏体中的固溶度较为接近。在1213 K以上温度区间,BN在奥氏体中的固溶度高于TiN,而在1213 K以下则正好相反。通常来讲,当钢中元素水平相当时,具有更低固溶度的第二相会优先析出。因此,在1213 K以上温度区间三者的析出优先级排序为TiN>BN>AlN,而在1213 K以下温度区间为BN>TiN>AlN。

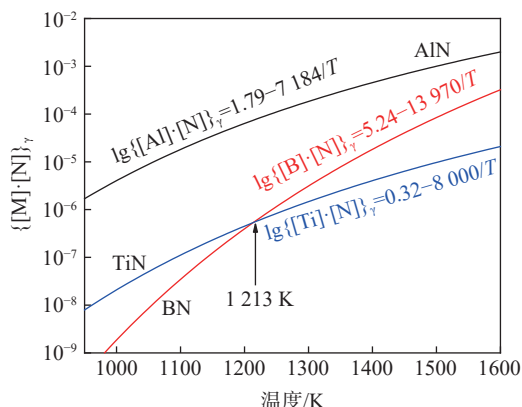


图1 BN、TiN、AlN在奥氏体中的固溶度对比

Fig. 1 Comparison of solid solubility of BN, TiN and AlN in austenite

然而,第二相间的析出顺序并不完全由其在钢中的固溶度大小而决定。钢中第二相组成元素的含量对第二相的析出时机同样有重要的影响。虽然在1213 K以下温度区间,BN、TiN、AlN三者的析出优先级为BN>TiN>AlN,但是当钢中Ti和Al的元素含量足够高时,TiN和AlN将会先于BN析出。由于BN、TiN、AlN析出相的组成中均含有N元素,先析出的析出相会消耗钢中大量的N元素,导致后析出的氮化物析出温度降低,甚至不能析出,这在一些学者^[20]的研究结果中已得到了证明。因此,BN、TiN、AlN之间存在着明显的竞争析出关系。

1.1 TiN与BN的竞争析出行为

当钢中Ti含量比较低时,由于BN在奥氏体中的溶解度低于TiN,随着温度降低钢中BN的浓度积先达到其平衡固溶度,BN会先于TiN析出。提高钢中Ti元素含量,TiN的开始析出温度升高,析出时机逐渐前移。当钢中Ti元素含量增大到一定程度时,钢中BN和TiN会同时析出。继续增大钢中Ti元素含量,TiN会先于BN析出。临界条件下,TiN和BN恰好同时达到固溶平衡,元素浓度积等于固溶度积,而又均未析出。此时,B、Ti、N元素在钢中的固溶量等于其初始含量,即[B]= w_B , [Ti]= w_{Ti}

和[N]= w_N ,其中 w_B 、 w_{Ti} 、 w_N 分别为钢中B、Ti、N元素的初始含量。因此,结合公式(1)和(2)可得TiN先于BN析出的临界钛添加量 $w_{Ti(Ti-BN)}$ 的计算公式为:

$$\lg w_{Ti(Ti-BN)} = 0.5727 \cdot \lg w_B - 0.4273 \cdot \lg w_N - 2.6807 \quad (4)$$

由式(4)可知钢中临界钛添加量的对数与钢中硼含量的对数成正相关线性关系,而与钢中氮元素含量的对数成负相关线性关系。如图2所示,当钢中的N元素含量一定时,使TiN先于BN析出的钛临界添加量随着B元素含量的增大而增大。当钢中的钛添加量高于 $w_{Ti(Ti-BN)}$ 时TiN先于BN析出,而小于该临界值时则正好相反。

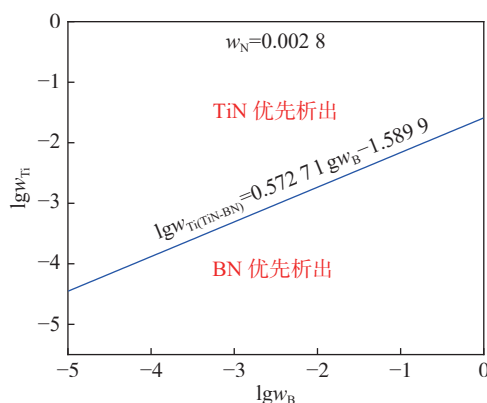


图2 TiN优先于BN析出的临界钛添加量

Fig. 2 Critical Ti addition for preferential precipitation of TiN over BN

当钢中的Ti含量进一步增大到一定程度时,BN的析出会被完全抑制,导致BN不能析出。此时析出相均为TiN,根据TiN的最佳原子配比有:

$$\frac{w_{Ti} - [Ti]}{w_N - [N]} = \frac{47.87}{14.01} \quad (5)$$

在临界条件下,钢中的BN恰好达到其平衡固溶度,但未析出。此时,钢中的硼元素的固溶量[B]等于钢中硼元素的初始含量。结合式(1)(2)和(5)即可获得BN不再析出的临界钛添加量 $w_{Ti(no BN)}$:

$$w_{Ti(no BN)} = 10^{(5970/T + \lg w_B - 4.92)} - 3.42 \times 10^{(5.24 - 13970/T - \lg w_B)} + 3.42 w_N \quad (6)$$

图3为抑制BN在不同温度下不析出的临界钛添加量随B含量的变化关系。如图3所示,当钢中的氮含量一定时,使BN在某个温度下不析出的临界钛添加量与钢中的B含量成正相关线性关系,而且随着温度降低,Ti/B比逐渐增大。

1.2 BN与AlN的竞争析出行为

同样,钢中的BN与AlN也存在类似的竞争析

出行为, 结合公式 (1) 和 (3) 可得 AIN 先于 BN 析出的临界铝添加量 $w_{\text{Al(AIN-BN)}}$, 其与钢中 B 元素含量和 N 元素含量的关系如式 (7) 所示。

$$\lg w_{\text{Al(AIN-BN)}} = 0.5142 \lg w_{\text{B}} - 0.4858 \lg w_{\text{N}} - 0.9046 \quad (7)$$

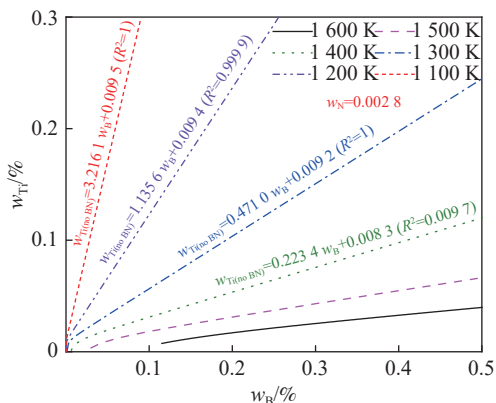


图 3 各温度下 BN 不析出的临界 Ti 含量

Fig. 3 Critical Ti content for complete suppression of BN precipitation at various temperatures

由式 (7) 可知钢中临界铝添加量的对数与钢中硼含量的对数成正相关线性关系, 而与钢中氮元素含量成负相关线性关系。如图 4 所示, 当钢中的 N 元素含量一定时, 使 AIN 先于 BN 析出的临界铝添加量随着 B 元素含量的增大而增大。当钢中的铝添加量高于 $w_{\text{Al(AIN-BN)}}$ 时 AIN 先于 BN 析出, 而小于该临界值时则正好相反。

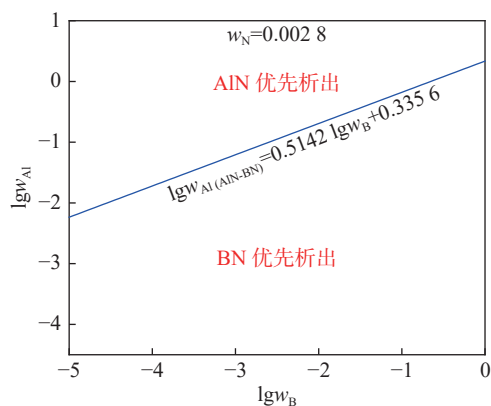


图 4 AIN 优先于 BN 析出的临界钛添加量

Fig. 4 The critical aluminum addition required for preferential precipitation of AIN over BN

当钢中的铝含量增加到一定程度同样也可以抑制 BN 的析出。此时析出相均为 AIN, 根据 AIN 的最佳原子配比有:

$$\frac{w_{\text{Al}} - [\text{Al}]}{w_{\text{N}} - [\text{N}]} = \frac{26.98}{14.01} \quad (8)$$

在临界条件下, 钢中的 BN 恰好达到其平衡固溶度, 但未析出。此时, 钢中的硼元素的固溶量 [B]

等于钢中硼元素的初始含量。结合式 (1)、式 (3) 和式 (8) 即可获得 BN 不再析出的临界铝添加量

$w_{\text{Al(no BN)}}$:

$$w_{\text{Al(no BN)}} = 10^{(6786/T + \lg w_{\text{B}} - 3.45)} - 1.93 \times 10^{(5.24 - 13970/T - \lg w_{\text{B}})} + 1.93 w_{\text{N}} \quad (9)$$

图 5 为抑制 BN 在不同温度下不析出的临界 Al 添加量随 B 含量的变化关系。如图 5 所示, 当钢中的氮含量一定时, 使 BN 在某个温度下不析出的临界 Al 添加量与钢中的 B 含量成正相关线性关系, 而且随着温度降低, Al/B 比逐渐增大, 这与 TiN 和 BN 间的竞争析出规律基本一致。

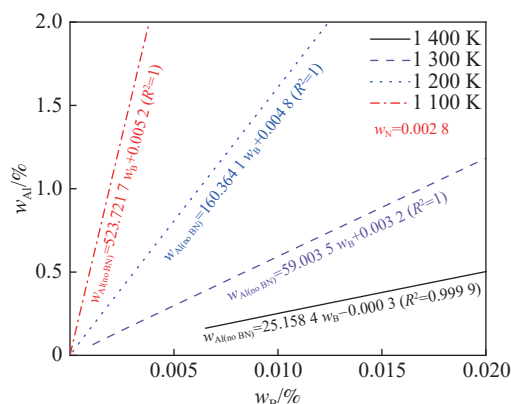


图 5 各温度下 BN 不析出的临界 Al 含量

Fig. 5 Critical Al content for complete suppression of BN precipitation at various temperatures

2 结果与讨论

抑制 BN 完全不析出的临界钛添加量和临界铝添加量除了受温度的影响, 钢中的氮含量对其也有重要的影响。在课题组之前的工作中发现^[21], 当温度降低到 1100 K 时, 钢中绝大多数的氮元素已经以 TiN 和 AIN 形式析出。因此只要确保 1100 K 时没有 BN 析出, 即可保证钢中不会有 BN 析出。文中进一步探究了在 1100 K 时, 钢中氮元素含量对抑制 BN 完全不析出的临界钛添加量和临界铝添加量的影响关系。

2.1 N 元素含量对 TiN 和 BN 竞争析出行为的影响

如图 6(a) 所示, 在不同氮元素含量下, 抑制 BN 完全不析出的临界钛添加量与钢中硼元素含量均保持严格的正相关线性关系。

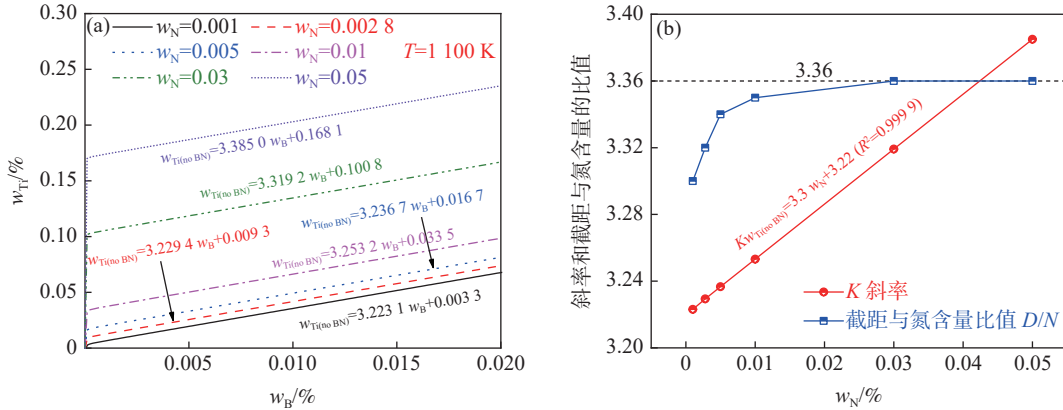
对图 6(a) 中各直线的斜率 K 和截距 D 随钢中氮含量的变化规律进行了分析, 结果如图 6(b) 所示。分析表明, 图 6(a) 中各直线斜率 K 与钢中氮元素的含量成严格的正相关线性关系, 经过确定其关系式为:

$$K_{w_{\text{Ti}(\text{no BN})}} = 3.3w_{\text{N}} + 3.22 \quad (10)$$

而截距 D 与钢中氮含量的比值(D/N)随着钢中氮含量的增大而增大, 且增长趋势逐渐变小, D/N 值逐渐趋近于 3.36。为了保证能够抑制 BN 完全不析

出, 将 D/N 值确定为 3.36。由此可得, 抑制 BN 完全不析出的临界钛添加量与钢中硼元素含量和氮元素含量间的关系式为:

$$w_{\text{Ti}(\text{no BN})} = (3.3w_{\text{N}} + 3.22)w_{\text{B}} + 3.36w_{\text{N}} \quad (11)$$



(a) 氮含量对 $w_{\text{Ti}(\text{no BN})}$ 的影响; (b) 氮含量对 (a) 中直线斜率和截距的影响

图 6 铸坯中不析出 BN 的临界 Ti 添加量

Fig. 6 Critical Ti addition amount to completely suppress BN precipitation in the as-cast billet

2.2 N 元素含量对 AlN 和 BN 竞争析出行为的影响

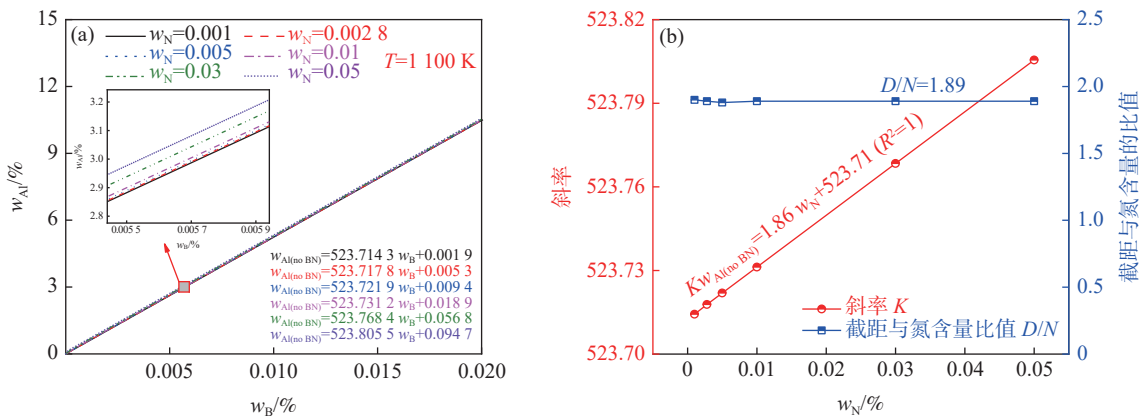
如图 7(a) 所示, 在不同氮元素含量下, 抑制 BN 完全不析出的临界铝添加量 $w_{\text{Al}(\text{no BN})}$ 与钢中硼元素含量均保持严格的正相关线性关系。同样, 对图 7(a) 中各直线的斜率 K 和截距 D 随钢中氮含量的变化规律进行了分析, 如图 7(b) 所示。分析结果表明, 图 7(a) 中各直线斜率 K 与钢中氮元素的含量

成严格的正相关线性关系, 经过确定其关系式为:

$$K_{w_{\text{Al}(\text{no BN})}} = 1.86w_{\text{N}} + 523.71 \quad (12)$$

而截距 D 与钢中氮含量的比值(D/N)为 1.89。因此, 抑制 BN 完全不析出的临界铝添加量与钢中硼元素含量和氮元素含量间的关系式为:

$$w_{\text{Al}(\text{no BN})} = (1.86w_{\text{N}} + 523.71)w_{\text{B}} + 1.89w_{\text{N}} \quad (13)$$



(a) 氮含量对 $w_{\text{Al}(\text{no BN})}$ 的影响; (b) 氮含量对 (a) 中直线斜率和截距的影响

图 7 铸坯中不析出 BN 的临界 Al 添加量

Fig. 7 Critical Al addition amount to completely suppress BN precipitation in the as-cast billet

2.3 抑制钢中 BN 完全不析出临界钛含量的确定

为了验证计算结果的可靠性, 通过场发射高分辨扫描电子显微镜(JEOL JSM-7 800F FEG SEM)对两种不同成分 22MnB5 钢铸坯中第二相组成进行了表征分析, 两种 22MnB5 钢的化学成分如表 1 所示。

当钢中的 B 和 N 含量分别为 0.002 7% 和 0.002 8% 时, 分别通过公式 (11) 和公式 (13) 计算出抑制钢中 BN 完全不析出的临界钛含量为 0.018 1% (Ti/B 比为 6.71), 抑制钢中 BN 完全不析出的临界铝含量为 1.419 3% (Al/B 比为 525.68)。因此, 虽然有一些学者的研究^[11,17]表明钢中的铝会一定程度抑

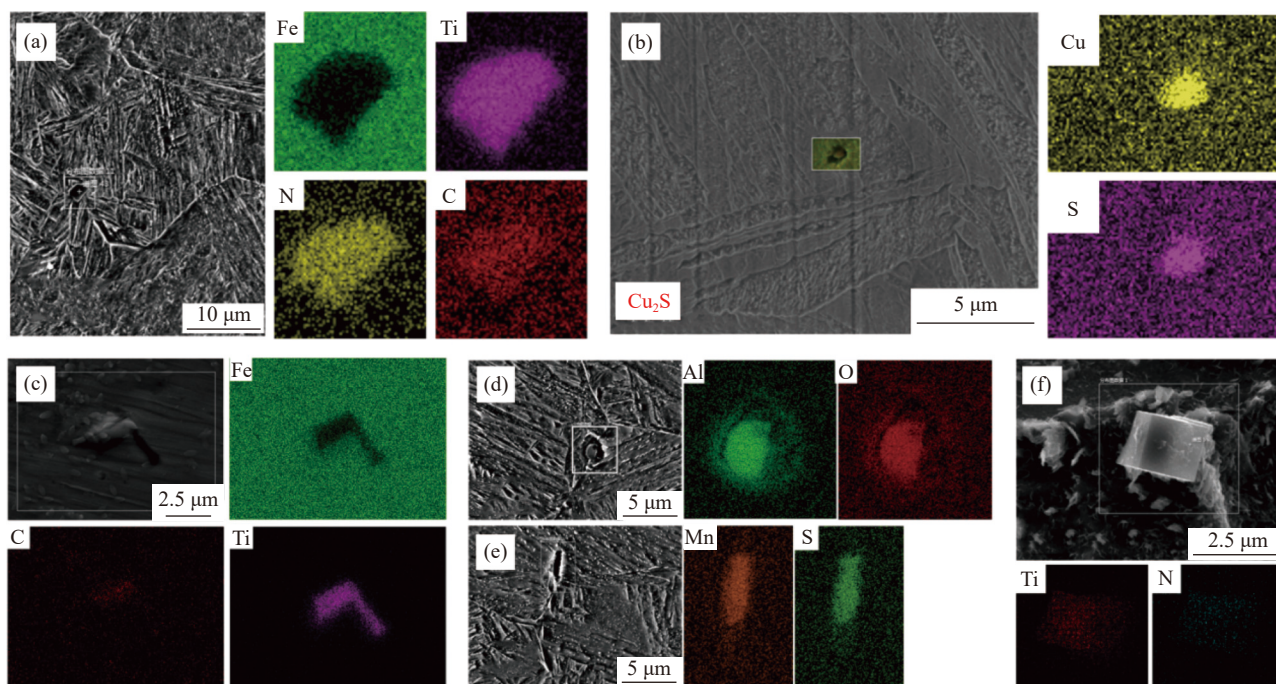
制 BN 的析出,但是相较于添加 Al 而言,通过在钢中添加 Ti 来防止 BN 析出明显更加经济合理,也是目前普遍被采用的方法。

如图 8 所示,22MnB5 钢铸坯中析出的第二相主要有: TiN、TiC、Ti(N,C)、MnS、Al₂O₃、Cu₂S 等,并未检测到 BN 析出。根据式 (11) 计算确定两种 22MnB5 钢中抑制 BN 完全不析出的临界钛含量分别为 0.018 1% 和 0.016 5%,而两种 22MnB5 钢中

Ti 含量分别为 0.002 8% 和 0.003 0%, 远高于临界钛含量。因此,两种 22MnB5 钢中均不能析出 BN,这与图 8 中的表征分析结果一致。

表 1 22MnB5 钢的主要化学成分

试样	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ti	B	N
I	0.21	0.27	1.18	0.008	0.001	0.23	0.029	8 0.033	0.002 7	0.002 8
II	0.23	0.034	1.47	0.010	0.003	0.18	0.040	0 0.040	0.002 0	0.003 0



(a)Ti(N,C); (b) Cu₂S; (c) TiC; (d) Al₂O₃; (e) MnS; (f) TiN

图 8 22MnB5 钢中第二相的表征结果

Fig. 8 Characterization results of second phases in 22MnB5 steel

为了进一步验证通过公式 (11) 计算抑制钢中 BN 完全不析出的临界钛含量具有良好的适用性,将其与一些学者们^[21-29]已经公开发表的研究结果进行了对比验证,验证结果如图 9 所示。图 9 中红色和蓝色符号表示所研究钢种中钛元素和氮元素的实际含量水平,其中红色代表在该研究过程中有 BN 析出,蓝色表示没有 BN 析出。黑色符号表示在该钢种成分条件下通过式 (11) 计算的 $w_{Ti(no BN)}$ 值。如图 9 所示,当钢中添加的钛元素含量低于临界 $w_{Ti(no BN)}$ 值时,钢中会析出 BN 相。而钛元素含量高于临界 $w_{Ti(no BN)}$ 值时,则不会析出 BN 相。这与预期结果完全一致,表明通过式 (11) 计算抑制钢中 BN 完全不析出的临界钛含量值是准确可靠的。研究确定的 $w_{Ti(no BN)}$ 值可为冶金工作者设计含硼钢钢种成分时钛元素添加量的确定提供理论依据,所添加的钛元素含量应适当高于 $w_{Ti(no BN)}$ 值,即可确保钢中不

会有 BN 析出,既保留了钢中的有效硼,而又避免加入过量钛元素而形成不利于钢性能的大尺寸 TiN 颗粒。

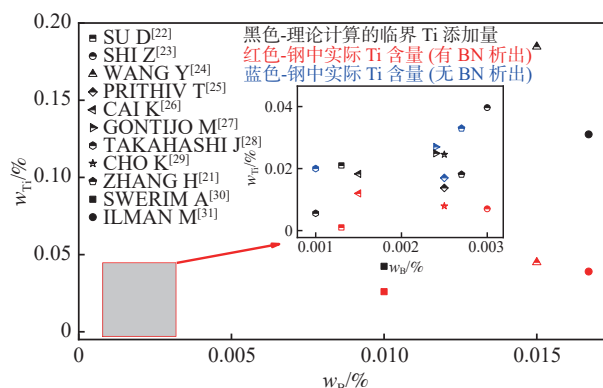


图 9 BN 的析出情况分析

Fig. 9 Analysis of BN precipitation behavior

3 结论

1) 当钢中元素水平相当时,在 1 213 K 以上温度区间析出优先顺序为 $\text{TiN} > \text{BN} > \text{AlN}$,而在 1 213 K 以下温度区间为 $\text{BN} > \text{TiN} > \text{AlN}$ 。

2) 抑制 BN 完全不析出的临界钛添加量 $w_{\text{Ti}(\text{no BN})}$ 和临界铝添加量 $w_{\text{Al}(\text{no BN})}$ 与钢中硼元素含量和氮元素含量间的关系分别为: $w_{\text{Ti}(\text{no BN})} = (3.3w_{\text{N}} +$

$$3.22)w_{\text{B}} + 3.36w_{\text{N}} \text{ 和 } w_{\text{Al}(\text{no BN})} = (1.86w_{\text{N}} + 523.71)w_{\text{B}} + 1.89w_{\text{N}}。$$

3) 当钢中氮元素含量为 0.002 8% 时,抑制 BN 完全不析出的临界钛含量为 0.018 1% (Ti/B 比为 6.71),抑制 BN 完全不析出的临界铝含量为 1.419 3% (Al/B 比为 525.68),相较于添加 Al 而言通过在钢中添加 Ti 来防止 BN 析出更为经济合理。

参考文献

- [1] LIU T, CHEN Y F, WANG D X, *et al.* Control of surface cracks in boron containing steel billet[J]. Continuous Casting, 2022(5): 62-68, 75.
(刘涛,陈永峰,王东兴,等.含硼钢铸坯表面裂纹缺陷控制[J].连铸,2022(5):62-68,75.)
- [2] ARDESHIR G, FANG L, HENRIK S, *et al.* Microstructure of a creep-resistant 10 pct chromium steel containing 250 ppm boron[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42: 940-951.
- [3] WANG W, ZHOU L M, XIONG L, *et al.* High temperature mechanical property of SS400 B-bearing steel slab[J]. Iron & Steel, 2015, 50(7): 38-42.
(王伟,周律敏,熊力,等.SS400 含硼钢连铸坯的高温力学性能[J].钢铁,2015,50(7):38-42.)
- [4] WANG Z Y, JI C, GONG W X, *et al.* Formation mechanism and control of transverse corner cracking of containing boron steel slab[J]. Iron & Steel, 2012, 47(5): 35-38.
(王朝阳,蔡程,巩文旭,等.含硼钢板坯边角裂纹的成因与控制[J].钢铁,2012,47(5):35-38.)
- [5] XU H M, ZHANG Y, PAN X, *et al.* The influence of Ti and B on the continuous phase transformation behavior and strength of weathering welding wire steel[J]. Iron & Steel, 2013, 48(10): 50-56.
(许红梅,张宇,潘鑫,等.Ti 和 B 对耐候焊丝钢连续相转变行为和强度的影响[J].钢铁,2013,48(10):50-56.)
- [6] WANG L J, LI F X, ZHANG J P, *et al.* Improving metallurgical quality measures of boron steel EAF process[J]. China Metallurgy, 2011, 21(3): 24-27.
(王立君,李法兴,张君平,等.提高电炉流程生产含硼钢冶金质量的措施[J].中国冶金,2011,21(3):24-27.)
- [7] HAN C, CAO R. Effects and characterization methods of boron in steel[J]. Materials Reports, 2022, 36(S1): 459-462.
(韩成,曹睿.硼在钢中的作用及表征方式[J].材料导报,2022,36(S1):459-462.)
- [8] MAM T H, JIANG C, LIU K, *et al.* Study on hardenability of large cross-sectional high strength medium-Mn forged steels[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(8): 834-839.
(满廷慧,江畅,刘坤,等.大截面高强度中锰锻钢淬透性研究[J].钢铁研究学报,2022,34(8):834-839.)
- [9] LIU G L, JI C X, NI Y J, *et al.* Formation and control of transverse corner cracks in boron steel slab[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2013, 34(4): 94-98, 103.
(刘国梁,季晨曦,倪有金,等.含硼钢板坯角横裂产生原因及控制研究[J].钢铁钒钛,2013,34(4):94-8,103.)
- [10] YANG K M, LIU W F. Cause analysis and control of corner crack for boron-bearing steel billet[J]. Metal World, 2023(3): 79-82.
(杨阔鸣,刘伟芳.含硼钢铸坯角裂成因分析与控制[J].金属世界,2023(3):79-82.)
- [11] YANG J, TANG W, LUO D, *et al.* Thermodynamic analysis and control of BN precipitation in low carbon boron steel[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2017, 45(4): 25-28, 35.
(杨俊,汤伟,罗登,等.低碳含硼钢中 BN 析出的热力学分析与控制[J].金属材料与冶金工程,2017,45(4):25-28,35.)
- [12] JIANG Z K, XIA Z D, CAI Z Z. Cause of formation transverse corner crack and process in boron steel CC slab [C]//Proceedings of the 12th China Iron and Steel Annual Conference, The Chinese Society for Metals, 2019: 322-327.
(江中块,夏兆东,蔡兆镇.含硼钢板坯角横裂缺陷的成因与工艺控制[C]//中国金属学会.第十二届中国钢铁年会论文集——2.炼钢与连铸.上海梅山钢铁股份有限公司;东北大学冶金学院,2019:322-327.)
- [13] GUI L T, LONG M J, ZHANG H H, *et al.* Study on the precipitation and coarsening of TiN inclusions in Ti-microalloyed steel by a modified coupling model[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 5499-5514.
- [14] LIU T, CHEN D F, LONG M J, *et al.* Control of coarse precipitates of titanium nitride in high-strength low-alloy steel[J].

- Metal Science and Heat Treatment, 2020, 61(9-10): 534-542.
- [15] CHEN J L, GUO M Y, LIU Z M, *et al.* Effect of nitrogen content on the hardenability of boron steel[J]. Steel Rolling, 2015, 32(4): 94-96.
(陈继林, 郭明仪, 刘振民, 等. 氮含量对含硼钢淬透性的影响[J]. 轧钢, 2015, 32(4): 94-96.)
- [16] KIM K S, DU L X, GAO C R. Thermodynamic analysis of boron nitride formation in boron microalloyed steel[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2015, 36(4): 483-488.
(金光秀, 杜林秀, 高彩茹. 含硼微合金钢中硼氮化物形成的热力学分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 483-488.)
- [17] LUO G H, ZHANG F, FAN Z J, *et al.* Thermodynamic analysis of BN inclusion precipitation in medium-carbon aluminum killed steel containing B and N[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2014, 37(6): 406-410.
(罗国华, 张帆, 范植金, 等. 含硼氮中碳铝镇定钢中 BN 夹杂析出热力学分析[J]. 武汉科技大学学报, 2014, 37(6): 406-410.)
- [18] LI P S, XIAO L J, XIE Z. Thermodynamic analysis of AlN and BN competitive precipitation in low carbon steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21(5): 16-18, 50.
(李培松, 肖丽俊, 谢植. 低碳钢中 AlN 和 BN 竞相析出热力学分析[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(5): 16-8, 50.)
- [19] YONG Q L, SUN X J, ZHENG L, *et al.* The role of the second phase in steel materials[J]. Science and Technology innovation Herald, 2009(8): 2-3.
(雍岐龙, 孙新军, 郑磊, 等. 钢铁材料中第二相的作用[J]. 科技创新导报, 2009(8): 2-3.)
- [20] WU D M, LI T, LIU Z H, *et al.* Study on process optimization for controlling corner cracks on boron-bearing steel by titanium micro-alloying[J]. Angang Technology, 2017(4): 23-27.
(吴东明, 李涛, 刘真海, 等. 钛微合金化抑制含硼钢角裂工艺优化研究[J]. 鞍钢技术, 2017(4): 23-27.)
- [21] ZHANG H H, WAN L H, LONG M J, *et al.* Quantitative investigation on the evolution of $Ti(C_x, N_{1-x})$ in ultra-high strength steel slab during TSCR process: precipitation and redissolution[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2023, 54(5): 2492-2502.
- [22] SU D X, ZHOU Q F, ZOU C D. Effect of precipitation characteristics of boron nitride on hot ductility of low carbon boron-bearing steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(6): 476-481.
(苏笃星, 周青峰, 邹长东. BN 析出行为对低碳含硼钢高温塑性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(6): 476-481.)
- [23] SHI Z R, WANG J J, CHAI X Y, *et al.* Effect of boron on intragranular ferrite nucleation mechanism in coarse grain heat-affected zone of high-nitrogen steel[J]. Materials Letters, 2020, 258: 126819.
- [24] WANG Y N, BAO Y P, WANG M, *et al.* Basic research on precipitation and control of BN inclusions in steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2013, 44: 1144-1154.
- [25] PRITGIV T, GAULT B, LI Y, *et al.* Austenite grain boundary segregation and precipitation of boron in low-C steels and their role on the heterogeneous nucleation of ferrite[J]. Acta Materialia, 2023, 252: 118947.
- [26] CAI K S, YAO Y K, LIU W J, *et al.* Study and control of boron existing forms in boron-bearing steel[J]. Steelmaking, 2015, 31(3): 45-49.
(蔡可森, 姚永宽, 刘伟建, 等. 含硼钢中硼的存在形式及控制研究[J]. 炼钢, 2015, 31(3): 45-49.)
- [27] GONTIJO M, CHAKRABORTY A, WEBSTER R, *et al.* Thermomechanical and microstructural analysis of the influence of B-and Ti-content on the hot ductility behavior of microalloyed steels[J]. Metals, 2022, 12(11): 1808.
- [28] TAKAHASHI J, ISHIKAWA K, KAWAKAMI K, *et al.* Atomic-scale study on segregation behavior at austenite grain boundaries in boron-and molybdenum-added steels[J]. Acta Materialia, 2017, 133: 41-54.
- [29] KYUNG C, DONG J M, YANG M K, *et al.* Effect of niobium and titanium addition on the hot ductility of boron containing steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(10-11): 3556-3561.
- [30] ILMAN M, COCHRANE R, EVANS G. Effect of nitrogen and boron on the development of acicular ferrite in reheated C-Mn-Ti steel weld metals[J]. Welding in the World, 2012, 56: 41-50.
- [31] KOMENDA J, LUO C H, LÖNNQVIST J. Interaction of carbon, titanium and boron in micro-alloy steels and its effect on hot ductility[J]. Alloys, 2022, 1(2): 133-148.