

# 含硼微合金钢中硼氮化物形成的热力学分析

金光秀, 杜林秀, 高彩茹

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 应用合金元素在奥氏体中的固溶度积公式, 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. 结果表明: 含硼铝镇静钢中 BN 的析出优先于 AlN 的析出, 使增加奥氏体稳定性的 B 的有效质量分数减少; 提高含硼钢中的固溶 B 质量分数的有效方法是加入比 B 与 N 的结合力强的 Ti; 复合微合金钢中 Nb, V 的质量分数对固溶 B 的质量分数几乎没有影响, 只与钢中加入 Ti 的质量分数有关, Ti-B 和 Ti-Nb-V-B 系微合金钢中 Ti 的质量分数最少为钢中 N 质量分数的 3.4~3.8 倍.

**关 键 词:** BN 析出; 微合金钢; Ti; 析出; 热力学

中图分类号: TG 142.13

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)04-0483-06

## Thermodynamic Analysis of Boron Nitride Formation in Boron Microalloyed Steel

KIM Kwang-su, DU Lin-xiu, GAO Cai-ru

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: DU Lin-xiu, E-mail: dulx@ral.neu.edu.cn)

**Abstract:** In aluminum killed boron steel, Ti-B steel and Nb-V-B microalloyed steel, the precipitation relation and the precipitate content of the various precipitates, and the influence of those on the solid solution boron content were thermodynamically analyzed by using the solid solubility formula of alloy elements in austenite. The results showed that the precipitation of BN is prior to the precipitation of AlN, so the effective boron content to increase the stability of austenite decreases in the aluminum killed boron steel. The addition of Ti is an effective method of increasing the solute boron content in the boron steel, because the bonding force between Ti and N is stronger than that between B and N. The contents of Nb and V have little influence on the solute B content in microalloyed steel, but the solute boron content only is related to Ti content added in the steel, and Ti content is 3.4~3.8 times of N content in the Ti-Nb-V-B microalloyed steel at least.

**Key words:** BN precipitation; microalloyed steel; Ti; precipitation; thermodynamics

钢中微量的 B 固溶于高温奥氏体中, 会在奥氏体晶界产生偏聚, 奥氏体的晶界能因此而降低, 这使奥氏体分解时铁素体在奥氏体晶界处形核困难, 延长了奥氏体/铁素体相变的孕育期<sup>[1-3]</sup>. 近年来, 在高强和超高强热轧结构钢的开发和生产中, 在进行微合金化的同时, 添加微量 B<sup>[4-5]</sup>, 以便更加充分地利用相变强化这一重要的强化机制. B 在此类钢中的作用机理仍然是基于固溶态

的 B 易于在奥氏体晶界处偏聚, 阻止铁素体在晶界上的优先形核. 所以, 如果 B 与钢中的 C, N, O 或其他合金元素结合形成化合物并以硼化物的形式存在, 则将失去硼的这一作用, 而且由于硼化物的形核作用, 将会促进钢的铁素体相变, 降低奥氏体的稳定性<sup>[2]</sup>, 这将不利于获得奥氏体低温转变产物. 硼为强烈的表面活性元素, 与钢中的 N, O, 特别是和 N 有很强烈的亲和力, 为了保证 B 的有

收稿日期: 2014-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2011BAE25B03).

作者简介: 金光秀(1975-), 男, 朝鲜平壤人, 朝鲜金策工业综合大学讲师, 东北大学博士研究生; 杜林秀(1962-), 男, 河北滦县人, 东北大学教授, 博士生导师.

利作用,一定要充分去除钢中 O, N 或抑制其作用。

关于硼对低碳钢和 Ti, Nb, V 微合金钢组织及性能的影响研究已有一些文献报道<sup>[5-6]</sup>, 但 BN 的形成过程及合金元素对其影响的热力学分析不足。

尽管不同的研究者在钢中 B 的最佳加入量方面有不同的研究结果, 但一般认为加入范围是 0.000 5% ~ 0.003%, 最佳为 0.001% ~ 0.003%<sup>[3,7]</sup>。因此, 为了有效地发挥固溶硼在钢中稳定奥氏体的作用, 需要掌握不同成分系的钢中硼化物的析出规律。本文以含硼铝镇静钢、Ti-B 和 Ti-Nb-V-B 系微合金钢为对象, 应用奥氏体中各合金元素的固溶度积公式, 研究不同含硼微合金钢中各元素的氮化物、碳化物在奥氏体中的析出规律, 为在含硼微合金钢中抑制硼化物形成、提高固溶硼的有效作用, 进而为含硼微合金钢的成分设计提供理论依据。

## 1 多元微合金系的析出热力学

单一微合金化时, 一般是将化学成分直接代入固溶度积公式来计算其析出关系。钢中加入单一微量合金元素 M 时, 对于二元化合物 MX, 其固溶度积公式为

$$\lg K_{MX} = \lg(w_{[M]} w_{[X]}) = A - \frac{B}{T} \quad (1)$$

式中: M 为金属元素; X 为非金属元素(N 或 C);  $w_{[M]}$  和  $w_{[X]}$  分别为处于固溶态的 M 及 X 的质量分数; A, B 为常数; T 为绝对温度。

基体中碳化物、氮化物的全固溶温度:

$$T_{MX} = \frac{B}{A - \lg(w_{[M]} w_{[X]})} \quad (2)$$

M, X 在基体中的平衡溶解度可由第二相在基体中的固溶度积公式及未溶第二相应保持理想化学配比计算的原则:

$$w_{[M]} w_{[X]} = 10^{A - \frac{B}{T}} \quad (3)$$

$$\frac{w_{0M} - w_{[M]}}{w_{0X} - w_{[X]}} = R = \frac{A_M}{A_X} \quad (4)$$

式中:  $w_{0M}$  为 M 的初始质量分数;  $w_{0X}$  为 X 的初始质量分数;  $A_M, A_X$  分别为 M 和 X 的原子量; R 为析出物的理想化学配比。

根据式(2) ~ 式(4)及在奥氏体中的固溶度积公式(表 1), 钢中加入单一微合金元素时能计算出不同温度及不同合金元素下的碳化物、氮化物析出量。析出物的种类、数量和析出物形成温度

主要跟钢的化学成分和奥氏体化温度有关。

表 1 主要析出物在奥氏体中的固溶度积公式和理想化学配比<sup>[8-10]</sup>

Table 1 Solid solubility formula of precipitates in austenite and stoichiometry

析出相	固溶度积公式	R
TiN	$\lg(w_{[Ti]} w_{[N]r}) = 4.94 - 14\,400/T$	3.42
TiC	$\lg(w_{[Ti]} w_{[C]r}) = 2.75 - 7\,000/T$	3.99
NbN	$\lg(w_{[Nb]} w_{[N]r}) = 2.8 - 8\,500/T$	6.64
NbC	$\lg(w_{[Nb]} w_{[C]r}) = 2.96 - 7\,510/T$	7.75
VN	$\lg(w_{[V]} w_{[N]r}) = 3.02 - 7\,840/T$	3.64
VC	$\lg(w_{[V]} w_{[C]r}) = 6.72 - 9\,500/T$	4.24
AlN	$\lg(w_{[Al]} w_{[N]r}) = 1.79 - 7\,184/T$	1.93
BN	$\lg(w_{[B]} w_{[N]r}) = 5.24 - 13\,970/T$	0.785

一般来说, 微合金钢复合微合金化时, 析出过程中一旦析出了碳化物、氮化物, 则奥氏体中相应元素的质量分数将会降低, 这对随后合金元素的析出过程会有影响。根据析出物的固溶度积, 随着合金元素及 C, N 质量分数的减少, 析出温度降低, 析出顺序也会发生变化。但在复合微合金系中, 许多有关合金元素析出过程解析的研究只是应用式(2) ~ 式(4)分析了单一元素的质量分数变化和析出过程。

本文扩大了式(2) ~ 式(4)的应用范围, 在多元微合金钢中, 研究了各合金元素共同作用对析出物形成的影响。钢中加入常用微合金元素 Ti, Nb, V, B 等后, 若各合金元素形成 MX 型碳化物或氮化物, 而且随温度变化, 各种析出相均满足热力学平衡关系, 则不同的温度下, 各元素的碳化物、氮化物在奥氏体中的固溶度积利用式(1)可表示为

$$\lg K_{M_iX} = \lg(w_{[M_i]} w_{[X]}) = A_{M_iX} - \frac{B_{M_iX}}{T}, \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

式中:  $w_{[M_i]}$  为处于固溶态的 i 合金元素的质量分数;  $w_{[X]}$  为处于固溶态的 N 或 C 元素的质量分数; n 为加入合金元素数。

对 i 元素的氮化物、碳化物, 式(5)可写为

$$\lg K_{M_iN} = \lg([w_{0M_i} - w_{M_i}][w_{0N} - w_N]), \quad (6)$$

$$\lg K_{M_iC} = \lg([w_{0M_i} - w_{M_i}][w_{0C} - w_C]), \quad (7)$$

$$w_N = \sum_{i=1}^n \frac{A_N}{A_{M_i} + A_N} w_{M_iN}, \quad (8)$$

$$w_C = \sum_{i=1}^n \frac{A_C}{A_{M_i} + A_C} w_{M_iC}, \quad (9)$$

$$w_{M_i} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_{M_i}}{A_{M_i} + A_N} w_{M_iN} + \frac{A_{M_i}}{A_{M_i} + A_C} w_{M_iC} \right). \quad (10)$$

式中:  $w_N, w_C$  分别为给定温度下形成氮化物、碳化物所消耗的 C, N 质量分数;  $w_{M_i}$  为给定温度下形成氮化物、碳化物所消耗的金属元素的质量分数;  $w_{M_iN}, w_{M_iC}$  分别为给定温度下形成氮化物、碳化物的质量分数;  $w_{0M_i}, w_{0N}, w_{0C}$  分别为钢中合金元素, N, C 的初始质量分数;  $A_M; A_N; A_C$  分别代表合金元素及 N, C 的原子量;  $K_{M_iN}, K_{M_iC}$  分别为给定温度下氮化物、碳化物形成的平衡常数. 若某一个合金元素只形成碳化物, 则对于  $i$  元素不用式(6), 式(10)中,  $w_{M_iN} = 0$ . 若某一个合金元素只形成氮化物, 则对于  $i$  元素不用式(7), 式(10)中,  $w_{M_iC} = 0$ .

式(6)~式(10)扩大了在多元微量合金系中碳、氮化物固溶度积公式的应用范围. 从上述固溶度积公式的应用可知, 复合微合金钢中析出物的种类、数量及析出物形成温度主要跟钢的化学成分和奥氏体化温度有关. 方程组(6)~(10)适用于在不同合金元素的质量分数及奥氏体化温度条件下不同析出物析出过程的理论分析.

## 2 计算结果与分析

### 2.1 合金元素的氮化物析出

根据式(2)及表1所列的固溶度积公式, 硼及常用几种合金元素的氮化物析出温度与钢中氮的质量分数关系的计算结果如图1所示.

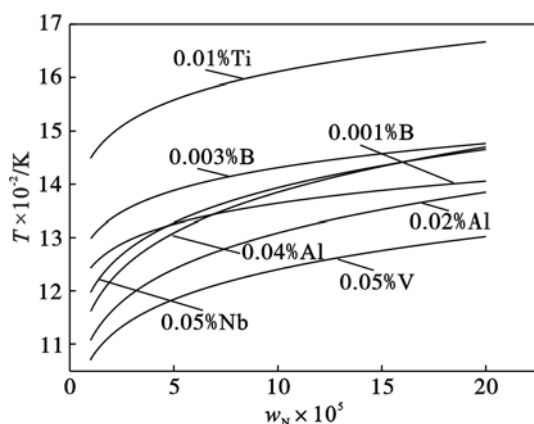


图1 各种氮化物析出温度与钢中氮的关系  
Fig. 1 Relationship between precipitate temperature and N in steel

由图1可知, 各元素的氮化物形成能力与钢中氮的质量分数及合金元素的质量分数有关, 氮及合金元素的质量分数越高, 氮化物的形成温度越高, 即氮化物形成能力越强. 但在一般的合金元素范围内, Ti 与 N 的结合力最强, 其次是 B, Al 或 Nb, V. 所以, 当钢中存在 Ti 时, Ti 优先与 N 结合

而形成钛氮化物. 与铝相比硼的氮化物形成能力很强, 虽然加入极少量的硼, BN 的析出温度要比 AlN 高. 但随着钢中氮质量分数的增加, AlN 的开始析出温度也增加, 特别是当钢中氮的质量分数达到 0.007% 以上时, 在 0.04% Al 成分下 AlN 的开始析出温度比在 0.001% B 成分下 BN 的开始析出温度高. 此时, 因 AlN 的优先析出, 会抑制 BN 的形成, 但钢脱氮用铝量有限, 所以一般镇静钢中还是 BN 优先于 AlN 析出. 因此, 钢中不含有 Ti, 加入 B 时, B 会优先与 N 结合而形成硼氮化物, 因而固溶 B 的质量分数将减少, 硼对奥氏体稳定性的有效作用降低.

### 2.2 含硼铝镇静钢中硼氮化物的析出

在低碳铝镇静钢中, 没有其他合金元素, 只有加入硼时, 分析 BN 析出过程. 此时, 固溶度积方程组中, 用式(6), 式(8)求解. 因为没有其他元素, 所以计算式为

$$\lg K_{BN} = \lg \left[ \left( w_{0N} - \frac{A_N}{A_B + A_N} w_{BN} - \frac{A_N}{A_{Al} + A_N} w_{AlN} \right) \times \left[ w_{0B} - \frac{A_B}{A_B + A_N} w_{BN} \right] \right] = 5.24 - \frac{13970}{T}, \quad (11)$$

$$\lg K_{AlN} = \lg \left[ \left( w_{0N} - \frac{A_N}{A_B + A_N} w_{BN} - \frac{A_N}{A_{Al} + A_N} w_{AlN} \right) \times \left[ w_{0Al} - \frac{A_{Al}}{A_{Al} + A_N} w_{AlN} \right] \right] = 1.79 - \frac{7184}{T}. \quad (12)$$

根据式(11)、式(12), 可以求解不同奥氏体化温度下析出物平衡析出量  $w_{BN}, w_{AlN}$ , 进而可分析钢中 AlN 和 BN 的析出关系. 假设钢成分为 0.002% B - 0.03% Al - 0.004% N 时, 钢中析出物的质量分数及钢中 B, N, Al 固溶的质量分数随析出温度变化关系的计算结果见图2. 由图2可见, 在此成分下 BN 和 AlN 均可析出, 但 BN 的析出温度为 1351 K, 显著高于 AlN, 优先于 AlN 析出. BN 的析出将会降低钢中硼及自由氮的质量分数, 后续 BN 析出的驱动力将因此而减小. AlN 的析出温度为 1177 K. 实际上, 当 N 的质量分数为 0.004% 时, 单一加入 0.003% Al 时 AlN 的开始析出温度为 1258 K, 但加入硼时, 由于 BN 的优先析出, 减少钢中氮的质量分数, 所以析出温度下降到 1177 K. 在这个温度以下, 同时析出 BN 和 AlN, 因此钢中 B, N 的质量分数继续下降. 当析出温度为 1073 K 时 BN 的质量分数及固溶硼的质量分数分别达到  $4.6 \times 10^{-5}$ ,  $2.29 \times 10^{-7}$ , 几乎完全析出. 由此可见, Al 抑制 BN 析出而提高奥氏体中固溶 B 的质量分数的作用很小. 以上计算结果与低碳铝镇静钢中 B, Al 氮化物析出关系

的分析结果<sup>[11]</sup>具有很好的一致性。

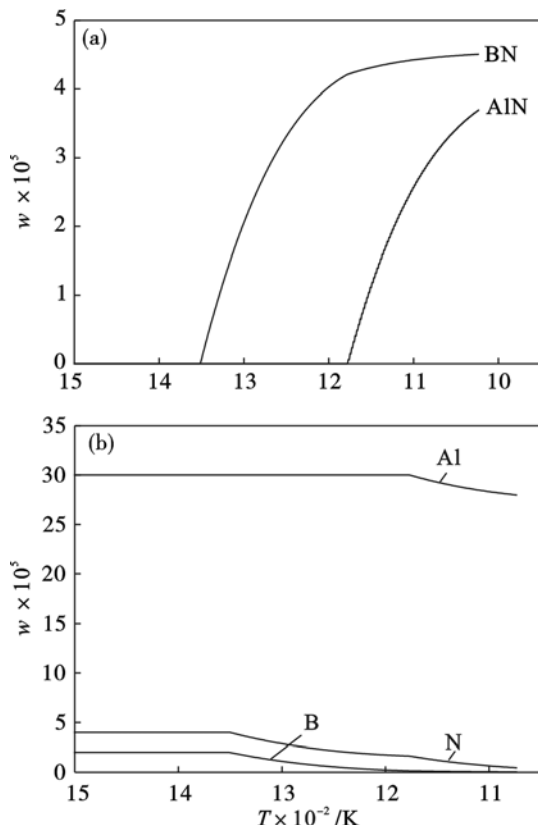


图2 钢中 BN, AlN 析出量及 B, N, Al 固溶量随温度的变化

Fig. 2 Relationship between temperature and mass fraction of BN, AlN, Al, B and N in steel

### 2.3 Ti-B 系钢中硼氮化物的析出

为了提高钢中固溶硼的质量分数,要尽量降低与硼的结合力很强的自由氮的质量分数。为此,可降低钢本身氮的质量分数或加入与氮的结合力更强的其他元素,使氮以化合物形式固定。其中最有效的方法就是后者。从图 1 可知,常用微合金元素中与氮的结合力最强的是钛。钢中加入钛,则固定了杂质元素 O, N 等,使硼处于固溶状态,而且形成的 TiN, TiO 还具有一定程度的细化晶粒的作用。因此,钢中加入钛时,需要分析钛及硼化合物的析出过程、各元素的质量分数变化关系及钛对有效硼质量分数的影响。

低碳镇静钢中加入钛、硼时,析出过程解析的方程组为

$$\lg K_{\text{TiN}} = \lg \left( \left[ w_{\text{0N}} - \frac{A_{\text{N}}}{A_{\text{Ti}} + A_{\text{N}}} w_{\text{TiN}} - \frac{A_{\text{N}}}{A_{\text{B}} + A_{\text{N}}} w_{\text{BN}} - \frac{A_{\text{N}}}{A_{\text{Al}} + A_{\text{N}}} w_{\text{AlN}} \right] \times \left[ w_{\text{0Ti}} - \frac{A_{\text{Ti}}}{A_{\text{Ti}} + A_{\text{N}}} w_{\text{TiN}} - \frac{A_{\text{Ti}}}{A_{\text{Ti}} + A_{\text{C}}} w_{\text{TiC}} \right] \right) = 4.94 - \frac{14400}{T}, \quad (13)$$

$$\lg K_{\text{TiC}} = \lg \left( \left[ w_{\text{0Ti}} - \frac{A_{\text{Ti}}}{A_{\text{Ti}} + A_{\text{N}}} w_{\text{TiN}} - \frac{A_{\text{Ti}}}{A_{\text{Ti}} + A_{\text{C}}} w_{\text{TiC}} \right] \times \right.$$

$$\left. \left[ w_{\text{0C}} - \frac{A_{\text{C}}}{A_{\text{Ti}} + A_{\text{C}}} w_{\text{TiC}} \right] \right) = 2.75 - \frac{7000}{T}, \quad (14)$$

$$\lg K_{\text{AlN}} = \lg \left( \left[ w_{\text{0N}} - \frac{A_{\text{N}}}{A_{\text{Ti}} + A_{\text{N}}} w_{\text{TiN}} - \frac{A_{\text{N}}}{A_{\text{B}} + A_{\text{N}}} w_{\text{BN}} - \frac{A_{\text{N}}}{A_{\text{Al}} + A_{\text{N}}} w_{\text{AlN}} \right] \times \left[ w_{\text{0Al}} - \frac{A_{\text{Al}}}{A_{\text{Al}} + A_{\text{N}}} w_{\text{AlN}} \right] \right) = 1.79 - \frac{7184}{T}, \quad (15)$$

$$\lg K_{\text{BN}} = \lg \left( \left[ w_{\text{0N}} - \frac{A_{\text{N}}}{A_{\text{Ti}} + A_{\text{N}}} w_{\text{TiN}} - \frac{A_{\text{N}}}{A_{\text{B}} + A_{\text{N}}} w_{\text{BN}} - \frac{A_{\text{N}}}{A_{\text{Al}} + A_{\text{N}}} w_{\text{AlN}} \right] \times \left[ w_{\text{0B}} - \frac{A_{\text{B}}}{A_{\text{B}} + A_{\text{N}}} w_{\text{BN}} \right] \right) = 5.24 - \frac{13970}{T}. \quad (16)$$

假设在上述钢成分(0.002% B-0.03% Al-0.004% N)上加入钛时,各相的析出量、析出温度及元素质量分数的变化关系如图 3, 图 4 所示。

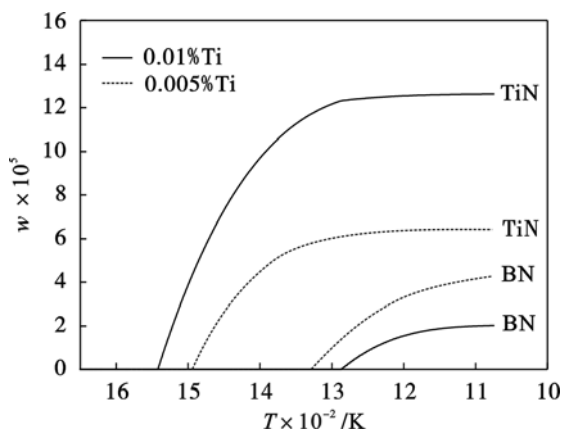


图3 钢中 TiN, BN 在不同温度下的析出量

Fig. 3 Precipitate content of TiN, BN in steel at different temperature

从图 3, 图 4 可知, 钢中加入钛时 TiN 的析出优先于 BN 的析出, 当钛的质量分数为 0.005%, 0.01% 时开始析出温度分别为 1493, 1542 K。即随着钛质量分数的增加, TiN 开始析出温度升高, 析出量增加, 使钢中自由氮急剧减少。因此, BN 析出量减少, 钢中固溶硼的质量分数增大, 当钛的质量分数为 0.005%, 0.01% 时有效硼的质量分数分别为  $1.15 \times 10^{-6}$ ,  $1.1 \times 10^{-5}$ 。即微量钛的加入对钢中固溶硼质量分数的增加有明显的作

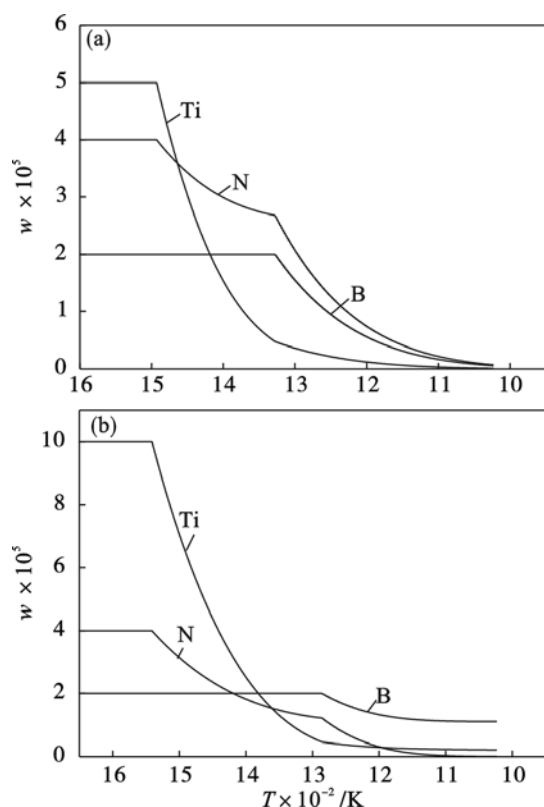


图4 钢中各元素质量分数在不同温度下变化  
Fig. 4 Relationship between temperature and mass fraction of elements in steel  
(a)—0.005% Ti; (b)—0.01% Ti.

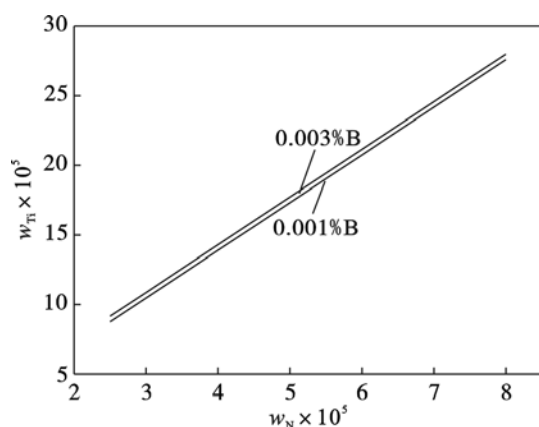


图5 随氮的质量分数的变化所加入的钛量  
Fig. 5 Change of  $w_{Ti}$  with  $w_N$

## 2.4 Ti-Nb-V-B系钢中硼氮化物的析出

Ti, Nb, V 是钢中最常用的微合金元素, 这些微合金元素与钢中的碳、氮交互作用, 产生了晶粒细化、析出强化、再结晶控制、相变强化等作用。微合金元素的加入范围一般为 0.02% ~ 0.2% Ti, 0.015% ~ 0.06% Nb, 0.02% ~ 0.15% V。Ti, Nb, V 复合微合金化的同时添加微量的硼, 这是近年来热轧超高强钢生产和研发过程中经常使用的成分设计, 为了充分发挥硼在稳定奥氏体、提高相变强化效果方面的作用, 需要对 Nb, V, Ti 三种元素

复合添加时微合金氮化物、碳化物析出规律及其对硼氮化物析出的影响进行相关的计算和分析。

将硼添加在 Ti-Nb-V 系复合微合金钢中时, 如析出 MX 型氮化物、碳化物, 利用式 (6) ~ 式 (10) 及各相的固溶度积公式可计算各元素质量分数在析出过程中的变化。

根据热力学分析, 当 C, N, Al 的质量分数分别为 0.1%, 0.004%, 0.03% 时, 钢中加入 0.01% Ti, 0.03% Nb, 0.1% V, 0.002% B 后在析出过程中按 TiN, NbC, BN, VC 的顺序析出。此时各相的开始析出温度分别为 1542, 1368, 1285, 1085 K, 无 TiC, NbN, VN, AlN 相析出。其原因: 一是 TiN 析出所需 Ti 是消耗 N 的 3.42 倍, 析出时 Ti 的质量分数大幅减少, TiC 的析出温度也随 Ti 的质量分数减少而降低, 难以平衡析出 TiC; 二是 TiN 的析出, N 的质量分数也大大减少, 同样难以平衡析出 NbN, VN, AlN。但钢中 C, N 的质量分数或 Ti, Nb, V 的质量分数不同时, 将相应地析出不同的碳化物和氮化物。假如 Ti-Nb-V-B 系钢中 N 的质量分数增加到 0.01% 或 Ti 的质量分数增加到 0.05% 时, 钢中按 TiN, BN, NbC, AlN, VN, VC 的顺序析出, 其析出温度分别为 1610, 1384, 1367, 1279, 1107, 1082 K。即 N 的质量分数增加时, 与前不同, 氮化物的析出温度提高, 析出了 AlN, VN。钢中 Ti 的质量分数增加到 0.05% 时, Ti 析出物的析出温度提高, 析出 TiN, NbC, TiC, VC。此时, 除了 TiN 以外, BN 等其他氮化物没有析出。

在 0.1% C-0.01% Ti-0.03% Nb-0.1% V-0.002% B 钢成分 (0.004% N) 下, 析出 BN 的质量分数及固溶硼的质量分数分别为  $2.02 \times 10^{-5}$ ,  $1.11 \times 10^{-5}$ , 有效硼的质量分数为加入硼的质量分数的一半以上。根据不同 Ti, Nb, V 的质量分数下的计算结果, Nb, V 的质量分数几乎不会影响固溶硼的质量分数, 只与钢中加入 Ti 的质量分数有关; 抑制析出 BN 所需要的 Ti 的质量分数也是钢中 N 的质量分数的 3.4 ~ 3.8 倍。

## 3 结 论

1) 含硼铝镇静钢中 B 和 Al 都与 N 结合能形成氮化物 BN, AlN, 但 BN 的析出优先于 AlN 的析出, 因此 B 对奥氏体稳定性的有效质量分数减少。

2) 为提高含硼钢中的固溶 B 的质量分数, 应加入比 B 与 N 的结合力强的 Ti; Ti-B 系微合金

钢中 TiN 的析出优先于 BN 的析出,使钢中与硼结合力很强的自由氮的质量分数急剧减少,从而增大了固溶态的硼的质量分数.为抑制 BN 形成所需加入的 Ti 随着钢中氮的质量分数的增加呈线性增大,约为氮质量分数的 3.4~3.8 倍.

3) Ti-Nb-V-B 系复合微合金钢中 Nb、V 的质量分数几乎不会影响固溶硼的质量分数,只与钢中加入 Ti 的质量分数有关,其质量分数也为钢中 N 质量分数的 3.4~3.8 倍.

#### 参考文献:

- [1] Wang M X, He X L. Effect of boron addition on structure and properties of low carbon bainitic steels [J]. *ISIJ International*, 2002, 42 (sup1): 38-46.
- [2] Jun H J, Kang J S. Effects of deformation and boron on microstructure and continuous cooling transformation in low carbon HSLA steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 422 (2): 157-162.
- [3] Deva A, Jha B K. Influence of boron on strain hardening behavior and ductility of low carbon hot rolled steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528 (3): 7375-7380.
- [4] 张慧云,李艳梅.含硼低碳贝氏体钢的 TMCP 工艺模拟[J].金属热处理,2013,38(7):6-9.  
(Zhang Hui-yun, Li Yan-mei. Simulation of TMCP process on a low-carbon bainitic steel contained boron [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2013, 38 (7): 6-9.)
- [5] Opielan M, Grajcar A. Hot deformation behavior and softening kinetics of Ti-V-B microalloyed steels [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2012, 12 (3): 327-333.
- [6] Kyung C C, Dong J M. Effect of niobium and titanium addition on the hot ductility of boron containing steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528 (3): 3556-3561.
- [7] Dong J M, Eun J S. Effects of cooling rate, austenitizing temperature and austenite deformation on the transformation behavior of high-strength boron steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 545 (2): 214-224.
- [8] 雍岐龙.钢铁材料中的第二相[M].北京:冶金工业出版社,2006.  
(Yong Qi-long. Second phase of the steel material [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.)
- [9] Vedani M, Mannucci A. Effect of titanium addition on precipitate and microstructural control in C-Mn microalloyed steels [J]. *ISIJ International*, 2002, 42 (12): 1520-1526.
- [10] Wada H, Pehlke R D. Nitrogen solubility and nitride formation in austenitic Fe-Ti alloys [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1985, 16 (4): 815-822.
- [11] 李培松,肖丽俊.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):16-19.  
(Li Pei-song, Xiao li-jun. Thermodynamic analysis of AlN and BN competitive precipitation in low carbon steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2009, 21 (5): 16-19.)
- [4] Mousavi S H, Rezaeian A, Yue S. The effect of chemical composition and austenite conditioning on the transformation behavior of microalloyed steels [J]. *Materials Characterization*, 2012, 63: 27-38.
- [5] 冯向阳,齐彦昌,彭云,等.货油舱用耐蚀钢焊接接头的耐腐蚀性能[J].钢铁研究学报,2012,24(3):44-49.  
(Feng Xiang-yang, Qi Yan-chang, Peng Yun, et al. Investigation on corrosion behaviors of anti-corrosion steels joint for cargo oil tanks [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2012, 24 (3): 44-49.)
- [6] Sun W H, Wang G D, Zhang J M, et al. Microstructure transformation behavior of 610 MPa HSLA steel plate for 150 000 m<sup>3</sup> oil storage tank construction [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, 17 (2): 48-52.
- [7] Jiang Y H, Liu F, Song S J. An extended analytical model for solid-state phase transformation upon continuous heating and cooling processes: application in  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60 (9): 3815-3829.
- [8] Wang B X, Liu X H, Wang G D. Effect of deformation of austenite and cooling rates on transformation microstructures in a Mn-Cr gear steel [J]. *Materials & Design*, 2009, 30 (6): 2198-2204.
- [9] Serajzadeh S, Taheri A K. A study on austenite decomposition during continuous cooling of a low carbon steel [J]. *Materials & Design*, 2004, 25 (8): 673-679.

(上接第 482 页)