

铌对高钢级管线钢中碳氮化物析出热力学影响

齐亮^{1,2} 赵爱民¹ 赵征志¹ 黄耀¹

(1. 北京科技大学 冶金工程研究院, 北京 100083; 2. 江西理工大学 材料科学与工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 高钢级管线钢中碳氮化物析出对提高钢的强韧性有着非常重要的作用。基于高钢级管线钢的成分体系, 建立 $(\text{Nb}_x, \text{Ti}_{1-x})(\text{C}_y, \text{N}_{1-y})-\text{AlN}$ 复合析出的双亚点阵热力学模型, 计算出 $800 \sim 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ 内两种不同Nb含量的管线钢中碳氮化物复合析出数据, 并与Jmatpro软件计算结果进行比较。结果表明: Nb含量的增加, 提高了Nb的全固溶温度, 扩大了高温析出温度区域; Ti元素在 $1200 \sim 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ 内析出速度很快, $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时两种成分钢中Ti的析出量均大于50%; $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 平衡态时, 析出物均以NbC为主; Nb对Ti元素的交互作用间接影响到AlN的析出; 热力学计算结果与JMatpro软件计算结果进行比较, 试验数据有着良好的一致性。

关键词: 铌; 管线钢; 碳氮化物; 热力学模型; 固溶度

中图分类号: TG335.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-0299(2012)06-0029-06

Effect of niobium on the carbonitride complex precipitation in high-grade pipeline steels

QI Liang^{1,2} ZHAO Ai-min¹ ZHAO Zheng-zhi¹ HUANG Yao¹

(1. Research Institute of Metallurgy Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Material Science and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Carbonitride precipitates have significant effects on the strength and toughness of high-grade pipeline steels. Based on the composition of high-grade pipeline steels, an ideal two-sub-lattice model which was a thermodynamic model for $(\text{Nb}_x, \text{Ti}_{1-x})(\text{C}_y, \text{N}_{1-y})-\text{AlN}$ complex precipitate was established to calculate carbonitride precipitation with different content of Nb between $800 \text{ }^\circ\text{C}$ and $1450 \text{ }^\circ\text{C}$. The results show that, with the content of Nb increased, the dissolution temperature is increased, and the precipitation temperature range is expanded; Ti elements precipitated fast at the range from $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ to $1450 \text{ }^\circ\text{C}$. When the temperature was $800 \text{ }^\circ\text{C}$, the NbC precipitates were dominated in equilibrium. Nb affected the precipitation of AlN indirectly. Thermodynamic calculation results are in agreement with those of JMatpro software.

Key words: niobium; pipeline steels; carbonitride precipitation; thermodynamic model; solubility

X80 ~ X120 高钢级管线钢是基于合金化技术和控轧控冷技术制备的, 钢中常添加 Nb、Ti、V、Cr、B、Mo、Al 等微合金元素, 它们可以通过析出强化、相变强化和晶粒细化提高管线钢的性能。Nb、Ti 和 Al 元素在奥氏体化阶段就能与 C、N 相互作用形成第二相粒子, 析出物尺度、数量及其分布状

态对钢的性能有着显著影响。因此, 在高钢级管线钢连铸坯再加热过程中, 第二相粒子的溶解和析出过程会直接影响到奥氏体晶粒大小、晶粒均匀化程度及随后变形过程中的奥氏体再结晶规律, 而这些因素都对最终的相变产物产生影响, 从而引起轧后钢材综合力学性能的变化。尤其铌在钢中具有阻止晶粒长大、抑制形变奥氏体再结晶及产生显著的沉淀强化效果, 并与微钛技术结合在管线钢制备中起到重要作用。所以, 研究在不同的温度制度下, 不同 Nb 含量的高钢级管线钢中形成的碳氮化物的分子式、固溶析出规律, 对制定再

收稿日期: 2011-11-14.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA03Z502);

江西省教育厅资助项目(gjj1145).

作者简介: 齐亮(1980-), 男, 博士研究生;

赵爱民(1962-), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 赵爱民, E-mail: aimin.zhao@mater.ustb.edu.cn.

加热温度和轧制工艺及了解析出物析出的动力学有非常重要的作用. 很多学者建立了关于第二相析出的热力学模型^[1-10], 其中涉及体系有 (M_x, M_{1-x}) (C_yN_{1-y})^[2] 和 Ti (C_xN_{1-x}) - MnS - Ti₄C₂S₂^[3], Ti (C_xN_{1-x}) - AlN - MnS^[4] 等.

本文针对高钢级管线钢建立一个基于双亚点阵模型的 (Nb_x, Ti_{1-x}) (C_yN_{1-y}) - AlN 复合析出的热力学模型, 利用此模型计算两种不同 Nb 含量的高钢级管线钢奥氏体阶段第二相的析出规律, 并与 Jmatpro 软件计算结果进行比较, 对铸坯再加热过程中的析出现象进行解释和定量分析.

1 析出热力学模型建立

在含有 Nb、Ti、Al 等微合金元素的高钢级管线钢中析出物的体系确立为 Fe - Nb - Ti - Al - C - N 系统. 根据热力学规律, Al 元素不会与 C 元素反应生成碳化物, 而只会与 N 元素反应生成 AlN. 由于 AlN 具有密排六方结构, 与 NaCl 结构的 (Nb_x, Ti_{1-x}) (C_yN_{1-y}) 不会发生互溶, 所以在此析出物系统中 (Nb_x, Ti_{1-x}) (C_yN_{1-y}) 与 AlN 可以认为是两个析出过程, 它们之间唯一的交互作用就是 N 元素. 由于置换元素 Nb、Ti 和间隙元素 C、N 在合金中的质量分数非常少, 所以它们在奥氏体中形成稀溶液, 并且满足亨利定律. 假设碳氮化物符合理想化学配比, 即碳氮化物中金属原子的数量等于间隙原子的数量, 忽略间隙和金属空位等缺位现象. 复合碳氮化物的化学式可以写成 (Nb_x, Ti_{1-x}) (C_yN_{1-y}), 其中 *x* 和 *y* 分别为 Nb 和 C 在各自亚点阵中的摩尔分数, Ti 和 N 的摩尔分数分别为 1 - *x* 和 1 - *y*. 1 mol 碳氮化物 (Nb_x, Ti_{1-x}) (C_yN_{1-y}) 可以看作是二元碳化物和氮化物的混合, 即 1 mol (Nb_x, Ti_{1-x}) (C_yN_{1-y}) 中含有 *xy* mol 的 NbC, *x*(1 - *y*) mol 的 NbN, *y*(1 - *x*) mol 的 TiC, (1 - *y*)(1 - *x*) mol 的 TiN. 这样碳氮化物 (Nb_x, Ti_{1-x}) (C_yN_{1-y}) 的形成自由能为^[1,11]

$$G_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})} = xyG_{NbC}^0 + x(1-y)G_{NbN}^0 + (1-x)yG_{TiC}^0 + (1-x)(1-y)G_{TiN}^0 - T^*S^m + {}^E G^m$$

式中: G_{NbC}^0 、 G_{NbN}^0 、 G_{TiC}^0 、 G_{TiN}^0 为纯二元化合物在任意温度的形成自由能; S^m 为理想混合熵; ${}^E G^m$ 为过剩自由能; T 为绝对温度.

假定金属原子和非金属原子各自在其亚点阵内随机混合, 则理想混合熵 S^m 为

$$-\frac{S^m}{R} = x \ln x + (1-x) \ln(1-x) + y \ln y + (1-y) \ln(1-y)$$

式中, R 为气体常数.

考虑到 Nb - Ti 和 C - N 的交互作用, 过剩自由能采用规则溶液模型为

$${}^E G^m = x(1-x)yL_{NbTi}^C + x(1-x)(1-y)L_{NbTi}^N + xy(1-y)L_{CN}^{Nb} + (1-x)y(1-y)L_{CN}^{Ti}$$

式中, L_{NbTi}^C 、 L_{NbTi}^N 、 L_{CN}^{Nb} 、 L_{CN}^{Ti} 为交互作用参数.

二元化合物析出相的偏摩尔自由能为

$$\bar{G}_{NbC} = G_{NbC}^0 + (1-x)(1-y)\Delta G + RT \ln x + RT \ln y + {}^E \bar{G}_{NbC}$$

$$\bar{G}_{NbN} = G_{NbN}^0 - (1-x)y\Delta G + RT \ln x + RT \ln(1-y) + {}^E \bar{G}_{NbN}$$

$$\bar{G}_{TiC} = G_{TiC}^0 - x(1-y)\Delta G + RT \ln(1-x) + RT \ln y + {}^E \bar{G}_{TiC}$$

$$\bar{G}_{TiN} = G_{TiN}^0 + xy\Delta G + RT \ln(1-x) + RT \ln(1-y) + {}^E \bar{G}_{TiN}$$

式中, $\Delta G = G_{NbN}^0 + G_{TiC}^0 - G_{NbC}^0 - G_{TiN}^0$.

由于描述碳化物和氮化物的规则溶液参数有限, 因此使用一些简化处理: 交互作用参数 L_{NbTi}^C 、 L_{NbTi}^N 取为 0; L_{CN}^{Nb} 、 L_{CN}^{Ti} 等于 -4 260 J/mol. 偏过剩自由能为

$${}^E \bar{G}_{NbC} = {}^E \bar{G}_{TiC} = L_{CN} (1-y)^2$$

$${}^E \bar{G}_{NbN} = {}^E \bar{G}_{TiN} = L_{CN} x^2$$

从热力学角度看, 当奥氏体和碳氮化物达到热力学平衡时, 析出相中由原子交互作用产生的自由能变化量一定等于奥氏体中的自由能变化量. 因此, 奥氏体与析出相间的热力学平衡条件如下:

$$\bar{G}_{NbC} = \bar{G}_{Nb}^y + \bar{G}_C^y \quad (1)$$

$$\bar{G}_{NbN} = \bar{G}_{Nb}^y + \bar{G}_N^y \quad (2)$$

$$\bar{G}_{TiC} = \bar{G}_{Ti}^y + \bar{G}_C^y \quad (3)$$

$$\bar{G}_{TiN} = \bar{G}_{Ti}^y + \bar{G}_N^y \quad (4)$$

式中, \bar{G}_{Nb}^y 、 \bar{G}_{Ti}^y 、 \bar{G}_C^y 和 \bar{G}_N^y 为 Nb、Ti、C 和 N 在奥氏体中的偏摩尔自由能, 其表达式为

$$\bar{G}_M = RT \ln a_M$$

式中, a_M 为组元 M 的活度. 对于很小的溶解组元含量, 活度可以通过摩尔分数 x_M 表示.

对式 (1) ~ (4) 进行转化, 得到最后的平衡条件方程

$$y \ln \frac{xyK_{NbC}}{x_{Nb}x_C} + (1-y) \ln \frac{x(1-y)K_{NbN}}{x_{Nb}x_N} +$$

$$\frac{L_{CN}}{RT} [y(1-y)] = 0, \quad (5)$$

$$x \ln \frac{xy K_{NbC}}{x_{Nb} x_C} + (1-x) \ln \frac{y(1-x) K_{TiC}}{x_{Ti} x_C} + \frac{L_{CN}}{RT} (1-y)^2 = 0, \quad (6)$$

$$x \ln \frac{x(1-y) K_{NbN}}{x_{Nb} x_N} + (1-x) \ln \frac{(1-y)(1-x) K_{TiN}}{x_{Ti} x_N} + \frac{L_{CN}}{RT} y^2 = 0. \quad (7)$$

式中 x_{Nb} 、 x_{Ti} 、 x_C 和 x_N 为平衡时奥氏体中这些组元的摩尔分数. 由于 AlN 的密排六方结构与碳氮化物的 NaCl 结构不互溶, 根据质量守恒定律可以得到

$$x_{Nb}^0 = f_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})} \left(\frac{x}{2} \right) + (1 - f_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})} - f_{AlN}) x_{Nb}, \quad (8)$$

$$x_{Ti}^0 = f_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})} \left(\frac{1-x}{2} \right) + (1 - f_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})} - f_{AlN}) x_{Ti}, \quad (9)$$

$$x_C^0 = f_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})} \left(\frac{y}{2} \right) + (1 - f_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})} - f_{AlN}) x_C, \quad (10)$$

$$x_N^0 = f_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})} \left(\frac{1-y}{2} \right) + \frac{f_{AlN}}{2} + (1 - f_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})} - f_{AlN}) x_N, \quad (11)$$

$$x_{Al}^0 = \frac{f_{AlN}}{2} + (1 - f_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})} - f_{AlN}) x_{Al}, \quad (12)$$

$$x_{Al} x_N = K_{AlN}. \quad (13)$$

式中: x_i^0 为析出前奥氏体中对应溶质的摩尔分数;

表2 试验钢的化学成分(质量分数/%)^[1]

编号	C	Si	Mn	Ti	Ni	Nb	Cr	Als	Mo	N	Cu
1#	0.054	0.20	1.90	0.014	0.26	0.095	0.044	0.023	0.28	0.004	0.024
2#	0.052	0.22	1.88	0.012	0.27	0.052	0.040	0.022	0.28	0.004	0.024

从热力学方面考虑, TiN 具有相当低的固溶度积, 在相当高的温度下就可能主要以 TiN 的形式存在, 且 Ti 和 N 的占位分数较高. 高温析出的 TiN 能够有效地钉扎奥氏体晶界、阻止奥氏体晶粒长大; 随着温度的降低, 低温析出物的数量增加, N 和 Ti 的占位分数逐渐减小. NbN 的固溶度积次低, 故在一定程度上也能起到阻止奥氏体晶粒长大的作用; TiC 和 NbC 具有相对高的固溶度积, 在轧制过程中主要起到应变诱导析出强化的作用. Al 在钢中可以和 N 相结合, 形成 AlN 析出

$f_{(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y})}$ 和 f_{AlN} 为析出物的摩尔分数.

在方程中, 所有溶度积 K_{NbN} 、 K_{NbC} 、 K_{TiN} 、 K_{TiC} 和 K_{AlN} 普遍都是以 $\lg K_{[M][X]}^{wt\%} = A - B/T$ 的形式给出, 其中 A 和 B 都是常数, 常用值见表 1, [M] 和 [X] 分别为金属原子和间隙原子的质量分数. 在式中物质的量和溶度积都以摩尔分数表示, 因此两者之间可以用下式进行转换:

$$K_{[M][X]} = \frac{(Fe)^2}{10^4(M)(X)} \times 10^{A-B/T}.$$

式(5)~(13)构成的非线性方程组中含有 9 个方程和 9 个未知数. 此方程组描述了高钢级管线钢中析出物与奥氏体间的热力学平衡, 利用 1stop 软件进行非线性方程组进行求解, 独立的二元化合物固溶度积中参数见表 1, 计算结果与 Jmatpro 软件结果进行对比.

表1 奥氏体中二元化合物的固溶度积^[1]

二元化合物	A	B
NbC	2.96	7 510
NbN	3.70	10 800
TiC	2.75	7 000
TiN	0.32	8 000
AlN	1.03	6 770

2 计算结果与讨论

研究的高钢级管线钢成分如表 2 所示: 1# 试验钢中 Nb 的质量分数为 0.095, 2# 为 0.052, 其他元素含量相差不大.

物, 在一定程度上会对碳氮化物析出产生一定的影响. 综合考虑以上因素, 通过热力学计算的复合 $(Nb_x Ti_{1-x})(C_y N_{1-y}) - AlN$ 析出物的热力学析出变化规律如图 1 所示.

从图 1(a) 的计算结果可以看出, 对于不同 Nb 含量的高钢级管线钢, 单纯从热力学方面考虑, Nb 元素在 1 450 ~ 1 250 °C 区间内析出量很小, Nb 含量的增加, 提高了 Nb 元素的全固溶温度. 1# 钢和 2# 钢在 1 200 °C 时析出 Nb 的质量约占总 Nb 量的分数分别为 25% 和 19%.

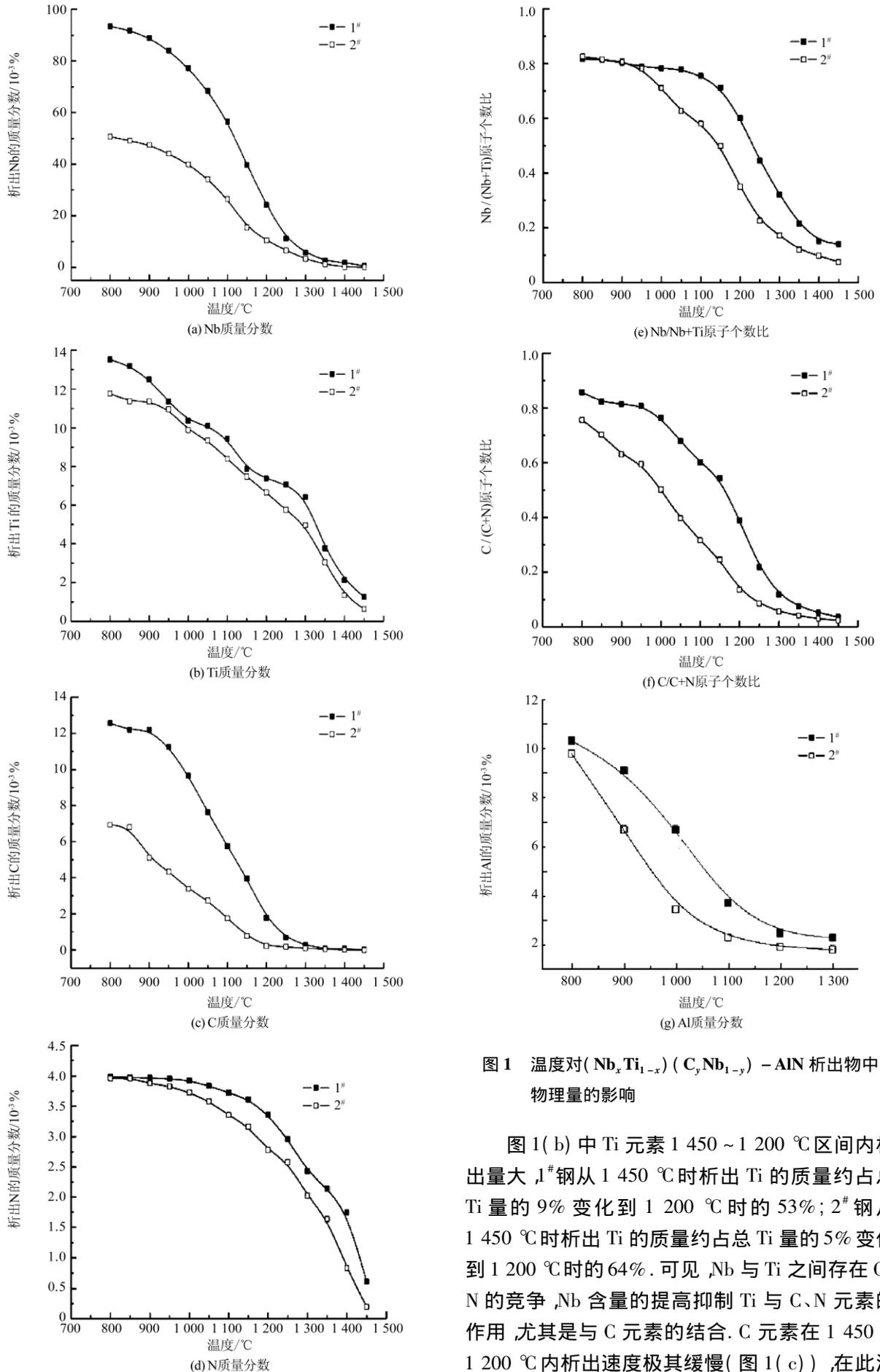


图 1 温度对 $(\text{Nb}_x\text{Ti}_{1-x})(\text{C}_y\text{Nb}_{1-y})-\text{AlN}$ 析出物中物理量的影响

图 1(b) 中 Ti 元素 1 450 ~ 1 200 °C 区间内析出量大, 1# 钢从 1 450 °C 时析出 Ti 的质量约占总 Ti 量的 9% 变化到 1 200 °C 时的 53%; 2# 钢从 1 450 °C 时析出 Ti 的质量约占总 Ti 量的 5% 变化到 1 200 °C 时的 64%。可见 Nb 与 Ti 之间存在 C、N 的竞争, Nb 含量的提高抑制 Ti 与 C、N 元素的作用, 尤其是与 C 元素的结合。C 元素在 1 450 ~ 1 200 °C 内析出速度极其缓慢(图 1(c)), 在此温

度区间内 C 元素几乎全部处于固溶状态. N 元素在 1 450 ~ 1 200 °C 温度内析出速度非常快 (图 1(d)), 主要与 Ti 元素作用生产 TiN. 在 1 200 °C 时, 1# 钢和 2# 钢中析出的 N 质量分数分别达到了 84% 和 70%. 析出物中 Nb 和 C 元素所占原子数分数随着温度的降低而增加. 经计算 1# 钢在 1 200 °C 平衡析出碳氮化物的化学式为 $(\text{Nb}_{0.591}\text{Ti}_{0.409})(\text{C}_{0.389}\text{N}_{0.611})$. 2# 钢在 1 200 °C 平衡析出碳氮化物为 $(\text{Nb}_{0.349}\text{Ti}_{0.651})(\text{C}_{0.135}\text{N}_{0.865})$. 由此可以看出, 板坯在 1200 °C 保温阶段析出的碳氮化物中, 1# 钢中析出物的化学式主要为 $(\text{Nb}, \text{Ti})(\text{C}, \text{N})$; 而 2# 钢中析出物的化学式主要为 TiN, 可见 Nb 含量的增加有利于 $(\text{Nb}, \text{Ti})(\text{C}, \text{N})$ 的高温析出.

当温度低于 1 200 °C 时, 随着温度的降低, Nb 元素的析出速率呈先升高而后再降低的趋势. 1# 钢中 Nb 约在 1 100 ~ 1 200 °C 内具有最大的析出速率; 而对于 2# 钢, Nb 约在 1 050 ~ 1 100 °C 内具有最大的析出速率. 说明 Nb 的含量变化对析出物的析出温度区间与析出速率有一定的影响. Nb 含量增加扩大了高温区的析出温度范围. 析出 Ti 元素和 N 元素随着温度的降低, 析出速率逐渐下降. 析出的 C 元素、Nb/(Nb + Ti) 和 C/(C + N) 的原子比 (图 1(c)、(e)、(f)) 随着温度的降低, 其变化速度均呈先升高而后再降低的趋势. 当温度为 800 °C 时, 平衡状态下, 两种成分钢中的 Nb、Ti 元素大部分析出. 此时析出物的化学式分别为: 成分 1 ($(\text{Nb}_{0.817}\text{Ti}_{0.183})(\text{C}_{0.857}\text{N}_{0.143})$); 成分 2 ($(\text{Nb}_{0.826}\text{Ti}_{0.174})(\text{C}_{0.756}\text{N}_{0.244})$). 由此可见, 析出物主要为 NbC.

因 Al 元素和 Ti、Nb 元素都与 N 元素作用, 尤其是 Ti 元素与 N 元素在高温时具有较强的亲和力, 抑制了 AlN 的形成. 若单纯考虑热力学因素, 经计算两种钢中 AlN 的全固溶温度在 1 060 °C 左右. 而高 Nb 钢中 Ti 的析出受到抑制, 提高了 AlN 的析出温度. 在 Ti 的交互作用下, Al 的析出受到一定的影响. 图 1(g) 中观察到 1# 成分中 AlN 的析出温度高于 2# 成分, 在 800 °C 时 Al 的析出量也仅为 0.01 左右, 相对于总量而言, 再加热阶段 AlN 的析出量较少.

图 2 为 Jmatpro 的计算结果, 可以观察到 1# 成分中 $(\text{Nb}, \text{Ti})(\text{C}, \text{N})$ 的析出温度为 1 220 °C, AlN 的析出温度也提高到 1 110 °C 左右. 2# 成分中 $(\text{Nb}, \text{Ti})(\text{C}, \text{N})$ 的析出温度为 1 160 °C, AlN 的析出温度在 1 000 °C, 并且 AlN 析出阶段会与 Ti 元

素形成竞争, 导致 TiN 析出量略减. 这与热力学模型计算结果基本一致.

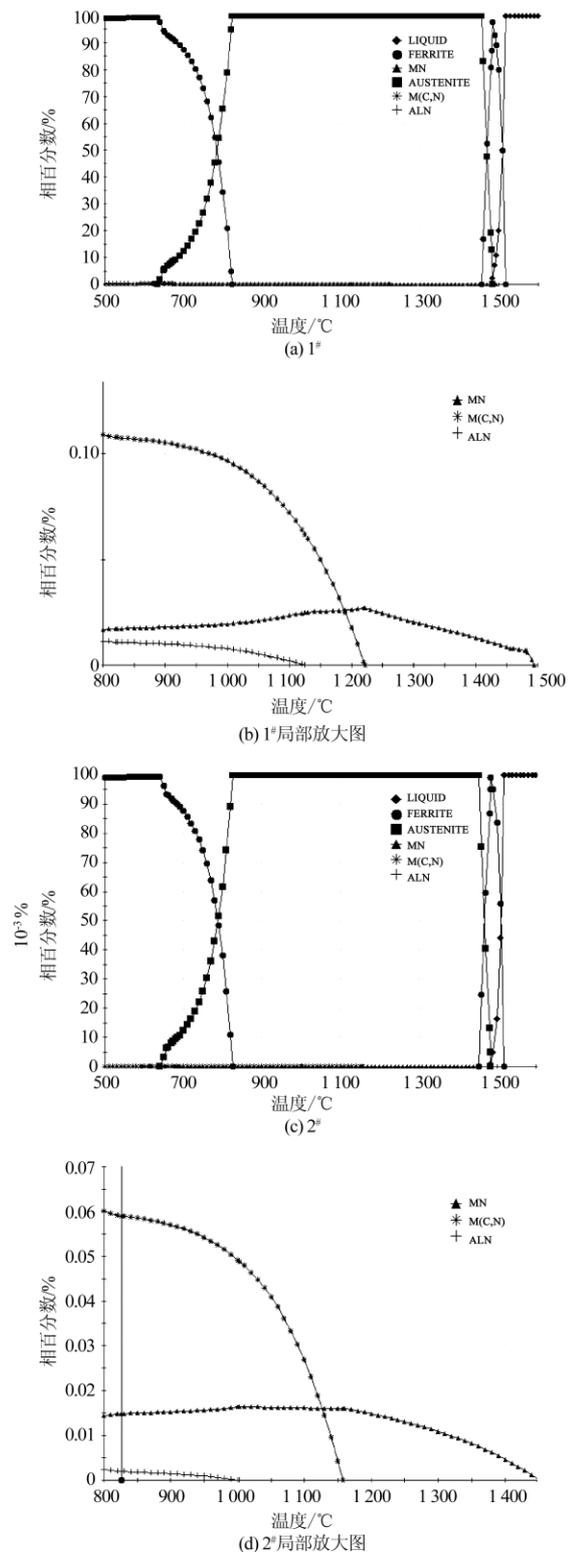


图 2 相平衡图及局部放大图

3 结论

1) Nb 含量的增加提高了 $(\text{Nb}_x, \text{Ti}_{1-x})(\text{C}_y, \text{N}_{1-y})$

析出温度, 1[#]成分的析出温度为1 220 °C, 在温度为1 100 ~ 1 220 °C时析出速率较大, 2[#]成分(Nb_x, Ti_{1-x}) (C_y, N_{1-y})的析出温度为1 160 °C, 在1 050 ~ 1 160 °C时析出速率较大。

2) Ti 元素在1 450 ~ 1 200 °C内析出速度很快, Nb 含量的提高能够抑制 Ti 的析出, 并且能够改变 AlN 析出的温度。

3) 800 °C平衡状态下, 两种成分钢中的 Nb、Ti 元素大部分析出, 析出物以 NbC 为主, Al 元素析出量仅占总质量的 0.5。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] SPEER J G, MICHAEL J R, HANSEN S S. Carbonitride precipitation in niobium / vanadium microalloyed steels [J]. Metal Trans, 1987, 18A: 211 - 215.
- [3] RIOS P R. Method for the determination of mole fraction and composition of a multicomponent fcc carbonitride [J]. Mater Sci Eng, 1991, 142A: 87 - 92.
- [4] 向嵩, 刘国权, 李长荣, 等. 低碳钢碳氮析出物的热力学计算 [J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(9): 818 - 822.
XIANG Song, LIU Guo-quan, LI Chang-rong, et al. Thermodynamic model for carbonitride precipitation in low carbon steels [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(9): 818 - 822.
- [5] 唐广波, 吴秀月, 雍兮, 等. 复合微合金化高强度低合金钢奥氏体相中碳氮化物析出热力学数值模拟 [J]. 金属热处理, 2008, 33(8): 67 - 72.
TANG Guang-bo, WU Xiu-yue, YONG Xi, et al. Numerical simulation of thermodynamic for carbonitride precipitation in austenite of complex microalloyed high strength and low alloy steels [J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(8): 67 - 72.
- [6] 陈颜堂, 郭爱民, 李平和. Nb - Ti 微合金化超低碳低合金高强度钢中第二相的析出行为 [J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 51 - 54.
CHEN Yan-tang, GUO Ai-min, LI Ping-he. Nitride and carbonitride precipitation behavior in a Nb - Ti microalloyed extra low carbon HSLA steel [J]. Heat Treatment of Metal, 2007, 32(9): 51 - 54.
- [7] AKAMATSU S, HASEBE M, SENUMA T, et al. Thermodynamic calculation of solute carbon and nitrogen in Nb and Ti added extra-low carbon steels [J]. ISIJ International, 1994, 34(1): 9 - 16.
- [8] 曹建春, 雍岐龙, 刘清友, 等. 含铌钼钢中微合金碳氮化物沉淀析出及其强化机制 [J]. 材料热处理学报, 2006, 27(5): 51 - 55.
CAO Jian-chun, YONG Qi-long, LIU Qing-you, et al. Precipitation of microalloyed carbonitride and its strengthening mechanism in low carbon steels containing Nb and Mo [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(5): 51 - 55.
- [9] 傅杰, 刘阳春, 吴华杰. HSLC 钢中纳米氮化物的析出与作用 [J]. 中国科学 E 辑, 2008, 38(5): 797 - 806.
FU Jie, LIU Yang-chun, WU Hua-jie. The precipitation and effect of nano nitrides in HSLC steel [J]. Science in China Series E, 2008, 38(5): 797 - 806.
- [10] YOSHINAGA N, USHIODA K, AKAMATSU S, et al. Precipitation behavior of sulfides in Ti-added ultra low-carbon steels in austenite [J]. ISIJ International, 1994, 34(1): 24 - 28.
- [11] 郝士明. 材料热力学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
HAO Shi-ming. Thermodynamics of Materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.

(编辑 程利冬)