

Nb-Ti-V-Mo 微合金钢中复合碳化物的析出动力学

姚 娜, 兴 超

(济源职业技术学院冶金化工系, 河南 济源 459000)

摘 要:结合 JmatPro 热力学软件对 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 海工钢中多元复合析出相的固溶热力学计算和经典形核长大动力学理论,研究了 (Nb,Ti,Mo,V)C 在奥氏体和铁素体中沉淀析出规律,探讨了奥氏体形变储能和形变诱导析出量对 (Nb,Ti,Mo,V)C 沉淀析出动力学的影响。研究表明, (Nb,Ti,Mo,V)C 在 1 448.6 K 时开始析出。在奥氏体相区,随着温度的降低,临界形核功逐渐降低, NrT 曲线和 PTT 曲线呈单调变化趋势。在奥氏体和铁素体两相区, (Nb,Ti,Mo,V)C 的最快沉淀析出温度为 1 062.6 K。随着形变储能的增加,相对形核率呈增加趋势,析出孕育期缩短。随形变诱导析出量增加, PTT 曲线向左移动,最大形核率温度和最快析出温度为 1 058.3 ~ 1 063.8 K。

关键词: Nb-Ti-V-Mo 微合金钢; 碳化物; 析出动力学; PTT 曲线; NrT 曲线

中图分类号: TF76, TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)04-0142-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.04.022

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Precipitation kinetics of composite carbides of Nb-Ti-V-Mo microalloyed steel

Yao Na, Xing Chao

(Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 459000, Henan, China)

Abstract: The precipitation thermodynamics of the multi-element composite precipitates in the Nb-Ti-V-Mo microalloy E460 off shore steel was calculated by JmatPro thermodynamics software, in combination with the classical nucleation and growth kinetic theory, were used to study precipitation law of (Nb,Ti,Mo,V)C in austenite and ferrite. The influence of austenite deformation storage and deformation-induced precipitation on (Nb,Ti,Mo,V)C precipitation and precipitation kinetics were also discussed. The results indicate that (Nb,Ti,Mo,V)C begins to precipitate at 1 448.6 K. In austenite region, as the temperature decreases the critical nucleation energy gradually decreases, and the NrT curve and the PTT curve show a monotonous trend. In the two-phase region of austenite and ferrite, the fastest precipitation temperature of (Nb,Ti,Mo,V)C is 1 062.6 K. Relative nucleation rate increases, and both precipitation and incubation period shorten with the increase of deformation energy storage. As the amount of precipitation induced by deformation increases, the PTT curve shifts to the left, and the maximum nucleation rate temperature and the fastest precipitation temperature are between 1058.3 K and 1063.8 K.

Key words: Nb-Ti-V-Mo microalloyed steel, carbide, precipitation kinetics, PTT curve, NrT curve

收稿日期: 2022-01-07

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目计划 (19B450003)。

作者简介: 姚娜 (1979—), 女, 河南济源人, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 冶金工艺技术, E-mail: yaon6461@163.com。

0 引言

在热处理工艺过程中, 低合金钢中的 Nb、V、Ti 和 Mo 等微合金元素将形成复合碳氮化物^[1-4], 其二元碳、氮化物将相互溶合、置换, 形成多元复合析出相, 并在钢中起到细化晶粒、沉淀强化及调节形变基体再结晶行为的作用。在奥氏体相向铁素体相转变过程中, 由于固溶度积, 碳氮化物的沉淀析出过饱和度与形核驱动力的变化, 微合金化元素在铁素体中大量析出, 形成更多细小弥散的析出颗粒, 沉淀析出强化效果得到了加强^[5-7]。

海工钢作为多元微合金化钢种是一种被广泛应用在船舶和海洋平台的结构钢^[8-10]。利用微合金化进行细化和强化组织, 在保证焊接性的同时获得高强度和高韧性^[11-12]。但海工钢中第二相的固溶析出行为对船板钢的强度和拉伸性能影响很大^[13-15]。因此, 有必要对 Nb-Ti-V-Mo 微合金化海工钢中复合析出相的析出机理进行详细深入的研究。然而, 由于目前检测技术的限制以及热加工工艺的复杂性, 尤其是对多元微合金钢的析出行为的试验研究和析出相的定量检测难以实现。因而, 理论计算模拟方

法就凸显了研究多元微合金化钢中复合析出相的析出机理研究的优势。

笔者以 Nb-Ti-V-Mo 微合金 E460 海工钢为基础, 结合 JmatPro 热力学软件对 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 海工钢中多元复合析出相的固溶析出理论计算和经典形核长大动力学理论, 对复合碳化物 (Nb,Ti,Mo,V)C 在奥氏体和铁素体中的沉淀析出动力学和形核参量进行了理论计算, 分析了轧制过程中钢材经奥氏体区轧制产生的形变储能和形变诱导析出量对 (Nb,Ti,Mo,V)C 沉淀析出动力学的影响, 以期对多元复合析出相在具体钢种中的理论计算提供借鉴和参考, 并为高端海工钢的开发提供理论参考。

1 试验材料和分析方法

1.1 试验材料

研究材料为某钢铁公司生产的 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 海工钢, 化学成分(如表 1 所示)参考国标。热轧过程中, E460 铸坯预热段小于 1 073 K, 均热段 1 473 ~ 1 523 K, 粗轧开轧温度大于 1 273 K, 精轧终轧温度 1 073 ~ 1 123 K。

表 1 Nb-Ti-V-Mo 微合金化试验钢化学成分
Table 1 Chemical composition of Nb-Ti-V-Mo microalloyed steel

C	N	Si	Mn	P	Al	Cr
0.11 ~ 0.13	0.003 0 ~ 0.004 0	0.20 ~ 0.30	1.1 ~ 1.3	0.010 ~ 0.012	0.030 ~ 0.05	0.16 ~ 0.20
Ni	Mo	Cu	Ti	Nb	V	Fe
0.20 ~ 0.30	0.18 ~ 0.22	0.15 ~ 0.18	0.013 ~ 0.017	0.024 ~ 0.028	0.030 ~ 0.036	余量

1.2 热力学和动力学研究方法

采用 JmatPro 热力学软件对 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 海工钢的相变和析出热力学进行计算。结合铁素体和奥氏体中相关参数研究 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 海工钢中复合碳化物的沉淀析出动力学。

对于 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 海工钢的沉淀析出动力学, 根据多元复合析出相的固溶析出理论模型进行相关假设^[16-18]。微合金钢的连续降温轧制生产中, 在奥氏体中只有少量的复合析出相析出, 在后续的轧制过程中, 剩余的微合金元素将在 γ/α 相间或者位错线与 C 结合而形成第二相粒子。因此, 研究 (Nb,Ti,Mo,V)C 在奥氏体和铁素体位错线上的析出, 第二相析出 ΔG 、临界核心尺寸 d^* 和临

界形核功 ΔG^* 为^[18]:

$$\Delta G_v = -\frac{RT}{V_m} \left[\ln \frac{[M]_0}{[M]} + \dots + \ln \frac{[X]_0}{[X]} \right] \quad (1)$$

$$d_d^* = -\frac{2\sigma}{\Delta G_v} \left[1 + (1 + \beta)^{1/2} \right] \quad (2)$$

$$\Delta G_d^* = (1 + \beta)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{16\pi\sigma^3}{3(\Delta G_v)^2} \quad (3)$$

式中, $[M]_0$, $[X]_0$ 为析出开始前固溶量, %; σ 为新相与母相比界面能, J/m²; R 为理想气体常数; T 为绝对温度, K。在刃型位错, $A = Gb^2/4\pi(1 - \nu)$ (G 为切变弹性模量; ν 为泊松比), $\beta = \frac{A\Delta G_v}{2\pi\sigma^2}$ 。相对形核率 $\lg(I/K)$ 和 Avrami 提出的相变动力学经验方程 $\lg\left(\frac{t_{0.05}}{t_0}\right)$ 表示如下^[18]:

$$\lg(I/K)_d = \lg(\pi b^2 \rho) + 2 \lg(d_d^*) - \frac{1}{\ln 10} \left(\frac{\Delta G_d^* + 2/3 Q}{kT} \right) \quad (4)$$

$$\lg\left(\frac{t_{0.05}}{t_0}\right)_d = -1.289\,94 - 2 \lg d_d^* + \frac{1}{\ln 10} \times \frac{(1+\beta)^{3/2} \Delta G^* + \frac{5}{3} Q}{kT} \quad (5)$$

式中, k 为 Boltzmann 常数, $k=1.380\,650\,5 \times 10^{-23}$ J/K; Q 为控制性元素 M 的扩散激活能, J/mol。

通过上述公式(1~5)计算 (Nb, Ti, V, Mo)C 在奥氏体和铁素体中沉淀析出的相关参量。根据 JmatPro 热力学软件对 (Nb, Ti, V, Mo)C 中各元素的结果进行计算, 可通过 NbC、TiC、VC、MoC 的相关

参量并通过线性内插法得到 (Nb, Ti, V, Mo)C 的相关参量^[17-18]。

2 结果与分析

2.1 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 海工钢析出热力学
采用 JmatPro 热力学软件对表 1 中 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 海工钢(选取成分中线进行计算)进行热力学计算, 如图 1 所示, 钢中 MC 在全奥氏体温度下已经析出, M23C6 和 Cementite 主要在铁素体相区析出。其中, MC 在 1 448.6 K 开始析出, 主要为 (Nb,Ti,Mo,V)C, 在全奥氏体温度下, MC 主要为 Nb 和 Ti 的复合碳化物, 进入全铁素体区时 Mo 和 V 组分明显增加。

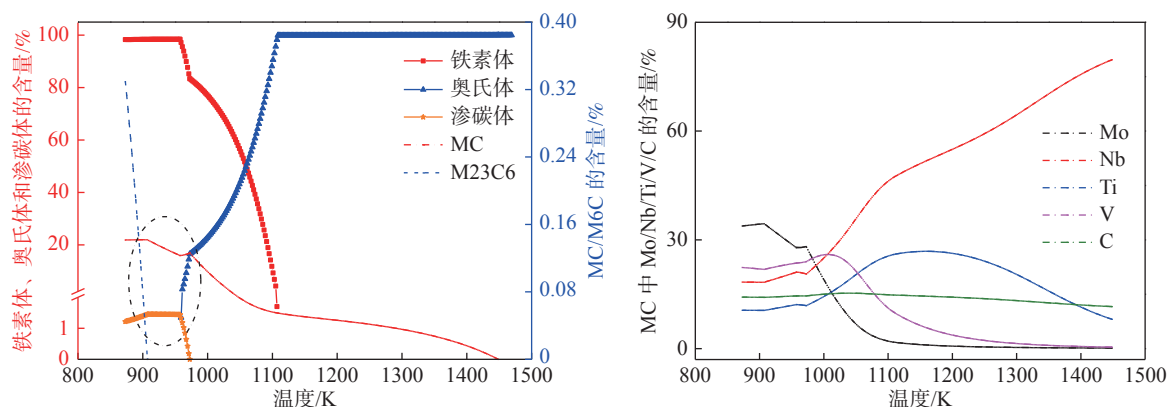


图 1 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 海工钢相变和主要析出相的析出热力学

Fig. 1 Phase transformation of E460 steel and precipitation thermodynamics of main precipitations

计算 MC 体积分数随着温度的变化如图 2 所示, 在奥氏体相区, MC 的最大析出量为 0.076 1%, 最大析出体积分数为 0.000 707%, 其中 NbC 和 TiC 占主要部分。随着温度的降低, Mo 和 V 在铁素体中的固溶度降低, Mo 和 VC 将析出并成为主要部分, 在两相区 MC 的最大析出量为 0.126%, 最大析出体积分数为 0.001 56%。

2.2 (Nb,Ti,Mo,V)C 析出动力学计算

研究表明, 钢中碳化物的 Ostwald 熟化过程的限制性因素为微合金化元素, 统计析出相在 γ 和 α 相中的动力学参数与温度的关系如表 2 所示^[18]。

复合析出相 (Nb,Ti,Mo,V)C 的位错形核的临界形核尺寸和临界形核功如图 3 所示, 可以看出复合碳化物 (Nb,Ti,Mo,V)C 不同析出形核机制下的临界形核尺寸随着温度的降低而降低。1 429.2 K $\leq T \leq$ 1 448.6 K 时, 位错形核的 $\beta < -1$, 析出反应可自发进行, 即 (Nb,Ti,Mo,V)C 将在位错线上自发形核。当

$T \leq 1\,429.2$ K 时, 位错形核的 $\beta > -1$, (Nb,Ti,Mo,V)C 将以不同的形核机制在钢中析出, 并以不同形核机制的形式竞相形核。

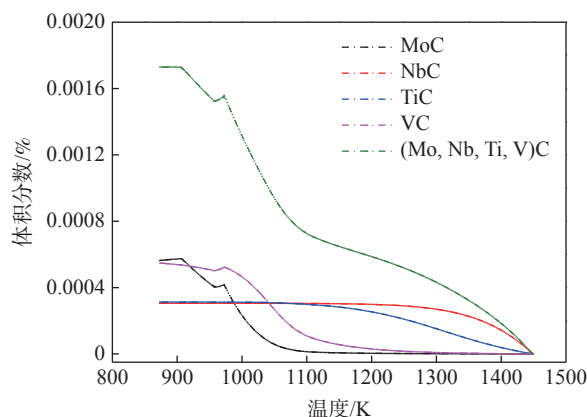


图 2 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 钢主要析出相体积分数的变化规律

Fig. 2 Variation of the volume fraction of the main precipitates in E460 steel

表 2 碳化物在 γ 和 α 相中的动力学计算相关参数
Table 2 Relevant parameters for kinetic calculation of MC in austenite^[18]

析出相		固溶度积	M 元素的扩散系数/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	晶格常数/nm
NbC	γ	$3.70-9\,100/T$	$530 \exp(-344\,000/RT)$	0.447 0
	α	$3.90-9\,930/T$	$50.2 \exp(-252\,000/RT)$	
TiC	γ	$2.75-7\,000/T$	$0.15 \exp(-251\,000/RT)$	0.431 8
	α	$4.40-9\,575/T$	$3.15 \exp(-248\,000/RT)$	
MoC	γ	$1.29-523/T$	$0.036 \exp(-240\,000/RT)$	0.427 7
	α	$3.19-4\,649/T$	$1.3 \exp(-229\,000/RT)$	
VC	γ	$6.72-9\,500/T$	$0.28 \exp(-264\,000/RT)$	0.418 2
	α	$2.72-6\,080/T$	$3.92 \exp(-241\,000/RT)$	

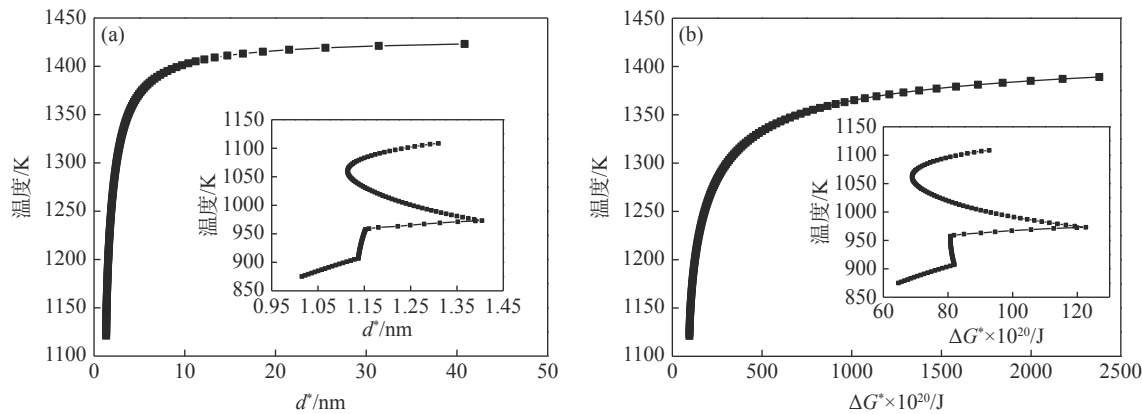


图 3 (Nb,Ti,Mo,V)C 的临界形核尺寸和临界形核功
Fig. 3 Critical nucleation size (d^*) and Critical nucleation energy (ΔG^*) of (Nb,Ti,Mo,V)C

临界形核功的大小可衡量形核难易程度,由图 3 可以看出, (Nb,Ti,Mo,V)C 在 γ 和 α 相的临界形核尺寸和形核功相差较大。在全奥氏体区范围,温度降低,临界形核功也随之降低。在奥氏体和铁素体两相区,临界形核功出现先降低后增加的趋势,在 1 060.2 K 时达到最小,更有利于 (Nb,Ti,Mo,V)C 在两相区的形核。

计算 (Nb,Ti,Mo,V)C 在位错形核条件下相对形

核率 (NrT) 曲线和析出-时间-温度 (PTT) 曲线如图 4 所示。在全奥氏体区, NrT 曲线和 PTT 曲线随着温度的降低呈单调变化,即随着温度的降低, (Nb,Ti,Mo,V)C 的相对形核率逐渐增加,析出-时间-温度 (PTT) 曲线逐渐降低。在 γ 和 α 两相区, PTT 曲线呈典型的“C”曲线形状, (Nb,Ti,Mo,V)C 在两相区位错形核时的最大形核率和最快沉淀析出温度均为 1 062.6 K。

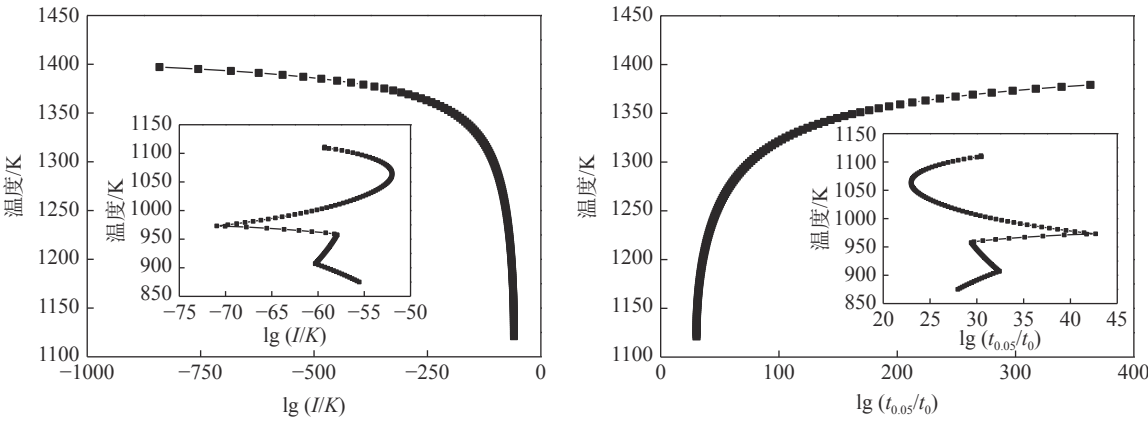


图 4 (Nb,Ti,Mo,V)C 的相对形核率和相对 PTT 曲线
Fig. 4 Relative nucleation rate and PTT curve of (Nb,Ti,Mo,V)C

结合 (Nb,Ti,Mo,V)C 热力学计算、临界形核尺寸和临界形核功可以看出,在 Cementite 相形成至奥氏体消失温度 (957.5 K),由于 Cementite 相和奥氏体相对碳元素的影响,出现相对形核率变大和相对形核时间减小的现象。在奥氏体消失 (957.5 K) 至 M23 C6 相出现 (907.2 K) 阶段,随着温度的降低,相对形核率降低和相对形核时间增加的现象。NrT 和 PTT 曲线单调变化很好地解释了微合金钢中复合碳化物常见的“相间析出”现象。因此,通过加速冷却,以细化晶粒和控制其碳化物的析出及尺寸和分布,从而实现强化沉淀析出的效果。

2.3 形变储能对奥氏体中 (Nb,Ti,Mo,V)C 析出动力学的影响

在奥氏体轧制过程中,将产生一定数量的奥氏体形变储能,并将影响析出相沉淀析出动力学^[17-18],而剧烈形变的奥氏体中未发生衰减的微区形变储能可在 2 000 ~ 3 000 J/mol^[19]。假设形变储能分别为 0 (奥氏体未变形)、2 000 和 4 000 J/mol,研究形变储能对 (Nb,Ti,Mo,V)C 在 E460 钢中析出动力学的影响。结合 Nb-Ti-V-Mo 微合金化 E460 中析出相的相关理论计算,研究在不同形核机制下形变储能对析出相析出动力学的影响如表 3 所示。

表 3 位错条件下不同形变储能下复合碳化物 (Nb,Ti,Mo,V)C 形核参量的计算结果
Table 3 Nucleation parameters of (Nb,Ti,Mo,V)C at different deformation energies under dislocation nucleation

位错形核温度/K	形变储能=0 J/mol		形变储能=2 000 J/mol		形变储能=4 000 J/mol	
	$\lg(I/K)_d$	$\lg(t_{0.05}/t_0)_d$	$\lg(I/K)_d$	$\lg(t_{0.05}/t_0)_d$	$\lg(I/K)_d$	$\lg(t_{0.05}/t_0)_d$
1 373	-325.62	297.57	-325.56	297.44	-325.51	297.31
1 323	-131.38	102.52	-131.33	102.39	-131.28	102.26
1 273	-86.54	57.32	-86.49	57.18	-86.43	57.05
1 223	-69.23	39.91	-69.18	39.77	-69.12	39.63
1 173	-61.65	32.44	-61.60	32.30	-61.54	32.15
1 123	-59.24	30.31	-59.18	30.15	-59.12	30.00
1 073	-52.20	23.22	-52.13	23.06	-52.07	22.90
1 023	-55.46	26.58	-55.39	26.41	-55.32	26.24
973	-70.95	42.69	-70.88	42.51	-70.81	42.33
923	-59.42	31.31	-59.35	31.12	-59.27	30.94
873	-55.55	27.97	-55.47	27.77	-55.39	27.57

随着形变储能的增加, (Nb,Ti,Mo,V)C 发生位错形核相对形核率呈增加趋势,PTT 曲线呈下降趋势,即增加形变储能,析出孕育期缩短,与文献^[17,20]中复合碳化物在奥氏体中形变诱导析出的动力学研究结果一致。因此,形变储能的增加可促进析出相形核,从而抑制奥氏体再结晶和晶粒的长大,以实现强化沉淀析出的效果。

2.4 形变诱导析出量对铁素体中 (Nb,Ti,Mo,V)C 析出动力学的影响

众所周知,奥氏体的变形程度和碳化物的析出行为会直接影响相变后的铁素体组织及碳化物的析出行为,特别是奥氏体的形变诱导析出量将对铁素体中的形核参量产生重要的影响^[17-18]。因此,在计算 (Nb,Ti,Mo,V)C 在铁素体中析出时,考虑减去已

在奥氏体中的析出量。为了简化计算条件,假设在精轧终轧温度 1 073 K 时,形变诱导析出发生了 10%、30% 和 50%。因此,在计算过程中用钢的原始成分分别减去 800 ℃ 时 (Nb,Ti,Mo,V)C 在奥氏体中平衡析出量的 10%、30% 和 50%,即可得到残留在铁素体中的 Nb、Ti、Mo、V 和 C 的含量,作为 (Nb,Ti,Mo,V)C 在铁素体中析出的初始量。结合 JmatPro 对奥氏体、铁素体和 (Nb,Ti,Mo,V)C 热力学的计算结果,得到不同形变诱导析出量时铁素体中元素的初始含量如表 4 所示。

形变诱导析出量 10%、30% 和 50% 时, (Nb,Ti,Mo,V)C 在铁素体中形核参量的计算结果和沉淀析出的 NrT 曲线和 PTT 曲线的影响如表 5 和图 5 所示。

表 4 不同形变诱导析出量时铁素体中元素的初始含量 (1 073 K)
Table 4 Initial content of elements in ferrite at different deformation induced precipitation (1 073 K)

	MC	Mo	Nb	Ti	V	C
析出量	0.056 3	0.002 14	0.023 3	0.013 1	0.009 15	0.008 51
10%		0.198	0.005 07	0.003 20	0.024 8	0.112
30%		0.199	0.009 72	0.005 83	0.026 6	0.114
50%		0.199	0.014 4	0.008 45	0.028 4	0.116

表 5 形变诱导析出量 10%、30% 和 50% 时 (Nb,Ti,Mo,V)C 在铁素体中形核参量的计算结果
Table 5 Calculation results of nucleation parameters of (Nb,Ti,Mo,V)C in ferrite under strain induced precipitation 10%, 30% and 50%

位错形核温度/K	10%		30%		50%	
	$\lg(I/K)_d$	$\lg(t_{0.05}/t_0)_d$	$\lg(I/K)_d$	$\lg(t_{0.05}/t_0)_d$	$\lg(I/K)_d$	$\lg(t_{0.05}/t_0)_d$
1 093	-199.43	172.21	-94.80	66.78	-72.07	43.69
1 073	-152.28	124.73	-83.74	55.51	-66.53	37.97
1 053	-146.15	118.51	-82.76	54.47	-66.26	37.65
1 033	-158.57	131.02	-87.64	59.42	-69.40	40.87
1 013	-183.63	156.28	-96.93	68.89	-75.28	46.91
993	-226.61	199.55	-112.18	84.39	-84.81	56.68
973	-306.99	280.33	-138.23	110.78	-100.62	72.81
953	-141.22	113.88	-88.93	61.06	-72.95	44.81
933	-135.54	108.38	-88.35	60.70	-73.30	45.39
913	-131.36	104.40	-88.24	60.83	-73.94	46.28
893	-113.42	86.58	-81.14	53.88	-69.68	42.21
873	-96.14	69.40	-73.23	46.13	-64.55	37.26

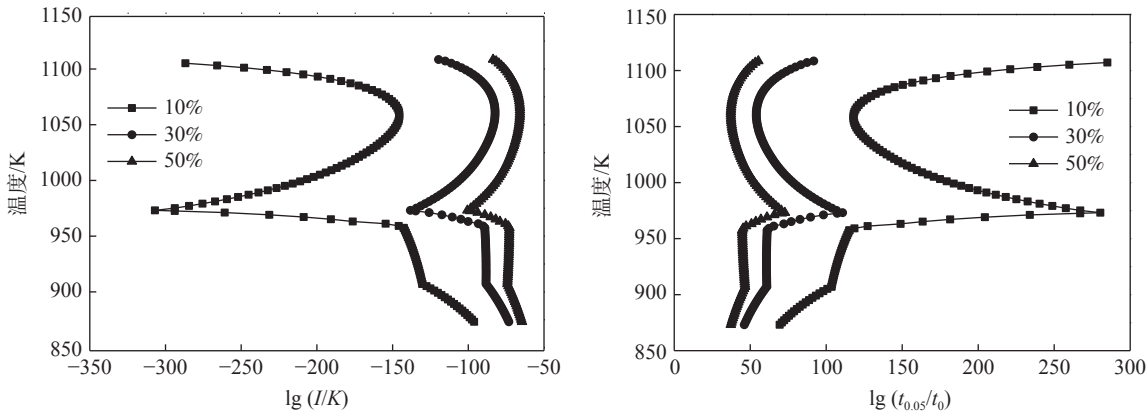


图 5 形变诱导析出量对 (Nb,Ti,Mo,V)C 在铁素体中沉淀析出的 NrT 和 PTT 曲线的影响
Fig. 5 Influences of the amount of strain induced precipitation on NrT (a) and PTT (b) curves of (Nb,Ti,Mo,V)C in ferrite under different strain induced precipitations at 800 °C

在奥氏体和铁素体两相区,当形变诱导析出程度为 10%、30% 和 50% 时, (Nb,Ti,Mo,V)C 在铁素

体中位错线上的形核率随着沉淀温度的变化均呈反“C”曲线的形状,PTT 曲线呈典型的“C”曲线形状。

随形变诱导析出程度增加,最快析出温度有增加趋势,形变诱导析出量为10%,30%和50%时的最快析出温度分别为1 058.3 K,1 059.9 K和1 063.8 K。因此,经理论计算得出,(Nb,Ti,Mo,V)C在Nb-Ti-V-Mo微合金化E460海工钢的奥氏体和铁素体两相区中的最大形核率温度和最快析出温度在1 058.3~1 063.8 K。这表明在奥氏体和铁素体两相区,随着形变诱导析出量的增加,在最快析出温度以下的温度保温时,(Nb,Ti,Mo,V)C的析出速率加快,析出需要的时间减少^[17-20]。

在Cementite相形成(972.6 K)温度以下时,(Nb,Ti,Mo,V)C的相对形核率和相对形核时间呈单调变化趋势,且不同形变诱导析出量的变化趋势相同。随着温度的降低,相对形核率变大和相对形核时间减小,但随着形变诱导析出量的增加变化趋势有所降低。因此,形变诱导析出量的增加将有利于获得更为细小的(Nb,Ti,Mo,V)C等析出相,使微合金元素的沉淀强化作用得到充分的发挥。

3 结论

1) Nb-Ti-V-Mo微合金化E460海工钢中MC在1 448.6 K开始析出,主要为(Nb,Ti,Mo,V)C,在奥氏体相区,MC的最大析出量为0.076 1%,最大析出体积分数为0.000 707%,其中NbC和TiC占主要部分;在两相区MC的最大析出量为0.126%,最大析出体积分数为0.001 56%,MoC和VC为主要部分。

2) 在全奥氏体区,随着温度的降低,临界形核功逐渐降低,NrT曲线和PTT曲线呈单调变化;在奥氏体和铁素体两相区,(Nb,Ti,Mo,V)C在两相区位错形核的最快沉淀析出温度为1 062.6 K。

3) 随着形变储能的增加,(Nb,Ti,Mo,V)C相对形核率呈增加趋势,析出孕育期缩短;在奥氏体和铁素体两相区,随形变诱导析出程度增加,最快析出温度以下的PTT曲线向左移动,最大形核率温度和最快析出温度为1 058.3~1 063.8 K。

参考文献

- [1] Zhang D Q, Liu G, Zhang K, *et al.* Effect of Nb microalloying on microstructure evolution and mechanical properties in low carbon medium manganese steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2021, 824: 1-13.
- [2] Zhang Zhengyan. Effect of Mo on the nanometer-sized precipitates, microstructure and properties of high Nb low carbon steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
(张正延. 高Nb低碳钢中Mo对纳米级析出相及组织性能的影响研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.)
- [3] Li Jing, Yuan Shaoqiang, Chu Xiangzhi. Dissolution behavior of second phase in Nb-Ti microalloyed steel[J]. *Foundry Technology*, 2017, 38(9): 2087-2089,2095.
(李敬, 苑少强, 褚祥治. Nb-Ti微合金钢中第二相的溶解行为[J]. 铸造技术, 2017, 38(9): 2087-2089,2095.)
- [4] Yang Qing, Zhang Liwen, Zhang Chi, *et al.* Austenite grain growth behavior of low carbon Nb-V-Ti microalloyed steel X70[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(4): 1-5.
(杨清, 张立文, 张驰, 等. 低碳Nb-V-Ti微合金钢X70的奥氏体晶粒长大行为[J]. 金属热处理, 2019, 44(4): 1-5.)
- [5] Chen Xin, Liu Chunming. Effects of V and Mo on precipitation of second phase in microalloyed bainite steel[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2011, 10(3): 209-211,236.
(陈昕, 刘春明. 钒和钼对微合金化贝氏体钢第二相析出的影响[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(3): 209-211,236.)
- [6] Zhou Dan, Chai Xiyang, Liang Fengrui, *et al.* Influence of V, V-N and V-Nb microalloying on microstructure and properties of high strength steel for shipbuilding[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(6): 60-64.
(周丹, 柴希阳, 梁丰瑞, 等. V, V-N与V-Nb微合金化对高强船板钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(6): 60-64.)
- [7] Fang Fang, Yong Qilong, Yang Caifu, *et al.* Precipitating kinetics of V(C, N) in ferrite of V-N microalloying steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(5): 625-629.
(方芳, 雍岐龙, 杨才福, 等. V(C, N)在V-N微合金钢铁素体中的析出动力学[J]. 金属学报, 2009, 45(5): 625-629.)
- [8] Zhao Mengjing, Wang Feng, Xi Xiaojun, *et al.* Effect of Y on inclusions characteristics and tensile properties in EH36 shipbuilding steel[J]. *Iron and Steel*, 2019, 54(7): 61-67.
(赵梦静, 王峰, 习小军, 等. 钇对EH36船板钢夹杂物特性和拉伸性能的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(7): 61-67.)
- [9] Zhou Yutao, Yang Shufeng, Li Jingshe, *et al.* Inclusions evolution of high-grade ship plate steel in practical production processes[J]. *Iron and Steel*, 2019, 54(1): 33-42.

- (周宇涛, 杨树峰, 李京社, 等. 高级别船板钢生产过程中夹杂物的演变规律[J]. 钢铁, 2019, 54(1): 33–42.)
- [10] Wang Hongtao, Tian Yong, Ye Qibin, *et al.* Development of heavy ship plate in extremely cold environment[J]. Steel Rolling, 2018, 35(5): 48–53.
(王红涛, 田勇, 叶其斌, 等. 极寒环境下厚规格船舶用钢的发展[J]. 轧钢, 2018, 35(5): 48–53.)
- [11] Yang Kaisheng. Effect of heat treatment process and NbV-N microalloying on mechanical property and microstructure of grade ship plate steel[J]. China Metallurgy, 2017, 27(10): 34–39.
(阳开生. 热处理及NbV-N微合金化对船板钢组织性能的影响[J]. 中国冶金, 2017, 27(10): 34–39.)
- [12] Vanovsek W, Bernhard C, Fiedler M, *et al.* Effect of titanium on the solidification and postsolidification microstructure of high-strength steel welds[J]. *Welding in the World*, 2013, 57(5): 665–674.
- [13] Zou X D, Zhao D P, Sun J C, *et al.* An integrated study on the evolution of inclusions in EH36 shipbuilding steel with Mg addition: From casting to welding[J]. *Metallurgical and Materials Transactions, B*, 2018, 49(2): 481–489.
- [14] Wang Bingxing, Wu Zhongzi, Lou Haonan, *et al.* Effect of oxide metallurgy on microstructure and properties of HAZ in EH36 Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2): 239–246.
(王丙兴, 武仲子, 娄号南, 等. 氧化物冶金工艺对EH36钢HAZ组织性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(2): 239–246.)
- [15] Shi Minghao, Duan Zhengtao, Zhang Pengyan, *et al.* Effect of inclusions on formation of acicular ferrite in Ti and Zr microalloying steel[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2012, 33(10): 1424–1427.
(石明浩, 段争涛, 张朋彦, 等. 夹杂物对Ti, Zr微合金钢中针状铁素体形成的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(10): 1424–1427.)
- [16] Adrian H. Thermodynamic model for precipitation of carbonitrides in high strength low alloy steels containing up to three microalloying elements with or without additions of aluminium[J]. *Materials Science and Technology*, 1992, 8(5): 406–420.
- [17] Zhang Ke, Sun Xinjun, Zhang Mingya, *et al.* Kinetics of (Ti, V, Mo)C precipitated in γ/α matrix of Ti-V-Mo complex microalloyed steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(8): 1122–1130.
(张可, 孙新军, 张明亚, 等. Ti-V-Mo复合微合金钢中(Ti, V, Mo)C在 γ/α 中沉淀析出的动力学[J]. 金属学报, 2018, 54(8): 1122–1130.)
- [18] Yong Qilong. Second phase in iron and steel materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
(雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.)
- [19] Wang X J, Sun X J, Song C, *et al.* Evolution of microstructures and mechanical properties during solution treatment of a Ti-V-Mo-containing high-manganese cryogenic steel[J]. *Materials Characterization*, 2018, 135: 287–294.
- [20] Duan Xiugang, Cai Qingwu, Wu Huibin, *et al.* Precipitation law of ultra fine carbides in ferrite matrix Ti-Mo micro-alloy steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(6): 644–650.
(段修刚, 蔡庆伍, 武会宾, 等. 铁素体基Ti-Mo微合金钢超细碳化物析出规律[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(6): 644–650.)

编辑 唐 肖

攀钢突破钛渣电炉煤气回收与钛精矿干燥闭环利用技术难题

(7月23日消息)近日,攀钢“电炉密闭改造+钛精矿干燥”项目取得突破,通过连续加料、连续冶炼、电炉密闭改造和煤气净化与回收等系列攻关,有效解决了副产品电炉煤气无法回收、工序互补性差、能源利用率低等问题,实现了大型钛渣电炉煤气全部回收与钛精矿干燥闭环利用。

攀钢大型钛渣电炉原设计为非密闭电炉,副产品电炉煤气无法回收,能源利用率低。为解决这一突出矛盾,攀钢先后开展了系列攻关,组合实施“电炉密闭改造+钛精矿干燥”技术,目前,攀钢利用回收的电炉煤气烘干钛精矿,每年可处理湿矿76万t,减少二氧化碳排放2.6万t以上,节约1万t标准煤,大幅降低成本、提升环境质量,加速实现碳达峰碳中和目标。

摘自 <http://kjj.panzhijia.gov.cn/zwgk/gzdt/4226593.shtml>