

稀土铈对钢中溶质碳偏析影响的热力学研究

陈华标, 龙木军, 陈登福, 黄云伟, 桂林涛, 马有光, 段华美

(重庆大学, 重庆 400044)

摘要: 以 Fe-C-Ce 合金为对象, 建立多元合金溶质分配系数热力学计算模型, 并利用 FactSage Equilib 模块计算不同铈含量下凝固体系中溶质碳的平衡分配系数, 以此研究稀土铈对钢中溶质碳偏析的影响。结果表明: 稀土铈对体系的凝固相转变影响较大。铈的添加可促使奥氏体的转变, 使 L+ γ 固-液共存区扩大, 从而使碳的平均平衡分配系数增大, 起到减小钢中碳偏析的作用。改善钢中碳偏析的最适宜铈添加量与碳含量有关, Fe-0.1%C-x%Ce(质量分数, 下同)体系最适宜的稀土铈添加量为 0.047%~0.057%, Fe-0.25%C-x%Ce 体系最适宜的稀土铈添加量为 0.03%~0.04%。

关键词: 铈; 碳偏析; 平衡分配系数; 凝固路径

中图分类号: TG142.33

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)07-2093-07

合金凝固过程存在复杂的动态固-液两相共存区, 即糊状区^[1,2]。溶质在糊状区中固相和液相之间进行分配, 溶质偏析的方向以及偏析的程度与溶质平衡分配系数密切相关。溶质平衡分配系数是表征凝固体系溶质再分配以及溶质偏析的特征参数^[2,3]。凝固体系中溶质平衡分配系数越偏离 1, 该溶质偏析越大。对于钢中大部分溶质而言, 其溶质平衡分配系数都小于 1, 即在钢的凝固过程中, 溶质从固相往液相富集; 在对流的作用下, 这种溶质再分配的结果导致溶质宏观偏析的产生^[4,5]。

钢是一种常见的 Fe-C 合金, 其碳含量对钢的组织及性能具有重要影响^[6]。溶质碳是一种易偏析元素, 凝固过程由于偏析导致某些局部碳浓度增大, 很可能与钢中碳含量要求相距较大, 诱发局部与基体不一致的相变, 直接影响到钢的组织及性能。因此, 在控制钢中溶质偏析时, 溶质碳的偏析是重点考虑之一。

稀土在钢铁中可以深度降低钢中氧和硫的含量, 起到净化钢液的作用。随着冶炼水平的提升, 钢的洁净度越来越高, 稀土在钢中变质及强效合金化方面的作用越来越突出^[7-9]。稀土铈(Ce)常用于钢铁精炼过程, 起到净化钢液提高产品性能的作用^[10]。同时, 稀土铈还可以细化晶粒, 提高钢的综合性能^[11,12]。近来, 有文献研究指出稀土铈可以改善钢中溶质磷和硫在晶界的偏析, 但其作用机理还尚未清楚^[13]。稀土铈对钢中溶质碳偏析的影响及其作用机理也少有报道。

溶质平衡分配系数是表征凝固体系溶质偏析程度

的特征参数, 其可通过实验^[2]或者热力学计算^[14]确定。溶质平衡分配系数与凝固体系的温度、成分以及相组成直接相关。因此, 凝固路径对溶质平衡分配系数的影响较大。目前, 关于稀土铈对体系平衡凝固过程影响的报道较少^[10,15]。采用热力学计算的方法可以研究不同组分下整个凝固路径溶质平衡分配系数的变化。

本研究以 Fe-C-Ce 三元系为研究对象, 采用热力学计算的方法, 借助 FactSage Equilib 模块, 计算不同铈含量下体系中溶质碳的平衡分配系数, 研究稀土铈对钢中溶质碳偏析的影响; 同时, 基于铈对体系凝固路径的影响, 探讨稀土铈对钢中碳偏析的影响机理。

1 多元合金溶质分配系数热力学模型建立

1.1 模型的建立

溶质分配系数为凝固界面处固相中溶质浓度与液相中浓度的比值, 组分 i 的分配系数如式(1)所示:

$$k_i = \frac{\omega_{S,i}^*}{\omega_{L,i}^*} \quad (1)$$

式中, $\omega_{S,i}^*$ 为组分 i 在凝固界面处固相中浓度(质量分数), $\omega_{L,i}^*$ 为组分 i 在凝固界面液相中浓度(质量分数), 如图 1 所示。

在平衡凝固过程中, 凝固体系溶质在固相及液相中完全扩散, 平衡凝固过程如图 2 所示。

因此, 平衡凝固体系凝固界面处组分 i 在固相中浓度 $\omega_{S,i}^*$ 和液相中浓度 $\omega_{L,i}^*$ 分别等于固相一侧浓度 $\omega_{S,i}$ 及液相一侧浓度 $\omega_{L,i}$ 。即有溶质平衡分配系数:

收稿日期: 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(51504048)

作者简介: 陈华标, 男, 1988 年生, 博士生, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044, 电话: 023-65102467, E-mail: chenhuabiao@cqu.edu.cn

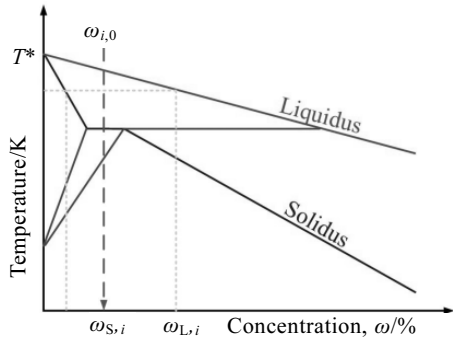


图 1 凝固过程溶质分配示意图

Fig.1 Solute distribution during solidification process

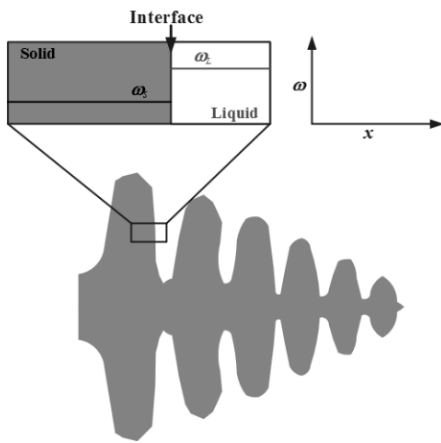


图 2 平衡凝固过程溶质浓度在液相和固相的分布

Fig.2 Solute concentration distribution in liquid and solid phase during equilibrium solidification

$$k_i^0 = \frac{\omega_{S,i}}{\omega_{L,i}} \quad (2)$$

在 Fe-*i*-*j* 三元系中, 组分 *i* 在固相及液相中的化学势分别如式(3)、(4)所示:

$$\mu_i^S = \mu_{i,0}^S + RT \ln a_i^S \quad (3)$$

$$\mu_i^L = \mu_{i,0}^L + RT \ln a_i^L \quad (4)$$

式中, $\mu_{i,0}^S$ 和 $\mu_{i,0}^L$ 分别为组分 *i* 在固相及液相中的标准化学势, J/mol; a_i^S 和 a_i^L 分别为组分 *i* 在固相及液相中的活度; *R* 为摩尔气体常数, J·(mol·K)⁻¹. 当体系达到热力学平衡时, 组分 *i* 在固相及液相中的化学势相等, 即:

$$\mu_i^S = \mu_i^L \quad (5)$$

活度系数表达式如(6)所示:

$$\gamma_i = \ln \gamma_i^0 + \varepsilon_i^i \omega_i + \varepsilon_i^j \omega_j \quad (6)$$

式中, γ_i^0 为无限稀溶液中组分 *i* 的活度系数, ε_i^i 为组分 *i* 的自作用系数, ε_i^j 为组分 *j* 对 *i* 的作用系数。

联立式(2)~(6)可得 Fe-*i*-*j* 三元系中组分 *i* 的平衡分配系数计算式, 如式(7)所示。

$$k_i^0 = \frac{\gamma_{i,0}^{0,L}}{\gamma_i} \exp \left[\frac{\mu_{i,0}^L - \mu_{i,0}^S}{RT} + (\varepsilon_i^{i,L} \omega_i^L - \varepsilon_i^{i,S} \omega_i^S) + (\varepsilon_i^{j,L} \omega_j^L - \varepsilon_i^{j,S} \omega_j^S) \right] \quad (7)$$

多元合金溶质分配系数的热力学计算模型是基于体系的热力学平衡建立的。著名热力学平衡计算软件 FactSage 具有全面精确的热力学数据库^[16], 其中, Equilib 平衡模块可计算体系的热力学平衡过程。因此, 本研究溶质平衡分配系数的计算利用 FactSage Equilib 模块进行。

1.2 模型的验证

为了验证模型的准确性, 应用建立的多元合金溶质分配系数的热力学模型计算了 Fe-0.93%C-1%Mn 三元系中溶质 C 和 Mn 的分配系数, 体系浓度与文献[14]的相同, 模型计算结果与文献实验测试及计算结果对比如图 3 所示^[14,17]。结果表明, 本模型计算获得的溶质 C 及 Mn 的平衡分配系数随温度的变化规律与文献报道的结果一致, 并且计算结果与实验测试结果吻合较好。特别地, 在 1733~1761 K 凝固区间内, 本模型计算得到 C 的平均分配系数为 0.350, 文献[14]中计算的平均值为 0.352, 两者偏差 0.57%。由此可见, 本研究建立的热力学模型是合理准确的。

2 结果与讨论

2.1 钕对溶质碳分配系数的影响

为了研究稀土元素钕对钢中溶质碳偏析的影响, 分别计算了 Fe-0.1%C-*x*%Ce 以及 Fe-0.25%C-*x*%Ce 2

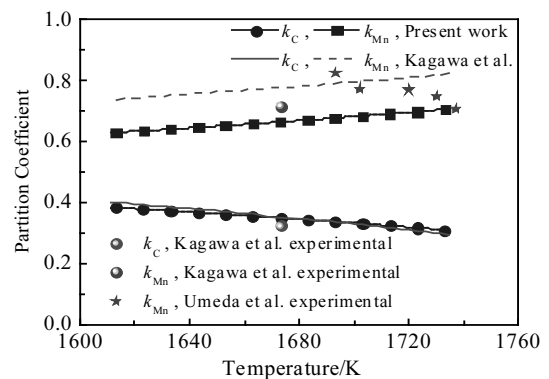


图 3 溶质 C 和 Mn 平衡分配系数与文献结果对比

Fig.3 Equilibrium partition coefficient of C and Mn comparing with data from literatures^[14,17]

种体系中溶质碳的平衡分配系数。Fe-0.1%C-x%Ce 体系中碳浓度位于包晶钢的亚包晶区，Fe-0.25%C-x%Ce 中碳浓度位于包晶钢的过包晶区。针对每个体系都讨论了不同 Ce 含量对碳平衡分配系数的影响；所讨论的 Ce 含量(质量分数)分别包括 0、0.01%、0.02%、0.03%、0.04%、0.05%、0.06%、0.07%、0.08%、0.09%、0.1% 11 种情况。由于溶质平衡分配系数随温度、组分、相组成等有关，本研究取凝固路径下整个糊状区溶质碳的平衡分配系数的平均值进行比较，以此探索稀土铈对钢中碳偏析的影响规律。

Fe-0.1%C-x%Ce 体系中溶质碳的平均平衡分配系数随铈含量的变化规律如图 4 所示。从图 4 可以看出，稀土铈的增加使 Fe-C 体系中溶质碳的平均分配系数增大。当体系铈的添加量小于 0.05% 时，溶质碳分配系数随铈的添加迅速增大；当体系铈添加量大于 0.05% 后，溶质碳的分配系数增加缓慢。此外，从稀土铈增大溶质碳分配系数的效果曲线(即变化率曲线)同样可以看出，当斜率大于 1 时，溶质碳的平均分配系数随铈添加量的增加而迅速增大，增幅明显；当斜率小于 1 时，溶质碳的平均分配系数随铈含量的增加增大效果有限，增幅已逐渐趋于平缓。当斜率等于 1 时，对应铈的含量为 0.047%，与拐点 0.05% 相近。综合考虑改善效果、经济性以及适应性，以斜率为 1 时铈含量为临界点，向前扩展 0.01% 的铈含量作为该体系改善碳偏析的最优铈添加量。即 Fe-0.1%C-x%Ce 体系最适宜的铈添加量范围为 0.047%~0.057%。文献[18]指出，铈由于使 Mn 的平衡分配系数增大而抑制了 Mn 的偏析。在 Fe-0.1%C-x%Ce 体系中当铈的添加量为 0 时，溶质碳的平均平衡分配系数为 0.157；而当体系中铈添加 0.05% 后，体系中碳的平均平衡分配系数增加到 0.232，增大了 47.7%。由此可见，稀土铈可明显改善钢中溶质碳的偏析，与 Y. Nuri 利用电子探针(EPMA)检测钢样的结果相吻合^[19]。

Fe-0.25%C-x%Ce 体系中溶质碳的平均平衡分配系数随铈含量的变化规律如图 5 所示。从图 5 可以看出，稀土铈对体系 Fe-0.25%C-x%Ce 中碳的平均分配系数影响规律与体系 Fe-0.1%C-x%Ce 类似，稀土铈含量的增加使体系中碳的平均分配系数增大。从稀土铈增大溶质碳分配系数的效果曲线(即变化率曲线)可以看出，当斜率为 1 时，体系稀土添加量为 0.03%，采用相同的方法可确定改善体系 Fe-0.25%C-x%Ce 溶质碳偏析的最适宜铈添加量范围为 0.03%~0.04%。当体系中铈的添加量为 0 时，碳的平均分配系数为 0.215；当体系添加 0.04% 铈后，碳的平均分配系数增加到 0.277，增加了 28.8%，在此证明铈对钢中溶质碳

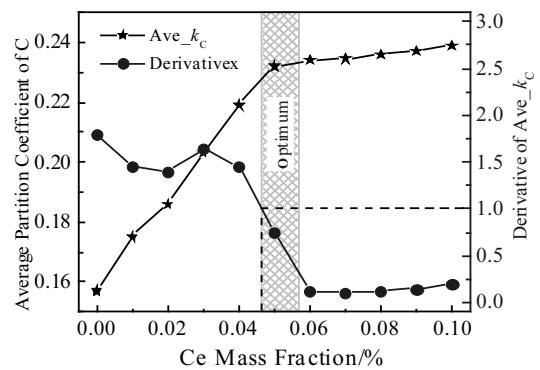


图 4 Fe-0.1%C-x%Ce 体系铈对碳平均平衡分配系数的影响
Fig.4 Effect of Ce on the average equilibrium partition coefficient of C in Fe-0.1%C-x%Ce system

偏析的改善效果较为明显。此外，与体系 Fe-0.1%C-x%Ce 相比，体系 Fe-0.25%C-x%Ce 铈的适宜添加量较小，这是由于体系 Fe-0.25%C-x%Ce 中碳浓度较高，凝固路径和相组成不同，体系中碳的平衡分配系数较大，这也说明了溶质分配系数与体系的凝固路径以及相组成相关。

2.2 铈对凝固相变过程的影响

溶质平衡分配系数与凝固过程中的相组成密切相关。在钢的凝固相变过程中，可出现液相(L)与铁素体相(δ)固-液共存区，液相(L)与奥氏体相(γ)固-液共存区，液相(L)与铁素体相(δ)及奥氏体相(γ)固-液共存区。为了揭示稀土铈增大钢中溶质碳平衡分配系数的机理，研究分析了稀土铈对体系凝固

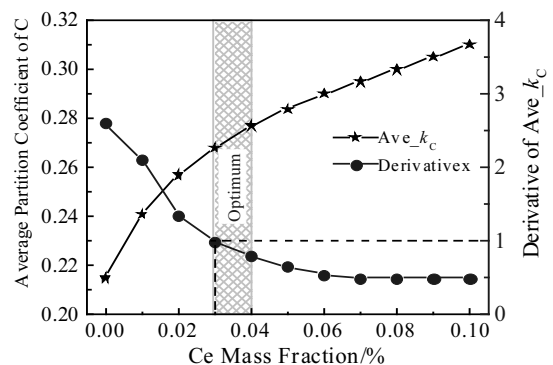


图 5 Fe-0.25%C-x%Ce 中铈对碳平均平衡分配系数的影响
Fig.5 Effect of Ce on the average equilibrium partition coefficient of C in Fe-0.25%C-x%Ce system

相变过程的影响。图 6 为不同稀土铈添加量下 Fe-0.1%C-x%Ce 体系的相图与凝固相变路径。

从图 6a 可以看出, Fe-0.1%C-0.01%Ce 凝固体系在温度达到固相线前, 凝固相变路径首先经过 L+ δ 两相共存区, 然后经过 L+ δ + γ 三相共存区。图 6b 为 Fe-0.1%C-0.03%Ce 凝固体系的凝固相变路径。该凝固体系凝固过程中, 在温度达到固相线前, 先后经过了 L+ δ 两相共存区, L+ δ + γ 三相共存区, L+ γ 两相共存区。由此可见, 稀土元素铈对钢的凝固相变过程影响较大。

不同铈含量下 Fe-0.1%C-x%Ce 凝固相变温度如表 1 所示。对 Fe-0.1%C 二元系而言, 其碳含量位于亚包晶区, 不添加 Ce 时, 体系凝固过程只经过 L+ δ 两相共存区; 当往体系 Fe-0.1%C-x%Ce 中添加铈并且添加量小于 0.02% 时, 体系先后经过 L+ δ 两相共存区, L+ δ + γ 三相共存区; 当体系 Fe-0.1%C-x%Ce 中铈添加量达到 0.03% 以后, 凝固体系将先后经过 L+ δ 两相共存区, L+ δ + γ 三相共存区, L+ γ 两相共存区。从表 1 可以看出, 随着体系铈含量的增加, L+ δ 两相区有所增大。L+ δ + γ 三相共存区与体系凝固相变路径关系较大。当体系 Fe-0.1%C-x%Ce 铈含量小于 0.02% 时, L+ δ + γ 区间随铈含量增加而有所增大; 当体系 Fe-0.1%C-x%Ce 铈含量达到 0.03% 以后, L+ δ + γ 区间随铈含量增加而有所减小。L+ γ 两相共存区随着体系铈含量的增加而不断扩大。由此可见, 稀土铈可促使液相往奥氏体的转变, 其含量对体系凝固相变路径的影响较大。此外, 稀土铈对体系液相线温度影响不大, 但对固相线温度影响较大, 随着体系铈含量的增大, 固相线温度下降, 凝固区间增大, 这与文献[20]报道结果相符。

体系 Fe-0.25%C-0.03%Ce 的相图及凝固相变路径如图 7 所示。对比图 7 与图 6b 可以看出, 体系碳含量对凝固路径的影响较大。体系 Fe-0.25%C-0.03%Ce 的凝固过程先后经过 L+ δ 两相共存区, L+ γ 两相共存区。

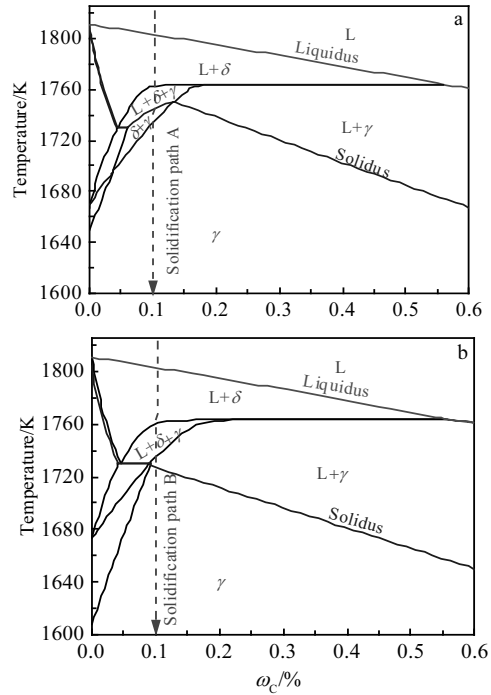


图 6 Fe-0.1%C-x%Ce 体系凝固路径

Fig.6 Solidification path of Fe-0.1%C-x%Ce system:
(a) x=0.01 and (b) x=0.03

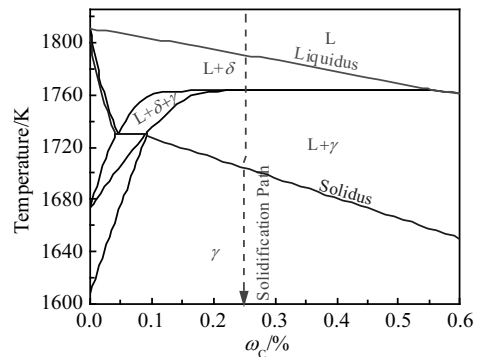


图 7 Fe-0.25%C-0.03%Ce 体系凝固路径

Fig.7 Solidification path of Fe-0.25%C-0.03%Ce system

表 1 Fe-0.1%C-x%Ce 凝固路径

Table 1 Solidification path of Fe-0.1%C-x%Ce system

x	δ +L range		$\Delta T_{\delta+L}$	δ + γ +L range		$\Delta T_{\delta+\gamma+L}$	γ +L range		$\Delta T_{\gamma+L}$	T_L-T_S	Ave_kc
	$T_{start}^{\delta+L}/K$	$T_{end}^{\delta+L}/K$		$T_{start}^{\delta+\gamma+L}/K$	$T_{end}^{\delta+\gamma+L}/K$		$T_{start}^{\gamma+L}/K$	$T_{end}^{\gamma+L}/K$			
0	1803	1764	39	-	-	-	-	-	-	39	0.157
0.01	1802	1763	39	1762	1745	17	-	-	-	57	0.175
0.02	1802	1762	40	1761	1737	24	-	-	-	65	0.186
0.03	1802	1761	41	1760	1735	25	1734	1727	7	75	0.203
0.04	1802	1760	42	1759	1735	24	1734	1716	18	86	0.219
0.05	1802	1759	43	1758	1735	23	1734	1706	28	96	0.232
0.06	1802	1759	43	1758	1734	24	1733	1704	29	98	0.234
0.07	1802	1758	44	1757	1734	23	1733	1703	30	99	0.234
0.08	1802	1757	45	1756	1734	22	1733	1701	32	101	0.236
0.09	1802	1757	45	1756	1734	22	1733	1700	33	102	0.237
0.1	1802	1756	46	1755	1734	21	1733	1698	35	104	0.239

稀土铈对 Fe-0.25%C-x%Ce 凝固路径的影响如图 8 所示。当体系 Fe-0.25%C-x%Ce 铈含量为 0 时，即 Fe-0.25%C 二元系，凝固体系先后经历 L+ δ 以及 L+ γ 两相共存区。当往体系中添加不同量的铈后，体系凝固仍然经过这 2 个固-液两相区，而且 L+ δ 的温度区间几乎无变化；所不同的是，凝固过程中 L+ γ 的温度区间大小随着铈含量的增加不断扩大。当体系中铈的添加量在最适宜添加量的上限时，即体系 Fe-0.25%C-0.04%，其 L+ δ 固-液共存区范围在 1764~1790 K，与 Fe-0.25%C 二元系一致；然而，体系 L+ γ 固-液共存区温度范围为 1694~1763 K，其共存温度区间达到了 69 K，而 Fe-0.25%C 二元系 L+ γ 固-液共存区范围为 1746~1763 K，共存温度区间只有 17 K。稀土铈使体系凝固区间增大，与文献[20]报道结果相符。显然，稀土铈对钢的凝固相变有较大影响，显著扩大了液相和奥氏体共存区。

2.3 铈对溶质碳偏析的影响机理

不同铈含量下体系 Fe-0.1%C-x%Ce 凝固过程中溶质碳平衡分配系数变化如图 9 所示。从图 9 可以看出，溶质碳的平衡分配系数与凝固过程相组成密切相关。溶质碳在奥氏体与液相铁之间的平衡分配系数比在铁素体与液相铁之间的平衡分配系数大 1 倍左右。因此，在 Fe-0.1%C-x%Ce 体系凝固过程中，当凝固路径由

L+ δ 两相共存区过度到 L+ δ + γ 三相共存区时，由于奥氏体 γ 的存在和不断增加，溶质碳的平衡分配系数迅速增大；当凝固路径由 L+ δ + γ 三相共存区时过度到 L+ γ 两相共存区时，由于 δ 铁素体相已完全转化为 γ 奥氏体相，溶质碳的平衡分配系数不再迅速增加，但仍随着温度的降低，缓慢增大。

图 10 为稀土铈改善钢中碳偏析的作用机理。图 10a 为 Fe-0.1%C 体系溶质碳的平衡分配系数随温度的变化。Fe-0.1%C 体系凝固过程只经过 L+ δ 共存区，溶质碳在铁素体与液相铁之间进行分配，溶质碳的平衡分配系数较小。

当体系 Fe-0.1%C-x%Ce 中添加了铈且 Ce 含量小于 0.02% 时，如图 10b，此时体系先经过 L+ δ 两相共存区，然后再经过 L+ δ + γ 三相共存区。在 L+ δ 两相共存区，溶质 C 在铁素体和液相铁之间分配，并且在此 L+ δ 两相共存区溶质碳的平衡分配系数基本与 Fe-0.1%C 体系的相等。与 Fe-0.1%C 体系不同的是，由于铈含量的增加，体系凝固过程经过了 L+ δ + γ 三相共存区，溶质碳在铁素体，奥氏体以及液相铁之间分配，奥氏体的迅速生成使溶质碳的平衡分配系数陡然增大。

当体系 Fe-0.1%C-x%Ce 中铈的添加量达到 0.03% 以后，如图 10c，由上文体系凝固路径分析可知，此

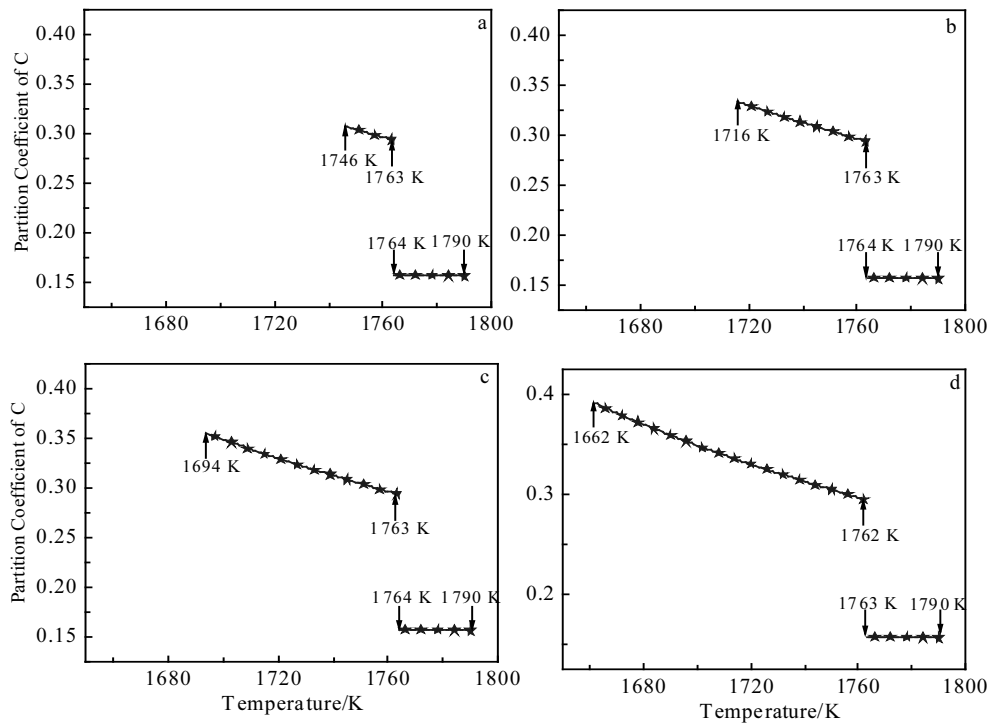


图 8 铈对 Fe-0.25%C-x%Ce 体系凝固路径的影响

Fig.8 Effect of Ce on solidification path of Fe-0.25%C-x%Ce system: (a) x=0, (b) x=0.02, (c) x=0.04, and (d) x=0.08

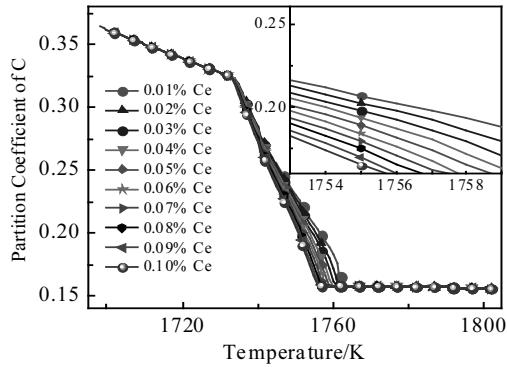


图 9 Fe-0.1%C-x%Ce 体系中铈对碳平衡分配系数的影响
Fig.9 Effect of Ce on the equilibrium partition coefficient of C in Fe-0.1%C-x%Ce system

时体系先经过 L+ δ 两相共存区, 然后再经过 L+ δ + γ 三相共存区, 最后经过 L+ γ 两相共存区。同样地, 在 L+ δ 两相共存区溶质碳平衡分配系数较小, 不同铈含量下, 在此共存区溶质碳的平衡分配系数几乎无变化。从 L+ δ 两相共存区过度到 L+ δ + γ 三相共存区, 溶质碳平衡分配系数陡然增大; 铈含量越高, 在此共存区同一温度下的溶质碳的分配系数略低, 这是由于铈含量增加降低了固相线, 拓宽了固-液两相区的缘故。从 L+ δ + γ 三相共存区过度到 L+ γ 两相共存区, 溶质碳平衡分配系数继续缓慢增大; 在此区域, 相同温度下溶质碳的分配系数几乎不变。随着铈含量的增大, 固相线温度降低, 故 L+ γ 两相共存区随铈含量的增加而扩大。

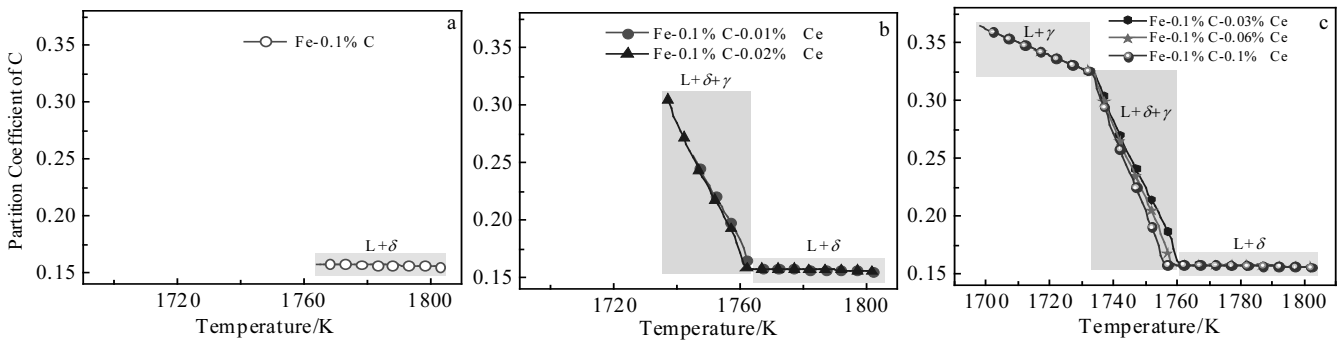


图 10 不同铈添加量下体系 Fe-0.1%C-x%Ce 中 C 平衡分配系的变化过程

Fig.10 Changing process of the equilibrium partition coefficient of C in Fe-0.1%C-x%Ce system: (a) x=0; (b) x=0.01, 0.02; (c) x=0.03, 0.06, 0.1

综上, 铈的添加可促使 Fe-0.1%C-x%Ce 体系奥氏体转变, 由于碳在奥氏体中的分配系数比铁素体中的大, 奥氏体转变使溶质碳平衡分配系数增大, 凝固路径下整个糊状区溶质碳的平均平衡分配系数增大。因此, 添加稀土铈可以提高钢中溶质碳的平衡分配系数, 从而改善钢中溶质碳的偏析。

3 结论

1) 稀土铈的添加可以提高钢中溶质碳的平衡分配系数, 从而起到改善钢中溶质碳偏析的作用。改善钢中碳偏析的最适宜铈添加量与碳含量有关。Fe-0.1%C-x%Ce 体系最适宜的稀土铈添加量为 0.047%~0.057%。Fe-0.25%C-x%Ce 体系最适宜的稀土铈添加量为 0.03%~0.04%。当往体系 Fe-0.1%C 添加 0.05%铈后, 溶质碳的平均平衡分配系数由 0.157 增大到 0.232, 增大了 47.7%。

2) 稀土铈可促进奥氏体相转变, 对 Fe-C 合金的凝固路径影响较大。对于没添加铈的 Fe-0.1%C 体系,

其凝固过程经过 L+ δ 共存区; 当体系 Fe-0.1%C-x%Ce 铈添加量小于 0.02%时, 其凝固路径先经过 L+ δ 共存区, 然后经过 L+ δ + γ 共存区; 当铈添加量大于 0.03%时, 凝固体系先后经过 L+ δ 、L+ δ + γ 以及 L+ γ 3 个固-液共存区。

3) 稀土铈并不能提高溶质碳在铁素体或者奥氏体中的平衡分配系数, 但铈可以促进奥氏体转变并促使奥氏体区扩大, 溶质碳在奥氏体中的平衡分配系数比铁素体中的大, 故稀土铈可提高体系凝固过程中溶质碳的平均平衡分配系数, 从而起到改善钢中溶质碳偏析的作用。

参考文献 References

[1] Flemings M C. *ISIJ International*[J], 2000, 40(9): 833
 [2] Sung P K, Poirier D R. *Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*[J], 1999, 30(8): 2173
 [3] Fujda M. *Journal of Metals, Materials and Minerals*[J], 2005, 15(2): 45

- [4] Domitner J, Wu M, Kharicha A *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*[J], 2014, 45(3): 1415
- [5] Fachinotti V D, Corre S L, Triolet N *et al.* *International Journal for Numerical Methods in Engineering*[J], 2006, 67(10): 1341
- [6] Guang Zhiqing (关志强), Huang Weigang (黄维刚), Wang Song (王松) *et al.* *Heat Treatment of Metals(金属热处理)*[J], 2012, 37(8): 72
- [7] Wang Longmei (王龙妹), Du Ting (杜挺), Lu Xianli (卢先利) *et al.* *Chinese Rare Earths(稀土)*[J], 2001, 22(4): 37
- [8] Xie Fei (谢飞), Ma Baotian (马宝钿), He Jiawen (何家文) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 1997, 26(1): 54
- [9] Wang Haiyan (王海燕), Mao Weimin (毛卫民), Zhu Guohui (朱国辉) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2015, 44(5): 1159
- [10] Khvan A V, Fartushna L V, Mardani M *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 651: 350
- [11] Xiang Yong (向勇), Chen Zhiguo (陈志国), Wei Xiang (魏祥) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2015, 44(6): 1335
- [12] Wang Yong (王勇), Zhang Zhengjiang (张正江), Zhang Xuyun (张旭昀) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2015, 25(7): 1858
- [13] Lin Qin (林勤), Guo Feng (郭锋), Zhu Xingyuan (朱兴元). *Journal of the Chinese Rare Earth Society(中国稀土学报)*[J], 2006, 24(9): 427
- [14] Kagawa A, Iwata K, Nofal A A *et al.* *Materials Science and Technology*[J], 1985, 1(9): 678
- [15] Fartushna I, Khvan A, Dinsdale A *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 654: 424
- [16] Bale C W, Bélisle E, Chartrand P *et al.* *Calphad-Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*[J], 2009, 33(2): 295
- [17] Umeda T, Kimura Y, Suzuki M *et al.* *The 4th Japan-Germany Seminar on Basic Principles of Solidification of Steel with Special Regard to Continuous Casting*[C]. Tokyo: Iron and Steel Institute of Japan, 1980
- [18] Gao Ruizhen (高瑞珍), Chen Xiaoguang (陈晓光), Liu Shumo(刘树模). *Metal Material and Hot Working Technology(金属材料与热加工技术)*[J], 1983(2): 31
- [19] Nuri Y, Ohashi T, Hiromoto T *et al.* *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*[J], 1982, 22(6): 399
- [20] Gao Ruizhen (高瑞珍), Chen Xiaoguang (陈晓光), Liu Shumo(刘树模). *Journal of Beijing Institute of Iron and Steel(北京钢铁学院学报)* [J], 1983(1): 53

Thermodynamic Study of Cerium Effect on the Carbon Segregation in Steel

Chen Huabiao, Long Mujun, Chen Dengfu, Huang Yunwei, Gui Lintao, Ma Youguang, Duan Huamei
(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to investigate the effect of cerium on the carbon segregation in steel, a thermodynamic calculation mold of equilibrium partition coefficient in multi-component alloy was established. The equilibrium partition coefficient of C in Fe-C-Ce system with different cerium contents was calculated with Equilib mouldle of FactSage. The results show that the effect of cerium on phase transformation is remarkable during solidification. The addition of cerium facilitates austenite transformation and enlarges the L+ γ coexisting zone. Cerium increases the average equilibrium partition coefficient of C, which means it can mitigate the segregation of C in steel. The optimum addition amount of cerium to improve the segregation of C in steel is associated with carbon content. For Fe-0.1%C-x%Ce system, the optimum addition amount of cerium is from 0.047% to 0.057%. And for Fe-0.25%C-x%Ce system, the optimum addition amount of cerium is from 0.03% to 0.04%.

Key words: cerium; carbon segregation; equilibrium partition coefficient; solidification path

Corresponding author: Long Mujun, Ph. D., Associate Professor, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China, Tel: 0086-23-65102467, E-mail: longmujun@cqu.edu.cn