

特约专栏

# 高铁弹条钢夹杂物塑性化控制的热力学分析

郭俊波<sup>1</sup>, 王丽君<sup>1</sup>, 刘延强<sup>1</sup>, 周国治<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083)

(2. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072)

**摘要:** 提高高铁弹条钢的疲劳性能, 除了要求弹条钢具有较高的纯净度外, 还必须控制弹条钢中的非金属夹杂物。弹条钢中存在的脆性和不变形非金属夹杂物是弹条钢疲劳断裂的重要原因, 所以必须控制弹条钢中的夹杂物为低熔点和具有良好的变形能力。借助 Factsage 热力学计算软件对 1 873 K 时钢液与夹杂物间的平衡进行了计算, 确定了生成具有良好变形能力的低熔点  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  系夹杂物所需要的钢液成分。结果表明: 将夹杂物的成分控制在  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  系的低熔点区域 2 中时, 钢液中的溶解氧含量为  $(1 \sim 3) \times 10^{-6}$ , 远远低于将夹杂物成分控制在低熔点区域 1 中时的溶解氧的含量, 此时可以同时实现夹杂物塑性化和钢液纯净化的要求。

**关键词:** 弹条钢; 低熔点区域;  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; 夹杂物; 热力学平衡

**中图分类号:** TF762.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1674-3962(2011)12-0027-06

## Thermodynamic Analysis of Control on Plasticization of Non-Metallic Inclusions in the Spring Steel of High-Speed Railway

GUO Junbo<sup>1</sup>, WANG Lijun<sup>1</sup>, LIU Yanqiang<sup>1</sup>, ZHOU Guozhi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** To improve the fatigue property of spring steel used in high-speed railway, besides the requirement of high cleanliness of spring steel, the non-metallic inclusions are needed to be controlled. Brittle inclusions and point-like inclusions are the important reasons of fatigue fracture for spring steel. Therefore, it is essential to control the inclusions composition to the target of low melting point and good deformation capacity. Thermodynamic equilibrium between molten steel and inclusions at 1 873 K have been calculated by the thermodynamic software Factsage in present study, and the appropriate steel composition corresponding to  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  system inclusions with good deformation capacity and low melting point has been determined. It is indicated that the dissolved oxygen content is estimated to be  $(1 \sim 3) \times 10^{-6}$  when the composition of inclusions is controlled in the second area of low melting point of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ . It is far lower than the dissolved oxygen content of the first area of the low melting point of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ , and the aim of achieving plastic inclusions and clean spring steel can be realised too.

**Key words:** spring steel; low point melting areas;  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; inclusions; thermodynamic equilibrium

### 1 前言

扣件系统是连接钢轨和轨枕使之形成轨排的部件, 它对保证轨道稳定性、可靠性起到重要作用<sup>[1]</sup>。其中弹条是扣件系统中的核心部件, 弹条的作用是将钢轨固定在铁垫板上。在工作过程中, 弹条不仅发生弯曲变形, 还会发生扭曲变形, 呈现比较复杂的应力状态。因此, 对弹条钢提出了更为苛刻的要求。弹条钢中存在的变形

能力差的脆性和不变形非金属夹杂物是弹条钢疲劳断裂的重要原因<sup>[2]</sup>。所以通过控制脆性及不变形夹杂物的成分进而改变其形态, 使弹条钢中生成低熔点可变形的塑性夹杂物, 对提高弹条用钢的疲劳性能、保障列车的安全运行、促进高铁飞速发展有重大意义。而控制钢中夹杂物形态是冶金工艺过程控制的一项重要目标。对操作温度下夹杂物与对应钢液成分之间热力学平衡的研究为工艺的改善及钢材质量的提高提供了重要的理论基础。

本文基于现有工艺生产中产生的弹条钢夹杂物, 通过钢液与夹杂物之间建立的反应平衡, 借助 Factsage 热力学计算软件, 计算预测 1 873 K 时钢液析出低熔点夹

收稿日期: 2011-10-16

基金项目: 高速铁路扣件系统弹条关键技术研发资助项目

通信作者: 周国治, 男, 1937 年生, 中国科学院院士

杂物时所需的钢液条件,为弹条钢实际生产中夹杂物形态控制提供理论指导。

## 2 弹条钢中夹杂物的检测与分析

在研究分析试样中的夹杂物时,研究者通常采用金相试样法和电解法。虽然金相试样法具有简单、直观、原位的优点<sup>[3]</sup>,但由于钢中的夹杂物在三维基体中的分布是随机的,所以任意磨抛的金相面上夹杂物的出现也带有随机性。因此,用金相试样法很容易出现漏检现象。此外,由于夹杂物在空间的取向不同,同一种夹杂物在金相面上也可能呈现不同的形貌和尺寸。因此用金相试样法往往不容易得出全面而正确的结论<sup>[4]</sup>。

电解法可从钢基体中萃取出钢中夹杂物进行全面地分析。但大多数研究人员所采用的电解液为酸性水溶液,在电解夹杂物的过程中容易侵蚀或溶解夹杂物中的铝硅酸盐和硫化物夹杂,所以这种方法也具有一定的缺陷。

为了克服金相试样法和酸性水溶液电解法所存在的问题,本文采用非水溶液电解法提取钢水中的夹杂物。对弹条钢的试样经过加工后用非水溶液电解法将钢中的夹杂物电解提取,经处理后,用扫描电镜和能谱分析夹杂物的形貌和成分。结果表明,钢中绝大部分夹杂物是  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  系夹杂物,少量含有  $\text{MgO}$  和  $\text{CaS}$  夹杂。典型夹杂物形貌及成分如图 1~3 所示。

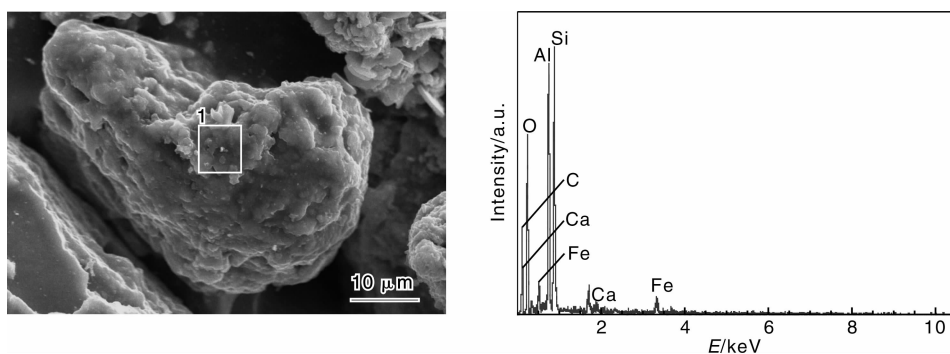


图 1  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  系夹杂物

Fig. 1 SEM image of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  inclusions

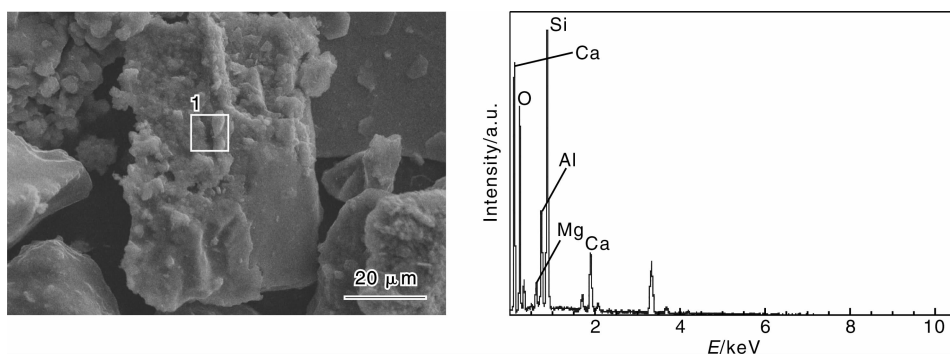


图 2 含有少量  $\text{MgO}$  的  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  系夹杂物

Fig. 2 SEM image of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  inclusions with  $\text{MgO}$

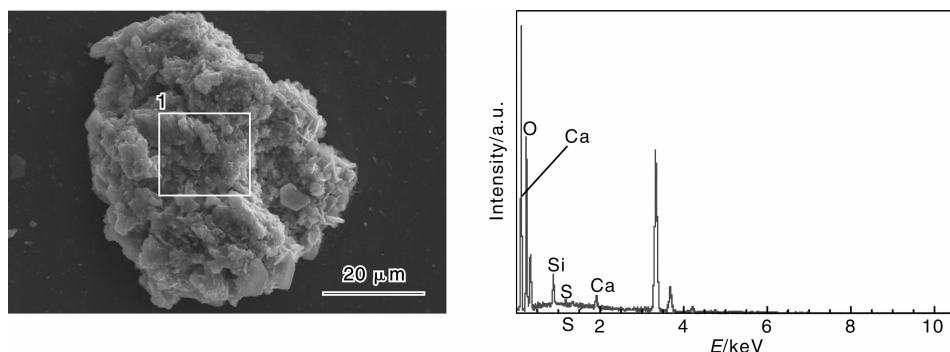


图 3 含有少量  $\text{CaS}$  的  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  系夹杂物

Fig. 3 SEM image of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  inclusions with  $\text{CaS}$

因此, 本文从热力学角度考察了  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  三元系夹杂物成分控制的热力学条件。

### 3 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元系夹杂物目标成分控制范围

前人研究表明<sup>[5]</sup>, 夹杂物的熔点和其变形能力有很大的关系。在轧制温度下, 随着夹杂物熔点的降低, 其变形能力也越来越好; 而夹杂物的化学成分决定了夹杂物的熔点, 从而决定了其在热加工过程的塑性变形能力。

Bernard G 指出: 在  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  三元系夹杂物中, 具有良好变形能力的夹杂物组成分布在钙斜长石 ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) 与磷石英 ( $\text{SiO}_2$ ) 和假硅灰石 ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) 相邻的周边区域<sup>[6]</sup>。该区域熔点低于 1 673 K, 即  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  三元系的低熔点分布图中 (图 4) 的区域 1。该区域的夹杂物的成分范围为  $\text{SiO}_2$ : 30% ~ 75%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 5% ~ 40%,  $\text{CaO}$ : 5% ~ 55%;  $\text{CaO/SiO}_2$  在 0.5 ~ 1.0 (质量分数) 之间。

除此之外, 还存在另一个较低熔点的区域 2 (如图 4 所示), 即铝酸三钙 ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )、硅酸二钙 ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )、铝酸钙 ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) 相邻的低熔点成分区域。该区域熔点低于 1 773 K, 其成分范围为  $\text{SiO}_2$ : 0% ~ 15%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 32% ~ 57%,  $\text{CaO}$ : 40% ~ 61%。

当夹杂物成分控制在低熔点区域 1 时, 由于该区域熔点低于 1 673 K, 所以夹杂物具有良好的变形能力, 钢材具有良好的抗疲劳性能。但该区域在实际控制时, 需要非常长的炉渣/钢液精炼时间; 同时与该区域相平衡的钢中的溶解氧含量很高, 在凝固过程中, 析出的夹杂物的成分、尺寸及数量难以控制<sup>[7]</sup>。

Suito H 通过热力学计算表明<sup>[8]</sup>, 当夹杂物成分控制在区域 2 时, 与该区域相平衡的钢中的溶解氧含量很低, 钢水的纯净度很高, 在凝固过程中, 夹杂物的成分、尺寸及数量能够得到有效地控制。同时, 由于区域 2 的熔点在 1 773 K 以下, 在轧制过程中, 夹杂物可以

发生稍许变形, 所以此区域的夹杂物具有一定的塑性变形能力, 有利于改善钢材的疲劳性能。

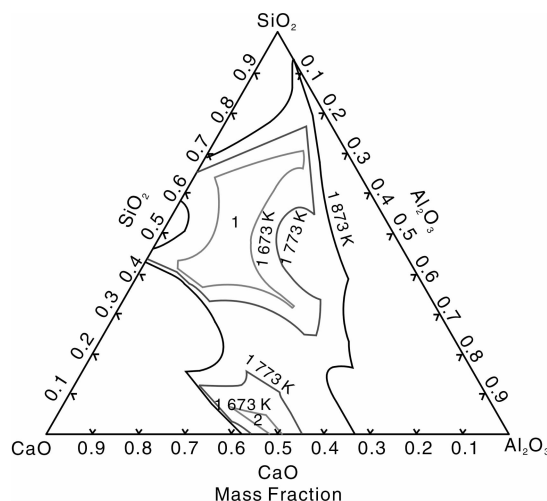


图 4  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  三元系的低熔点分布图

Fig. 4 Low melting point areas in the ternary phase diagram of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

## 4 钢液与夹杂物平衡的热力学分析

### 4.1 钢液成分及基础热力学数据

钢液化学成分如表 1 所示, 数据来源于某厂生产的弹条钢的成分分析。

表 1 钢液各组元化学成分分析 (w/%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.37	1.53	0.64	0.006 5	0.004 5	0.18

表 2<sup>[9]</sup> 给出了与活度系数计算有关的元素相互作用系数  $e_i^j$ 。亨利活度系数, 活度分别按式 (1)、(2) 计算, 如下:

$$\lg f_i = \sum_j e_i^j [\%j] \quad (1)$$

$$a_{[i]} = f_i \cdot [\%i] \quad (2)$$

表 2 1 873 K 时元素相互作用系数  $e_i^j$

Table 2 Interaction coefficients  $e_i^j$  of solution at 1 873 K

$i \backslash j$	Al	C	O	Mn	P	S	Si	Cr
Al	0.045	0.091	-6.6	0.012	0.05	0.03	0.005 6	0.025
C	0.043	0.14	-0.34	-0.012	0.051	0.046	0.08	-0.024
O	-3.9	-0.45	-0.20	-0.021	0.07	-0.133	-0.131	-0.04
Si	0.058	0.18	-0.23	0.002	0.11	0.056	0.11	-0.000 3
Mn	0.07	-0.07	-0.083	0	-0.003 5	-0.048	0.39	0.003 6
Ca	-0.072	-0.34	-678	0	0	-125	-0.097	0

式(1), (2)中,  $f_i$  为元素  $i$  的亨利活度系数,  $e_i^j$  为元素  $j$  对  $i$  的相互作用系数,  $[\%i]$  和  $[\%j]$  分别为钢液中元素  $i, j$  的质量百分浓度。

根据式(1)、表 1、表 2 的数据, 计算出了 1 873 K 时有关元素的亨利活度系数, 见表 3。

表 3 1 873 K 时各组元亨利活度系数  $f_i$

Table 3 Activity coefficients  $f_i$  of solution at 1 873 K

Activity coefficients	$f_C$	$f_{Mn}$	$f_{Si}$	$f_{Al}$	$f_O$	$f_{Ca}$
Value	1.46	3.71	1.80	1.105	0.40	0.008 7

#### 4.2 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系活度

为了进行钢液/夹杂物之间的平衡热力学计算, 需要知道温度在 1 873 K 时 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系各组元的活度, 见图 5~7。

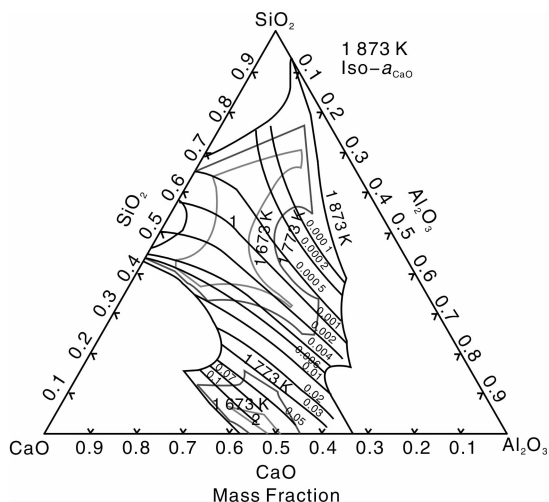


图 5 1 873 K 下 CaO 的等活度线

Fig. 5 Iso-activity lines of CaO at 1 873 K

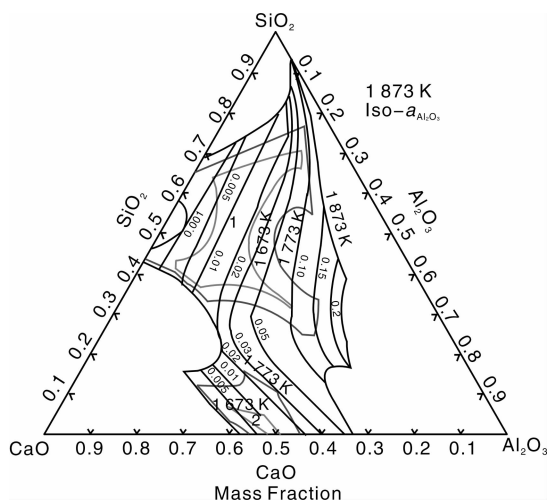


图 6 1 873 K 下 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的等活度线

Fig. 6 Iso-activity lines of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 1 873 K

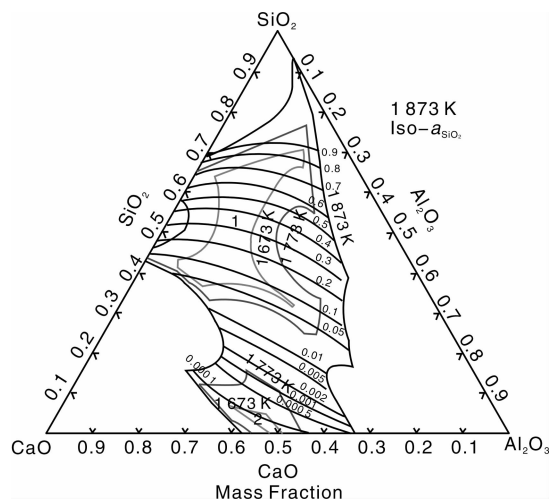


图 7 1 873 K 下 SiO<sub>2</sub> 的等活度线

Fig. 7 Iso-activity lines of SiO<sub>2</sub> at 1 873 K

#### 4.3 钢液与 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系夹杂物的平衡热力学计算

##### 4.3.1 钢液与 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系夹杂物平衡时的 $[O]$

钢液与 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系夹杂物平衡时的  $[O]$  计算如下:

$$[Si] + 2[O] = (SiO_2)$$

$$\Delta G^\theta = -581\,900 + 221.8T \text{ J/mol} \quad (3)$$

通过式(1), (2), (3)可推出:

$$K_{1\,873\text{ K}} = \frac{a_{SiO_2}}{a_{[Si]} \cdot a_{[O]}^2} = \frac{a_{SiO_2}}{f_{[Si]} \cdot [\%Si] \cdot f_{[O]}^2 \cdot [\%O]^2}$$

$$\text{即: } [\%O] = \left( \frac{a_{SiO_2}}{K \cdot f_{[Si]} \cdot [\%Si] \cdot f_{[O]}^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

将表 1、表 3 及图 7 中 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系的 SiO<sub>2</sub> 的活度值代入(4)中, 可以得出 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系夹杂物和钢液在 1 873 K 平衡状况下钢液中等溶解氧含量线, 如图 8 所示。

从图 8 中可以看出: 与低熔点区 1 相平衡的钢液中的溶解氧含量在 0.001 5% ~ 0.006 8% 之间; 与低熔点区 2 相平衡的钢液中的溶解氧在 0.000 1% ~ 0.000 3% 之间, 远远低于与区域 1 相平衡的钢液中的  $[O]$  含量。同时, 从图 8 还可以看出: 随着 CaO/SiO<sub>2</sub> 的提高, 与钢液平衡的  $[O]$  含量明显降低; 当 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 一定时, 降低 SiO<sub>2</sub> 的含量, 钢液中的  $[O]$  含量明显降低。

##### 4.3.2 钢液与 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系夹杂物平衡时的 $[Al]$

钢液与 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系夹杂物平衡时的  $[Al]$  计算如下:

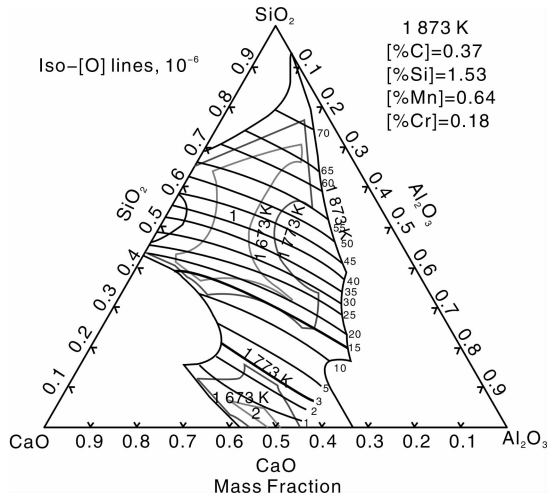
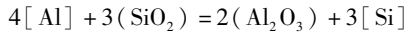
图 8 钢液与 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物平衡时的等溶解氧含量线

Fig. 8 Iso-[O] lines on the equilibrium between the molten spring steel and CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions at 1 873 K



$$\Delta G^\theta = -658\,200 + 107.1T \text{ J/mol} \quad (5)$$

通过式(1), (2), (5)可得出:

$$K_{1\,873\text{ K}} = \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2 \cdot a_{[\text{Si}]}^3}{a_{\text{SiO}_2}^3 \cdot a_{[\text{Al}]}^4} = \frac{f_{[\text{Si}]}^3 \cdot [\% \text{Si}]^3 \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2}{f_{[\text{Al}]}^4 \cdot [\% \text{Al}]^4 \cdot a_{\text{SiO}_2}^3}$$

$$\text{即: } [\% \text{Al}] = \left( \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2 \cdot f_{[\text{Si}]}^3 \cdot [\% \text{Si}]^3}{a_{\text{SiO}_2}^3 \cdot f_{[\text{Al}]}^4 \cdot K} \right)^{1/4} \quad (6)$$

将表 1、表 3 及图 6、图 7 中 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> 的活度值代入(6)中, 可以得出 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系夹杂物与钢液在 1 873 K 平衡状况下钢液中等铝含量线, 如图 9 所示。

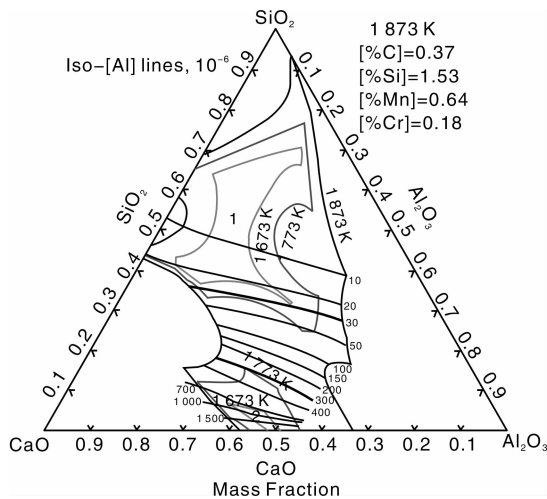
图 9 钢液与 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物平衡时的等铝含量线

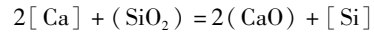
Fig. 9 Iso-[Al] lines on the equilibrium between the molten spring steel and CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions at 1 873 K

分析图 9 可知: 与低熔点区 1 相平衡的钢液中的

[Al] 含量在 0.003 0% 以下; 与低熔点区 2 相平衡的钢液中的 [Al] 含量在 0.03% ~ 0.18% 之间, 远远高于与区域 1 相平衡的钢液中的 [Al] 含量。当保持 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 一定时, 降低 SiO<sub>2</sub> 的含量, 钢液中平衡 [Al] 含量明显增加; 提高 CaO/SiO<sub>2</sub>, 钢中平衡 [Al] 含量将有所增加。

4.3.3 钢液与 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系夹杂物平衡时的  $a_{[\text{Ca}]}$

钢液与 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系夹杂物平衡时的  $a_{[\text{Ca}]}$  计算如下:



$$\Delta G^\theta = -694\,422 + 75.06T \text{ J/mol} \quad (7)$$

同理, 可推出:

$$K_{1\,873\text{ K}} = \frac{a_{\text{CaO}}^2 \cdot a_{[\text{Si}]}^2}{a_{[\text{Ca}]}^2 \cdot a_{\text{SiO}_2}} = \frac{a_{\text{CaO}}^2 \cdot [\% \text{Si}]^2 \cdot f_{[\text{Si}]}^2}{a_{\text{SiO}_2}^2 \cdot a_{[\text{Ca}]}^2}$$

$$\text{即: } a_{[\text{Ca}]} = \left( \frac{a_{\text{CaO}}^2 \cdot [\% \text{Si}]^2 \cdot f_{[\text{Si}]}^2}{K \cdot a_{\text{SiO}_2}^2} \right)^{1/2} \quad (8)$$

将表 1、表 3 及图 5、图 7 中 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系的 CaO, SiO<sub>2</sub> 的活度值代入(8)中, 可以得出 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元系夹杂物和钢液在 1 873 K 平衡状况下钢液中等钙活度线, 如图 10 所示。

由图 10 可知: 与低熔点区 1 相平衡的钢液中的  $a_{[\text{Ca}]}$  非常低, 在  $10 \times 10^{-10}$  以下; 与低熔点区 2 相平衡的钢液中的  $a_{[\text{Ca}]}$  较高, 在  $(300 \sim 5\,000) \times 10^{-10}$  之间。当 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 一定时, 降低 SiO<sub>2</sub> 的含量, 钢液与夹杂物平衡时的  $a_{[\text{Ca}]}$  升高; 提高 CaO/SiO<sub>2</sub> 时, 钢液与之平衡的  $a_{[\text{Ca}]}$  增加。

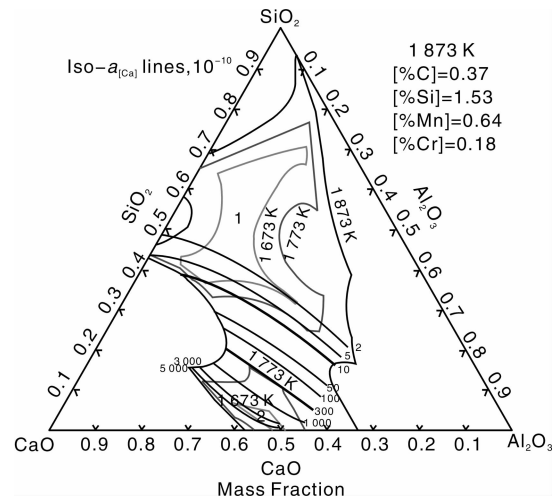
图 10 钢液与 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物平衡时的等  $a_{[\text{Ca}]}$  线

Fig. 10 Iso- $a_{[\text{Ca}]}$  lines on the equilibrium between the molten spring steel and CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions at 1 873 K

分析图 8 ~ 10 可以得知: 通过调整钢液成分使钢中

[Al]、[Ca]含量较高,[O]含量较低时,可以达到将夹杂物成分控制在低熔点区域2的目的。这时钢液中的[O]含量控制在 $(1 \sim 3) \times 10^{-6}$ ,钢水的纯净度很高,既可以实现夹杂物塑性化,又可以达到高纯净钢的要求,大大提高了弹条钢的疲劳寿命。

## 5 结 论

(1)该弹条钢在精炼时,要将夹杂物成分控制在CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元系中的低熔点区域1中,钢中所需的[O]含量为0.001 5%~0.006 8%;[Al]含量为0.003 0%以下; $a_{[Ca]}$ 在 $10 \times 10^{-10}$ 以下。

(2)要将夹杂物成分控制在CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元系中的低熔点区域2中,钢中所需的[O]含量为0.000 1%~0.000 3%;[Al]含量为0.03%~0.18%; $a_{[Ca]}$ 为 $(300 \sim 5\,000) \times 10^{-10}$ 。这时可以同时实现夹杂物塑性化和高纯净钢的要求。

## 参考文献 References

- [1] Sheng Wei(盛伟), Fu Chuanfeng(付传锋). 高速铁路扣件系统的类型和应用[J]. *Machinist Metal Cutting*(金属加工), 2010, (7): 31-35.
- [2] Gao Huiju(高惠菊). *Research & Development of High Performance Alloy Spring Steels for Accelerated Railway Wagons*(提速铁路车辆用高性能优质合金弹簧钢的研究与开发)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2005.
- [3] Wang Guocheng(王国承), Deng Gengfeng(邓庚凤). 钢中夹杂物研究的新方法及其应用[J]. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*(江西理工大学学报), 2008, 29(5): 51-55.
- [4] Shang Deli(尚德礼), Wang Xidong(王习东), Wang Guocheng(王国承), et al. 无损检测分析钢中非金属夹杂物的实验研究[J]. *Metallurgical Standardization & Quality*(冶金标准化与质量), 2005, 43(1): 28-30.
- [5] Kawahara Jun, Tanabe Koji, Banno Toshio, et al. Advance of Valve Spring Steel[J]. *Wire Journal International*, 1992, (11): 55-61.
- [6] Bernard G, Riboud P V, Urbain G. Oxide Inclusions' Plasticity[J]. *La Revue de Metallurgie-CIT*, 1981, 78(5): 421-433.
- [7] Chen Bin(陈斌). *Investigation on Liquid Steel-Slag Equilibrium and the Non-Metallic Inclusions in Alloying Structural Steels*(钢液-炉渣间的反应平衡及合金钢中非金属夹杂物的研究)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2007.
- [8] Ohta H, Suito H. Activities in CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Slag and Deoxidation Equilibria of Al, Mg and Ca[J]. *ISIJ International*, 1996, 36(8): 983-990.
- [9] Chen Jiaxiang(陈家祥). *Normal Data Book of Steelmaking*(炼钢常用图标数据手册)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

# 陕西省新材料产业构建千亿经济“航母”

“十二五”期间,陕西省新材料产业已经圈定了钛材料、钼材料、先进复合材料等5个重点发展方向。到2015年,陕西省将形成西安经济技术开发区等7个百亿元新材料产业基地,电子、石化等5个新材料产业集群,有色金属等3条新材料产业链,以及12家百亿级新材料企业集团。借助得天独厚的新材料产业的优势,陕西省正全力打造千亿级经济“航母”。

陕西省新材料产品涵盖了特种金属功能材料、高端金属结构材料、先进高分子材料、新型无机非金属材料、高性能复合材料、前沿新材料等领域。在当今国际新材料市场上,陕西省的钛材料加工能力位居世界第一;钼采选冶能力达到亚洲第一、世界第三;高性能螺旋焊管、柔性连续管和HFW焊管技术水平世界一流。

近年来,在金属新材料领域,陕西省一批龙头和骨干企业不断壮大,成为引领陕西省新材料发展的领头雁。例如,宝钛集团是国际上少数几个从事钛材料研究加工的大型企业,其产量占到世界市场份额的20%和国内市场份额的80%以上。金堆城钼业公司拥有国内唯一的钼材料研究国家工程技术中心,钼及钼合金材料生产能力世界第三、亚洲第一。

目前,陕西省已建成西高新电子信息材料、宝鸡国家新材料、西安阎良航空材料、安康新材料、商洛现代材料等产业基地,以及西安、咸阳、渭南、商洛等光伏产业聚集区。2010年,陕西省新材料产业工业总产值达到420亿元以上,拥有新材料有效专利2 400多件。据悉,到“十二五”末期,陕西省新材料产业产值有望突破2 100亿元,一举成为西部最大的新材料产业基地。

(来源:陕西日报)