

· 冶炼与凝固 ·



精准钙处理指导软件开发及在特殊钢生产中的应用

王伟健¹, 杨文², 任英², 张立峰¹

(1 北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要:针对钢液钙处理过程存在的钙收得率低、钙处理效果不稳定等难点问题,建立了精准钙处理模型,开发了精准钙处理指导软件,并应用于特殊钢生产中夹杂物控制的钙处理。采用Wagner模型计算钢液中组元的活度,采用离子-分子共存理论计算液态夹杂物组元的活度,然后根据系统自由能最小原理求解热力学平衡,得到钢液成分和夹杂物成分的变化。同时,建立了深度神经网络模型,实现了钙处理过程钙收得率的精确预测。在此基础上开发了以夹杂物成分精准控制为目标的钢液精准钙处理在线指导软件,可根据实际钢液成分和温度等操作条件,结合现场操作相关参数,计算出合理的喂钙线长度。该指导软件在特殊钢生产中得到了良好应用,能够为实际特殊钢生产过程的钙处理操作提供在线精准指导,稳定提升钙处理效果,减少含钙合金的消耗量,促进特殊钢生产的绿色化发展。针对45Mn钢进行工业试验,根据精准钙处理,软件计算结果,将喂钙线长度由应用前的320~350 m降低至200 m,可以较好的将钢中夹杂物改性为液态,工业试验结果与计算结果吻合较好。

关键词:精准钙处理; 在线指导软件; 热力学; 夹杂物控制; 特殊钢

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00111 **中图分类号:**TF769.2

Development of the Guidance Software of Precise Calcium Treatment and Its Application in Special Steel Production

Wang Weijian¹, Yang Wen², Ren Ying², Zhang Lifeng¹

(1 School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In response to the difficulties of low calcium yield and unstable effect in the calcium treatment process of molten steel, a precise calcium treatment model was established, and a guidance software of precise calcium treatment was developed and applied to the calcium treatment practice of special steel for the inclusion control in the current study. The Wagner model was used to calculate the activity of components in molten steel, and the ion molecule coexistence theory was used to calculate the activity of components in liquid inclusions. Then, the thermodynamic equilibrium was solved based on the principle of minimum system free energy to obtain the changes in steel composition and inclusion composition. At the same time, a deep neural network model was established to accurately predict the calcium yield during calcium treatment. On the basis, an online control software for precise calcium treatment of molten steel has been developed with the aim of precise control of inclusion composition. Based on actual operating conditions such as molten steel composition and temperature, combined with relevant on-site operation parameters, a reasonable length of calcium cored wire can be calculated. This guidance software has been well applied in the production of special steels and can provide online and accurate guidance for calcium treatment operations in the actual production process which can improve the efficiency of calcium treatment process, reduce the consumption of calcium containing alloys as well as promote the green development of special steel production. Industrial experiments were conducted on 45Mn steel, based on the calculation results of precise calcium treatment software, the length of the calcium feeding line was reduced from the range of 320-350 m to 200 m, which can effectively modify inclusions in the steel into liquid state. The industrial test results were in good agreement with calculation results.

Key Words: Precise Calcium Treatment; Online Guidance Software; Thermodynamic; Inclusion Control; Special Steel

作为钢中不可避免的第二相粒子,非金属夹杂物的存在破坏了钢基体的连续性,且由于夹杂物和钢基体间性质的差异和界面的存在,在钢材加工和服役过程中易产生应力集中,对钢材的强度、韧性

等性能产生不利影响。同时对于铝脱氧钢,由于脱氧产物氧化铝与钢液间的润湿性很差,容易在浇注过程粘附到水口内壁,导致水口结瘤,危害浇注的顺行和连铸坯的洁净度^[1-6]。因此,合理控制钢中非

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 52174293, U22A20171, 51874031, U1860206)

作者简介: 王伟健(1993—),男,博士,讲师; **E-mail:** wangweijian@ncut.edu.cn; **收稿日期:** 2023-06-06

通信作者: 杨文(1985—),男,教授,博士生导师; **E-mail:** wenyang@ustb.edu.cn

金属夹杂物对提高钢液可浇性和钢材性能具有重要意义。

钙处理技术广泛应用于钢中非金属夹杂物的改性,是控制非金属夹杂物形态和减少水口结瘤的重要技术手段^[7-12]。然而,生产实践中的钙处理过程存在多个难题,钙的熔点和沸点较低,在钢液中的溶解度较低,导致钙处理过程的钙收得率偏低且不容易控制,钢液喂钙量不足时达不到钙处理的效果,喂钙量过高时容易生成高熔点的硫化钙以及氧化钙,同样会导致连铸过程水口结瘤^[8, 13-19]。钙的合理喂入量与钢液成分、洁净钢和温度等因素密切相关,然而,实际生产中往往都是固定一个钙线喂入量,造成由于不同炉次间的工况差异而导致钙处理效果的波动^[13, 20-21]。因此,钢液中钙含量存在一个精准的合理范围,且随着不同炉次生产条件的变化而变化,存在“精准钙处理”的概念。在此背景下,本文着重介绍了精准钙处理指导软件的开发,并描述了该指导软件在钙处理特殊钢生产中的应用实践。

1 精准钙处理的热力学模型

关于钢液钙处理对钢中夹杂物影响的热力学计算,文献中大多使用 FactSage 软件进行计算,FactSage 是一款商用热力学软件,其选用的热力学数据已经打包到软件中,很难对其进行有效的修正。此外,FactSage 软件只能计算钢中钙含量对钢中夹杂物的改性反应,无法准确考虑钙收得率以及钙处理过程操作参数的影响。为此,通过编程直接建立钙处理热力学模型,综合考虑钙收得率和钙处理操作参数等因素,开发精准钙处理指导软件更加有效的在线指导现场的钙处理操作。

通过最小自由能法建立热力学模型,研究铝脱氧钢钙处理后钢中夹杂物成分随钢液成分和温度的变化,从而达到预测不同钢液条件下精准喂钙量的目的。

采用 Wagner 模型来计算钢液相组元的活度系数,计算时纯物质为标准态,计算公式如式(1)。

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_0 + \sum_{j=2}^n \varepsilon_i^j [j] + \sum_{j=2}^n \rho_i^j [j]^2 + \sum_{j=2}^n \sum_{k=2}^n \rho_i^{(j,k)} [j][k] \quad (1)$$

式中: i, j, k 为钢液中溶解态元素,包括 Al、C、Ca、Cr、Mg、Mn、N、O、P、S、Si、Ti 等元素, γ_i 为组元 i 活度系数, γ_0 为常数, ε_i^j 为组元 j 对 i 的一阶活度相互作用系数, ρ_i^j 为组元 j 对 i 的二阶活度相互作用系数, $\rho_i^{(j,k)}$ 为

组元 j 和组元 k 对组元 i 的二阶交叉活度相互作用系数, n 为钢液相中组元数量, $[j]$ 为钢液中组元 j 的摩尔分数, $[k]$ 为钢液中组元 k 的摩尔分数。

铝脱氧钢钙处理后生成的夹杂物主要为钙铝酸盐夹杂物,采用分子-离子共存理论计算 Al_2O_3 -CaO 系液相夹杂物中 Al_2O_3 及 CaO 组元的活度。根据 Al_2O_3 -CaO 系相图, Al_2O_3 -CaO 系熔渣中存在两种阳离子及六种分子。两种阳离子包括 Ca^{2+} 和 O^{2-} ,其中分子包括 Al_2O_3 、 $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $7\text{CaO} \cdot 12\text{Al}_2\text{O}_3$ 等。CaO 及 Al_2O_3 等组元的活度定义式分别如式(2)及式(3)所示。

$$a_1 = \frac{n_{\text{Ca}^{2+}} + n_{\text{O}^{2-}}}{n_z} \quad (2)$$

$$a_2 = \frac{n_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{n_z} \quad (3)$$

式中, a_1 和 a_2 分别为 Al_2O_3 -CaO 体系中 CaO 以及 Al_2O_3 组元的活度, n 为平衡状态下各组元的物质的量, n_z 为平衡状态下所有组元总的物质的量。

钙处理过程热力学平衡计算中输入的初始条件为钢液的成分及温度,计算钢液及夹杂物的自由能变化。采用 Wagner 模型计算钢液中铝和钙等元素的活度。采用离子-分子共存理论计算液相夹杂物组元中 Al_2O_3 和 CaO 的活度。最后根据系统自由能最小原理求解热力学平衡,得到钢液成分和夹杂物成分的变化。钢液中考虑的夹杂物类型包括 Al_2O_3 、 $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 、CaO、CaS 以及液态钙铝酸盐夹杂物等物质。

利用所建立的热力学模型计算得到的夹杂物成分,同 FactSage 热力学商业软件计算结果以及试验检测结果进行对比,如图 1 所示。图 1 中的点为实际检测的钢中夹杂物成分,实线为本论文热力学模型计算的将夹杂物归一化后的结果,虚线为 FactSage 热力学软件计算的将夹杂物归一化后的结果。与 FactSage 软件的计算结果相比,本论文热力学模型计算的夹杂物平均成分结果与实际结果更接近,验证了本模型的先进性和准确性。

通过系统最小自由能法建立的热力学模型计算的钢中总氧含量及硫含量对夹杂物液态窗口的影响如图 2 所示,随着钢中氧含量的增加,控制夹杂物液态窗口的总钙含量的上限及下限均增加,控制夹杂物的液态窗口范围变宽。随着钢中硫含量的增加,CaS 更容易生成,控制夹杂物液态窗口的总钙含量的下限几乎不变,而上限值降低,液态窗口的范围变窄。

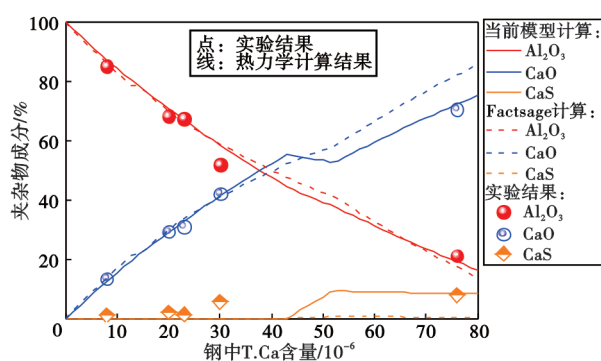


图1 夹杂物成分的热力学计算结果与试验结果对比^[22]
Fig. 1 Comparison between the thermodynamic calculation and the test results of inclusion composition in the steel^[22]

2 钙收得率的神经网络预测模型

钙处理过程中,钙收得率的稳定性控制一直是影响钙处理精准程度的难题。在精准钙处理模型的实际应用过程中,合理的喂线长度的前提之一是确定钙的收得率。钙处理过程中,钙的收得率受到多种因素影响,很难从理论层面对钙处理过程中钙的收得率进行计算^[23-24]。但在实际的钙处理过程中,为实现钢中钙含量的稳定精准控制,必须精准获得钙收得率。因此,本研究建立了神经网络模型用于预测钢液钙处理过程中钙的收得率。

采集国内某厂钙处理钢种的数据,进行预处理,分析对比,删去存在明显错误、缺失等不合理的数据。为了消除不同量纲对数据产生的影响,将筛选后的样本数据进行归一化处理。然后,分别选取浅层神经网络(SNN)、深度神经网络(DNN)以及经过遗传算法优化的神经网络(GA-BP)模型对钙收得率进行预测。对3种神经网络模型的预测结果进行

对比,进而挑选出最优的计算模型对钙的收得率进行预测。浅层神经网络由一个输入层、一个隐藏层及一个输出层组成。与浅层神经网络相比,深度神经网络增加了隐藏层的数量,因此预测结果相对更加准确。深度神经网络结构如图3所示。图3中X代表输入数据,包括钢液成分、温度、喂线速度、精炼过程石灰、改性剂、脱氧剂等原辅料加入量、钢液重量等参数,Y代表输出数据,当前模型的输出参数为钙收得率。神经网络模型由多个神经元节点连接而成,W为不同隐藏层的各个神经元节点间连接的权值。

神经网络的计算主要包括3个步骤:(1)对数据进行预处理,选择合适的神经网络结构参数,构建合适的神经网络;(2)对神经网络进行训练;(3)利用训练好的神经网络对测试数据进行预测。在当前的神经网络结构中,输入层节点数量为22,输出层节点数量为1。对比得到当中间层数量为3的时候,模型的预测结果相对更加精确,预测结果与实际钙处理过程中钙的收得率的试验结果平均误差小于5%,因此,选择最优的中间层数量3进行后续的模型预测。

将3种不同的神经网络模型预测的钙收得率与实际生产过程的收得率进行对比,其中DNN模型预测值与试验值的对比结果如图4所示。发现DNN模型与GA-BP模型的计算结果比SNN更加准确,但GA-BP模型需要更长的计算时间。综合考虑计算结果的准确性及运行效率,选择DNN模型作为钙收得率的预测模型。

3 精准钙处理指导软件的开发

本研究在以上研究基础上,开发了以夹杂物成

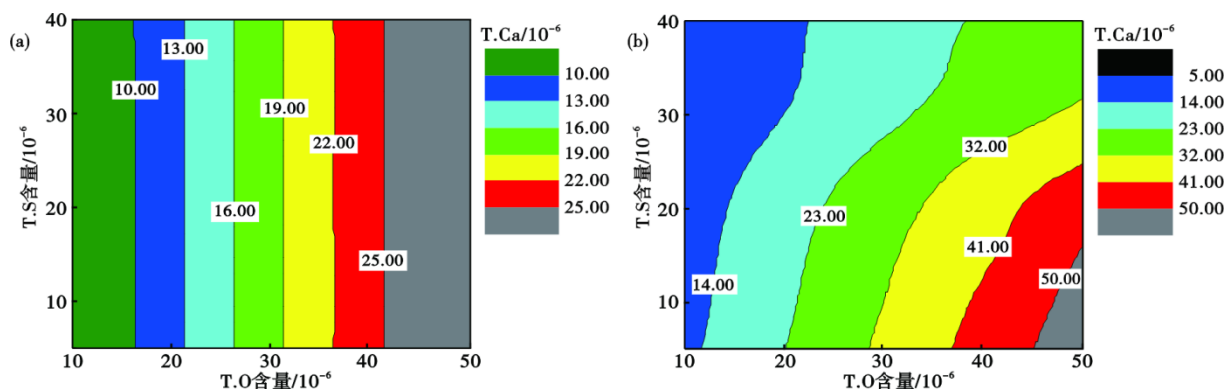


图2 钢中总氧含量及硫含量对钙处理过程夹杂物100%液态窗口的影响:(a)最小加入量,(b)最大加入量
Fig. 2 Effect of T. O and T. S contents on the precise addition of calcium for 100% liquid window of inclusions in the steel during calcium treatment: (a) Minimum addition, (b) Maximum addition

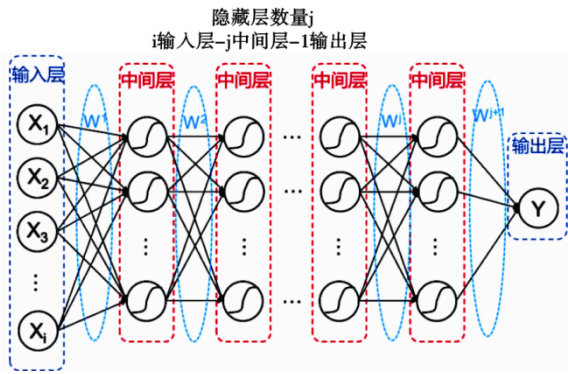


图 3 深度神经网络结构示意图^[25]

Fig. 3 Structure schematic of deep neural network (DNN)^[25]

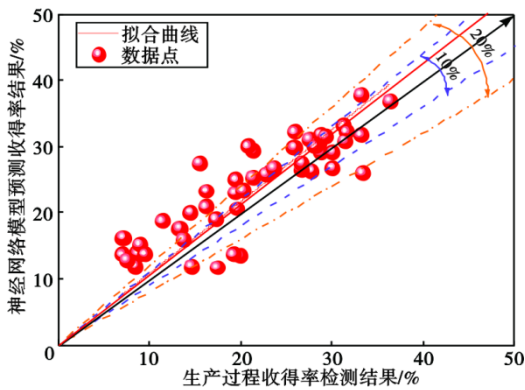


图 4 DNN 神经网络模型预测的钙收得率和工业试验检测值的对比^[25]

Fig. 4 Comparison between the predicted calcium yields using the DNN neural network model and the detected values in industrial tests^[25]

分精准控制为目标的钢液精准钙处理在线指导软件。该软件根据实际钢液成分和温度等操作条件,基于本论文所介绍的热力学模型,自主开发程序计算得到钢中精准的加钙量,同时结合现场操作相关参数,包括钢液重量、钙线成分、钙收得率等,计算出合理的喂钙线长度,为实际生产过程的钙处理操作提供在线精准指导。该软件的工作流程示意图如图 5 所示。首先读取当前钙处理操作的条件,包括钢液成分、温度以及钢水量等信息,结合夹杂物的控制目标,通过热力学计算得到当前钢液的需钙含量。以读取的当前钢液成分等信息作为钙收得率神经网络预测模型的输入数据,对当前生产条件下的钙收得率进行预测,结合热力学计算得到钢液的需钙含量,最终得到应该精准加入的喂钙线长度。

钙处理指导软件的操作界面如图 6 所示。将实际生产过程中测得的钢液成分以及相关参数输入



图 5 精准钙处理指导软件工作流程示意图^[22]

Fig. 5 Schematic diagram of the workflow for precise calcium treatment software^[22]

到软件的界面上,也可自动从企业的数据库中读出并显示到软件界面上,启动计算,最终得到当前炉次条件下钢液中夹杂物成分和喂钙线长度的指导结果。软件主要包括钢液成分及操作参数模块、运行结果模块、当前炉次信息模块及软件控制模块。图 6 中还显示了某一炉次钙处理软件的计算结果示例。计算过程中软件与现场的生产数据库进行数据交互。在实际生产过程中,并不是所有钢种都进行钙处理操作。因此,在计算过程中需要判断当前生产的钢种是否需要钙处理。在当前炉次的钢液成分下,经过本软件计算得到的钢中夹杂物主要为固相的 $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物,平均成分为 92% 的 Al_2O_3 和 8% 的 CaO 。由于设置的夹杂物目标是将钢液中的 Al_2O_3 含量控制在 30% ~ 60%,因此,需要继续加入 $(25 \sim 45) \times 10^6$ 的钙,根据读取的钙线操作参数计算出需要的钙线长度为 427 ~ 769 m。由于在实际生产过程中,该钢种需要经过钙处理操作,因此,在“是否为钙处理钢种”处提示“是”,钙线的操作建议为钙线操作范围 427 ~ 769 m 的平均值。



图 6 精准钙处理指导软件的操作界面^[26]

Fig. 6 Operation interface of the guidance software for the precise calcium treatment^[26]

该软件可实现与钢铁生产企业的 Oracle、Access 等数据库的实时交互,可自动读入数据库中的工艺信息,并自动输出结果,并将计算结果写入到数据库中。使用该软件可为实际生产过程的钙处理操作提供实时在线的科学指导,给出量化性建议,避免了生产过程的经验性加钙,减少因人为经验操作而导致的错误或误差,降低企业的生产成本,提高生产效率。

4 精准钙处理指导软件在特殊钢生产中的应用示例

为了验证精准钙处理指导软件预测的准确性,将合金钢实际生产过程钙处理后,钢中夹杂物的平均成分与通过软件计算的夹杂物平均成分进行对比,如图7所示。图7中空心圆为检测到的夹杂物成分投影,五角星为检测到的夹杂物平均成分,实心圆为根据精准钙处理指导软件预测得到的夹杂物平均成分。可以看出,虽然实际检测到的夹杂物成分分布较为分散,但其平均成分与通过精准钙处理指导软件预测的成分较为接近,验证了软件预测结果的准确性。

国内某厂采用精准钙处理指导软件对45Mn钢夹杂物的液态化改性进行了钙处理操作的在线指导。该钢种的钙处理操作过程喂钙线长度一般为300~350 m,目标钙含量为 25×10^{-6} ,喂钙量较高,因此,喂钙过程生成了大量的CaS夹杂物,如图8所示。加钙前夹杂物成分如图8(a)所示,其主要成分为 Al_2O_3 -CaO。将夹杂物的控制目标设置为100%液相区范围,根据精炼精准钙处理在线指导软件的计算结果,将钢中钙含量控制在 $(10 \sim 15) \times 10^{-6}$,喂钙线长度降低至200 m即可以将夹杂物较好的控制在液相区域,根据计算结果进行喂钙线操作。钢液加

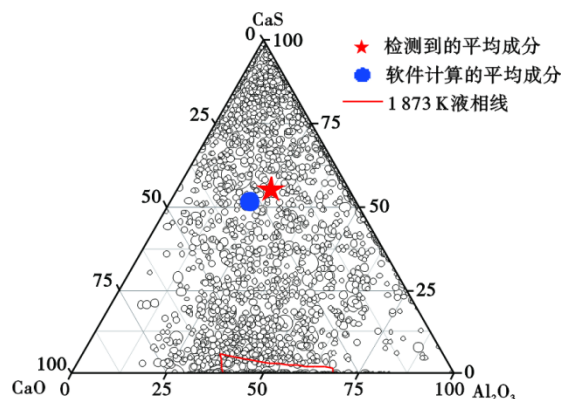


图7 合金钢加钙后钢中夹杂物的成分分布

Fig. 7 Composition distribution of inclusions in a alloy steel after calcium treatment

钙后检测得到的夹杂物成分分布如图8(b)所示,大部分夹杂物都分布在75%液相区范围,夹杂物平均成分接近于100%液相区,说明较好地实现了夹杂物的液态化控制,其中,钙处理后钢中进入精准钙处理指导软件设定的目标成分区的夹杂物比例达到70%以上。目前该精准钙处理在线指导软件已应用于梅钢、中国一重、凌钢、南钢等特钢企业,取得了良好效果。

5 结论

(1)建立了精准钙处理的热力学模型,包括采用Wagner模型计算钢液中组元的活度,采用离子-分子共存理论计算液态夹杂物组元的活度,根据系统自由能最小原理求解热力学平衡,得到钢液成分和夹杂物成分的变化。

(2)建立了神经网络模型,实现了钙处理过程钙收得率的精确预测。

(3)通过自编程开发了具有自主知识产权的钢

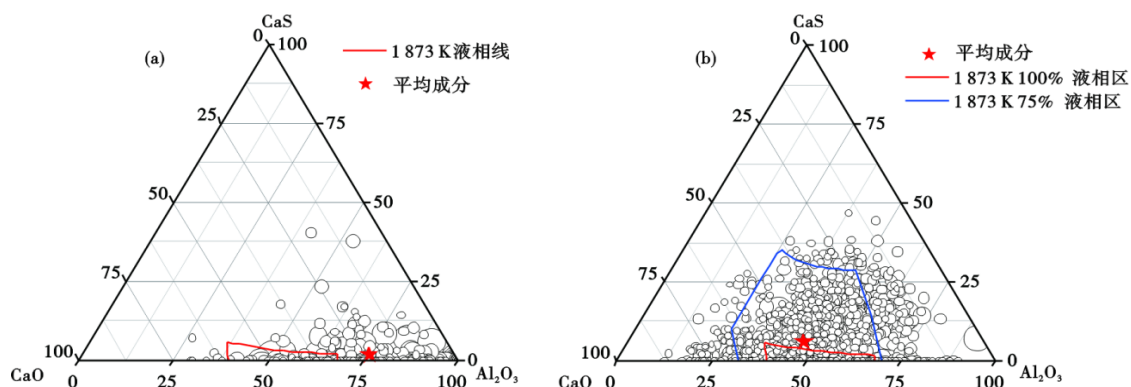


图8 45Mn钢检测得到的夹杂物成分:(a)加钙前,(b)经过精准钙处理软件指导的加钙后

Fig. 8 Detected composition of inclusions in a 45Mn steel : (a) before calcium addition , (b) after calcium addition guided by the precise calcium treatment software

液精准钙处理在线指导软件,可根据每一炉次实际的钢液成分、温度和操作参数,在线计算出合理的喂钙线长度。该指导软件在特殊钢生产中应用效果良好。针对 45Mn 钢进行工业试验,根据精准钙处理软件计算结果,将目标钙含量由应用前的 25×10^{-6} 降低至 $(10 \sim 15) \times 10^{-6}$,喂钙线长度由应用前的 320 ~ 350 m 降低至 200 m,较好的将钢中夹杂物

改性为液态,工业试验结果与计算结果吻合较好。

致谢

本课题得到北方工业大学和燕山大学高钢中心(HSC)、先进制造用高品质钢铁材料开发与智能制造北京市国际科技合作基地(ICSM)和北京科技大学高品质钢研究中心(HQSC)的资助,特此致谢。

参考文献

- [1] Yang W, Wang X H, Zhang L F, et al. Characteristics of alumina-based inclusions in low carbon Al-killed steel under No-stirring condition [J]. *Steel Research International*, 2013, 84 (9) : 878-891.
- [2] Liu S H, Wang X H, Zuo X J, et al. Inclusions, lining materials and nozzle clogging during middle carbon steel billet continuous casting process[J]. *Revue De Métallurgie*, 2008, 105(2): 72-79.
- [3] 吴松杰, 杨文, 张立峰, 等. 钙处理时机对 LF-RH 精炼过程 Al_2O_3 基夹杂物的影响[J]. *中国冶金*, 2022, 32(1): 36-43+51.
- [4] Xi Z B, Li C R, Wang L Z. A kinetic model for the modification of Al_2O_3 inclusions during calcium treatment in high-carbon hard wire steel[J]. *Materials*, 2021, 14(5): 1305.
- [5] Li W F, Wang Y, Wang W J, et al. Dependence of the clogging possibility of the submerged entry nozzle during steel continuous casting process on the liquid fraction of non-metallic inclusions in the molten Al-killed Ca-treated steel[J]. *Metals*, 2020, 10(9) : 1205.
- [6] Lamut J, Falkus J, Jurjavec B, et al. Influence of inclusions modification on nozzle clogging[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2012, 57(1): 319-324.
- [7] 张立峰. 钢中非金属夹杂物几个需要深入研究的课题[J]. *炼钢*, 2016, 32(4): 6-21.
- [8] 张立峰, 李菲, 方文. 钢液钙处理过程中钙加入量精准计算的热力学研究[J]. *炼钢*, 2016, 32(2): 1-8.
- [9] Yang W, Zhang L F, Wang X H, et al. Characteristics of inclusions in low carbon Al-killed steel during ladle furnace refining and calcium treatment [J]. *ISIJ International*, 2013, 53 (8) : 1401-1410.
- [10] Yang G W, Wang X H, Huang F X, et al. Influence of calcium addition on inclusions in LCAK steel with ultralow sulfur content [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2015, 46(1) : 145-154.
- [11] Abdelaziz S, Megahed G, El-Mahallawi I, et al. Control of Ca addition for improved cleanliness of low C, Al killed steel[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2009, 36(6): 432-441.
- [12] Zhang L F, Liu Y, Zhang Y, et al. Transient evolution of nonmetallic inclusions during calcium treatment of molten steel[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018, 49 (4) : 1841-1859.
- [13] 季莎, 张立峰, 罗艳, 等. 钙处理对 20CrMnTiH 齿轮钢中非金属夹杂物的影响[J]. *工程科学学报*, 2021, 43 (6) : 825-834.
- [14] 刘珍童, 杨文, 任英, 等. 铝脱氧钢钙处理效果影响因素分析[J]. *钢铁*, 2020, 55(3): 29-34.
- [15] 王郢, 徐建飞, 何西, 等. 38CrMoAl 钢浇铸过程水口结瘤原因分析及工艺改进[J]. *特殊钢*, 2021, 42(2): 38-41.
- [16] Wu S J, Zhang Y H, Yang W, et al. Effect of types of calcium-containing cored wires on the inclusion modification by calcium treatment [J]. *Steel Research International*, 2022, 93 (9) : 2200264.
- [17] Miao K Y, Nabeel M, Dogan N. Evaluation of calcium treatment on oxide and sulfide inclusions through modification indexes [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2022, 53(5) : 2897-2913.
- [18] Wang L Z, Xi Z B, Li C R. Modification of type B inclusions by calcium treatment in high-carbon hard-wire steel [J]. *Metals*, 2021, 11(5): 676
- [19] 王伟健, 罗艳, 张立峰, 等. 20CrMo 合金钢生产过程中非金属夹杂物的演变[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(8) : 1090-1099.
- [20] 梁娜, 刘永昌, 王升. 汽车零部件用 45Mn2R 硫系易切削钢的开发[J]. *特殊钢*, 2022, 43(5): 51-54.
- [21] 邢佳, 杜晓建, 张欣杰, 等. 喂钙量与软吹氩对 316L 不锈钢中夹杂物的影响[J]. *特殊钢*, 2022, 43(2): 31-35.
- [22] Wang W J, Wang J J, Ren Y, et al. A thermodynamic model to predict the composition of inclusions in Al-killed Ca-treated steels [J]. *Steel Research International*, 2023, 94(7): 2200845.
- [23] Basak S, Kumar Dhal R, Roy G G. Efficacy and recovery of calcium during CaSi cored wire injection in steel melts[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2010, 37(3): 161-168.
- [24] Kumar B, Mishra S, Rao M B V, et al. Experimental investigation of recovery and efficiency of calcium addition through cored wire in steel melt at Visakhapatnam Steel Plant[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2019, 46(5): 454-462.
- [25] Wang W J, Zhang L F, Ren Y, et al. Prediction of calcium yield during calcium treatment process performed in steelmaking using neural network [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2022, 53(1): 1-7.
- [26] Wang W J, Zhang L F. A modified thermodynamic software to control the composition of inclusions during calcium treatment process[C]//Wagstaff S, Anderson A, Sabau AS. TMS Annual Meeting & Exhibition. Cham: Springer, 2023: 135-141.