

20CrMnTi 齿轮钢中夹杂物演变及 钢液洁净度提升研究

李海涛¹, 高放², 李昊哲², 李立凯¹, 张小华¹, 顾超², 包燕平²

(1. 常州东方特钢有限公司, 江苏 常州 213000; 2. 北京科技大学, 钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:以国内某厂 20CrMnTi 齿轮钢为研究对象, 通过全流程取样分析了钢液洁净度提升的限制性环节, 并提出以下两项优化措施: ①基于 FactSage7.2 计算了精炼渣碱度和钙铝比对 CaO 和 Al₂O₃ 活度的影响, 综合考虑渣系的低温液相区, 确定了目标精炼渣系范围: 碱度=4~6, w(SiO₂)=9%~13.5%, w(Al₂O₃)=22.5%~31.5%, w(Fe₂O₃+MnO)<1%; ②基于钙处理过量的现状, 依托热力学数据库搭建了精准钙处理计算模型, 并设计了人机交互界面。工业试验数据显示, 在优化渣系和减少钙处理量的情况下, 冶炼过程中的夹杂物数量显著减少, 铸坯中夹杂物数量比原工艺降低 56.3%。

关键词:20CrMnTi; 齿轮钢; 洁净度提升; 渣系优化; 钙处理

中图分类号: TF777.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)03-0122-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.03.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Research on the evolution of inclusions in 20CrMnTi gear steel and the improvement of steel liquid cleanliness

LI Haitao¹, GAO Fang², LI Haozhe², LI Likai¹, ZHANG Xiaohua¹, GU Chao², BAO Yanping²

(1. Eastran Special Steel Co., Ltd., Changzhou 213000, Jiangsu, China; 2. State key Lab of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In this work, taking a domestic factory's 20CrMnTi gear steel as the research object, the limiting factors for improving the cleanliness of the steel liquid were analyzed through systematic sampling, and two optimization measures were proposed. Firstly, based on FactSage7.2, the effects of refining slag basicity and calcium aluminum ratio on CaO and Al₂O₃ activity were calculated. Taking into account the low-temperature liquid phase region of the slag system, the target refining slag system range was determined as follows: R=4-6, w(SiO₂)=9%-13.5%, w(Al₂O₃)=22.5%-31.5%, and w(Fe₂O₃+MnO)<1%. Then, based on the current situation of excessive Ca-treatment, a thermodynamic database had been utilized to construct an accurate calculation model for Ca-treatment. Finally, the results of industrial experiments showed that with the optimization of the refining slag and the reduction of Ca-treatment, the number of inclusions in the smelting process significantly reduced, and the number of inclusions in the casting billet decreased by 56.3% compared to the original process.

Key words: 20CrMnTi, gear steel, improvement of cleanliness, optimization of slag system, Ca-treatment

0 引言

齿轮钢主要应用于汽车、工程机械及机械制造业的传动部件^[1]。齿轮钢中的非金属夹杂物会严重破坏钢基体的连续性, 从而对传动部件的塑形、韧性以及抗疲劳性能等产生严重危害^[2-4]。因此, 考虑到其服役环境的特殊性, 下游用户对于齿轮钢中非金属夹杂物的控制水平具有较高要求。目前, 国内 20CrMnTi 系列齿轮钢产量占渗碳齿轮钢的 70% 左右^[5], 其生产主要采用 Al 脱氧工艺, 脱氧产物 Al₂O₃ 属于高熔点、高硬度类夹杂。尽管脱氧产生的铝系夹杂物大部分上浮进入精炼渣中, 但仍有部分夹杂物残留在钢液中, 不仅对钢材的力学性能产生不利影响, 还易在水口沉积导致水口堵塞。

作为脱氧产物, 夹杂物的产生不可避免, 精炼渣在吸附夹杂物方面具有非常重要的作用, 因此提升精炼渣对夹杂物的吸附能力是改善钢液洁净度的有效手段。很多学者^[6-15] 针对精炼渣的成分优化开展研究, 刘成松^[7] 等利用热力学软件计算了 1 873 K 下 CaO-SiO₂-Al₂O₃-5%MgO 系精炼渣与钢液平衡时的等 [O] 线、等 [S] 线, 获得了最优精炼渣成分范围。王旭^[10] 等人通过调整精炼渣系的 CaO/Al₂O₃ 值, 使渣系脱硫率提高, 熔化温度降低, 钢中氧含量降低。林路^[13] 等着重探讨了精炼渣碱度、CaO/Al₂O₃、MI 指数对其吸附能力的影响, 最终得到目标精炼渣系, 使铸坯中全氧含量平均降低 0.000 3%。

为解决铝镇静钢中的水口堵塞的问题, 钙处理

技术得以快速发展, 因为钙元素能够变性 Al₂O₃ 形成具有较低熔点和良好塑性的钙铝酸盐。但是, 钙添加量不足或过剩皆对钢材具有不利影响, 很多学者^[16-29] 围绕钙处理的合理区间开展研究。刘坤龙^[23] 等通过热力学平衡模型计算了铝镇静钢钙处理钢液中 S-Ca、Al-Ca 及 Al-S 反应平衡曲线, 结果表明当钢液中 w([Al]) 为 0.007 5% 时, w([Ca]) 和 w([S]) 分别控制在 0.000 62%~0.001 9%, 0.001 6%~0.005 1% 范围内有利于生成理想液态产物 C₁₂A₇。贾涛^[25] 等进行了高喂钙量、中喂钙量以及低喂钙量对高强钢中非金属夹杂物改性效果的工业试验, 结果表明不同钢液成分对钢中非金属夹杂物的液态窗口以及 CaS、CaO 的生成影响较大, 适当的钙处理对钢中夹杂物改性效果最好。王伟健^[26] 等针对钙处理过程中钙收得率低、钙处理效果不稳定等难点, 建立了精准钙处理模型, 开发了精准钙处理指导软件。

因此, 为提高国内某厂 20CrMnTi 齿轮钢钢液洁净度, 笔者通过全流程取样分析了钢液洁净度提升的限制性环节, 并从精炼渣调整和精准钙处理两个方向开展了优化研究。

1 试验方法

1.1 试验钢成分

以国内某厂生产的 20CrMnTi 齿轮钢为研究对象。试验钢除 Fe 元素外, 其他合金元素含量要求如表 1 所示。

表 1 20CrMnTi 齿轮钢的化学成分
Table 1 Chemical Compositions of 20CrMnTi Gear Steel

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Al
标准	0.17~0.23	0.17~0.37	0.80~1.10	≤0.03	≤0.03	1.00~1.30	0.04~0.10	0.015~0.035
内控	0.18~0.20	0.19~0.26	0.87~0.93	≤0.02	≤0.02	1.02~1.08	0.05~0.08	0.020~0.030

1.2 试验方法

20CrMnTi 齿轮钢的生产工艺流程为转炉→LF 炉→连铸。为系统评估齿轮钢冶炼过程中钢液洁净度的变化, 对该钢种进行了系统取样, 其中取样的节点、编号和方法如图 1 所示。

转炉冶炼终点钢液仍呈现沸腾状态, 无法取得提桶样, 但是用定氧仪对钢液进行了定氧。在转炉后脱氧合金化结束(B-2)、LF 进站(L-1)、LF 白渣形成后(L-2)、LF 喂钙线前(L-3)及 LF 吊包前(L-4)

等节点取到了提桶样和渣样。在中间包(T-1)内取到了提桶样。在铸坯(P-1)上取到了对应炉次的钢样。

采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)对渣样成分进行检测; 使用惰性气体熔融红外吸收法检测钢中氧、氮含量; 采用 ASPEX 自动扫描电镜对 10 mm×10 mm×10 mm 规格的金相样进行夹杂物统计, 扫描面积为 25 mm²; 采用 SEM+EDS 观察金相样上夹杂物的形貌。

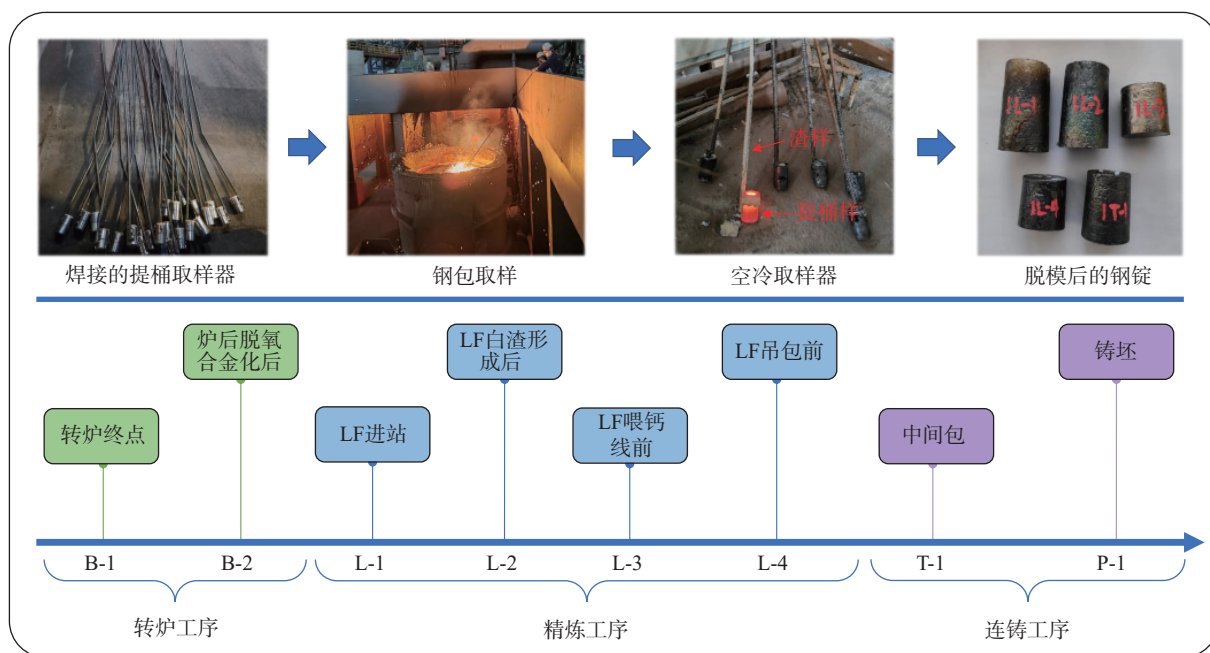


图 1 取样节点以及取样方式
 Fig. 1 Sampling nodes and sampling methods

2 结果与讨论

2.1 冶炼过程中的夹杂物演变规律

2.1.1 钢中氧、氮含量的变化

钢中全氧含量可从整体上表征钢液洁净度水平, 20CrMnTi 齿轮钢氧、氮含量变化如图 2 所示。

由图 2(a)可知, 转炉冶炼结束钢中全氧含量最

高, LF 精炼结束之后, 钢中全氧含量降至最低。钢液流经中包进入结晶器时, 发生了轻微的二次氧化, 最终铸坯中全氧含量控制在 18×10^{-6} 。由图 2(b)可知, 与钢中全氧含量相比, 钢中氮含量呈现相反的趋势, 随着冶炼的进行钢中氮含量不断增加, 最终铸坯中氮含量控制在 77×10^{-6} 。

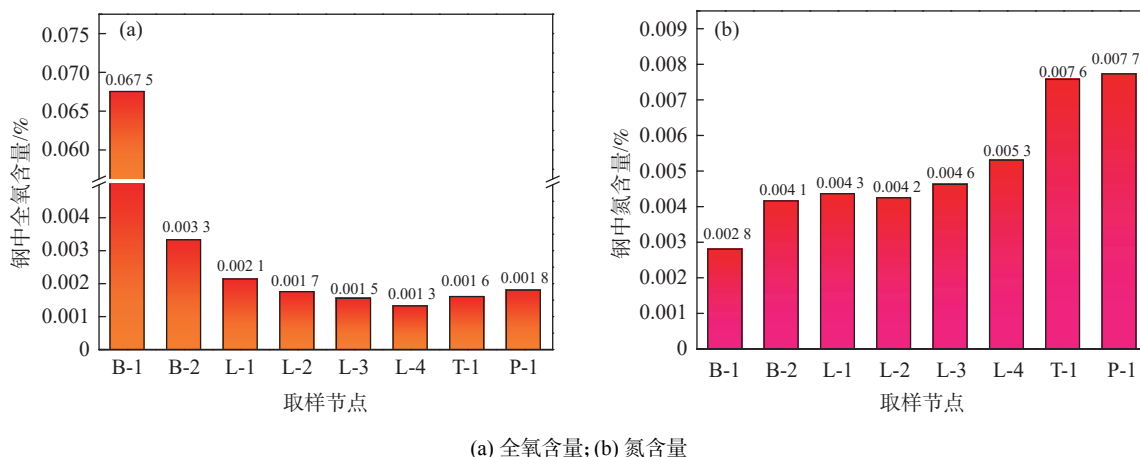


图 2 冶炼过程中氧、氮含量变化
 Fig. 2 Changes in oxygen and nitrogen content during smelting process

2.1.2 钢中夹杂物演变规律研究

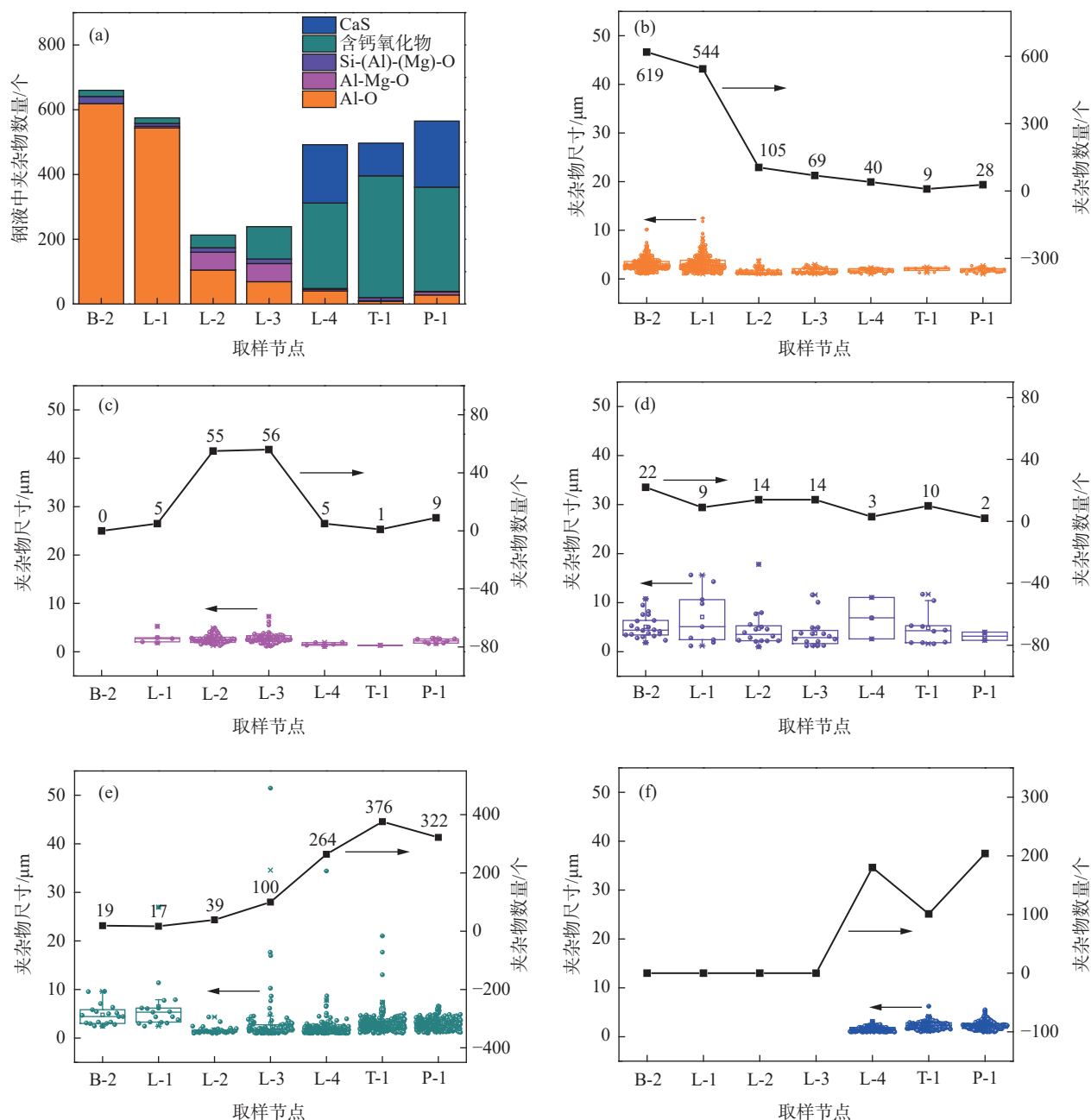
为掌握 20CrMnTi 冶炼过程中夹杂物的演变规律, 基于 ASPEX 自动扫描数据, 探究了冶炼过程中夹杂物类型、尺寸的变化情况。鉴于硫化锰和碳氮化钛等析出物仅在铸坯凝固过程中产生, 析出物未

纳入统计, 其结果如图 3 所示。

由图 (3) 可知, 夹杂物演变规律可被归纳为: $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}-(\text{Mg})-\text{O} \rightarrow \text{Ca}-(\text{Mg})-\text{Al}-\text{O} \rightarrow \text{CaS}-(\text{Ca}-\text{Mg}-\text{Al}-\text{O})$ 。在整个冶炼过程中, 夹杂物数量变化存在两个显著节点: ①LF 进站后, 钢中夹杂物显著减少;

②钙处理后,钢液中的夹杂物显著增加。LF 进站后,钢中因脱氧产生夹杂物大部分进入渣中,因此夹杂物数量骤减。钙处理后,夹杂物数量显著增加则是

因为钙处理过量,产生大量的 CaS 类夹杂,恶化钢液洁净度。



(a) 夹杂物数量堆积直方图; (b) Al-O 类夹杂数量及尺寸分布; (c) Al-Mg-O 类夹杂数量及尺寸分布; (d) Si-(Al)-(Mg)-O 类夹杂数量及尺寸分布; (e) 含 Ca 氧化物数量及尺寸分布; (f) CaS 数量及尺寸分布

图3 夹杂物类型及数量变化
Fig. 3 Changes in types and quantities of inclusions

2.2 精炼渣系的优化研究

2.2.1 精炼渣成分

为探究冶炼过程精炼渣成分的变化,通过 XRF 对所取过程渣样进行检测,其主要氧化物成分如表 2 所示。

表 2 精炼过程渣样化学成分

Table 2 Main components of refining process slag %

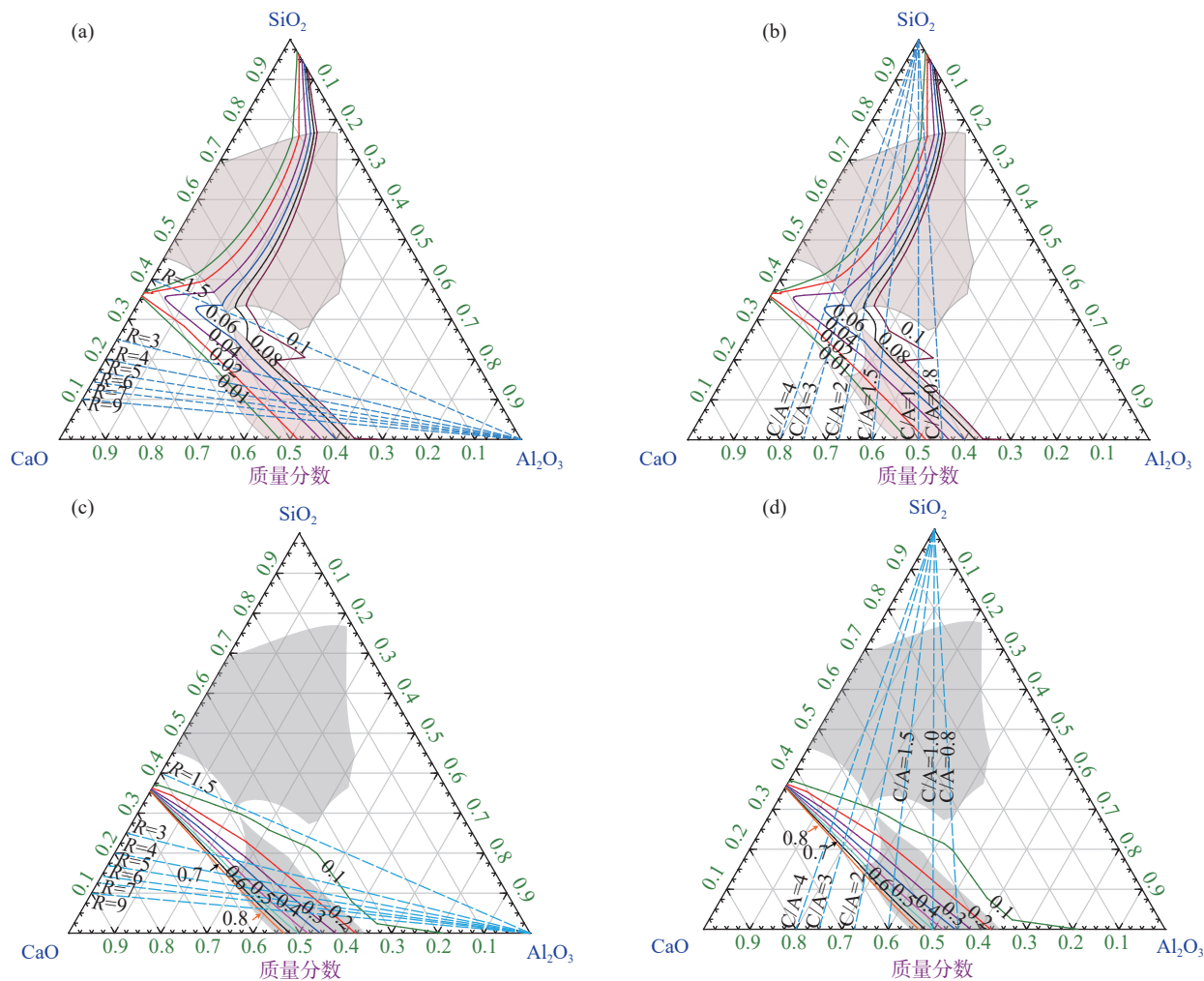
节点	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	R= CaO/ SiO ₂
LF进站时	54.85	16.08	18.36	5.29	1.41	0.92	3.41
LF白渣后	55.76	15.68	19.36	5.31	1.21	0.53	3.55
LF喂线前	56.68	15.11	19.21	5.01	0.92	0.15	3.75
LF吊包前	56.27	15.05	18.04	4.71	0.83	0.1	3.73

由表 2 可知,该厂精炼渣是以 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ 为主的多元渣系。转炉炉后加入造渣料,到 LF 进站时精炼渣已经初步形成,随着冶炼进行,渣中各组元成分含量呈现波动性变化,波动范围不大。

2.2.2 精炼渣的理论计算

精炼渣的熔点直接影响化渣速度,低熔点的精炼渣有利于尽早化渣,为夹杂物吸附提供有利的动力学条件,在相图中,一般认为熔点 $\leq 1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ 的区

域为低温液相区^[13]。铝脱氧产物进入渣中与 CaO 形成钙铝酸盐,因此降低渣中 Al_2O_3 的活度或提高 CaO 的活度皆有助于提高其对铝系夹杂的吸附能力。笔者采用 FactSage7.2 软件计算了 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-5\%MgO}$ 多元渣系的低温液相区以及 CaO 和 Al_2O_3 的等活度线,并在此基础上探讨了碱度和 C/A 等参数对渣系吸附 Al_2O_3 能力的影响,具体如图 4 所示。



(a) 碱度对 Al_2O_3 活度的影响; (b) C/A 对 Al_2O_3 活度的影响; (c) 碱度对 CaO 活度的影响; (d) C/A 对 CaO 活度的影响

图 4 碱度和 C/A 对 Al_2O_3 和 CaO 活度的影响

Fig. 4 Effects of basicity and C/A on the activities of Al_2O_3 and CaO

由图 4 可知,相图上的低温液相区分别落于低碱度区和高碱度、高 Al_2O_3 区,因脱硫需求,该厂采用高碱度、高 Al_2O_3 渣系。据图 4(a)和 4(c)可知,随着碱度的增加,渣中 Al_2O_3 活度降低, CaO 活度增加。因此,提高碱度有利于提升精炼渣对 Al_2O_3 的吸附能力,但碱度越高,熔渣的熔点越高。综合来看,当精炼渣碱度控制在 4~6 时较为合理,有利于其对 Al_2O_3 夹杂的吸附。

由图 4(b)(d)可知,随着 C/A 的增加,渣中 Al_2O_3 的活度降低, CaO 的活度增加,有利于提高渣系吸附夹杂的能力。然而当 $\text{C/A} > 2$ 时,该区域已经超出了低温液相区,渣系熔点偏高。因此, C/A 控制在 1~2 时较为合理。有研究^[13]发现当渣中 C/A 从 2~4.4 降至 1.2~2.0 时,可有效降低钢中全氧含量,这与笔者的研究结果相吻合。

2.2.3 精炼渣系的优化方案

将表 2 中的过程渣成分数据映射到三元相图上发现, 无论是初渣、过程渣还是终渣, 其在相图中皆位于低温液相区外, 说明原渣系熔点偏高, 如图 5 所示。

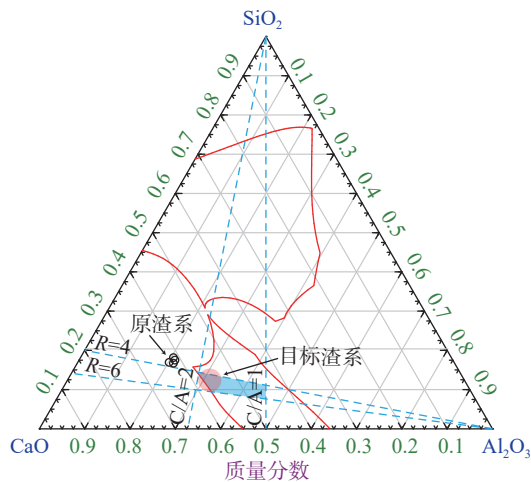
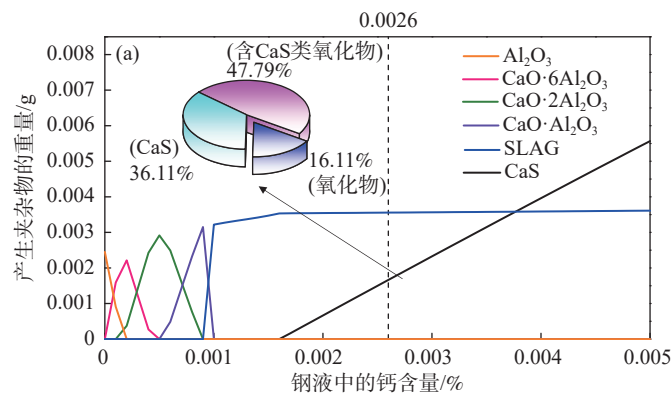


图 5 精炼渣系的优化方案
Fig. 5 Optimization plan for refining slag



综合考虑精炼渣熔点、碱度和 C/A, 确定了目标渣系区域, 见图 5 中红色圆形标注区, 其具体参数范围为: 碱度 4~6; 渣中 SiO₂ 含量 10%~15%; 渣中 Al₂O₃ 含量 25%~35%。此外为了保证炉渣的还原性, 渣中(FeO+MnO)小于 1%。考虑到实际精炼渣中 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三种组元成分总占比 90% 左右, 修正实际渣中 SiO₂ 含量范围为 9%~13.5%, 渣中 Al₂O₃ 含量为 22.5%~31.5%。

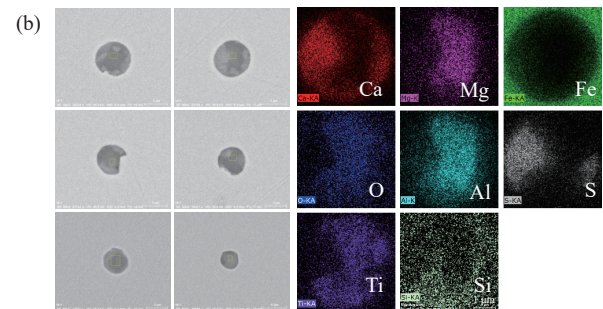
2.3 钙处理对钢液洁净度的影响

2.3.1 钙处理现状分析

基于该厂实际生产数据, 通过 FactSage7.2 软件进行热力学计算, 计算不同钙处理量对钢液中夹杂物类型的影响。计算条件如表 3 所示, 计算结果如图 6 所示。

表 3 钢液化学成分和温度

化学成分/%								T/℃
C	Si	Mn	P	S	O	Al	Fe	
0.19	0.24	0.9	0.015	0.006	0.001 5	0.015		1 580



(a) 钙处理液态窗口区; (b) CaS 类夹杂物形貌
图 6 钙处理的液态窗口区
Fig. 6 Liquid window zone of Ca-treatment

由图 6 可知, 钙处理的“液态窗口”区所对应的 Ca 含量范围是 $10 \times 10^{-6} \sim 16.5 \times 10^{-6}$, 而在该厂铸坯中检测的钙含量为 26×10^{-6} , 过量的 Ca 导致了大量 CaS 类夹杂产生, 这一点在图 3(f) 中得以印证, 说明该厂钙处理存在过量的情况。

由图 6(b) 可知, 含 CaS 类氧化物多呈球形, 此类夹杂物大多是以氧化物夹杂物为核心, 在外围包裹 CaS 形成。不同夹杂物中 CaS 占比不同, 这与其析出时形核中心的大小有关。当以小尺寸氧化物为形核中心时, 夹杂物呈现以 CaS 为主体的形态。当以较大尺寸氧化物为形核中心时, CaS 与氧化物质量占比相差不大。当以大尺寸氧化物为形核中心时 CaS 质量占比低, 仅在其外围覆盖较薄的一层。

2.3.2 钙处理量的影响因素分析

钙处理量受很多因素的影响, 笔者计算了钢液中 O、Al、S 含量以及钢液温度对钙处理液态窗口区的影响。计算条件见表 3, 计算结果如图 7 所示。

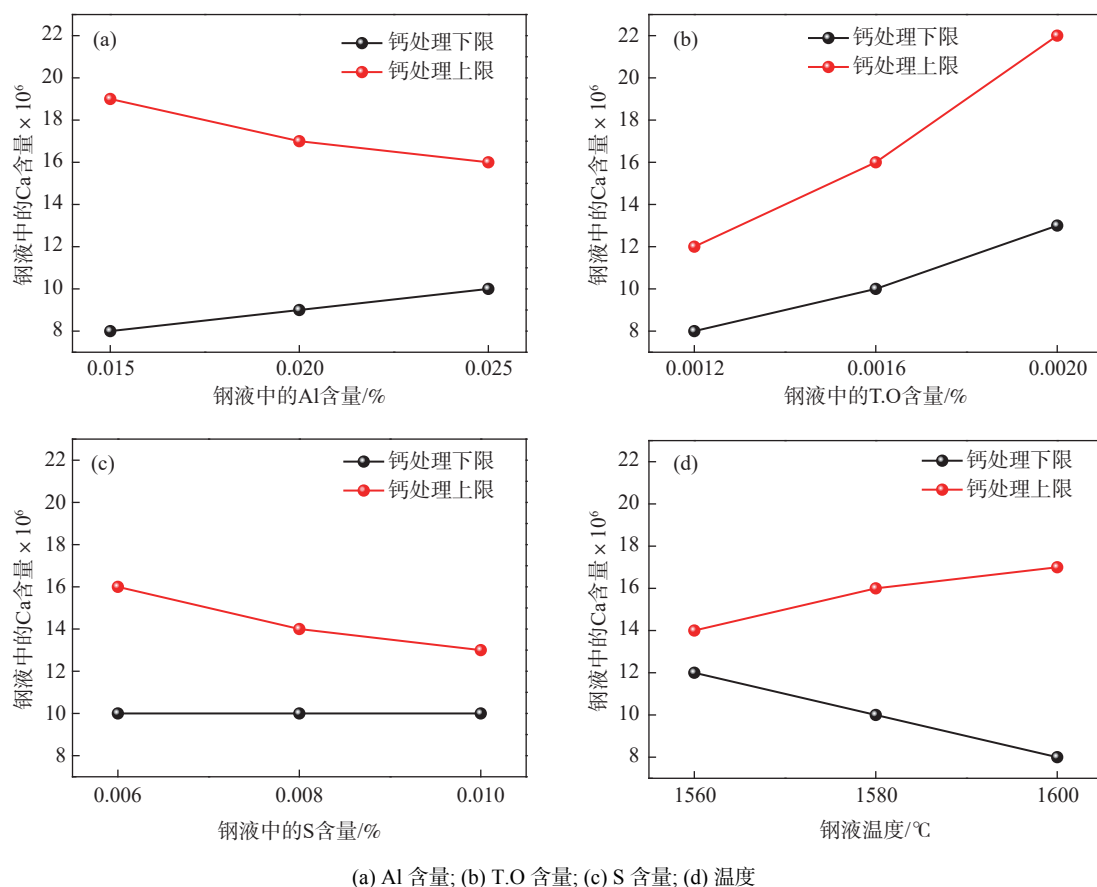
据图 7 可知, 钢液成分和温度的改变会影响钙处理液态窗口区的上限值和下限值, 导致窗口区的范围产生波动。因此, 在实际生产中, 鉴于每炉钢液成分存在差异性, 需要建立动态的精准钙处理模型来指导生产。

2.3.3 精准钙处理模型的搭建

模型的搭建具体分为以下几个步骤: ① 通过 FactSage7.2 建立液态窗口区的数据库; ② 建立精准

钙处理数学机理模型;③通过 Matlab 将数学模型编译成人机交互界面。界面模型主要由钢液成分、

工艺参数、钙线参数以及计算结果四部分组成,如图 8 所示。



(a) Al 含量; (b) T.O 含量; (c) S 含量; (d) 温度

图 7 钢液条件对钙处理液态窗口区界限值的影响

Fig. 7 The influence of steel liquid conditions on the liquid window zone of Ca-treatment

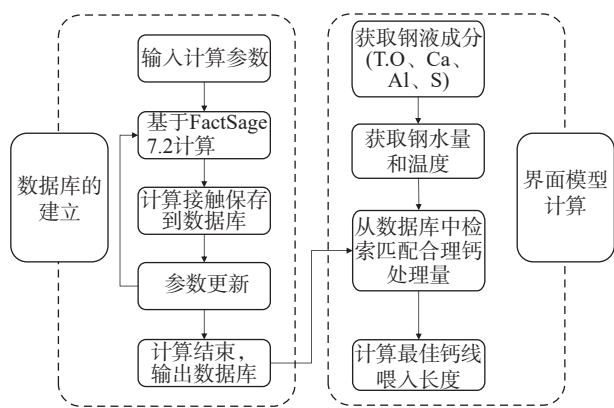


图 8 模型搭建和计算思路

Fig. 8 The logic of model construction and calculation

在实际应用过程中,通过取样和测温获取钢液成分和温度等数据,录入界面模型后可计算目标钙线喂入长度。

2.4 工业试验与效果

2.4.1 试验前后数据统计

基于渣系优化方案和精准钙处理模型进行工业试验,其中渣样成分以及钙线喂入量如表 4 所示。

由表 4 可知,原工艺精炼渣碱度在 3.5 左右, Al_2O_3 含量在 18% 左右, C/A 在 3 左右,钙线喂入长度为 130 m。新工艺精炼渣碱度在 5 左右, Al_2O_3 含量在 25% 左右, C/A 在 2 左右,钙线喂入量降低到 80 m。

表 4 工艺优化前后渣样成分及钙线喂入量

Table 4 Compositions of slag samples and length of calcium wire added before and after process optimization

工艺	节点	化学成分/%							钙线喂入量/m
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	$R = \text{CaO} / \text{SiO}_2$	
原工艺	LF进站渣	54.85	16.08	18.36	5.29	1.41	0.92	3.41	130
	LF出站渣	56.27	15.05	18.04	4.71	0.83	0.1	3.73	
新工艺	LF进站渣	54.16	9.55	27.59	3.84	1.70	1.44	5.67	80
	LF出站渣	55.81	12.51	23.2	2.72	0.65	0.11	4.46	

2.4.2 钢中夹杂物数量统计

为探究钢液洁净度的提升效果,对优化后的工艺进行取样,各取样节点试样夹杂物数量情况如图9所示。

由图9可知,两工艺各节点钢中夹杂物数量皆呈现先降低后增加的趋势,钙处理后,夹杂物数量显著增加。在钙处理后,受限于扩散动力学,钢液中会出现“贫钙区”和“富钙区”,“富钙区”钢液内因钙含量较高会产生CaS类夹杂。此外,随着钢液温度降低,也会有部分CaS析出。二次氧化也是导致夹杂物数量回增的重要原因,如图2所示,钢中全氧呈现先降低后增加的趋势,说明在钢液发生了轻微的二次氧化。

对比工艺优化前后各取样节点钢液中夹杂物数量可知,在渣系和钙处理优化的共同作用下,钢液中的夹杂物数量显著减少。钙处理在L-3和L-4节点之间进行,钙处理之前,优化工艺与原工艺相比,夹

杂物数量显著降低,这说明渣系的调整在吸附Al系夹杂方面体现出了显著优势性。钙处理之后,优化工艺与原工艺相比,CaS类和含CaS类氧化物夹杂物数量显著减少,见图10(a),同样说明钙处理优化在减少夹杂物方面的作用。

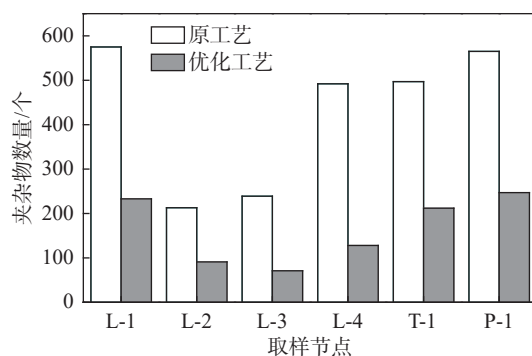


图9 冶炼过程中各节点夹杂物数量变化
Fig. 9 Changes in the number of inclusions during the smelting process

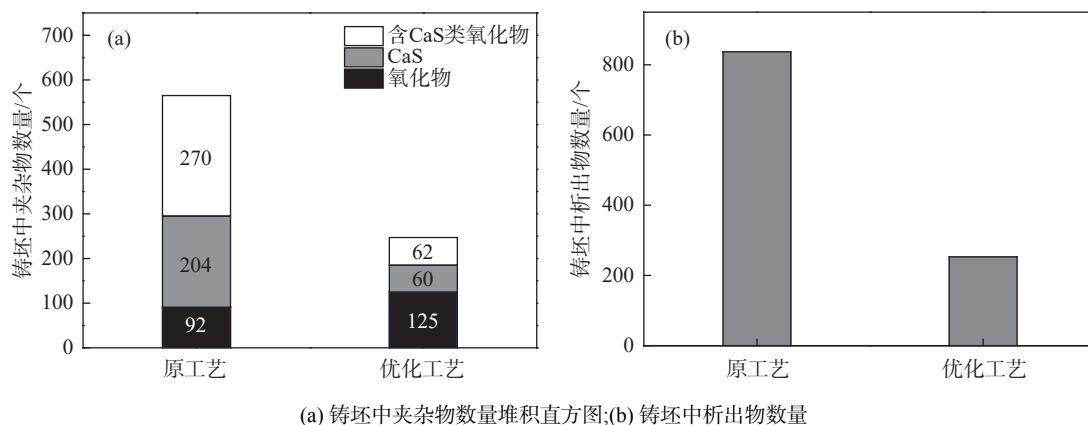


图10 铸坯中夹杂物和析出物数量对比
Fig. 10 Comparison of the number of inclusions and precipitates in the cast billet

如图10(a)所示,在25 mm²的扫描面积内,原工艺铸坯内含有夹杂物566个,工艺优化后,铸坯中夹杂物总数降至247个,铸坯中夹杂物数量降低56.3%。除了遗传自钢液中的夹杂物,在铸坯凝固过程中还产生了大量以硫化锰和碳氮化钛为代表的析出物。如图10(b)所示,与原工艺相比,优化工艺铸坯中析出物数量显著降低。影响析出物产生的原因很多,包括元素浓度、冷却速度以及形核质点数量等,工业数据显示,优化工艺铸坯中夹杂数量显著降低,导致析出物产生过程中具有更少的形核质点,这是析出物减少的原因之一。然而,考虑到影响析出物产生的诸多因素,此研究在工业试验中又未进行严格的变量控制,对铸坯中析出物数量明显降低的原因仍需进一步探索,这将是笔者后续工作的重点。

3 结论

通过对20CrMnTi齿轮钢的系统取样,准确聚焦了其生产工艺中钢液洁净度提升的限制性环节,并提出了优化措施,取得了显著效果。具体得出以下几点结论:

1) 铝脱氧20CrMnTi齿轮钢冶炼过程中夹杂物的演变规律为: $Al_2O_3 \rightarrow Al-(Mg)-O \rightarrow Ca-Al-(Mg)-O \rightarrow CaS-(Ca-Mg-Al-O)$ 。钢中夹杂物数量在精炼过程中呈现先降低后增加的趋势,尤其是在钙处理后,夹杂物数量增加显著。

2) 为提高精炼渣吸附夹杂的能力,基于热力学计算结果,综合考虑炉渣熔点、碱度和C/A,确定了目标精炼渣系范围:碱度=4~6, $w(SiO_2)=9\% \sim$

13.5%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 22.5\% \sim 31.5\%$, $w(\text{FeO}+\text{MnO}) < 1\%$ 。

3) 根据热力学计算定量化阐述了钢液成分和温度变化对钙处理液态窗口区的影响, 提出并建立了精准钙处理计算模型, 并编译成人机交互界面, 为

现场提供精确指导。

4) 通过优化渣系和减少钙处理量, 优化工艺冶炼过程中各节点夹杂物数量显著降低, 铸坯中夹杂物总数降低 56.3%, 其中 CaS 和含 CaS 类氧化物夹杂数量减少最为显著。

参考文献

- [1] LIN P. Smelting and production quality study of high quality gear steel with BOF process[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2010.
(林平. 转炉生产高品质齿轮钢冶炼工艺与产品质量研究[D]. 东北大学, 2010.)
- [2] ZHAO P L, HAN W X, YANG Z J, *et al.* Effect of inclusions on impact toughness of H-shaped steel for marine engineering[J]. China Metallurgy, 2020, 30(2): 74-78.
(赵培林, 韩文习, 杨志杰, 等. 夹杂物对海工用 H 型钢冲击韧性影响及分析[J]. 中国冶金, 2020, 30(2): 74-78.)
- [3] GUAN Z, SUN Y Q, LI L, *et al.* Effects of smelting process on fatigue performance of 15-5PH stainless steel[J]. Iron and Steel, 2020, 55(1): 72-80.
(管真, 孙永庆, 李莉, 等. 冶炼工艺对 15-5PH 不锈钢疲劳性能的影响[J]. 钢铁, 2020, 55(1): 72-80.)
- [4] AN J, WANG Z, LI R X, *et al.* Cleanliness of automobile gear steel 8620RH[J]. China Metallurgy, 2016, 26(9): 33-37.
(安杰, 王哲, 李润霞, 等. 汽车齿轮钢 8620RH 的洁净度[J]. 中国冶金, 2016, 26(9): 33-37.)
- [5] JU Y J, LÜ Z Y, XING L D, *et al.* Evolution analysis of inclusions in the whole process of 20CrMnTiH smelting[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2022, 13(4): 20-27.
(巨银军, 吕子宇, 邢立东, 等. 20CrMnTiH 冶炼全流程夹杂物演变分析[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(4): 20-27.)
- [6] ZHAO D W, BAO Y P, WANG M, *et al.* Composition optimization of LF refining slag in high cleanliness Al-killed steel[J]. Steelmaking, 2013, 29(2): 9-13.
(赵东伟, 包燕平, 王敏, 等. 高洁净度铝镇静钢 LF 精炼渣成分优化[J]. 炼钢, 2013, 29(2): 9-13.)
- [7] LIU C S, HOU S W, LIU X Q, *et al.* Optimization of refining slag for 30Cr1Mo1V steam turbine rotor steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(10): 1098-1107.
(刘成松, 侯松威, 刘晓芹, 等. 30Cr1Mo1V 汽轮机转子钢的精炼渣优化[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(10): 1098-1107.)
- [8] ZHAO B, WU W, YANG F, *et al.* Thermodynamic analysis and performance optimization of refining slag containing lanthanum oxide[J]. China Metallurgy, 2023, 33(7): 31-39.
(赵博, 吴伟, 杨峰, 等. 含氧化镧精炼渣的热力学分析及性能优化[J]. 中国冶金, 2023, 33(7): 31-39.)
- [9] CHENG R J, QI Z, ZHANG H, *et al.* Optimization of refining slag of 20SiMn alloy structural steel[J]. Iron and Steel, 2023, 58(1): 100-107, 152.
(成日金, 齐詹, 张华, 等. 20SiMn 合金结构钢精炼渣系优化[J]. 钢铁, 2023, 58(1): 100-107, 152.)
- [10] WANG X, WEI J, QIU S T, *et al.* Optimization of CaO/ Al_2O_3 ratio in refining slag for 12Mn steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(3): 122-127.
(王旭, 魏军, 仇圣桃, 等. 12Mn 钢精炼渣 CaO/ Al_2O_3 值优化[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3): 122-127.)
- [11] XU G F, ZHANG X L, YANG S F, *et al.* Inclusion characterization in whole smelting process of 20CrMnTi gear steel[J]. China Metallurgy, 2020, 30(11): 23-28.
(许国方, 张雪良, 杨树峰, 等. 20CrMnTi 齿轮钢冶炼全流程的夹杂物分析[J]. 中国冶金, 2020, 30(11): 23-28.)
- [12] WU H Q, LIN L, GU C. Optimization and industrial tests of LF refining slag for gear steel(8620H)[J]. China Metallurgy, 2016, 26(8): 32-38.
(吴辉强, 林路, 顾超. 齿轮钢 (8620H) 精炼渣优化及工业试验[J]. 中国冶金, 2016, 26(8): 32-38.)
- [13] LIN L, GU C, BAO Y P, *et al.* Optimization of LF refining slag of 20CrMnTi gear steel[J]. Steelmaking, 2017, 33(2): 15-19.
(林路, 顾超, 包燕平, 等. 20CrMnTi 齿轮钢 LF 精炼渣优化[J]. 炼钢, 2017, 33(2): 15-19.)
- [14] LIU J, AN J, TIAN W Y, *et al.* Production practice on improving cleanliness of gear steel 8620RH[J]. Industrial Heating, 2023, 52(12): 7-10.
(柳军, 安杰, 田万原, 等. 改善齿轮钢 8620RH 洁净度的生产实践[J]. 工业加热, 2023, 52(12): 7-10.)

- [15] ZENG Y X. Cleanness control of sulfur bearing gear steel 20CrMnTiH[J]. Iron and Steel, 2021, 56(2): 76-81.
(曾耀先. 含硫齿轮钢 20CrMnTiH 洁净度控制[J]. 钢铁, 2021, 56(2): 76-81.)
- [16] JI S, ZHANG L F, LUO Y, *et al.* Effect of calcium treatment on nonmetallic inclusions in 20CrMnTiH gear steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 825-834.
(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.)
- [17] WU H J, LU P Y, YUE F, *et al.* Effect of calcium treatment on sulfide inclusions in steel with medium sulphur content[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(S1): 230-234.
(吴华杰, 陆鹏雁, 岳峰, 等. 钙处理对中硫含量钢中硫化物形态影响的试验研究[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(S1): 230-234.)
- [18] CAI X F, BAO Y P, LIN L. Evolution of inclusions during calcium treatment in liquid steel and its thermodynamic analysis[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(S1): 32-36.
(蔡小锋, 包燕平, 林路. 钙处理过程夹杂物演变及热力学分析[J]. 工程科学学报, 2016, 38(S1): 32-36.)
- [19] WANG H, LI J, SHI C B, *et al.* Evolution of inclusions in calcium-treated H13 die steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(S1): 11-18.
(王昊, 李晶, 史成斌, 等. 钙处理 H13 钢中夹杂物的转变[J]. 工程科学学报, 2018, 40(S1): 11-18.)
- [20] BAI X, SUN Y, CHEN R, *et al.* Formation and thermodynamics of CaS-bearing inclusions during Ca treatment in oil casting steels[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2019, 26: 573-587.
- [21] GOLLAPALLI V, RAO M B V, KARAMCHED P S, *et al.* Modification of oxide inclusions in calcium-treated Al-killed high sulphur steels[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2019, 46(7): 663-670.
- [22] ZHANG L F, LI F, FANG W. Thermodynamic investigation for the accurate calcium addition during calcium treatment of molten steels[J]. Steelmaking, 2016, 32(2): 1-8.
(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.)
- [23] LIU K L, LÜ M, SONG B M, *et al.* Q355B aluminum calming steel inclusion evolution and calcium treatment process optimization[J]. Iron and Steel, 2022, 57(12): 79-87.
(刘坤龙, 吕明, 宋保民, 等. Q355B 铝镇静钢夹杂物演变及钙处理工艺优化[J]. 钢铁, 2022, 57(12): 79-87.)
- [24] LONG H, QIU W S, LIU D, *et al.* Mechanism of ZrO₂ containing nozzle clogging in continuous casting of calcium treated aluminum killed steel[J]. Continuous Casting, 2024(1): 38-45.
(龙鹤, 丘文生, 刘栋, 等. 钙处理铝镇静钢连铸锆质水口堵塞机理分析[J]. 连铸, 2024(1): 38-45.)
- [25] JIA T, WANG W J, REN Y, *et al.* Effect of calcium addition amount on the modification of non-metallic inclusions in high-strength steel[J]. Continuous Casting, 2024, (3): 32-40.
(贾涛, 王伟健, 任英, 等. 喂钙量对高强度钢中非金属夹杂物的改性影响[J]. 连铸, 2024, (03): 32-40.)
- [26] WANG W J, YANG W, REN Y, *et al.* Development of the guidance software of precise calcium treatment and its application in special steel production[J]. Special Steel, 2023, 44(6): 25-30.
(王伟健, 杨文, 任英, 等. 精准钙处理指导软件开发及在特殊钢生产中的应用[J]. 特殊钢, 2023, 44(6): 25-30.)
- [27] LI X, WU H J, LIU W, *et al.* Practice and analysis of light calcium treatment of 55Cr3 aluminum deoxidized spring steel[J]. Special Steel, 2023, 44(4): 49-53.
(李学, 吴华杰, 刘维, 等. 铝脱氧 55Cr3 弹簧钢轻钙处理的实践与分析[J]. 特殊钢, 2023, 44(4): 49-53.)
- [28] DENG Z Y, ZHU M Y. Discussion on calcium treatment technology for clean steel refining[J]. Iron and Steel, 2023, 58(9): 104-115, 147.
(邓志银, 朱苗勇. 洁净钢精炼钙处理技术探析[J]. 钢铁, 2023, 58(9): 104-115, 147.)
- [29] ZHANG Y Q, CHENG G G, Li Y, *et al.* Characteristics and distribution of sulfide in calcium treated resulfurized steel at home and abroad[J]. China Metallurgy, 2023, 33(2): 65-72.
(张友祺, 成国光, 李尧, 等. 国内外钙处理含硫钢中硫化物的特征和分布[J]. 中国冶金, 2023, 33(2): 65-72.)