



铝脱氧55Cr3弹簧钢轻钙处理的实践与分析

李学¹, 吴华杰¹, 刘维¹, 孙彦辉¹, 李明^{1,2}

(1 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083; 2 南京钢铁股份有限公司研究院, 南京 210035)

摘要:为改善铝脱氧55Cr3弹簧钢连铸过程水口结瘤和连浇性差问题,讨论了不同钙线加入量时夹杂物的演变规律并开展工业试验。结果表明,将55Cr3钢的喂钙线长度由100 m减少到50 m的轻钙处理,钢液中钙含量控制到0.001 7%左右,氧含量约为0.002 6%,整体上夹杂物平均成分的熔点靠近1 600 °C液相线,CaS夹杂物的面积密度小于0.7个/mm²,水口结瘤问题得到了改善,平均连续浇注炉数从5~6炉提高到8~10炉,并且夹杂物评级结果合格率高达98%以上,轻钙处理技术取得了较好的效果。

关键词:钙处理; 55Cr3弹簧钢; 热力学计算; 工业试验; 夹杂物; 连烧炉数

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00038 中图分类号:TF769

Practice and Analysis of Light Calcium Treatment of 55Cr3 Aluminum Deoxidized Spring Steel

Li Xue¹, Wu Huajie¹, Liu Wei¹, Sun Yanhui¹, Li Ming^{1,2}

(1 Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Research Institute, Nanjing Iron and Steel United Co., Ltd., Nanjing 210035, China)

Abstract: In order to improve the problem of nozzle clogging and poor continuous castability of 55Cr3 spring steel with aluminum deoxidation during continuous casting, the evolution of inclusions precipitation in different adding value of calcium lines are discussed and industrial test are carried out. The experimental results show that the light calcium treatment of 55Cr3 steel by reducing the length of the calcium line from 100 m to 50 m, to control the calcium content of the molten steel to about 0.001 7% and the oxygen content to about 0.002 6%, on the overall, the melting point of the average composition of inclusions at 1 600 °C is close to the liquid phase line, the area density of CaS inclusions is less than 0.7 pcs·mm⁻², the problem of nozzle clogging has been improved, the average number of successive pouring heats has been increased from 5-6 to 8-10 heats, and the qualified rate of inclusions grading result is above 98 %, and the light calcium treatment technology has achieved better results.

Key Words: Calcium Treatment; 55Cr3 Spring Steel; Thermodynamic Calculations; Industrial Tests; Inclusions; Number of Continuous Casting Heats

汽车制造领域对弹簧钢的需求量较大,占弹簧钢总消耗量的60%左右,如阀门弹簧、悬梁弹簧和汽车稳定杆等关键部件。稳定杆又称为防倾杆,是汽车独立悬架系统中的不可或缺的重要安全组件,能够提高车辆操作的稳定性^[1-4]。55Cr3弹簧钢具有良好旋转弯曲疲劳性能,主要被用于制造汽车的横向稳定杆。而该钢种由于采用铝脱氧+钙处理的方式进行生产,生产过程中连续浇注能力较差,水口结瘤问题突出,并在水口处发现大量的高熔点的CaO-Al₂O₃系夹杂物和CaS夹杂物。

对于铝镇静55Cr3弹簧钢而言,钙处理可将钢液中高熔点氧化物改性为低熔点非金属夹杂物^[5-6]。

而由于钙的沸点较低(1 484 °C),冶炼过程中在钢液温度下容易气化^[7],且化学性质活泼^[8],难以精准控制加入到钢液中的量,计算钙的收得率时存在波动性,导致钙处理的生产不稳定,影响因素较多^[9],钙处理效果难以控制^[10-12]。一般认为钙处理改性顺序为Al₂O₃→CaO·6Al₂O₃(CA₆)→CaO·2Al₂O₃(CA₂)→CaO·Al₂O₃(CA)→12CaO·7Al₂O₃(C₁₂A₇)→CaO·3Al₂O₃(C₃A),钙处理过程中常引入“液态窗口”这一概念^[13-14],定义钙处理夹杂物演变过程中CA₂完全消失的点为“液态窗口”的下限,将CaS夹杂物开始生成点称作“液态窗口”的上限。在这个“液态窗口”下能够保证获得改性良好的夹杂物并无大量

基金项目: 国家自然科学基金(U1660113)

作者简介: 李学(1997-),男,硕士; Email:lixuestd@163.com; 收稿日期: 2023-03-14

通讯作者: 吴华杰(1978-),男,副教授; Email:wuhuajie@ustb.edu.cn

CaS 夹杂物的生成。在钢中钙的加入量过少会导致高熔点夹杂物改性不完全,而过量的钙会导致氧化铝耐火钢包内衬的磨损^[15]。而在现场调研过程中,发现钙处理要求的钙含量较大,既增加了成本,又造成大量 CaS 生成和水口堵塞等一系列问题^[16-18]。不同钢种的钙处理工艺并不完全统一,需要根据具体钢液成分选择合适的工艺来获得最佳的效果^[19-20]。钙处理的主要目的是将钢液中高熔点氧化铝改性为低熔点的液态非金属夹杂物,同时控制 CaS 夹杂物不会在炼钢温度下析出,避免在连铸过程中堵塞水口,以提高连浇炉数和可浇性。轻钙处理时钢中 Al_2O_3 和镁铝尖晶石夹杂会转变为内部固相、外层为液态铝酸钙的复合夹杂,轻钙处理技术已有相关研究和应用^[21-22],但对弹簧钢轻钙处理的报道较少。

本研究以低硫型铝镇静 55Cr3 弹簧钢为试验对象,从理论上系统分析轻钙处理的工艺参数与钢液中夹杂物之间的关系,提出合理的轻钙处理工艺优化方案并进行工业验证,为后期低硫弹簧钢生产提供指导性意见。

1 试验材料及方法

某钢铁企业生产 55Cr3 钢的工艺流程为 120 t 转炉→LF 精炼→RH 精炼→钙处理+5 机 5 流 CC。55Cr3 钢的主要化学成分见表 1。

表 1 55Cr3 弹簧钢的主要化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Alt
0.56	0.30	0.90	≤0.015	≤0.01	0.85	0.035

将钙处理的喂线长度从 100 m 减少到 50 m,进行轻钙处理的尝试。试验方案及取样流程为:当钢液的 RH 真空精炼工序结束后开始取样并喂入钙线,在连铸吊包前和中间包分别进行取样,取样后立即进行水冷,炼钢温度在 1 520 ~ 1 560 °C 内。试验流程与取样方案如图 1 所示。

使用相应的制样和检测仪器设备进行检测分析。采用 Feature 夹杂物分析系统(EVO18+X-MAX80, 德国),扫描面积为 25 mm²,对范围内直径 ≥1 μm 的夹杂物进行统计分析;采用氧氮氢测定仪(TCH600, 美国)测定钢液中的全氧(T.O.)及氮含量;结合电感耦合等离子体质谱仪(Plasma MS 300, 中国)表征钢液成分;利用 FactSage 热力学软件进行热力学方面



图 1 试验流程与取样方案

Fig. 1 Test procedure and sampling plan

的计算。

2 试验结果与分析

2.1 钢液中氧氮含量及钙含量变化

钙处理前后钢液中 T.O、N 及 Ca 含量的变化见表 2,钙处理后氧含量略有升高,钢液中 T.O 含量保持在 0.002 0% ~ 0.002 6% 范围内,在中间包阶段 T.O 含量降低到 0.002 2%,约降低了 0.000 4%。N 含量几乎没有发生变化,始终维持在 0.005 4% ~ 0.005 5% 范围内,说明整个试验过程中对于钢液的保护良好,试验过程无明显的二次氧化发生。喂钙后钢液中钙含量为 0.001 7%,至中间包阶段,钢液中钙含量降低到 0.000 7%。

表 2 各工序 T.O、N、Ca 含量变化(质量分数)

元素	真空结束	吊包前	中间包
T.O	0.002 0	0.002 6	0.002 2
N	0.005 4	0.005 5	0.005 5
Ca	0.000 5	0.001 7	0.000 7

2.2 各工序中夹杂物成分变化

钙处理前后夹杂物在 Al_2O_3 -CaO-MgO 三元相图中的分布如图 2 所示。图 2(a)为钙处理前夹杂物统计结果,相图中夹杂物分布较为密集,大部分为 Al_2O_3 -CaO 类夹杂物,夹杂物最大尺寸为 18.5 μm,平均尺寸为 2.28 μm。图 2(b)和图 2(c)为钙处理后吊包前与中间包阶段的夹杂物统计图,整体上看,钙处理后夹杂物数目有所增多,且出现了较多的 Al_2O_3 -CaO-MgO 类夹杂物,夹杂物中 MgO 含量的升高,可能是由于钙线的加入,促进了钢液流动,增加了钢液与耐材的反应程度;另一方面,夹杂物数量的增多与喂钙后氧含量升高有关系。

整体上,采取轻钙处理后,低熔点非金属夹杂物有所增多,不同工序下夹杂物平均成分的变化趋

响,讨论了当钙含量相对较少(0.001 0%)或者相对较多(0.002 0%,0.003 0%)时钢中夹杂物演变,同时与此次轻钙处理的钙含量(0.001 7%)进行对比,如图6所示。

在炼钢温度为 1 550 °C 的前提下,当钙含量低于 0.001 0% 时,钢中主要以高熔点的固态铝酸钙(CA₂)为主,如图 6(a)所示;当钙含量为 0.001 7% 时,钢液中以 CA 夹杂物和液态夹杂物为主,如图 6(b)所示;继续增加钙含量(0.002 0%),钢液中液态铝酸钙比例增加,如图 6(c)所示;当增加到一定程度时,开始有大量 CaS 生成,如图 6(d)中钙含量为 0.003 0%,钢液中即生成了较多的 CaS 夹杂物。

钙含量对夹杂物演变和钢中 CaS 夹杂影响较大,当喂钙量过低时,对高熔点的氧化物改性不足,而过高会导致高熔点 CaS 夹杂物的生成。喂钙量为 0.001 7% 左右时,不会导致炼钢温度下大量生成 CaS,但当钢液温度低于炼钢温度的凝固阶段仍会有部分 CaS 析出,恰好解释了图 4 中 CaS 存在的原因。因此,50 m 钙线的轻钙处理工艺,将钢液中钙含量控制在 0.001 7% 左右时,能够获得较好钙处理效果。

3 轻钙处理批量生产的应用效果

轻钙处理工艺应用于工业生产后,连续抽样统计了 124 批次 55Cr3 钢的夹杂物水平,依据标准 GB/T10561-2005:钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法,结合企业内部夹杂物控制范围,评级结果见表 3。夹杂物评级结果合格率≥98%,平均连浇炉数达到 8~10 炉。

表 3 55Cr3 夹杂物评级结果统计表

类别	A		B		C		D		D _s
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
标准/级	≤1.0	≤0.5	≤1.5	≤0.5	≤1.0	≤0.5	≤1.0	≤0.5	≤1.0
合格率/%	99	100	100	98	100	100	100	100	100

4 结论

(1)钙处理过程的热力学计算表明,钙含量对夹杂物改性过程的影响十分显著。当钙含量为 0.001 7%,炼钢温度为 1 550 °C 时,能避免高熔点氧化物大量生成,在这个钙含量条件下也能够将夹杂物改性至熔点相对较低的区间,CaS 生成量接

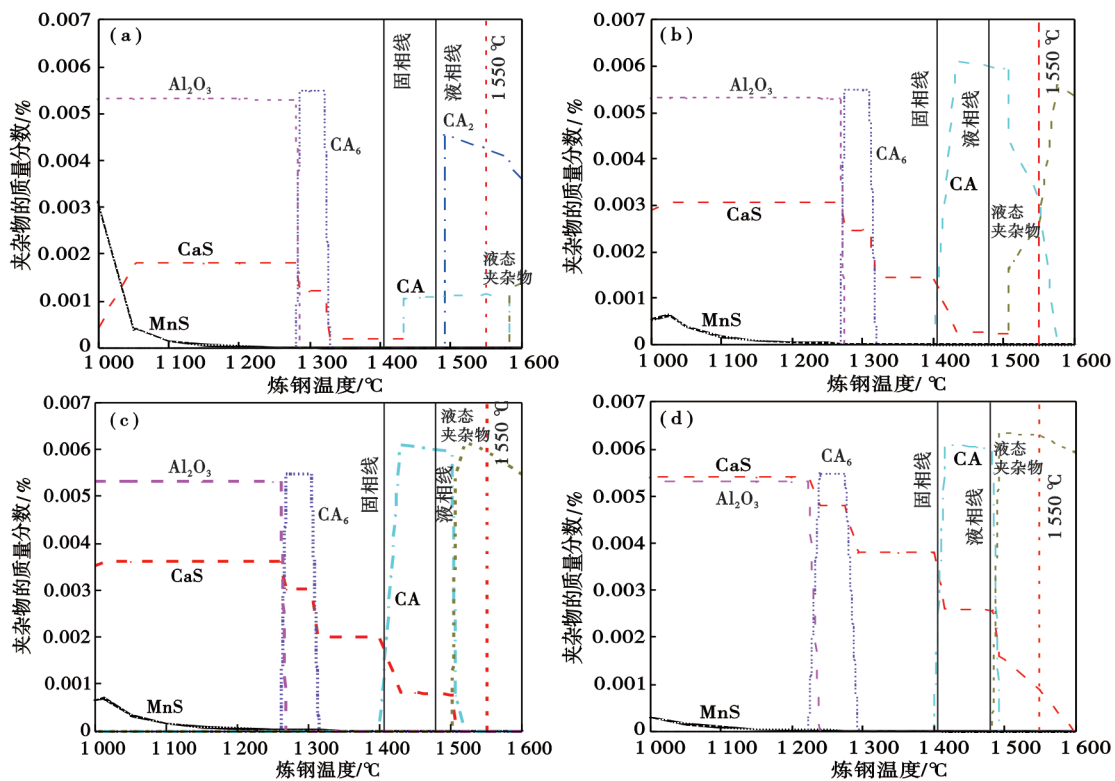


图 6 不同钙含量下夹杂物随温度变化的演变:(a)Ca-0.001 0%,(b)Ca-0.001 7%,(c)Ca-0.002 0%,(d)Ca-0.003 0%
Fig. 6 Evolution of inclusions with temperature change at different calcium contents : (a) 0.001 0%Ca , (b) 0.001 7%Ca , (c) 0.002 0%Ca , (d) 0.003 0%Ca

近于0。

(2)轻钙处理的工业试验结果与热力学计算结果吻合良好,热力学计算能够较好预测钙处理的改性效果。55Cr3钢采用轻钙处理后,夹杂物平均成分的熔点靠近1600℃液相线,CaS夹杂物的面积密度小于0.7个/mm²。

(3)将55Cr3钢的喂钙线长度由100 m减少到

50 m的轻钙处理,在实际生产应用中获得了较好的夹杂物改性效果,即使氧化物未完全改性为液态夹杂物,但有效防止了高熔点氧化物的大量生成,同时也避免了大量高熔点CaS在炼钢温度下生成,水口结瘤问题得到了改善,平均连续浇注炉数从5~6炉提高到8~10炉,并且夹杂物评级结果达到要求。

参考文献

- [1] 吕永年,杜振民,李绍杰. 55Cr3钢轿车稳定杆疲劳断裂失效分析[J]. 河北冶金,2014(11):58-62.
- [2] 尹德福,汪开忠,龚梦强,等. 汽车稳定杆用55Cr3弹簧钢室温旋转弯曲疲劳性能[J]. 物理测试,2019,37(4):17-20.
- [3] 安会龙,任英,刘洋,等. 弹簧钢中夹杂物生成热力学[J]. 炼钢,2020,36(3):55-61.
- [4] 张正林,陈志亮,王向红,等. 汽车稳定杆用高品质弹簧钢55Cr3生产工艺实践[J]. 连铸,2018,43(6):7-10.
- [5] 杨光,杨文,张立峰. 铝镇静钢中夹杂物钙处理改性及其影响因素[J]. 钢铁,2022,57(12):66-78.
- [6] 刘浏. 洁净钢生产技术的发展与创新[J]. 中国冶金,2016,26(10):18-28.
- [7] 苏平虎. 钙处理技术在钢水精炼中的应用[J]. 山西冶金,2009,32(4):47-48+79.
- [8] 刘建华,吴华杰,包燕平,等. 高级别管线钢钙处理效果评价标准[J]. 北京科技大学学报,2010,32(3):312-318.
- [9] 阮墨,李天佑,曾成,等. LF喂纯Ca与CaAl包芯线对DC01钢的冶金效果的影响[J]. 特殊钢,2018,39(5):48-53.
- [10] 任立坤,童立芬,曹立军,等. 无钙处理工艺对合金钢洁净度的影响[J]. 特殊钢,2020,41(2):36-39.
- [11] 方忠强,孙彦辉,温榜,等. 不同钙处理路线钢中夹杂物改性效果评估[J]. 钢铁钒钛,2018,39(3):123-128.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Bielefeldt W V, Vilela A C F. Study of Inclusions in High Sulfur, Al-Killed Ca-Treated Steel via Experiments and Thermodynamic Calculations[J]. Steel Res Int, 2015,86(4):375-385.
- [15] VISSER H J, BOOM R, BIGLARI M. Simulation of the calcium treatment of aluminium killed steel [J]. Metallurgical Research & Technology, 2008,105(4):172-180.
- [16] 杨文,李超,张立峰,等. 优化钙处理工艺减少管线钢B类夹杂物[J]. 中国冶金,2018,28(S1):70-75.
- [17] 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.
- [18] 郎炜昀,翟俊,赵鑫森,等. 典型含钛超纯铁素体不锈钢冶炼-连铸过程夹杂物衍变研究[J]. 特殊钢,2021,42(1):16-19.
- [19] Yuan F M, Wang X H, Yang X F. Influence of calcium content on solid ratio of inclusions in Ca-treated liquid steel [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006,13(6):486-489.
- [20] 朱诚意,黄罗翼,罗小燕,等. 钙处理对成品无取向硅钢夹杂物特性的影响[J]. 钢铁研究学报,2020,32(2):117-128.
- [21] 朱万军,周甫,王春锋,等. CSP流程薄规格高强钢夹杂物控制研究[J]. 炼钢,2021,37(2):51-57.
- [22] 杜秀峰,王春锋,刘先同,等. CSP产线高强钢冶炼关键工艺技术[J]. 炼钢,2015,31(1):31-34+39.