生产实践

20CrMnTiH齿轮钢夹杂物分析及优化

王志通[1],张建元[1],康思琪[1],李博洋[2],李术怀[1],田东晓[1],程文森[3]
(1.鞍钢集团凌源钢铁股份有限公司,辽宁 凌源 122500;
2.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009;
3.鞍钢集团北京研究院有限公司,北京 102200)

摘要: 鞍钢集团凌源钢铁股份有限公司针对20CrMnTiH齿轮钢夹杂物内控指标合格率(细系和≤2.0、粗系和≤1.5、Ds≤1.0)降低的问题,运用数据分析及精准钙处理软件分析认为,钢液中钙量过低导致Al_2O_3夹杂物成分远离液相区是影响上述问题的主要原因。采取将喂钙线工艺由"LF(喂钙线)—RH"优化为"LF—RH(喂钙线)",喂入钙线量由80~120 m/炉降低到50~60 m/炉等措施后,20CrMnTiH夹杂物内控指标合格率由74%提高到90%,连铸中间包内钢液中钙收得率由2%~4%提高到20%~25%,保证生产顺行的同时提升了齿轮钢质量。

关键词: 齿轮钢;夹杂物;钙线喂入量;钙收得率
中图分类号: TF777 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)04-0063-05
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.04.009

Inclusion Analysis of 20CrMnTiH Gear Steel and Its Optimization

WANG Zhitong[1], ZHANG Jianyuan[1], KANG Siqi[1], LI Boyang[2],
LI Shuhuai[1], TIAN Dongxiao[1], CHENG Wensen[3]
(1. Ansteel Group Lingyuan Iron & Steel Co., Ltd., Lingyuan 122500, Liaoning, China;
2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China;
3. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: In response to the decline in the qualification rate of inclusion internal control indices in 20CrMnTiH gear steel (sum of fine inclusion series categories ≤2.0, sum of coarse inclusion series categories ≤1.5, Ds≤1.0) at Ansteel Group Lingyuan Iron & Steel Co., Ltd., through data analysis and precise calcium treatment software analysis, the primary reason for the problem mentioned above was that the calcium content in the molten steel was too low, which caused the inclusion composition to deviate from the liquid phase region. After implementing measures such as optimizing the calcium addition process from "LF(calcium wire feeding)—RH" to "LF—RH(calcium wire feeding)" and reducing the calcium addition amount from 80~120 m/heat to 50~60 m/heat, the qualification rate of inclusion internal control indices for 20CrMnTiH improved from 74% to 90%. Meanwhile, the calcium yield in the molten steel in the continuous casting tundish increased from 2%~4% to 20%~25%, ensuring smooth production while improving the quality of the gear steel.

Key words: gear steel; inclusion; calcium addition amount; calcium yield

20CrMnTiH齿轮钢因具有优异的表面硬度及良好的耐磨性和冲击韧性,被广泛应用于汽车、重工和船舶等领域[1-3]。齿轮钢在使用过程中需承受持续的扭应力和交变载荷,其疲劳失效往往源

王志通,硕士,工程师,2017年毕业于北京科技大学冶金工程专业。E-mail:1539048170@qq.com

于扭转疲劳。非金属夹杂物作为影响齿轮钢疲劳性能的关键因素,其形态、尺寸与成分均受到严格控制,以满足对材料性能的更高要求[4-7]。20CrMnTiH是铝脱氧钢,钢中易生成大量高熔点Al_2O_3类脆性夹杂物,该类夹杂物极易在齿轮钢表面和近表面位置成为疲劳裂纹源,导致齿轮钢在使用过程中发生疲劳损坏[8]。目前,通常采用钙处理方法将钢中高熔点Al_2O_3类夹杂物改性为低熔点钙铝酸盐类夹杂物(以下简称"B类夹杂物"),以降低该类夹杂物对钢材疲劳性能的危害[9-10],同时防止连铸过程水口结瘤。然而,大量的研究结果表明,钙处理不足或过量都会使钢中存在较多高熔点夹杂物[11-16]。

鞍钢集团凌源钢铁股份有限公司(以下简称"凌钢")受铁水条件的影响(入炉铁水中硅含量低、温度低),在冶炼20CrMnTiH齿轮钢时,转炉终点磷含量和温度控制难度加大。因此,将转炉终点碳含量下限值由0.08%降至0.06%,转炉终点碳含量降低后钢液中氧含量升高,进而导致铝脱氧生成夹杂物数量增多;同时,转炉终点温度低导致钢液进入LF后所需升温时间增加,LF精炼造白渣时间延长,LF后续处理时间变短,不利于钢中夹杂物的去除。为保证产品质量,增加了RH真空处理工艺,但是齿轮钢夹杂物内控指标合格率(细系和≤2.0、粗系和≤1.5、Ds≤1.0,严于国标要求)由84%降低至74%,严重影响了产品质量稳定性。因此,凌钢针对以上问题进行了分析,并提出解决措施,以提高齿轮钢夹杂物内控指标合格率,保证产品质量稳定性。

1 问题分析

为了提高钢水洁净度,从以下几个方面进行深入分析研究。

1.1 喂钙量对钢中非金属夹杂物的影响

对于铝脱氧钢,钢中会产生大量的Al_2O_3夹杂物,为了控制Al_2O_3夹杂物的形态以及对水口结瘤的影响,通常采用钙处理技术对Al_2O_3夹杂物进行改性处理,因此钙处理技术在国内外钢厂得到了广泛应用[17-22]。季莎等[23]研究了20CrMnTiH齿轮钢喂钙线量对非金属夹杂物的影响,其研究结果表明:在喂钙线前,钢中夹杂物数量较少,主要成分为Al_2O_3·MgO·CaO;在喂钙线过量后,钢中产生大量CaS类夹杂物,此时钢中夹杂物平均成分已远离低熔点区域,并且钢中非金属夹杂物数量明显增加,不利于钢水洁净度的控制;当钢液中喂钙量不足时,达不到钙处理的效果。因此,需要对钢中喂钙量进行有效控制。

实际生产中,在对钢液进行钙处理时若不考虑钢液实际成分、钢中全氧等因素,会造成钢液钙处理后效果的不稳定性[23-25]。因此,在对钢液钙处理时,应考虑厂内实际生产情况以及实际钢液成分,实现对Al_2O_3夹杂物有效改性的同时又不引入过多的氧化物夹杂。

1.2 中间包内钢液钙含量及夹杂物分布

分析凌钢实际齿轮钢夹杂物检测结果认为,降低转炉终点碳含量及采用RH真空精炼工艺后,齿轮钢夹杂物内控指标合格率降低的主要原因为B类夹杂物指标升高,B类粗系夹杂物指标由0~0.5级升高至1.0~1.5级,生产过程中频繁发生液面波动超标的现象,且液面波动不规律。

分析认为上述现象与钢液中夹杂物改性效果有关。利用精准钙处理软件对钢液中夹杂物进行计算,该软件[26-27]采用Wagner模型计算钢液中各组元活度,同时采用离子-分子共存理论计算钢液中液态夹杂物组元活度,根据自由能最小原理进行求解,可得到钢液中夹杂物成分变化。该软件可结合钢液重量、钙线成分、钙收得率等参数,计算出钙线加入量,计算参数如表1所示。

表1 计算参数

Table 1 Calculation Parameters

钢液中硫含量/%	钢液中全氧含量/%	钢液中残钙量/%	钢液中铝含量/%	钢液重量/t
0.003	0.000 8~0.001 0	0.000 3~0.000 4	0.010~0.020	110~130

精准钙处理软件工作流程示意图见图1[26],本模型可计算得到CaS-CaO-Al_2O_3系三元相图,LF喂钙线工艺路线下钢中夹杂物分布见图2。

由表1、图2可知,原工艺路线即LF(喂钙线)—RH,LF喂钙线80~120 m/炉后钢液中的钙含量较高,但经过RH真空处理后,钢液中钙在低压状态下被去除,经RH处理后钢中残余的钙含量仅为0.000 3%~0.000 4%,钢液中夹杂物平均成分(红点位置)并没有分布在液相区内。分析认为,采用原LF(喂钙线)

—RH工艺路线时，钢液中夹杂物已经转变为低熔点的钙铝酸盐类夹杂物(B类夹杂物)，与钢液接触角小，接触角越小，夹杂物与钢液分离的驱动力也就越小[28]，夹杂物不易被去除，导致夹杂物的数量较多。经RH真空处理后，钢液中的钙未达到连铸中间包内钢中Al_2O_3改性所需量，对Al_2O_3夹杂物改性效果较差，夹杂物平均成分偏离液相区，进而导致齿轮钢中夹杂物内控指标合格率降低，且连铸生产过程中频繁出现液面波动超标的现象。

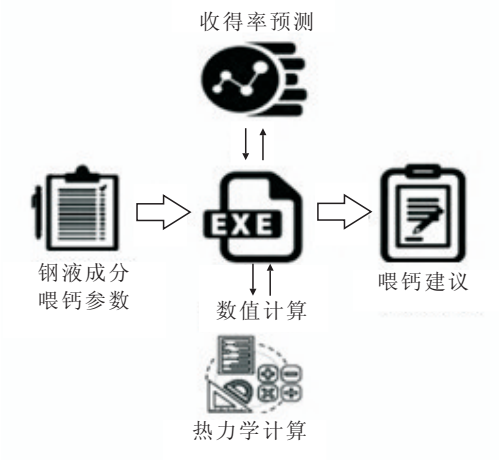


图1 精准钙处理软件工作流程示意图[26]

Fig. 1 Schematic Diagram of Precise Calcium Treatment Software Workflow[26]

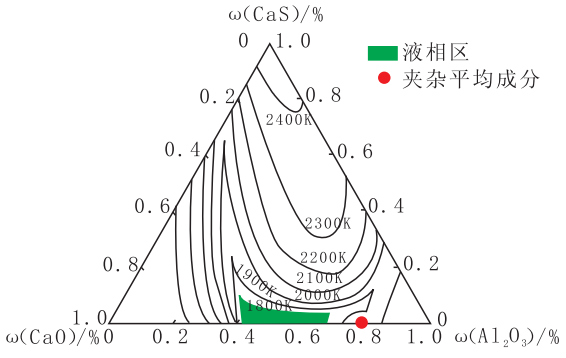


图2 LF喂钙线工艺路线下钢中夹杂物分布

Fig. 2 Inclusion Distribution in Molten Steel under Calcium Addition in LF

2 工艺优化

对原工艺进行优化，采用LF—RH(喂钙线)工艺路线，优化后的工艺路线见图3。由精准钙处理软件计算得出，RH真空处理后向钢液中喂入50~60 m/炉的钙线时，钢液中夹杂物平均成分分布在液相区内，见图4。由图4看出，钢中Al_2O_3夹杂物改性为液相。采用LF—RH(喂钙线)工艺路线时，RH精炼过程中，高熔点的Al_2O_3类夹杂物与钢液接触角较大，导致夹杂物去除的驱动力较大[26]，Al_2O_3类夹杂物较易去除。因此，钢液经RH处理后再进行钙处理有利于夹杂物数量及夹杂物成分控制，可满足对钢中Al_2O_3夹杂物的改性效果。同时可避免由于钙线喂入量过多生成高熔点CaS及引入大量氧化物夹杂。



图3 优化后的工艺路线

Fig. 3 Process Routing after Optimization

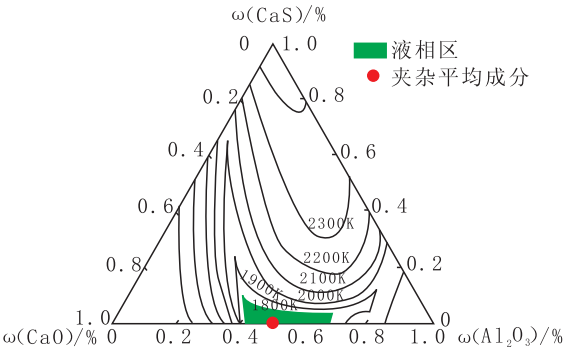


图4 工艺优化后钢中夹杂物平均成分分布

Fig. 4 Average Composition Distribution of Inclusions in Molten Steel after Process Optimization

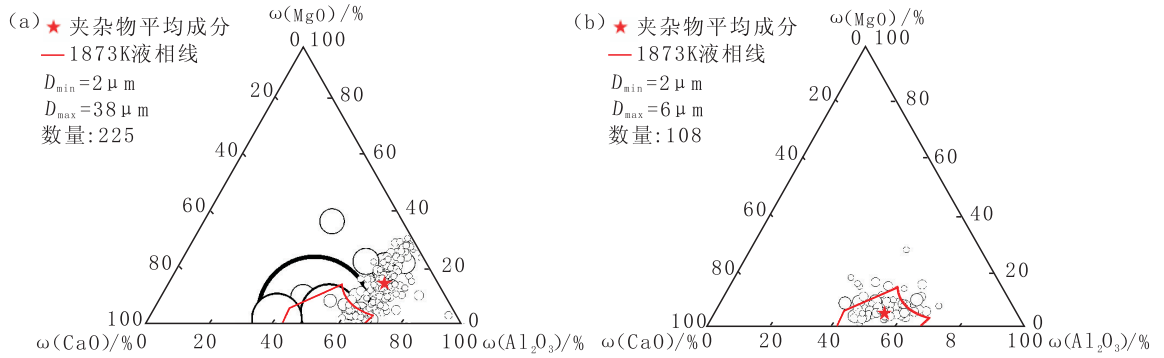
为了验证LF—RH(喂钙线)工艺路线实施效果，将优化后的工艺路线及钙线喂入量进行工业跟踪试验。

3 工业试验效果

3.1 中间包内非金属夹杂物

对中间包内钢水取样检验夹杂物情况，将夹杂物成分投到Al_2O_3-CaO-MgO三元相图中，图5为工艺优化前后中间包内钢液中夹杂物成分分布对比。图5中，D_{max}为扫描到的夹杂物最大尺寸，D_{min}为扫描到的夹杂物最小尺寸。

由图5中可以看出，工艺优化后夹杂物的平均成分控制较好，中间包钢液中夹杂物数量减少，且夹杂物中Al_2O_3含量较低，大尺寸夹杂物所占比例降低，平均尺寸降低，夹杂物去除效果较好。



(a) 优化前;(b) 优化后

图5 工艺优化前后中间包内钢液中夹杂物成分分布对比

Fig. 5 Comparison of Inclusion Composition Distribution in Molten Steel in Tundish before and after Process Optimization

3.2 齿轮钢夹杂物指标

跟踪现场500炉试验样本,统计工艺优化前后各工序钢液中钙含量及收得率对比见表2。

表2 工艺优化前后各工序钢液中钙含量及收得率对比

Table 2 Comparison of Calcium Content and Yield in Molten Steel in Different Processes before and after Optimization

	项目	钢液中钙含量/%	钙收得率/%
优化前	LF处理后	0.001 0~0.002 0	—
	RH处理后	0.000 3~0.000 4	—
	连铸中间包内	0.000 3~0.000 4	2~4
优化后	LF处理后	0.000 2~0.000 3	—
	RH处理后	0.001 0~0.001 5	—
	连铸中间包内	0.000 7~0.001 0	20~25

由表2可以看出,工艺优化后,连铸钢液中钙含量由0.000 3%~0.000 4%提高到0.000 7%~0.001 0%,连铸中间包内钢液中钙收得率由2%~4%提高至20%~25%。RH工序喂钙线可以充分利用RH高效去除夹杂物的作用,使钢中的夹杂物数量更低,利于钢液洁净度的控制。

工艺优化后,连铸塞棒曲线相对平稳,连铸开浇平稳后至浇次结束塞棒曲线波动值在3 mm以内,连铸生产过程中的结晶器液面异常波动得到有效控制,夹杂物内控合格率由74%提高至90%。

4 结语

鞍钢集团凌源钢铁股份有限公司针对20CrMnTiH齿轮钢生产存在的夹杂物内控指标合格率降低问题,运用数据分析及精准钙处理软件分析认为,钢液中钙量过低导致Al_2O_3夹杂物成分远离液相区是影响上述问题的主要原因。优化原有工艺,采取RH工艺喂钙线处理,且喂钙线量降至50~60 m/炉,工艺优化后,连铸开浇平稳后至浇次结束塞棒曲线相对平稳,波动值在3 mm以内,有效控制了连铸生产过程结晶器液面异常波动现象;夹杂物内控三项(细系和≤2.0、粗系和≤1.5、Ds≤1.0)合格率由74%提高到90%,钙收得率由2%~4%提高至20%~25%,保证生产顺行的同时提高了齿轮钢质量。

参考文献

[1] 曾耀先. 含硫齿轮钢20CrMnTiH洁净度控制[J]. 钢铁,2021,56(2):76-81.

[2] 苑一波,杨利彬,赵进宣,等. 20CrMnTiH齿轮钢在BOF-LF-RH-CC流程中的夹杂物演变[J]. 中国冶金,2024,34(1):36-43.

[3] 白旭旭,张敏,曾建华,等. 20MnCr5齿轮钢全流程夹杂物分析[J]. 钢铁钒钛,2022,43(6):143-148.

[4] YANG Yanhui, WANG Maoqiu, CHEN Jingchao, et al. Microstructure and mechanical properties of steels after high temperature carburization[J]. Journal of Iron and Steel Research, International,2013,20(12):140-145.

[5] CANTó J S, WINWOOD S, RHODES K, et al. A study of low cycle fatigue life and its correlation with microstructural parameters in IN713C nickel based superalloy[J]. Materials Science and Engineering A,2018,718:19-32.

[6] XING Zhiguo, WANG Zhiyuan, WANG Haidou, et al. Bending fatigue behaviors analysis and fatigue prediction of 20Cr2Ni4 gear steel with different stress concentrations near non-metallic

inclusions[J]. Materials,2019,20(12):3443-3457.
[7] HE Xiaofei,WANG Maoqiu,HU Chengfei,et al. Study of the relationship among total oxygen, inclusions and fatigue properties of gear steel[J]. Materials Science and Engineering A,2021,826:152101.
[8] 李俊国,曾亚南,王树华,等. 20CrMnTi冶炼过程中夹杂物行为研究[J]. 钢铁钒钛,2010,31(1):56-61.
[9] 张立峰. 钢中非金属夹杂物[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
[10] 耿鑫,宋波,刘涛,等. 38CrMoAl钢精炼过程夹杂物生成及演变规律[J]. 中国冶金,2022, 32(11):106-114.
[11] Luis Truebra Jr. Nozzle clogging during the continuous casting of aluminum-killed steel[D]. Rolla: University of Missouri-Rolla. 2003.
[12] Holappa L. Thermodynamic examination of inclusion modification and precipitation from calcium treatment to solidified steel [J]. Ironmaking and Steelmaking,2003,30(2):111-115.
[13] 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 Research International, 2015, 86(4): 375-385.
[14] 韩志军,林平,刘浏,等. 20CrMnTiH1齿轮钢钙处理热力学[J]. 钢铁,2007,42(9):32-36.
[15] Inoue R,Suito H. Calcium desulfurization equilibrium in liquid iron[J]. Steel Research International,1994,65(10):403-409.
[16] Suito H,Inoue R. Thermodynamics on control of inclusions composition in ultraclean steels[J]. ISIJ International,1996,36(5): 528-536.
[17] 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):1-15.
[18] 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.
[19] 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.
[20] 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.
[21] Abdelaziz S,Megahed G,El-Mahallawi I, et al. Control of Ca addition for improved cleanness of low C, Al killed steel[J]. Ironmaking & Steelmaking,2009,36(6):432-441.
[22] 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.
[23] 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):825-832.
[24] 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.
[25] 李树森,任英,张立峰,等. 管线钢精炼过程中夹杂物CaO和CaS的研究[J]. 北京科技大学学报,2014,36(增刊1):168-171.
[26] 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.
[27] 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.
[28] Abraham S, Bodnar R, aines J, et al. Inclusion engineering and metallurgy of calcium treatment[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2018,25(2):133-145.

(编辑 许营)
修回日期:2025-12-10

(上接第57页)

矿润湿、降低点火强度以及合理调节烧结风量分布等措施,实现了900 mm料层长期稳定生产,固体燃耗由56.58 kg/t降至49.63 kg/t,吨矿电耗由46.77 (kW·h)/t降至36.50 (kW·h)/t,烧结利用系数由1.241 t/(m²·h)提高至1.402 t/(m²·h),实现了厚料层烧结工艺的优势生产,达到了超厚料层改造的目标。

参考文献

[1] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社,2015:8-10.
[2] 翟江南. 厚料层烧结优化技术综述及其实践[J]. 烧结球团,2017,42(2):2-5.
[3] 王洪江,安钢,王全乐. 首钢京唐1号烧结机800 mm厚料层烧结生产实践[J]. 烧结球团,2010,35(3):47-51.
[4] 郑兴荣,徐冰,张群山. 900 mm超厚料层烧结设备改造实践[J]. 安徽冶金科技职业学院学报,2016,26(4):27-29.
[5] 郑兴荣,黄世来,戚义龙. 马钢三铁总厂900 mm厚料层烧结生产实践//[C]2012年全国炼铁生产技术会议暨炼铁学术年会论文集,无锡:中国金属学会,2012.
[6] 邹凡球,赵改革,梁高铭. 湘钢360 m²烧结机920 mm厚料层烧结生产实践[J]. 烧结球团,2019,44(3):6-9.
[7] 罗吉敖. 炼铁学[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.
[8] 敬大宾. 提高烧结混合料料温实践//[C]2014年全国中小高炉炼铁学术年会论文集,成都:中国金属学会炼铁分会中小高炉学术委员会,2014:913-914.
[9] 郭会良,纪召毅,玄振法. 水分在烧结中的行为探讨与分析[J]. 山东冶金,2023,45(2):23-26.
[10] 周江虹,章裕东,黄世来. 烧结过程风量合理分布实验研究[J]. 烧结球团,2021,46(1):37-42.

(编辑 许营)
修回日期:2026-01-27