

120 t LF 精炼渣系对弹簧钢 55SiCrA 夹杂物塑性的影响

王清波^{1,2} 张 华¹ 李永超² 卢彩玲² 白瑞娟² 刘成松¹

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 河南济源钢铁(集团)有限公司, 济源 459000)

摘 要 在分析“120 t LD→LF→RH→150 mm×150 mm 连铸坯→线材轧制”工艺流程生产的弹簧钢 55SiCrA 的基础上,应用 Factsage 热力学计算软件进行热力学计算,对精炼工艺进行优化研究。结果表明:精炼渣系中含 SiO₂ 41%~46%、CaO 36%~41%、Al₂O₃ 0%~3%、MgO 10%,渣碱度 0.8~1.0,可使 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 系夹杂物成为塑性夹杂物。使用低 Ti、低 Al 合金及无铝耐材,冶炼终点 [Al] 降至 0.001 8%~0.002 2%, [Ti] 降至 0.001 0%~0.001 2%,钢中铝镁尖晶石和 TiN 等不变形夹杂物明显降低,夹杂物中 Al₂O₃ 含量降至 15% 左右,夹杂物成分全部位于低熔点区。

关键词 弹簧钢 55SiCrA 精炼渣 夹杂物塑性化

Effect of 120 t LF Refining Slag System on Plasticity Inclusions in 55SiCrA Spring Steel

Wang Qingbo^{1,2}, Zhang Hua¹, Li Yongchao², Lu Cailing², Bai Ruijuan² and Liu Chengsong¹

(1 School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

2 Henan Jiyuan Iron & Steel (Group) Co Ltd, Jiyuan 459000)

Abstract Based on the analysis of 55SiCrA spring steel produced by “120 t LD→LF→RH→150 mm×150 mm continuous casting billet→wire rolling” process, the thermodynamic calculation is carried out by using Factage thermodynamic calculation software to optimize the refining process. The results show that the inclusions in CaO-SiO₂-Al₂O₃ system can be transformed into plastic inclusions with the content of SiO₂ 41%~46%, CaO 36%~41%, Al₂O₃ 0%~3%, MgO 10% refining slag and slag basicity 0.8~1.0. Using low Ti, Al alloy and non-aluminum refractory material, the smelting end [Al] reduces to 0.001 8%~0.002 2%, [Ti] reduces to 0.001 0%~0.001 2%, the undeformed inclusions such as aluminum magnesium spinel and TiN in the steel are obviously reduced, the content of Al₂O₃ in the inclusions is reduced to about 15%. The inclusion ingredient are all located in the low melting point region.

Material Index 55SiCrA Spring Steel, Refining Slag, Inclusion Plasticity

高品质汽车悬架用弹簧钢的主要生产工艺有两种^[1-3],一种是铝脱氧工艺,钢中的氧含量降到极低;另一种是硅锰脱氧工艺,即夹杂物塑性化的工艺路线。

目前,济源钢铁公司(下称济钢)生产的弹簧钢的夹杂物成分离散度较大,偏离塑性区,夹杂物成分没有严格落入 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三元系 1 400 ℃ 低熔点区域。通过 Factsage 软件计算,采用使夹杂物成分控制在低熔点区域最优的精炼渣组成,并进行工业试验,实现了济钢弹簧钢产品夹杂物的塑性化目标。

1 济钢弹簧钢生产

1.1 现有工艺控制点

济钢生产的弹簧钢 55SiCrA,采用“120 t LD→LF→RH→150 mm×150 mm 连铸坯→线材轧制”工艺流程生产,主要化学成分见表 1。

55SiCrA 钢脱氧造渣工艺为硅锰脱氧,精炼终

表 1 55SiCrA 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 55SiCrA steel/%							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Al
0.51~0.59	1.40~1.60	0.60~0.80	≤0.020	≤0.015	0.60~0.80	≤0.003	≤0.003

表 2 改进前 55SiCrA 钢的精炼渣成分和碱度

Table 2 Refining slag ingredient and basicity for 55SiCrA steel before improvement

精炼渣成分/%						碱度(R)
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	
40~45	35~40	3~6	10~15	1~3	0.2~1.0	1.0~1.5

渣碱度(R)控制在 1.0~1.5, Al₂O₃ 含量为 3%~6%,见表 2。用户使用过程中出现绕簧断裂、疲劳寿命低等问题。

1.2 钢中夹杂物控制

在 55SiCrA 钢原工艺基础上取 3 个批次样品进行显微夹杂物的观察,将所观察到夹杂物的主要成

分标记于 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元相图上,其中 MnO 与 SiO_2 和 MgO 与 Al_2O_3 合并评价,如图 1 所示。其主要问题就是复合氧化物夹杂的成分控制不稳定,偏离低熔点区域,在相图中分布较分散。检测到的部分夹杂物中 Al_2O_3 含量较高,严重影响了夹杂物的可变形性。

对钢中夹杂物进一步分类,夹杂物种类主要为 Mg-Al-Ca-Si-O 复合夹杂物、 MnS 、 MgAl_2O_4 、 TiN ,典型夹杂物形貌如图 2 所示。观察到的夹杂物中 MgAl_2O_4 、 TiN 等不变形夹杂较高。

2 精炼渣 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 的优化

影响夹杂物塑性的主要因素是熔点,夹杂物的熔点和热膨胀性与夹杂物自身的成分密切相关,因此,可以通过控制夹杂物成分以达到控制夹杂物塑性化。精炼过程中,夹杂物的化学成分主要受炉顶渣影响,当顶渣与钢水反应达到平衡时,夹杂物成分与顶渣一致。因此,夹杂物塑性控制与控制顶渣液相面积投影一致^[3]。

2.1 MgO 的影响

目前济钢生产 55SiCrA 钢采用的脱氧方式为硅锰脱氧,夹杂物多数在 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 四元系中,与精炼渣中主要成分相符,因此热力学计算基于 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 四元系进行。根据顾超^[4]等的研究,以及 Factsage 中 Phase Diagram 计算,在四元渣系中,随着 MgO 比例的增加,低熔点区(熔点低于 1673 K 为低熔点区)先增后减,见图 3。当 MgO 含量为 25% 时,低熔点区域将迅速降低,且渣中 MgO 含量较高时更易生成 MgAl_2O_4 ,该种夹杂物不利于 Al_2O_3 在渣中的快速溶解。因此,根据相图及钢包材质情况,选择 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 四元系中 (MgO) = 10% 较为恰当。

2.2 热力学计算

根据钢液 $[\text{Al}]$ 与精炼渣中 (SiO_2) 的反应式可以计算出钢液中的等铝线 ($[\text{Al}] = 5 \times 10^{-6}$ 、 10×10^{-6} 、 15×10^{-6} 、 20×10^{-6}),如图 4。从图 4 可以看出,随着渣中 SiO_2 含量的增加,钢液中平衡 Al 含量降低,这是由 Al 还原渣中 SiO_2 所致。则为保证夹杂物落入低熔点区域,其与之平衡时钢液中 Al 含量

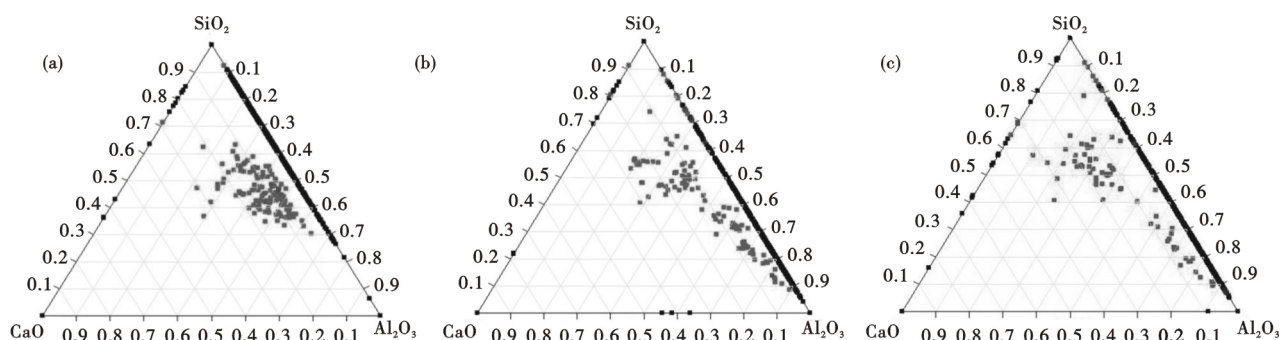


图 1 改进前 55SiCrA 钢中夹杂物的成分: 批次 1 (a), 2 (b) 和 3 (c)

Fig. 1 Ingredient of inclusions in 55SiCrA steel before improvement: batch No1 (a), No2 (b) and No3 (c)

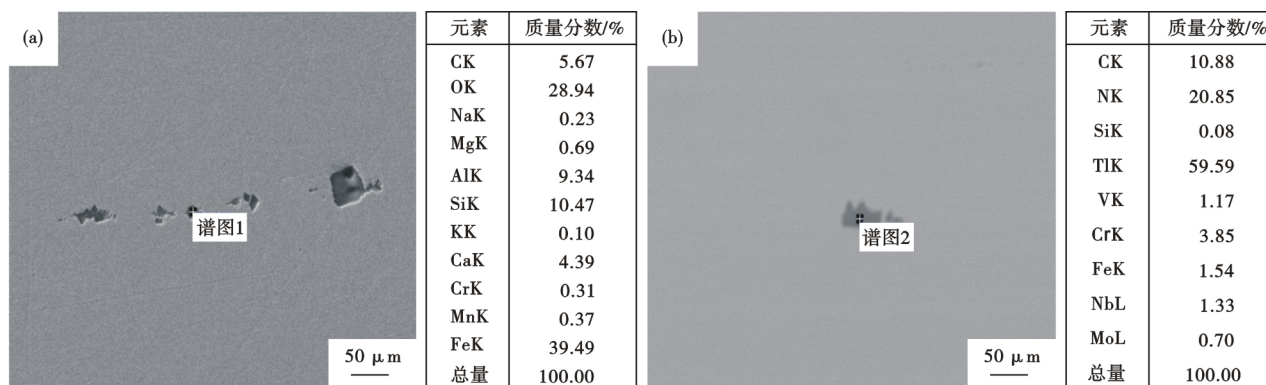


图 2 改进前 55SiCrA 钢中夹杂物形貌及能谱分析: (a) Mg-Al-Ca-Si-O 复合夹杂物 (b) TiN 夹杂物

Fig. 2 Morphology and energy spectrum analysis of inclusions in 55SiCrA steel before improvement: (a) Mg-Al-Ca-Si-O composite inclusions (b) TiN inclusions

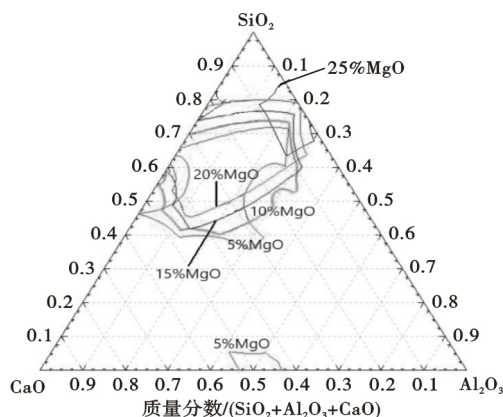


图 3 MgO 含量对 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 渣系低熔点区域的影响

Fig. 3 Effect of MgO content on CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO slag system low melting point region

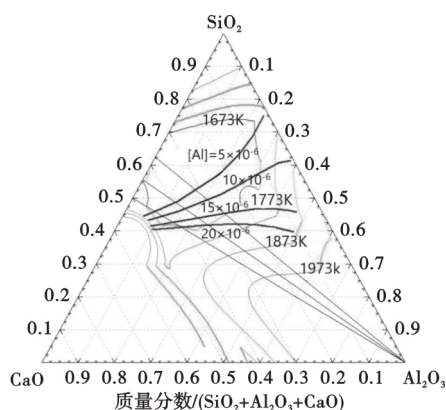


图 4 钢液与 CaO-SiO₂-Al₂O₃-10% MgO 系平衡的等 [Al] 线图

Fig. 4 Equal [Al] diagram of equilibrium between molten steel and CaO-SiO₂-Al₂O₃-10% MgO system

应小于 20×10^{-6} , 夹杂物中 Al₂O₃ 含量小于 20%。

根据研究^[5,4], 炉渣中 Al₂O₃ 含量、钢液中的 Al₂O₃ 含量三者之间相互影响, 夹杂物中 Al₂O₃ 的含量随着渣中 Al₂O₃ 含量的升高而增加, 为了保证夹杂物中 Al₂O₃ 含量小于 20%, 须严格控制渣中 Al₂O₃ 含量小于 3%。

根据 Si-O 平衡, 计算弹簧钢 55SiCrA 的四元 CaO-SiO₂-Al₂O₃-10% MgO 渣系中平衡的等氧图 ($[O] = 5 \times 10^{-6}$, 10×10^{-6} , 15×10^{-6} , 20×10^{-6}), 见图 5。由图 5 可知, 随着渣中 SiO₂ 含量的升高, 与精炼渣平衡的钢液中 [O] 含量也随之升高。若想提高弹簧的疲劳寿命, 则氧含量越低越好, 再结合等 [Al] 线图, 为保证夹杂物落在低熔点区域, 碱度应控制在 0.8~1.0, 则 (SiO₂) 控制为 41%~46%。

根据以上计算, 最终确定适合硅锰脱氧

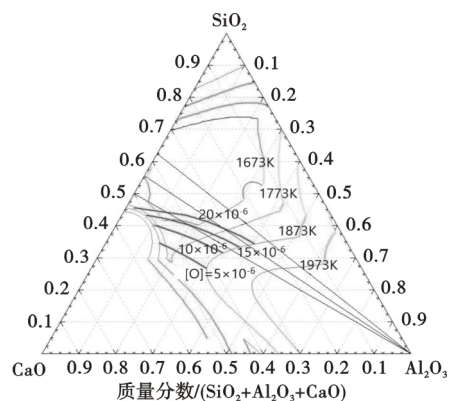


图 5 钢液与 CaO-SiO₂-Al₂O₃-10% MgO 系平衡的等 [O] 线图

Fig. 5 Equal [O] diagram of equilibrium between molten steel and CaO-SiO₂-Al₂O₃-10% MgO system

55SiCrA 弹簧钢的 LF 精炼渣成分为: SiO₂ 41%~46%, CaO 36%~41%, Al₂O₃ 0%~3%, MgO 10%, 碱度 R 为 0.8~1.0。

3 工艺改进试验

3.1 工艺改进措施

(1) 控制铁水 Ti $\leq 0.05\%$, 铁水经 KR 预处理 S $\leq 0.007\%$, 搅拌结束后进行扒渣处理。

(2) 选择低 Ti、Al 的合金及辅料, 控制钢中 Al 和 Ti 含量, 降低铝镁尖晶石和 TiN 夹杂物数量。转炉和精炼炉采用的锰铁、硅铁、铬铁合金中 Ti $\leq 0.01\%$ 、Al $\leq 0.01\%$; 精炼过程中采用的低碱度合成渣 MgO、Al₂O₃、TiO₂ 均小于 2%。

(3) 研究发现^[7], 生产弹簧钢时所用钢包若上次生产钢种为高碱度、高 Al₂O₃ 渣系, 则钢包在弹簧钢上第一次使用时精炼渣碱度和 Al₂O₃ 含量显著升高, 对弹簧钢渣系影响较大。为保证渣系的稳定, 生产弹簧钢时所用钢包上次生产的钢种需要严格限制, 不能是高碱度、高 Al₂O₃ 渣系的钢种, 且前一炉钢种 $[Ti] \leq 30 \times 10^{-6}$, $[Al] \leq 25 \times 10^{-6}$ 。

(4) 针对低碱度精炼渣工艺选用镁钙砖专用钢包, 镁质中间包颗粒覆盖剂, 同时采用无铝的塞棒、水口等, 最大程度避免耐材对钢水的污染, 减少 Al₂O₃、铝镁尖晶石、钙铝酸盐等高熔点不变性夹杂物的生成。

在济钢生产 5 炉 55SiCrA, 采用“KR→120 t LD→LF→RH→150 mm×150 mm 连铸坯→线材轧制”工艺流程生产, 控制精炼渣碱度 0.8~1.0。试验过程中在 LD 氩站、LF 精炼前期、LF 精炼中期、LF 精炼后、RH 精炼后、中间包浇注 30 min 后分别取样进

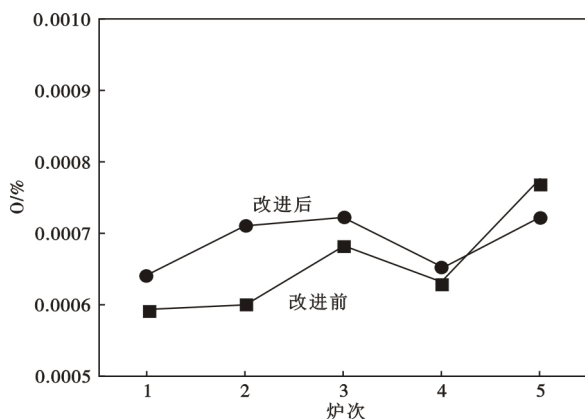


图 6 改进前后中间包钢水全氧含量对比

Fig. 6 Comparison of total oxygen content in tundish liquid between before and after improvement

行成分、精炼渣和夹杂物分析,采用自动扫描电子显微镜(EVO 18)对约 2 cm^2 的钢试样检测夹杂物的成分和形貌。

3.2 工艺改进效果

3.2.1 钢中氧含量

图 6 表明改进后中间包全氧含量在 0.0064% ~ 0.0072% ,与改进前氧含量控制水平相当,说明改进后钢水脱氧良好,可有效提高弹簧的疲劳寿命。

3.2.2 钢中 Al、Ti、S 含量

图 7(a)、(b)、(c) 反映了改进后整个冶炼过程钢中 Al、Ti、S 含量的变化情况,可以看出,从转炉氩站到 RH 精炼过程中,钢中 Al 含量在冶炼过程中逐步升高,这是由于合金和渣料中带入的 Al。中间包

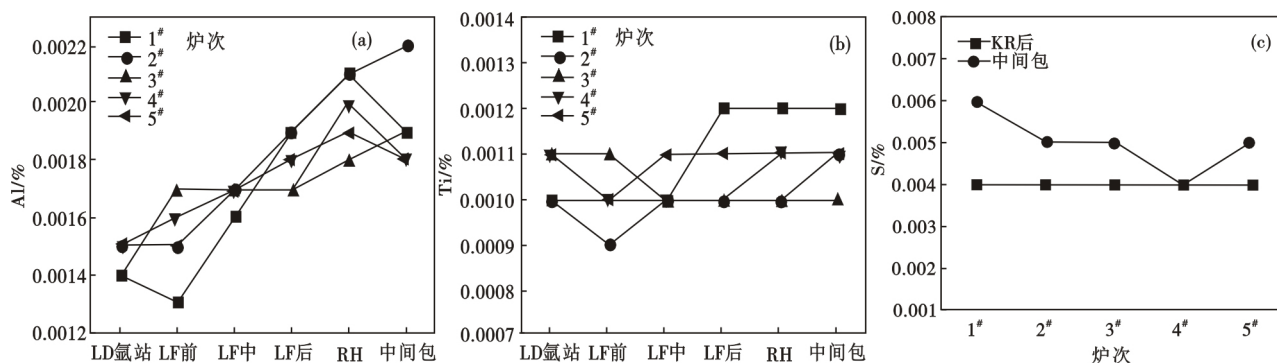


图 7 改进后炼钢过程钢中 Al(a)、Ti(b) 和 S(c) 含量的变化情况

Fig. 7 Change of Al(a), Ti(b) and S(c) content in steel in steelmaking process after improvement

钢中 Al 含量较 RH 精炼过程降低,说明发生还原反应生成 Al_2O_3 进入渣中,因此应尽量降低钢中 Al 含量,降低夹杂物中 Al_2O_3 含量;采用 KR 铁水预处理后, S 含量 0.004% ,在后期精炼过程中略有增加, S 最高为 0.006% ,可能为合金中带入。

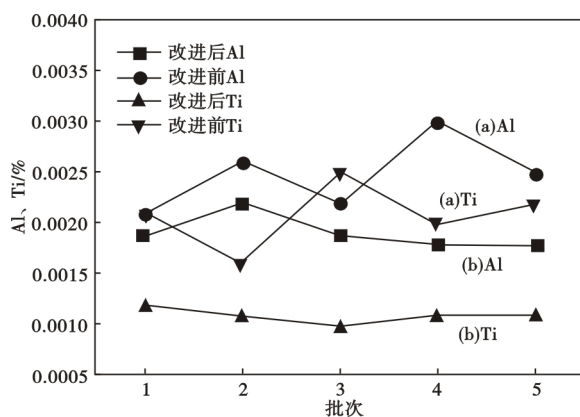


图 8 改进前(a)后(b)钢中 Al、Ti 含量的对比

Fig. 8 Comparison of Al, Ti contents in steel before (a) and after (b) improvement

表 3 精炼渣成分及碱度控制

Table 3 Refining slag composition and alkalinity control

炉次	精炼渣成分/%						碱度 (R)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	
1 [#]	38.01	40.27	1.91	9.63	4.35	0.22	0.94
2 [#]	35.31	42.15	2.40	10.04	5.28	0.21	0.84
3 [#]	36.89	43.68	1.45	9.22	3.96	0.23	0.84
4 [#]	36.10	43.48	1.69	9.32	4.39	0.22	0.83
5 [#]	35.59	44.26	1.70	10.08	4.37	0.22	0.80

图 8 反映了工艺改进前后 Al、Ti 含量的对比情况。采用低 Ti、Al 的合金和渣料后,钢中 Al、Ti 含量明显降低,改进后成品 Ti 小于 0.0012% , Al 小于 0.0022% ,较改进前均有所降低,降低了 TiN 和 MgAl_2O_4 不变形夹杂的生成率。

3.2.3 精炼渣和夹杂物控制

表 3 为精炼渣成分及碱度(R) 控制情况,可以看出,精炼渣中(MgO) 在 10% 左右,(Al₂O₃) 最高 2.4%,最低 1.45%,碱度(R) 控制在 0.80~0.94。

图 9 是工艺改进前后精炼渣成分在 CaO-SiO₂-Al₂O₃-10% MgO 四元相图中的位置,图 10 是工艺改

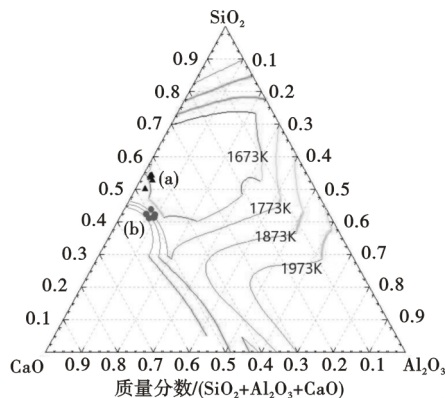


图 9 改进前 (a) 和改进后 (b) 的 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-10\% MgO}$ 精炼渣成分的对比

Fig. 9 Composition of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-10\% MgO}$ refining slag ingredient before (a) and after (b) improvement

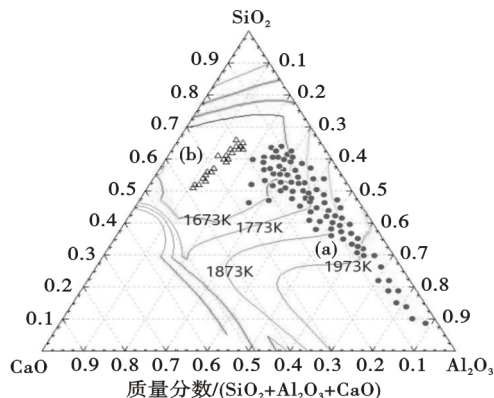


图 10 改进前 (a) 和改进后 (b) 的 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-10\% MgO}$ 系精炼的钢中夹杂物成分

Fig. 10 Ingredient of inclusions in steel refined by $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-10\% MgO}$ system before (a) and after (b) improvement

进前后夹杂物成分在 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-10\% MgO}$ 四元相图中的位置。由图 9、图 10 可知,改进前精炼渣成分正好落在等温线密集区,精炼渣控制不稳定时,其熔点出现 $\geq 1973\text{ K}$ 的情况,夹杂物成分也控制不稳定,偏离低熔点区域;改进后精炼渣和夹杂物成分均落在低熔点区域内。

参考文献

- [1] 蒋晨旭,岳峰,辛彩萍. 55SiCr 悬臂用弹簧钢夹杂物控制 [J]. 工程科学学报, 2016, 38(S1): 96-100.
- [2] Hu Y, Chen W, Wan C, et al. Effect of Deoxidation Process on Inclusion and Fatigue Performance of Spring Steel for Automobile Suspension [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49(2): 569-580.
- [3] Yang H, Ye J, Wu X, et al. Optimum Composition of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ Slag for Spring Steel Deoxidized by Si and Mn in Production [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(2): 1435-1444.
- [4] 顾超,包燕平,林路,等. 弹簧钢 LF 精炼渣系优化与工业试验 [J]. 炼钢, 2015, 31(4): 11-15 + 20.
- [5] Wang Y, Tang H, Wu T, et al. Effect of Acid-Soluble Aluminum on

表 4 工艺改进后钢中非金属夹杂物类型及尺寸分布

Table 4 Types and size distribution of non-metallic inclusions in steel after improvement process

夹杂物类型	不同尺寸夹杂物分布 / 个					
	< 2 μm	2 ~ 5 μm	5 ~ 10 μm	10 ~ 15 μm	15 ~ 20 μm	$\geq 20 \mu\text{m}$
MnS	26	45	22	5	1	1
MgAl_2O_4	3	8	2	0	0	0
Mg-Al-Ca-Si-O	52	198	35	4	1	0
TiN	0	5	1	0	0	0
CaO-SiO_2	0	1	1	0	0	0
合计	81	257	61	9	2	1
所占比例 / %	19.71	62.53	14.84	2.19	0.48	0.25

从表 4 夹杂物类型及尺寸分布来看,工艺改进后钢中 10 μm 以上的夹杂物占比 2.92%, 5 μm 以上的夹杂物占比 17.76%, 5 μm 以下的夹杂物占比 82.24%, 夹杂物尺寸明显减小, 主要为可变形的 MnS 和低熔点的 Mg-Al-Ca-Si-O 复合夹杂物, MgAl_2O_4 、TiN 等不变形夹杂物较少。

4 结论

(1) 工艺改进前 55SiCrA 钢中复合氧化物夹杂成分较分散, Al_2O_3 含量相对较高, 钢中夹杂物多数不易变形且尺寸较大。

(2) 调整精炼渣系成分为 SiO_2 41% ~ 46%, CaO 36% ~ 41%, Al_2O_3 0% ~ 3%, MgO 10%, 渣碱度 0.81.0, 可使 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂物成为塑性夹杂物。

(3) 通过调整精炼渣系, 使用低 Ti、低 Al 合金及无铝耐材, 冶炼终点 $[\text{Al}]$ 0.0018% ~ 0.0022%, $[\text{Ti}]$ 0.0010% ~ 0.0012%, 钢中铝镁尖晶石和 TiN 等夹杂物明显降低, 夹杂物中 Al_2O_3 含量降至 15% 左右, 夹杂物成分全部位于低熔点区。

(4) 工艺改进后, 10 μm 以上的夹杂物占比 2.92%, 5 μm 以上的夹杂物占比 17.76%, 5 μm 以下的夹杂物占比 82.24%, 夹杂物尺寸明显减小。

the Evolution of Non-Metallic Inclusions in Spring Steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(2): 943-955.

[6] 殷雪, 孙彦辉, 焦帅, 等. 精炼渣成分对硅锰脱氧弹簧钢夹杂物影响的实验室研究 [A]. 中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集-S02. 炼钢与连铸 [C]. 中国金属学会, 2017: 7.

[7] 阎丽珍, 孟耀青, 姬旦旦, 等. 转炉连铸工艺生产弹簧钢 55SiCrA 的夹杂物控制 [A]. 中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集-S02. 炼钢与连铸 [C]. 中国金属学会, 2017: 6.

王清波(1985-), 女, 硕士生(武汉科技大学), 工程师, 2007 年武汉科技大学(本科)毕业, 新产品开发。

E-mail: 13939162133@126.com

收稿日期: 2021-05-28