

• 工艺技术 •

80 t BOF-LF-RH-CC 流程冶炼 55SiCr 弹簧钢洁净度的研究

杜广巍^{1,2} 郭汉杰¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 青海省工程咨询中心, 西宁 810001)

摘 要 55SiCr 钢 280 mm × 325 mm 铸坯(/% : 0.55C, 1.42Si, 0.67Mn, 0.008S, 0.67Cr) 的冶炼流程为 80 t BOF-LF-RH-CC 工艺。通过 BOF 出钢加 Al 和硅铁合金, 同时加入精炼渣, 控制精炼过程渣碱度 $R(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$ 为 2.0 左右, RH ≥ 20 min, 软吹搅拌 ≥ 15 min, 控制钢中夹杂物转变, 得到洁净弹簧钢 55SiCr。分析结果表明, LF 精炼过程中夹杂物由早期的 Al_2O_3 - SiO_2 -MnO 和 Al_2O_3 夹杂将逐渐转变为 Al_2O_3 -CaO- SiO_2 夹杂, RH 真空处理夹杂物全部转变为 Al_2O_3 -CaO- SiO_2 夹杂, LF 开始精炼 T[O] 和 [N] 分别为 36×10^{-6} 和 26×10^{-6} , 铸坯 T[O]、[N] 分别为 7×10^{-6} 和 43×10^{-6} , 铸坯中夹杂物主要为 Al_2O_3 -CaO- SiO_2 和 Al_2O_3 , 尺寸 $\leq 10 \mu\text{m}$ 。

关键词 80 t BOF-LF-RH-CC 流程 55SiCr 弹簧钢 T[O] [N] 夹杂物 洁净度

A Study on Cleanliness of Spring Steel 55SiCr during 80 t BOF-LF-RH-CC Steelmaking Process

Du Guangwei^{1,2} and Guo Hanjie¹

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Qinghai Engineering Consulting Center, Xining 810001)

Abstract The flowsheet for steelmaking of 280 mm × 325 mm casting bloom of steel 55SiCr (/% : 0.55C, 1.42Si, 0.67Mn, 0.008S, 0.67Cr) is 80 t BOF-LF-RH-CC process. With during BOF tapping adding Al, ferrosilicon and refining slag, controlling slag basicity $R(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$ about 2.0, RH refining for ≥ 20 min, soft blowing stirring for ≥ 15 min to control the transformation of inclusions in steel, the clean spring steel 55SiCr is gotten. Analysis results show that during LF refining process the inclusions in liquid transform from earlier period Al_2O_3 - SiO_2 -MnO and Al_2O_3 inclusions to inclusion Al_2O_3 -CaO- SiO_2 , after RH vacuum treatment the inclusions in liquid all transform to inclusion Al_2O_3 -CaO- SiO_2 , the T[O] and [N] at beginning LF refining are respectively 36×10^{-6} and 26×10^{-6} , and the T[O] and [N] in casting bloom are respectively 7×10^{-6} and 43×10^{-6} , and the inclusions in casting bloom are mainly Al_2O_3 -CaO- SiO_2 and Al_2O_3 with size $\leq 10 \mu\text{m}$.

Material Index 80 t BOF-LF-RH-CC Flowsheet, Spring Steel 55SiCr, T[O], [N], Inclusions, Cleanliness

弹簧在服役过程一般承受冲击、振动或周期性交变应力, 疲劳破坏是导致弹簧工件失效的重要原因, 而引起弹簧疲劳破坏的一个重要原因是钢中非金属夹杂^[1-3]。非金属夹杂物在钢中与基体构成镶嵌结构, 在钢加热或冷却过程中, 由于膨胀系数的不同, 夹杂物周围会产生嵌镶应力, 若钢中夹杂物数量多、直径大, 嵌镶应力场会叠加, 工件服役过程所受力与嵌镶应力叠加, 使夹杂物周围的应力超过钢的屈服极限, 导致裂纹产生, 形成疲劳源。

近年来, 随着汽车轻量化发展, 汽车对弹簧的使用强度和疲劳寿命要求越来越高。弹簧强度越高, 夹杂物对其疲劳性能的影响就愈显著, 夹杂物的“临界尺寸”就愈小^[4]。弹簧中非金属夹杂物的尺寸、数量、类型和形态分布均会对其疲劳性能和使用可靠性产生影响。如何实现钢中夹杂物小径化、洁净化甚至无害化受到弹簧钢生产企业的关注, 同时也是科研院所研究的热点之一^[5-8]。55SiCr 是应用

广泛的一种硅锰弹簧钢, 可用于制作汽车悬架簧、离合器簧、稳定杆、减震簧以及气门簧等。“BOF-LF 精炼-RH 处理-大方坯连铸”是生产 55SiCr 的一种重要工艺, 本文通过对钢厂 55SiCr 弹簧钢冶炼过程的洁净度和夹杂物的系统研究, 提出目前冶炼过程中存在的问题, 以期为提高产品质量提供参考。

1 实验方法

1.1 工业实验

实验钢种为 55SiCr, 采用“80 t BOF-LF-RH-大方坯连铸”的冶炼工艺。主要操作包括:

(1) 转炉出钢后分批加部分金属铝和硅铁合金, 同时加入精炼渣;

(2) LF 精炼主要完成脱氧、合金化、温度和成分控制, 精炼渣碱度 ($R = \text{CaO}/\text{SiO}_2$) 控制在 2.0 左右;

(3) RH 真空处理后通过底软吹进一步促进夹杂物充分上浮, RH 深真空处理时间不低于 20 min,

表 1 实验工艺过程取样		
Table 1 Samplings during test steelmaking process		
工位	取样点	编号
LF 精炼	LF 进站	LF1
	精炼 20 min	LF2
	LF 出站	LF3
RH 真空处理	处理 5 min	RH1
	处理 10 min	RH2
	处理结束	RH3
软吹 Ar	软吹 10 min	RC1
	软吹结束	RC2
中间包 铸坯	钢包浇铸 30 t 连铸坯(内弧 1/4)	中间包 铸坯

软吹时间不低于 15 min;

(4) 浇铸成 325 mm×280 mm 的方坯。
实验钢种目标成分(%)为:0.51~0.59C, 1.30~1.60Si, 0.60~0.80Mn, 0.60~0.80Cr, ≤0.015P, ≤0.015S, ≤0.008[N], ≤0.025 T[O]。为研究整个冶炼过程中钢水的洁净度和夹杂物控制水平,对冶炼过程进行系统取样,结果见表 1。

1.2 化学成分分析

从所取试样中切取 Φ5 mm×40 mm 的圆棒分析钢中 T[O] 和 [N], T[O] 和 [N] 用远红外脉冲分析法测定, T[O] 采用 GB/T11261-2006 标准, [N] 采用 GB/T20124-2006 标准。

所取渣样经粉碎、除铁和过筛后送至国家钢铁材料测试中心检测, 渣中 CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO、MnO 采用 X 射线荧光分析(GB/T21114-2007), FeO 采用 GB/T6730.8-1986 分析得到。

钢中 C、Si、Mn 和 S 等采用常规化学法分析, [Al]s 采用等离子质谱(ICP-MS)分析方法。

1.3 夹杂物检测

钢样经金相研磨、抛光后制成金相试样, 采用 Aspex exporer 扫描电镜对夹杂物的成分、形态、数量以及尺寸进行分析。本文只检测分析尺寸 1 μm 以上的氧化物夹杂。

2 结果讨论

2.1 化学成分的控制

表 2 为实验钢种在不同冶炼阶段的化学成分。LF 进站时, 钢中 [Al]s 较低, 仅为 15×10⁻⁶。钢的成分调整主要在 LF 精炼阶段完成, LF 精炼结束时, 钢中 C、Si、Mn、S、Cr 以及 [Al]s 含量均控制在目标水平。之后的 RH 真空处理和软吹操作过程中未添加任何合金, 铸坯中 [Al]s 为 51×10⁻⁶。

2.2 钢中 T[O] 和 [N] 变化

图 1 为钢中 T[O] 和 [N] 在不同冶炼阶段的变

表 2 精炼过程钢水和铸坯成分 / %						
Table 2 Analysis composition of liquid during refining process and casting bloom / %						
取样工序	C	Si	Mn	S	Cr	[Al]s
LF 进站	0.46	1.33	0.58	0.009 1	0.64	0.001 5
LF 处理 20 min	-	-	-	-	-	0.005 9
LF 出站	0.55	1.43	0.67	0.008 2	0.64	0.005 7
浇铸 40 t	-	-	-	-	-	0.005 2
铸坯	0.55	1.42	0.67	0.007 9	0.67	0.005 1

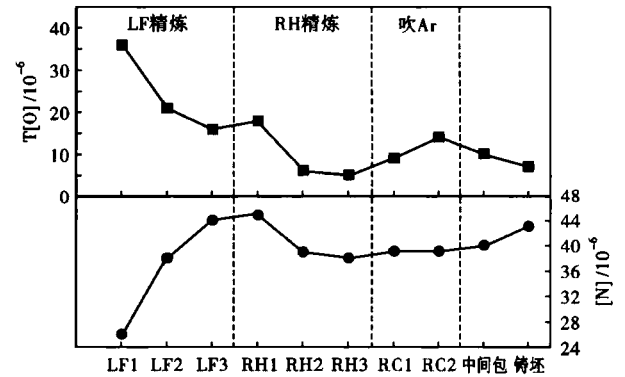


图 1 弹簧钢 55SiCr 生产过程中 T[O] 和 [N] 的变化
Fig.1 Change of T[O] and [N] in spring steel 55SiCr during steelmaking process

化曲线。LF1、LF2 和 LF3 分别为 LF 进站、精炼 20 min 以及精炼结束时的试样, 可以看出, LF 精炼过程钢中 T[O] 明显下降, 由进站时的 36×10⁻⁶ 降至 LF 精炼结束时的 16×10⁻⁶, T[O] 降低的主要原因是钢中脱氧元素 Si、Mn 以及 [Al]s 与钢中 [O] 反应生成氧化物夹杂并不断上浮去除。相反, LF 精炼阶段钢中 [N] 则呈上升趋势, 由进站时的 26×10⁻⁶ 增至 LF 精炼结束时的 44×10⁻⁶, [N] 的增加主要是 LF 精炼过程中电弧将空气中的 N₂ 电离进入钢液造成的。

RH1、RH2 和 RH3 分别为 RH 真空处理 5、10 min 以及处理结束时的试样, 钢中 T[O] 和 [N] 在 RH 精炼过程均呈下降趋势, 真空处理前 5~10 min 去除效果最佳, T[O] 和 [N] 的降幅最大, T[O] 由 18×10⁻⁶ 降至 6×10⁻⁶, [N] 则由 45×10⁻⁶ 降至 39×10⁻⁶, 之后随着真空处理时间的延长, 钢中 T[O] 和 [N] 虽有降低, 但并不明显。真空处理结束后, 钢中 T[O] 为 5×10⁻⁶, [N] 为 38×10⁻⁶。这是因为真空处理过程中, 需要一定时间才能达到深真空, RH 真空处理前 5 min 由于真空度不够低, 对钢中 T[O] 和 [N] 去除效果并不明显, 随着真空度的不断降低, 越来越有利于钢中 T[O] 和 [N] 的去除, 真空处理 5 min 后, 达到深真空, 有利于钢中 T[O] 和 [N] 的去除。经过一段时间后, T[O] 和 [N] 的去除趋于极限

值,因此,即便延长真空处理时间钢中T[O]和[N]降幅也十分有限。

RC1 和 RC2 为软吹 5 min 和软吹结束时的钢样,软吹过程钢中[N]基本保持不变,维持在 39×10^{-6} ,T[O]呈增加趋势,由 5×10^{-6} 增至 9×10^{-6} ,这是由于 Ar 流量控制不当,致使钢液吹露造成的。因此,软吹过程的 Ar 流量还有待进一步优化。

浇铸过程钢中[N]呈增加趋势,铸坯中[N]在 $43 \times 10^{-6} \sim 44 \times 10^{-6}$ 。浇铸过程由于夹杂物的上浮,钢中T[O]呈下降趋势,铸坯中T[O]降至 7×10^{-6} 。

2.3 精炼渣成分变化

由表 3 可知,随着精炼的进行,碱度(CaO/SiO₂)稍稍降低,由 LF 精炼初期的 2.4 降至软吹结束时的 2.1,渣的氧化性控制在合理水平,渣中(FeO + MnO) < 2%,总体上看,精炼过程中精炼渣的成分基本稳定。

2.4 夹杂物变化

2.4.1 夹杂物形貌

表 3 精炼过程中精炼渣成分和碱度

Table 3 Ingredient and basicity of refining slag during each refining phase / %

渣样	工位	渣成分 / %						碱度 (CaO/SiO ₂)
		CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	
LF1	LF 进站	38.4	7.6	15.7	37.0	0.6	0.7	2.4
LF2	精炼 20 min	39.9	7.7	17.3	33.6	1.1	0.4	2.3
LF3	LF 离站	39.4	8.0	18.0	32.5	1.7	0.4	2.2
RH3	真空结束	39.3	8.4	18.7	32.0	1.2	0.4	2.1
RC2	软吹结束	38.3	8.1	17.9	30.9	0.9	0.4	2.1

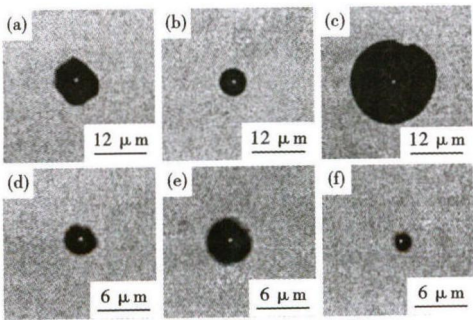


图 2 LF 精炼过程典型夹杂物形貌:LF 进站(a) Al₂O₃ 和(b) 51SiO₂-38Al₂O₃-11MnO;LF 精炼 20 min (c) 18SiO₂-51Al₂O₃-26CaO-4MgO 和(d) 15SiO₂-59Al₂O₃-24CaO-2MgO;LF 精炼结束 (e) 14SiO₂-54Al₂O₃-27CaO-5MgO 和 (f) 72Al₂O₃-14CaO-9SiO₂-4MgO

Fig. 2 Morphology of typical inclusions during LF refining process: LF beginning (a) Al₂O₃ and (b) 51SiO₂-38Al₂O₃-11MnO; LF refining for 20 min (c) 18SiO₂-51Al₂O₃-26CaO-4MgO and (d) 15SiO₂-59Al₂O₃-24CaO-2MgO; LF end (e) 14SiO₂-54Al₂O₃-27CaO-5MgO and (f) 72Al₂O₃-14CaO-9SiO₂-4MgO

LF 进站时,钢中存在 Al₂O₃ 和 SiO₂-Al₂O₃-MnO 两类夹杂,Al₂O₃ 多呈不规则棱角状,如 2(a) 所示, SiO₂-Al₂O₃-MnO 夹杂为球形,如图 2(b) 所示,说明炼钢温度条件下, SiO₂-Al₂O₃-MnO 夹杂为液态夹杂。LF 精炼 20 min 后,钢中以球形 Al₂O₃-CaO-SiO₂ 夹杂为主,如图 2(c) ~ (f) 所示。

RH 真空处理和软吹时,钢中仍以球形 Al₂O₃-SiO₂-CaO 夹杂为主,但是夹杂物尺寸明显小于 LF 精炼过程,如图 3 所示,说明大尺寸夹杂在 RH 真空处理和软吹过程上浮去除。

中间包试样中以 Al₂O₃-CaO-SiO₂ 夹杂为主,如图 4(a) 和(b) 所示,铸坯中存在两类夹杂,一类为

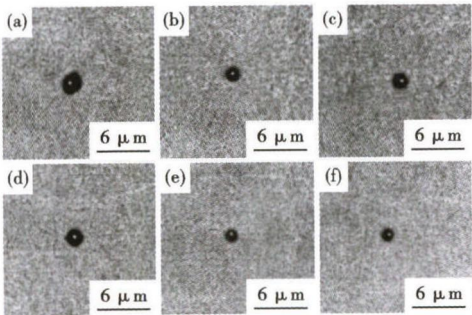


图 3 RH 精炼过程典型夹杂物形貌:RH 处理 5 min (a) 62Al₂O₃-22CaO-15SiO₂-1MgO; (b) 75Al₂O₃-12CaO-8SiO₂-5MgO;RH 处理结束 (c) 65Al₂O₃-19CaO-14SiO₂-2MgO 和 (d) 56Al₂O₃-27CaO-15SiO₂-2MgO;软吹结束 (e) 52Al₂O₃-27CaO-18SiO₂-2MgO 和 (f) 51Al₂O₃-31CaO-16SiO₂-2MgO

Fig. 3 Morphology of typical inclusions during RH refining process: RH treating for 5min (a) 62Al₂O₃-22CaO-15SiO₂-1MgO and (b) 75Al₂O₃-12CaO-8SiO₂-5MgO; RH end (c) 65Al₂O₃-19CaO-14SiO₂-2MgO and (d) 56Al₂O₃-27CaO-15SiO₂-2MgO; soft Ar blowing end (e) 52Al₂O₃-27CaO-18SiO₂-2MgO and (f) 51Al₂O₃-31CaO-16SiO₂-2MgO

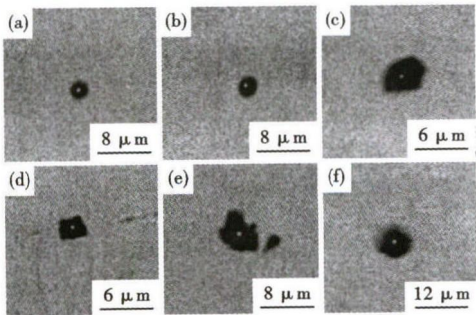


图 4 中间包和铸坯中典型夹杂物形貌:中间包(a) 67Al₂O₃-19CaO-10SiO₂-3MgO 和 (b) 68Al₂O₃-19CaO-11SiO₂-2MgO;铸坯(c) Al₂O₃, (d) 91Al₂O₃-9MgO, (e) 43Al₂O₃-29CaO-25SiO₂-2MgO 和(f) 66Al₂O₃-16CaO-14SiO₂-3MgO

Fig. 4 Morphology of typical inclusions in liquid in tundish: (a) 67Al₂O₃-19CaO-10SiO₂-3MgO and (b) 68Al₂O₃-19CaO-11SiO₂-2MgO; in casting bloom: (c) Al₂O₃, (d) 91Al₂O₃-9MgO, (e) 43Al₂O₃-29CaO-25SiO₂-2MgO and (f) 66Al₂O₃-16CaO-14SiO₂-3MgO

如图 2(c)和(d)所示的棱角状 Al_2O_3 夹杂,一类为如图 2(e)和(f)所示的球形 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 夹杂。

2.4.2 夹杂物成分和尺寸变化

LF 进站时,由于出钢过程加入了合金和精炼渣,钢中生成大量夹杂物,此时钢中 $[\text{Al}]$ 较低,为 20×10^{-6} ,见表 2,钢中 Ca 活度不高,钢中夹杂物以 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MnO}$ 和 Al_2O_3 为主。两类夹杂物的成分分布如图 5(a)所示。从夹杂物尺寸上看,10 μm 以上夹杂主要是 Al_2O_3 夹杂,大部分 $\text{CaO-SiO}_2\text{-MnO}$ 夹杂尺寸在 5 μm 以下,仅发现少量尺寸为 5 ~ 10 μm 的 $\text{CaO-SiO}_2\text{-MnO}$ 夹杂。

随着精炼的进行以及铝的不断加入,钢中 $[\text{Al}]$ s 不断增加,LF 精炼 20 min 时,钢中 $[\text{Al}]$ s 增至 59×10^{-6} ,钢中 $[\text{Al}]$ s 的增加促进了精炼渣与钢液之间的反应,导致钢中 Ca 活度增加,钢中 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MnO}$ 夹杂逐渐转变为 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 夹杂。如图 5(b)所示,LF 精炼 20 min 时,钢中夹杂物以 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 和 Al_2O_3 为主,从夹杂物尺寸看,大部分夹杂物尺寸在 5 μm 以下,存在少量尺寸在 10 μm 以上的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 夹杂。随着精炼的继续进行,钢中 Al_2O_3 不断转变为 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 系夹杂,如

图 5(c)所示,LF 精炼结束时,钢中主要以 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 夹杂为主,仅存在少量 Al_2O_3 夹杂,并且没有检测到 10 μm 以上的夹杂,说明 LF 精炼有去除大尺寸夹杂的效果。

RH 真空处理以及软吹过程中夹杂物仍以 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 夹杂为主,与 LF 精炼阶段相比夹杂物有以下几点变化:

- (1)夹杂物中 CaO 含量较 LF 精炼结束有所增加,如图 6 所示,夹杂物中 CaO 含量均在 40% 以上;
- (2)钢中已经不存在 Al_2O_3 夹杂,尤其是真空处理结束以及软吹结束,钢中均未检测到 Al_2O_3 夹杂,如图 6(b)和(c)所示;
- (3)大尺寸夹杂物数量较 LF 精炼结束明显减少,RH 真空处理结束后夹杂物均在 10 μm 以下,如图 6(b)所示,软吹结束后所检测到的钢中夹杂物尺寸均在 5 μm 以下,如图 6(c)所示。

以上 3 点变化说明,RH 真空处理和软吹过程中精炼渣/钢液/夹杂物三者之间仍然进行着化学作用,导致夹杂物中 CaO 含量不断增加,并且大尺寸夹杂在此过程得到了上浮去除。

中间包试样中夹杂物以 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 夹杂

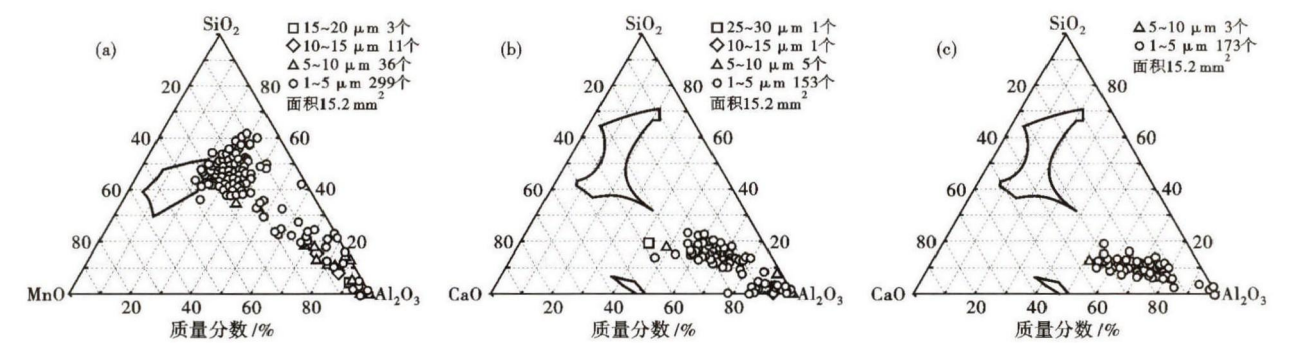


图 5 LF 精炼阶段夹杂物成分和尺寸分布:(a)LF 进站;(b)LF 精炼 20 min;(c)LF 精炼结束
Fig. 5 Distribution of ingredient and size of inclusions in liquid during LF refining process: (a) LF beginning; (b) LF refining for 20min and (c) LF end

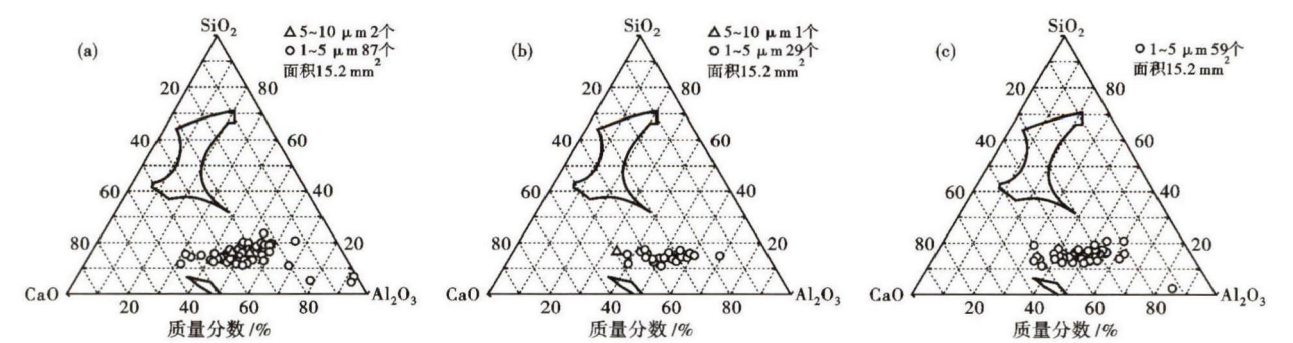


图 6 RH 真空处理和软吹阶段夹杂物成分和尺寸分布:(a)RH 处理 5 min;(b)RH 结束;(c)软吹结束
Fig. 6 Distribution of ingredient and size of inclusions in liquid during RH vacuum treatment process and soft blowing: (a) RH treating for 5 min; (b) RH end and (c) soft blowing end

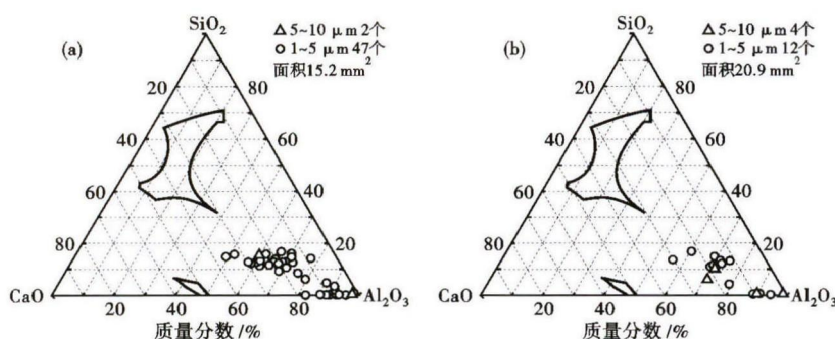


图 7 中间包钢水(a)和铸坯(b)中夹杂物成分和尺寸分布

Fig. 7 Distribution of ingredient and size of inclusions in liquid in tundish (a) and in casting bloom (b)

和 Al_2O_3 夹杂为主,与软吹结束时相比,钢中出现了部分 Al_2O_3 夹杂,如图 7(a)所示,这部分 Al_2O_3 夹杂可能是浇铸过程钢液裸露发生二次氧化造成的。铸坯夹杂物仍以 Al_2O_3 -CaO- SiO_2 夹杂和 Al_2O_3 夹杂为主,但是夹杂物数量明显低于中间包,如图 7(b)所示,这是由于夹杂物在中间包上浮去除的原因。中间包和铸坯中所检测到的夹杂物尺寸均在 $10\ \mu\text{m}$ 以下。

3 结论

(1) 采用“BOF-LF 精炼-RH 真空处理-软吹-CC”生产工艺,精炼过程采取 Al-Si 脱氧,钢中 $[\text{Al}]$ 控制在 55×10^{-6} 左右,精炼渣碱度保持 2.0 左右,渣中 Al_2O_3 保持 35% 左右,有利于将铸坯中夹杂物数量控制在较低水平,所得铸坯 $T[\text{O}] = 7 \times 10^{-6}$ 。

(2) RH 真空处理能够有效去除夹杂,降低钢中 $T[\text{O}]$ 和 $[\text{N}]$,钢中 $T[\text{O}]$ 由真空处理前的 18×10^{-6} 降至真空处理后的 5×10^{-6} , $[\text{N}]$ 则由真空处理前的 45×10^{-6} 降至真空处理后的 38×10^{-6} 。

(3) 软吹阶段由于 Ar 流量控制不当,钢中 $T[\text{O}]$ 由软吹前的 5×10^{-6} 增至软吹后的 14×10^{-6} ,因此,软吹处理时应合理控制 Ar 气流量,避免因 Ar 流量过大将钢液吹裸露,导致钢液二次氧化。

(4) LF 精炼前,钢中夹杂物以 Al_2O_3 - SiO_2 -MnO 和 Al_2O_3 夹杂为主,随着渣/钢/夹杂物之间反应的进行, Al_2O_3 - SiO_2 -MnO 和 Al_2O_3 夹杂均逐渐转变为

熔点较低的 CaO- SiO_2 -CaO 夹杂。软吹结束后,浇铸前钢中夹杂物全部转变为 Al_2O_3 - SiO_2 -CaO 夹杂,且夹杂物尺寸在 $10\ \mu\text{m}$ 以下。

(5) 由于浇铸过程中钢液的二次氧化,中间包钢液中又生成了 Al_2O_3 夹杂,最终铸坯中夹杂以 Al_2O_3 -CaO- SiO_2 和 Al_2O_3 夹杂为主,由于夹杂物在中间包的上浮去除,铸坯中 $T[\text{O}] = 7 \times 10^{-6}$ 且夹杂物尺寸

在 $10\ \mu\text{m}$ 以下,得到了洁净度较高的弹簧钢铸坯,但是浇铸过程钢液的二次氧化应引起关注。

参考文献

- [1] Furuya Y, Matsuoka S, Abe T. Inclusion-controlled Fatigue Properties of 1800 MPa-Class Spring Steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2004, 35A(12): 3737-3744.
- [2] Murakami Y. Quantitative Evaluation of Effects of Defects and Non-Metallic Inclusions on Fatigue Strength of Metals [J]. Tetsu to Hagane, 1989, 75(8): 1267-1277.
- [3] Sumie S, Nobuhiko I. The Past and Future of High-Strength Steel for Valve Springs [J]. Kobelco Technology Review, 2005, 26(11): 21-25.
- [4] Yang Z G, Zhang J M, Li S X, et al. On the Critical Inclusion Size of High Strength Steels Under Ultra-High Cycle Fatigue [J]. Materials Science and Engineering, 2006, 427A(1-2): 167-174.
- [5] 周红霞, 王 郢, 王新华. 超低氧弹簧钢 60Si2Mn 的夹杂物研究 [J]. 特殊钢, 2008, 29(2): 47-49.
- [6] 陈文满, 文 敏, 廖 明, 等. 80 t 复吹转炉-LF-CC 流程生产 65Mn 弹簧钢的工艺实践 [J]. 特殊钢, 2009, 30(1): 52-53.
- [7] 余国松, 杜建新. 弹簧钢 100 t DC EAF-LF-VD 流程无铝脱氧工艺实践 [J]. 特殊钢, 2010, 31(3): 38-40.
- [8] 王向红, 周 俐, 刘天泉, 等. Al_2O_3 - SiO_2 -CaO 精炼渣系对 55SiCrA 弹簧钢夹杂物形态控制的影响 [J]. 特殊钢, 2013, 34(3): 14-17.

杜广巍(1971-),男,博士生,高级工程师,1994 年昆明工学院(本科)毕业,钢铁冶金研究。

E-mail: dgw710619@126.com

收稿日期: 2016-02-18