

100 t LD-LF-RH-CC 流程冶炼 60Si2Mn 弹簧钢非金属夹杂研究

刘飞¹ 岳峰¹ 刘佳伟² 肖波³ 翟万里³

(北京科技大学1钢铁共性技术协同创新中心,2材料科学与工程学院,北京100083;

3江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司总工办,淮安223002)

摘要 试验60Si2Mn弹簧钢(‰:0.58C,1.75Si,0.75Mn,0.012P,0.005S,0.006Als,0.008Alt)的工艺流程为100 t转炉不加铝饼脱氧,采用硅铁脱氧,控制终点[C]≥0.08%,出钢温度1620~1660℃,LF到站温度≥1500℃,精炼时间不少于35 min,RH真空度≤100 Pa并且保持时间≥20 min,软吹前喂入硅钙线100 m进行变性夹杂物处理,150 mm方坯采用全程保护浇铸。分析结果表明,钢中氧含量在RH精炼过程中到达最低,在中间包阶段又有所回升。在LF精炼中,钢液增氮明显。夹杂物成分以Al₂O₃、SiO₂、MgO和CaO为主,在LF精炼过程中,SiO₂含量下降了26.7%,MgO和CaO含量上升了36.7%,最终铸坯中夹杂物成分为33% Al₂O₃,20.7% SiO₂,45% MgO和CaO,减少了钢中高硬度夹杂物的含量。

关键词 100 t LD-LF-RH-CC 流程 弹簧钢 60Si2Mn 夹杂物 尺寸 成分

Study on Nonmetallic Inclusions in Spring Steel 60Si2Mn Produced by 100 t LD-LF-RH-CC Flow Sheet

Liu Fei¹, Yue Feng¹, Liu Jiawei², Xiao Bo³ and Zhai Wanli³

(1 Collaborative Innovation Center of Steel Technology, 2 School of materials science and engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 3 Chief Engineer Office, Huaigang Special Steel Co Ltd, Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002)

Abstract The production process of tested spring steel 60Si2Mn(‰:0.58C,1.75Si,0.75Mn,0.012P,0.005S,0.006Als,0.008Alt) is not adding aluminum cake but adding ferrosilicon to deoxidize in an 100 t converter, controlling end [C]≥0.08%, and tapping liquid temperature 1620~1660℃, LF original temperature ≥1500℃, refining time no less than 35 min, RH vacuum ≤100 Pa for ≥20 min, feeding 100 meters of calcium and silicon wire for modification of inclusions before soft blowing, in whole process shielding-atmosphere casting 150 mm square billet. Analysis results show that the oxygen content in steel reaches the lowest in RH refining process, and rises in tundish stage. In LF refining process, the nitrogen increase of liquid steel is obvious. Inclusions are mainly composed of Al₂O₃, SiO₂, MgO and CaO. During LF refining, the content of SiO₂ decreases to 26.7%, while the content of MgO and CaO increases to 36.7%. Finally, the inclusions in the casting billet are 33% Al₂O₃, 20.7% SiO₂ and 45% MgO and CaO to decrease the high hardness inclusions in steel.

Material Index 100 t LD-LF-RH-CC Flow Sheet, Spring Steel 60Si2Mn, Inclusions, Size, Ingredient

弹簧钢中的全氧含量和夹杂物对弹簧钢的疲劳寿命具有重要影响,降低钢中的全氧含量,控制夹杂物类型及尺寸可以提高弹簧钢的使用寿命^[1]。钢中非金属夹杂物的来源主要包括转炉出钢后的精炼过程和凝固过程^[2]。夹杂物按来源分类可分为内生夹杂物与外来夹杂物,内生夹杂物典型的特点是尺寸小,数目多,其类型主要包括单元素脱氧产物、复合元素脱氧产物及合成渣脱氧,尺寸常在几十微米至几百微米之间,但它们也有可能聚合成簇状物或宏观夹杂^[3]。而外来夹杂物则不同,往往尺寸较大,形状不规则,此类夹杂物的形成大多发生在钢液与卷入的炉渣(包括保护渣)或耐火材料接触时^[4]。

本研究为在100 t LD→LF→RH→CC的工艺流程下,采用硅脱氧,碱度控制在3~4情况下,对淮钢

60Si2Mn弹簧钢150 mm方坯的氧氮含量和氧化物夹杂物数量、成分变化规律以及铸坯中大颗粒夹杂物的控制进行了研究,为工业生产提供相应的理论依据。

1 研究方法

1.1 生产工艺

试验60Si2Mn弹簧钢(‰:0.58C,1.75Si,0.75Mn,0.012P,0.005S,0.006Als,0.008Alt)的生产工艺流程为100 t LD→LF→RH→CC。

100 t转炉出钢不加铝饼脱氧,采用硅铁脱氧,终点碳含量不低于0.08%,出钢温度1620~1660℃,出钢过程加入400 kg的石灰和400 kg的精炼渣。LF精炼采用低碱度精炼渣系(成分如表1),精炼时间不少于35 min,出钢、精炼前期和调整成分时,采

表 1 60Si2Mn 弹簧钢 LF 精炼渣成分和碱度
 Table 1 Ingredient of LF refining slag for spring steel 60Si2Mn and basicity

精炼渣	精炼渣成分/%						碱度 (R)	CaO/Al ₂ O ₃
	MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO		
LF 初渣	5~9	24~30	54~63	6~10	0~3	0~1	1~3	5~9
LF 终渣	5~7	20~29	57~64	5~11	0~2	0~1	2~3	5~12

用大搅拌吹氩强度,强化脱硫和均匀成分。RH 真空度 ≤ 100 Pa, 保持时间 ≥ 20 min, 控制破空钢水 [H] ≤ 2 × 10⁻⁶, 软吹前喂入 100 m 硅钙线进行变性处理。控制连铸钢水过热度 20 ~ 35 °C, 150 mm 的方坯生产采用全程保护浇注。

1.2 试验方法

弹簧钢 60Si2Mn 在正常生产工艺条件下, 选取三个炉次进行取样跟踪研究, 具体取样方案为: 转炉, LF 化渣, LF 出站, RH 破空, 吊包, 中间包, 铸坯。

对于 60Si2Mn 弹簧钢夹杂物的演变规律研究, 本试验将所有工序的试样加工成金相样 (15 mm × 15 mm × 15 mm), 将金相样进行粗磨、精磨和抛光, 采用 ZEISS ULTRA 55 热场发射扫描电镜进行观察。

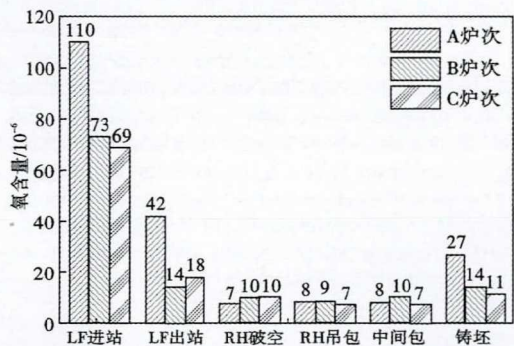


图 1 60Si2Mn 弹簧钢冶炼过程氧含量变化

Fig. 1 Variation of T[O] of spring steel 60Si2Mn in steelmaking process

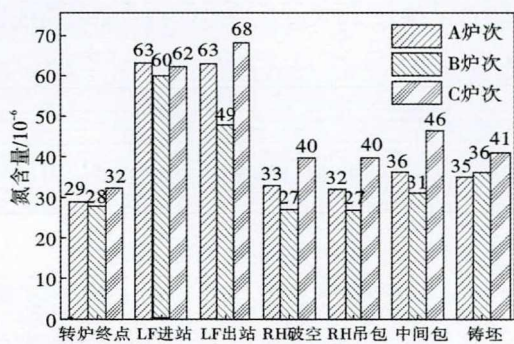


图 2 60Si2Mn 弹簧钢冶炼过程氮含量变化

Fig. 2 Variation of T[N] of spring steel 60Si2Mn in steelmaking process

随机选取金相样中 10 个夹杂物, 采用能谱 EDS 分析测定夹杂物的化学成分。同时, 对 60Si2Mn 弹簧钢每个炉次的铸坯样由内弧至外弧加工成 3 块金相试样 (50 mm × 50 mm × 15 mm), 利用扫描电镜中的

连续扫描功能观察金相样品。ZEISS ULTRA 55 热场发射扫描电镜中的连续扫描功能可以自动控制样品台移动, 逐一视场采集; 确定最小检测颗粒, 自动改变放大倍数; 选定标准类型, 自动输出报告; 选择感兴趣颗粒, 自动重新定位。60Si2Mn 弹簧钢中夹杂物尺寸越大, 危害越大, 有时一炉钢中仅仅一个大颗粒夹杂物就可造成严重缺陷。本次试验自动扫描设置最小宽度为 20 μm, 对铸坯样的夹杂物进行统计分析。

另外, 本次试验利用红外吸收法 (GB/T 11261-2006) 检测钢棒样的 T[O], 利用热导法 (GB/T 20124-2006) 检测钢棒样中的 [N] 含量^[5]。

2 试验结果

2.1 氧氮分析

由图 1 可知, LF 精炼结束后, 氧含量控制在 16 × 10⁻⁶, 脱氧效果显著, 氧含量降低 77%。在 RH 精炼过程中, 氧含量进一步降低, 降低 6 × 10⁻⁶, 降低 37.5%。在软吹阶段, 氧含量基本没有变化, 因此软吹对降氧效果并不明显。在连铸阶段, 钢中氧含量略有上升, 与氮含量的变化是一致同步的, 这是因为没有做好保护浇注, 造成钢液与空气接触, 最终铸坯中平均氧含量为 17 × 10⁻⁶。

由图 2 可知, 转炉终点平均氮含量为 30 × 10⁻⁶, 在 LF 精炼过程有明显的增氮现象, 氮增加 32 × 10⁻⁶, 在 LF 精炼开始阶段, 加入的渣料未完全融化, 在电弧区极易增氮。RH 阶段钢液中的氮含量降至转炉终点的状态, 降低 27 × 10⁻⁶, 降低 45%, 说明 RH 具有一定脱氮能力, RH 阶段氮含量的降低主要是钢液中的氮以氮气的形式析出。最终铸坯中平均氮含量为 37 × 10⁻⁶。

2.2 夹杂物演变规律

根据各工序夹杂物能谱检测结果统计, 可以得出各工序夹杂物平均成分变化规律, 如图 3 所示。

由图 3(a) (b) (c) 可以看出, A 炉次夹杂物中 Al₂O₃ 含量由 LF 进站时的 41% 下降至铸坯中的 32%, 减少了 9%; C 炉次夹杂物中 Al₂O₃ 含量由 LF 进站时的 59% 下降至铸坯中的 37%, 减少了 22%;

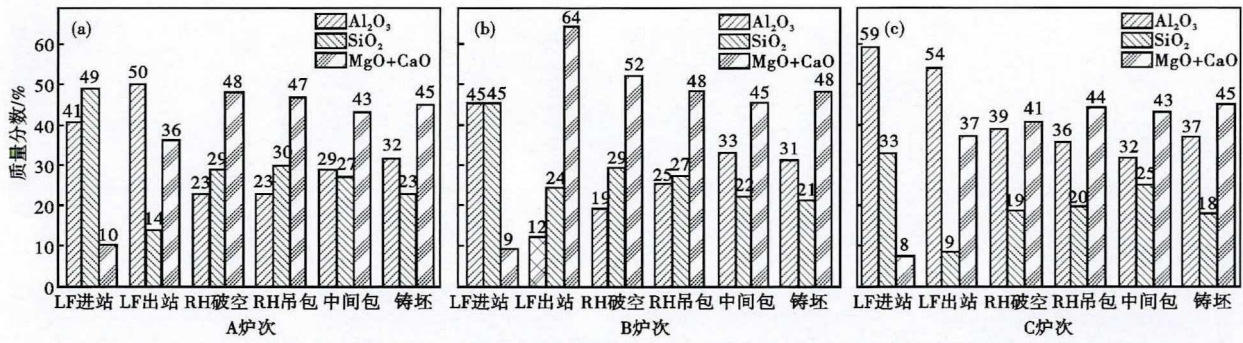


图 3 A 炉次(a), B 炉次(b)和 C 炉次(c)各工序夹杂物平均成分含量变化

Fig. 3 Variation of average composition content of inclusions in heat A (a), heat B (b) and heat C (c) in each phase

B 炉次夹杂物中 Al₂O₃ 在 LF 冶炼过程中由进站的 45%降低至出站 12%, CaO 含量由进站的 9%升高至出站的 64%,可能是 LF 炉渣碱度较高引起。铸坯的夹杂物中 Al₂O₃ 含量均保持在 33%左右。

经过 LF 工序后,渣中大量的钙进入钢液,夹杂物成分以 Al₂O₃ 和 MgO + CaO 为主,夹杂物中 SiO₂ 含量出现大幅度降低,3 个炉次平均降低 26.7%,夹杂物中 MgO + CaO 含量大幅升高,3 个炉次平均升高 36.7%,说明夹杂物成分受渣成分影响较为显著。

3 个炉次(A, B, C 炉次)的夹杂物成分在 LF 精炼阶段略有差异,但最终铸坯中成分相近,分布较为集中,Al₂O₃ 含量稳定在 33%,(MgO + CaO)含量稳定在 46%,SiO₂ 含量稳定在 21%。夹杂物中的 Al₂O₃ 含量减少,夹杂物变性效果良好,有利于夹杂物的去除,减少高硬度夹杂物的危害,有利于提高弹簧钢的质量。

2.3 大颗粒夹杂物成分数量研究

对铸坯金相样进行大颗粒夹杂物扫描电镜自动分析,9 块金相试样共观察到尺寸大于 20 μm 的大颗粒夹杂物 25 个,其中尺寸大于 50 μm 的大型夹杂物有 2 个,占 8%,说明弹簧钢夹杂物尺寸控制较好,大颗粒夹杂物对弹簧钢性能的影响较小。检测到的夹杂物具体成分及尺寸如表 2 所示。

由表 2 可以看出,25 个大型夹杂物中最大尺寸为 83.6 μm,最小尺寸为 20.1 μm。83.6 μm 的夹杂物电镜面扫描如图 4 所示,成分以 Al₂O₃-SiO₂-(MgO + CaO)为主。

大颗粒夹杂物中有 15 个至少含有 Na 和 K 元素中的一种,占 60%,这可能是由于冶炼过程中存在结晶器卷渣的原因。

由表 2 可知,大颗粒夹杂物的主要成分为 MgO、Al₂O₃、SiO₂ 和 CaO,根据表 2 数据绘制大型夹杂物

表 2 60Si2Mn 钢大颗粒夹杂物主要成分和尺寸

Table 2 Main ingredients and size of large inclusions in steel 60Si2Mn

编号	夹杂物成分/%							尺寸/ μm
	O	Mg	Al	Si	Ca	Na	K	
A-1	55.77	-	-	44.23	-	-	-	21.1
A-2	64.29	5.31	4.97	7.88	16.84	-	0.72	45.7
A-3	56.27	-	0.97	41.78	0.56	0.15	0.25	21.1
A-4	65.78	0.55	12.96	14.31	5.11	0.74	0.56	49.0
A-5	54.08	0.79	10.64	26.71	1.24	5.82	0.73	36.4
A-6	52.61	-	-	0.72	46.29	0.24	-	22.0
A-7	57.79	0.36	3.30	37.24	0.16	0.17	0.97	28.8
A-8	53.19	-	0.27	46.18	0.27	-	-	28.9
A-9	62.00	7.08	0.26	4.40	25.78	0.23	0.26	32.0
A-10	66.19	-	-	33.70	-	-	-	61.3
A-11	51.89	0.31	1.34	45.88	-	0.23	0.24	31.6
A-12	71.48	13.49	-	0.97	13.62	0.42	-	48.9
A-13	51.24	0.51	19.09	21.13	0.28	0.58	7.16	32.0
A-14	51.20	0.84	17.91	22.33	0.27	0.40	7.05	31.5
A-15	52.28	2.59	12.56	26.15	3.48	0.33	2.59	46.7
B-1	39.77	0.61	11.77	11.69	36.15	-	-	25.0
B-2	42.91	0.97	17.64	9.57	28.83	-	-	21.5
B-3	42.47	1.78	15.92	10.97	28.72	0.15	-	22.3
B-4	41.41	1.71	13.64	10.20	32.99	-	-	20.1
B-5	42.48	1.10	15.91	9.95	30.49	-	-	21.8
B-6	41.69	1.72	15.64	11.53	29.33	-	0.10	25.0
B-7	40.33	0.32	13.59	11.78	33.98	-	-	23.5
B-8	40.50	11.02	14.68	9.10	24.60	-	0.11	22.8
C-1	42.73	1.48	16.64	10.26	28.82	-	-	25.8
C-2	42.10	7.08	1.47	15.61	33.66	-	-	83.6

在 Al₂O₃-SiO₂-(MgO + CaO) 伪三元系中的分布情况,如图 5 所示。

由表 2 和图 5 可知, A 炉次中的大型夹杂物成分较为分散,有 5 个以 SiO₂ 为主,可能是由于引流砂的操作不当引起;2 个以 (MgO + CaO) 为主,与渣中的钙含量、卷渣有关;B 炉次中的大型夹杂物成分较为均匀, SiO₂ 平均含量为 23.25%, Al₂O₃ 平均含量为 28.76%, (MgO + CaO) 平均含量为 47.99%。这与扫描电镜检测铸坯中夹杂物的成分接近,这对于减小高硬度夹杂物带来的危害提高弹簧钢的质量有利。

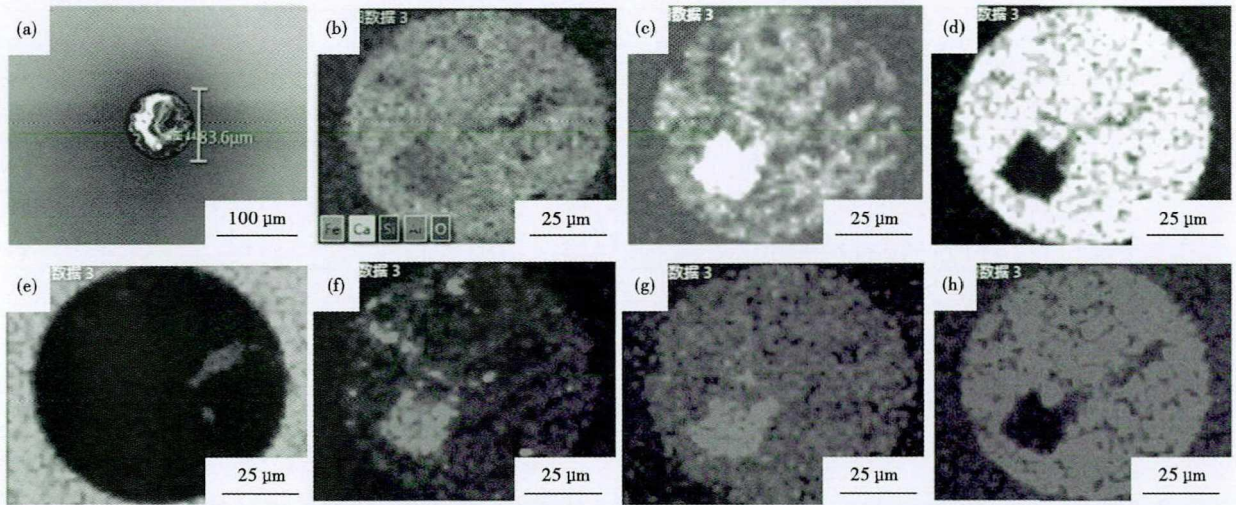


图 4 60Si2Mn 钢 83.6μm 夹杂物 (a), (b) 的面扫描: (c) Al; (d) Ca; (e) Fe; (f) Mg; (g) O; (h) Si
Fig. 4 Surface scanning of 83.6μm inclusion (a), (b) in steel 60Si2Mn: (c) Al; (d) Ca; (e) Fe; (f) Mg; (g) O; (h) Si

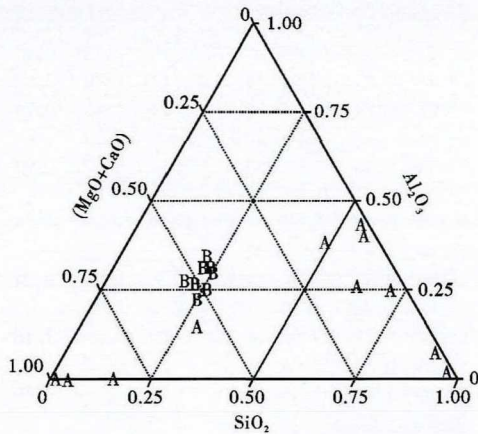


图 5 60Si2Mn 钢大型夹杂物分布伪三元相图
Fig. 5 Pseudo-ternary phase diagram of large inclusions distribution in steel 60Si2Mn

3 结论

(1) LF 精炼过程增氮明显, 由 29.7×10^{-6} 增加至 61.7×10^{-6} , 主要是因为钢液长期裸露在空气中, 解决措施为提高钢液到站温度, 减少钢液裸露时间。RH 精炼过程对于氧含量的降低具有显著作用, 由 16×10^{-6} 降至 9×10^{-6} , 说明 RH 精炼具有良好的脱气效果, 而软吹过程对于降低氧含量效果不大。在连铸阶段, 钢中氧含量略有上升, 与氮含量的变化是同步一致的, 这是因为没有做好保护浇注, 造成钢液与空气接触。

(2) 夹杂物成分以 $Al_2O_3-SiO_2-(MgO + CaO)$ 复合氧化物为主, Al_2O_3 含量在整个过程中有所减少, 在 LF 精炼过程中 SiO_2 含量下降了 26.7%, ($MgO +$

CaO) 含量上升了 36.7%, 主要是受渣成分的影响。最终铸坯中夹杂物 Al_2O_3 含量稳定在 33%, ($MgO + CaO$) 含量稳定在 46%, SiO_2 含量稳定在 21%。夹杂物中的 Al_2O_3 含量减少, 夹杂物变性效果良好, 有利于夹杂物的去除, 减小高硬度夹杂物的危害, 有利于提高弹簧钢的质量。

(3) 大颗粒夹杂物尺寸控制较好, 减小了大型夹杂对弹簧钢质量的影响; 大颗粒夹杂物的成分以 $Al_2O_3-SiO_2-(MgO + CaO)$ 为主, 为复合氧化物夹杂; 发现 60% 的大颗粒夹杂至少含有 Na 和 K 元素中的一种, 说明存在结晶器卷渣现象; 此外, 还发现有 20% 的大颗粒夹杂物成分以纯 SiO_2 为主。

参考文献

- [1] 殷雪. 汽车悬架弹簧钢非金属夹杂物塑性化控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [2] 董履仁, 刘新华. 钢中大型非金属夹杂物[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [3] Thorbjorn Hansen, Par Jonsson. Some Ideas of Determining the Macro Inclusion Characteristic During Steelmaking [C]. // 2001 Electric Furnace Conference Proceedings. Warrendale: ISS, 2001: 71.
- [4] 陈俊杰, 刘建华, 刘建飞, 等. IF 钢连铸坯表层夹杂物[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(S1): 173-178.
- [5] 刘佳伟, 岳峰, 王子健. 100 t BOF-LF-RH-CC 流程冶炼 GCr15 轴承钢非金属夹杂的演变[J]. 特殊钢, 2017, 38(3): 61-65.

刘飞(1995-), 女, 硕士生, 2018 年辽宁科技大学(本科)毕业, 中低碳钢大颗粒夹杂物控制研究。
E-mail: bkd.liufei@foxmail.com

收稿日期: 2020-04-01