

改善 60 t EAF-LF-VD-CC 流程冶炼齿轮钢 FAS3420H 洁净度的研究

安杰¹ 李涛¹ 李刚² 冯桂萍² 张妍³

(抚顺特殊钢股份有限公司 1 总工办; 2 技术中心; 3 中心试验室, 抚顺 113001)

摘要 以抚顺特钢一炼钢厂的生产数据为实践依据, 以改善汽车齿轮钢 FAS3420H 的洁净度为目的。使用扫描电镜分析水口结瘤物和棒材中氧化物夹杂的化学成分, 确定了通过减少钢中的 B 类夹杂物来解决水口结瘤问题的方向。通过优化电弧炉供氧曲线降低钢水氧化性、优化精炼炉渣流动性和碱度提高夹杂物吸附能力等措施, 解决了连铸过程水口结瘤问题, 同时达到棒材的氧含量平均值为 9.2×10^{-6} , B 类夹杂物 B 细不高于 1.0 级、B 粗不高于 0.5 级的控制水平。

关键词 齿轮钢 FAS3420H 60 t EAF-LF-VD-CC 流程 洁净度 夹杂物

Study on Improving Cleanliness of Gear Steel FAS3420H Steelmaking by 60 t EAF-LF-VD-CC Flow Sheet

An Jie¹, Li Tao¹, Li Gang², Feng Guiping² and Zhang Yan³

(1 Chief Engineer Office; 2 Technology Center; 3 Central Laboratory, FuShun Special Steel Shares Co., Ltd., FuShun 113001)

Abstract On the basis of actual production data in the first steelmaking plant of FuSteel, the objective is to improve cleanliness of automobile gear steel FAS3420H. The nozzle clogging and oxide inclusion are analyzed by using SEM and the aim of solving nozzle clogging is defined, that is decreasing B inclusion in steel. Several measures were implemented, such as optimizing oxygen supply curve of EAF to reduce liquid steel oxidation, optimizing fluidity and basicity of LF slag to increase adsorption capacity of inclusion. The problem of nozzle clogging is solved during production process of continuous casting. The average oxygen mass fraction in production can reach to 9.2×10^{-6} , B thin series rating of inclusions is no more than 1.0 and B coarse series rating of inclusions is less than or equal to 0.5 in bar.

Material Index Gear Steel, FAS3420H, 60 t EAF-LF-VD-CC Flow Sheet, Cleanliness, Inclusion

抚顺特殊钢股份有限公司第一炼钢厂主要生产各类汽车钢, 其中 FAS3420H 钢属于 Cr-Ni-Mo 系齿轮钢, 用于制造重型卡车或客车的传动齿轮、齿轮轴等零部件。汽车齿轮是重要的传动零件, 起着传递动力及改变速度和方向的作用^[1], 要求具备优良的抗疲劳破坏性能, 必须对钢中非金属夹杂物严格控制^[2]。下游用户对产品洁净度要求日趋苛刻, 同时连铸生产亦存在水口结瘤现象影响产品质量和生产顺行。所以, 本研究通过优化冶炼工艺以提高夹杂物控制水平。

1 汽车齿轮钢 FAS3420H 生产工艺流程

FAS3420H 钢是抚顺特钢产量最大的汽车齿轮钢之一, 其化学成分要求见表 1。

抚顺特钢一炼钢厂生产汽车齿轮钢 FAS3420H 的工艺流程为: 60 t EAF→LF→VD→CC。生产工艺参数见表 2。

电弧炉采用偏心底出钢, 出钢过程混冲碳粉、铝锭、白灰、钙铝预熔渣等材料预脱氧和造渣; LF 使用铝粒、SiC 粉和碳粉混合扩散脱氧, 并喂入铝线调整钢中铝含量, LF 精炼过程强调白渣精炼和炉渣流动性。VD 处理前喂入 CaSi 线 1.5 m/t, 同时最后调整铝含量; 钢中氮含量的控制通过 LF 底吹氮气增氮和 VD 脱氮来完成。VD 处理后除喂入硫线调整硫含量外, 不再允许其它任何元素的合金化操作, 软吹时间 ≥ 20 min; 连铸中间包过热度控制为 25 ~ 35 ℃。

表 1 FAS3420H 钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of FAS3420H steel /%

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	O	N
0.19 ~ 0.24	0.70 ~ 0.90	0.20 ~ 0.35	0.017 ~ 0.032	≤ 0.025	0.45 ~ 0.60	0.40 ~ 0.70	0.15 ~ 0.25	≤ 0.20	0.010 ~ 0.045	≤ 0.0015	≤ 0.0180

表 2 齿轮钢 FAS3420H 生产工艺参数
Table 2 Production parameters of gear steel FAS3420H

项目	参数
电弧炉出钢量/t	60
钢包容量/t	65
电弧炉功率/kVA	35 000
LF 功率/kVA	11 000
VD 工作真空度/Pa	≤67
连铸方坯规格/(mm × mm)	240 × 240, 280 × 320
棒材/mm	45 ~ 110

2 夹杂物分析

2.1 连铸水口结瘤物分析

连铸生产 FAS3420H 钢时,占比约 5% 的炉号发生水口结瘤导致塞棒上涨、捣流,甚至更严重的连浇失败,此类品种的连铸结瘤现象也是特殊钢生产中普遍存在的问题。为研究连铸水口的侵蚀和夹杂物聚集情况,FAS3420H 钢连铸结束后在图 1(a)所示位置取样,横向试样实物和示意图见图 1(b,c)。

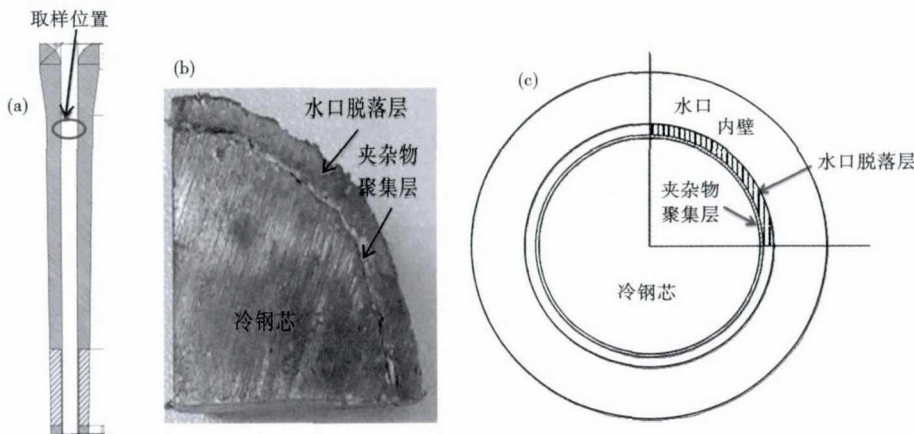


图 1 水口结瘤物取样位置(a)、实物(b)和示意图(c)

Fig. 1 Sampling location (a), material object (b) and schematic diagram (c) of nozzle clogging

图 1 所示,试样从内到外依次是冷钢芯、夹杂物聚集层、水口脱落层、水口内壁,其中夹杂物聚集层厚度 1 ~ 1.5 mm,水口侵蚀脱落层厚度 3 ~ 4 mm。

采用扫描电镜分析图 1 中水口脱落层靠近水口内壁一侧(外圆侧)的夹杂成分,分析结果见图 2。

图 2 扫描电镜结果显示,化学成分是纯 Al₂O₃、Al-Si-O 质夹杂和钢基体混合。应为钢水侵蚀水口内壁之后形成的水口脱落物。

采用扫描电镜分析图 1 中水口脱落层靠近夹杂物聚集层一侧(内圆侧)的夹杂成分,见图 3。

图 3 电镜分析结果显示:夹杂物成分包括 Ca-Al-O、Ca-Al-Si-Mg-O,应为钢水中夹杂物逐渐与水口侵蚀脱落物结合反应之后,最终形成的。

夹杂物聚集层在制样时,主体物质粉碎成细小颗粒脱落,可按图 3 中谱图 1 所示成分进行分析。夹杂物聚集层的化学成分以 Ca - Al - O 为主。

2.2 棒材上 B 类夹杂物分析

B 类(氧化铝类)夹杂物是影响该厂齿轮钢产品质量的主要因素,FAS3420H 钢中典型 B 类夹杂物形貌,见图 4。

齿轮钢 FAS3420H 属于铝脱氧钢,电弧炉出钢后加入铝锭、铝线等材料作为还原剂,精炼过程在钢水中产生大量的脱氧产物 Al₂O₃ 夹杂。脱氧产物逐渐与钢水、炉渣或钢包耐火材料中的 Mg、Ca 反应,同时在精炼及连铸过程中碰撞长大,但未

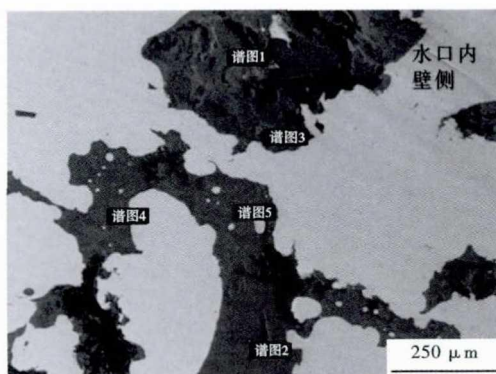


图 2 水口脱落层外圆侧扫描电镜分析

Fig. 2 Outer circle of nozzle abscission layer analyzed by SEM

谱图	成分/%									
	C	O	Na	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe
1	5.91	56.06	-	38.03	-	-	-	-	-	-
2	29.52	46.69	-	22.82	-	0.21	-	-	-	0.74
3	6.03	57.40	1.66	9.67	18.70	-	0.32	0.29	5.92	-
4	8.08	53.41	3.94	11.55	16.96	-	0.65	0.32	4.33	0.76
5	9.71	57.28	4.20	9.00	16.12	-	0.45	0.38	2.85	-

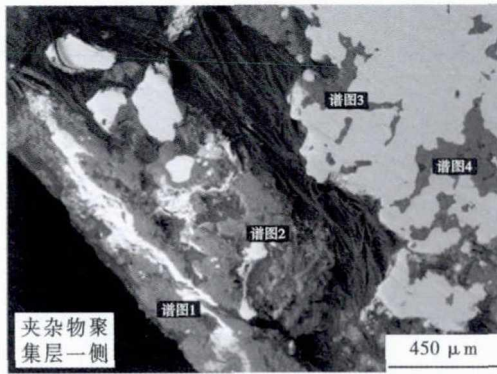


图3 水口脱落层内圆侧扫描电镜分析

Fig. 3 Inner circle of nozzle abscission layer analyzed by SEM

谱图	成分/%									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe
1	5.87	52.12	-	-	33.23	-	-	8.79	-	-
2	54.29	24.86	0.39	0.79	10.18	4.39	0.48	4.07	0.27	0.27
3	5.49	50.67	0.59	0.43	15.21	11.40	-	15.85	0.37	-
4	4.95	52.93	1.18	0.85	15.35	13.13	-	10.68	0.95	-

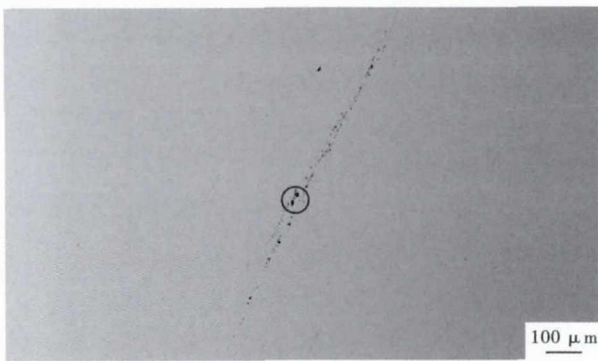


图4 齿轮钢 FAS3420H 棒材中典型 B 类夹杂物形貌

Fig. 4 Typical morphology of B inclusion in gear steel FAS3420H bar

及时上浮去除,便会堵塞水口,更会残留在铸坯中,最终导致棒材中形成如图4所示的氧化物夹杂^[3,4]。

以上棒材中的 B 类夹杂物与水口结瘤物的成分基本一致,所以提高钢水夹杂物控制水平是解决水口结瘤的有效途径,更有利于提高齿轮钢 FAS3420H 的产品质量。

3 提高钢液洁净度的措施

3.1 优化电弧炉供氧曲线,缓解钢水过氧化

抚顺特钢电弧炉全部采用废钢、生铁、注余冷钢等固态料作为入炉钢铁料,齿轮钢 FAS3420H 又属于低碳结构钢范畴,电弧炉熔炼过程除熔化钢铁料以外的重要任务是钢液脱磷和脱碳。钢液脱磷和脱碳均需要强氧化性气氛,尤其是熔炼末期当钢水碳含量低于 0.10% 且温度高于 1 580 °C 之后,氧枪强供氧方式会导致电弧炉出钢钢水严重过氧化。此危害除钢水严重烧损造成成本损失外,电弧炉终点氧含量高,后续采用铝锭和铝线沉淀脱氧过程产生大量脱氧产物 Al_2O_3 (非金属夹杂物) 污染钢液^[5],增加夹杂物超标的风险。

优化电弧炉供氧制度的方向是降低熔炼末期炉门氧枪供氧强度和供氧方式。炉门氧枪的最大氧气流量由 2 500 m^3/h 降为 2 300 m^3/h 。重点调整出钢前的供氧操作,由最大氧气流量供氧至出钢,修正为当钢水温度 1 550 ~ 1 570 °C,随即氧气流量降为 1 300 m^3/h 。钢水温度 1 580 ~ 1 590 °C 时,氧气流量降为 800 m^3/h 直至出钢。修正后的供氧方式显著降低了钢水的过氧化程度,电弧炉出钢钢水氧含量由 700×10^{-6} 降低至 500×10^{-6} ,为后续 LF 精炼去除夹杂操作提供良好的初始条件。

3.2 优化 LF 精炼炉渣

电弧炉采用留钢留渣的偏心底出钢方式,炉后混兑石灰、预熔渣造精炼渣,原炉后渣料配比的 LF 末期炉渣化学成分,见表 3。

扫描电镜分析, B 类夹杂物中的 Ca 含量为 10% 左右,另外,电弧炉供氧曲线优化之后,存在精炼炉渣偏稠的现象,均说明原工艺电弧炉炉后渣料配比的精炼炉渣碱度或 CaO 含量过高,同时精炼炉渣中 Al_2O_3 含量为 22% ~ 24%,偏低,限制了吸附 B 类夹杂物的能力。

生产实践证明,精炼炉渣具有良好的流动性方能保证夹杂物的上浮去除效果。精炼炉渣优化的方向是通过降低电弧炉炉后石灰用量,降低炉渣二元碱度,提高炉渣流动性。分析优化后的 LF 末期炉渣化学成分,见表 4。

表3 原工艺 LF 末期炉渣成分和碱度

Table 3 Slag composition of original process at end of LF and basicity

炉号	炉渣成分/%					碱度 (R)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO + MnO	
1	8.75	23.70	58.23	5.89	0.53	6.66
2	8.52	24.23	58.60	6.08	0.59	6.88
3	10.04	22.18	57.94	5.58	0.63	5.77

表 4 优化后 LF 末期炉渣成分和碱度

Table 4 Slag composition after optimizing at end of LF and basicity

炉号	炉渣成分/%					碱度 (R)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO + MnO	
1	10.24	28.13	52.41	6.11	0.61	5.12
2	9.93	28.35	52.01	5.52	0.51	5.24
3	10.86	28.99	52.13	5.88	0.49	4.80

表 4 所示,通过调整精炼炉渣流动性和碱度之后,炉渣中的 Al₂O₃ 含量提高至 28% ~ 29%,更有利于吸附 B 类夹杂物。

3.3 其它措施

对于抚顺特钢的 EAF→LF→VD→CC 工艺路线,VD 真空处理要求真空度 67 Pa,保持 15 min,此过程将钢包顶渣卷入钢水中,这是卷渣类夹杂物,甚至低倍夹杂产生的主要原因之一。VD 后必须辅以 20 min 以上的软吹时间,方能保证钢包顶渣和钢水中夹杂物充分上浮去除。

生产中,连铸中间包的过热度稳定性对连铸结瘤的产生具有很高的贡献度,尤其是连铸第 1 炉,当钢水进入中间包后与包衬材料接触,钢水温度迅速下降,钢水中氧元素的溶解度急剧下降致使氧大量析出,进而生成 Al₂O₃ 夹杂物堵塞水口。此问题需要良好的中间包烘烤制度加以缓解。连铸第 1 炉过后的中间包过热度稳定性需要通过完善中间包覆盖剂的保温效果来解决。汽车齿轮钢的连铸过热度控制连浇第 1 炉为 20 ~ 40 °C,其它炉号为 25 ~ 35 °C,保证 240 mm × 240 mm 断面拉坯速度恒定为 0.9 m/min,280 mm × 320 mm 断面拉坯速度恒定为 0.7 m/min。另外,连铸全封闭式氩气保护浇注同样要引起足够重视,如钢包与长水口连接处、中间包内等关键部位。

通过以上措施,该厂汽车齿轮钢 FAS3420H 连铸生产过程彻底解决了水口结瘤现象,连浇炉数由 8 连浇增加至 11 连浇。棒材的平均氧含量为 9.2×10^{-6} 。B 类夹杂物控制水平见表 5。

表 5 优化后 B 类夹杂物控制水平

Table 5 Controlling level of B inclusions rate after optimizing

项目	B 细	B 粗
标准要求	≤2.0 级	≤1.0 级
实际控制	≤1.0 级	≤0.5 级

4 结论

(1) 水口结瘤物与钢中的 B 类夹杂物成分基本一致,采用提高钢水洁净度作为改善连铸水口结瘤问题的研究方向。

(2) 通过采取优化电弧炉供氧曲线,使电弧炉出钢钢水氧含量达到 500×10^{-6} ,降低 LF 精炼炉渣的碱度,并改善其流动性,使渣中的 Al₂O₃ 含量升至 28% ~ 29% 等措施,以提高齿轮钢 FAS3420H 的洁净度,解决了连铸过程水口结瘤问题,连浇炉数增至 11 炉,同时达到棒材的氧含量平均值为 9.2×10^{-6} ,B 类夹杂物 B 细 ≤ 1.0 级、B 粗 ≤ 0.5 级的控制水平。

国家重点研发计划项目(2016YFB0300102)

参考文献

- [1] 陈 晖,周细应. 汽车齿轮钢的研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2011,29(3):478-482.
- [2] 王新华,姜 敏,于会香,等. 超低氧特殊钢中非金属夹杂物研究[J]. 炼钢,2015,31(6):1-12.
- [3] 孙大利,李 涛,安 杰. 汽车齿轮钢 8620RH 中夹杂物的研究[J]. 钢铁研究,2017,45(5):18-21.
- [4] 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):1-16.
- [5] 安 杰,王 哲,李润霞,等. 汽车齿轮钢 8620RH 的洁净度[J]. 中国冶金,2016,26(9):33-37.

安 杰(1985-),男,硕士(2011 年辽宁科技大学),工程师,2008 年河北经贸大学(本科)毕业,特殊钢冶炼工艺技术研发。E-mail:anjie0131@163.com

收稿日期:2018-10-11