

38CrMoAl 钢浇铸过程水口结瘤原因分析及工艺改进

王 郢 徐建飞 何 西 王昆鹏 万文华 孙光涛

(中天钢铁集团有限公司技术中心,常州 213011)

摘 要 38CrMoAl 钢 120 t BOF-LF-RH-CC 冶炼过程钢中夹杂物主要以 CaS 和 Al_2O_3 为主,并且随着精炼的进行,夹杂物中 CaS 含量逐渐升高, Al_2O_3 含量逐渐降低。通过钙处理试验,得出采用钙处理工艺,不仅不能有效变性 38CrMoAl 钢中夹杂物,反而会产生更多 CaS 夹杂物,最终引发由 CaS 产生的水口结瘤。工业试验结果表明,在 RH 原工艺基础上取消钙处理工艺,将 LF 精炼结束钢水硫含量降低至 0.001% ~ 0.002%,可以很好的改善钢水浇铸性。

关键词 38CrMoAl 钢 钙处理 CaS 水口结瘤

Analysis on Nozzle Clogging during Continuous Casting of Steel 38CrMoAl and Process Improvement

Wang Ying, Xu Jianfei, He Xi, Wang Kunpeng, Wan Wenhua and Sun Guangtao
(Technology Center, Zenith Steel Group Co Ltd, Changzhou 213011)

Abstract The ingredient of main inclusions in 38CrMoAl steel by 120 t BOF-LF-RH-CC process is Al_2O_3 and CaS. The CaS content decreases and the Al_2O_3 content increases with the time of refining. By calcium treatment experiments, it is obtained that the inclusions of 38CrMoAl steel could not be modified by calcium treatment, on the contrary, more CaS inclusions could be obtained by calcium treatment, leading to nozzle clogging during continuous casting of 38CrMoAl steel. The results of industrial experiments show that a good casting is obtained when the sulfur content after LF refining is controlled at 0.001% ~ 0.002% and no calcium is added after RH degassing.

Material Index Steel 38CrMoAl, Calcium Treatment, CaS, Nozzle Clogging

合金结构钢 38CrMoAl 具有较高的表面硬度、耐磨性及疲劳强度,广泛用于机械制造、航天航空及军工等领域^[1-2]。目前 38CrMoAl 钢主要采用“转炉或电弧炉→LF 精炼→RH 或 VD 真空→连铸”工艺流程,生产过程中主要关注钢水可浇性和连铸保护渣这两个环节。

针对采用“转炉→LF 精炼→RH 真空→Ca 处理→连铸”工艺生产的 38CrMoAl 钢,发现浇铸过程塞棒曲线显著上涨,并且钙处理量越大,塞棒上涨速度越快。尽管钙处理前钢水 S 含量仅为 0.003%,且真空结束后仅喂 100 m 硅钙线(130 t 钢水),但通过对水口结瘤物进行电镜分析,发现结瘤物主要以 CaS 为主,伴有少量高熔点钙铝酸盐,其典型形貌如图 1。

目前,关于改善 38CrMoAl 钢水可浇性已有较多文献进行过报道。何生平等人^[3-5]在不进行钙处理条件下,通过转炉出钢渣洗操作,将高熔点氧化铝转变为低熔点球状钙铝酸盐夹杂物来改善钢水可浇性。但是,生产实践表明,当钢水 Al 含量在 0.7% ~ 1.0% 时,即便采用高碱度精炼渣,也很难通过渣钢反应将氧化铝夹杂物变性为液态钙铝酸盐,这一结果与 Yoshioka 等人^[6]的研究结果相一致,即冶炼

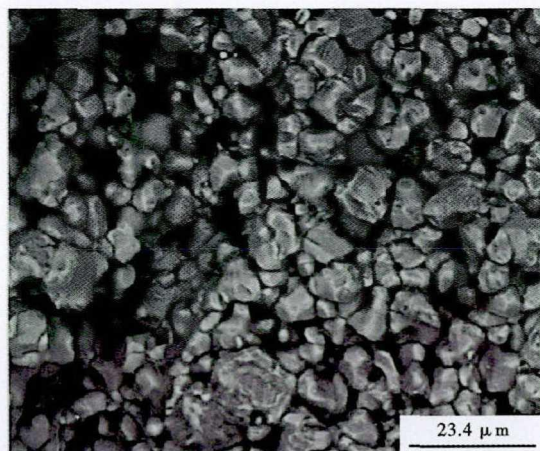


图 1 38CrMoAl 钢浇铸过程水口结瘤物 CaS 形貌
Fig. 1 Morphology of nozzle clogging products CaS during casting process of steel 38CrMoAl

过程中夹杂物 CaO 含量始终维持在一个较低水平。魏巍等人^[7]指出铝含量调整方法不当,会增加 Al_2O_3 夹杂物生成量,从而容易导致水口结瘤。但是,通过对钢水总氧进行分析,发现即便精炼过程生成更多 Al_2O_3 夹杂物,经过真空处理,钢水总氧可以控制在 0.000 2% ~ 0.000 3%,即钢中非金属夹杂物很容易去除。此外,上述研究更多的是从 Al_2O_3 夹

杂物控制角度来改善钢水可浇性,而关于 CaS 导致 38CrMoAl 钢浇铸过程水口结瘤问题几乎未涉及。鉴于此,本文首先对 38CrMoAl 钢冶炼过程夹杂物成分进行研究,并研究钙处理不能变性 38CrMoAl 钢中夹杂物原因,以此弄清浇铸过程水口结瘤的原因。

1 试验方案

针对采用“120 t 转炉→LF 精炼→RH 真空→100 m 硅钙线→280 mm×320 mm 连铸机”工艺生产的 38CrMoAl 钢,选择一个浇次塞棒曲线上涨速度最快的最后一炉,LF 每间隔 10 min 进行钢水取样,LF 结束进行炉渣取样,同时 RH 真空结束(钙处理前)、软吹结束(钙处理后)和中间包也进行钢水取样。

与此同时,在 1 kg 真空感应炉开展 16 炉钙处理试验,以进一步阐述 CaS 夹杂物形成条件。实验前先将装有 CaSi 粉的铁盒绑在钼棒上(钼棒可以手动调节上升或者下降),并安装在感应炉内,同时将预先配好不同 S 含量的母铁(1 kg)放到 MgO 坩埚中,母铁化学成分(%)为:0.05C,0.02Si,0.25Mn,0.03Al,0.0008~0.0028S,0.0015T.O,<0.0005T.Ca,然后对炉内进行抽真空,待真空度达到 30 Pa,以 6 L/min 流量充入高纯 Ar,待炉内达到 0.1 MPa 时开始加热。当温度达到 1600 ℃时,加入 0.3 g 铝粒进行合金化,保温 2~3 min 后,将装有 CaSi 粉的钼棒插入到钢液中,经过不同的保温时间(1、5、10 min),将钢液倒入出钢模中。

工业生产中所取试样 C、Si、Mn、S、Al、Cr 采用光谱分析法,总氧(T.O)采用氧氮分析仪分析,炉渣成分采用荧光分析法。真空感应炉冶炼后的钢样化学成分全部委托给国家材料测试中心进行分析。钢中夹杂物成分全部采用全自动扫描电镜 ASPEX 获取。

2 试验结果

2.1 钢水和炉渣成分

表 1 为 38CrMoAl 钢冶炼过程中钢水成分,中间包 Al 含量控制在 0.82%,S 含量控制在 0.003%,总氧含量仅为 0.00028%。

表 2 为 38CrMoAl 钢精炼结束炉渣成分,由于钢水 Al 含量很高,导致渣中 SiO₂ 被大量还原,精炼结

表 2 LF 精炼结束炉渣成分 / %

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO + MnO
52.52	3.21	34.43	7.32	<0.50

束炉渣 SiO₂ 含量仅为 3.21%。

真空感应炉冶炼后的钢样 Al 含量在 0.015%~0.052%,S 含量在 0.0008%~0.0028%,T.Ca 含量在 0.0009%~0.0018%,T.O 含量为 0.00063%~0.00241%。尽管真空感应炉中控制的 Al 含量低于 38CrMoAl 钢实际冶炼控制值,但 T.O 对夹杂物中 CaS 含量的影响规律可以用来解释为何钙处理不能有效变性 38CrMoAl 钢中夹杂物。

2.2 工业生产中 38CrMoAl 钢的夹杂物成分变化

图 2 为 38CrMoAl 钢精炼过程夹杂物成分,其中横坐标为夹杂物检测个数,并按夹杂物中 CaO 含量由高到低进行排序。表 3 为统计的精炼不同阶段夹杂物平均成分。在分析夹杂物成分前,首先对能谱给出的元素进行化合物折算。由于铝脱氧钢不存在 MnO 夹杂物(MnO 很容易被 Al 还原),因此,首先将 Mn 和 S 结合,得到 MnS 含量,由于 S 除了与 Mn 结合外,只能与 Ca 结合,故将剩余的 S 和 Ca 结合,得到 CaS 含量,然后将剩余的 Ca 和 O 结合,得到 CaO 含量,最后,将 Al 和 O 结合,得到 Al₂O₃ 含量。从图 2 和表 3 中可以看出,精炼过程夹杂物以 Al₂O₃ 和 CaS 为主,夹杂物中 CaO 和 MgO 含量一直维持在较低水平,并且随着精炼的进行,夹杂物中 Al₂O₃ 含量逐渐降低,CaS 含量逐渐升高。

图 3 为 38CrMoAl 钢真空结束(钙处理前)、软吹结束(钙处理后)和中间包夹杂物成分;表 4 为统计的夹杂物平均成分,可以看出,真空结束后,夹杂物中 CaO 和 MgO 含量更低,夹杂物仍然以 Al₂O₃ 和 CaS 为主。Ca 处理后,夹杂物中 Al₂O₃ 含量有所降低,CaO 含量并没有像常规铝脱氧钢种随着 Ca 的喂入而增加,喂入到钢液中的 Ca 主要与 S 结合,导致夹杂物中 CaS 含量进一步升高。浇铸时,中间包夹杂物成分仍然以 Al₂O₃ 和 CaS 为主,且 CaS 平均含量高达 87.4%。

表 3 LF 精炼过程夹杂物平均成分 / %

LF 过程	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	CaS
10 min	62.6	8.2	5.0	24.2
20 min	57.0	6.1	10.7	26.2
30 min	37.4	10.2	5.8	46.6
结束	35.0	8.9	7.0	49.1

表 1 冶炼过程钢水成分 / %

工位	C	Si	Mn	S	Al	Cr	T.O
LF 处理 10 min	0.27	0.15	0.35	0.015	0.10	1.12	0.00125
LF 结束	0.37	0.24	0.45	0.003	0.85	1.44	0.00082
RH 结束	0.37	0.23	0.45	0.003	0.84	1.42	0.00025
中间包	0.37	0.23	0.45	0.003	0.82	1.43	0.00028

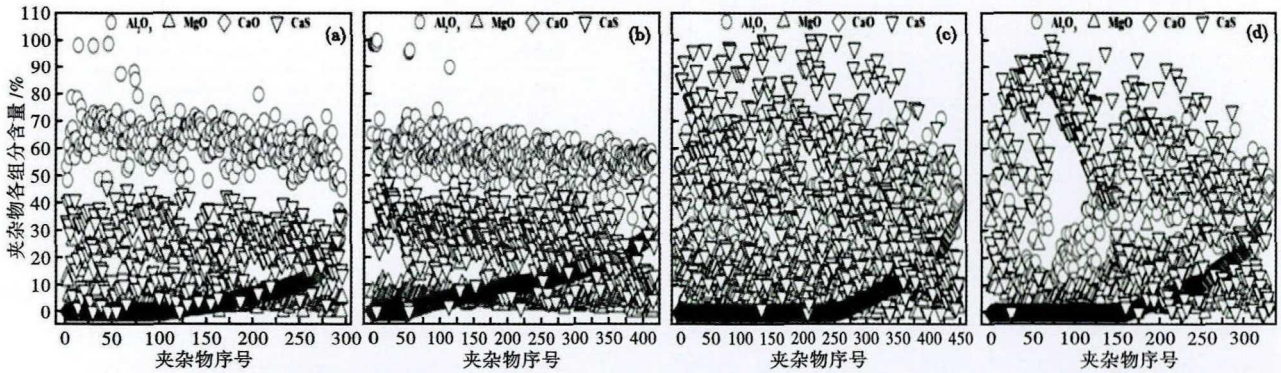


图 2 LF 精炼过程夹杂物成分变化: (a) LF 10 min; (b) LF 20 min; (c) LF 30 min; (d) LF 结束

Fig. 2 Change of ingredient of inclusions in steel during LF refining: (a) LF 10 min; (b) LF 20 min; (c) LF 30 min; (d) LF end

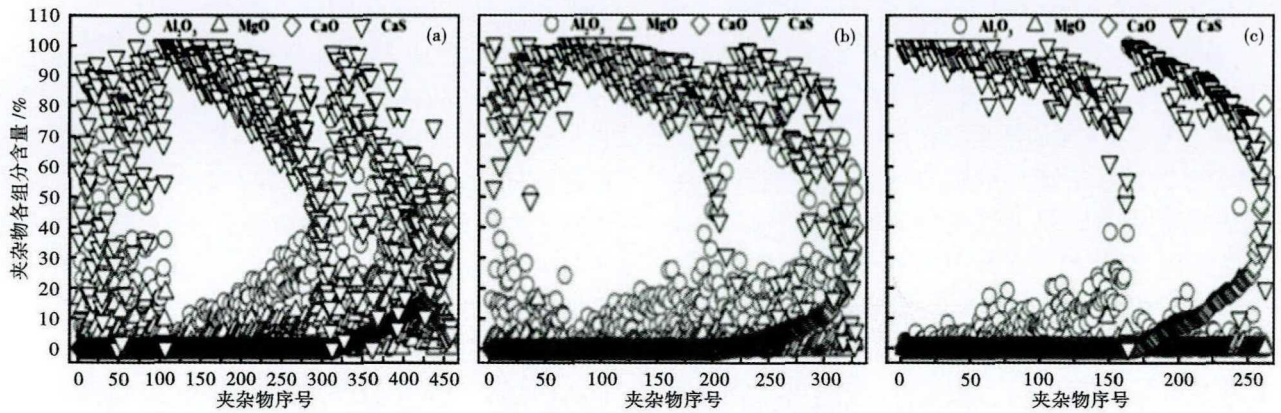


图 3 RH 结束(a), 软吹终点(b)和中间包(c)过程钢中夹杂物成分

Fig. 3 Ingredient of inclusions in steel at RH end (a), finished soft blowing (b) and tundish process (c)

表 4 RH 结束、软吹终点和中间包钢中夹杂物平均成分 / %
Table 4 Average ingredient of inclusions in steel at RH end, finished soft blowing and tundish / %

工位	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	CaS
RH 真空结束	23.3	6.3	3.5	66.9
RH 软吹结束	15.8	1.4	3.1	79.7
中间包	7.0	0.2	5.4	87.4

由于 CaS 属于高熔点夹杂物,且浇铸时钢中夹杂物几乎全部为 CaS,故钢水在浇铸过程容易由 CaS 导致水口结瘤。

2.3 真空感应炉实验结果及 CaS 夹杂物生成条件分析

通过对冶炼过程夹杂物成分进行分析,很容易得出 38CrMoAl 钢浇铸过程为何由 CaS 导致水口结瘤。但是,有一个现象还需要进一步解释,即为何对 38CrMoAl 钢进行 Ca 处理不能得到含 CaO 夹杂物,反而得到更多 CaS 夹杂物。为此,本文借助真空感应炉,开展了一系列钙处理实验,通过研究钢液成分 S、T. O 和 T. Ca 与 Ca 处理后夹杂物平均成分 CaO、CaS、Al₂O₃ (备注:铝脱氧钙钙处理后夹杂物组分主要有 CaO, CaS, Al₂O₃) 关系,来解释对 38CrMoAl 钢

进行 Ca 处理,只能得到更多 CaS 夹杂物,而不能得到含 CaO 夹杂物。

图 4 为钢水 S/T. O 和 T. Ca/T. O 对夹杂物中 CaO、CaS、CaS/Al₂O₃ 影响,可以看出, S/T. O 越大, CaO 含量越低, CaS 含量越高; T. Ca/T. O 越高,夹杂物中 CaS 与 Al₂O₃ 比值越大,即提高 T. Ca/T. O, 更有利于夹杂物中 CaS 含量升高, Al₂O₃ 含量降低。

由于 38CrMoAl 钢钙处理前钢水总氧仅 0.000 25%, 而 S 含量为 0.003%, 使得钢水 S/T. O 值很大, 因此根据图 4 结果, 工业生产中向钢液中喂入 100 m 钙线, 很难得到含 CaO 夹杂物, 只能得到更多 CaS 夹杂物。因此, 根据夹杂物成分演变规律, 并结合钢液总氧对夹杂物成分影响, 得出 38CrMoAl 钢冶炼过程中不宜向钢液中喂入 Ca 线, 即便喂入钙线, 也不能有效变性夹杂物, 反而产生更多 CaS 夹杂物。

基于上述结果, 从减少 38CrMoAl 钢中 CaS 夹杂物量的角度, 采取以下措施: (1) 转炉出钢渣料继续加 500 kg 石灰和 200 kg 精炼渣, 转炉终点 C 控制在 0.06% ~ 0.12%, 出钢温度控制在 1 620 ~ 1 640 ℃ (转炉渣料加入量、终点 C 和温度控制与原工艺保

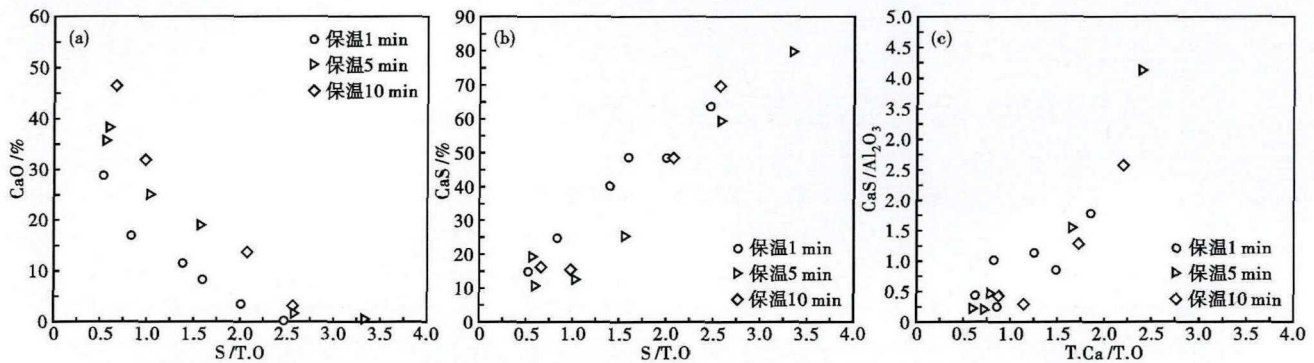


图4 钢水 S/T.O(a)(b)和 T.Ca/T.O(c)对夹杂物中 CaO(a), CaS(b)和(c) CaS/Al₂O₃ 影响

Fig.4 Effect of liquid steel S/T.O (a)(b) and T.Ca/T.O (c) on CaO(a), CaS(b), CaS/Al₂O₃(c) in inclusions

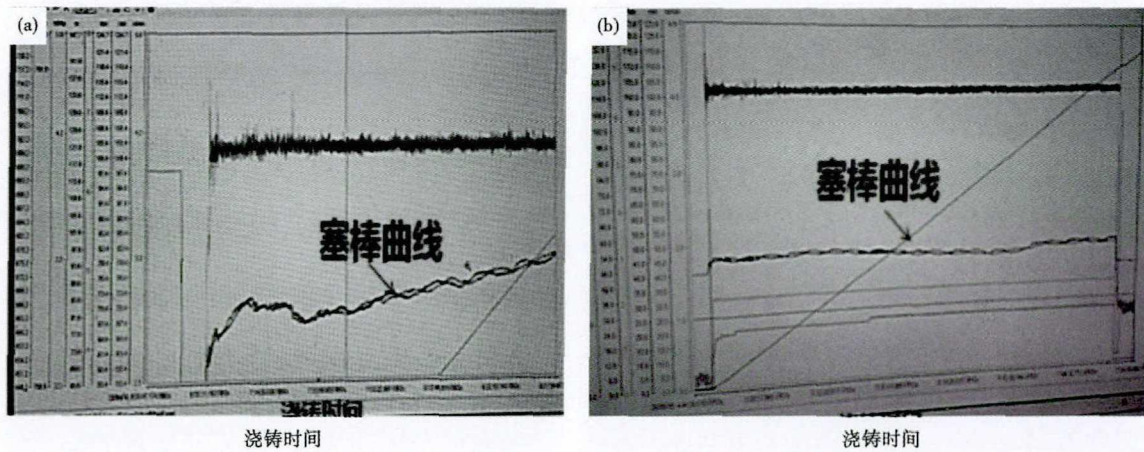


图5 工艺改进前(a)后(b)塞棒曲线

Fig.5 Stopper curve before (a) and after (b) process improvement

持不变);(2)精炼过程通过钢渣反应进行渣面脱氧,精炼结束将铝含量调整到位,避免真空过程补铝,同时精炼过程加强脱硫,确保精炼结束 S 含量控制在 0.001%~0.002% (原工艺精炼结束硫含量约 0.003%),减少钢液中 CaS 夹杂物量;(3)RH 过程不添加任何渣料和合金,RH 真空时间控制在 20~25 min,破空后不进行钙处理(原工艺破空后喂 100 m 硅钙线),软吹时间控制在 10 min 即可;(4)连铸过程采用整体水口浇铸,减少二次氧化,并以此进行了一个浇次改善钢水可浇性的试验,发现采用上述措施,钢水可浇性得到了明显改善,如图 5。

3 结论

(1) 38CrMoAl 钢冶炼过程夹杂物以 CaS 和 Al₂O₃ 为主,并且随着精炼的进行,夹杂物中 CaS 含量逐渐升高,Al₂O₃ 含量逐渐降低。

(2) 因 38CrMoAl 钢水总氧很低,采用钙处理工艺,不能有效变性夹杂物,反而产生更多 CaS 夹杂物,最终引发由 CaS 产生的水口结瘤问题。通过取

消 RH 钙处理工艺,将精炼结束钢水 S 含量降至 0.001%~0.002% 可以防止水口结瘤。

参考文献

- [1] 周伟基,薄永明,吉海峰,等.优化脱氧工艺提高 38CrMoAl 钢连铸成功率[J].特殊钢,2012,33(5):40-42.
- [2] 徐泽宁.38CrMoAl 钢水口结瘤机理分析及控制研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2018.
- [3] 何生平,张国兴,曾建华,等.38CrMoAl 高铝钢钢水可浇性控制[J].北京科技大学学报,2011,33(4):413-417.
- [4] 赵克文,何生平,曾建华,等. BOF-LF-RH-CC 流程生产 38CrMoAl 钢关键技术研究[J].钢铁,2009,44(12):38-41.
- [5] 张敏,曾建华,陈永,等.提高高铝钢可浇性工艺技术研究[J].武汉科技大学学报,2013,36(6):420-423.
- [6] Yoshioka T, Ideguchi T and Karasev A, et al. The Effect of a High Al Content on the Variation of the Total Oxygen Content in the Steel Melt during a Secondary Refining Process[J]. Steel Research International,2018,89(2):1-9.
- [7] 魏巍,李虹. BOF→LF→VD→CC 流程生产 38CrMoAl 钢实践[J].炼钢,2019,35(1):76-78.

王 郢(1979-),男,博士(北京科技大学),高级工程师,2001 年武汉科技大学(本科)毕业,特殊钢工艺质量研究。E-mail:452657523@qq.com

收稿日期:2020-09-08