

高碳铬 GCr15 轴承钢中镁铝夹杂物形成与控制工艺实践

蒋鲤平, 徐建飞, 王昆鹏, 王 郢, 王立涛, 陈廷军

(中天钢铁集团有限公司第三炼钢厂, 常州 213011)

摘 要 GCr15 钢的生产流程为 120 t BOF-LF-RH-CC 工艺。BOF 出钢加 200 kg 铝块进行强脱氧, 同时 LF 过程控制 Al 含量至 0.030% ~ 0.045%, LF 结束夹杂物主要为 $MgO \cdot Al_2O_3$, RH 真空后 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物被去除, 钢水中夹杂物以钙铝酸盐为主, 但是连铸浇铸过程 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物又会重新生成。因为 LF 精炼过程 Al-MgO 和 C-MgO 反应的存在, 高碳铝脱氧 GCr15 轴承钢 LF 精炼结束更容易获得 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物, 并促进中间包钢水 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物重新生成。当 BOF 出钢仅加 40 kg 铝块进行预脱氧, LF 结束钢水 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物数量显著降低, 同时中间包钢水中 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物不再重新生成。此外, 将低钛低铝硅铁由出钢过程改为 LF 过程加入, 也可以有效控制钢水中 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物数量。

关键词 GCr15 轴承钢 镁铝夹杂物 C 含量 加 Al 量

Formation of Magnesium-Aluminum Inclusion in High Carbon Chromium GCr15 Bearing Steel and Control Process Practice

JIANG Liping, XU Jianfei, WANG Kungpeng, WANG Ying, WANG Litao, CHEN Tingjun
(Zenith Steel Group Co Ltd, No. 3 Steelmaking Plant, Changzhou 213011)

Abstract The GCr15 steel production flow steel is 120 t BOF-LF-RH-CC process. As adding 200 kg aluminum block at BOF tapping for strong deoxidation and controlling the aluminum content 0.030% ~ 0.045% in steel in LF process, at end LF the main inclusions in steel are $MgO \cdot Al_2O_3$ and the $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusions are removed during RH degassing and the calcium aluminate inclusions are main inclusions in steel after RH. However, but $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusions are formed again in the tundish steel. Due to the existence of Al-MgO and C-MgO reactions in LF refining process, the $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusions could be formed again after LF refining in high carbon aluminum deoxidized GCr15 bearing steel. However, when just adding 40 kg aluminum block for preliminary deoxidation in the BOF tapping process, the amount of $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusions in steel significantly decrease after LF refining, and the regeneration of $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusions in tundish steel could be prevented. In addition, adding low titanium and low aluminum ferrosilicon in the LF refining process instead of adding in tapping process effectively control the amount of $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusions in steel.

Material Index GCr15 Bearing Steel, Magnesium-Aluminum Inclusion, Carbon Content, Adding Al Amount

目前,关于铝脱氧钢夹杂物成分演变规律已有较多文献对其进行过报道,由于渣钢反应等原因,铝脱氧钢 LF 精炼过程夹杂物会由初始的脱氧产物 Al_2O_3 向钙铝酸盐转变^[1-5],即 LF 精炼结束夹杂物一般会以钙铝酸盐为主,这一研究结果已在大部分钢种中得到验证。但是,生产实践发现,对于高碳铝脱氧钢如轴承钢,LF 精炼过程 Al_2O_3 夹杂物会向 $MgO \cdot Al_2O_3$ 转变,但是 $MgO \cdot Al_2O_3$ 基本不再向钙铝酸盐转变,即夹杂物成分演变规律与上述报道有所不同,因此,有必要对这类钢种夹杂物演变规律和控制方法进行研究。

此外,合金加入时机对夹杂物成分也有影响,由于硅铁合金中含有少量金属钙,LF 过程加入到钢水中的硅铁合金会促进钙铝酸盐夹杂物形成^[6-7];若硅铁合金全部放在出钢过程加入,则这种影响可以被

忽略^[8-9],目前这一结果在低碳钢生产工艺上报道过。对于高碳铬轴承钢,调整合金加入时机是否会促进更多 $MgO \cdot Al_2O_3$ 向钙铝酸盐转变,目前没有相关文献报道。

鉴于此,本研究首先对轴承钢镁铝尖晶石夹杂物产生原因进行了研究,在此基础上,还研究了合金加入时机对 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物转变的影响,以此找到控制轴承钢中镁铝尖晶石夹杂物的方法。

1 试验方案

首先在 GCr15 轴承钢进行试验,采用的炼钢工艺为“120 t BOF-LF-RH-CC”,炉号标记为第 1 炉,出钢过程采用铝块、低钛低铝硅铁、低碳锰铁、高碳铬铁进行脱氧和合金化,其中铝块加入量为 200 kg,钢种所需的低钛低铝硅铁合金全部放在出钢过程一次性加入,合金加完后加入 500 kg 石灰和 500 kg 合成渣

(成分为低熔点钙铝酸盐)进行造渣;采用常规的 LF 精炼、RH 真空和连铸操作模式,其中 LF 精炼过程采用 SiC 进行渣面脱氧,LF 精炼时间按 60 min 控制;RH 过程不加任何合金和渣料,高真空 (< 100 Pa) 时间控制在 20 min,软吹时间按 10 min 控制;连铸采用整体水口进行保护浇铸。

此外,对轴承钢生产工艺开展调整铝块和低钛低铝硅铁加入时机的试验,以找到控制轴承钢中镁铝尖晶石夹杂物方法,炉号分别标记为第 2 炉和第 3 炉,其中第 2 炉出钢过程仅加 40 kg 铝块进行钢水预脱氧,LF 精炼全程钢水残余 Al 控制在 0.002% ~ 0.004%,RH 进站以喂铝线形式进行钢水 Al 含量调整,Al 含量按 0.03% 控制,其它操作与第 1 炉相同;第 3 炉低钛低铝硅铁合金全部放在 LF 精炼 20 min 后加入,即出钢不进行 Si 合金化,其它操作与第 1 炉相同。

与此同时,又分别对铝脱氧钢 10 钢、40Cr、55 钢各开展 1 炉试验,探讨轴承钢精炼过程 MgO · Al₂O₃ 夹杂物不向钙铝酸盐转变原因,炉号标记为第 4 炉、第 5 炉、第 6 炉,这 3 炉出钢和 LF 精炼操作模式与第 1 炉相同,包括合金类型、合金加入时机、出钢渣料加入量、LF 处理时间,同时,精炼结束炉渣碱度控制在 5 ~ 7。

2 试验结果

2.1 钢水和炉渣成分

表 1 为轴承钢 LF 进站和结束钢水成分。由于钢水 Mg、Ca 含量低,加上设备检测精度限制,不能给出准确结果,因此,主要采用夹杂物中 MgO、CaO 含量来表征钢水 Mg、Ca 含量。

表 2 为轴承钢 LF 结束炉渣成分,其中第 1 炉和第 3 炉炉渣成分相接近,炉渣碱度控制在 6 ~ 7;第 2 炉由于 LF 过程刻意控制钢水 Al 含量,LF 结束炉渣碱度控制较低。

2.2 夹杂物成分

图 1 为第 1 炉钢水 LF 过程夹杂物成分,可以看出,出钢采用铝脱氧工艺,使得 LF 进站夹杂物主要为 Al₂O₃。随着 LF 精炼的进行,Al₂O₃ 夹杂物并没有像先前文献报道会向钙铝酸盐转变,

表 1 GCr15 轴承钢 LF 处理前后钢水成分/%

Table 1 Compositions of GCr15 bearing steel before and after LF refining/%

炉次	工序	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr
第 1 炉	LF 进站	0.81	0.19	0.32	0.016	0.018	0.052	1.21
	LF 结束	0.97	0.28	0.36	0.017	0.007	0.030	1.48
第 2 炉	LF 进站	0.87	0.17	0.29	0.012	0.015	0.003	1.17
	LF 结束	0.97	0.25	0.37	0.012	0.011	0.004	1.46
第 3 炉	LF 进站	0.83	0.03	0.26	0.015	0.019	0.058	1.06
	LF 结束	0.96	0.27	0.34	0.014	0.009	0.029	1.47

表 2 GCr15 轴承钢 LF 结束炉渣成分和碱度

Table 2 Compositions and basicity of slag after LF refining of GCr15 bearing steel

炉次	炉渣成分/%						碱度 (R)
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	TFe	MnO	
第 1 炉	52.8	27.8	8.6	3.6	0.25	0.04	6.1
第 2 炉	49.3	22.5	16.4	4.2	0.62	0.31	3.0
第 3 炉	51.7	31.2	7.5	3.2	0.36	0.21	6.9

若定义夹杂物中 CaO + CaS 含量 < 5%、MgO 含量 ≥ 5% 为 MgO · Al₂O₃ 夹杂物,那么 LF 结束时钢水中夹杂物成分主要以 MgO · Al₂O₃ 为主,其中 MgO · Al₂O₃ 夹杂物数量比例为 84%,说明常规铝脱氧轴承钢 LF 过程钢中大部分 MgO · Al₂O₃ 夹杂物并不会向钙铝酸盐转变。

图 2 为第 1 炉钢水 RH 真空后和中间包内钢水中夹杂物成分,由于 MgO · Al₂O₃ 夹杂物比钙铝酸盐夹杂物更容易通过 RH 真空被去除,导致 RH 真空后钢中夹杂物主要为钙铝酸盐。但是,连铸浇铸过程中发现 MgO · Al₂O₃ 夹杂物又在钢中重新生成,并且生成量较大,这也是铝脱氧轴承钢钢水可浇性差的主要原因。

针对轴承钢 LF 过程钢中大部分 MgO · Al₂O₃ 夹杂物不会向钙铝酸盐转变这一问题,在采用相同的炼钢和 LF 精炼工艺时,对比了不同 C 含量下的

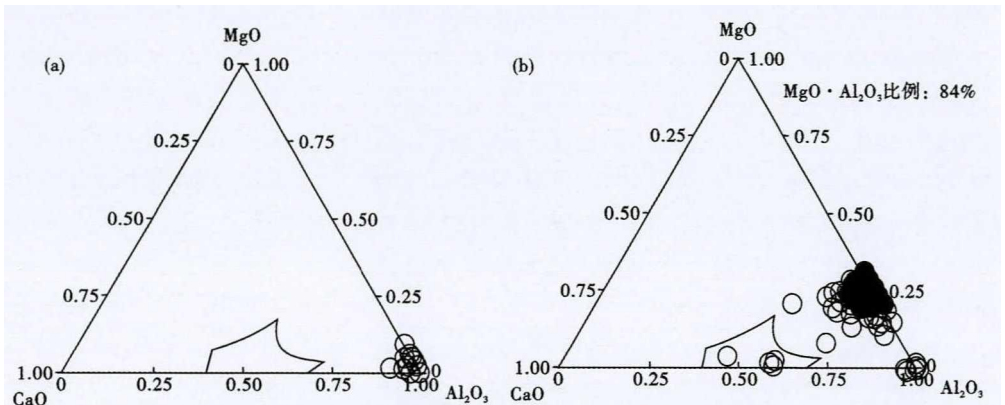


图 1 第 1 炉 (a) LF 进站, (b) LF 结束钢中夹杂物成分
Fig. 1 Compositions of inclusions in steel No. 1 heat at LF refining initial (a) and end (b)

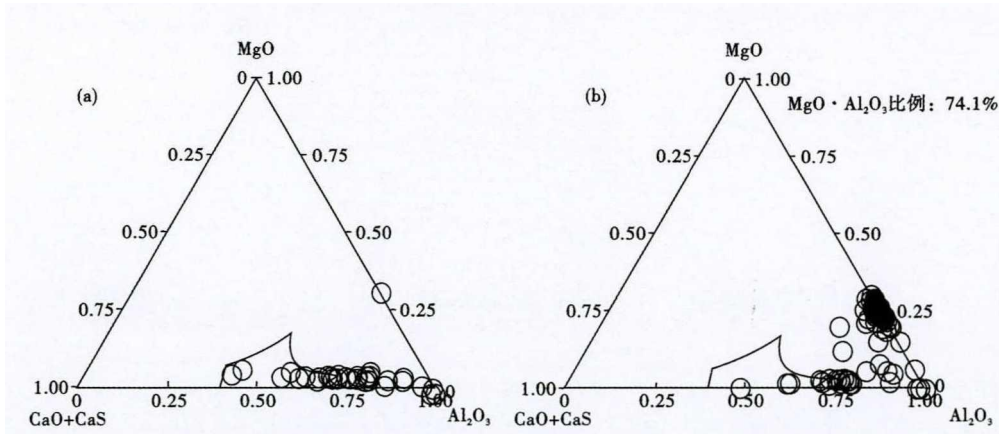


图2 第1炉RH结束(a)和中间包浇铸区(b)钢中夹杂物成分

Fig.2 Compositions of inclusions in steel of No1 heat at RH end (a) and tundish casting zone (b)

钢种 LF 结束夹杂物成分,其结果如图3所示,可以看出,LF 进站夹杂物均为 Al_2O_3 ,随着 LF 精炼的进行,中低碳钢如 10 钢、40Cr, Al_2O_3 夹杂物会向 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 和钙铝酸盐转变,而对于 C 含量更高的钢种如 55 钢和图 1 中 GCr15, Al_2O_3 夹杂物主要向 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 转变,并不会进一步向钙铝酸盐转变。

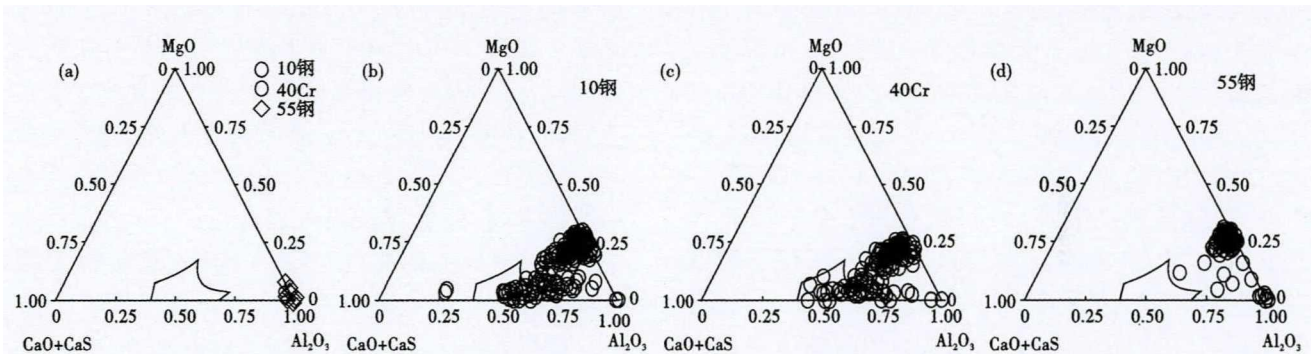


图3 钢中碳含量对精炼过程夹杂物成分的影响:LF 进站(a);LF 结束 10 钢(b),40Cr 钢(c),55 钢(d)

Fig.3 Effect of carbon content on composition of inclusion in steel in refining process: initial LF (a); 10 steel (b), 40Cr steel (c), 55 steel (d) of end LF

盐转变。

与此同时,文献[10-11]指出,钢中除了 Al, C 也能够还原耐材和炉渣中 MgO , 导致钢水增 Mg, 这说明含铝高碳钢中 Mg 含量要高于中低碳钢。由于轴承钢冶炼时采用 Ca 含量很低的合金来控制钢水 Ca 含量, 因此, 随着钢水 Mg 含量的升高, 加上钢水 Ca 含量本身较低, Mg 与 O 的结合将大于 Ca 与 O, 导致 LF 结束后夹杂物以 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 为主, 这说明钢水 C 含量对铝脱氧钢 LF 精炼过程夹杂物成分有一定的影响, 这也是轴承钢 LF 结束更容易获得 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物的主要原因。

针对轴承钢浇铸过程钢水中又重新生成许多 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物这一问题, 分析认为, 尽管 RH 真空会使钢水中 Mg 发生挥发, 且破空后检测不到 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物, 但破空后钢水 Mg 含量可能依然相对较高, 加上连铸过程钢水与外界发生部分反应, 导致中间包内钢水中 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物重新生成。为了验证这一推测, 在轴承钢上开展了第 2 炉工业试验, 即出钢铝块加入量由 200 kg 降低至

40 kg, LF 精炼过程不调整 Al 含量, 使得 LF 结束钢水残余 Al 仅为 0.004%, 通过降低 LF 精炼过程钢水 Mg 含量, 来探讨中间包内是否仍然能够生成 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物。图 4 为第 2 炉钢水冶炼过程夹杂物成分, 可以看出, 通过降低钢水 Al 含量, LF 精炼结束钢水中几乎检测不到 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物, 夹杂物主要为钙铝酸盐, 这说明轴承钢尽管钢水 C 含量高, 但当钢水 Al 含量很低时, 钢水 Mg 含量可以控制在较低的水平。

RH 进站喂完 Al 线后, 由于新产生许多 Al_2O_3 夹杂物, 导致夹杂物由低熔点钙铝酸盐向高熔点钙铝酸盐转变。由于高熔点钙铝酸盐夹杂物在 RH 过程去除效率高于低熔点钙铝酸盐, RH 结束夹杂物重新以低熔点钙铝酸盐为主, 并且连铸浇铸过程钢水中不再形成 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物。因此, 结合第 1 炉和第 2 炉夹杂物成分, 可以得出轴承钢 LF 精炼结束钢水 Mg 含量高会促进中间包内 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物重新生成, 并且降低 LF 精炼结束钢水 Mg 含

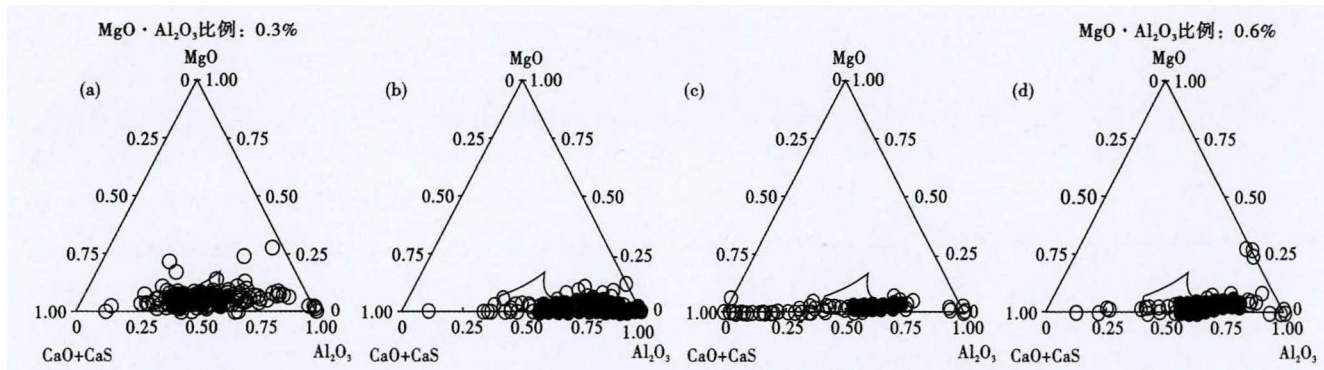


图 4 第 2 炉 (a) LF 结束, (b) RH 进站喂 Al 线后, (c) RH 结束和 (d) 中间包浇铸区钢中夹杂物成分

Fig. 4 Compositions of inclusions in steel of No2 heat at end LF (a), initial RH after feeding Al wire (b), end RH (c) and tundish casting zone (d)

量,以防止中间包 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物重新生成。

与此同时,根据图 4(c, d) 结果,发现中间包夹杂物中 (CaO + CaS) 含量显著低于浇铸前,这说明浇铸过程钢水发生二次氧化,因此,从钢水可浇性角度来讲,不仅要控制 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物数量,还要控制二次氧化,以减少中间包内高熔点夹杂物数量。

2.3 低钛低铝硅铁加入时机对夹杂物成分影响

针对 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物控制方法,除了研究铝块加入时机,还探讨了低钛低铝硅铁加入时机对轴承钢夹杂物成分影响,即低钛低铝硅铁由出钢过

程改为 LF 精炼 20 min 后加入。图 5 为第 3 炉钢水冶炼过程夹杂物成分,可以看出,LF 结束钢水 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物数量显著降低,夹杂物主要为钙铝酸盐,这是因为低钛低铝硅铁合金中含有少量的金属钙,若放在出钢加入,由于钢水氧化性高,钙很容易被氧化,放在 LF 精炼 20 min 后加入可以提高钙的收得率,但低钛低铝硅铁合金中 Ca 含量毕竟很低(0.010%),因此,采用这一操作,钢水 Ca 含量也仅仅能够提高至 0.000 3% ~ 0.000 5%。

RH 结束时,夹杂物依旧以钙铝酸盐为主。由

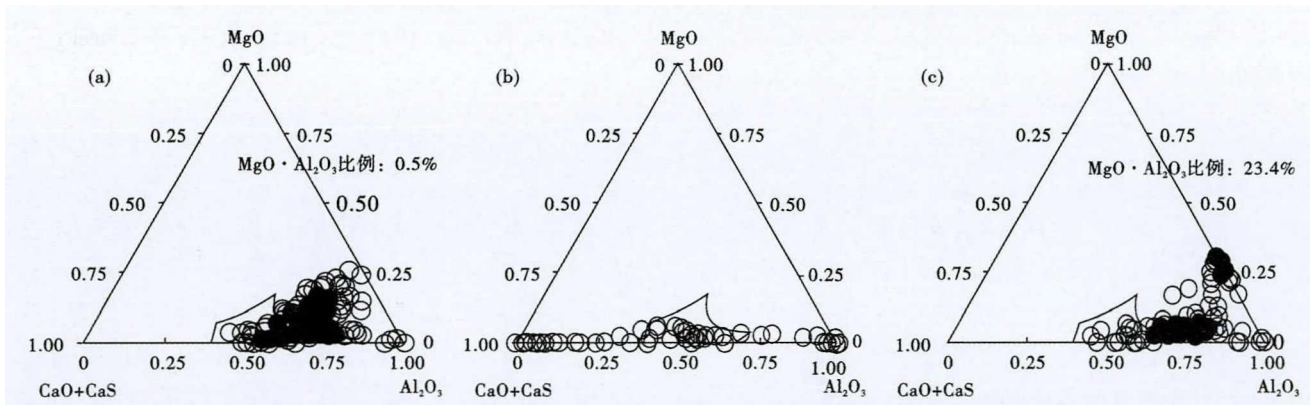


图 5 第 3 炉 (a) LF 结束, (b) RH 结束和 (c) 中间包浇铸区钢中夹杂物成分

Fig. 5 Compositions of inclusions in steel of No3 heat at end LF (a), end RH (b) and tundish casting zone (c)

于 LF 精炼过程未控制 C-MgO 和 Al-MgO 反应,精炼结束钢水 Mg 含量依旧较高,因此,连铸浇铸过程有部分 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物生成,但是钢水 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物数量所占比例显著低于常规炉次即第 1 炉,这主要是因为此时钢水中毕竟含有少量 Ca,因此,将低钛低铝硅铁由出钢过程改为 LF 精炼过程加入,可以有效控制钢水中 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物数量。

尽管钢水 Mg 含量高会促进中间包 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物形成,但是开浇前和中间包钢水 Mg 含

量基本一致,而开浇前钢水中并没有检测到 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物,说明浇铸过程钢水与外界还存在其它反应,最终促进中间包 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物形成。在后续的研究中,将致力于研究中间包内具体发生哪些反应如钢水与覆盖剂反应、钢水二次氧化、钢水温度降低等会导致 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物生成。

3 结论

(1) C 含量对铝脱氧钢夹杂物成分有一定的影响,这主要是因为 LF 精炼过程 Al-MgO 和 C-MgO 反

应的存在,使得高碳铬脱氧钢精炼过程钢水更容易发生增 Mg,这也是轴承钢 LF 精炼结束更容易获得 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物的主要原因,并且这也会促进中间包内 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物重新生成。

(2)120 t BOF 出钢过程加入 40 kg 铝块进行预脱氧,LF 过程不调整 Al 含量,LF 结束钢水 Al 含量约 0.004%,同时 RH 进站进行 Al 含量调整,可以显

著降低轴承钢 LF 精炼结束 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物数量,同时可以防止中间包内钢水中 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物重新生成。

(3)出钢过程加入 200 kg 铝块进行强脱氧,同时将低钛低铝硅铁由出钢过程改为 LF 精炼过程加入,也可以有效控制 GCr15 轴承钢中 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物数量。

参考文献

- [1]郝鑫,王新华,杨光维,等.高级别船板钢炉外精炼过程洁净度研究[J].北京科技大学学报,2014,36(11):1471-1475.
- [2]李强,王新华,黄福祥,等.X80 管线钢 LF-RH 二次精炼过程夹杂物行为及控制[J].特殊钢,2011,32(4):26-30.
- [3]李强,王新华,李海波,等.低合金高强钢中非金属夹杂物的改性[J].北京科技大学学报,2012,34(11):1262-1267.
- [4]杨光维,郝鑫,杨叠,等.GCr15 轴承钢冶炼过程钢水洁净度变化[J].钢铁,2014,49(11):31-35.
- [5]Yang J, Chen B. T, Tang W, et al. Experimental Study to Improve the Castability of Aluminum Killed Cold Heading Steel[J]. Steel Research International, 2013, 84(8): 703-712.
- [6]Herrera M, Castro F, Castro M, et al. Modification of Al_2O_3 Inclusions in Medium Carbon Aluminium Killed Steels by AlCaFe Additions[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2006, 33(1), 45-51.
- [7]Li M, Li S, Ren Y, et al. Modification of Inclusions in Linepipe Steels by Ca-Containing Ferrosilicon During Ladle Refining [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2020, 47(1): 6-12.
- [8]Xu J, Wang K, Wang Y, et al. Effects of Ferrosilicon Alloy, Si Content of Steel, and Slag Basicity on Compositions of Inclusions

- During Ladle Furnace Refining of Al-Killed Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2020, 27(9): 1011-1017.
- [9]Xu J, Wang K, Wang Y, et al. Influence Mechanism of Silicon Content in Al-Killed Steel on Compositions of Inclusions During LF Refining[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2021, 48(2): 127-132.
- [10]Deng Z, Liu Z, Zhu M, et al. Formation, Evolution and Removal of $MgO \cdot Al_2O_3$ Spinel Inclusions in Steel[J]. ISIJ International, 2021, 61(1): 1-15.
- [11]Mizuno K, Todoroki H, Noda M et al. Effects of Al and Ca in Ferrosilicon Alloys for Deoxidation on Inclusion Composition in Type 304 Stainless Steel[J]. Iron Steelmaker, 2001, 28(8): 93-101.

蒋鲤平(1983-),男,工程师,2005年东北大学(本科)毕业,转炉,精炼,连铸生产及产品质量控制。

E-mail:452657523@qq.com

收稿日期:2021-12-02

欢迎订阅 2022 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:25.00 元/期 150.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 6292935