

40 t T 型 6 流中间包结构优化对高碳钢中夹杂物的影响

王 勇¹ 成泽伟¹ 陈伟庆¹ 曹长法² 王广顺²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 青岛钢铁公司技术中心, 青岛 266043)

摘 要 通过几何相似 1:3 的水模型对原中间包和优化的增设挡墙中间包进行去除夹杂物的模拟试验, 根据水模拟试验结果, 优化了 40 t 钢包结构并进行高碳钢 82A 和 72A 的生产试验。结果表明, 增设挡墙优化结构后, 中间包内滞止时间和实际停留时间延长, 活塞区比例提高, 而死区比例减小; 中间包结构优化后去除夹杂物的效果明显提高, 采用优化的增设挡墙中间包生产的高碳钢 $\Phi 5.5$ mm 盘条中夹杂物数量由原来的 2.06 ~ 2.52 个/mm² 降至 0.20 ~ 1.06 个/mm², 最大夹杂物尺寸由原来的 (9.87 ~ 13.37) $\mu\text{m} \times$ (6.29 ~ 9.44) μm 降至 (4.01 ~ 8.33) $\mu\text{m} \times$ (3.41 ~ 7.62) μm ; 铸坯中大型夹杂物数量和尺寸也相应降低。

关键词 40 t T 型 6 流中间包 挡墙 高碳钢 夹杂物

Influence of Structure Optimization of a 40 t T-Baffled Six-Strand Tundish on Inclusions in High Carbon Steel

Wang Yong¹, Cheng Zewei¹, Chen Weiqing¹, Cao Changfa² and Wang Guangshun²

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Technology Center, Qingdao Iron and Steel Co., Qingdao 266043)

Abstract The simulation test on removing inclusions in original tundish and optimum tundish established an additional retaining wall has been carried out by using a geometric similarity 1:3 water model, and based on water-simulated test results, the structure of 40 t tundish is optimized and the pilot production of high carbon steel 82A and 72A is carried out. Results show that with optimum tundish established an additional retaining wall, the stagnation time and actual retained time are prolonged, the piston area ratio increases and the dead zone ratio reduces; with optimum tundish structure the effect of inclusion removal improves significantly, the inclusion number in $\Phi 5.5$ mm coil of high carbon steel produced with optimum tundish established an additional retaining wall decreases from original 2.06 ~ 2.52 inclusion /mm² to 0.20 ~ 1.06 inclusion/mm², the size of maximum inclusion decreases from original (9.87 ~ 13.37) $\mu\text{m} \times$ (6.29 ~ 9.44) μm to (4.01 ~ 8.33) $\mu\text{m} \times$ (3.41 ~ 7.62) μm ; the number and size of large inclusions in casting billet also decrease correspondingly.

Material Index 40 t T-Baffled Six-Strand Tundish, Retaining Wall, High Carbon Steel, Inclusion

高碳钢线材对于钢水的洁净度要求较高, 夹杂物的控制水平直接影响中高碳钢线材制品的产品质量^[1]。对于高碳帘线钢 82A 和 72A 来说, 夹杂物的数量和尺寸是影响拉丝断头率的主要因素之一^[2-3]。合理的中间包结构, 可以促进夹杂物的上浮, 提高钢水洁净度^[4-5]。试验对中间包结构优化前后冶炼的高碳钢各过程样中的夹杂物数量、大小及类型进行研究, 以便对中间包结构的优化效果进行评价。

1 试验方法

中间包水模型装置按照模型与原型比为 1:3, 采用有机玻璃制成。试验系统主要由上水、示踪剂加入、数据采集和排水系统 4 部分组成。优化后中间包结构和挡墙开孔位置如图 1(b) (单位 mm) 所示, 而原有中间包结构图 1(a) 无图 1(b) 中的方形孔挡墙, 其他基本结构和尺寸均与优化后中间包相同。

根据中间包结构的水模型研究结果, 进行中间

包的改进优化。中间包优化前后进行现场工业试验。冶炼采用钢种为高碳钢 82A 和 72A, 其主要成分如表 1 所示。生产 82A 和 72A 采用的工艺流程为: 转炉 → LF 精炼 → 小方坯连铸 → 高速线材轧制。中间包钢水容量为 40 t, 采用中性覆盖剂 ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1$, $(\text{MgO}) = 8\%$, 铸坯断面尺寸为 150 mm \times 150 mm, 最终轧制盘条规格为 $\Phi 5.5$ mm。

在现场, 首先当冶炼 82A 时在原中间包取 3 个炉次 (13E、15E 和 17E) 的过程样 (即取中间包、铸坯和盘条样); 然后当冶炼 82A 和 72A 时在优化中间包分别取 1 个炉次 (14E、28E) 的过程样 (即取浇铸平台、开浇 20 min 后中间包挡墙前、开浇 20 min 后中间包挡墙后、铸坯、盘条样)。将这些过程样做显微夹杂物分析、大型夹杂物的检测, 以便对中间包改进的效果进行对比评价。

现场试验所取试样均按照金相制样的方法镶

样、研磨、抛光后在光学显微镜下观察统计显微夹杂物数量和尺寸,其中夹杂物的数量由单位面积上当量直径(5 μm)的夹杂物个数(个/mm²)表示,夹杂物的大小由夹杂物的平均尺寸表示。然后,再采用扫描电镜进行能谱分析,测出各种夹杂物的成分。连铸坯中的大型夹杂物采用大样电解方法,做出大型夹杂物总量和粒径分布统计,然后用扫描电镜对分离出的大型夹杂物进行能谱分析。

2 试验结果与分析

2.1 水模型研究结果

水模型研究结果如表 2 所示,可以看出:

(1)优化中间包内钢水的滞止时间明显高于原中间包,滞止时间延长,活塞区扩大。优化中间包内活塞区比例更高,死区比例更小。

(2)优化中间包峰值时间较长,表明流场更合理。

(3)由于优化中间包内增设的方形孔挡墙将中间包注流区完全分割成两部分(注流前区和后区),钢液都必须通过挡墙上的方形孔才能到达注流后区,再经过导流孔进入水口区,因此中间包优化后钢液的停留时间有所增加,这对促进夹杂物碰撞、聚集长大和上浮有利。

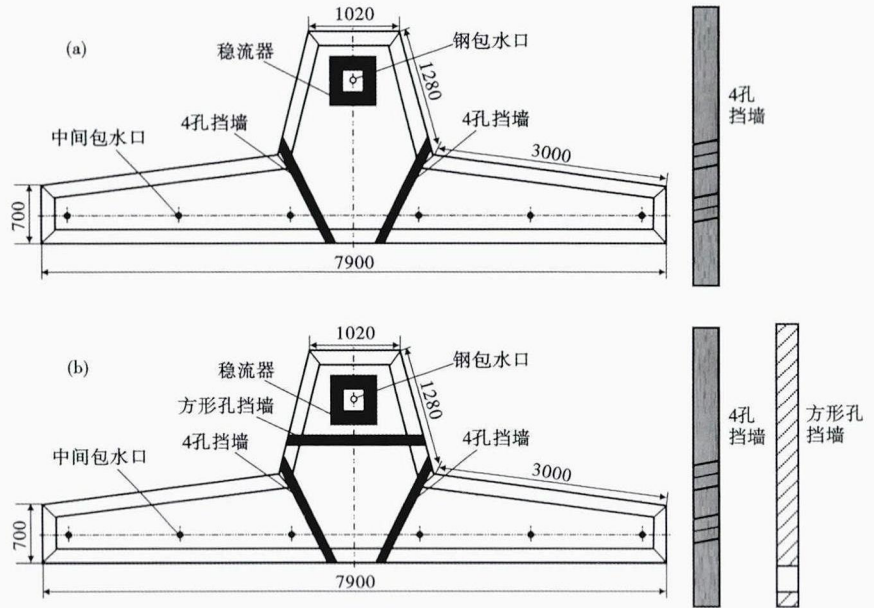


图 1 原中间包(a)和优化中间包(b)结构简图
Fig. 1 Schematics of original tundish (a) and optimum tundish (b)

表 1 高碳钢 82A 和 72A 主要化学成分/%

Table 1 Main chemical composition of high carbon steel 82A and 72A / %

牌号	C	Si	Mn	P	S
82A	0.81	0.20	0.53	0.012	0.006
72A	0.72	0.21	0.54	0.014	0.008

表 2 原中间包和优化中间包的水模型实验结果

Table 2 Experimental results of water model of original and optimum tundish

项目	滞止时间/s	峰值时间/s	电导率峰值/(μs·cm ⁻¹)	实际平均停留时间/s	中间包内流动模式组成/%		
					活塞区	死区	全混区
原中间包	29	196	0.198 6	414	22.50	17.12	60.38
优化中间包	72	202	0.191 2	461	27.97	5.77	66.26

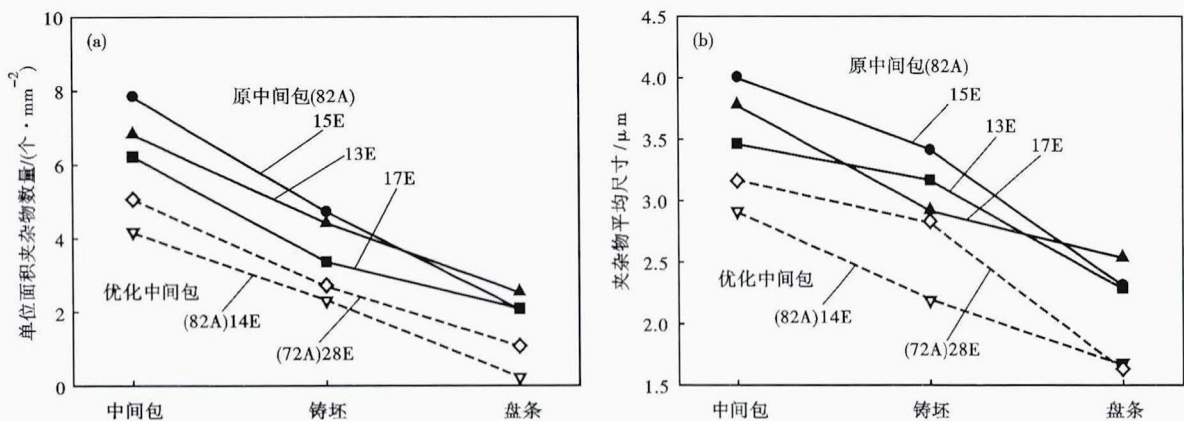


图 2 原中间包和优化中间包过程钢样中夹杂物数量变化(a)和尺寸变化(b)的对比

Fig. 2 Comparison of number (a) and size (b) variation of inclusions in steel sampling in process with original and optimum tundish

表 3 原中间包和优化中间包冶炼生产的盘条中夹杂物数量和尺寸

Table 3 Number and size of inclusions in wire coil steelmaking by original and optimum tundish

炉次	单位面积夹杂物量/ (个·mm ⁻²)	平均直径/ μm	夹杂物尺寸分布/%			平均长宽比	最大夹杂物尺寸 (长×宽)/ (μm×μm)	
			1~2μm	2~5μm	>5μm			
原中间包 (82A)	13E	2.08	2.30	52.87	42.97	4.16	2.02	13.37×9.44
	15E	2.06	2.25	54.39	41.23	4.38	1.88	12.50×6.29
	17E	2.52	2.55	43.61	50.59	5.80	1.76	9.87×8.51
优化 中间包	(82A) 14E	0.20	1.69	82.61	17.39	-	2.44	4.01×3.41
	(72A) 28E	1.06	1.64	82.35	15.44	2.21	2.04	8.33×7.62

表 4 原中间包和优化中间包冶炼的钢中显微夹杂物的类型,能谱分析

Table 4 Type of micro-inclusions in steel steelmaking by original and optimum tundish, energy spectrum analysis

项目	位置	夹杂物类型
优化中间包	挡墙前方	CaO-MnO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO 和 CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO 为主
	挡墙后方	CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO 为主
	铸坯	CaO-MnO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO 为主
	盘条	少量 CaO-MnO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 、MnO-Al ₂ O ₃ -MgO、CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃
原中间包	中间包	CaO-MnO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO 为主,少量 CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO
	铸坯	CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO 为主,少量 CaO-MnO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO
	盘条	CaO-MnO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO 为主

2.2 中间包结构优化对钢中显微夹杂物的影响

2.2.1 中间包结构对钢中显微夹杂物数量和尺寸的影响

现场试验优化前后中间包钢中显微夹杂物数量和尺寸的对比由图 2 和表 3 所示。

由图 2 可以看出:

(1) 中间包→铸坯→盘条的过程中,无论是显微夹杂物数量还是平均尺寸都是逐渐减少的趋势;

(2) 优化中间包两个炉次在中间包→铸坯→盘条各过程样夹杂物数量和平均尺寸都比原中间包 3 个炉次有所减少。夹杂物统计结果表明:方形孔挡墙前取样与挡墙后所取钢样相比,挡墙前的显微夹杂物的数量和尺寸都高于挡墙后,这表明优化中间包增设的挡墙使得部分尺寸稍大的显微夹杂物上浮

表 5 原中间包和优化中间包生产的铸坯中大型夹杂物数量和粒径分布

Table 5 Distribution of number and size of large inclusions in casting billet produced with original and optimum tundish

炉次		50~180μm		180~280μm		>280μm		夹杂物总量/mg	铸坯试样电 解质量/g	钢中夹杂物含量/ (mg·10kg ⁻¹)
		质量/ mg	比例/ %	质量/ mg	比例/ %	质量/ mg	比例/ %			
原中间包 (82A)	13E	0.5	14.71	0.6	17.65	2.3	67.64	3.4	887.6	38.31
	15E	0.3	14.29	0.3	14.29	1.5	71.42	2.1	1 323.9	15.86
	17E	0.5	14.29	0.8	22.86	2.2	62.85	3.5	1 417.5	24.69
优化 中间包	(82A) 14E	0.1	9.09	0.4	36.36	0.6	54.55	1.1	920.2	11.95
	(72A) 28E	0.5	19.23	0.6	23.08	1.5	57.69	2.6	1 217.6	21.35

排除。

由表 3 可知:

(1) 优化中间包相比原中间包,显微夹杂物平均数量由 2.22 个/mm² 减少至 0.63 个/mm²;

(2) 优化中间包与原中间包相比,显微夹杂物平均尺寸由 2.37 μm 减小至 1.67 μm;

(3) 优化中间包中 <2 μm 的夹杂物超过 80%, >5 μm 的夹杂物明显减少,最大夹杂物尺寸也明显减小,可见优化中间包中较大尺寸的夹杂物比较多地被上浮排除;

(4) 原中间包的夹杂物长度比平均值为 1.89,优化中间包则为 2.24,说明夹杂物的塑性化得到改善,也说明了塑性差的、熔点高的夹杂物在中间包内比较多地

被排除;

(5) 优化中间包 14E(82A) 炉次冶炼的盘条中夹杂物统计各项指标都优于其他炉次,夹杂物控制得很好。

2.2.2 钢中显微夹杂物的类型

能谱分析得到的优化前后中间包钢中显微夹杂物类型如表 4 所示,可以看出:

(1) 原中间包内显微夹杂物 CaO-MnO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 数量较多,并有少量的 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO;优化中间包内方形孔挡墙前方夹杂物类型主要以 CaO-MnO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 和 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 为主,方形孔挡墙后方的夹杂物主要是 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO,说明 CaO-MnO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 夹杂在挡墙前方排除得较多。

(2) 原中间包冶炼的盘条内夹杂物以 CaO-MnO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 为主,而在铸坯中的主要夹杂 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 在原中间包内则明显减少,可能该类夹杂在轧制中被轧碎,说明该类夹杂熔点较低。优化前后中间包冶炼的盘条样夹杂

物类型差别较大,优化中间包的夹杂物类型包括 $\text{CaO-MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 、 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 等,说明在优化中间包内夹杂物 $\text{CaO-MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 比较多地被排除。

2.3 中间包结构优化对连铸坯中大型夹杂物的影响

2.3.1 中间包结构对连铸坯中大型夹杂物数量和尺寸的影响

原中间包和优化中间包连铸坯大样电解后所得大型夹杂物数量和粒径分布的比例如表 5 所示,可看出:

(1)原中间包的连铸坯中大型夹杂物平均数量为 26.29 mg/10 kg 钢,而优化中间包的连铸坯中大型夹杂物平均数量降至 16.65 mg/10 kg 钢。

(2)从大型夹杂物尺寸分布的比例上看,原中间包的铸坯中尺寸大于 280 μm 的大型夹杂物比例平均值为 67.30%,而优化中间包则降至 56.12%。

2.3.2 连铸坯中大型夹杂物的类型和来源

对连铸坯的大样电解夹杂物进行扫描电镜能谱分析,原中间包的铸坯试样中大型夹杂物有以下类型:

(1) SiO_2 夹杂:块状,尺寸多在 200 ~ 300 μm ,数量较多;

(2) $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂:含有少量的 Na,可能是钢液中的脱氧产物与保护渣反应的产物;

(3) $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂:复合氧化产物,少量含有 Na 或 K 中的一种或两种元素,可能是卷入钢液中的钢包渣、中间包覆盖剂、保护渣相互反应聚合的产物;

(4) CaO-SiO_2 夹杂:不规则状,复合氧化产物或由渣进入钢液中;

(5) Al_2O_3 夹杂物:形状不规则,铝氧化产物或水口侵蚀进入钢液;

(6) $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 夹杂:复合氧化产物,多呈球状,尺寸多小于 150 μm ,主要存在于 15E (82A) 炉次,可能是钢包渣与脱氧产物的反应聚合产物。

优化中间包的铸坯试样中大型夹杂物主要类型为:

(1) SiO_2 夹杂:块状,含有较多的 FeO;

(2) $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂:可能是钢液中的脱氧产物与保护渣反应的产物;

(3) $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂:复合氧化产物,少量含有 K 元素,可能脱氧物与保护渣相互反应聚合的产物。

对比优化前后中间包的铸坯中大型夹杂物的类型可以看出,原中间包铸坯中出现的 CaO-SiO_2 、 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 、 Al_2O_3 等大型夹杂物在优化中间包内未出现,优化中间包铸坯中大型夹杂物类型比较简单,表明大型夹杂物去除效果较好。

3 结论

(1)优化中间包增设了方形孔挡墙之后,比原中间包内的滞止时间和实际停留时间更长,有利于夹杂物上浮排除,活塞区比例更高,而死区比例更小,这表明优化中间包的结构更为合理。

(2)在中间包→铸坯→盘条过程样,优化中间包比原中间包在显微夹杂物的数量、尺寸上均有明显降低。优化中间包增设的挡墙前与挡墙后所取钢样相比,后者的显微夹杂物数量和尺寸都有所降低,表明尺寸稍大的显微夹杂物容易在挡墙前上浮排除。

(3)优化中间包中方孔挡墙前方的显微夹杂物以 $\text{CaO-MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 和 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 为主;挡墙后方的显微夹杂物以 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 为主,而 $\text{CaO-MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 夹杂物则显著减少,说明该类型的夹杂物在优化中间包方孔挡墙前方比较多地被排除。

(4)铸坯中大型夹杂物平均数量由原中间包的 26.29 mg/10 kg 降至优化中间包的 16.65 mg/10 kg;原中间包铸坯中尺寸大于 280 μm 的大型夹杂物比例的平均值为 67.30%,而优化中间包的平均值则降至 56.12%。优化中间包铸坯中大型夹杂物类型简单,未发现原中间包铸坯中出现的 CaO-SiO_2 、 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 、 Al_2O_3 等类型的大型夹杂物,表明对这些夹杂物的去除效果较好。

参考文献

- [1] 周德涌. 钢丝与钢绳机械[M]. 湘潭:湘潭职工大学,1992.
- [2] 王立峰,卓晓军,张炯明,等. 冶金过程中帘线钢夹杂物成分控制[J]. 北京科技大学学报,2003,25(4):308-311.
- [3] Yamada Y, Shimazu S. Wire Rod for Higher Breaking Strength Steel Cord[J]. Wire Journal International, 1986, 19(4):53-65.
- [4] 黄 奥,汪厚植,张美杰,等. 连铸中间包挡墙设置优化的数学模拟研究[J]. 炼钢,2005,21(6):27-29.
- [5] 李东辉,李宝宽. 中间包双板多孔挡墙流动控制去除夹杂物效果的研究[J]. 金属学报,1999,35(10):1107-1111.

王 勇(1988-),男,硕士研究生,炼钢过程质量控制研究。

E-mail:wangyong19881207@sina.com

收稿日期:2013-08-20