

大管坯连铸中间包钢液内夹杂物去除的研究

杨树峰^{1,2}, 李京社¹, 张立峰², 高锦国¹, 唐海燕¹, 石少清^{1,3}

(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 密苏里科技大学 冶金工程系, 美国 密苏里州 罗拉市 65401; 3. 衡阳钢管公司 技术中心, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 通过中间包水模型试验和工业试验研究了 U 型挡墙中间包和 Y 型挡墙中间包对夹杂物去除的影响。结果表明: Y 型挡墙中间包能提高夹杂物的去除率。与 U 型挡墙中间包相比, 从中间包到铸坯, 钢中平均总氧去除率显著提高, 铸坯中大于 50 μm 的夹杂物显著减少, 而显微夹杂数目变化不大; 同时 Y 型挡墙中间包内各流夹杂物分布较均匀。使用 U 型挡墙中间包时, 中间包到铸坯过程吸氮较少。

关键词: 中间包; 水模型; 夹杂物去除; 工业实践

中图分类号: TF777.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1043(2009)03-0049-04

Study on inclusion removal in liquid steel in a big round billet continuous casting tundish

YANG Shu-feng^{1,2}, LI Jing-she¹, ZHANG Li-feng², GAO Jin-guo¹,
TANG Hai-yan¹, SHI Shao-qing^{1,3}

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Dept. of metallurgical engineering, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO 65401, USA
3. Research center, Hengyang Pipe Company Ltd., Hengyang 421001, China)

Abstract: The effect of two different flow controlled tundishes (U-baffled tundish and Y-baffled tundish) on inclusion removal was studied using water modeling and industrial experiments. Comparing to the U-baffled tundish, the Y-baffled tundish obviously improved inclusion removal. The removal percent of the total oxygen remarkably increased, and more inclusions over 50 μm can be removed while the micro-inclusions observed using 2D optical microscope changed little. Furthermore, the amount of inclusions at the different strands of the Y-baffled tundish is more homogeneous. Using the U-baffled tundish, the nitrogen pickup less occurs in the metallurgical process from tundish to the continuous caster.

Key words: tundish; water modeling; inclusion removal; industrial practice

钢中非金属夹杂物直接影响钢的质量和性能,为了去除或减少进入结晶器的夹杂物数量,近年来国内外十分注重研究夹杂物在中间包内的运动和去除^[1-7]。净化钢水去除钢水中的夹杂物已经成为现代连铸中间包的重要功能。衡阳华菱连轧管有限公司大管坯连铸生产线生产的连铸坯全部用来轧制无缝钢管,对铸坯质量特别是钢中

夹杂物含量要求非常高,为了降低钢中的夹杂物含量,进一步提高铸坯质量,采用水模型试验对该公司炼钢厂两种不同类型挡墙的中间包去除夹杂物的效果进行了模拟研究,同时通过大量的工业试验研究了不同类型挡墙中间包对减少总氧含量和总氮含量以及对去除微观夹杂物 and 大型夹杂物的影响。

作者简介: 杨树峰(1981-),男,北京科技大学冶金与生态工程学院,博士生,从事钢中夹杂物控制的研究。

1 夹杂物上浮水模型试验

1.1 试验原理及方法

本研究依据相似原理,在几何和动力学相似条件下,以模型与原型 1 2.3 的相似比($\lambda = 0.43$)建造有机玻璃水模型,由于中间包水模型实验中,水的流动主要是重力和惯性力起主导作用的湍流流动,故选用弗鲁德准数(Froude Number)作为实验的决定性准数。于是式(1)应成立:

$$Fr = u_p^2 / g L_p = u_m^2 / g L_m \quad (1)$$

因此长度、速度、流量的相似条件为:

$$L_m = \lambda L_p = 0.43 L_p \quad (2)$$

$$u_m = \lambda^{0.5} \cdot u_p = 0.66 u_p \quad (3)$$

$$Q_m = \lambda^{2.5} Q_p = 0.12 Q_p \quad (4)$$

式(1~4)中 p、m 分别代表原型和模型;L 为长度,m;u 为速度,m/s;Q 为流量,L/h; λ 为相似比。

本试验选取实际连铸生产过程中 30 t 四流中间包(如图 1 所示),拉速为 0.9 m/min,圆坯直径为 330 mm。中间包原型和水模型的参数参见表 1。

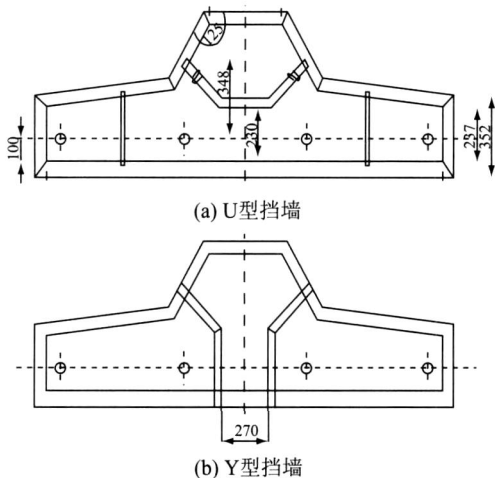


图 1 两种带不同挡墙的中包

表 1 中间包原型与模型对应的工艺参数

中间包	单个水口 流量/(L·h ⁻¹)	长水口插入 深度/m	长水口 内径/m	中包液面 高度/m
原型	4 616.4	0.180	0.070	0.760
模型	575.4	0.078	0.030	0.330

实验用聚苯乙烯塑料颗粒模拟夹杂物。如图 2 所示,称取 100 g 聚苯乙烯塑料发泡粒子,从长水口处脉冲加入中间包内,在中间包 4 个流的出水口处分别用布袋收集流出的粒子,经过 1 068 s

(二倍理论停留时间)后停止收集,将收集到的粒子晾干后称重,计算夹杂物去除率公式如式(5):

$$\eta = 1 - \frac{\text{各水口收集夹杂物总量}}{\text{加入量}} \times 100 \% \quad (5)$$

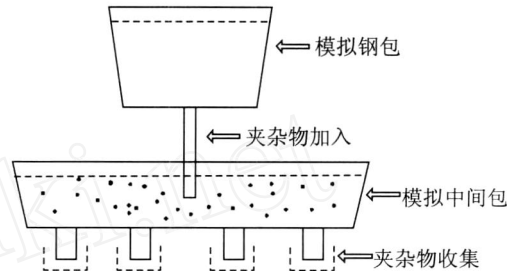


图 2 中间包夹杂物去除水模拟实验装置示意图

本次实验,用 50 目的塑料发泡粒子,密度 $\rho_{\text{inc},m} = 64 \text{ kg/m}^3$,代入式(6)^[8]

$$d_{\text{inc},m} / d_{\text{inc},p} = \lambda^{0.25} \cdot [(1 - \rho_{\text{nc},p} / \rho_{\text{st},p}) / (1 - \rho_{\text{nc},m} / \rho_{w,m})]^{0.5} \quad (6)$$

式(6)中,d 为直径,m; ρ 为密度,kg/m³;下标 inc,st 和 w 分别代表夹杂物、钢水和水。

可得本次实验模拟的夹杂物的实际尺寸为 250~300 μm 。

1.2 试验结果及分析

夹杂物上浮试验结果如表 2 所示。从表 2 可看出,Y 型挡墙中间包夹杂物上浮率为 96.07%,与 U 型挡墙中间包相比夹杂物上浮率提高了 5%,所以 Y 型挡墙中间包去除夹杂物的能力较强。用 U 型挡墙中间包,铸坯边部流与中部流铸坯夹杂物收集量最大波动为 1.702 g,而 Y 型挡墙中间包,铸坯边部流与中部流铸坯夹杂物收集量最大波动是 0.04 g,表明 Y 型挡墙中间包内边部流与中部流之间差异减小,钢液流动更加均匀。

表 2 水模型夹杂物去除实验结果

中间包	实际平均停留时间/s	加入量/g	各水口夹杂物收集量/g				η %
			1 号	2 号	3 号	4 号	
U 型挡墙	395	100	1.228	2.891	2.902	1.198	91.78
Y 型挡墙	458	100	0.963	0.995	1.003	0.965	96.07

2 工业试验

2.1 试验方法

对原型中间包和改进型中间包分别在中间包内和铸坯上进行取样分析,取样钢种为 27SiMn。中间包取样是在每个钢种的 1 个浇次的第 2 炉和第 3 炉的中间包液面稳定时,分别取圆饼样 2 个。铸坯取样是在中间包取样结束 30 min 后分别取

边部流与中间流的铸坯各 1 块,在铸坯样上分别切大样和金相样,坯样位置为铸坯内弧 1/4 处。对所取试样进行如下分析:(1)分析中间包钢样和铸坯的平均总氧、总氮含量变化;(2)在金相显微镜下对夹杂物进行分类,并对各类夹杂物的数量、尺寸进行统计;(3)通过对电解大样的分析得到大颗粒($\geq 50\text{ }\mu\text{m}$)夹杂物在铸坯中的含量。

2.2 试验结果及分析

2.2.1 氧氮含量分析

钢中的全氧量是自由氧和与非金属夹杂物的结合氧之和。自由氧的含量主要受与脱氧剂之间的热力学平衡控制,而且通常较为稳定,所以全氧量就可以用来间接衡量钢中氧化物夹杂总数量。而钢液在各个炼钢容器中的氮含量的差异是钢液在运输传递过程中是否吸入空气的重要指标(见表 3),因此总氮量可以用来粗略间接衡量钢的洁净度和来源于二次氧化夹杂物的质量问题。

表 3 试样中氧氮含量						
取样位置	挡墙类型	试样编号	$w(\text{T.O})/10^{-6}$		$w(\text{N})/10^{-6}$	
			单值	平均值	单值	平均值
中间包	U 型	2	23	21	73	87
		3	18		100	
	Y 型	2	44	35	120	103
		3	25		85	
铸坯	U 型	2a	10	10	70	88
		2b	11		71	
		3a	10		100	
		3b	9		86	
		4a	12		98	
		4b	8		100	
	Y 型	2a	10	10	110	105
		2b	10		120	
		3a	10		100	
		3b	10		88	

注:试样编号中数字代表取样炉次,a 为边部流,b 为中间流

表 3 表明,使用两种不同类型挡墙的中间包,尽管铸坯中的平均总氧含量均能达到 10×10^{-6} ,但使用 U 型中间包时,中间包到铸坯总氧去除 52%,而使用 Y 型中间包,中间包到铸坯总氧去除 71%。用 U 型挡墙中间包,不同流的铸坯清洁度有差别, $w(\text{T.O})$ 可以差别 4×10^{-6} ,而使用 Y 型挡墙中间包时,不同注流铸坯的 $w(\text{T.O})$ 没有差距,均为 10×10^{-6} ,表明使用 Y 型挡墙中间包能使各流铸坯中总氧含量更均匀。

从中间包到铸坯氮含量变化可以反映钢液二

次氧化程度,表 3 显示 U 型挡墙中间包从中间包到铸坯钢液平均吸氮质量分数为 1×10^{-6} ,而 Y 型挡墙中间包从中间包到铸坯钢液平均吸氮质量分数为 2×10^{-6} ,表明 Y 型挡墙中间包浇铸过程中液面波动较大,可能是由于挡墙侧面开孔向上角度较大造成的。

2.2.2 铸坯夹杂物含量分析

铸坯中夹杂物包括显微夹杂(小于 $50\text{ }\mu\text{m}$)和大型夹杂(大于 $50\text{ }\mu\text{m}$)。铸坯中显微夹杂数目统计见表 4。使用 U 型挡墙中间包铸坯中当量直径 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的夹杂物为 $4.93\text{ 个}/\text{mm}^2$;使用 Y 型挡墙中间包,铸坯中当量直径 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的夹杂物为 $4.68\text{ 个}/\text{mm}^2$,使用 Y 型挡墙中间包铸坯中显微夹杂的数目略低于使用 U 型挡墙中间包铸坯中显微夹杂的数目。由 Stoke 上浮公式可知 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒在液体中上浮的速度较小,在中间包内钢液的有限停留时间内很难被上浮去除,故中间包作为炼钢过程中的缓冲容器,对于显微夹杂物的去除效果并不大。

表 4 铸坯中显微夹杂数目统计			
挡墙类型	试样编号	每 mm^2 面积夹杂物个数	
		单值	平均值
U 型	2a	4.95	4.93
	2b	5.12	
	3a	5.50	
	3b	4.19	
Y 型	2a	4.95	4.68
	2b	4.77	
	3a	4.57	
	3b	4.43	

注:表中夹杂物数目是指当量直径为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的夹杂物的个数

铸坯中大型夹杂物的含量如表 5 所示,由表 5 可以看出,使用 Y 型挡墙的中间包能够显著降低铸坯中大型夹杂物的含量,与使用 U 型挡墙的中间包相比大型夹杂物含量降低 65%。同时使用 U 型挡墙中间包,边部流铸坯与中间流铸坯每 10 kg 样中大型夹杂物含量最大波动达到 35 mg ,而 Y 型挡墙中间包,边部流铸坯与中间流铸坯每 10 kg 样中大型夹杂物含量最大波动只有 3.6 mg ,表明 Y 型挡墙中间包各流之间差异明显减小。

采用 Y 型挡墙中间包有利于钢水中夹杂物去除的主要原因是钢水在 Y 型挡墙中间包内的平均停留时间较长,使用 Y 型挡墙中间包中部流和边部流的钢液的平均停留时间分别为 477 s 和

表 5 铸坯中大型夹杂物含量

挡墙 类型	试样 编号	每 10 kg 铸坯样中夹杂物含量/ mg	
		单值	平均值
U 型	2a	12.13	14.66
	2b	3.04	
	3a	39.49	
	3b	4.0	
Y 型	2a	4.13	5.12
	2b	7.75	
	3a	4.47	
	3b	4.14	

479 s,而使用 U 型挡墙中间包中部流和边部流的钢液的平均停留时间分别为 417 s 和 445 s。另外 Y 型挡墙中间包可以通过挡墙上孔的倾角来调节钢液到达中部水口和边部水口的时间趋于一致,而 U 型挡墙中间包由于挡墙上孔的方向与钢液流动方向不一致,很难通过调节挡墙上孔的倾角使钢液到达中部水口与边部水口的时间达到一致^[9]。

3 结 论

(1)水模拟试验研究表明:中间包采用 Y 型挡墙能提高夹杂物的上浮率,250 ~ 300 μm 的夹杂物在原型挡墙中间包内上浮率为96.07 %,比在 U 型挡墙中间包内上浮率提高 5 %;同时 Y 型挡墙能改善边部流与中间流的流动差异。

(2)钢液经过 Y 型挡墙中间包后钢中的平均总氧质量分数下降 25×10^{-6} ,而经过 U 型挡墙的中间包后平均总氧质量分数只下降了 11×10^{-6} 。用 Y 型挡墙中间包还能使各流铸坯中总氧含量更均匀。但是使用 Y 型挡墙会使中间包液面波

动变大,造成钢液吸氮增加。

(3)使用 Y 型挡墙的中间包能够显著降低铸坯中大型夹杂物的含量,与使用 U 型挡墙的中间包相比大型夹杂物含量降低 65 %,但不同类型挡墙的中间包对铸坯中显微夹杂的含量影响不大。

[参 考 文 献]

[1] 李东辉,李宝宽,赫冀成. 中间包双板多孔挡墙流动控制去除夹杂物效果的模拟研究[J]. 金属学报, 1999, 35(10): 1107-1111.

[2] 张胜军,郑淑国,朱苗勇. 连铸中间包内夹杂物去除行为的水模型研究[J]. 北京科技大学学报,2007,29(8):781-784.

[3] Zhang Li-feng. Fluid flow, heat transfer and inclusion motion in a four-strand continuous casting tundish[J]. Steel Research International. 2005,76(11):784-796.

[4] Zhang Li-feng. Effect of thermal buoyancy on fluid flow and inclusion motion in a tundish without flow control devices, part I: fluid flow [J]. Journal of Iron and Steel Research International,2005, 12(4):20-27.

[5] Zhang Li-feng. Effect of thermal buoyancy on fluidflow and inclusion motion in a tundish without flow control devices, part II: inclusion motion [J]. Journal of Iron and Steel Research International,2005, 12(5):11-17.

[6] Zhang Li-feng. Validation of the numerical simulation of fluid flow in the continuous casting tundish[J], Journal of University of Science & Technology Beijing, 2005,12(2): 116-122.

[7] 张立峰,蔡开科. 连铸中间包钢液流动和夹杂的去除[J]. 炼钢,1995,11(12):43-48.

[8] 王建军,包燕平,曲 英. 中间包冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.

[9] Koria S C,Singh S. Physical modeling of the effects of the flow modifier on the dynamics of molten steel flowing in a tunish[J]. ISU Int, 1994, 34(10):784-793.

(修回日期: 2008-12-18)

(上接第 48 页)

[参 考 文 献]

[1] 职建军,黄可为,杜 斌. 宝钢板坯连铸新一代漏钢预报系统(BBPS)的开发实践[C]//2005 中国钢铁年会论文集, 2005:746-748.

[2] Tannka T, Endo H, Kamada N, et al. Trouble forecasting system by multi-neural network on continuous casting process of steel production[J]. Artificial Neural Network, 1991:835-840.

[3] 胡志刚,毕学工,陈崇峰. 连铸结晶器内粘结漏钢的形成机理及对策 [J]. 炼钢,1998,(6):23-27.

[4] Blazek K E, Saucedo I G. Characteristics of the formation, propagation and recovery of sticker/ hanger type breakouts [J]. ISU International, 1990, 30(6):435-443.

[5] 郭 戈,乔俊飞. 连铸过程控制理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2003:81-82.

(收稿日期: 2008-05-29)