

## 气幕挡墙中间包仿真优化及其冶金效果

马光林<sup>1</sup> 皮怀玉<sup>1</sup> 龚荣波<sup>1</sup> 李全智<sup>1</sup> 邓乐锐<sup>2</sup> 黄 奥<sup>3</sup>

(1 首钢水城钢铁(集团)有限责任公司,六盘水 553028; 2 北京联合荣大工程材料有限责任公司,北京 101400;  
3 武汉科技大学省部共建耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地,武汉 430081)

**摘 要** 根据水钢炼钢厂 150 mm × 150 mm 六流连铸 32 t 中间包的结构操作工艺参数,采用数模仿真法研究了气幕挡墙技术对中间包内钢液流动特性及夹杂物去除的影响,并对 HPB235 和 65 钢进行了工业试验。结果表明,气幕挡墙可以有效改善钢液的流动状态,均衡各出口停留时间,有效延长钢液的平均停留时间,降低死区体积,提高夹杂物去除率。该技术适应多流中间包纯净钢冶炼的需求。

**关键词** 中间包 气幕挡墙 数模仿真 优化 工业实践

## Mathematical Simulation for Optimization of Tundish with Gas Curtain and Its Metallurgy Effects

Ma Guanglin<sup>1</sup>, Pi Huaiyu<sup>1</sup>, Gong Rongbo<sup>1</sup>, Li Quanzhi<sup>1</sup>, Deng Lerui<sup>2</sup> and Huang Ao<sup>3</sup>

(1 Shougang Shuicheng Iron and Steel (Group) Co Ltd, Liupanshui 553028;

2 Beijing Allied Rongda Engineering Material Co Ltd, Beijing 101400;

3 State Key Lab of Refractories and Ceramics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** According to structure and operation parameters of a 32 t tundish for 150 mm × 150 mm 6-strand concasting billet at steelmaking workshop, Shuicheng Steel, the effect of gas curtain technology on characteristics of liquid flow in tundish and removal rate of inclusion particles in steel has been studied by using mathematical simulation method, and the commercial test for casting HPB235 and 65 C steel is carried out. Results show that the gas curtain weir is available to improve flow situation of liquid, balance residence time at each outlet, effectively prolong the residence time of liquid in tundish, decrease dead zone volume and increase removal rate of inclusion particles. This technology is suitable to meet the requirement for cleanliness steel steelmaking with tundish for multi-strand casting.

**Material Index** Tundish, Gas Curtain Weir, Mathematic Simulation, Optimization, Commercial Practice

实际生产中,保证钢的清洁度、降低钢中夹杂物是提高钢材质量的有效途径之一。对于首钢水城钢铁有限责任公司(简称水钢)六流连铸机来说,由于钢包浇注点至中间包的多个水口的距离相差很大,不能有效地把钢包注入中间包的钢水及时均衡地分配给各个结晶器,因而容易造成中间包远端水口因钢水温降太大而冻结,而近端夹杂物去除又不理想。

近年来气幕挡墙技术在中间包上的应用,它不仅有效改善了钢液的流动,延长了钢液的停留时间,使中间包钢液流场趋于合理,每个水口处的钢水平均停留时间和温度差异得以缩小,确保多流连铸机的正常操作;还可以利用气泡来捕获微小夹杂物,最大限度降低了钢中夹杂物含量,提高钢液纯净度<sup>[1-3]</sup>。本实验采用数模仿真法对比研究了采用气幕挡墙技术优化前后的中间包内钢液流动特性及夹杂物去除情况,并进行了工业试验,验证了该技术的冶金效果。

### 1 数值仿真优化

#### 1.1 数学模型

本实验采用欧拉-欧拉两流体模型描述中间包内的气液两相流动,其中钢液作为主相,气体作为第二相。对每一相认为是三维稳定的湍流流动。描述两相流的基本方程包括液相和气相的连续性方程、动量方程、湍动能方程及湍动能耗散率方程,具体形式参见文献[4]。示踪剂在钢液中的湍流扩散方程参见文献[2],夹杂物的轨迹及去除率计算参见文献[5],边界条件参见文献[5~7]。

#### 1.2 计算条件与方案

以水钢 6 机 6 流 32 t 连铸中间包为计算模型,其结构及气幕挡墙安装位置如图 1 所示,中间包侧壁为倾斜壁,钢包长水口下方设有湍流控制器,两边设有斜孔挡墙,气幕挡墙对称安装。钢包长水口的内径为 65 mm,插入液面下 100 mm。铸坯截面尺寸为 150 mm × 150 mm,拉坯速度为 1.8 m/min。在固体壁面及自由表面采用无滑移边界。钢液入口速度

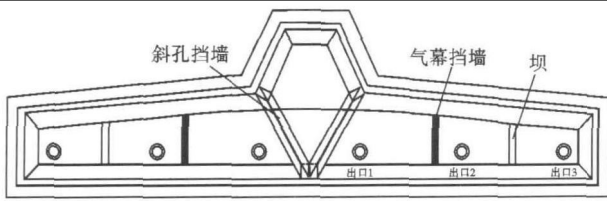


图 1 气幕挡墙中间包结构示意图(底吹气体)

Fig. 1 Sketch of tundish with gas curtain weir (bottom gas blowing)

根据连铸机的拉速和铸坯断面尺寸确定,并假定为常数。因吹气量很小时少量的气泡在中间包内难以形成气幕挡墙,而当吹气量过大易引起金属-渣界面卷渣现象,严重时还会冲开表面保护渣而严重污染钢水。因此本研究根据文献[7]控制适当的吹气量,其计算方案见表 1。

表 1 气幕挡墙中间包仿真优化方案(底吹气体)

Table 1 Schemes of simulation optimization for tundish with gas curtain weir (bottom gas blowing)

方案(No)	控流装置	吹气位置/mm
1	空中间包	-
2	斜孔挡墙	-
3	斜孔挡墙 + 气幕挡墙	1 100
4	斜孔挡墙 + 气幕挡墙	1 550
5	斜孔挡墙 + 气幕挡墙	2 000

### 1.3 网格划分与求解

采用正交法划分 6 面体网格。为了保证计算的精度并加快收敛的速度,在入口、出口及靠近壁面处网格划分密些。总网格数 420 000 (图 2)。采用 SIMPLEC 法,利用 CFD 商业软件求解各方程。得到稳定的流场后,在钢液入口处瞬态加入示踪剂,求解瞬态的三维湍流扩散方程,可求出钢液在中间包内的停留时间分布 (RTD) 曲线。根据各 RTD 曲线,可以分析得到各流最短停留时间  $t_{min}$ 、出口示踪剂浓度达到最大值的时间  $t_{peak}$ 、平均停留时间  $t_{av}$ ,以及整个中间包钢液平均停留时间  $T_{av}$ ,并结合相应的流动模型,可以计算出中间包内全混流区 ( $V_m$ )、活塞流区

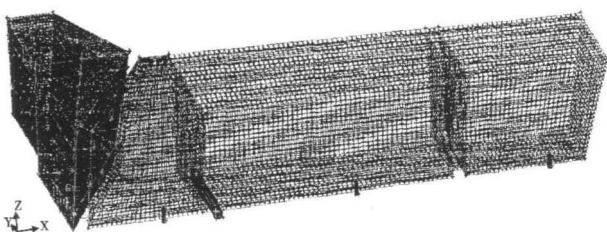


图 2 中间包网格划分示意图

Fig. 2 Schematics of grid division of tundish

( $V_p$ )、滞止流区 ( $V_d$ ) 的体积分数,分析钢液的流动特征。夹杂物去除的计算参见文献[5]。

## 2 结果与分析

### 2.1 中间包钢液流动

由于该中间包结构对称,取其 1/2 轴对称截面进行分析。图 3(a) 为空中间包横向入口截面的流场图,图 3(b) 为空中间包纵向出口截面的流场图,图 4 为加装斜孔挡墙和气幕挡墙中间包纵向斜孔、出口截面的流场图。

从图 3 可以看出,钢液以较大的速度由入口冲击到中间包底部,然后沿着包底向四周扩散流动。当流动到前后壁面后沿着壁面向上流动,在靠近前

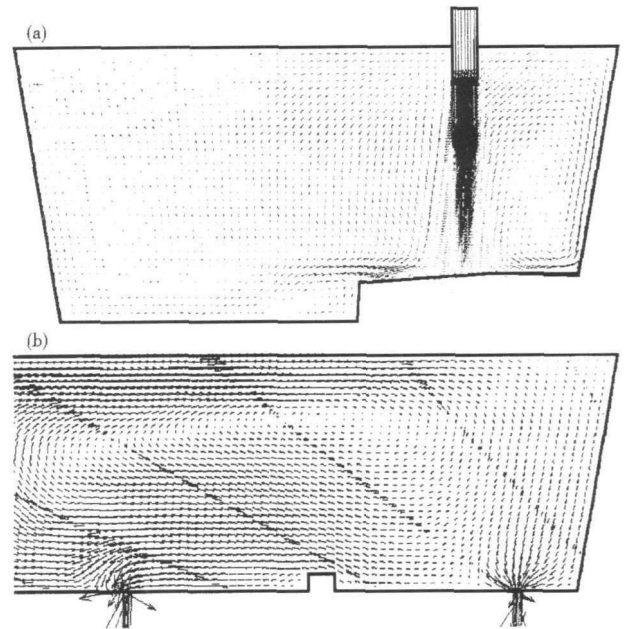


图 3 空中间包横向入口截面 (a) 和纵向出口截面 (局部) (b) 流场图

Fig. 3 Flow field diagram of liquid on cross section of inlet (a) and on longitudinal section of outlet (local) (b) in bare tundish

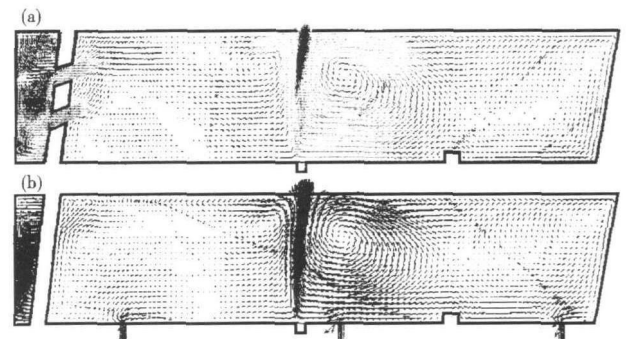


图 4 气幕挡墙中间包斜孔 (a) 和出口 (b) 纵向截面流场图

Fig. 4 Flow field diagram of liquid on longitudinal section of inclined hole (a) and outlet (b) in tundish with gas curtain weir

后壁面处形成小的回流区。钢液流动到液面后沿着液面向四周扩展,由图 3(b)可见,钢液在整个浇注区流动速度及湍动能很小,近乎停滞,造成中间包内死区体积较大,未有效上扬流动,短路流明显。

由图 4 可以看到,加装斜孔挡墙,尤其是采用气幕挡墙技术进行优化后,吹入的气泡在中间包内形成了气泡幕,气泡带动钢液向上流动,改变了钢液的流动方向,使得经过斜孔挡墙上扬流动的钢液并未沿着包底及侧壁流向最近出口,而是再次形成上扬流动,有利于均衡各出口停留时间并延长平均停留时间。而且由于气体的吹入,形成的气泡与钢液间

相互作用,在剪切力的作用下钢液改变了流动方向,在气幕挡墙的两侧形成两个方向相反的回流区,增加了该区域钢液的混合程度,尤其是靠近出口一侧的回流降低了死区体积,增加了中间包内有效容积;同时也增大了夹杂物的碰撞长大机率,有利于夹杂物的上浮去除。

### 2.2 中间包钢液停留时间

研究表明<sup>[2]</sup>,钢液在中间包内的停留时间越长,夹杂物上浮去除率越大。中间包内钢液的 RTD 曲线如图 5 所示,对 RTD 曲线的分析如表 2 所示。

由图 5 及表 2 可知,在原始空中间包配置中,无

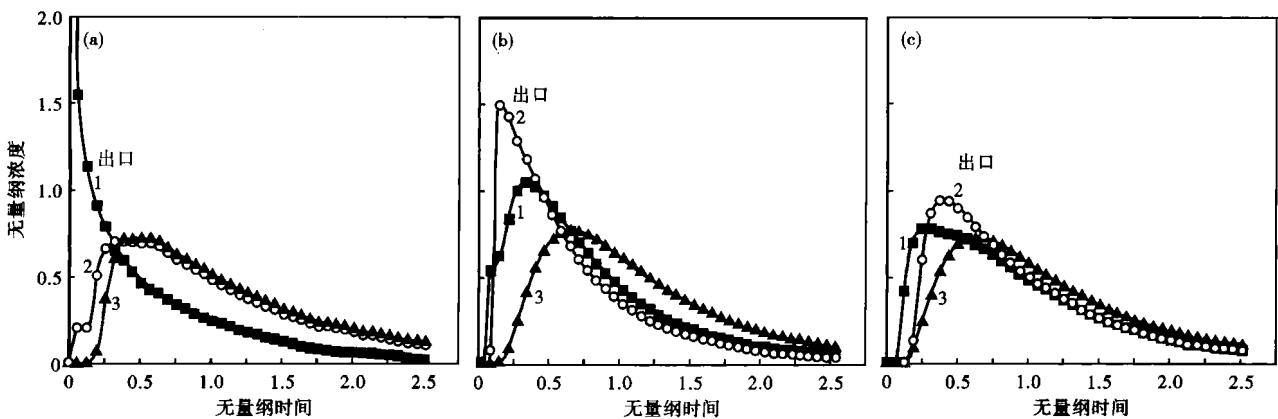


图 5 中间包停留时间(RTD)曲线:(a)原始空中间包;(b)配置斜孔挡墙;(c)配置气幕挡墙(方案 4)

Fig. 5 Curves of residual time distribution (RTD) for tundish: (a) original bare tundish; (b) with weir of inclined hole; (c) with gas curtain weir (scheme No4)

表 2 中间包各方案停留时间(RTD)曲线分析结果

Table 2 Analysis results of curves of residual time distribution (RTD) for each scheme of tundish

方案 (No)	出口	$t_{min}/$ s	$t_{peak}/$ s	$t_{av}/$ s	$T_{av}/$ s	$V_n/$ %	$V_p/$ %	$V_m/$ %
1	1	2	16	418	647	41.2	12.9	45.9
	2	23	312	691				
	3	101	411	786				
2	1	18	250	580	685	35.3	16.5	48.2
	2	36	191	510				
	3	86	506	832				
3	1	8	125	541	711	32.2	13.2	54.6
	2	27	216	669				
	3	106	512	978				
4	1	46	223	711	742	27.9	16.9	55.2
	2	94	318	739				
	3	82	503	847				
5	1	32	208	509	735	31.3	17.6	51.1
	2	68	391	775				
	3	88	428	807				

控流装置,导致停留时间很短,死区体积非常大,钢液混合较差;安装斜孔挡墙后,从长水口冲出的钢液被斜孔引导流向表面的多数钢液在尚未到达中间包

端部时就开始下降,从中间包相近出水口流出,同时由于这种现象的存在也导致了中间包端部死区体积的增大且各水口仍有较大差异。当采用气幕挡墙技术后,钢液与气泡相互作用,气幕挡墙的两侧形成两个方向相反的回流区,加强了搅拌,延长了有效路径从而有效延长了停留时间。尤其是采用方案 4,3 个出口的停留时间更趋均匀,停留时间最大差异由空中间包的 367.25 s 减少到 298.27 s,平均停留时间延长 88 s,死区体积最小仅 27.91%,相比空中间包减小 13.34%,有利于夹杂物的上浮去除。

### 2.3 中间包夹杂物去除率

表 3 为中间包中夹杂物的去除率。由表 3 可以看出,在空中间包内,由于钢液停留时间短,无有效上扬流动,所以夹杂物去除率最低,仅有 36.5%;仅仅加上斜孔挡墙可使夹杂物去除率提高到 52.8%,这是因为在斜孔挡墙 + 气幕挡墙中间包内,夹杂物随着钢液流出斜孔挡墙后上浮运动,一部分被渣吸附而去除,但另一部分不能到达端部而流向出口;安

表 3 中间包各方案钢中夹杂物去除率

Table 3 Removal rate of inclusions in liquid for each scheme of tundish

方案(No)	夹杂物去除率/%
1	36.5
2	52.8
3	69.2
4	71.5
5	70.8

表 4 试验钢种化学成分和中间包夹杂物去除率

Table 4 Chemical composition of commercial test steels and removal rate of liquid in tundish

牌号	化学成分/%					中间包配置	10 kg 钢夹杂物含量(平均)/mg	夹杂物变化率/%
	C	Si	Mn	P	S			
HPB235	0.10~0.20	0.08~0.30	0.30~0.60	≤0.045	≤0.050	斜孔挡墙+气幕挡墙	50.99	-37.98
						原始空中间包	82.22	
65#	0.62~0.70	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	斜孔挡墙+气幕挡墙	7.24	-18.65
						原始空中间包	8.90	

表 5 有无气幕挡墙中间包钢液温差

Table 5 Temperature difference of liquid in tundish with-out and with gas curtain weir

气幕挡墙配置	炉号	中间包钢液温度/℃			温差/℃	
		I~II流	III~IV流	V~VI流		
无	291-09121	1 503	1 510	1 501	9	
	292-03770	1 571	1 575	1 570	5	
	292-03771	1 552	1 552	1 550	2	
	292-03772	1 549	1 550	1 550	1	
	291-03687	1 541	1 544	1 543	3	
	291-03688	1 535	1 538	1 535	3	
	292-03775	1 549	1 553	1 550	4	
	有	292-03776	1 549	1 551	1 548	3
		292-03777	1 535	1 539	1 536	4
291-09118		1 543	1 545	1 542	3	
292-08793		1 506	1 508	1 505	3	
291-09122		1 507	1 510	1 508	3	
291-09123		1 523	1 525	1 522	3	
292-08796		1 510	1 512	1 511	2	

比吹气和未吹气的钢液温差(表 5)以及铸坯的夹杂物含量(表 4),获得实际应用效果。

由表 4、表 5 可以看出,气幕挡墙中间包优化后,中间包钢液温差保持在 5℃ 以内,夹杂物含量平均降低 28.31%,尤其是 65# 高品质钢也有较大改善,夹杂物减少达 18.65%。使用气幕挡墙技术,炼钢产品质量能得到提高,后工序质量改判降低,售后质量异议减少,经济效益明显,适应中间包纯净钢冶金的需求。

#### 4 结论

(1) 对中间包内气液两相流动的数值模拟研究表明,采用中间包气幕挡墙技术,可以有效改善钢液

装气幕挡墙后,改善了钢液流场,延长了钢液停留时间,夹杂物去除率增加,尤其采用方案 4 时去除率达 71.5%。

#### 3 工业试验效果

根据以上仿真计算和优化分析,采用中间包气幕挡墙技术,在水钢炼钢厂进行了气幕挡墙中间包的工业试验。试验钢种化学成分见表 4 所示,通过对

的流动状态,均衡各出口对应停留时间,延长钢液的平均停留时间,降低死区体积。

(2) 采用中间包气幕挡墙技术,可以有效促进夹杂物颗粒在中间包内上浮去除,气泡吸附能较好去除小夹杂物,提高了夹杂物总去除率。

(3) 工业试验证明,中间包气幕挡墙技术在实际应用中能有效缩小中间包钢液温差,去除夹杂物,提高钢液纯净度。

国家科技攻关计划项目资助(2005BA325C)

#### 参考文献

- 张美杰. 中间包气幕挡墙的结构优化及其夹杂物去除的数学物理模拟研究:[博士学位论文]. 武汉:武汉科技大学,2006
- 王建军,包燕平,曲英. 中间包冶金学. 北京:冶金工业出版社,2001
- 张胜军,朱苗勇. 连铸中间包内夹杂物去除机理的水模型研究. 金属学报,2007,43(9):1004
- Ramos-Banderas A. Mathematical Simulation and Modeling of Steel Flow with Gas Bubbling in Trough Type Tundish. ISIJ International, 2003,43(5):653
- 黄奥. 气幕挡墙中间包气泡形成与运动及夹杂物去除的数模研究:[硕士学位论文]. 武汉:武汉科技大学,2007
- 张美杰,汪厚植,黄奥. 底吹氩中间罐夹杂物运动行为的数模研究. 连铸,2006(6):19
- 张美杰,汪厚植,黄奥. 底吹氩中间包钢液流动特性的数值模型研究. 钢铁钒钛,2005,26(4):43

马光林(1970-),男,工程师,1993 年贵州工学院毕业,炼钢工艺研究。

收稿日期:2010-11-23