

文章编号:1000-582X(2011)03-069-06

钢包长水口形状对中间包内钢液流动特性的影响

文光华,黄永锋,唐 萍,祝明妹
(重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400044)

摘 要:通过物理模拟实验研究了在不同的中间包液位时使用喇叭形长水口和直通形长水口对单流板坯中间包内的流体流动特性的影响。实验结果表明:使用喇叭形长水口后的 RTD 曲线峰值较低,波动较小,流场较稳定,而且不存在短路流;使用喇叭形长水口后更有利于延长流体在中间包内的开始响应时间、平均停留时间和活塞流平均停留时间;中间包内的死区体积较小,活塞流体积较大,而且活塞流与死区体积的比值也更大。因此,在中间包液位上升时,使用喇叭形长水口后包内的流动模式组成更合理,这更有利于保证中间包内钢水的质量。

关键词:钢包;中间包;长水口;流体流动;物理模拟;流动模式

中图分类号:TF769.2

文献标志码:A

Influence of ladle shroud's shapes on characteristics of fluid flow in tundish

WEN Guang-hua, HUANG Yong-feng, TANG Ping, ZHU Ming-mei

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The influence of trumpet-shaped ladle shroud and straight ladle shroud on characteristics of fluid flow in a single strand slab tundish under different liquid levels through physical simulation is studied. The results show that the peak value of RTD curves after using trumpet-shaped ladle shroud is relatively low, the curves become smooth, the flow field is relatively stable and there isn't short circuit flow. Also, the respond residence time, the mean residence time and the plug residence time of the liquid in tundish are prolonged. Besides, when the trumpet-shaped ladle shroud is used, the dead volume fraction is smaller, the plug volume fraction becomes larger and the ratio of the plug volume fraction to the dead volume fraction is greater. Therefore, when the liquid level of tundish is going up, its flow pattern becomes more reasonable after using trumpet-shaped ladle shroud, which is in favor of improving the quality of molten steel in tundish.

Key words: ladle; tundish; ladle shroud; fluid flow; physical simulation; flow patterns

长水口又称为保护套管,用于盛钢桶与中间包之间保护钢流的二次氧化,减少非金属夹杂物,它在连铸工艺中已成为必不可少的耐材部件。使用长水口还有助于降低中间包表面波动,减少钢液卷渣,提高钢水质量^[1-2]。

目前国内外对长水口的研究主要是长水口的结

构、材质、耐用性等方面^[1,3-4],Jha 等人研究了在中间包工作液位下长水口浸入深度对钢液混合的影响^[5]。但是,在实际生产过程中,由于换包或更换长水口,中间包液位发生改变对钢水质量影响最大。对于在换包后中间包液位上升,长水口对中间包内钢液流动特性的影响方面的研究目前还比较少^[6-9]。

收稿日期:2010-10-10

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(2006B402)

作者简介:文光华(1963-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事炼钢及连铸新技术的研究,(Tel)023-65105202,
(E-mail) wengh@cqu.edu.cn。

笔者主要介绍了在板坯以单流中间包内的钢液从钢包中进入中间包后,随着中间包液位上升时,使用喇叭形长水口和直通形长水口对流体流动模式的稳定性以及中间包流动特性的影响。同时,也比较了在中间包液位不变时长水口形状对中间包内流体流场的影响。此研究有助于减少在浇注过程,尤其是在换包或更换长水口后中间包液位变化对钢水质量带来的不利影响。

1 实验原理及方法

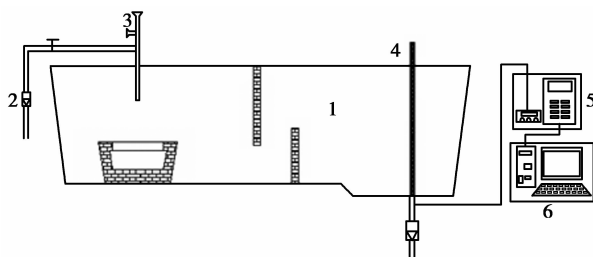
实验采用水力学物理模拟的研究方法,中间包模型与原型的几何相似比为 1:2。在模拟实验中,考虑到中间包内流体流动处于第二自模化区,因此,只要满足模型和原型的 F_r 准数相等,即可保证动力

相似,长水口只考虑内径和长度相似,几何相似比也是 1:2,而相应的流量相似比 $\lambda_p = 0.177^{[10-14]}$ 。中间包和长水口的材质选用有机玻璃,用水作为模拟钢水介质进行实验研究,原型和模型的主要参数见表 1,实验方法具体如下:

1)模拟实验所用的板坯单流中间包的控流装置采用湍流器与挡墙挡坝组合,实验装置示意图如图 1 所示,改变长水口的形状(喇叭形和直通形长水口原型尺寸图分别如图 2 和图 3 所示)和改变中间包液位,使长水口浸入中间包液面下的深度(原型尺寸)为 0、110、220mm,分析不同的长水口形状对中间包流动特性的影响。

表 1 原型与模型的主要参数

类别	中间包顶部尺寸/mm	中间包底部尺寸/mm	中间包高度/mm	入口流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	出口流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
原型	4 534×1 691	4 203×1 091	1 410	43.0	43.0
模型	2 267×846	2 102×546	705	7.6	7.6



1. 中间包; 2. 流量计; 3. 示踪剂加入器;
4. 塞棒; 5. RTD 系统; 6. 数据采集系统

图 1 实验装置示意图

2)实验采用“刺激-响应”技术^[15-17],将清水充满中间包,使其液位、流量稳定,将饱和食盐水作为示踪剂从中间包入口处加入,该时刻记为 0 时刻。同时在中间包出口处开始采集数据,实验采集时间总长度为理论停留时间的 2 倍。通过数据处理得到示踪剂随时间的变化曲线(即 RTD 曲线),得到示踪剂从加入流至中间包出口的开始响应时间及平均停留时间和浓度最大时的峰值时间值,根据 Sahai^[18]提出的修正混合流动模型,分析中间包内的活塞流体积、死区体积及混合流体积,从而定量描述中间包内流体的流动状况。为了确保实验结果的准确性,各实验方案重复 3 次,结果取 3 次的平均值。

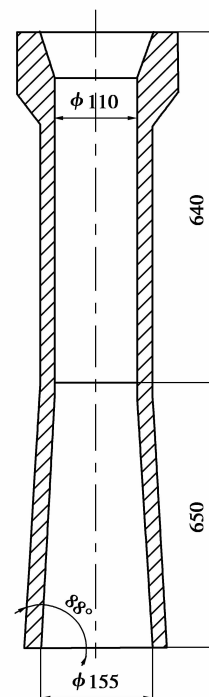


图 2 喇叭形长水口示意图

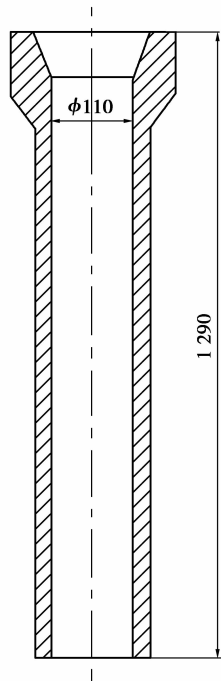


图3 直通形长水口示意图

2 实验结果及分析

实验模拟了在更换大包或更换长水口后,中间包液位上升时长水口形状对其包内流体的停留时间及流动模式组成的影响。图4-6分别为在中间包液位上升,长水口浸入深度(原型尺寸)为0、110、220 mm时的RTD曲线。图中 C_0 表示在中间包各液位下示踪剂的平均浓度, T 表示在中间包各液位下的理论平均停留时间, C/C_0 和 t/T 均为量纲的特征数。

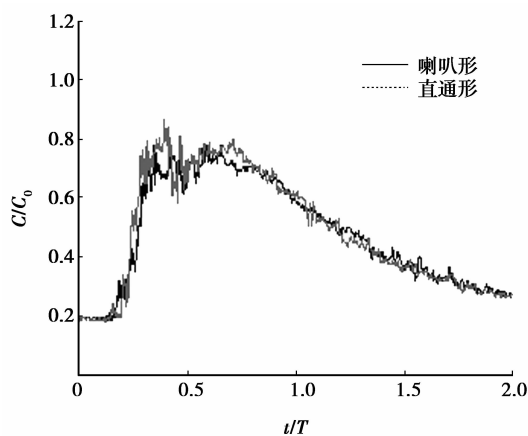


图4 长水口浸入深度为0 mm时的RTD曲线

由图4-6可知,在浸入深度为0、110、220 mm时,使用直通形长水口后的RTD峰值明显较高,曲线存在双峰,尤其是在浸入深度为110 mm和

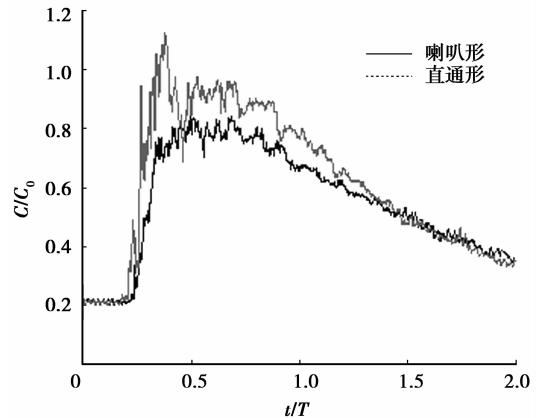


图5 长水口浸入深度为110 mm时的RTD曲线

220 mm时曲线出现的双峰很明显,而且曲线波动也很大。当中间包液位上升,长水口浸入深度由0 mm上升到220 mm时,使用直通形长水口后的RTD曲线变化很大,峰值越高,双峰现象越明显。这表明了使用直通形长水口时中间包内有一定的短路流,而且流体在中间包内的流场很不稳定,这不利于钢中夹杂物的上浮去除。

从图4-6还可以看出,在浸入深度为0、110、220 mm下,使用喇叭形长水口时的RTD曲线峰值较低,没有明显的尖峰而且曲线波动很小。这表明了使用喇叭形长水口后流体在中间包内不存在短路流,流场较稳定。当中间包液位上升,长水口浸入深度由0 mm上升到220 mm时,使用喇叭形长水口后的RTD曲线基本一致。这表明了使用喇叭形长水口后,中间包液位上升对流场的改变很小。

可见,从RTD曲线来看,无论是在相同的中间包液位下还是在中间包液位上升时,使用喇叭形长水口后,中间包内不存在短路流,流场也较稳定,这有利于保证中间包钢水的质量。

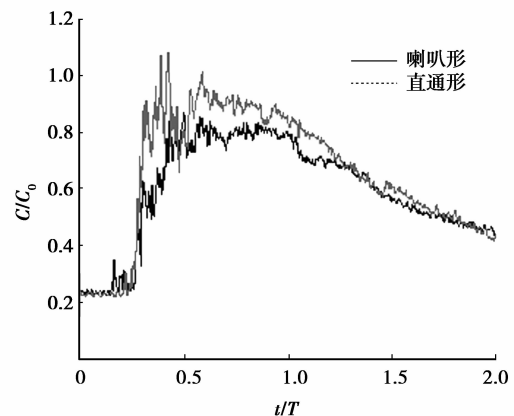


图6 长水口浸入深度为220 mm时的RTD曲线

表2和表3分别给出了使用喇叭形长水口和直通形长水口在3个不同浸入深度下流体在中间包内的停留时间及流动模式组成实验结果(每组实验重

复3次)。从表2和表3中3次实验结果的极差 E 可以看出,极差 E 值均较小。可见,3次实验的重复性较好。

表2 喇叭形长水口的停留时间及流动模式组成实验结果

浸入深度/mm	实验方案	$t_{理}/s$	t_{min}/s	\bar{t}_m/s	t_s/s	t_p/s	中间包内流动模式组成				
							V_m/V	V_d/V	V_s/V	V_p/V	V_p/V_d
0	1	298	56	277	—	146	0.44	0.070	—	0.49	7.00
	2	298	58	280	—	139	0.47	0.060	—	0.47	7.83
	3	298	63	277	—	147	0.44	0.070	—	0.49	7.00
	极差 E	0	7	3	—	8	0.03	0.010	—	0.02	0.83
	平均值	298	59	278	—	144	0.45	0.067	—	0.48	7.28
110	1	336	70	314	—	139	0.52	0.080	—	0.41	5.38
	2	336	64	313	—	142	0.51	0.065	—	0.42	6.31
	3	336	73	309	—	145	0.49	0.068	—	0.43	6.18
	极差 E	0	9	5	—	6	0.03	0.015	—	0.02	0.93
	平均值	336	69	312	—	142	0.51	0.071	—	0.42	5.96
220	1	375	85	352	—	165	0.50	0.056	—	0.44	7.68
	2	375	78	354	—	163	0.51	0.061	—	0.43	7.21
	3	375	80	353	—	173	0.48	0.059	—	0.46	7.80
	极差 E	0	7	2	—	10	0.03	0.005	—	0.03	0.59
	平均值	375	81	353	—	167	0.50	0.059	—	0.44	7.56

注: $t_{理}$ 为理论平均停留时间, t_{min} 为示踪剂开始响应时间, \bar{t}_m 为实测模型平均停留时间, t_s 为短路流平均停留时间, t_p 为活塞流平均停留时间, V_d/V 为死区体积分数, V_m/V 为全混流体积分数, V_s/V 为短路流体积分数, V_p/V 为活塞流体积分数, V_p/V_d 为活塞流与死区体积之比,以下同理。

表3 直通形长水口的停留时间及流动模式组成实验结果

浸入深度/mm	实验方案	$t_{理}/s$	t_{min}/s	\bar{t}_m/s	t_s/s	t_p/s	中间包内流动模式组成				
							V_m/V	V_d/V	V_s/V	V_p/V	V_p/V_d
0	1	298	59	272	59	119	0.32	0.087	0.20	0.40	4.60
	2	298	55	267	55	126	0.29	0.104	0.19	0.42	4.04
	3	298	56	271	56	121	0.32	0.091	0.19	0.41	4.51
	极差 E	0	3	5	4	7	0.03	0.017	0.01	0.02	0.56
	平均值	298	57	270	57	122	0.31	0.094	0.19	0.41	4.38
110	1	336	67	307	67	118	0.36	0.080	0.20	0.35	4.38
	2	336	62	302	62	123	0.35	0.101	0.18	0.37	3.66
	3	336	66	309	66	116	0.38	0.086	0.20	0.35	4.07
	极差 E	0	5	7	5	7	0.03	0.021	0.02	0.02	0.72
	平均值	336	65	306	65	119	0.37	0.089	0.19	0.35	4.04
220	1	375	81	345	81	122	0.38	0.080	0.21	0.33	4.13
	2	375	75	346	75	132	0.37	0.077	0.20	0.35	4.55
	3	375	78	341	78	130	0.35	0.091	0.21	0.34	3.74
	极差 E	0	6	5	6	10	0.03	0.014	0.01	0.02	0.81
	平均值	375	78	344	78	128	0.37	0.083	0.21	0.34	4.14

根据表2和表3实验结果的平均值分别作图7-12,分析两种形状的长水口在不同浸入深度下的停留时间及其流动模式组成。

图7和图8表明了使用喇叭形和直通形长水口时,随着中间包液位上升而长水口浸入深度增加,流体在中间包内的开始响应时间和平均停留时间都延长。当其浸入深度由0 mm增加到220 mm时,使用喇叭形长水口后其开始相应时间由59 s延长到81 s,平均停留时间由278 s延长到353 s;而使用直通形长水口后其开始相应时间由57 s延长到78 s,平均停留时间由274 s延长到344 s。这表明了由于中间包液位上升,中间包内的有效体积增大,有助于延长流体在中间包内的停留时间。除此,在中间包液位相同时,使用喇叭形长水口的开始相应时间均比使用直通形的长2~4 s,其平均停留时间均比使用直通形长水口的长4~9 s。可见,无论是在中间包液位上升时还是在中间包液位保持不变时,使用喇叭形长水口后流体在中间包内的停留时间更长。

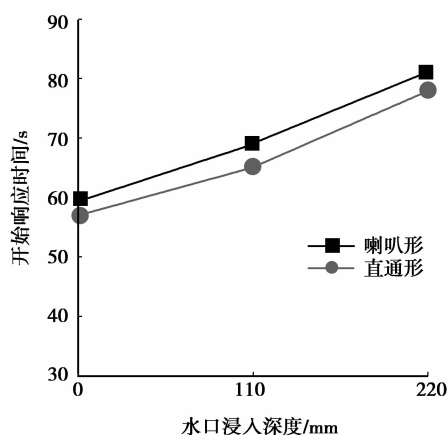


图7 在不同浸入深度下的开始响应时间

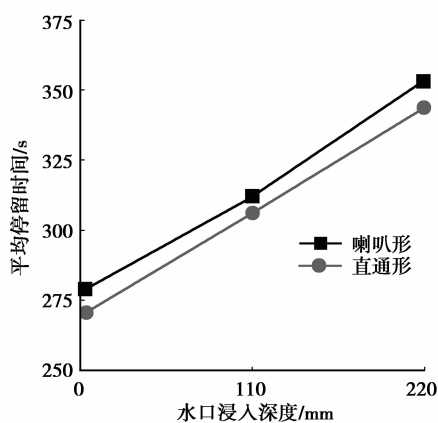


图8 在不同浸入深度下的平均停留时间

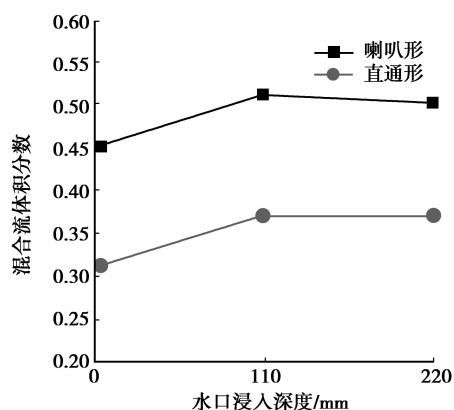


图9 在不同浸入深度下的混合流体积分数

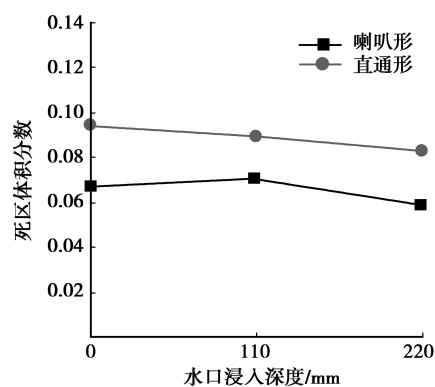


图10 在不同浸入深度下的死区体积分数

从图9可看出,中间包内的混合流体积随长水口浸入深度增加而有增大的趋势。当长水口浸入深度从0 mm增加到110 mm时,使用喇叭形和直通形长水口后的混合流体积都增大了6.0%,当长水口浸入深度从110 mm增大到220 mm时,使用喇叭形和直通形长水口后的混合流体积变化不明显。在相同的中间包液位下,使用喇叭形长水口后的混合流体积均比使用直通形大13.0%~14.0%。这表明了使用喇叭形长水口更有利于钢水在中间包内的成分均匀和温度均匀。

由图10可知,随着中间包液位上升,长水口浸入深度的增加,使用喇叭形长水口时中间包内的死区体积变化都不大,保持在6.0%~7.0%;而使用直通形长水口时中间包的死区体积保持在8.0%~9.0%。这表明了中间包液位的升高对中间包的死区体积影响较小。但是,在中间包液位相同时,使用喇叭形长水口时的死区体积均比使用直通形的小2.0%。可见,使用喇叭形长水口更有利于提高中间包的有效容积。

从图 11 可以看出,中间包内的活塞流体积随长水口浸入深度的增加而有减少的趋势。在长水口浸入深度为 0 mm 增加到 110 mm 时,活塞流体积减少较明显,平均减少了 6.0%。浸入深度为 110 mm 上升到 220 mm 时,使用喇叭形长水口的活塞流体积增大了 2.0%,而使用直通形长水口的活塞流体积却减少了 1.0%。在相同的长水口浸入深度时,使用喇叭形长水口的活塞流体积均比使用直通形长水口的大了 6.0%~7.0%。这表明了在中间包液位上升时,使用喇叭形长水口比使用直通形长水口更有利于保持较高的活塞流体积。

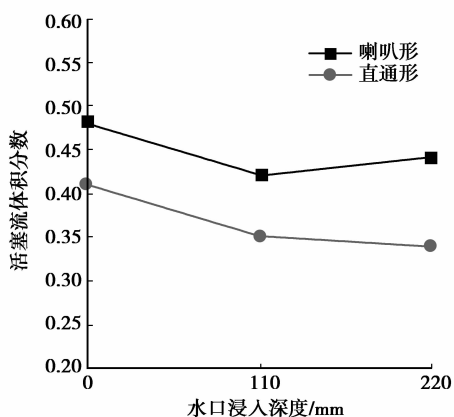


图 11 在不同浸入深度下的活塞流体积分数

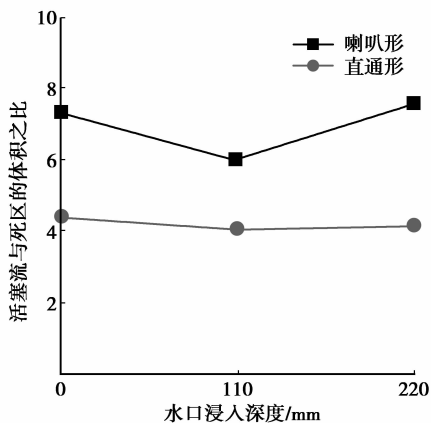


图 12 不同浸入深度下的活塞流与死区体积分数之比

图 12 表明了,在中间包液位上升时,使用喇叭形长水口时活塞流与死区体积分数的比值都先减小再增大,而且活塞流与死区体积之比为 5.96~7.56。使用直通形长水口后的活塞流与死区体积之比为 4.04~4.14。在喇叭形长水口浸入深度为 110 mm 时,中间包内的活塞流与死区体积之相对较小,原因是,在此浸入深度时的活塞流较小而死区体积相对较大。在中间包液位相同时,使用喇叭形长水口后中间包的活塞流体积与死区体积的比值比使用直通形

长水口大 47.5%~82.6%。可见,使用喇叭形长水口后中间包内的流动模式更合理。

综合上述,使用喇叭形长水口更有利于延长流体在中间包内的开始响应时间、平均停留时间和活塞流平均停留时间,保证钢液中的夹杂物有更长的时间上浮,从而提高钢水的洁净度。同时,使用喇叭形长水口比使用直通形长水口后,混合流体积较大,死区体积较小,活塞流体积也较大,即流体在中间包内的流动模式组成更合理。

4 结 论

1) 在中间包液位保持不变时,使用直通形长水口后的 RTD 曲线峰值较高,波动较大,而且存在双峰现象;使用喇叭形长水口后的 RTD 曲线峰值较低,曲线较光滑,波动较小。在中间包液位上升时,使用喇叭形长水口后的 RTD 曲线基本一致,中间包内的流场较稳定,有利于保证钢水质量。

2) 在相同的中间包液位下,使用喇叭形长水口后比使用直通形长水口的开始响应时间、平均停留时间和活塞流平均停留时间均较长;死区体积小了 2.0%,活塞流体积大了 6.0%~7.0%,而且使用喇叭形长水口后流体在中间包内不存在短路流。中间包液位上升,中间包的有效体积增大,流体在中间包内的开始响应时间和平均停留时间均延长,混合流体积有增大的趋势,而死区体积有减小的趋势。

3) 长水口的浸入深度由 0 mm 到 220 mm,使用喇叭形长水口后的活塞流与死区体积之比为 5.96~7.56,而使用直通形长水口后的活塞流与死区体积之比仅为 4.04~4.14。因此,使用喇叭形长水口后的活塞流与死区体积之比更大,中间包内的流动模式组成更合理。

参考文献:

- [1] 朱义文,张小红. 锆质长水口的研制及使用[J]. 安徽冶金,2004(2):23-24.
ZHU YI-WEN, ZHANG XIAO-HONG. Development and application of long zircon nozzle [J]. Anhui metallurgy,2004(2):23-24.
- [2] 赵林,刘海澜,崔成万,等. 模铸中间包液面波动的物理模拟研究[J]. 大型铸锻件,2008(1):1-5.
ZHAO LIN, LIU HAI-LAN, CHUI CHENG-WAN, et al. Physical simulation research on the level fluctuate of intermediate ladle in die-casting[J]. Heavy castings and forgings, 2008(1):1-5.
- [3] 王志刚,李楠. 长水口机械应力研究[J]. 耐火材料,2004,38(2):118-120.
WANG ZHI-GANG, LI NAN. Study of machine stress for long nozzle[J]. Refractory, 2004,38(2):118-120.

- MENG, et al. Research on Removal of Zn From Blast Furnace Dust. *Iron and Steel*, 2006,41(10):78-81.
- [14] 库巴谢夫斯基. 冶金热化学[M]. 北京:冶金工业出版社,1985.
- [15] 陈少纯,周令治,邹家炎,等. 铁酸锌的还原分解和其中锗的行为研究[J]. 广东有色金属学报,1991,1(1):27. CHEN SHAO-CHUN, ZHOU LING-ZHI, ZOU JIA-YAN, et al. Studies on reducing decomposition of zinc ferrite and the behavior of germanium[J]. *Journal of Guangdong Non-Ferrous Metals*, 1991, 1(1):26-31.
- [16] 孟繁明,王文忠,八木顺一郎,焦炭过滤床在线分离电炉粉尘中氧化锌的研究[J]. 钢铁,2008,43(4):91. MENG FAN-MING, WANG WEN-ZHONG, YAGI JUNICHIRO. Research on zinc oxide separation in EAF dust with coke bed filter[J]. *Iron and Steel*, 2008, 43(4):91.
- [17] MANTOVAN M C, TAKANO C. The strength and the high temperature behaviors of self-reducing pellets containing EAF dust [J]. *ISIJ International*, 2000, 40(3):224-230.
- [18] PENG CUI, GUO ZHAN-CHENG, ZHANG FU-LI. Discovery of potassium chloride in the sintering dust by chemical and physical characterization [J]. *ISIJ International*, 2008, 48 (10):1398-1403.
- [19] PENG CUI, ZHANG FU-LI, GUO ZHAN-CHENG. Separation and recovery of potassium chloride from sintering dust of ironmaking works [J]. *ISIJ International*, 2009, 49(5):735-742.
- [20] 沐继尧. 高炉冶炼中的碱金属[M]. 北京:冶金工业出版社,1992.

(编辑 王维朗)

(上接第74页)

- [4] 徐庆斌. 可反复使用的长寿命 Al_2O_3-C 质长水口的设计方案[J]. 国外耐火材料, 2006,31(4):44-52. XU QIN-BIN. Design scheme of long life Al_2O_3-C ladle nozzle for repeated use[J]. *Foreign refractories*, 2006, 31(4):44-52.
- [5] JHA P K. 出口位置,前置浇铸箱高度和大包长水口浸入深度对中间包内钢液混合的影响[J]. 现代冶金, 2003(1):39-48. JHA P K. Effect of molten steel mix in tundish on immersion depth of ladle nozzle [J]. *Modern metallurgy*, 2003(1):39-48.
- [6] SOL ORIO-DIAZ G, RAMOS-BANDERAS A. Modeling study of turbulent flow effect on inclusion removal in a tundish with swirling ladle shroud[J]. *Steel Research International*, 2009,80(3):223-34.
- [7] 王波,郭俊玉,张捷宇,等. 板坯连铸异型中间包卷渣水模型实验研究[J]. 铸造技术, 2007,28(4):504-507. WANG BO, GUO JUN-YU, ZHANG JIE-YU, et al. Hydraulics simulation investigation on tundish for slab casting[J]. *Foundry Technology*, 2007,28(4):504-507.
- [8] KASAI N, YAMAZOE H, IQUCHI M. Development of optimum argon shrouding system between ladle and tundish[J]. *Journal of the iron and steel institute of Japan*, 2005,91(10):763-768.
- [9] 孙彦辉,蔡开科,赵长亮. 非稳态浇注操作对连铸坯洁净度影响[J]. 钢铁, 2008,43(1):22-25. SUN YAN-HUI, CAI KAI-KE, ZHAO CHANG-LIANG. Effect of transient casting operation on cleanliness of continuously cast strands[J]. *Iron and steel*, 2008,43(1):22-25.
- [10] ZHONG L C, LI B K, ZHU Y X, et al. Fluid flow in a four-strand bloom continuous casting tundish with different flow modifiers[J]. *ISIJ International*, 2007,47(1):88-94.
- [11] ANIL K, DIPAK M, KORJA S C. Experimental validation of flow and tracer — dispersion [J]. *Metallurgical and materials transactions*, 2005,36(12):777-785.
- [12] 李刚,何俊范. 多流水方坯连铸中间罐内液体流动状态的研究[J]. 重庆大学学报,1994,17(1):100-106. LIN GANG, HEN JUN-FAN. A study on liquid steel mixing and flow state in tundish for CC multi-strand billets[J]. *Journal of Chongqing University*, 1994, 17(1):100-106.
- [13] EPEREZ L M, DIAZ C M. Physical modeling of steel flow in a tundish equipped with a turbulence inhibitor and a gas curtain[J]. *Revista De Metalurgia*, 2005, 41(6):410-418.
- [14] 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[J]. 金属学报,2007,43(9):1004-1008. ZHANG SHENG-JUN, ZHU MIAO-YONG. Water model study of removal mechanism of inclusion in continuous casting tundish [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007,43(9):1004-1008.
- [15] 文光华,唐萍,祝明妹,等. 板坯连铸中间包钢水洁净度的水力学模拟和应用[J]. 特殊钢, 2004,25(1):10-14. WEN GUANG-HUA, TANG PING, ZHU MING-MEI, et al. Apply and water modeling simulation of molten steel purity in tundish for slab continuous casting[J]. *Special steel*, 2004,25(1):10-14.
- [16] RUCKERT A, WARZECHA M, KOITZSCH R, et al. Particle distribution and separation in continuous casting tundish[J]. *Steel research international*, 2009,80(8):568-574.
- [17] LIU J G, YAN H C. Water modeling of optimizing tundish flow field [J]. *Journal of iron and steel research, International*, 2007,14(3):13-17.
- [18] SAHAI Y, EMI T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes [J]. *ISIJ International*, 1996,36(6):667-672.

(编辑 王维朗)