

· 试验研究 ·

# 连铸板坯结晶器液面波动及冲击深度水模型研究

刘红军<sup>1</sup> 童志博<sup>2</sup> 刘文华<sup>1</sup>

(1 华菱涟源钢铁公司, 娄底 417009; 2 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

**摘要** 为评价现有浸入式水口设计是否合理, 通过几何相似比 1:2 的水模型对拉速 0.8 ~ 1.7 m/min, 断面为 230 mm × (900 ~ 2 150) mm 的板坯结晶器液面波动和冲击深度进行了模拟实验。结果表明, 现行结晶器在 5 种不同断面下液面较平稳, 模型中波高都在 1.5 mm 以内(相当于原型 3 mm 以内), 保护渣渣层平稳, 液渣层分布较均匀; 而当低拉速、小断面时, 即使冲击深度较低, 液面波动也小于 0.5 mm(相当于原型小于 1 mm), 导致渣-钢界面活跃不够, 化渣不良, 甚至可能造成液面结壳, 故有必要对现有浸入式水口进行优化改造。

**关键词** 板坯 结晶器 浸入式水口 水模型 液面波动

## A Study on Water Model for Liquid Level Fluctuation and Impact Depth of Flow in Mold for Slab Casting

Liu Hongjun<sup>1</sup>, Tong Zhibo<sup>2</sup> and Liu Wenhua<sup>1</sup>

(1 Lianyuan Iron and Steel Co, Hualing Group, Loudi 417009; 2 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** In order to evaluate whether the existing design of submerged nozzle is reasonable or not, the simulation test on liquid level fluctuation and impact depth of flow in 230 mm × (900 ~ 2 150) mm mold with casting speed 0.8 ~ 1.7 m/min is carried out by using geometric similarity 1:2 water model. Results show that for current mold of five different cross sections, the liquid level is relatively stable and the wave height in model is no more than 1.5 mm (corresponding prototype within 3 mm), the slag level is stable and the distribution of molten slag layer is relatively uniform; but as for smaller cross-section slab with lower casting speed even if the impact depth is lower the liquid level fluctuation is less than 0.5 mm (corresponding prototype less than 1.0 mm) led to lack of activity of slag-steel interface, bad melting of slag, and even causing shell of liquid surface, therefore it is necessary to revamp and optimize the current submerged nozzle.

**Material Index** Slab, Mold, Submerged Nozzle, Water Model, Liquid Level Fluctuation

结晶器被誉为连铸机的“心脏”, 钢液在其内的流动行为与铸坯的卷渣、吸气、裂纹等缺陷直接相关。当浸入式水口的倾角或插入深度过大时, 注流冲击深度大, 不利于夹杂物的上浮; 同时也必然造成结晶器内高温区下降, 从而引起液面过于平静, 不利于保护渣的熔化, 润滑不良, 导致铸坯与结晶器的摩擦阻力增大, 造成粘连而拉漏; 且高温区过低会造成坯壳太薄, 引起鼓肚或拉漏<sup>[1-5]</sup>。

2010 年 1 月至 7 月华菱涟源钢铁公司 210 厂事故发生较为频繁, 由于结晶器内钢液面是否活跃及流体的冲击深度对铸坯的质量有着十分重要的影响, 为探究该厂浸入式水口是否和结晶器匹配, 对其进行了水模拟实验。

该厂 1# 板坯连铸机采用的是双侧孔水口进行浇注, 浸入式水口底端的结构尺寸如图 1 所示。

### 1 原理与研究方法

本实验用水作模化介质, 用有机玻璃建立 1:2 的缩小物理模型, 根据弗鲁德准相等和长度相似比

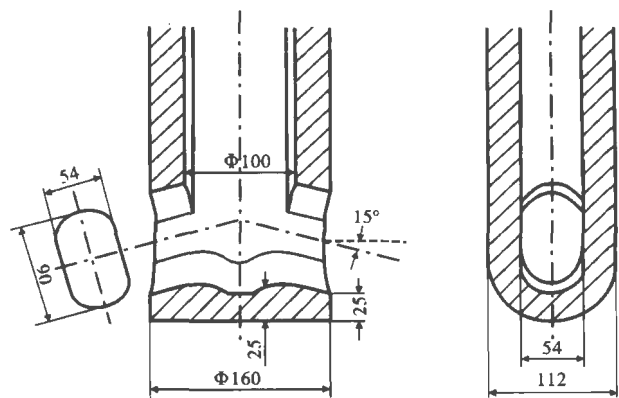


图 1 浸入式水口底端的结构  
Fig. 1 Structure of end of submerged nozzle

$\lambda_l = \frac{l_m}{l_p} = 0.5$ , 可以推导出速度相似比 ( $\lambda_u$ )、时间相似比 ( $\lambda_t$ ) 和流量相似比 ( $\lambda_Q$ ), 如式 (1) ~ (3) 所示。

$$\lambda_u = \frac{u_m}{u_p} = \sqrt{\lambda_l} = 0.707 \quad (1)$$

$$\lambda_l = \frac{\lambda_t}{\lambda_r} = \frac{\lambda_l}{\sqrt{\lambda_l}} = \sqrt{\lambda_l} = 0.707 \quad (2)$$

$$\lambda_Q = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{u_m \cdot A_m}{u_p \cdot A_p} = \lambda_u \cdot \lambda_l^2 = \lambda_l^{2.5} = 0.177 \quad (3)$$

式中： $\lambda$ - 几何相似比； $m$ - 原型； $p$ - 模型； $u, t, Q$ - 表示速度、时间、流量。

考虑到水箱出水对结晶器出口流体的影响，结晶器模型在满足相似比的基础上延长了 1 倍，其结构如图 2 所示，实验装置如图 3 所示，主要由水路系统和数据采集系统组成。为了解钢水在结晶器内的流动轨迹和冲击深度，在模型实验水口中部和上方加入墨水，并用摄像机记录下染色剂在结晶器模型内的扩散情况。另外实验中用煤油和真空泵油的混合油模拟液渣层，用发泡塑料粒子模拟固渣层。

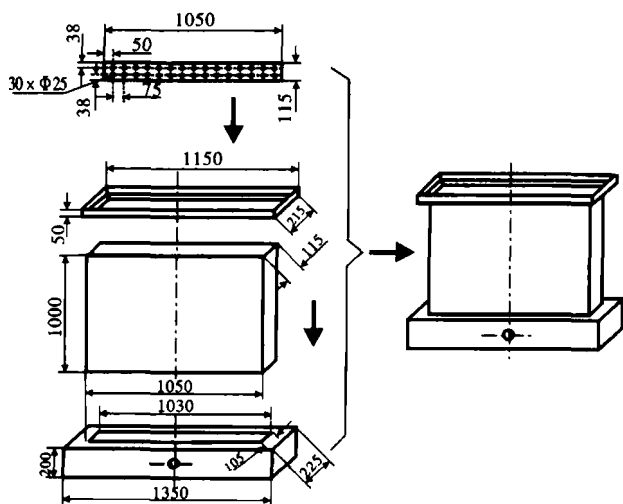


图 2 结晶器模型结构  
Fig. 2 Structure of mold model

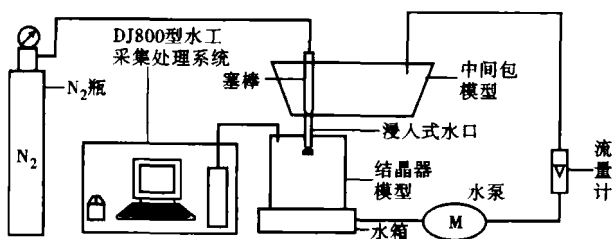


图 3 结晶器模拟实验装置图  
Fig. 3 Schematics of device for mold simulation test

根据相似比计算得到流量及插入深度条件如表 1 所示，表中修正的流量值用于保护渣模拟实验。

## 2 结果与分析

### 2.1 液面波高分析

当液面波动大时，容易造成卷渣现象的发生，而

表 1 模拟实验中的水流量及水口浸入深度

Table 1 Water flow rate and nozzle immersion depth in simulation test

方案编号	断面/ (mm × mm)	拉速/ (m · min <sup>-1</sup> )	流量/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )			浸入深度/mm	
			原型	模型	模型 (修正)	原型	模型
1	230 × 900	0.9	12.1	2.1	0.9	130	65
2		1.1	14.8	2.6	1.1	130	65
3		1.3	17.5	3.1	1.3	130	65
4		1.5	20.2	3.6	1.5	130	65
5		1.7	22.9	4.1	1.6	130	65
6	230 × 1 250	0.9	16.9	3.0	1.2	130	65
7		1.1	20.6	3.6	1.5	130	65
8		1.3	24.3	4.3	1.8	130	65
9	230 × 1 550	0.9	20.9	3.7	1.5	130	65
10		1.1	25.5	4.5	1.8	130	65
11		1.3	30.2	5.3	2.2	130	65
12	230 × 1 850	0.8	22.2	3.9	1.6	130	65
13		1.0	27.7	4.9	2.0	130	65
14		1.2	33.3	5.9	2.4	130	65
15	230 × 2 150	0.8	25.8	4.6	1.9	130	65
16		1.0	32.2	5.7	2.3	130	65
17		1.2	38.7	6.8	2.8	130	65

钢液适当的波动可以为保护渣的融化提供热量<sup>6)</sup>。图 4 为水模拟实验液面波动实测曲线之一，取每个测量点的平均值，测得在断面 (mm × mm) 为 230 × 900、230 × 1 250、230 × 1 550、230 × 1 850、230 × 2 150 时，不同拉速及水口插入深度对液面波高的影响，结果如图 5(a) 所示。

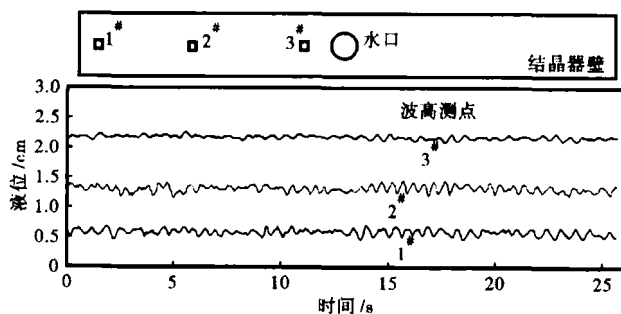


图 4 结晶器的各测点位置(上)和液面波动曲线(下)  
Fig. 4 Curves of liquid level fluctuation (lower) and each measured location (upper) in mold

由图 5(a) 可知，不同的断面随着拉速的提高，其液面波高也上升，而相同的拉速下随着断面尺寸的增大其液面波高上升。从整体来看，结晶器液面较平稳，模型中波高都在 1.5 mm 以内(相当于原型 3 mm 以内)，从典型结晶器液面模拟保护渣形貌来看，渣层平稳，液渣层分布较均匀；综合液面波动和保护渣形貌来看，当低拉速、小断面时的液面波动小于 0.5 mm (相当于原型小于 1 mm)，导致渣-钢界面活跃不够，化渣不良，甚至可能造成液面结壳。

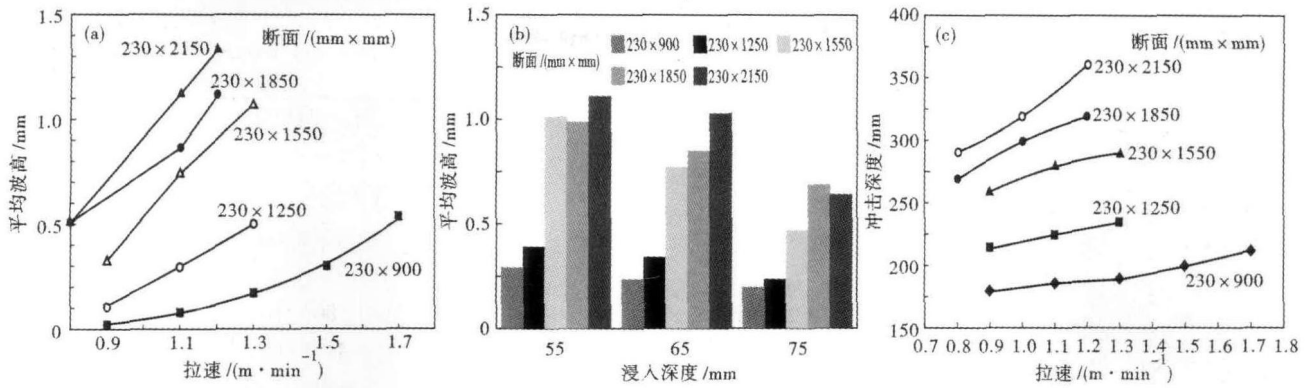


图5 拉速(a)和水口浸入深度(b)对波高的影响;拉速对冲击深度的影响(c)

Fig. 5 Effect of casting speed on wave height (a) and nozzle immersion depth (b); Effect of casting speed on impact depth (c)

图5(b)为现用水口条件下浸入深度对波高的影响,由图5(b)可知,相同的断面随着浸入深度的增加液面波高降低,而断面尺寸(mm×mm)为230×900、230×1250的平均波高较低,都在0.5 mm以下(相当于原型小于1 mm),而当断面尺寸 $\geq 230$  mm×1550 mm时,波高明显增加。

## 2.2 冲击深度分析

结晶器钢液冲击深度决定了拉坯过程的顺行和坯壳的表面质量,当冲击深度过深时不利于夹杂的上浮及坯壳的均匀生长,严重时会造成漏钢;反之,会导致结晶器内钢液面波动过大,发生卷渣的可能性增加,理想的结晶器流场是液面波动较小且冲击深度较低<sup>[6-7]</sup>。在现用水口条件下,不同断面与不同拉速下的冲击深度的实验结果如图5(c)所示。

由图5(c)可知,随着断面尺寸的增大、拉速的增加,冲击深度也在增加,而断面尺寸大小对冲击深度影响更大。当低拉速的小断面时,即使冲击深度较低,结晶器液面波动也较低,不能满足生产要求,故有必要对现有浸入式水口进行优化改造,适当增加低拉速及小断面情况下的液面活跃程度,提高弯月面的温度,促进保护渣的熔化和钢渣界面的更新。

## 3 结论

(1)对于不同的断面,随着拉速的提高,液面波高也上升,而相同的拉速下随着断面尺寸的增加其液面波高也上升。

(2)现行结晶器在5种不同断面下液面较平稳,模型中波高都在1.5 mm以内(相当于原型3 mm以内),模拟保护渣渣层平稳,液渣层分布较均匀。

(3)当低拉速的小断面时,液面波动小于0.5 mm(相当于原型小于1 mm),导致渣-钢界面活跃不够,化渣不良,甚至可能造成液面结壳。

(4)对于相同的断面,随着浸入深度的增加和液面波高降低,断面尺寸(mm×mm)为230×900、230×1250时,平均波高在0.5 mm以下,而当断面 $\geq 230$  mm×1550 mm时,波高明显增加。

(5)随着断面尺寸的增大、拉速的增加,冲击深度也在增加,且断面大小对冲击深度影响更大。

(6)当低拉速的小断面时,即使冲击深度较低,结晶器液面波动也较低,并不能满足生产要求,有必要对现有浸入式水口进行优化改造。

## 参考文献

- [1] 马范军,文光华,李刚. 板坯连铸结晶器内钢液流动数值模拟[J]. 金属学报,2000,36(4):399-402.
- [2] Herbertson J. Modelling of Metal Delivery to Continuous Casting Moulds. Steelmaking Conference Proceedings,1991,74:171-185.
- [3] Gupta D. A Water Model Study of the Flow Asymmetry Inside a Continuous Casting Slab Mold. Metallurgical and Materials Transactions B,1996,27B(10):757-764.
- [4] Ferretti. Submerged Nozzle Optimization to Improve Stainless Steel Surface Quality at TERNI Steel Works. Steelmaking Conference Proceedings,1985,68:49-57.
- [5] 王永胜,侯泽旺,王新华,等. 板坯连铸结晶器流场及液面波动的水模研究[J]. 钢铁钒钛,2009,30(1):55-59.
- [6] 朱建强,包燕平,田乃媛,等. 薄板坯连铸结晶器流场模拟研究[J]. 钢铁,1999,34:616-618.
- [7] 齐新霞,岳峰,刘国林. 板坯结晶器流场水模拟实验研究[J]. 连铸,2003(5):15-17.

刘红军(1979-),男,硕士,工程师,2001年武汉科技大学毕业,连铸工艺研究。E-mail:lhj@lysteel.com

收稿日期:2012-11-05