

文章编号:1000-582X(2006)08-0119-04

异钢种连浇过程中的交接部铸坯预测模型*

李玉刚¹, 董金刚², 李刚¹, 谢兵¹, 王雨¹

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030; 2. 宝山钢铁股份有限公司技术部, 上海 201900)

摘要:为了提高异钢种连浇过程中交接部铸坯起始位置和长度判定的准确性,减少铸坯的切除量,以宝钢二号连铸机的板坯连铸为对象,对异钢种连浇过程进行了研究.通过水模实验测量了不同铸坯断面、拉速和中间包剩余钢水量等条件下沿铸坯长度方向的无量纲浓度曲线,在此基础上运用形函数插值的方法建立了异钢种连浇过程中铸坯成分及交接部铸坯长度和位置的预测模型.预测模型的计算结果与现场测试结果的对比表明,所建立预测模型精度较高,能够满足实际生产的需要.

关键词:异钢种连浇;交接部铸坯长度;预测模型;水力学模拟

中图分类号:TF777

文献标识码:A

自钢铁工业使用连铸技术以来,它以低能耗、高效率、高产量等优势迅速地得到推广与应用.随着浇注钢种的增加和对连铸工艺效率性要求的进一步提高,国内外越来越多的钢铁厂趋向于在同一连铸机上多炉连浇不同钢种的铸坯,实践证明这一技术能显著地提高连铸机的作业率,降低生产成本^[1].但在异钢种连浇的过程中,2个不同钢种的钢水在中间包和铸坯液芯中相互混合形成混合坯,当连浇的2炉钢水成分相差较大时,部分混合坯可能既不属于第1个钢种,也不属于第2个钢种,将这种混合坯称为交接部铸坯^[2-6].交接部铸坯成分波动较大,必须进行专门管理,有时甚至只能作为废钢来处理,从而降低了金属收得率.因此,对异钢种连浇过程中交接部铸坯的成分、长度和起始位置进行预测具有十分重要的意义:一方面,通过对交接部铸坯的起始位置和长度的准确预测,可以减少铸坯的切除长度;另一方面,也可以为优化连浇工艺,减少交接部铸坯长度提供理论依据.

笔者在水模实验的基础上建立了宝钢二连铸异钢种连浇交接部铸坯预测模型,对不同工艺条件下异钢种连浇过程中铸坯成分的变化情况以及交接部铸坯的长度和位置进行预测.

1 实验研究方法

后一炉钢水开浇后,2个不同钢种的钢水在中间包和铸坯液芯中相互混合,混合坯中各种成分的含量也逐步由前一钢种向后一钢种过渡,定义无量纲浓度 $C_d(x)$ 来表征铸坯中各种成分的过渡程度^[2]:

$$C_d(x) = \frac{C(x) - C_1}{C_2 - C_1}, \quad (1)$$

式中, $C(x)$ 为铸坯长度 x 处某成分的含量; C_1 和 C_2 分别为前后2炉钢水中该成分的含量,铸坯长度 x 是以第2炉钢开浇时结晶器内钢液面为基准点,其长度方向与拉坯方向相反.

设 x 处混合坯中前后2炉钢水的质量比为 $m_1:m_2$,则:

$$C_d(x) = \frac{\frac{C_1 m_1 + C_2 m_2}{m_1 + m_2} - C}{C_2 - C_1} = \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad (2)$$

由式(2)可知,无量纲浓度实际表征的是后一炉钢水在 x 处铸坯中的质量百分比,因此,在铸坯同一位置处,铸坯中各种成分的含量是相等的.其取值范围在0~1之间.

笔者通过水模实验,对不同工况条件下的无量纲浓度沿铸坯长度的变化曲线 $C_d(x)$ 进行测试.宝钢二连铸异钢种连浇的相关工艺参数如表1所示.

表1 宝钢二连铸异钢种连浇的相关工艺参数

项目	工艺参数
铸坯断面尺寸	230×900~1450 mm ²
流数	2流
拉速	1.0~1.6 m/min
中间包工作液面高度	1080 mm
中间包最小液面高度	600 mm
钢包钢水容量	275 t

在实验过程中,为使问题简化,进行如下假设:1)

* 收稿日期:2006-04-15

作者简介:李玉刚(1974-),男,山东平度人,重庆大学博士研究生,主要从事钢铁冶金和连铸工艺等方面的研究.

假设进行连浇的两钢种的钢水密度、粘度等物理性质相同。2) 由于在中间包和铸坯液芯内由强制流动引起的钢水混合远远大于钢水间的相互扩散,因此可以忽略钢水中各成分由于浓度差造成的扩散。

水模实验依据相似原理进行,选取弗鲁德准数(Fr)作为模拟的相似准数,即:

$$\frac{u_p^2}{gL_p} = \frac{u_m^2}{gL_m} \quad (3)$$

式中, L 、 u 、 g 分别为特征长度、速度和重力加速度;下标 p 表示原型, m 表示模型。按照 $L_p:L_m=3:1$ 的比例建立宝钢二连铸板坯中间包和结晶器的水力学模型,由式(3)可以得出原型与模型之间速度、时间和流量的相似关系为:

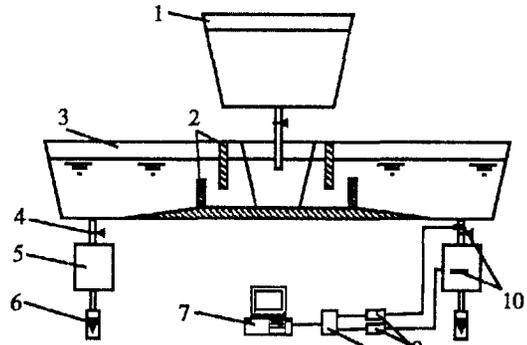
$$u_m = \left(\frac{1}{3}\right)^{1/2} u_p, t_m = \left(\frac{1}{3}\right)^{1/2} t_p, Q_m = \left(\frac{1}{3}\right)^{5/2} Q_p \quad (4)$$

水模实验的装置如图1所示,实验中采用不同浓度的NaCl溶液模拟不同钢种的钢水进行异钢种连浇过程的模拟。实验的步骤如下:在模型钢包内装入浓度为 C_{m2} 的NaCl溶液,在模型中间包内装入浓度为 C_{m1} 的NaCl溶液至正常工作液面,在中间包水口及结晶器内安装电极测量相应位置处NaCl溶液的浓度变化。模拟异钢种连浇时,首先开启中间包水口的阀门,并在一定的流量下进行浇注,此时中间包液面会自然下降。当中间包的液面降至指定位置时,开启钢包长水口的阀门,开始进行异钢种连浇,同时由计算机开始记录2个位置的浓度变化。由于此时钢包注流的流入量大于中间包水口的流出量,因此中间包液面会逐渐上升。当中间包液面上升至正常工作液面时,调节钢包长水口阀门使钢包注流的流入量与中间包水口的流出量相等,此时中间包液面保持在正常工作液面不变。当钢包内NaCl溶液浇注完毕后,实验结束。

图2为某工况下中间包水口和结晶器出口处测得的NaCl溶液的浓度变化曲线,从图中可以看出,结晶器出口处测得的NaCl溶液浓度变化曲线比中间包水口测得的曲线滞后30~80s,这说明由中间包水口进入结晶器中的混合钢水还要在结晶器中进行进一步的混合,因此,实验认为:结晶器出口测得的浓度变化曲线更能反应铸坯中钢水的成分变化情况。根据结晶器出口测得的浓度变化曲线由式(5)可以计算出沿铸坯长度方向无量纲浓度的变化曲线。

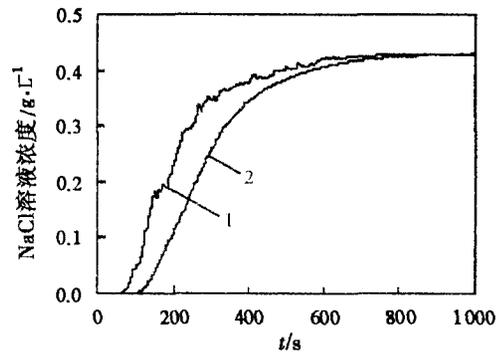
$$C_d(x) = \frac{C_m \left(60 \times \frac{x - 3x_0}{\sqrt{3}V_p}\right) - C_{m1}}{C_{m2} - C_{m1}} \quad (5)$$

式中, C_{m1} 、 C_{m2} 为开浇前模型中间包和钢包内的NaCl溶液浓度; x 为铸坯长度,m; $C_m(t)$ 为结晶器出口处测



1-钢包;2-挡墙;3-中间包;4-阀门;5-结晶器;6-流量计;
7-计算机;8-数据采集系统;9-电导仪;10-电极

图1 水模实验装置示意图



测量位置:1-中间包水口;2-结晶器出口

图2 NaCl溶液浓度变化曲线

得的NaCl溶液的浓度变化曲线。在原型与模型的几何比例为3:1的条件下,实验中的记录时间 t 与铸坯长度 x 的关系为:

$$t = 60 \times \frac{x - 3x_0}{\sqrt{3}V_p} \text{ s} \quad (6)$$

式中, V_p 为拉速,m/min; x_0 为电极到模型结晶器液面的距离。

2 预测模型的建立

由式(2)知,无量纲浓度表征的是后一炉钢水在铸坯中的质量百分比,因此无量纲浓度与连浇的钢种以及钢水的成分无关,而只与2种钢水在中间包和铸坯液芯中的混合情况相关,对无量纲浓度的影响因素为中间包剩余钢水量、铸坯断面尺寸和拉速。宝钢二连铸的连铸条件如表1所示,其中间包剩余钢水液面高度的取值范围为600~825mm,铸坯宽度的取值范围为900~1450mm,拉速的取值范围为1.0~1.6m/min。笔者对以上3个因素各取4个水平进行了全组合实验,测量了不同工况条件下的无量纲浓度曲线,根据排列组合可知实验组数为64组。在实际生产中,所遇到的工况要远远多于实验点的数目,要对所有工况的无量纲浓度曲线进行实验测试是不可能的。笔者采用形函数插值的方法对非实验点工况的无量纲浓度曲线进行计算。

分别将中间包剩余钢水液面高度、铸坯宽度、拉速 3 个因素作为 x, y, z 轴构成一个三维空间, 这样一个工况就与该三维空间中的一个点相对应. 对每一因素取相邻的 2 个水平进行组合共 8 个实验点, 以这 8 个点为顶点构成一个空间六面体(如图 3 所示).

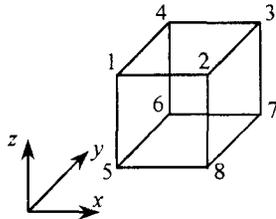


图 3 空间 8 节点单元

其 8 个顶点的坐标依次为: (x^-, y^-, z^+) 、 (x^+, y^-, z^+) 、 (x^+, y^+, z^+) 、 (x^-, y^+, z^+) 、 (x^-, y^-, z^-) 、 (x^+, y^-, z^-) 、 (x^+, y^+, z^-) 、 (x^-, y^+, z^-) , 其中, 上标“-”表示相邻两个水平中较低的水平; 上标“+”表示较高的水平. 根据形函数差值法, 对于六面体内的任意一个工况点的无量纲浓度, 都可以由其 8 个顶点的无量纲浓度插值得到. 其插值公式为:

$$C_d = \sum_{i=1}^8 N_i C_{di}, \quad (7)$$

式中, C_{di} 为顶点 i 的无量纲浓度; N_i 为插值形函数, 空间 8 节点单元的形函数为:

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= (1 - \xi)(1 - \eta)\zeta, \\ N_2 &= \xi(1 - \eta)\zeta, \\ N_3 &= \xi\eta\zeta, \\ N_4 &= (1 - \xi)\eta\zeta, \\ N_5 &= (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta), \\ N_6 &= (1 - \xi)\eta(1 - \zeta), \\ N_7 &= \xi\eta(1 - \zeta), \\ N_8 &= \xi(1 - \eta)(1 - \zeta), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:

$$\xi = \frac{x - x^-}{x^+ - x^-}, \quad \eta = \frac{y - y^-}{y^+ - y^-}, \quad \zeta = \frac{z - z^-}{z^+ - z^-}. \quad (9)$$

根据式(7) - 式(9)以及水模实验的检测结果就可以对中间包剩余钢水液面高度 600 ~ 825 mm、铸坯宽度 900 ~ 1 450 mm、拉速 1.0 ~ 1.6 m/min 范围内的任何一个工况的无量纲浓度曲线进行预测.

3 交接部铸坯长度和位置的计算方法

对于铸坯中的某成分 i , 定义其无量纲边界浓度:

$$C_{B1}^i = \max \left\{ \frac{C_{1\min}^i - C_1^i}{C_2^i - C_1^i}; \frac{C_{1\max}^i - C_1^i}{C_2^i - C_1^i} \right\}, \quad (10)$$

$$C_{B2}^i = \min \left\{ \frac{C_{2\min}^i - C_1^i}{C_2^i - C_1^i}; \frac{C_{2\max}^i - C_1^i}{C_2^i - C_1^i} \right\}, \quad (11)$$

式中, $C_{1\max}^i$ 和 $C_{1\min}^i$ 为前一个钢种对成分 i 要求范围的上限和下限; $C_{2\max}^i$ 和 $C_{2\min}^i$ 为后一个钢种对成分 i 要求范围的上限和下限; C_1^i 和 C_2^i 分别为前后两炉钢水中该成分的含量.

由于钢水中包含多种成分, 依据各成分得到的无量纲边界浓度也各不相同, 在进行交接部铸坯判定时必须综合考虑每一种成分的判定结果, 有:

$$\left. \begin{aligned} C_{B1} &= \min_{i=1}^n \{ C_{B1}^i \}, \\ C_{B2} &= \max_{i=1}^n \{ C_{B2}^i \}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由无量纲边界浓度的定义可知, 在 $C_d(x) \leq C_{B1}$ 的区域, 铸坯的成分能够满足前一钢种的要求, 在 $C_d(x) \geq C_{B2}$ 的区域, 铸坯的成分能够满足后一钢种的要求. 由此可以得到交接部铸坯的起始位置 X_S 为 $C_d(x) = C_{B1}$ 的位置, 交接部铸坯的结束位置 X_E 为 $C_d(x) = C_{B2}$ 的位置, X_S 与 X_E 之间的铸坯即为交接部铸坯(如图 4 所示).

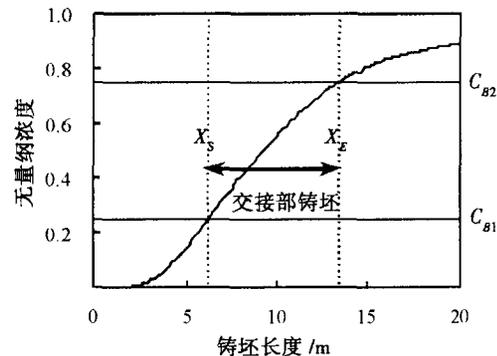


图 4 交接部铸坯位置和长度的计算方法

由于无量纲浓度曲线 $C_d(x)$ 为单调增函数, 因此当 $C_{B2} \leq C_{B1}$ 时不存在交接部铸坯; 当 $C_{B2} > C_{B1}$ 时必然存在交接部铸坯, 并且交接部铸坯的长度随 $C_{B2} - C_{B1}$ 的增大而增加. 交接部铸坯的长度 L_M 为:

$$L_M = \begin{cases} X_E - X_S, & C_{B2} > C_{B1}, \\ 0, & C_{B2} \leq C_{B1}. \end{cases} \quad (13)$$

4 模型验证

为了验证预测模型的准确性, 对宝钢二连铸 2 个不同钢种连浇过程中的混合坯进行了取样, 检测了 C、Mn 2 种成分的含量沿铸坯长度的变化情况. 连浇的工艺参数为: 中间包剩余钢水液面高度为 650 mm、铸坯宽度 1 100 mm、拉速 1.2 m/min. 前后两炉钢水中 C、Mn 的含量如表 2 所示, 沿铸坯长度方向无量纲浓度的预测值与实测值如图 5 所示. 由图中可以看出, 预测模型的

计算结果与铸坯取样的测试结果相差不大,在铸坯不同位置处,C元素含量的预测值与实测值的最大误差为10.47%,平均误差为4.62%;Mn元素含量的最大误差为7.30%,平均误差为2.75%。由两钢种C和Mn的成分范围以及这2种成分在钢水中的实际含量,可以得到无量纲边界浓度: $C_{B1} = 0.167$ 、 $C_{B2} = 0.833$,交接部铸坯的起始位置为5.3 m,长度为10.74 m。

表2 两炉钢水的C、Mn的含量 %

炉号	C		Mn	
	成分范围	实际含量	成分范围	实际含量
206514	0.085 ~ 0.110	0.095 8	0.35 ~ 0.45	0.40
206516	0.135 ~ 0.175	0.148 3	0.65 ~ 0.78	0.70

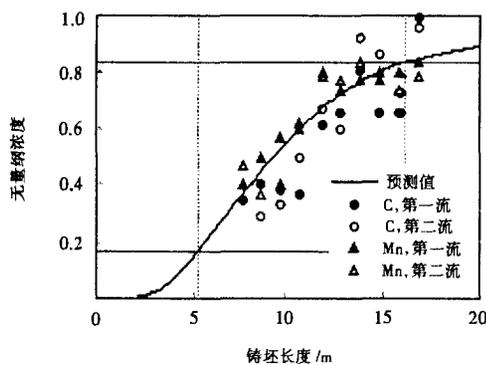


图5 沿铸坯长度方向无量纲浓度预测值与实测值的比较

5 结论

1) 笔者在水模实验基础上建立了的宝钢二连铸异钢种连浇过程中无量纲浓度曲线的预测模型,运用

该模型可以对不同的铸坯断面尺寸、中间包剩余钢水量和拉速条件下异钢种连浇的无量纲浓度曲线进行预测。

2) 在预测模型的基础上,根据连浇钢种的成分范围和前后两炉钢水中的成分含量可以计算得到交接部铸坯的起始位置和长度。

3) 预测模型的计算结果与现场测试结果的对比表明,所建立预测模型精度较高,能够满足实际生产的需要。

参考文献:

- [1] 程常桂, 邓康. 异钢种全连铸技术的应用和发展[J]. 包头钢铁学院学报, 1999, 18(9): 401-406.
- [2] THOMAS B G. Modeling Study of Intermixing in Tundish and Strand During a Continuous Grade Transition[J]. Steelmaking Conference Proceedings, 1996, 79: 519-531.
- [3] DAMLE C S, SAHAI Y. Modeling of Grade Change Operations During Continuous Casting of Steel[J]. Steelmaking Conference Proceedings, 1994, 77: 235-247.
- [4] HUANG X, TOMAS B G. Modeling of Steel Grade Transition in Continuous Slab Casting Processes[J]. Met Trans B, 1993, 24B: 379-393.
- [5] YEH J L, HWANG W S. The Development of a Mathematical Model to Predict Composition Distribution in Casting Slab and Intermix Slab Length during Ladle Changeover Period and Its Verification by Physical Model[J]. ISIJ International, 1993, 33(5): 588-594.
- [6] 职建军, 樊俊飞, 张捷宇. 宝钢一连铸不同钢种连浇的水模实验研究[J]. 宝钢技术, 2002, (1): 17-19.

Prediction Model of Intermixing Slab Length During Continuous Casting Grade Transition Process

LI Yu-gang¹, DONG Jin-gang², LI Gang¹, XIE Bing¹, WANG Yu¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Technical Department of Baoshan Iron and Steel Co., Shanghai 201900, China)

Abstract: In order to increase decision accuracy of the intermixing slab length and position, and decrease the slabs which are offgraded or scrapped. Water model experiments were conducted to simulate the continuous casting grade transition process of No. 2 continuous caster at Bao Steel. The dimensionless concentration profiles along slab length with different continuous casting conditions were measured. Based on the profiles a mathematical model was developed to predict the final composition distributions and length of intermixing slab. Comparison of predicted dimensionless concentration profile with plant data shows that the precision of the model is considerably satisfied to meet the need of steel grade transition evaluation.

Key words: grade transition; intermixing length; prediction model; water model