

太钢三炼钢板坯连铸中包结构优化

林 纲^{1,2)} 李士琦¹⁾ 黄 筠¹⁾ 韩建军¹⁾ 王贺利³⁾ 王立新³⁾

1)北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083 2)中咨工程建设监理公司,北京 100044 3)太原钢铁(集团)有限公司,太原 030003

摘 要 采用数值模型方法对太钢第三炼钢厂板坯连铸用中间包内部结构几何参数进行了最优化虚拟实验研究,研究中使用的评价指标是钢液在中间包内平均停留时间等三项时间参数,这些参数值用虚拟的示踪剂的脉冲响应实验测量求得.按 $L_{16}(2^{15})$ 正交表试验设计安排(四因子二水平)全因子实验.实验结果经方差分析、F 检验,确定了有显著性影响的因子,按三项评价指标确定最佳工况是:挡墙位置前移至 500 mm,下口减少至 200 mm,墙和坝中心线距离仍维持 322 mm,坝高仍为 272 mm.虚拟实验结果表明现生产用中包流动情况良好,采用最佳参数后中间包钢液流动的死角将由现工况的 4.80%减至 4.37%,采用湍流抑制器后死角可进一步减至 1.54%.

关键词 连续铸钢;中间包;虚拟实验;平均停留时间

分类号 TF777.1

符号表

P —流体密度, kg/m^3 ;

μ —粘度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$;

τ —平均停留时间, s ;

t —时间自变量, s ;

c —反应器出口处示踪剂的浓度, kg/m^3 ;

t_i —从开始加入示踪剂到时间步数为 i 步时的时间间隔, s ;

c_{t_i} — t_i 时刻的示踪剂的浓度, g/m^3 ;

Δt_i —第 i 步的时间步长, s ;

N —出口处示踪剂量达到 $(0.95\sim 0.99)G^\circ$ 的时间步数;

$\tau_{\text{平均}}$ —理论平均停留时间, s ;

τ_0 —滞留时间, s ;

τ_{max} —峰值时间, s ;

G° —示踪剂的总加入量, kg ;

V —反应器有效容积, m^3 ;

Q —稳定流过反应器的介质的体积流量, m^3/s .

1 研究的目的是和意义

太钢第三炼钢已有多年的不锈钢冶炼和连铸经验,为进一步改善不锈钢连铸板坯的质量,希望对其中间包内部的几何结构对钢液流动特征的影响做更为深入的细微的研究,为其优化改进提供指导,

特进行本研究.

本研究采用数值虚拟实验方法,可以为这一具体工程研究给出精细的结果,对其他类似的研究也给出了有益的参考.

2 基本的工程条件

太钢三炼钢不锈钢板坯连铸中间包的公称容量为 18 t,钢液注入区和流出区之间设有挡墙和挡坝,包中钢液公称液面深度为 800 mm,生产用中间包的内部几何结构见图 1.大包水口内径 $d_1 = 70 \text{ mm}$,插入钢液深度 $h = 200 \text{ mm}$,中包出水口(结晶器浸入式水口)内径 $d_2 = 48 \text{ mm}$.

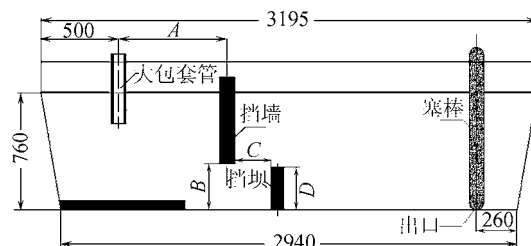


图 1 生产用中包内部结构

按正常的稳定连浇生产节奏,每炉 45 t 钢液,平均浇注时间为 47 min,即流过中包的平均质量流量 $Q = 970.79 \text{ kg}/\text{min}$,即 $16.18 \text{ kg}/\text{s}$.生产的钢种按 304 不锈钢考虑,其相关的液态(1600°C)物理性质为:密度 $\rho = 7050 \text{ kg}/\text{m}^3$,粘度 $\mu = 0.00624 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$.

收稿日期:2007-02-01 修回日期:2007-04-15

作者简介:林纲(1965—),男,高级工程师,博士生

3 中包结构优化的特征指标和影响因素

3.1 中包结构优化的特征指标

评价中间包内钢液流动状态的优劣有各种各样的判据，本研究选用反应工程学中通用的指标——平均停留时间 τ 作为评定中间包结构最优的宏观目标参数。平均停留时间 τ 定义式见式(1)^[1-2]：

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} (ct) dt}{\int_0^{\infty} c dt} \quad (1)$$

显然，式(1)中分母为浓度对时间的定积分，应等于反应器入口处投入示踪剂的总量，即：

$$\int_0^{\infty} c dt = G^0 \quad (2)$$

对于一个具体的有限时间内的实验，很难做到 $t \rightarrow \infty$ 。常以出口处示踪剂量达到 $(0.95 \sim 0.99) G^0$ 的时刻 t_{∞} 代替积分上限，即取平均停留时间为：

$$\tau = \frac{\int_0^{t_{\infty}} (ct) dt}{\int_0^{t_{\infty}} c dt} \quad (3)$$

本研究采用数值方法模拟过程，积分式(3)化为求和：

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^N c_i t_i t_i}{\sum_{i=1}^N c_i t_i} \quad (4)$$

本研究还选取响应曲线中另外两个特征参数作为参考指标，分别是滞止时间 τ_0 和峰值时间 τ_{max} (参见响应曲线图 2)。

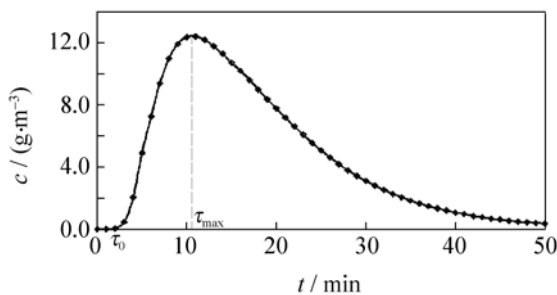


图 2 中间包停留时间分布曲线

3.2 待优化的中间包结构参数

参见图 1，本研究选取以下四项中包内部几何参数为有待优化的中间包内部几何结构参数：

A—挡墙到大包水口中心线的距离，mm；

B—挡墙距中包底部(开口)的距离，mm；

C—挡墙和挡坝中心线的水平距离，mm；

D—挡坝的高度，mm。

4 虚拟实验研究方法的选择

4.1 理论平均停留时间 $\tau_{平均}$

由反应工程学可知，一个反应器的理论平均停留时间是介质以理想的活塞流方式流过反应器的时间^[1-2]：

$$\tau_{平均} = V/Q \quad (5)$$

按上述太钢三炼钢板坯连铸的基本工况可知，钢液以理想的活塞流的形式平均的流过中间包所用的时间，即理论平均停留时间为：

$$\tau_{平均} = V/Q = 1074 \text{ s}.$$

4.2 预实验、无挡坝的极端情况

考虑另一极端情况，该中间包内部不设挡墙、也不设挡坝，钢液由入口流到出口将出现“短路”现象，可以设想，该工况下钢液在中包内相应的平均停留时间应该最短。采用数值模拟方法(方法详见下文)求知 $\tau' = 985 \text{ s}$ 。

4.3 实验方法的选择

由上述理论分析可知，在本研究中钢液在中间包内的平均停留时间最短的是 985 s，最长的不会超过 1074 s，总的变动范围大约是 89 s。可见，在现行工况的基础上调整中间包的内部结构对平均停留时间指标造成的影响可能的量级只是 $\pm 10 \text{ s}$ 。

这样的精度要求，排除了工业实验，也排除了水力学模型实验的可能，决定了本研究只能采用数值方法进行虚拟的脉冲刺激响应实验。

4.4 虚拟实验

考虑到钢液在中间包中的流动是在几何形状、物理条件较为复杂的情况下的流动，远非均匀粘性流体在无限长管中或无限大平板间的理想流动状态，故采用描述紊流状态的 $K-\varepsilon$ 双方程模型，并假设^[3-5]：

- (1) 均匀单一的介质，各项物理性质为常数；
- (2) 钢液处于连续稳态的流动状态；
- (3) 各项边界条件按常规处理；
- (4) 各项物理条件按工艺条件选取；
- (5) 由大包水口出处瞬间加入质量为 G^0 的某示踪剂，中包内示踪剂的浓度随时间而变化(非稳态)，示踪剂在钢液中的扩散远小于流体流动带来的传质效应，扩散可忽略。

虚拟实验使用商用软件 ANSYS CFX 10.0 工具，中间包内钢液稳态流动流场的数值模拟每次耗时约为 4 h，加示踪剂的刺激响应虚拟实验每次耗时约为 8 h，数据后处理时间约 2 h。典型的虚拟实验结果示意图如图 2 和图 3。

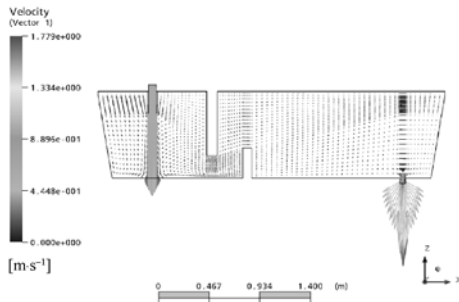


图 3 中包对称面的速度矢量图

5 $L_{16}(2^{15})$ 正交表实验设计

中包钢液流动特征的虚拟实验按正交表安排。

5.1 定量评价指标——目标函数

评价中间包钢液流动状况优劣的指标有许多种，本研究选下述三项计量值指标，以便进行定量的方差分析和显著性检验^[6]。

(1) 主评价 y_1 指标(%)——由虚拟实验中示踪剂的脉冲响应曲线(见图 2)，由式(4)求得的钢液在中包中的平均停留时间值最能全面表征钢液流动状况优劣的计量值参数。然而，中包内部挡墙和挡坝几何尺寸的变化会使中包实际容积有所改变，由式(1)可知，理论平均停留时间 $\tau_{\text{平均}}$ 的数值也将有所改变。在本实验研究中其变动幅度大约有 3%。因此，直接对比虚拟实验测到的平均停留时间 τ 的可比性就受到了干扰。所以，本研究取虚拟实验得到的实测与相应的理论值之相对差值 y_1 作为评价指标：

$$y_1 = \left(\frac{\tau_0 - \tau}{\tau_0} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{\tau}{\tau_0} \right) \times 100\% \quad (6)$$

y_1 可以认为表征了中包内钢液流动死区的百分数。 y_1 越小，死区越小， $y_1 = 0$ 表明中包流动可视为理想的活塞流。

(2) 两项辅助评价指标，分别是：

y_2 (s)——脉冲响应曲线中示踪剂开始达到中包出口的时间间隔值 τ_0 (s)；

y_3 (s)——脉冲响应曲线中示踪剂浓度达到最大值时的时间间隔值 τ_{max} (s)。

同上所述， y_2 和 y_3 值都按理论平均停留时间 $\tau_{\text{平均}}$ 的改变做了相应的修正。

指标 y_2 和 y_3 部分反映了钢液在中包中的停留状况，数值较大者，表明钢液在中包内的停留时间较长。

5.2 待优化的中包内部结构参数——因子和水平

本研究中有待优化的中包内部结构参数是 A 、 B 、 C 、 D 四项参数。考虑到以前不曾进行过精细的实验研究和理论研究，缺乏关于这些因子之间的交互作用的定量估计，本次虚拟实验采取“低水平数的全因子”实验设计——四因子二水平的全因子实验，实验次数取 $2^4 = 16$ 次。如前所述，数值模拟方法的虚拟实验的再现性极高，故不安排重复实验估计基准误差。

根据太钢三炼钢厂生产中使用的中间包内部几何结构为各因子的第一水平取值，参照有关的实验研究和理论研究的结果选取各因子的第二水平值，各因子及其水平取值列于表 1。

表 1 因子和水平

因子	一水平	二水平
A	$a1 = 700$ mm	$a2 = 500$ mm
B	$b1 = 224$ mm	$b2 = 200$ mm
C	$c1 = 322$ mm	$c2 = 346$ mm
D	$d1 = 272$ mm	$d2 = 296$ mm

注： A 、 B 、 C 、 D 如图 1 所示。

十六次虚拟实验按 $L_{16}(2^{15})$ 正交表安排，四个主效应分别安排在第 1、2、7 和 15 列，各二级交互作用不相混杂，各主效应及其二级交互作用均可以定量地做方差分析和显著性检验，三级交互作用占了五列，均作为误差项处理，表头设计见表 2，详表从略。

表 2 四因子二水平全因子实验 $L_{16}(2^{15})$ 设计表头

列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
因子符号	A	B	AB	C	AC	BC	e	D	AD	BD	e	CD	e	e	e

6 实验结果

6.1 虚拟实验

按 $L_{16}(2^{15})$ 正交表实验设计的安排完成了 16 次数值实验，实际的实验顺序随机进行，对加入的虚拟示踪剂的脉冲刺激响应曲线进行了后处理，分别求知了 16 种实验工况下钢水在中间包中流动的三个数值特征 y_1 和 y_2 、 y_3 的数值，(数据从略)。

6.2 方差分析和显著性检验

按三项数值特征指标 y_1 和 y_2 、 y_3 ，分别对四项影响因子及其二级交互作用的贡献做方差分析和 F

检验, 结果列于表 3.

表 3 虚拟实验的显著性检验结果($\alpha = 0.05$)

指标	有显著影响的因子
y_1	A
y_2	B
y_3	A、D、AD

6.3 主效应和交互作用的效应

(1) 对于主要评价指标 y_1 值有显著性影响的只有因子 A, 由 16 次实验的结果可分别求得 A_1 和 A_2 两个工况下的 y_1 的平均值, 见表 4.

其他三项因子及各二级交互作用的影响均不显著, 这表明在实验研究的范围内诸因子的变动值并未对 y_1 指标产生明显的影响, 故因子 B、C、D 可按其他方面的考虑取为一水平或二水平. 即对于指标 y_1 的最优工况是将挡墙的位置由距水口中心线 700 mm 处移至 500 mm 处, 中包内钢液流动的死区可由 4.80% 减至 4.37%, 改善的幅度约为 9%.

(2) 同理, 对于参考评价指标 y_2 和 y_3 的值有显著影响的因素可分别求出其效应, 见表 4.

表 4 在主效应影响下的三个评价指标的值

工况	指标 $\bar{y}_1 / \%$	指标 \bar{y}_2 / s	指标 \bar{y}_3 / s
\bar{A}_1 (原工况)	4.80	—	615.1
\bar{A}_2	4.37	—	605.1
\bar{B}_1 (原工况)	—	140.0	—
\bar{B}_2	—	145.3	—
\bar{D}_1 (原工况)	—	—	613.5
\bar{D}_2	—	—	606.8
$(\bar{AD})_1$	—	—	612.6
$(\bar{AD})_2$	—	—	607.6

注: $(\bar{AD})_1$ 为 A 和 D 有相同水平; $(\bar{AD})_2$ 为 A 和 D 有不同水平.

7 最佳工况和确认实验

7.1 最佳工况

根据表 4 (分别对于指标 y_1 和 y_2 、 y_3) 的结果, 得到最佳工况为 $a_2b_2c_1d_1$, 即: 挡墙位置为 500 mm, 挡墙下口高度为 200 mm, 挡墙和挡坝中心线的距离为 322 mm, 挡坝高度为 272 mm. 最佳工况和现行工况下三个评价指标见表 5.

7.2 确认实验

按正规程序, 应在最佳工况下进行若干次确认实验, 然而本研究采用数值方法重复实验的再现性极高, 故可取全因子试验中的相应结果确认实验结果, 最佳工况下的指标值如表 5 所列.

表 5 现行工况和最佳工况的评价指标值

指标	现行工况	最佳工况
$\bar{y}_1 / \%$	4.80	4.37
\bar{y}_2 / s	140.0	145.3
\bar{y}_3 / s	621.0	606.0

7.3 改进实验

本研究在上述最佳工况下添加湍流抑制器进行数值模拟. 虚拟实验结果表明, 湍流抑制器对改善钢液在中包内部的流场, 延长钢液在中包内的平均停留时间具有显著效果, 死区体积减少至 1.54%.

8 结论

本论文对太钢三炼钢厂板坯连铸中包内部几何结构进行优化研究, 得到如下结论:

(1) 钢液在中间包内的平均停留时间是综合描述钢液流动状况的宏观定量评价指标. 本研究选择的三种评价指标都是单位计量值, 各个指标均允许进行方差分析, 显著性检验等统计分析.

(2) 本中间包的理论停留时间为 1074 s, 现生产中使用的工况的平均停留时间为 1022 s (死区占 4.80%), 无挡墙无挡坝的工况为 993 s (死区占 8.22%).

这些数据表明, 中间包内部几何结构的改变对平均停留时间指标的影响的数量级大约为 ± 10 s. 普通的工业实验和水力学模型实验难以描述如此高的精度要求的实验. 故合理的方法是采用数值模拟的虚拟实验方法.

(3) 由于缺乏关于中包内部各几何结构参数之间的交互作用大小的定量估计, 本论文采用“多因子、少水平数”的研究策略. 具体实验为四因子、二水平的全因子实验, 按 $L_{16}(2^{15})$ 正交表安排实验. 经方差分析和显著性检验, 确定中间包的内部几何结构最佳参数是:

挡墙到大包水口的中心线距离由原来的 700 mm 减至 500 mm;

挡墙下口高度由原来的 232 mm 减至 200 mm;
挡墙和挡坝中心线的距离仍为原来的 322 mm;
挡坝的高度仍为 272 mm.

(4) 实验表明现行生产用中间包的内部几何结构较为合理, 但仍有改进的余地. 若选用最优参数, 可望达到的效果是: 钢液平均停留时间 τ 延长至 1069 s, 死区为 4.37%, 比原生产用工况减少 12.25%; 滞留时间间隔 τ_0 增至 145.3 s, 比生产工况

增加 2.84%；而峰值时间 τ_{\max} 为 606.0 s，比原工况 (621.0 s) 减少 2.42%。

(5) 进一步的虚拟实验表明：在中间包内安置湍流抑制器，钢液在包中的流动状况的宏观指标相当接近于理想活塞流，死区仅占 1.54%。

(6) 本文采用的数值虚拟实验、正交表实验设计、显著性检验、最佳工况估计等研究方法，可供类似的中间包内部几何结构优化研究参考。

参 考 文 献

[1] 曲英，刘今．冶金反应工程学导论．北京：冶金工业出版社，1987

- [2] 王建军，包燕平．中间包冶金学，北京：冶金工业出版社，2001
- [3] 钟良才．单流厚板坯连铸中间包结构优化．*炼钢*，2006，22(3)：10
- [4] Singh R.K, Paul A, Ray A K. Modelling of flow behaviour in continuous casting tundish. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 2003, 32: 137
- [5] Singh S, Koria S. The Physical modeling of steel flow in continuous casting tundish. *Ironmaking Steelmaking*, 1993, 20(3), 221
- [6] 李士琦．冶金系统工程．北京：冶金工业出版社，1991

Optimization of slab continuous casting tundish configuration of No. 3 Steel Plant in Taiyuan Iron and Steel (Group) Company Ltd.

LIN Gang^{1,2)}, LI Shiqi¹⁾, HUANG Yun¹⁾, HAN Jianjun¹⁾, WANG Heli³⁾, WANG Lixin³⁾

1) Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Consultation of the Engineering Construction Surveillance Company China, Beijing 10004, China

3) Taiyuan Iron & steel (Group) Company Ltd., Taiyuan 030003, China

ABSTRACT By the means of numerical model, the optimization of the geometrical parameters of slab continuous casting tundish configuration of the No. 3 Steel Plant in Taiyuan Iron and Steel Group were simulated. There are three evaluating indicators on time, one of which is the average time of stay of molten steel in the tundish. These indicators can be got by the impulse response experiment of the virtual tracer. The design of the total factor (four factors and tow levels) experiment is based on $L_{16}(2^{15})$ orthogonal list. And the results ascertain the significant influencing factors by variance analysis and F test. The best working condition due to the three evaluating indicators is: the distance of retaining wall to the center line of water gap is 500 mm, the bottom of retaining wall to the bottom of tundish 200 mm, the center line of retaining wall to the center line of dam 322 mm, and the height of the dam 272 mm. It means that the flow behavior in the existed tundish is normal. But it will be better under the optimized condition. The disabled zone will be reduced from 4.80% to 4.37%. The disabled zone will be decreased by 2.53% if the turbulence inhibitor is used.

KEY WORDS tundish; continuous casting steel; virtual experiment; average time of stay