

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.07.029

# 应用多因素耦合数值计算 210 t 钢包热状态分级

袁 飞<sup>1,2</sup>, 徐安军<sup>1,2</sup>, 贺东风<sup>1,2</sup>, 汪红兵<sup>3</sup>

(1.北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2.钢铁冶金新技术国家重点实验室(北京科技大学), 北京 100083;

3.北京科技大学 计算机与通讯工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为精确管控周转钢包造成的钢水温降, 以降低转炉出钢温度并减少能耗, 使用有限元软件 Ansys14 和 ParaMesh2.3 网格随移技术建立钢包的传热计算模型, 分析新包烘烤时间、空包时间、在线烘烤、离线烘烤时间和包衬侵蚀对钢包热状态及钢水温降的耦合影响; 使用红外法实测温度, 对比验证了模型的准确性. 根据计算的钢水温度补偿值, 建立包含包况信息编码的钢包热状态分级表. 结果表明: 受烘烤时间影响, 第一包龄钢水温降变化范围是 32.0~39.6 K; 空包 3 h 无在线烘烤情况下, 钢水温降约为 47 K; 有在线烘烤的情况下, 前 10 min 的在线烘烤能够使钢水温降减少 3.1~6.2 K; 钢包侵蚀对包衬温度影响较大, 但对钢水温降影响不大, 最高不超过 1 K. 分级表应用于现场, 为转炉出钢温度的设定和配包提供了依据, 使 M 钢厂主要钢种出钢温度降低 2.3~13.2 K.

**关键词:** 钢包; 钢水温降; 钢包分级; 温度场; 耦合

中图分类号: TD 701

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)07-0176-06

## Thermal state classification of 210 t ladle using multi-factor coupling numerical calculation

YUAN Fei<sup>1,2</sup>, XU Anjun<sup>1,2</sup>, HE Dongfeng<sup>1,2</sup>, WANG Hongbing<sup>3</sup>

(1.School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy (University of Science and Technology Beijing), Beijing 100083, China;

3. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To accurately control molten steel temperature drop caused by turnover ladle and reduce tapping temperature and energy consumption, the heat transfer computation model for ladle was built by using the software Ansys14 and adaptive mesh refinement of ParaMesh2.3. The influence of preheating time before ladle going online, cooling time, online preheating time, offline preheating time and erosion of ladle lining on the thermal storage of ladle and molten steel temperature drop was analyzed. The infrared measured data was used to verify the veracity of the model. The ladle classification table including ladle condition information coding has been built, which was based on calculated molten steel temperature compensation. The research result showed that the molten steel temperature drop varies from 32.0 K to 39.6 K influenced by the preheating time when ladle in the first thermal circulation. The molten steel temperature drop was 47 K when the cooling time was 3 hours with no online preheating. Molten steel temperature drop could be decreased by 3.1 K~6.2 K through the first online preheating for 10 min. The erosion of ladle lining had a big influence on the temperature field of ladle lining but not on the temperature drop of molten steel, and the molten steel temperature drop could not be more than 1K. The ladle classification table can be used to the tapping temperature setting and ladle selecting. The main steel grades tapping temperature in the M steel plant was decreased by 2.3~13.2 K.

**Keywords:** ladle; molten steel temperature drop; ladle classification; temperature field; coupling目前,炼钢厂多存在转炉出钢温度过高<sup>[1]</sup>和钢水温度管控精度低<sup>[2]</sup>的问题,钢包作为钢水运输容器连接转炉至连铸区段,钢包传热<sup>[3]</sup>是影响钢水温度的重要因素. 现场温度实测<sup>[4]</sup>可以定性分析钢包与钢水温度的关系,但由于无法剥离其他非钢包因素的影响,同时由于影响因素的复杂多样性,无法获得精确的规律.Zimmer 等<sup>[5]</sup>使用在包衬内埋设热电

收稿日期: 2015-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(51574032);

国家重点基础研究发展计划(2012CB720405)

作者简介: 袁 飞(1988—),男,博士研究生;

徐安军(1965—),男,教授,博士生导师

通信作者: 贺东风, hdfcn@163.com

偶的方法,估计钢包周转各阶段的包衬温度分布。数值计算能够解析单因素下钢包对钢水温度的影响<sup>[6]</sup>,Camdali等<sup>[7]</sup>使用稳态传热计算研究LF精炼过程钢包对钢水温降的影响。Tripathi等<sup>[8]</sup>通过建立CFD模型,结合实验验证的方法研究了钢包包龄对钢水温降影响。杨治立等<sup>[9]</sup>使用有限元法模拟钢包瞬态传热,并采用能量守恒分析,研究静置和浇铸两阶段内钢包导致的钢水温降。但若要实现现场应用,需要研究综合因素影响下全工序的钢包热状态和钢水温度变化。

本文使用有限元软件Ansys14和ParaMesh2.3网格随移技术,研究全工序过程中烘烤时间、空包时间、包龄和包衬侵蚀<sup>[10]</sup>等因素对M钢厂210 t钢包热状态的影响规律,以及复杂钢包热状态对钢水温

降的影响,提出了一种基于多因素耦合模拟计算建立钢包分级的方法,实现现场应用。

## 1 建立传热模型

M炼钢厂生产流程包括“转炉—钢包炉精炼—连铸”和“转炉—真空循环脱气精炼—连铸”两种,受生产计划影响,在线周转钢包数量变化范围为6~11包。

### 1.1 钢包的材质和几何模型

钢包高度5.2 m,钢包内腔深度4.06 m,包口外径4.63 m,包口内径4.00 m,钢包有效容积约30 m<sup>3</sup>,无绝热层。

现场取样实测,获得钢包耐材的热物性参数(见表1)。钢水等其他热物性参数参阅文献<sup>[11]</sup>。

表1 钢包各层的物性参数

耐火材料	相应钢包结构	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
镁碳砖	渣线	0.589 + 0.002 4T - 1.25 × 10 <sup>-8</sup> T <sup>2</sup>	936 + 0.307T	3.06
浇注料	永久层和包底非冲击区	0.974 + 0.000 5T - 1.61 × 10 <sup>-7</sup> T <sup>2</sup>	882 + 0.227T	3.03
预制块	包底冲击区	0.181 + 0.001 1T - 4.07 × 10 <sup>-7</sup> T <sup>2</sup>	843 + 0.207T	3.11
平砌层砖	包底平砌层	0.419 + 0.001 1T - 5.50 × 10 <sup>-7</sup> T <sup>2</sup>	843 + 0.207T	3.06
尖晶石砖	包壁工作层和围罐砖	0.028 + 0.002 5T - 9.77 × 10 <sup>-7</sup> T <sup>2</sup>	843 + 0.207T	3.20
钢板	包壳	47	502	7.60

### 1.2 控制方程和边界条件

由于钢包传热的复杂特性,对其进行以下假设:1)忽略钢包内各层之间的接触热阻<sup>[12]</sup>;2)认为钢包烘烤时煤气燃烧的温度分布均匀;3)忽略钢包各层的热膨胀;4)忽略耳轴、水口和滑板等附件<sup>[13]</sup>;5)认为钢水温度分布均匀,钢包运输过程中钢水温度变化对包衬传热影响较小,温度恒定为1 923 K;6)包盖对钢包包体热状态影响很小,文中忽略;7)钢包为漫射(漫发射、漫反射)灰体。

#### 1.2.1 传热控制方程<sup>[14]</sup>

包衬温度控制方程使用圆柱坐标系下的傅里叶导热微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{\phi}$$

式中: $\rho$ 为包衬材料的密度,kg·m<sup>-3</sup>;  $c$ 为包衬材料的比热容,J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>;  $T$ 为温度,K;  $\tau$ 为时间,s;  $\dot{\phi}$ 为包衬内热源项,W·m<sup>-3</sup>;  $r$ 为包壁的半径,m;  $z$ 为包底的厚度,m;  $\lambda$ 为包衬材料的导热系数,W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>。对于钢包有 $\dot{\phi} = 0$ 。

#### 1.2.2 烘烤过程

烘烤过程的边界条件包括钢包内壁和钢包外壁的边界条件:

内表面边界条件为

$$Q_{\text{气-内}} = \left\{ \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{内}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{气}}} - 1} \left[ \frac{\varepsilon_{\text{气}}}{\alpha_{\text{气}}} \left( \frac{T_{\text{气}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{内}}}{100} \right)^4 \right] + A_{\text{气-内}} (T_{\text{气}} - T_{\text{内}}) \right\} B_{\text{内}};$$

外表面边界条件为

$$Q_{\text{外-环}} = h_{\text{外-环}} (T_{\text{外}} - T_{\text{环}}) B_{\text{外}}.$$

式中: $Q_{\text{气-内}}$ 和 $Q_{\text{外-环}}$ 分别为火焰向包衬内表面传递的热量以及包外表面向环境传递的热量,J·s<sup>-1</sup>;  $C_0$ 为黑体辐射系数,为5.67 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-4</sup>;  $\varepsilon_{\text{内}}$ 为包衬内表面的黑度;  $\varepsilon_{\text{气}}$ 为火焰烟气的黑度;  $\alpha_{\text{气}}$ 为火焰烟气的吸收率;  $T_{\text{气}}$ 、 $T_{\text{内}}$ 、 $T_{\text{外}}$ 、 $T_{\text{环}}$ 为火焰烟气、钢包内外表面和环境的温度,K;  $A_{\text{气-内}}$ 为火焰烟气向钢包内表面的对流换热系数,W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>;  $B_{\text{内}}$ 、 $B_{\text{外}}$ 分别为钢包内、外表面积,m<sup>2</sup>;  $h_{\text{外-环}}$ 为合并了对流和辐射传热的综合换热系数,W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>。

#### 1.2.3 空包过程

空包冷却阶段,认为包内空气是热辐射的透明体,不具有发射和吸收辐射的能力,此阶段钢包内表面的边界条件是

$$Q_{\text{内-环}} = \left\{ \frac{C_0 \varepsilon_{\text{内}} F_{\text{内-顶}}}{1 - (1 - \varepsilon_{\text{内}})(1 - F_{\text{内-顶}})} \left[ \left( \frac{T_{\text{内}}}{100} \right)^4 - \varepsilon_{\text{环}} \left( \frac{T_{\text{环}}}{100} \right)^4 \right] - A_{\text{内-环}} (T_{\text{内}} - T_{\text{环}}) \right\} B_{\text{内}}$$

式中:  $F_{\text{内-顶}}$  为内表面对包顶虚拟面的角系数,  $\varepsilon_{\text{环}}$  为环境的黑度。

钢包外表面的边界条件和烘烤阶段相同。

#### 1.2.4 满包过程<sup>[15-16]</sup>

钢水传热控制方程为

$$m_{\text{钢}} c \left( \frac{dT_{\text{钢}}}{d\tau} \right) = q_{\text{内壁}}(\tau) B_{\text{内壁}} + q_{\text{内底}}(\tau) B_{\text{内底}} + q_{\text{自}}(\tau) B_{\text{自}}$$

满包时内表面的边界条件为

$$T_{\text{内}} = T_{\text{钢}}(\tau),$$

外表面的边界条件为

$$Q_{\text{外-环}} = h_{\text{外-环}} (T_{\text{外}} - T_{\text{环}}) B_{\text{外}}$$

式中:  $m_{\text{钢}}$  为钢水质量, kg;  $q$  是热流密度,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\tau$  是时间, s; 下标: 内壁、内底、自分别表示包壁内面、包底内面和钢水渣层自由面。

#### 1.2.5 出钢和浇铸过程

边界条件类似于满包过程; 浇铸过程可以看成是出钢过程的逆过程, 传热边界条件和控制方程和出钢过程类似。

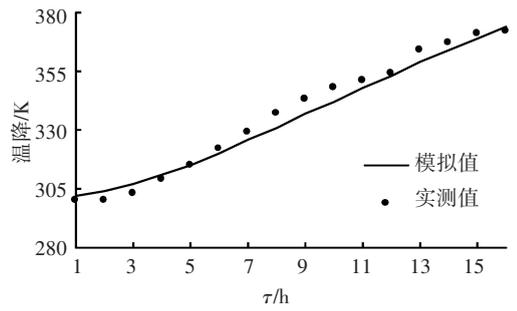
## 2 计算方法及模型验证

### 2.1 计算方法

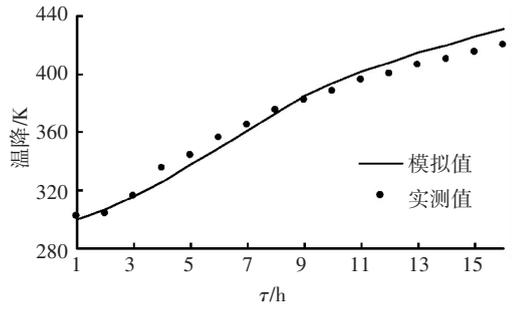
根据耐火材料的不同, 在有限元软件 Ansys14 中, 将包壳和永久层分别设置为连续的整体, 渣线、包壁工作层、包底冲击区工作层、非冲击区工作层、包底砖和围罐砖单独做几何划分, 分别对各部分指定不同的耐材特性<sup>[17]</sup>。模型共使用单元 28 383 个平面 4 节点热实体单元 (PLANE55), 对出钢、满包和浇铸过程, 使用 0 ~ 611 个表面效应单元 (SURF151)。使用 Paramesh2.3 网格随移技术处理钢包壁的侵蚀变薄过程, 允许网格有大的移动而仍然保持求解精度。

### 2.2 模型验证

使用红外测温枪对包壳 6 个不同高度的标记点进行现场测温, 与数值模拟结果进行对比验证。测温枪物距比 50 : 1, 精度  $\pm 1$  K。对钢包在上线前烘烤前 16 h 的升温过程进行了实测值和模拟值的对比。图 1 显示了标记点 1 和 4 处的温度变化, 标记点 1 距包底 1.4 m, 标记点 4 距包口 1.9 m。对包壳 6 个标记点的温度取平均值, 代表包壳的平均温度。经对比数值计算和实测的误差在 4% 以内, 验证了模型的准确性。



(a) 1号标记点



(b) 4号标记点

图 1 包壳表面测温点温度

## 3 计算结果与分析

不同的钢包周转数主要影响钢包烘烤和空包时间, 而转炉出钢、精炼、连铸浇注时间以及满包的吊运及等待时间等变化较小, 根据对生产数据的统计, 钢包周转过程各工序的平均时间为: 上线前烘烤 10 h、在线烘烤 30 min, 出钢过程 7 min, 出钢结束至精炼开始的吊运及等待 15 min, 精炼 30 min, 精炼结束至浇注开始的吊运及等待 20 min, 浇注 35 min, 空包 (浇注结束至在线烘烤开始) 60 min。当研究某一过程时间因素的影响规律时, 其它过程的时间按以上数据取值。

### 3.1 上线前烘烤时间的影响

模拟不同上线前烘烤时间下, 钢包蓄热饱和和前包衬的温度变化, 并基于能量守恒, 计算了每次包龄从转炉出钢至浇铸结束过程钢包对钢水造成的温降值:

$$c_{\text{钢}} m_{\text{钢}} \Delta T_{\text{钢}} = \sum_i^{483} q_i B_i \tau$$

式中:  $c_{\text{钢}}$  为钢水比热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $q$  为热流密度,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\Delta T_{\text{钢}}$  是钢水温度变化, K; 将与钢水接触的内表面按节点划分为 483 个微元面,  $i$  为每个微元面的序号。

图 2 显示了上线前烘烤 6~12 h 对钢水温降的影响, 新包第一个循环周期 (第一包龄) 造成的钢水温降较大, 钢包在周转到第 10 包龄达到蓄热饱和, 造成钢水温降约 30 K。烘烤 6 h 时, 第一包龄钢包造成钢水温降约 40 K, 通过延长烘烤时间, 能够有效

降低钢水温降,烘烤60 h时,第一包龄钢包造成钢水温降约32 K,已经接近于M炼钢厂钢包蓄热饱和状态下造成的钢水温降值30 K.

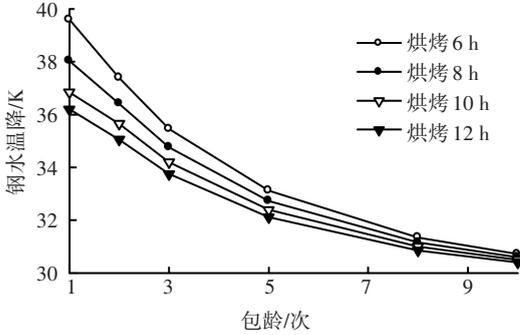


图2 不同上线前烘烤时间导致钢水温降

### 3.2 空包时间和在线烘烤时间的影响

M钢厂出钢前钢包于在线烘烤位进行在线烘烤,对空包时间1.0、1.5、2.0、2.5和3.0 h后,在线烘烤0、10、20、30、40 min的钢包后续周转过程进行传热计算.图3是对钢水温降的影响.空包3 h,不进行在线烘烤时,周转过程钢水温降约47 K;当空包1.5 h,在线烘烤40 min时,周转过程中钢包造成钢水温降是32 K.

在线烘烤前10 min对包衬蓄热的提升较为明显,能够降低后续钢水温降3.1~6.2 K,在线烘烤对降低钢水温降的效果随着烘烤时间增加而减少.

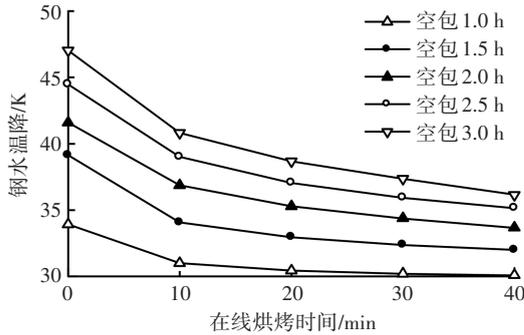


图3 空包和在线烘烤时间对钢水温降的影响

### 3.3 周转过程离线烘烤时间的影响

生产中,钢包热修完毕后可能进入离线状态,空包等待一段时间,随后进行离线烘烤后再次上线周转.模拟空包1.0、1.5、2.0、2.5和3.0 h,以及每种情况下离线烘烤时间1、3、5、10、20和30 h,研究钢包的包衬温度变化状况和钢水温降,结果见图4.

图4表明,当空包1 h时,离线烘烤1 h使后续钢包导致钢水温降约30 K,而增加离线烘烤时间反而会增加钢水温降,这是由于空包时间较短,包衬蓄热较多,钢包的散热量大于离线烘烤给包衬的传热量.当空包时间大于1.5 h时,增加离线烘烤时间有助于减少后续钢水温降,对于不同情况下的钢包,离线烘烤时间大于20 h时对钢水温降的影响不大,随

离线烘烤时间延长,钢水温降值趋于约32 K.

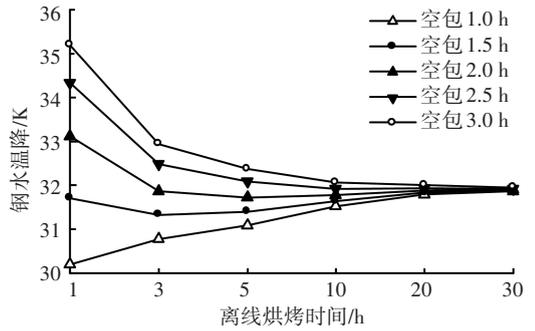


图4 离线烘烤时间对钢水温降的影响

### 3.4 包衬侵蚀的影响

钢水和渣<sup>[18]</sup>的冲刷侵蚀使包衬工作层的厚度逐渐减小.M钢厂在第41和82包龄后对钢包进行小修,包底残厚110 mm,渣线残厚100 mm;第123包龄后进行中修,包底残厚110 mm,包壁残厚90 mm,渣线残厚100 mm;10次中修后进行大修,更换全部永久层和工作层.对一个中修周期(即123包龄),按照工作层平均侵蚀速度,使用网格随移技术更改模型网格的尺寸,模拟钢包周转过程的包衬侵蚀.

图5显示了第6包和第117包钢包受侵蚀影响的变化,并对比了两者在浇铸开始时刻的包衬温度分布,第117包钢包的渣线、包壁和包底厚度相较第6包明显变薄,同时包壳表面的温度更高.

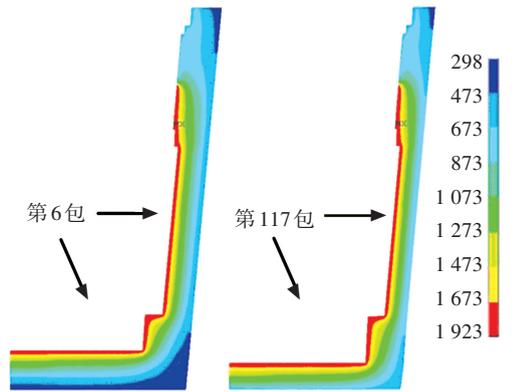


图5 钢包受侵蚀影响温度分布对比(K)

图6显示了包衬侵蚀对钢水温降的影响规律,第1包和小修完毕后的第42包、83包,钢水温降分别为36.8、37.1和37.2 K,温降差异很小.蓄热饱和后,第35包、76包和117包,钢包造成的钢水温降为30.1、30.7和31.1 K,侵蚀对蓄热饱和钢包导致钢水温降的影响较小,最高为1 K,其原因是虽然侵蚀包的包壳外表面散热量大,但由于侵蚀使包衬质量减少,而导致包衬蓄热量减少,两种因素互为抵消,它们的综合作用使钢水通过钢包损失的热量相差不大.

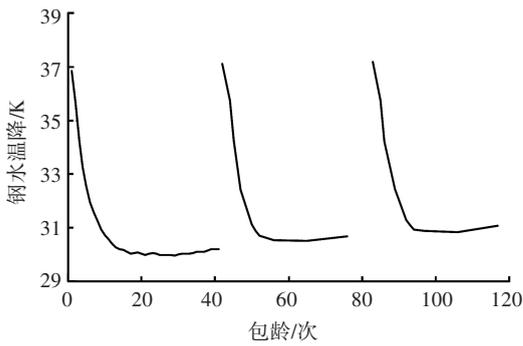


图 6 包衬侵蚀对钢水温降的影响

## 4 钢包热状态分级

### 4.1 钢包热状态分级设计

#### 4.1.1 钢包分级信息编码

钢包分级信息编码按照对钢包蓄热状态影响的 4 类因素进行分位编排:

1) 上线前烘烤时间. 钢包未达蓄热饱和, 根据上线前烘烤时间 6、8、…、60 h 的模拟结果, 对应钢包第 1 位分级编码 A、B、…、I, 对于蓄热饱和状态的钢包, 其第 1 位钢包信息编码为 O.

2) 包龄和包衬侵蚀<sup>[19]</sup>. 不同烘烤时间对应钢包达到蓄热饱和的周转次数不同, 编码第 1 位 A ~ I 对应的蓄热周期有 1~10、1~9、1~8、1~7、1~6、1~5 包这几种情况, 该包龄为第 2 位编码, 编码对应了包龄对钢水温降的模拟结果; 第 1 位编码为 O 的钢包, 即蓄热饱和的钢包, 此时 X、Y、Z 为第 2 位编码, 表征 1~41、42~82、83~123 包的侵蚀影响, X、Y、Z 分别对应钢水补偿温降为 0、0.5、1.0 K. 1、2 位信息编码详情见表 2.

表 2 钢包分级第 1、2 位编码信息

上线前烘烤时间/h	第 1 位分级编码	第 2 位分级编码(包龄)
<7	A	1 ~ 10
[7,9)	B	1 ~ 10
[9,11)	C	1 ~ 10
[11,13)	D	1 ~ 10
[13,16)	E	1 ~ 9
[16,18)	F	1 ~ 8
[18,22)	G	1 ~ 7
[22,30)	H	1 ~ 6
≥ 30	I	1 ~ 5
所有烘烤时间	O	X、Y、Z

3) 空包时间. 第 3 位信息编码 A ~ E, 表示空包时间 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 h, 编码根据相关模拟结果对应钢水温降值.

4) 在线烘烤和离线时间. 第 4 位信息编码 Z<sub>0</sub>、Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>、Z<sub>3</sub>、Z<sub>4</sub>, 表示在线烘烤 0、10、20、30、40 min,

编码根据在线烘烤时间影响的模拟结果对应钢水温降值; 若钢包转为离线烘烤, 第 4 位信息编码为 L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>4</sub>, 表示离线烘烤 1、3、5、20 h, 对应离线烘烤的模拟结果中的钢水温降值.

#### 4.1.2 多因素耦合分级

对 4 类分级编码对应的包况进行数值模拟, 计算对钢包热状态和钢水温降的耦合影响, 则有

$$T_{\text{补偿}} = T_{\text{温降}} - T_{\text{标}},$$

$$T_{\text{叠加}} = (T_1 - T_{\text{标}}) + (T_2 - T_{\text{标}}).$$

式中:  $T_{\text{温降}}$  和  $T_{\text{补偿}}$  是 4 类影响因素耦合影响下钢包导致钢水温降值和温度补偿值,  $T_{\text{标}}$  是 M 炼钢厂蓄热饱和和钢包的包衬传热导致钢水温降值, 其值为 30 K,  $T_1$  是包龄和上线前烘烤因素影响钢包导致钢水温降值,  $T_2$  是空包时间和在线烘烤或离线烘烤时间影响导致钢水温降值,  $T_{\text{叠加}}$  是 4 类因素两两耦合后钢水温度补偿值的线性叠加.

由于 4 类因素组合情况非常多, 直接计算全部的  $T_{\text{补偿}}$  工作量巨大, 难以实现; 而计算  $T_{\text{叠加}}$  只需分别计算两种因素耦合情况进行叠加, 计算量大大降低. 比较  $T_{\text{叠加}}$  与  $T_{\text{补偿}}$ , 计算其误差, 当其他因素固定时, 误差随包龄增加而减小, 部分编码的误差值详见表 3, 当误差 < 0.1 K 时, 用  $T_{\text{叠加}}$  近似代替  $T_{\text{补偿}}$ .

表 3 部分信息编码的  $T_{\text{叠加}}$  与  $T_{\text{补偿}}$  的误差值 K

信息编码	$T_{\text{叠加}}$	$T_{\text{补偿}}$	误差
A4EZ <sub>0</sub>	21.135	21.973	0.838
A5EZ <sub>0</sub>	20.149	20.754	0.605
A6EZ <sub>0</sub>	19.335	19.822	0.487
A7EZ <sub>0</sub>	18.835	19.093	0.258
A8EZ <sub>0</sub>	18.380	18.565	0.185
A9EZ <sub>0</sub>	18.035	18.076	0.041

## 4.2 应用及效果

在数值计算中, 选取离散有限的特征时间代表一定范围内的烘烤或空包时间, 并结合包龄等影响因素, 建立包含钢水温度补偿信息的完整钢包分级信息表. 信息表集成在钢包信息管理软件中, 通过包况实时自动判断钢包等级, 提供钢包导致的钢水温度补偿信息, 为现场配包提供判据.

表 4 根据 3 760 组现场生产数据, 比较使用前后平均转炉出钢温度和精炼废钢使用量(由于钢水温度过高, 经常需要在精炼过程添加废钢以降低钢水温度), 钢包分级使用后主要钢种的平均出钢温度有明显的下降, 下降值在 2.3~13.2 K 间, 出钢温度的降低使精炼加入废钢量明显减少, 减少 0.18~1.44 t.

表4 钢包分级使用效果对比

钢号	平均出钢温度/K		精炼加入废钢量/t		样本数
	使用前	使用后	使用前	使用后	
BWG-1	1 927.1	1 919.4	1.74	1.02	169
M3A30	1 974.8	1 963.4	0.38	0.20	153
M3A33	1 975.9	1 963.7	0.62	0.32	330
SDC01	1 971.0	1 962.7	1.35	0.73	215
SDC03	1 972.0	1 959.8	1.51	0.92	181
SDX51D	1 970.3	1 962.6	1.31	0.57	759
SDX52D	1 972.3	1 959.1	1.26	0.69	167
SPHC	1 963.3	1 961.0	2.14	0.70	1 597
SPHD-P	1 967.0	1 959.1	1.10	0.77	189

## 5 结 论

1)使用有限元方法建立周转各工序的钢包传热模型,计算了多种因素对钢包热状态和钢水温降的影响规律。上线前烘烤时间由6 h增加至60 h时,第1包龄钢包造成钢水温降值由39.6 K降低至32 K。不同空包时间,前10 min的在线烘烤能减少钢水温降3.1~6.2 K。空包时间大于11.5 h时,增加离线烘烤时间有助于减少钢水温降。

2)使用网格随移方法计算钢包侵蚀对传热影响。包衬侵蚀变薄对钢包造成钢水温降值影响较小,侵蚀造成的钢水温降增加最多为1 K。

3)通过对钢水温度补偿值的叠加和直接计算结果的误差分析,减少了多因素耦合计算的工作量,实现了全因素耦合影响下钢包热状态和钢水温降规律的计算。

4)考虑包龄、上线前烘烤时间、空包时间、在线和离线烘烤时间的耦合影响,基于数值计算,从造成钢水温降的角度完成钢包热状态分级,钢包的信息编码和分级表应用于M钢厂钢包管理系统,指导配包和钢水温控,降低不同钢种的转炉出钢温度2.3~13.2 K,减少精炼废钢使用量0.18~1.44 t。

## 参 考 文 献

[1] 余亮,文光华,唐萍,等.数据挖掘在出钢过程钢水温降预测中的应用[J].过程工程学报,2009,9(1):296-299.

[2] DORCAK L, TERPAK J. Monitoring and prediction of the liquid steel temperature in the ladle and tundish [J]. Metalurgija, 2006, 45(2): 93-96.

[3] PAN Yuhua, BJORKMAN B. Physical and mathematical modeling of thermal stratification phenomena in steel ladles [J]. ISIJ International, 2002, 42(6): 614-623.

[4] 贺东风,徐安军,吴鹏飞,等.炼钢厂钢包热状态跟踪模型[J].北京科技大学学报,2011,33(1):110-115.

[5] ZIMMER A, LIMA A N C, TROMMER R M, et al. Heat Transfer in Steelmaking Ladle [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2008, 15(3): 11-14.

[6] FREDMAN T P. Heat transfer in steelmaking ladle refractories and steel temperature [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2000, 29(6): 232-258.

[7] CAMDALI U, TUNC M. Steady state heat transfer of ladle furnace during steel production process [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2006, 13(3): 18-20.

[8] TRIPATHI A, SAHA J K, SINGH J B, et al. Numerical simulation of heat transfer phenomenon in steel making ladle [J]. ISIJ International, 2012, 52(9): 1591-1600.

[9] 杨治立,朱光俊,王宏丹,等.210 t钢包钢水温降规律的数值模拟[J].炼钢,2011,27(2):61-64.

[10] 蒋国璋,孔建益,李公法,等.钢包内衬膨胀缝对热应力的影响研究[J].中国冶金,2007,17(12):25-27.

[11] 李红霞.耐火材料手册[M].北京:冶金工业出版社,2007:710-711.

[12] VOLKOVA O, JANKE D. Modelling of temperature distribution in refractory ladle lining for steelmaking [J]. ISIJ International, 2003, 43(8): 1185-1190.

[13] LI Gongfa, LIU Jia, JIANG Guozhang, et al. Numerical simulation of temperature field and thermal stress field in the new type of ladle with the nanometer adiabatic material [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(4): 1-13.

[14] 徐安军.炼钢厂物流调控系统及其温度-时间流的解析与应用研究[D].北京:北京科技大学,1996:91-94.

[15] GILDARDO S D, RODOLFO D M, JOSE B S, et al. Numerical modelling of dissipation phenomena in a new ladle shroud for fluidynamic control and its effect on inclusions removal in a slab tundish [J]. Steel Research International, 2014, 85(5): 863-874.

[16] SCHALK W P, EKSTEEN J J, BRADSHAW S M. A numerical modelling investigation into design variables influencing mixing efficiency in full scale gas stirred ladles [J]. Minerals Engineering, 2013, 46 - 47: 16-24.

[17] NATH N K, MANDAL K, SINGH A K, et al. Ladle furnace on-line reckoner for prediction and control of steel temperature and composition [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2006, 33(2): 140-150.

[18] 张艳奎,韩兵强,邱文冬,等.不同Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的镁铝尖晶石抗钢包渣侵蚀性研究[J].耐火材料,2013,47(2): 92-96.

[19] GRUBER D, HARMUTH H. Durability of brick lined steel ladles from a mechanical point of view [J]. Steel Research International, 2008, 79(12): 913-917.