

# 钢轧转炉烟气智能预测与 控制系统的研发与实现

## Development and Implementation of an Intelligent Flue Gas Prediction and Control System for Steel Rolling Converter

供稿|胡显堂<sup>1</sup>, 宋征<sup>1</sup>, 杨星<sup>2</sup> / HU Xiantang<sup>1</sup>, SONG Zheng<sup>1</sup>, YANG Xing<sup>2</sup>

### 内 容 导 读

在钢铁冶炼过程中, 转炉顶吹氧工艺是核心环节之一。随着生产节奏不断加快, 传统人工操作不仅劳动强度大, 也容易引发现场事故。为提高转炉炼钢的自动化与智能化水平, 首钢京唐公司研发了一套基于烟气分析的智能预测与控制系统。该系统通过实时采集和分析转炉排放的烟气数据, 精准判断冶炼状态, 并动态指导副枪进行测温、取样及定碳操作, 大幅提升终点碳含量和温度的预测准确性。本文详细介绍了该系统的设计思路与方法, 包括烟气延迟时间分析、工艺计算模型构建、一二级系统通讯实现等关键模块, 为推进智慧炼钢提供了可靠的技术支撑。

随着国内钢铁行业的迅速发展, 对板材质量的要求越来越高, 传统的炼钢技术难以达到钢材连续稳定生产的高技术要求, 因此转炉炼钢操作的智能化研究成为主流趋势。智慧炼钢技术的出现, 既大幅提升了产品的质量, 也有效降低了炼钢成本, 实现了提质增效的目的。终点双命中情况一直是国内外研究转炉炼钢的焦点, 目前较为成熟的技术为收支平衡计算模型和副枪模型。收支平衡计算模型以铁水成分和吹炼目标成分为基础进行计算, 随着转炉冶炼的进行, 计算误差被逐步放大, 从而导致计算终点碳含量误差较大。副枪模型只能测量某一时刻的熔池碳和温度, 不能连续地预测转炉熔池碳含量。因此, 建立基于转炉烟气模型, 实现辅助测温、取样、定碳(TSC)测量控制及动态模型计算参数

调节, 既可以对熔池碳含量进行预测, 又可以辅助副枪测量提高 TSC 命中精度, 从而提高终点碳和温度双命中率, 保持动态过程的稳定, 减少喷溅和补吹情况的发生, 从而节约转炉炼钢的生产成本<sup>[1-3]</sup>。京唐公司钢轧作业部设计投产 3 座 210 t 顶底复吹型转炉, 年产钢水量 450 万 t。目前转炉双炉生产为常态, 为了提高转炉炼钢自动化水平, 控制精度、预测准度, 辅助岗位进行转炉炼钢操作的稳定性, 本文提出了转炉烟气模型设计方案。转炉烟气模型首先是利用烟气分析仪分析转炉烟气成分, 通过计算机处理烟气成分数据后传输到转炉二级数据库, 再对转炉烟气成分数据和熔池碳含量数据进行分析并构建数学模型, 最终形成根据转炉烟气成分含量预测熔池碳含量的烟气模型, 指导 TSC 测量控制。

作者单位: 1. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司钢轧作业部, 河北 唐山 063200; 2. 北京首钢自动化信息技术有限公司, 北京 石景山 100041

## 转炉控制现状介绍

钢轧作业部产线年产钢水 450 万 t，共有 3 套机械式搅拌法（KR）脱硫站、3 座 200 t 转炉、3 座钢包精炼（LF）炉（包括 2 座单工位和 1 座双工位）、2 套双工位真空炉（VD）、2 台单流板坯连铸机，并建设 1 台单流多模式全连续铸轧生产线，2 座 500 m<sup>2</sup> 套筒窑。生产的连铸坯分别供应后序中板生产线和多模式全连续铸轧生产线。

目前生产常态为转炉双炉生产，生产节奏较快。为降低工人劳动强度，减少事故发生，提升钢轧作业部智能炼钢水平，需进一步提高转炉炼钢自动化程度、控制精度和预测准度，辅助岗位进行生产操作。目前 6<sup>#</sup>~8<sup>#</sup> 转炉已经实现自动出钢功能，8<sup>#</sup> 转炉已经实现氧枪联动、烟气分析、自动溅渣、自动出渣、钢包质量识别模块化等冶炼功能。

## 转炉烟气模型设计

烟气分析经历了烟气成分的权重拟合、控制变量的氧量修正和脱碳速率拟合。对比分析发现利用脱碳速率分析的预测碳含量拟合曲线规律较明显、终点预测含碳量较为准确。烟气数据分析分为冷端烟气数据分析和热端烟气数据分析。烟气数据分析的主要步骤有烟气数据清洗、延迟时间分析和数据拟合建模，其中，数据清洗是为了剔除掉异常烟气成分数据，保证所用数据为准确度较高的数据，从而使拟合公式较为准确；延迟时间分析是为了将碳含量、烟气成分含量和烟气流量等参数对应到同一时刻；数据拟合建模是根据脱碳速率与转炉熔池碳含量的关系，拟合出烟气成分预测碳含量的模型<sup>[4-6]</sup>。

### 冷端烟气数据分析

#### ➤ 数据清洗

从转炉二级数据库中取出烟气成分、烟气流量、钢液重量、合金加入量和动态计算的碳含量等数据，对点吹、废钢加入量异常、吹氧量异常、出现喷溅返干、数据量较少和拟合效果差的炉次进行剔除。

#### ➤ 延迟时间分析

延迟时间是转炉烟气模型开发过程中的一个重

要物理量，主要由烟气成分延迟和烟气流量延迟导致。在转炉炉况稳定的情况下，氧气流量突然变化引起烟气含量发生相同变化的时间差即为延迟时间。如图 1 所示，吹炼前期氧气流量存在明显上升，但是由于此时转炉炉况不稳定，加料、喷溅和返干等干扰因素较多，容易造成偶然误差，故选取图中氧气流量出现明显下降的时期进行延迟时间分析。此时处于吹炼中后期，转炉炉况稳定，氧气流量下降影响正常的脱碳反应，分析延迟时间较为合理。氧流量出现下降一段时间后，转炉烟气的 CO 体积分数呈现相同的下降趋势，则氧气流量下降与烟气中 CO 体积分数下降的时间差即为延迟时间。

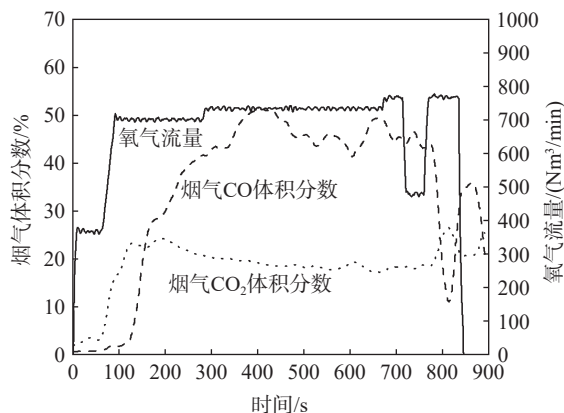


图 1 冷端烟气成分和氧气流量随时间变化曲线图

造成烟气成分延迟的原因有烟气自产生到取样器所需时间和烟气分析仪进行分析所需时间，该延迟可通过 TSC 曲线中烟气 CO 体积分数与氧枪吹氧流量发生变化的时间差确认，即对 TSC 曲线中氧气流量曲线和烟气 CO 体积分数曲线明显下降的时刻作差，如图 1 所示。当吹炼时间为 700 s 时，氧气流量曲线出现明显下降，在该时刻之后约 60 s，冷端烟气 CO 含量曲线也出现了明显的下降趋势，氧气流量与烟气 CO 含量出现明显下降时刻的差值为烟气成分延迟时间。表 1 为实际测量的部分炉次烟气成分延迟时间，冷端烟气成分的平均延迟时间约为 61 s。

同理，烟气流量延迟时间按照氧气流量与烟气

表 1 部分炉次的烟气成分延迟时间

| 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> | 6 <sup>#</sup> | 7 <sup>#</sup> | 8 <sup>#</sup> | 9 <sup>#</sup> | 10 <sup>#</sup> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 63             | 60             | 59             | 61             | 61             | 67             | 58             | 62             | 64             | 59              |

流量出现明显下降的时刻作差,如图2所示。在700 s时氧气流量出现明显的下降趋势,烟气流量随后也出现明显下降,通过数据分析可得烟气流量延迟时间约为7 s。大量炉次验证结果如表2所示,得出烟气流量的平均延迟时间约为7 s。

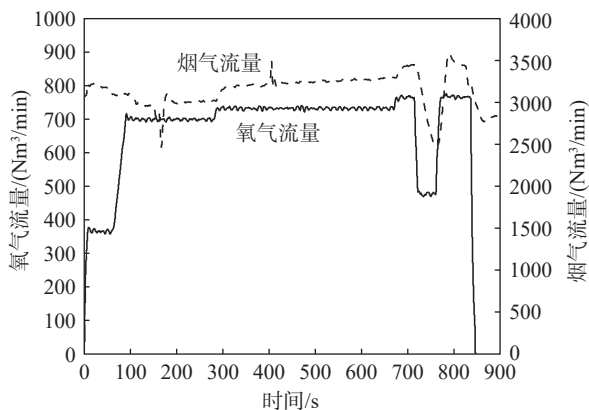


图2 氧气流量和烟气流量随时间变化曲线图

表2 部分炉次的烟气流量延迟时间

| 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> | 6 <sup>#</sup> | 7 <sup>#</sup> | 8 <sup>#</sup> | 9 <sup>#</sup> | 10 <sup>#</sup> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 7              | 7              | 6              | 7              | 7              | 8              | 6              | 7              | 7              | 7               |

在进行烟气数据分析时,为了每炉分析烟气数据的时间对应,将烟气流量、烟气成分、动态计算的碳含量按照延迟时间平移到同一时间点上。

### 热端数据分析过程

#### 延迟时间分析

钢轧1<sup>#</sup>转炉在2022-07-25新上线拉曼激光热端分析仪,和原来的质谱仪相比,拉曼激光分析仪可以同时分析8种气体并给出气体成分,量程范围大、分析结果更快、维护简单。分析热端数据延迟时间时,采用与分析冷端数据延迟时间相同的方法<sup>[7-10]</sup>,对热端分析仪给出的数据曲线进行分析。

双渣炉次数据如图3所示,在120 s时开始双渣倒渣,此时氧气流量下降,热端分析仪分析该时刻烟气延迟时间为45 s。在1120 s时氧流量再次出现下降,热端分析仪通过第二次氧流量下降分析出烟气延迟时间为46 s。两次氧流量降低时刻间存在氧流量升高的现象,此时对应双渣倒渣结束恢复吹炼,氧流量升高的时刻为450 s,热端分析仪分析该过程对应的烟气延迟时间为47 s。

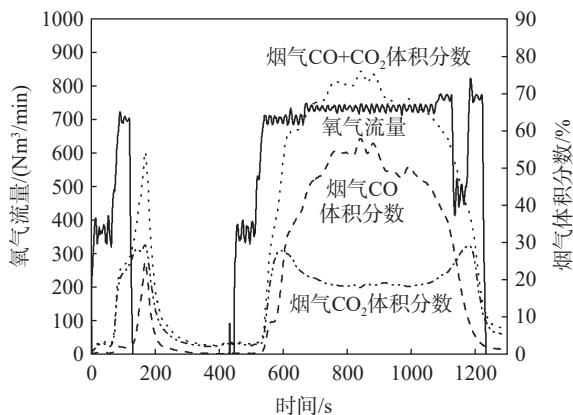


图3 双渣炉次烟气含量和氧流量随时间变化曲线

常规炉次数据如图4所示,在760 s时氧气流量出现明显下降,分析烟气延迟时间为48 s。延迟时间在常规炉次和双渣炉次测试值相差不大,说明热端分析仪测量烟气延迟时间不受炉次影响。

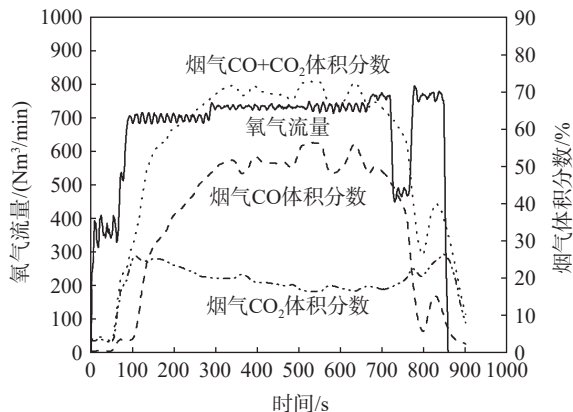


图4 常规单渣下的烟气含量和氧流量随时间变化曲线

综上所述,热端延迟时间约为48 s,从烟气分析和利用转炉烟气模型指导生产方面,该延迟时间过长,故采用标准样气标定法分析热端烟气分析延迟时间过长的原因。

#### 样气标定

为确认热端分析仪分析烟气延迟时间过长的原因,使用样气对热端烟气分析仪进气口和取样点分别进行标定,测量打开抽气泵到热端烟气分析仪表产生数据的时间,转炉烟气分析系统示意图如图5所示、测试结果如表3和表4所示。可以看出,从取样点开泵到热端烟气分析仪表产生气体数据明显变化所用时间为47 s,从热端烟气分析仪开泵到烟气分析仪表产生气体数据明显变化的时间仅

为 7 s, 两者时间差为 40 s。可以判断热端烟气分析仪实际分析烟气数据造成的延迟时间很短。取样点开泵到热端烟气分析仪产生数据耗时过长, 其原因为取样点到热端烟气分析仪表之间路径长、过滤气体所致。

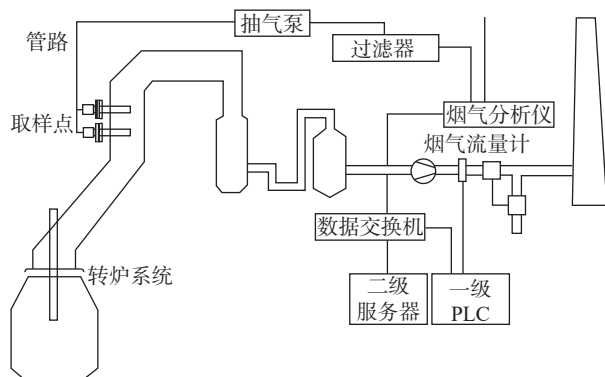


图 5 转炉烟气分析系统示意图

表 3 测试取样点到产生数据的延迟时间

| 开/关泵时刻    | 气体变化时刻    | 延迟/s |
|-----------|-----------|------|
| 15:19:00开 | 15:19:47升 | 47   |
| 15:22:00关 | 15:22:49降 | 49   |

表 4 测试热端烟气分析仪到产生数据的延迟时间

| 开/关泵时刻    | 气体变化时刻    | 延迟/s | 备注                        |
|-----------|-----------|------|---------------------------|
| 15:55:05开 | 15:55:12升 | 7    | 仪表CO体积分数在63%平稳, 样气成分62.1% |
| 15:56:15关 | 15:56:23降 | 8    | —                         |
| 16:00:00开 | 16:00:04升 | 4    | 仪表CO体积分数在54%平稳。           |

### ➤ 无过滤器后的延迟时间分析

技术人员对取样点到热端烟气分析仪之间的路径进行分析, 发现管路中存在过滤器导致延迟时间过长, 对过滤器调整后又重新测试了延迟时间, 结果如图 6 所示。在 720 s 处, 氧气流量出现明显下降, 经过一段时间后烟气 CO 含量曲线出现明显下降, 两处下降时间点对应差值即为延迟时间, 最终得出转炉热端烟气延迟时间在 19 s 左右。

### 烟气指导副枪工艺计算模型设计

#### ➤ 设计思路

由于热端分析仪的使用寿命和工作环境制约, 冷端烟气曲线虽然滞后, 但是能够保持和热端几乎相同的变化趋势, 且曲线圆滑、波动小。故使用冷端数据作为指导副枪 TSC 测量。

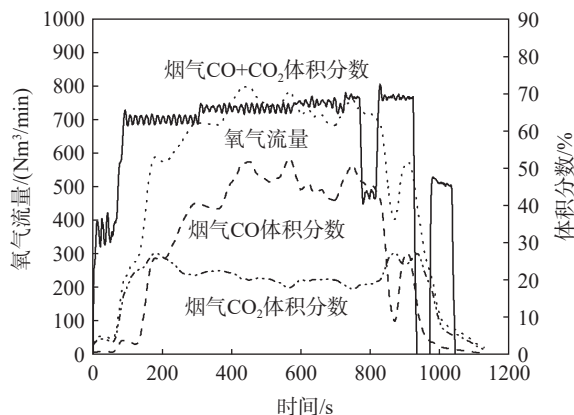


图 6 无过滤器热端分析仪测量氧气流量和烟气 CO 体积分数随时间变化曲线

由于冷端烟气的延迟时间超过 1 min, 故使用脱碳速率指导副枪测量时, 需要将烟气流量等数据作出平移, 和延迟后的烟气成分数据相对应。

使用冷端烟气含量数据进行分析, 收集通过 TSC 测量碳质量分数为 0.3%~0.5% 的炉次数据。吹炼后期转炉熔池碳含量下降, 碳含量作为碳氧反应的限制性环节, 此时烟气曲线出现明显的下降拐点。转炉冶炼过程中, 尤其是前中期, 烟气成分波动较大, 所以该拐点可以用吹氧量、烟气含量下降值或某时刻烟气含量值作为限制。如果变化不明显, 可以考虑增加时间轴系数, 对拐点放大。

冷端烟气成分必然受到吹氧、搅拌、加料和枪位变化的影响, 最优的烟气曲线为 CO 体积分数先上升, 再平稳, 后下降。由于前期受吹氧流量, 后期受碳含量的影响, 同时存在喷溅和返干等情况, 导致 CO 曲线出现波谷和波峰, 这也是转炉烟气模型使用率低和对炉况要求高、需要精料入炉的原因。

#### ➤ 计算方法

首先以吹氧量作为主要的限制环节, 给定系数  $\alpha$  和  $\beta$ 。其中  $\alpha$  为实际吹氧量占总吹氧量的最小百分比,  $\beta$  为最大百分比。最小百分比吹氧量为烟气指导下副枪开始计算的信号, 当实际吹氧量达到最小百分比吹氧量设定值时, 转炉烟气成分的变化规律作为控制副枪测量的依据。若烟气实时计算没有产生合理的结果, 最大百分比吹氧量发挥作用, 保证副枪测 TSC 可以成功自动触发。最大百分比吹氧量数值可以设置为当钢液碳质量分数为 0.3%~0.5% 且靠近 0.3% 时吹氧量对应的数值。

使用冷端烟气含量数据进行分析, 收集 TSC 测量碳质量分数在 0.3%~0.5% 的炉次数据, 如图 7~9 所示。图 7 为下枪时机与测量碳质量分数的关系, 可以得出实际下副枪时吹氧量占总氧量的百分比设置在 81%~88% 较为理想。图 8 的拐点氧量可以用吹氧量、烟气含量下降值或某时刻烟气含量值作为限制, 为人为限制吹氧量拐点时的实际吹氧量, 用来表征和探索合理的副枪下枪时机, 可以得出实际下副枪时含氧量百分比设置在 81%~88% 较为理想, 进一步验证图 7 的结论。

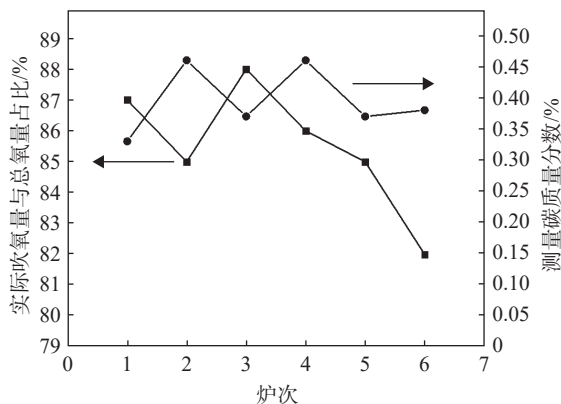


图 7 下枪时机与测量碳质量分数关系曲线图

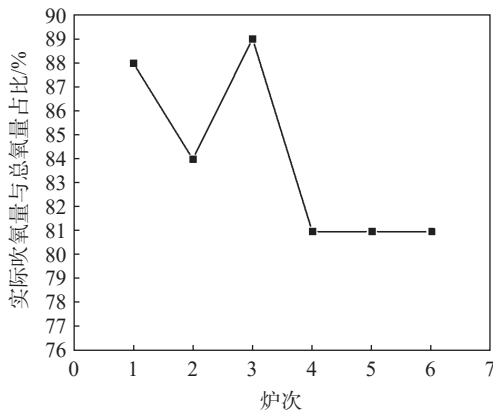


图 8 拐点氧量

图 9 所示为实际下副枪时吹氧量占总吹氧量百分比, 在实际生产中, 占总氧量最大百分比设置在 88% 附近, 最小百分比设置在 83% 附近。

在实际吹氧量达到计算总氧量的最小百分比时, 触发烟气模型计算。烟气模型计算方法如下:

$$\varphi(C) = t \cdot \varphi[\varphi(CO) + \varphi(CO_2)] \quad (1)$$

式中,  $t$  为时间,  $\varphi(CO)$  和  $\varphi(CO_2)$  分别为烟气中

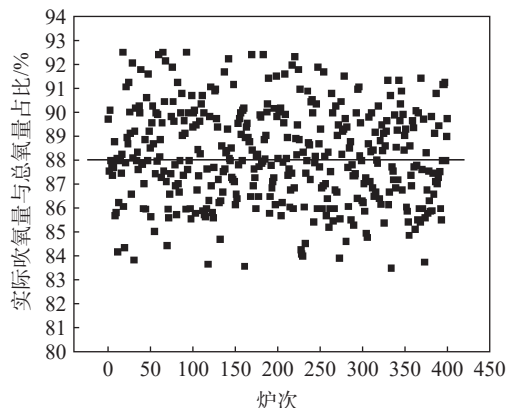


图 9 实际下副枪时吹氧量占总吹氧量百分比

CO 和  $CO_2$  的体积分数。

利用式 (1) 对曲线的拐点进行放大之后, 排除了大部分的干扰。随后利用连续曲线的单调性, 比较曲线最新四点的方式确定出拐点, 见式 (2)。如果数据满足式 (2) 条件, 则  $\varphi_4(C)$  为该段数据的最大值。

$$\varphi_1(C) \leq \varphi_2(C) \leq \varphi_3(C) \leq \varphi_4(C) \quad (2)$$

### > 钢液终点碳含量预测

数据拟合建模分别经历了烟气成分的权重拟合、控制变量的氧量修正和脱碳速率拟合, 对比分析发现利用脱碳速率分析的曲线规律较明显、终点预测较准确, 脱碳速率见式 (3):

$$\frac{dw(C)}{dt} = \frac{12}{22.4} Q \cdot \frac{[\varphi(CO) + \varphi(CO_2)]}{w} \quad (3)$$

式中:  $\frac{dw(C)}{dt}$  为脱碳速率;  $Q$  为烟气流量,  $Nm/s$ ;  $w$  为钢液质量,  $kg$ 。

由于添加钢液之后钢包车称重包含了钢液重量和空包重量, 所以要将钢包车称重与钢包加料总量和空包重量作差, 差值作为钢液质量 ( $w$ ) 参与计算。

根据传质理论, 转炉前期铁水和废钢中含有大量碳, 限制脱碳速率的条件是氧气流量; 随着碳氧反应的进行, 熔池中碳逐渐被氧化生成 CO 和  $CO_2$ , 限制脱碳速率的条件变成熔池中的碳, 所以本研究为了预测终点碳含量, 拟合终点碳含量和脱碳速率的关系式, 见式 (4)。

$$w[C] = f\left(\frac{dw(C)}{dt}\right) \quad (4)$$

根据式 (3)~(4), 对多炉单一炉次的脱碳速率和

动态计算碳含量进行拟合, 拟合结果如图 10 所示, 拟合优度  $R^2$  为 0.9968, 拟合程度非常高。

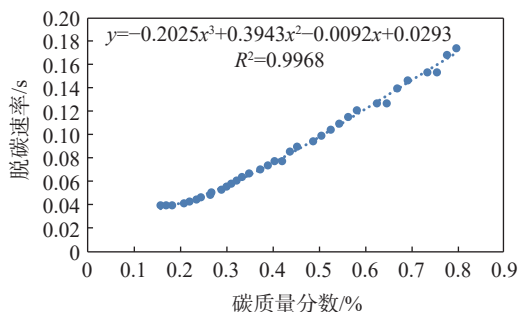


图 10 单一炉次数据拟合

将拟合程度较高的炉次数据作整体拟合, 剔除数据异常炉次, 选取数据点密度最高的位置, 即为拟合公式最优的位置, 效果如图 11 所示, 拟合优度  $R^2$  为 0.8359, 拟合程度较高。

### 数据库设计

根据转炉烟气和熔池碳含量的关系作拟合公式, 建立转炉烟气指导副枪测量模型。模型指导副枪的过程控制需要转炉二级数据库的数据支撑。本模型数据库采用 SQL SERVER2016 版本, 烟气分析仪对转炉烟气成分数据分析后, 传输到二级数据库中, 烟气模型在吹炼开始后从数据库中获取数据参与计算, 当模型计算出合理的测量 TSC 时机时, 发出副枪测量的信号并储存在数据库中。

在二级转炉数据库中增加参数类型和具体参

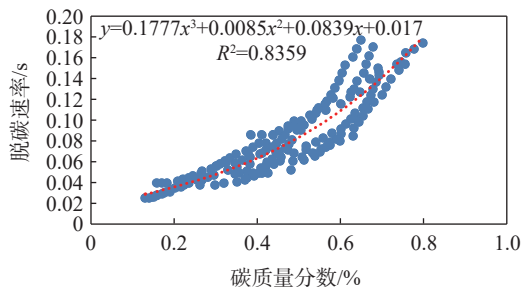


图 11 多个炉次数据拟合

数, 如表 5~6 所示, 可供工艺人员查看。

表 5 参数类型

| Variable_Name | Description | Owner | Visible_Flg |
|---------------|-------------|-------|-------------|
| OLINE_CAL_GAS | 烟气计算系数      | 0     | 0           |

表 5 包含信息为参数类型的变量名 (Variable\_Name) 为 OLINE\_CAL\_GAS、描述该参数类型的变量名的描述 (Description)、及所有者 (Owner) 和可见标志 (Visible\_Flg)。

表 6 包含信息为参数类型的变量名 (Variable\_Name) 为 Actual oxygen blowing ratio、该参数类型的参数序号 (Value\_Seq)、对该参数序号代表的参数描述 (Description)、整形数据 (Integer\_Value)、字符型数据 (Char\_Value)、浮点型数据 (Float\_Value)、最小值 (Min\_Value)、最大值 (Max\_Value)、使用状态 (In\_Use)、可见标志 (Visible\_Flg) 和时间 (Timestamp)。

表 6 具体参数

| Variable_Name               | Value_Seq | Description | Integer_Value | Char_Value | Float_Value | Min_Value | Max_Value | In_Use | Visible_Flg | Timestamp       |
|-----------------------------|-----------|-------------|---------------|------------|-------------|-----------|-----------|--------|-------------|-----------------|
| Actual oxygen blowing ratio | 500       | 实际吹氧量占比     | 500           | 0.65       | 0.65        | 0.83      | 0.88      | 1      | 0           | 2023/1/31 15:01 |

副枪指令下发如表 7, 在二级转炉数据库中建表 (TC\_SUBLANCE\_SEND)。当总氧量占比和烟气含量满足上述规律时, 转炉烟气模型将副枪测量指令写入数据库, 包含信息从上到下依次为: 炉次号 (HEAT\_NO)、下指令时间 (TIMESTAMP)、下指令次数 (COUNTER)、指令描述 (DESCRIPTION)、烟气 CO 含量 (GAS\_CO)、烟气 CO<sub>2</sub> 含量 (GAS\_CO<sub>2</sub>)、烟气 N<sub>2</sub> 含量 (GAS\_N2)、烟气 O<sub>2</sub> 含量 (GAS\_O<sub>2</sub>)、计算熔池碳含量 (C\_CAL)、

当前实际吹氧量 (O<sub>2</sub>\_VOL\_REAL)、数据类型 (DATA\_TYPE, 代表人工或模型输出)、状态 (STATUS, 界面是否读取)、指导类型 (GUIDE\_TYPE, 烟气或氧量)、varchar 表示字符型数据, datetime 表示时间型数据, numeric 表示浮点型数据, Checked/Unchecked 表示数据是否可为空值。

### 一、二级通讯

烟气模型指导副枪测量信号储存在数据库后, 需要实现该信号对一级副枪可编程控制器 (PLC)

表7 副枪指令下发表

| 参数                       | 数据类型         | 空值与否      |
|--------------------------|--------------|-----------|
| Heat_No                  | varchar(10)  | Unchecked |
| Timestamp                | datetime2(0) | Unchecked |
| Counter                  | numeric(6,0) | Unchecked |
| Description              | varchar(10)  | Checked   |
| Gas_Co                   | numeric(9,4) | Checked   |
| Gas_Co <sub>2</sub>      | numeric(9,4) | Checked   |
| Gas_N <sub>2</sub>       | numeric(9,4) | Checked   |
| Gas_O <sub>2</sub>       | numeric(9,4) | Checked   |
| C_Cal                    | numeric(7,4) | Checked   |
| O <sub>2</sub> _Vol_Real | numeric(5,0) | Checked   |
| Data_Type                | numeric(1,0) | Checked   |
| Status                   | numeric(1,0) | Checked   |
| Guide_Type               | numeric(1,0) | Checked   |

的指导。建立一级和二级通讯,实现一级数据的采集,传输到二级实现模型计算,模型通过数据计算后下发指令,实现对一级副枪 PLC 的控制,自动进行副枪测量。一、二级通讯实现如下:

通讯程序数据采集。新增烟气曲线采集程序,实现烟气分析仪数据采集,内容包括热端和冷端 CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> 气体含量实时数据采集,用于烟气模型数据分析及模型实现。

通讯程序数据下发。TSC 下枪指令下发,实现对一级副枪 PLC 的控制,自动副枪测量。

系统间接口数据采集。实现烟气数据接口采集;一级状态接口根据控制模式和枪位修正判断实际执行值,并实现报警等连锁程序自动执行。

系统间数据下发。通过 TSC 下枪指令接口进行测量指令下发。

## 结束语

本文介绍了首钢京唐公司钢轧作业部转炉烟气模型的详细设计过程,以副枪模型系统为基础平台,分别进行了转炉烟气数据分析、工艺计算模型、一级控制程序的设计工作,主要包括:

(1) 设计了烟气数据分析模块,实现了烟气延迟时间分析,供氧强度变化等因素对脱碳速率影响分析和误差分析等;

(2) 增加了烟气指导副枪工艺计算模型,实现了实际吹氧量和脱碳速率联合判断和控制指令生成;

(3) 添加了一、二级通讯程序,实现了烟气成分数据的采集、存储,实现二级计算数据(副枪测量 TSC 指令)下发至一级系统,二级系统与一级系统接口,实现数据传递,完成一级数据采集、二级指令下发;

(4) 优化了一级自动程序,实现了副枪测量 TSC 的自动执行、实现报警等连锁程序自动执行。

## 参考文献

- [1] 于洪石,杨世亮,阳坤林,等.转炉吹炼水冷活动烟罩对烟气逸散控制机理的数值模拟.中国有色金属学报,2024,34(8): 2787
- [2] 李学禹,刘钊,程树森.基于烟气分析的转炉自动炼钢生产实践//第十三届中国钢铁年会论文集——3.炼钢与连铸.重庆,2022
- [3] 林文辉.转炉冶炼过程工艺行为解析与脱碳控制研究[学位论文].北京:北京科技大学,2022
- [4] 刘富贵,肖毅鹏.转炉烟气控制技术的研究与应用.南方金属,2022(1): 13
- [5] 田海,郭林威,闫兆阳,等.基于转炉干法除尘系统的烟气温度控制策略.自动化与仪表,2020,35(7): 25
- [6] 张斌.转炉干法除尘控制系统设计与实现[学位论文].沈阳:东北大学,2024
- [7] 徐钢,黎敏,徐金梧,等.基于函数型数字孪生模型的转炉炼钢终点碳控制技术.工程科学学报,2019,41(4): 521
- [8] 高志滨.120 t 转炉全过程动态智能冶炼技术实践.山东冶金,2020,42(3): 57
- [9] 韩一杰.转炉烟气净化系统微差压控制的改造及应用.黑龙江科技信息,2016(20): 97
- [10] 刘莫岩.转炉烟气分析动态控制及技术应用.科技视界,2015(20): 11

作者简介:胡显堂(1981—),男,安徽省怀宁人,高级工程师。2001年毕业于重庆大学,硕士研究生,从事钢铁冶金工作;E-mail: huxiantangwuxi@sina.com。

杨星(1994—),男,河北省承德人,初级工程师。2021年毕业于东北大学,硕士研究生,从事转炉二级模型计算和自动化工作;E-mail: 1034635272@qq.com。

通信作者:宋征(1982—),男,河北省承德市人,高级工程师。2011年毕业于燕山大学,硕士研究生,从事连铸连轧机模型控制工作;E-mail: 279785677@qq.com。