

转炉冶炼过程多模态检测技术集成研究与应用

张学民*, 李长新, 周平, 赵立峰

山东钢铁集团有限公司研究院, 济南 250101

Integrated Research and Application of Multimodal Detection Technology in Converter Smelting Process

Zhang Xuemin, Li Changxin, Zhou Ping, Zhao Lifeng

(Shandong Iron and Steel Group Research Institute Shandong Jinan 250101)

1. 引言

钢铁冶炼是物理与化学过程十分复杂、多相共存的动态系统, 存在过程变量类型混杂、维数高、规模大, 具有强耦合、非线性和大滞后等特点。特别是转炉炼钢“黑箱”特征明显, 存在炉内冶炼过程参数“感知”困难、“喷溅、返干”异常炉况预判难度大等问题, 目前检测炉内反应状态的虽有音频化渣、烟气分析、炉口火焰识别等技术, 但都是独立运行, 没有对各自检测结果进行相互融合验证, 检测结果存在一定偏差; 另外, 过程检测数据反馈应用到转炉冶炼控制也缺少相应的研究实践。针对上述问题, 本文对转炉冶炼过程多模态检测技术进行集成和融合, 开发了多模态过程检测数据融合算法和“返干、喷溅”等异常炉况预测及动态反馈控制模型, 实现了冶炼过程的平稳控制, 全程无干预比例大幅提升。

2. 转炉冶炼过程多模态检测技术

(1)转炉音频化渣监测技术。音频化渣系统是通过采集转炉吹炼时发出的噪音,经频谱分析和计算机模型计算来检测转炉内部化渣情况, 形成微机画面给操作工以参考和指导。该技术是转炉冶炼过程检测炉渣化渣情况最重要的手段之一, 系统包括取样装置、探头、前置处理器、声处理仪、数据采集装置、数据处理计算机及配水配气系统。

(2)转炉烟气分析炼钢控制技术。通过质谱仪等分析烟气分析设备对转炉烟气成分进行分析, 将分析结果、入炉料相关参数以及目标钢种相应的温度等数据信息输入转炉控制模型, 从而获取的转炉冶炼参数, 系统主要包括烟气分析设备、数据处理设备等。

(3)转炉炉口火焰分析技术。利用机器视觉技术和装备对炉口焰颜色、形状、亮度进行分析, 预测吹炼时内部钢水温度和炉渣反应状态, 对转炉冶炼过程进行反馈指导, 该系统包括图像采集系统、机械密封机构、数据处理模块、吹扫冷却系统、工控机等组成。

(4)转炉副枪控制技术。副枪是转炉计算机二级控制系统最主要的设备, 也是目前应用最广泛的冶炼过程检测技术, 副枪系统可以自动选择并安装探头, 进入转炉到指定高度, 测量钢水温度、钢水成分、吹炼后的熔池液位等数据, 运用与副枪技术相配套的计算机系统控制二级模型进行过程控制。副枪装置由下列几个主要部件组成: 旋转框架及其驱动装置, 副枪枪体及升降小车, 小车升降驱动装置, 探头供给及插装装置, 副枪枪体矫直装置, 探头回收溜槽等。

3. 冶炼过程异常炉况判定

在吹炼的过程中, 由于氧气流股对熔池的冲击和脱碳反应产生的大量 CO 气体逸出, 所以, 炉渣和金属液飞溅情况是不可避免的。在正常情况下, 金属液飞溅的高度一般不会超出炉口, 不会形成喷溅, 但是, 在脱碳反应加剧的情况下, 如果在短时间里转炉内产生大量的 CO 气体, 那么向炉口排出的气体就会成倍地增加, 也就是会发生爆发性的碳氧反应, 将炉渣和金属液带出炉外, 从而发生喷溅。当渣中的 TFe 含量过低时, 熔渣化不开, 就会析出高熔点的化合物, 使熔渣变得黏稠、流动性变差, 这就是通常所说的炉渣

“返干”。“返干”和“喷溅”等异常炉况都会对转炉操作过程产生影响，造成钢铁料消耗高、氧枪粘渣、设备损坏等事故。

转炉音频化渣通过获取转炉吹炼噪音特征，在线了解炉内泡沫渣的厚度及其变化趋势，从而实现对炉渣情况的实时监测。在生产实践中总结各吹炼阶段音频特征并结合实时炉况进行综合判断，如：当吹炼 6-8 分钟或 10-12 分钟时，正常音频强度范围为 30-40%；音频强度大于或等于 40%时，转炉炉渣状况为返干预警；音频强度大于 40%，且持续 15 秒时，转炉炉渣状况为轻微返干；音频强度大于 50%时，转炉炉渣状况为返干；音频强度大于 50%时，且持续 15 秒，转炉炉渣状况为中度返干；音频强度大于 60%时，且持续 15 秒，转炉炉渣状况为重度返干；音频强度小于或等于 30%时，转炉炉渣状况为喷溅预警；音频强度小于 30%，且持续 15 秒时，转炉炉渣状况为轻微喷溅；音频强度小于 25%时，转炉炉渣状况为喷溅；音频强度小于 20%，且持续 15 秒时，转炉炉渣状况为大喷。

对转炉冶炼过程中烟气成分 CO 和 CO₂ 浓度的曲线变化情况与转炉冶炼操作相关性开展研究，在转炉冶炼的不同阶段，受炉内反应的不同情况，烟气信息中 CO 和 CO₂ 浓度曲线变化呈现出不同的状态。根据烟气中 CO 和 CO₂ 浓度曲线变化情况，能够准确的判断炉内反应，可以有效地预防过程返干和喷溅，对于改善操作具有重要的指导意义。

表 1 冶炼过程 CO 曲线与炉内反应关联情况

序号	CO、CO ₂ 曲线情况	炉内反应
1	CO 曲线 42-58%	反应速率正常
2	CO 曲线 ≥50%	炉渣趋于返干状态
3	CO 曲线 ≤40%	炉渣氧化性强，趋于喷溅
4	CO ₂ 曲线 30s 内上升 8%以上	炉渣趋于返干状态
5	CO ₂ 曲线 30s 内下降 5%以上	炉渣氧化性强，趋于喷溅

在转炉冶炼过程中，依据操作人员经验 CO 含量在 42-58%范围内熔池反应基本正常；当 CO 含量 ≥50%、CO₂ 曲线 30s 内上升 8%以上两个条件出现时就出现炉渣趋于返干状态；当 CO 曲线 ≤40%、CO₂ 曲线 30s 内下降 5%以上则炉渣氧化性强，趋于喷溅，并将此输入专家控制模型中。

音频监测技术和烟气分析技术两项技术基于不同原理皆可实现对炉内炉渣返干、喷溅的监测，以此为结合点，将两项技术结合使用，其运用思路如图 1 所示。

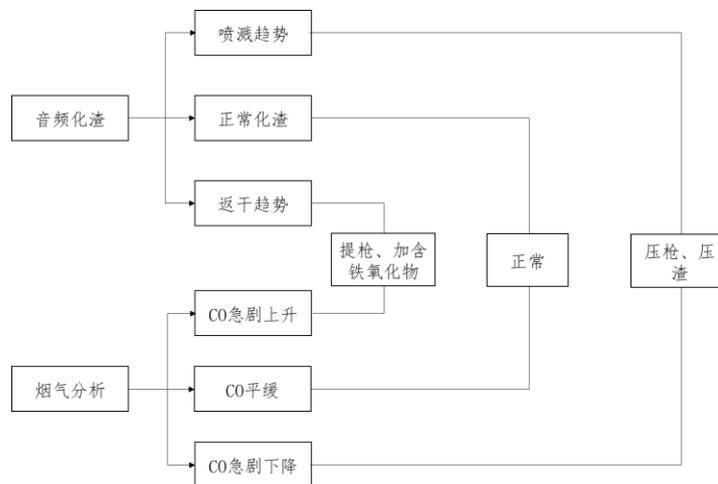


图 1 基于音频化渣+烟气分析的异常炉况控制工艺流程

4. 冶炼过程碳温预测技术综合应用

转炉烟气分析技术和炉口火焰分析技术都能通过检测到的相关参数，利用二级控制模型进行冶炼过程碳温预报和控制，但副枪在进行 TSC 测量是直接对钢水实时温度成分进行检测，结果更加准确。利用副枪检测结果效准烟气分析和炉口火焰检测两个系统的碳温预报曲线，则更加利于整个冶炼过程的碳温控制。烟气分析系统基于烟气成分建立碳温计算模型，实时计算碳温变化曲线并给出预测得到终点碳温，形成参考方案一。炉口火焰检测系统则在在自动操作系统启动后继续才炉口火焰信息，基于获得的火焰信息建立碳、温预报模型，实时计算碳温变化曲线并给出预测得到终点碳、温，形成参考方案二。进入冶炼后期，

氧步达到 85%左右时，下副枪检测，获得准确的钢水碳含量和钢水温度，将此点信息与两个参考方案进行对比分析，不符合误差预期的方案将被弃用，另一种方案将成分碳温实时预报以及停吹时机的主要参考，通过计算模型计算剩余吹氧量和冷却剂量，进入自动操作模式，以保证吹炼终点的全部命中。工艺流程见图 2。

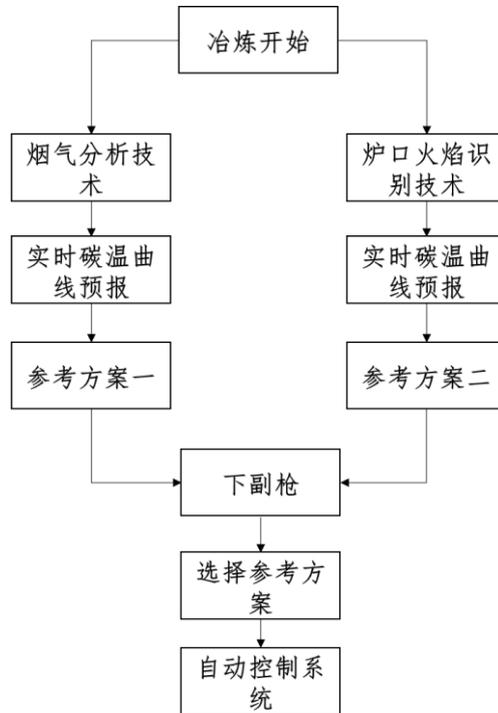


图 2 基于副枪+烟气分析+炉口火焰监测的终点碳温控制工艺流程

5. 基于多模态检测技术的转炉操作过程控制

5.1. 利用烟气分析过程控制模型

利用烟气分析系统测量炉气中的 O_2 、 CO 、 CO_2 含量值，并将测得的 O_2 、 CO 、 CO_2 含量值反馈至二级控制系统；二级控制系统接收炉气中的 O_2 、 CO 、 CO_2 含量信息，并根据 O_2 、 CO 、 CO_2 含量值控制投料过程。具体控制如下：当炉气中的 O_2 含量值为 12%~18%、 CO 含量值为 6%~10%时，二级控制系统控制第一次投料，第一次投料包括石灰、白云石和矿石，其中，石灰为所述石灰总量的 60%~70%、白云石占为所述白云石总量的 100%、矿石为所述矿石总量的 30%~40%；当炉气中 O_2 含量为 0.5%~1.0%、 CO 含量为 40%~50%、 CO_2 含量为 20%~30%时，二级控制系统控制第二次投料，将剩余石灰分为 2~3 批次加入转炉；当炉气中 O_2 含量小于 0.5%、 CO 含量为 45%~55%、 CO_2 含量为 20%~30%时二级控制系统控制第三次投料：将剩余矿石分为 5~7 批次加入转炉。

5.2. “返干、喷溅”异常炉况工艺处置模型

利用音频化渣和烟气分析检测判断的异常炉口，制定相应的异常炉况工艺处置模型，并输入转炉二级控制系统。

转炉前期喷溅：前期铁水中的硅、锰氧化完毕之后，进入碳反应期，此时转炉容易发生喷溅，因为碳开始大量反应，会产生一定的 CO 气体，在上升过程中带出部分熔渣，因此应该通过加入部分石灰，破坏泡沫渣的形成，使 CO 气体排出顺畅。

转炉中期喷溅：当 CO 含量持续升高时候，说明此时的碳氧反应激烈，炉内温度高，氧化铁含量低，要保证中期温度继续均匀上升，碳氧保持合理的反应速度，控制了金属喷溅。

转炉后期喷溅：转炉吹炼中期控制后，碳氧反应速度减慢，氧化铁开始出现聚集，通过烟气分析，可以看出此时 CO 含量是持续降低的，说明氧化铁开始聚集，应当适当降低枪位，加快碳氧反应速度，避免氧化铁出现聚集现象，停止加入辅料，加大氧气流股的冲击搅拌，具体控制工艺模型见表 2。

表 2 转炉喷溅控制工艺模型

喷溅控制	小喷	中喷	大喷
枪位控制	枪位不变，氧压由 0.85MPa 降至 0.80MPa，待异常炉况结束后恢复正常	枪位提高 0.1m，氧压由 0.85MPa 降至 0.80MPa，待异常炉况结束后恢复正常	枪位提高 0.2m，氧压由 0.85MPa 降至 0.80MPa，待异常炉况结束后恢复正常
辅料加入	加入 300-600Kg 石灰或白云石	加入 600-1000Kg 石灰或白云石	加入 1000-1500Kg 石灰或白云石
底吹控制	底吹不变	底吹不变	底吹强搅（流量设定值最大）

返干控制措施：提高枪位的同时还可以适当调低吹炼氧压，延长吹炼时间，降低脱碳速度，同样可以促使（FeO）量增加，达到消除返干的目的，具体返干控制工艺模型见表 3。

表 3 转炉返干控制工艺模型

返干控制	轻微返干	中度返干	严重返干
枪位控制	枪位不变	枪位提高 0.05m，待异常炉况结束后恢复正常	枪位提高 0.1m，待异常炉况结束后恢复正常
辅料加入	加入 500kg 矿石	加入 500-1000kg 矿石	加入 1000kg 矿石
底吹控制	底吹不变	底吹不变	底吹不变

5.3. 高效底吹及音频化渣综合利用技术

利用底吹系统的搅拌化渣作用，并用音频化渣曲线控制底吹强度，达到平稳冶炼的目的。根据音频化渣系统设定最佳化渣曲线，将转炉底吹流量设定为流量由低到高的三级流量模式，第一级流量模式、第二级流量模式、第三级流量模式的流量分别为单枪 60L/min、单枪 100L/min、单枪 150L/min。吹炼开始，底吹模式设定为第三级流量模式，根据音频曲线偏离情况，转化相应的底吹模式；吹炼至 8 分钟以后，将底吹模式设定为第一级流量模式，根据音频曲线偏离情况，转化相应的底吹模式；吹炼进入拉碳期，底吹模式设定第二级流量模式，根据音频曲线偏离情况，转化相应的底吹模式。将音频化渣系统处理后的噪音信号传输给转炉操作一级系统，由转炉操作一级系统通过调节阀开度控制底吹流量改变，实现噪音信号与底吹流量的联动控制。该技术在音频曲线达到返干线或者喷溅线之前即可进行及时调整，可以改善顶底复吹转炉底吹化渣效果，较好解决了转炉对喷溅与返干调整不及时的问题，极大的稳定转炉操作。



图 3 音频化渣控制底吹流量工艺流程

6. 结论

融合副枪、烟气分析、音频化渣等多模态过程检测数据，进行耦合关联，相互验证，信息互补，实现了转炉冶炼过程的实时检测，过程异常识别率得到有效提高，喷溅识别率达到 98%，返干识别率达到 96%。异常炉况控制模型实现冶炼过程“返干、喷溅”等异常炉况的机器判断和反馈控制，解决了自动炼钢过程中出现问题人为手动干预的问题，实现了冶炼过程的平稳控制，智能炼钢全程无干预比例达到 97%，转炉喷溅渣量由实施前 18.36kg/t 降为 8.92kg/t，降幅达到 51.4%。

参考文献

- [1] 高放,包燕平,王敏,刘宇,黄永生,孙光涛. 基于 FA-ELM 的转炉终点磷含量预测模型[J].钢铁,2020, 12: 24-30.
- [2] 高放,包燕平,王敏,刘宇,黄永生,孙光涛. Continuous Prediction Model of Carbon Content in 120t Converter Blowing Process, *metals*, *Metals* 2022, 12, 151.