

# 高炉热风炉4炉2烧2送智能换炉技术的开发与应用

焦志春

北京金自天正智能控制有限公司，北京，100070；

**摘要：**介绍了高炉热风炉4炉2烧2送智能换炉技术的开发与应用情况。该技术基于多变量耦合的动态模型预测控制，综合考虑热风炉的燃烧、蓄热、送风等过程，实现了热风炉的智能化换炉操作。实际应用结果表明，该技术能够有效提高热风炉的风温稳定性和能源利用效率，降低高炉炼铁的生产成本。

**关键词：**高炉热风炉；智能换炉；动态模型预测控制；风温稳定性；能源利用效率

**DOI：**10.69979/3041-0673.25.11.026

## 引言

热风炉是高炉炼铁的重要配套设备，其作用是为高炉提供高温热风，以提高铁矿石的还原效率和降低焦比。在现代高炉炼铁生产中，热风炉的风温水平直接影响着高炉的生产效率和能源消耗。因此，提高热风炉的风温稳定性和能源利用效率一直是炼铁行业关注的重点问题。

目前，国内大多数高炉热风炉采用的是传统的换炉方式，即按照固定的时间间隔或温度条件进行换炉操作。这种换炉方式存在着诸多弊端，如换炉过程中热风炉的风温波动较大，容易对高炉的炉况产生不利影响；换炉时机不合理，导致热风炉的能源利用效率低下等。为了解决这些问题，开发一种智能化的热风炉换炉技术具有重要的现实意义。

本文介绍了一种基于多变量耦合的动态模型预测控制的高炉热风炉4炉2烧2送智能换炉技术，该技术能够根据热风炉的实时运行状态和高炉的生产需求，实现热风炉的智能化换炉操作，有效提高了热风炉的风温稳定性和能源利用效率。

## 1 智能换炉技术的开发背景

### 1.1 热风炉的工作原理

热风炉是高炉冶炼过程中不可或缺的关键设备，其主要功能是为高炉提供温度稳定、流量充足的热风。热风炉的工作原理可以概括为“燃烧-蓄热-送风”三个阶段的循环往复。

在燃烧阶段，热风炉的燃烧室内，煤气和空气按照一定比例混合并点火燃烧。燃烧产生的高温烟气经过蓄热室内错落有致的格子砖，将大部分热量传递给格子砖，使其温度迅速升高。当格子砖被加热到足够高的温度后，燃烧过程就会停止，热风炉进入蓄热阶段。

在蓄热阶段，大量冷风被送入蓄热室，与高温格子砖充分接触、换热。冷风从格子砖中吸收热量，温度迅速升高，变为高温热风。热风在蓄热室内积聚，直至达

到送风要求。

当热风炉的拱顶温度或废气温度达到预设的切换值时，送风阶段开始。另一座热风炉此时切换为燃烧状态，而本座热风炉则切换为送风状态。高温热风在高压的作用下，从热风炉直接送入高炉，为高炉冶炼提供所需的热量和氧气。送风过程持续进行，直到热风炉内的热量被耗尽，需要再次切换为燃烧状态。

热风炉的三个工作阶段周而复始地进行，使得热风炉可以源源不断地为高炉提供高温热风。通过合理控制各个阶段的切换时机和持续时间，既可以保证热风的温度和流量满足高炉冶炼的需求，又可以实现热风炉自身的安全、高效运行。

### 1.2 传统换炉方式的弊端

传统的热风炉换炉方式主要有定时换炉和定温换炉两种。定时换炉是按照固定的时间间隔进行换炉操作，这种方式简单易行，但无法根据热风炉的实际运行状态和高炉的生产需求进行灵活调整，容易导致换炉时机不合理，造成热风炉的能源浪费和高炉的炉况波动。定温换炉是根据热风炉的拱顶温度或废气温度达到设定值时进行换炉操作，这种方式在一定程度上能够保证热风炉的风温稳定，但由于热风炉的蓄热能力和热交换效率会随着运行时间的增加而逐渐下降，因此需要不断调整设定温度，操作较为复杂，且仍然难以避免换炉过程中的风温波动。

此外，传统的换炉方式在换炉过程中需要人工手动操作多个阀门，操作繁琐，容易出现误操作，影响换炉的安全性和可靠性。同时，由于人工操作的响应速度较慢，无法及时根据高炉的生产变化进行换炉调整，也会对高炉的稳定生产造成一定的影响。

### 1.3 智能换炉技术的需求分析

随着钢铁行业的不断发展，对高炉炼铁的生产效率、能源利用效率和产品质量提出了更高的要求。为了满足这些要求，需要开发一种智能化的热风炉换炉技术，能

够实现以下功能：

①实时监测热风炉的运行状态，包括拱顶温度、废气温度、煤气流量、空气流量、风压等参数，并根据这些参数准确预测热风炉的蓄热能力和热交换效率。

②综合考虑高炉的生产需求、热风炉的运行状态以及煤气、空气等能源介质的供应情况，制定合理的换炉策略，实现热风炉的智能化换炉操作。

③在换炉过程中，能够自动控制各个阀门的开关动作，实现快速、平稳的换炉切换，减少风温波动，保证高炉的稳定生产。

④具备良好的人机交互界面，能够实时显示热风炉的运行参数和换炉状态，方便操作人员进行监控和管理。同时，能够对历史数据进行存储和分析，为优化热风炉的运行提供依据。

## 2 智能换炉技术的关键技术

### 2.1 多变量耦合的动态模型预测控制

智能换炉技术采用了多变量耦合的动态模型预测控制方法，该方法综合考虑了热风炉燃烧、蓄热、送风等过程中的多个变量之间的相互关系，建立了热风炉的动态数学模型。通过对模型的求解和预测，能够实时掌握热风炉的运行状态和未来趋势，为制定合理的换炉策略提供依据。

在建立动态数学模型时，考虑了以下因素：

①煤气和空气的燃烧反应动力学，包括燃烧速率、燃烧热等参数。

②蓄热室格子砖的传热传质过程，包括热量传递、质量传递、热阻等参数。

③热风炉内气体的流动特性，包括流速、压力分布等参数。

④高炉的生产需求，如热风温度、热风流量等参数。

通过对这些因素的综合考虑，建立了一个能够准确描述热风炉运行过程的动态数学模型。该模型具有较高的精度和可靠性，能够为智能换炉技术的实现提供有力的支持。

### 2.2 数据采集与处理系统

数据采集与处理系统是实现智能换炉技术的关键组成部分，该系统通过在热风炉各个关键位置部署传感器，实时采集反映炉况的各项参数。这些参数包括但不限于拱顶温度、废气温度、煤气流量、空气流量、风压等。

为保证采集数据的准确性和可靠性，系统采用了先进的数据处理算法和技术。首先，原始数据经过实时滤波和去噪处理，剔除由于传感器故障或环境干扰导致的异常值。其次，针对不同类型的传感器，系统执行相应的校正策略，消除传感器固有误差带来的影响。最后，

处理后的数据被打上时间戳并存入数据库，以备后续分析之需。

除实时数据处理外，数据采集与处理系统还具备历史数据管理功能。它定期对数据库中的历史数据进行挖掘和分析，通过数据可视化技术直观展现热风炉运行过程中的规律和趋势，这为工艺工程师优化热风炉运行参数、预测设备寿命等提供了重要依据。

此外，系统预置了一系列实用的数据分析模型，如热平衡模型、燃烧优化模型等。这些模型综合考虑各项工艺参数，量化评估热风炉的运行效率和节能潜力。通过比对模型输出与实际采集数据，工艺工程师可快速诊断热风炉运行状态，识别存在的问题并制定针对性的优化措施。

### 2.3 智能换炉策略的制定

智能换炉策略是智能换炉技术的核心内容，其制定需要综合考虑高炉的生产需求、热风炉的运行状态以及煤气、空气等能源介质的供应情况等多个因素。在制定智能换炉策略时，采用了以下方法：

①基于动态模型预测控制的换炉时机预测：通过对热风炉动态数学模型的求解和预测，实时掌握热风炉的蓄热能力和热交换效率，当预测到热风炉的蓄热能力即将下降到无法满足高炉生产需求时，系统会及时发出换炉信号，提醒操作人员进行换炉操作。

②优化换炉顺序：由于热风炉的运行状态和高炉生产需求各不相同，因此换炉顺序的优化显得尤为重要。通过综合分析各热风炉的实时运行数据和高炉生产计划，智能换炉系统可以计算出最优的换炉顺序，使得换炉过程对高炉生产的影响降到最低。同时，优化后的换炉顺序还能最大限度地减小热风炉风温的波动，保证高炉生产的稳定性。

③考虑能源介质的供应情况：热风炉的正常运行离不开煤气和空气等能源介质的稳定供应。因此，智能换炉系统需要实时监测能源介质的供应状态，并根据监测结果动态调整换炉策略。如果预测到煤气或空气供应可能出现短缺，系统会提前调整换炉计划，避免能源短缺影响热风炉的正常运行。

通过采用上述方法，制定了一套科学合理的智能换炉策略，能够实现热风炉的智能化换炉操作，有效提高热风炉的风温稳定性和能源利用效率。

### 2.4 自动控制系统的实现

为了实现智能换炉技术的自动化操作，开发了一套先进的自动控制系统。该系统采用了分布式控制系统(DCS)架构，通过对各个阀门的自动控制，实现了热风炉的燃烧、蓄热、送风以及换炉等过程的自动化操作。

自动控制系统具有以下特点：

①高可靠性：系统采用了冗余设计和容错技术，确保在出现故障时能够自动切换，保证系统的正常运行。

②高精度控制：系统采用了先进的控制算法和技术，能够实现对各个阀门的精确控制，保证热风炉的运行参数稳定在设定范围内。

③良好的人机交互界面：系统配备了友好的人机交互界面，能够实时显示热风炉的运行参数和换炉状态，方便操作人员进行监控和管理。同时，操作人员也可以通过人机交互界面手动干预系统的运行，提高系统的灵活性和适应性。

### 3 智能换炉技术的应用案例

#### 3.1 应用背景

某钢铁企业拥有一座 $4000\text{m}^3$ 高炉，配套4座顶燃式热风炉，采用4炉2烧2送的送风制度。在采用智能换炉技术之前，该高炉热风炉采用的是传统的定时换炉方式，换炉过程中热风炉的风温波动较大，容易对高炉的炉况产生不利影响。同时，由于换炉时机不合理，导致热风炉的能源利用效率低下，生产成本较高。为了提高热风炉的风温稳定性和能源利用效率，降低生产成本，该企业决定采用智能换炉技术对热风炉进行改造。

#### 3.2 改造方案

该企业采用了本文介绍的智能换炉技术对热风炉进行改造，具体改造方案如下：

①安装数据采集与处理系统：在热风炉各个部位安装传感器，实时采集拱顶温度、废气温度、煤气流量、空气流量、风压等参数，并将这些数据传输到控制系统中进行处理和分析。

②开发智能换炉软件：基于多变量耦合的动态模型预测控制方法，开发智能换炉软件，实现对热风炉运行状态的实时监测和分析，制定合理的换炉策略。

③改造自动控制系统：对热风炉的自动控制系统进行改造，采用分布式控制系统（DCS）架构，实现对各个阀门的自动控制，确保智能换炉策略的顺利实施。

#### 3.3 应用效果

经过一段时间的运行，智能换炉技术在该企业高炉热风炉上取得了显著的应用效果，主要体现在以下几个方面：

①风温稳定性显著提高：采用智能换炉技术后，热风炉的风温波动明显减小，风温稳定性得到了显著提高。在正常生产情况下，热风炉的风温波动范围由原来的 $\pm 50^\circ\text{C}$ 降低到了 $\pm 20^\circ\text{C}$ 以内，有效保证了高炉的稳定生产。

②能源利用效率大幅提升：智能换炉技术能够根据热风炉的实时运行状态和高炉的生产需求，合理调整换炉时机和燃烧参数，使热风炉的能源利用效率得到了大幅提升。与传统换炉方式相比，采用智能换炉技术后，热风炉的煤气消耗降低了约5%，空气消耗降低了约3%，能源利用效率提高了约8%。

③生产成本降低：由于风温稳定性提高和能源利用效率提升，高炉的生产效率得到了提高，焦比降低，生产成本相应降低。据统计，采用智能换炉技术后，该高炉的焦比降低了约 $10\text{kg/t}$ ，生铁产量提高了约2%，每年可为企业节约生产成本约5000万元。

④操作管理更加便捷：智能换炉技术实现了热风炉的自动化操作和智能化管理，操作人员只需通过人机交互界面进行监控和管理，操作简单便捷，大大减轻了操作人员的劳动强度，提高了工作效率。

### 4 结论

本文介绍的高炉热风炉4炉2烧2送智能换炉技术，通过采用多变量耦合的动态模型预测控制、数据采集与处理系统、智能换炉策略的制定以及自动控制系统的实现等关键技术，实现了热风炉的智能化换炉操作。实际应用案例表明，该技术能够有效提高热风炉的风温稳定性和能源利用效率，降低高炉炼铁的生产成本，具有良好的经济效益和社会效益。随着钢铁行业智能化发展的不断推进，智能换炉技术将在高炉热风炉领域得到更加广泛的应用和推广。

### 参考文献

- [1]于现军,王孝伟,闫铁佐.智能燃烧优化技术在高炉热风炉上的应用[J].上海电机学院学报,2018,21(4):5.
- [2]聂荣恩.热风炉零扰动换炉技术应用[J].山东冶金,2021,43(3):2.
- [3]张福明,李富朝,银光宇,等.高效低碳高风温热风炉关键技术研究与创新[Z].首钢集团有限公司.2024.
- [4]王亮,王长春,王博,等.热风炉外均压智控技术研发与应用[Z].四川川锅环保工程有限公司.2024.
- [5]廖海欧,方伟,唐政.智能线性控制高炉热风换炉应力波动研究[J].冶金动力,2023(3):78-82.
- [6]徐英杰,余雪峰,李红兵,曹卫强,张计斌,薛庆国.不同料柱模式下高炉内煤气流分布的模拟[J].中国冶金,2023,33(3):54-61.被引量:2
- [7]赵腾,杨位钦,陈峰,颜永健,颜磊.山钢集团全力以赴争上游走在前[J].山东国资,2023(1):42-44.