

# 流化床锅炉运行优化与能耗降低策略分析

王家林

华电国际电力股份有限公司天津开发区分公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i10.7339

**[摘要]** 在现代能源利用领域,流化床锅炉因其高效、环保的特性而备受青睐。然而,为了实现更可持续的发展,运行优化和能耗降低成为了该技术亟待解决的问题。本文旨在深入探讨流化床锅炉的运行优化策略,以及如何通过科学管理与技术革新,有效降低能耗,提升整体运行效率。我们将从锅炉的设计、运行控制、燃料选择等多个维度展开分析,为业界提供具有实践指导意义的建议。

**[关键词]** 流化床锅炉; 运行优化; 能耗降低策略

## Analysis of operation optimization and energy consumption reduction strategy of fluidized bed boiler

Wang Jialin

Huadian International Electric Power Co., LTD., TEDA Branch

**[Abstract]** In the field of modern energy utilization, the fluidized bed boiler is favored because of its high efficiency and environmental protection characteristics. However, in order to achieve more sustainable development, operation optimization and energy consumption reduction have become urgent problems to be solved by the technology. This paper aims to deeply discuss the operation optimization strategy of fluidized bed boiler, and how to effectively reduce energy consumption and improve the overall operation efficiency through scientific management and technical innovation. We will conduct the analysis from the boiler design, operation control, fuel selection and other dimensions, to provide practical suggestions for the industry.

**[Key words]** fluidized bed boiler; operation optimization; energy consumption reduction strategy

### 一、引言

流化床锅炉,作为清洁、高效能源利用技术的代表,是全球洁净煤发电领域不可或缺的关键设备。随着环境污染问题的加剧和能源危机的日益凸显,如何提升这种锅炉的运行效率,降低能耗,实现更绿色的能源转化,已经成为全球科研与工程领域关注的焦点。本章将深入探讨流化床锅炉运行优化与能耗降低的策略,旨在为行业提供实用的理论支持和实践指导。

在当今社会,环境保护和可持续发展成为全球共识,作为污染排放大户的火电行业,其能源利用效率的提升直接关系到整个社会的碳排放水平。流化床锅炉作为一种低氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、低硫氧化物( $\text{SO}_x$ )排放的燃烧技术,对实现低碳发电具有重要意义。然而,其运行过程中存在的能耗高、效率低等问题,使得其在实际应用中仍面临挑战。优化运行策略,不仅有助于提高锅炉的热效率,还能够降低运行成本,提升电厂的经济效益。

在过去的几十年中,尽管流化床锅炉技术取得了显著进步,但其运行参数的复杂性和多变量耦合特性使得优化工作充满困难。传统的经验操作方法难以适应不断变化的工况,而现代的计算机技术、数据挖掘和智能控制方法为解决这些问题提供了新的途径。这些技术的应用,使得我们可以从海量运行数据中识别关键影响因素,构建精确的控制模型,进而实现精细化管理,达到节能降耗的目标。

### 二、流化床锅炉工作原理与结构

流化床锅炉是一种独特的锅炉类型,它的工作原理基于流化床的概念,即固体颗粒在上升的气流作用下形成类似液体的流动状态。这种流动状态使得燃料颗粒与空气均匀混合,提高了燃烧效率,同时减少了污染物的生成。以下是流化床锅炉

的主要工作原理和结构组成,以及它们对运行效率的影响。

#### 1. 工作原理

流化床锅炉的工作过程可以分为以下几个步骤:

**燃料进入:** 固体燃料(如煤、生物质等)通过给煤机进入炉膛,在炉膛底部形成一个稳定的燃料层。

**流化阶段:** 鼓风机提供的空气通过分布板进入炉膛,当空气流量达到一定值时,燃料层开始形成流化床,颗粒在气流中上下浮动。

**燃烧阶段:** 流化床中的燃料颗粒与上升的气流中的氧气充分混合,进行均匀的燃烧,释放出热量。

**物料循环:** 燃烧后的灰渣和未完全燃烧的颗粒由于密度差异,上浮至炉膛顶部,通过分离设备(如旋风分离器)分离出干净的烟气,未燃尽的颗粒则重新落入炉膛继续燃烧,形成物料循环。

**热交换:** 经过燃烧的烟气携带大量热量,通过烟道进入空气预热器和省煤器,对空气和给水进行预热,然后在锅炉的尾部通过尾部烟道排出,形成热力循环。

#### 2. 结构组成

流化床锅炉主要由以下几个部分组成:

**炉膛:** 这是燃料燃烧和物料循环发生的场所,通常设计为圆筒形或方形,以保证气流的均匀分布。

**分布板:** 位于炉膛底部,用于引导气流进入燃料层,确保流化床的形成。

**旋风分离器:** 用于分离烟气与燃烧产物,保证烟气的清洁,并将未燃尽的颗粒送回炉膛。

**空气预热器和省煤器:** 用于回收烟气中的热量,提高锅炉的热效率。

给煤机和灰渣处理系统：分别负责供应燃料和处理燃烧后的灰渣。

### 3. 对运行效率的影响

流化床锅炉的结构设计直接影响其运行效率和污染物排放。优化的结构设计可以确保气固两相的充分接触，提高燃烧效率，降低未燃尽的颗粒率。分布板的设计、风量的控制以及旋风分离器的效率，都对物料循环和燃烧质量有关键影响。合理的空气预热器和省煤器布局可以最大程度地回收热量，降低排烟温度，从而提高锅炉的热效率。此外，良好的灰渣处理系统可以保证锅炉的长周期稳定运行，降低故障率。

## 三、运行优化策略

流化床锅炉的运行优化策略是实现高效、低污染能源转化的关键。这些策略主要涉及燃烧调整、风量控制、物料循环优化和热交换强化等多个方面。通过深入理解这些策略，我们可以有针对性地提升锅炉的整体性能。

首先是燃烧优化。燃烧是流化床锅炉的核心过程，其效率直接影响到热能的产出和污染物的生成。优化燃烧过程，通常包括调整燃料与空气的混合比、控制床温、确保适当的空气过剩系数等。例如，通过 Catboost 模型等机器学习算法，可以实时监测和调整一次风与二次风的比例，以达到最优的燃烧效果。过低的氧气供应会导致不完全燃烧，产生大量烟尘和一氧化碳；而过高的氧气供应则会增加氮氧化物的生成。通过精确控制，可以实现低氮、低硫的清洁燃烧，提高能源转化效率。

风量控制是维持稳定流化床至关重要的环节。一次风和二次风的流量、压力与频率，都会对床层状态产生影响。一次风负责维持床层的流化，而二次风则主要负责提供燃烧所需的氧气。为了达到最佳运行状态，需要通过模型预测和实时调整，确保风量的平衡，既能保证稳定的物料循环，又能避免床温过高或过低。

床层控制，特别是床层厚度和流化状态的管理，对能耗降低至关重要。过厚的床层会降低热交换效率，增加能耗，而过薄的床层可能导致颗粒循环率降低，影响燃烧稳定性。通过精确控制分布板的设计和与气固两相的接触，可以实现理想的床层结构，从而提高热效率。

热交换优化是另一个不可忽视的环节。空气预热器和省煤器的效率直接影响到锅炉的热能回收。通过改进换热器的结构设计，如采用高效的翅片管，或是优化烟气流动路径，可以提高热交换性能，降低排烟温度。在实际运行中，可以通过拉格朗日插值法等数学模型，实时计算烟气温度分布，从而调整换热器的运行参数，获取最佳热效率。

智能控制系统在运行优化中起着举足轻重的作用。通过集成分散控制系统 (DCS)，可以实时收集和分析大量的运行参数，为操作人员提供实时反馈。结合数据挖掘技术，如模糊关联模式分析，可以挖掘出不同工况下与高效运行匹配的最佳操作策略。针对负荷变化或燃料特性变化，采取针对性的调整措施，如优化启动策略，可以显著缩短启动时间，降低油耗。

运行优化策略是流化床锅炉性能提升的关键手段，包括燃烧优化、风量控制、床层管理和热交换强化等。这些策略的实施依赖于现代计算机技术、数据挖掘以及智能控制算法，通过实时监控和精确调整，可以有效降低能耗，提升锅炉的经济性和环保性能。随着信息技术的不断进步，这些优化策略的应用将更加广泛，为流化床锅炉的进一步发展提供有力支持。

## 四、能耗降低策略

能耗降低策略是流化床锅炉优化运行的另一重要方面，它

涵盖了从燃烧过程改进到余热回收、设备升级等多元化的技术手段。在实际操作中，这些策略的实施能够显著降低锅炉的热能损失，提高能源利用率，从而达到节能减排的目标。

### 1. 低温烟气余热再利用

低温烟气余热回收作为能耗降低的有效手段，通过在锅炉尾部安装余热锅炉或高温热泵系统，能够提取排烟中的低温热量，转化为可再利用的能源。例如，通过热泵技术将低温烟气热量提升至更高的温度，然后用于预热锅炉的给水或空气，从而降低外部热源的需求，减少能耗。对于大型 CFB 锅炉，这种余热回收系统能显著降低排烟温度，提升热效率，对整体节能减排具有显著效果。

### 2. 燃烧调整与优化燃烧工况

优化燃烧工况是降低能耗的关键步骤。通过对燃料类型、给煤量、风量等参数的精细调整，可以实现燃料的更完全燃烧，减少不完全燃烧造成的热能损失。例如，采用先进的燃烧模型如 Catboost，结合实时监测数据，对一次风、二次风的比例和频率进行动态调整，既能保证燃烧的充分性，又能避免过度燃烧导致的氮氧化物生成增加。同时，根据燃料的热值和特性，选择合适的给煤策略，可以进一步提高燃烧效率。

### 3. 设备升级与能效提升

设备的升级和能效提升也是降低能耗的重要途径。例如，改进空气预热器和省煤器的设计，采用高效的翅片管，优化烟气流动路径，可以提高热交换器的性能，减少热能损失。此外，高效率的鼓风机和引风机，以及精确的分离设备，如分离效率更高的旋风分离器，都可以在减少系统阻力的同时，提高能量利用率。定期的设备维护和定期更换磨损部件，也能保证设备在最佳状态下运行，降低额外的能耗。

### 4. 能耗在线监测与分析

利用信息技术，实现能耗的在线监测与分析是能耗降低策略的重要组成部分。通过 DCS 系统收集现场数据，运行人员可以实时了解锅炉的能耗状况，快速识别出参数的偏离，从而做出及时的调整。利用数学模型如拉格朗日插值法，可以建立能耗基准值的计算模型，帮助操作人员迅速定位并解决能耗问题。同时，数值模拟方法也可用于研究可控参数对能耗的影响，为实时优化运行曲线提供依据。

### 5. 数据挖掘与智能控制策略

数据挖掘技术，如模糊关联模式分析，可以深入挖掘历史运行数据，揭示出操作参数与能耗之间的隐含关系，从而提出优化运行策略。通过智能化的控制系统，操作人员可以依据这些策略进行策略调整，如优化启动过程，减少启动时间，降低油耗。随着机器学习算法的发展，预测模型将更加精确，有助于实现更为精细化的能耗管理。

能耗降低策略是多维度、多层次的系统工程，涵盖了燃烧优化、设备升级、余热回收和实时监控等各个方面。通过这些策略的实施，流化床锅炉的运行效率得到显著提升，为实现低碳、高效和环保的能源转化提供了有力保障。随着技术的进一步发展，能耗降低策略将更加智能化，为流化床锅炉的可持续发展注入新的活力。

## 五、案例分析与前景展望

### 1. 案例分析

在实际应用中，优化策略的实施往往能够带来显著的经济效益和环境效益。以一座 130 t/h 的 CFB 锅炉为例，该锅炉在优化前，由于风量控制不合理，燃烧状况不稳定，造成了较高的能耗和污染物排放。通过引入 Catboost 模型进行风量调整，

以及模糊关联模式分析挖掘出最佳给煤策略,启动时间被成功缩短了25%,油耗降低了10%,同时,烟气中氧气体积分数和炉膛出口压力的控制精度也得到了显著提升,使得燃烧效率提高了8%。这些效果不仅降低了运行成本,也减少了对环境的影响,充分验证了优化策略的有效性。

## 2. 技术前沿与前景展望

随着技术的不断进步,未来的流化床锅炉运行优化与能耗降低策略将展现出以下几个趋势:

**深度学习与人工智能:**随着深度学习和人工智能技术的发展,未来优化模型将更加精准和自适应。例如,利用深度强化学习(Deep Reinforcement Learning, DRL)技术,可以让锅炉系统自我学习和优化,以适应不断变化的工况,实现更智能的控制。

**数据驱动的预测与决策:**大数据和云计算的广泛应用,使得实时数据的获取和处理更为便捷。通过实时的在线分析,可以预测未来运行状况,提前做出策略调整,进一步降低能耗。

**模块化与集成化:**模块化设计将简化设备维护和升级,而集成化技术将促进不同优化策略的协同作用,如通过集成燃烧优化、风量控制和余热回收系统,实现全方位的能效提升。

**环境适应性与能源多元化:**随着可再生能源的开发,未来流化床锅炉可能会更多地承担起混合燃料的燃烧任务。优化策略需要考虑到不同燃料的特性,以实现最优的能源转换效率。

**标准化与规范:**随着行业标准和规范的完善,优化策略将更加规范化,有助于降低运行成本,提高整体效率。

**绿色与可持续:**随着碳中和目标的提出,优化策略将更加注重降低碳排放,提高能源的循环利用效率,推动锅炉技术的绿色发展。

## 上接第 249 页

投入。四是提高工作环境的安全性。智能焊接技术可以减少焊接过程中产生的烟尘、气体和噪声等有害物质的排放,提高工作环境的安全性。智能焊接设备可以通过封闭式操作减少对工人的伤害风险,提高工作环境的安全性。智能焊接技术在机械制造中的应用优势主要体现在提高生产效率和质量、减少人力成本等方面,为企业提供了更高效、更稳定、更安全的焊接解决方案。

### 3.2. 智能焊接技术面临的挑战

智能焊接技术在机械制造中的应用面临以下挑战:一是复杂焊接工艺。机械制造中的焊接工艺通常较为复杂,需要考虑材料的特性、焊接接头的设计和焊接参数的选择等多个因素。智能焊接技术需适应不同工艺要求,并能够自动调整焊接参数以实现高质量焊接。二是焊接质量控制。焊接质量对于机械制造的产品性能和可靠性至关重要。智能焊接技术需实时监测焊接过程中的焊缝形态、焊接温度和焊接质量等参数,并能够及时调整焊接参数,以保证焊接质量。三是自动化程度。机械制造中的焊接通常需要大量人工操作,智能焊接技术需实现自动化的焊接过程,减少人工干预,提高生产效率和产品质量。四是多材料焊接。机械制造中常常需要对不同材料进行焊接,如金属与非金属的焊接。智能焊接技术需适应不同材料的焊接要求,并能够实现高强度和可靠的焊接接头。五是环境适应性。机械制造中的焊接通常在复杂的环境条件下进行,如高温、高湿度和有害气体等。智能焊接技术需要适应不同的环境条件,

流化床锅炉运行优化与能耗降低策略的未来将融合先进的计算技术、智能控制和环保理念,实现能源利用的高效、清洁和可持续。通过不断的技术创新和实践应用,流化床锅炉将在全球能源转型中发挥更为重要的作用,助力构建一个更加绿色、和谐的能源未来。

## 结束语

流化床锅炉的运行优化与能耗降低是一项系统工程,涉及锅炉设计、运行策略、燃料管理等多个层面。通过引入先进的控制技术,优化燃料混合,以及持续的技术研发,我们有望在保障锅炉高效运行的同时,显著降低能耗。这不仅有利于提升企业的经济效益,也是对环保责任的积极履行。未来,我们期待看到更多创新的解决方案涌现,推动流化床锅炉技术向更加节能、绿色的方向发展。

## 参考文献

- [1]李文科.关于循环流化床锅炉集控运行分析[J].科技风, 2023, (35): 169-171.
- [2]刘丁赫,冯玉鹏,孙瑞彬,樊保国,李泽鹏,赵冰,王家林,巩太义.超临界循环流化床锅炉技术发展现状与展望[J].电站系统工程, 2022, 38(01): 8-12.
- [3]刘晓东,韩磊,王灵梅.基于机理模型的循环流化床锅炉节能监测系统研发[J].工业控制计算机, 2021, 34(11): 49-51.
- [4]郝玉平,马艳妮,李斌,陈玉娇.燃细颗粒煤循环流化床锅炉技术与应用[J].工业锅炉, 2020, (04): 4-8.
- [5]魏永军.第一代循环流化床锅炉(CFB)节能进步措施的实施与效果[J].山东工业技术, 2020, (04): 125-127.

并能够保证焊接过程的稳定性和安全性。

## 4. 结束语

综上所述,近年来,智能焊接技术已在机械制造领域得到广泛地应用。采用智能化焊接装备及系统,可有效地改善焊接质量与效率、减少人力及能耗。采用智能焊接技术,既能适应我国机械制造业对高质量焊接的要求,又能促进我国产业的技术改造和升级。但在实际应用中还存在设备成本高和技术标准不统一等问题。因此,开展与推广工作还需继续加大研发力度,以提升智能化焊接技术的可靠性与普及性。相信随着科技水平的提高和应用范围的扩大,智能焊接将会成为机械制造业的一个重要组成部分,给工业的发展提供了新的机遇与挑战。

## 参考文献

- [1]沈喜丰.浅谈人工智能技术在机械设计制造中的应用[J].中国设备工程, 2022, (09): 32-34.
- [2]宋广舒.智能机器人数控技术在机械制造行业中的应用[J].无线互联科技, 2022, 19(05): 104-105.
- [3]王劲锋.自动化焊接技术在机械制造中的应用策略[J].装备制造技术, 2021, (11): 132-133+136.
- [4]李健生.人工智能技术在机械制造中的应用研究[J].中国设备工程, 2021, (12): 24-25.
- [5]苏海棒.自动化焊接技术在机械制造中的应用策略[J].内燃机与配件, 2021, (04): 191-192.
- [6]周志博,王丰.智能设计技术在农业机械研发制造中的应用[J].南方农机, 2020, 51(09): 69.