

# Calculation and Safety Analysis of Boiler Hydrodynamic Characteristics under Deep Load Regulation

Liuyi Xiao

Nayong Power Plant, Guizhou Jinyuan Co., Ltd., State Power Investment Corporation Limited, Bijie, Guizhou, 553300, China

## Abstract

With the continuous increase in installed capacity of new energy power generation, the demand for deep peak regulation of thermal power units has become increasingly urgent. During deep peak regulation operation, the boiler load significantly decreases, leading to notable changes in the boiler's hydrodynamic performance, which can easily cause water circulation failures and pose serious threats to the safe and stable operation of the unit. This paper investigates the hydrodynamic characteristics of boilers under deep peak regulation conditions. It first explains the background of deep peak regulation and the connotation of boiler hydrodynamic characteristics, clarifying the significance of the research. Then, it establishes a computational model for boiler hydrodynamic characteristics under deep peak regulation conditions, focusing on the impact of low-load conditions on water circulation. A safety assessment is conducted, identifying hydrodynamic safety risks and proposing countermeasures. The study aims to enhance the operational reliability of deep peak regulation units, ensure stable power supply in the power system, and holds significant engineering application value.

## Keywords

Deep peak regulation; Boiler hydrodynamic characteristic calculation; safety analysis

## 深度调峰下锅炉水动力特性计算与安全性分析

肖流毅

国家电投集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂, 中国·贵州 毕节 553300

## 摘要

由于新能源电力装机容量的不断增大, 火电机组深度调峰的需求也越来越迫切。深度调峰运行时, 锅炉负荷大幅度降低, 锅炉水动力性能会发生显著变化, 容易导致水循环故障的发生, 从而对机组的安全稳定运行构成严重威胁。本文对深度调峰下锅炉水动力特性进行研究, 首先说明深度调峰的背景和锅炉水动力特性的内涵, 明确研究的意义; 其次建立深度调峰工况下锅炉水动力特性计算模型, 重点分析低负荷工况对水循环的影响, 开展安全性评价, 识别水动力不安全因素并提出对策, 希望提高深度调峰机组的运行可靠性, 保证电力系统稳定供电, 有重要的工程应用价值。

## 关键词

深度调峰; 锅炉水动力特性计算; 安全性分析

## 1 引言

在“双碳”目标的指引下, 风电、光伏等新能源电力被大规模地开发利用, 但是新能源电力具有间歇性、波动性的固有特点, 给电力系统的安全稳定运行带来了严峻的考验。为了消化更多的新能源电力, 火电机组要承担深度调峰的任务, 大幅度降低出力来平衡电力供需。锅炉是火电机组的关键设备, 锅炉运行好坏直接影响到机组的安全、经济。当锅炉处于深度调峰低负荷工况时, 炉膛热负荷分布不均、工质流量变化等因素会造成水动力特性变坏, 出现自然循环

停滞、倒流、膜态沸腾等故障, 严重时会造成爆管等重大安全事故。目前, 对于锅炉水动力特性的研究大多集中在额定负荷或者较高负荷工况上, 对于深度调峰低负荷工况的研究还不系统、深入。因此进行深度调峰下锅炉水动力特性计算和安全性分析, 揭示低负荷工况下水动力特性变化规律, 建立科学的安全性评价方法, 对保证火电机组深度调峰工况下的安全运行、推动新能源电力消纳有重大现实意义。本文以该研究为核心, 按照概述、意义、特性计算、安全性分析、结束语的逻辑进行论述。

## 2 深度调峰下锅炉水动力特性计算与安全性概述

### 2.1 深度调峰的背景与运行特征

深度调峰是指火电机组在原有的最小技术出力的基础

【作者简介】肖流毅(1999-), 男, 中国贵州六盘水人, 本科, 助理工程师, 从事火电厂锅炉本体研究。

上,继续降低出力来满足电力系统的调峰需求。近年来我国新能源电力产业快速发展,风电、光伏装机容量位居世界前列,但是由于其出力受自然条件影响大,造成电力系统峰谷差越来越大,传统的调峰手段已经不能满足要求。在此背景下国家出台多项政策推动火电机组灵活性改造,要求机组具备更深的调峰能力,部分机组最小技术出力已降至额定负荷的30%以下。深度调峰运行时,锅炉有如下特点,负荷波动范围大,变化速度快,要求锅炉有良好的负荷适应性;炉膛热负荷低,燃烧不稳定,容易出现熄火、结渣等现象;工质流量小,传热条件差,水动力特性是非线性的。由于这些特点,锅炉运行环境会更加复杂,对水动力系统的稳定性提出了更高的要求。

## 2.2 锅炉水动力特性的核心内涵与影响因素

锅炉水动力特性指锅炉蒸发系统内工质(水和蒸汽)的流动特性,主要包括工质的流量分布、压力变化、汽液两相流动状态等,其核心是保证工质在蒸发受热面内能够稳定流动,及时带走炉膛传给它的热量,避免受热面超温损坏。影响锅炉水动力特性的因素很多,在额定负荷工况下主要有炉膛热负荷分布、受热面结构、工质压力、给水温度等。深度调峰低负荷工况下,影响因素的作用机理会发生变化,一方面,由于低负荷造成炉膛热负荷大幅下降,热负荷分布不均匀的程度加剧,使得受热面局部吸热不均,影响工质流量分配;另一方面,工质流量减小,汽液两相流型发生转变,流动阻力特性发生变化,容易导致自然循环动力不足;再者,低负荷时锅炉燃烧稳定性降低,炉膛温度波动增大,进一步加剧水动力特性不稳定。对这些影响因素的作用规律有深刻的认识,是进行水动力特性计算及安全性的分析的前提<sup>[1]</sup>。

## 3 保障机组安全稳定运行的工程意义

### 3.1 保障机组安全稳定运行的核心工程价值

火电机组深度调峰运行的首要条件就是保证机组的安全。锅炉是机组的重要设备,锅炉水动力特性的好坏直接影响到机组的安全运行。深度调峰、低负荷工况下锅炉水动力系统易出现自然循环停滞、倒流、汽水分层、膜态沸腾等故障。自然循环停止时,受热面内工质流动停止,热量不能及时带走,受热面超温;倒流时,工质反向流动,破坏正常的水循环秩序,加重局部过热;膜态沸腾时,受热面与工质之间形成蒸汽膜,传热系数急剧下降,短时间内造成受热面爆管。这些故障不但会造成机组非计划停机,造成巨大的经济损失,而且有可能引发安全事故。因此开展深度调峰下锅炉水动力特性计算和安全性分析,可以准确地找出水动力系统的薄弱环节,提出有针对性的优化措施,有效防止水循环故障的发生,保证机组在深度调峰工况下的安全稳定运行,具有重要的工程实践意义<sup>[2]</sup>。

### 3.2 推动电力系统转型发展的战略意义

“双碳”目标之下,电力系统向着清洁低碳转型成为必然走向,新能源电力的大规模消纳属于转型的重要任务之

一。火电机组深度调峰能力提升,给新能源电力消纳打下基础。开展深度调峰下锅炉水动力特性研究,可以给火电机组灵活性改造提供技术依据,使机组的最小技术出力进一步降低,调峰深度和灵活性得到提高。不但可以提高电力系统消纳新能源电力的能力,减少弃风弃光现象,还可以改善电力系统电源结构,推进能源转型进程。同时改善锅炉水动力特性来优化深度调峰工况下的水动力特性,可以减少低负荷运行时的能耗和污染物排放,达到经济效益和环境效益的统一。因此本研究对电力系统清洁低碳转型、实现双碳目标有重大的战略意义。

## 4 深度调峰下锅炉水动力特性计算

### 4.1 水动力特性计算模型的构建

深度调峰下锅炉水动力特性计算的关键,就是建立一个能够准确反映出低负荷工况下汽液两相流动、传热规律的数学模型。根据质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律,结合汽液两相流理论建立锅炉蒸发系统水动力计算模型。模型主要包括工质侧的流动阻力计算模块、传热计算模块、汽液两相平衡计算模块。流动阻力计算模块中考虑到低负荷下工质流量小、汽液两相流型复杂的特点,采用适合低流速工况的阻力计算,如Moody阻力公式结合两相流修正系数,提高阻力计算的准确性;传热计算模块中考虑对流换热、辐射换热和导热,重点修正低负荷下炉膛辐射换热减弱、对流换热系数降低的影响;汽液两相平衡计算模块中根据水和蒸汽的热力学性质建立不同压力、温度下的汽液平衡方程,准确计算工质的含汽率。由于深度调峰过程中负荷波动会对系统水力特性产生影响,因此在该模型中采用了动态计算方式,引入时间变量来实现系统的水动力特性随时间的变化进行模拟<sup>[3]</sup>。

### 4.2 低负荷工况下工质流量分布计算

工质流量分布是锅炉水动力性能的重要指标,对受热面的冷却效果有很大影响。在深度调峰低负荷工况下,由于炉膛热负荷分布不均、受热面结构不同、并联管组水力耦合等因素,工质流量在各并联管之间分布会出现较大的偏差。为了准确地计算出工质的流量分布,首先要建立并联管组的水力计算模型,考虑管组的进口压力、出口压力、管道阻力以及各管的吸热不同。利用并联管的动量方程求出各管流量。在计算时要重点考虑炉膛热负荷分布不均对各管吸热的影响,用炉膛热力计算得到各个区域的热负荷数据,从而确定各管的吸热量;低负荷下工质含汽率低,汽液两相流型以泡状流或塞状流为主,需要采用对应的两相流阻力计算方法;并联管结构不同,管道长度、管径、弯头数量等都会对流动阻力造成影响。通过以上计算,可以确定低负荷工况下工质流量分布规律,找出流量偏差大的管道<sup>[4]</sup>。

### 4.3 自然循环动力特性计算

自然循环锅炉的循环动力主要是下降管和上升管内工质的密度差。深度调峰低负荷工况下,上升管内工质含汽率

下降,密度差减小,自然循环动力减弱,容易造成循环流速降低甚至循环停滞。因此开展自然循环动力特性计算就显得十分必要。计算过程中,首先确定下降管内工质的密度:下降管内工质为饱和水或者过冷水,其密度可直接从热力学性质表中查取;上升管内工质为汽液两相混合物,其平均密度根据含汽率和汽水密度计算得出。根据循环回路的结构尺寸计算循环回路总阻力,其中总阻力又分为沿程阻力和局部阻力。根据自然循环动力等于循环回路总阻力的平衡关系,建立循环流速计算方程,求解得到低负荷工况下不同的循环流速。分析负荷变化速率、给水温度、炉膛热负荷等对自然循环动力的影响,找到自然循环动力随负荷变化的规律,为判断自然循环稳定性提供依据。

## 5 深度调峰下锅炉水动力安全性分析

### 5.1 水循环故障风险识别与评估

深度调峰下锅炉水动力安全性分析的首要任务是识别潜在的水循环故障风险,并进行量化评估。水循环的常见故障有自然循环停滞、倒流、汽水分层、膜态沸腾等。根据前述水动力特性计算结果,结合故障判别准则,进行故障风险识别,对自然循环停滞,计算各上升管的循环流速,当循环流速小于临界流速时,判断为存在停滞风险;对倒流,分析并联管组内各管的压力差,某一管的进口压力低于出口压力时,可能发生倒流;对汽水分层,主要发生在水平或倾斜度较小的管道内,当工质流速较低时,汽液两相因密度差出现分层流动,通过计算管道内工质的轴向流速和含汽率,判断是否存在分层风险;对膜态沸腾,计算受热面壁温,当壁温超过工质饱和温度且传热系数大幅降低时,判定为发生膜态沸腾。同时运用风险矩阵法,通过故障发生概率和后果严重程度两个维度,对各类故障风险做定量评估工作,从而找出高风险故障类型以及重点风险区域<sup>[9]</sup>。

### 5.2 受热面超温安全性分析

受热面超温属于深度调峰期间锅炉水动力不安全的重要表现形式,对锅炉结构的安全存在直接威胁。根据水动力特性计算得到的工质流量分布、传热系数、壁温计算结果,进行受热面超温安全性分析。首先确定不同的低负荷工况下水冷壁、过热器、再热器等受热面的壁温分布,重点对局部吸热不均、流量偏差大的地方进行壁温分析。然后比较壁温与受热面材料的允许使用温度,判断有无超温。存在超温风险的区域分析超温原因:工质流量不足,冷却效果变差;局部热负荷过高,热量不能及时被工质带走;汽液两相流型恶化,传热系数降低。另外分析超温对受热面材料造成的影响,即受热面材料的蠕变、疲劳损伤情况,进而评价超温运行对

受热面的寿命影响。通过受热面超温安全性分析来确定超温风险的分布区域和严重程度,为制定防控措施提供依据。

### 5.3 水动力稳定性动态分析

深度调峰工况下锅炉负荷变化频繁,造成水动力特性动态变化,所以需要做水动力稳定性动态分析。利用建立的动态水动力计算模型,模拟负荷从额定负荷降到最小技术出力,再从最小技术出力升到额定负荷的全过程,分析水动力参数(循环流速、含汽率、压力)随时间的变化规律。重点考察负荷变化速率对水动力稳定性的影响:当负荷下降较快的时候,炉膛热负荷迅速减少,上升管内含汽率突然降低,自然循环动力也突然变小,循环流速也会发生大幅度的波动;当负荷快速上升的时候,炉膛热负荷也快速增加,工质蒸发量也突然增大,从而造成局部压力急剧升高,影响水动力稳定性。用稳定性判据(衰减系数法)来判断不同负荷变化速率下水动力系统的稳定性,确定允许的最大负荷变化速率。同时分析水动力系统动态响应特性,给优化机组负荷调节策略提供技术依据。

## 6 结语

综上所述,本文以深度调峰下锅炉水动力特性计算与安全性分析为研究对象,从概述深度调峰背景、锅炉水动力特性内涵入手,阐述研究的工程意义和战略意义,建立深度调峰工况下锅炉水动力特性计算模型,对工质流量分布、自然循环动力、汽液两相流型、传热特性进行计算,分析低负荷工况下水动力特性变化规律,通过水循环故障风险识别、受热面超温分析、水动力稳定性动态分析确定安全运行边界并提出优化措施。未来研究可以进一步借助试验测试检验计算模型的精确性,对不同种类的锅炉展开个性化的水动力特性及安全性的研究,从而为火电机组深度调峰灵活性改造给予更为精确的技术支持,助力电力系统清洁低碳转型。

### 参考文献

- [1] 徐福斌,周晓韩,陈辉,等. 基于水动力计算的600MW锅炉深度调峰受热面安全性分析[J]. 电站系统工程,2025,41(01):10-13+18.
- [2] 曹霆,郑沧海,李永利,等. 超临界锅炉低负荷运行水动力及壁温特性分析[J]. 动力工程学报,2024,44(11):1680-1688+1711.
- [3] 覃跃,李德波,覃昊,等. 燃煤电厂锅炉水动力研究现状与展望[J]. 湖南电力,2024,44(05):1-8.
- [4] 张西容,宋园园,周妍君,等. 超临界循环流化床锅炉水冷壁吸热偏差计算及深度调峰水动力特性[J]. 中国电机工程学报,2024,44(15):6047-6057.
- [5] 管晓军,雷鸣洋. 1000MW超超临界锅炉水动力特性分析及应对措施[J]. 能源科技,2023,21(05):50-53.