

武振国, 杨楚轲, 张守玉, 等. 变负荷下循环流化床锅炉内燃烧行为研究进展[J]. 煤炭转化, 2025, 48(2): 78-91. DOI: 10. 19726/j. cnki. ebcc. 202502008.

WU Zhenguo, YANG Chuke, ZHANG Shouyu, et al. Research progress on combustion behavior of circulating fluidized bed boiler during peak shaving[J]. Coal Conversion, 2025, 48(2): 78-91. DOI: 10. 19726/j. cnki. ebcc. 202502008.

## 变负荷下循环流化床锅炉内燃烧行为研究进展\*

武振国<sup>1</sup> 杨楚轲<sup>1</sup> 张守玉<sup>1,2,3</sup> 肖红亮<sup>2</sup> 王君峰<sup>2,4</sup> 吕俊复<sup>2,5</sup>  
柯希玮<sup>2,3</sup> 吕邦勇<sup>1</sup> 黄健添<sup>1</sup> 梁 宁<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 200093 上海; 2. 北京怀柔实验室, 101499 北京;  
3. 怀柔实验室山西研究院, 030032 太原; 4. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司,  
150046 哈尔滨; 5. 清华大学能源与动力工程系, 100084 北京)

**摘 要** “双碳”战略下, 煤电是以新能源为主要电源的电网的安全保障, 其中循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)燃烧发电技术在煤电深度调峰中担当着重要角色, 但其热惯性大, 制约了 CFB 锅炉的变负荷速率。降低粒径、改善燃料燃烧特性等燃烧调控行为可降低 CFB 锅炉的流动、传热和燃烧等热惯性, 对提升 CFB 锅炉的灵活性具有重要意义。焦炭燃烧是固体燃料燃烧的主要放热过程, 通过总结并对比常见的焦炭燃烧速率模型(包括动力/扩散表面反应速率模型、焦炭缩核燃烧模型和 Coats-Redfern 积分法), 得出了焦炭燃烧的影响因素。结果表明: 焦炭燃烧速率的主要影响因素为给煤粒径、床温、一二次风氧气体积分数和燃料种类; 总结了上述主要影响因素对炉内燃烧速率和其他燃烧行为的影响, 降低给煤粒径、升高床温、提高氧气体积分数和改善燃料特性均能改善燃料燃烧过程, 提升 CFB 锅炉变负荷速率; 基于粒径、燃料特性等因素对循环流化床炉内燃烧行为的影响, 国内外研究者开发了不同技术(包括粉煤循环流化床燃烧(powdered coal circulating fluidized bed combustion, PC-CFB 燃烧)和燃料高温预热等技术)以提高 CFB 锅炉灵活性, 亦可采用绿色低碳多元燃料掺烧等技术提高 CFB 锅炉的升负荷速率。

**关键词** 循环流化床, 焦炭燃烧, 升负荷速率, 粒径, 床温, 氧气体积分数, 燃料特性

### 创新点

- 总结并对比了多种煤焦燃烧速率模型, 得出了焦炭燃烧的主要影响因素为给煤粒径、床温、一二次风氧气体积分数和燃料种类等。
- 研究了给煤粒径、床温、一二次风氧气体积分数和燃料种类等因素对燃烧速率和其他燃烧行为的影响, 进而提出了提升 CFB 锅炉负荷速率的措施。

**中图分类号** TM621

**DOI:** 10. 19726/j. cnki. ebcc. 202502008

## 0 引 言

鉴于中国能源禀赋, 火力发电尤其是燃煤发电一直是我国电力供应的主要方式, 也是保障我国电

力安全稳定的“压舱石”<sup>[1]</sup>。在“碳达峰、碳中和”背景下, 新能源发电占比持续提高, 但太阳能、风能、潮汐能等发电的不稳定性导致其利用受到极大限制。为充分利用新能源发电及保障电网安全, 火力发电机组须参与调峰, 由基础电源转为调节性

\* 怀柔实验室重大专项资助项目(ZD2023008A)。

第一作者: 武振国, 硕士生, E-mail: 136957150@qq.com; 通信作者: 张守玉, 博士、教授、博士生导师, E-mail: zhangsy-guo@163.com

收稿日期: 2024-09-30; 修回日期: 2024-11-25

电源<sup>[2-4]</sup>。

循环流化床(CFB)锅炉具有燃料适应广、污染物排放控制成本低和负荷调节范围广等优点,因此,在煤电机组调峰工作中担任重要角色<sup>[5]</sup>。目前,在CFB锅炉调峰方向上的研究主要包括低负荷稳燃、压火热备和升负荷速率三个方面。CFB锅炉因采用流态化燃烧方式在低负荷下具有良好的燃烧稳定性<sup>[6]</sup>,与燃用相同煤种的煤粉锅炉相比,CFB锅炉的最低稳燃负荷低约10%以上<sup>[7]</sup>。采用压火技术能充分利用CFB锅炉临时停机后的床料与耐磨耐火材料余热提高锅炉机组的经济性<sup>[8-10]</sup>。吕俊复等<sup>[11]</sup>通过75 t/h CFB锅炉压火实验发现当压火时间为6 h~7 h时,CFB锅炉可以直接热态启动,燃用高挥发分、着火温度低的燃料可进一步延长压火时间<sup>[12]</sup>。CFB锅炉的升负荷速率是应对电网需求的一个重要指标,关乎锅炉运行的稳定性和安全性。张洪福等<sup>[13]</sup>研究表明CFB机组负荷响应能力随负荷降低而显著下降,CFB炉内大量的床料使流动、传热状况恶化,与煤粉炉相比,CFB锅炉燃烧温度较低、燃料粒径较大,导致了其燃烧惯性增大,变负荷速率较慢<sup>[14]</sup>。

CFB锅炉的流动惯性是由炉内大量床料循环引起的,主要受炉膛几何形状、分离器效率和给煤粒径等因素影响,减少炉内床料量,降低床料停留时间,可以使流动惯性减小<sup>[15]</sup>。CFB锅炉的传热惯性主要受床料和浇注料的蓄热影响,降低给煤粒径及选择燃烧特性好的煤可提高炉侧燃烧速率,降低床料量,并提高炉内传热量,降低CFB锅炉的传热惯性<sup>[16]</sup>。同时,随床温升高,物料的传热系数线性增长。因此,可通过加快炉内燃烧速率和升高床温来加强炉内传热<sup>[17]</sup>。CFB锅炉的燃烧惯性取决于炉内的给料方式和燃烧温度,采用提高炉膛温度、降低燃料粒径或采用燃烧特性好的燃料等措施可提高燃料燃烧速率,降低燃烧惯性<sup>[18]</sup>。

综上所述,通过降低燃料粒径和升高床层温度等方式进行燃烧调控可同时降低CFB锅炉的流动、传热和燃烧惯性,从而提升CFB锅炉的变负荷速率。因此,明确CFB锅炉燃烧的主要影响因素并分析这些因素对炉内燃料燃烧的作用机制,可充分挖掘CFB锅炉的变负荷潜力,指导CFB机组调峰运行<sup>[19]</sup>。

鉴于此,本研究总结了目前常见的煤焦燃烧模型,进而明确了影响煤焦燃烧过程的主要影响因素,并分析了这些因素对锅炉内燃料燃烧行为的影

响。通过改善燃料特性,降低燃料着火温度、提高燃烧速率,从而降低了CFB锅炉稳燃负荷,加快了CFB锅炉热启动和升负荷过程。本研究探讨了提升锅炉升负荷速率的措施,以期为CFB机组深度调峰提供理论参考。

## 1 焦炭燃烧速率模型

煤燃烧过程主要包括煤的预热、挥发分的着火和燃烧、焦炭的预热和着火、焦炭的燃烧和燃尽四个过程。马李洋等<sup>[20]</sup>研究表明长焰煤在空气气氛中燃烧,其挥发分燃烧放热约占总放热的18.06%,而焦炭燃烧放热约占总放热的81.94%,且焦炭燃烧时间占煤总燃烧时间的9/10<sup>[21]</sup>。因此,焦炭燃烧是煤颗粒燃烧的主要阶段。

鉴于此,本研究总结了常见的焦炭燃烧速率模型,分析了相关燃烧速率模型在应用过程中的优缺点,以期为今后固体燃料燃烧及CFB锅炉内燃料燃烧速率提升等方面的研究提供参考。表1所示为Coats-Redfern积分法、动力/扩散速率模型和焦炭缩核燃烧模型等常见的焦炭燃烧速率模型<sup>[22-43]</sup>。Coats-Redfern积分法可根据燃料种类和燃烧阶段选择与实际情况最符合的反应模型函数,以减小模拟结果与实验结果的误差<sup>[24]</sup>。但该函数是根据实验结果的经验总结,反应模型函数中的参数没有具体的物理意义,不利于CFB锅炉燃烧调整的相关研究<sup>[25]</sup>。动力/扩散速率模型计算简单,可有效提高燃料表面反应计算效率,但该模型的扩散速率常数( $C_1$ )为固定值,氧气扩散作用仅反映了煤颗粒及其表面气体温度的影响,而给煤粒径和氧气扩散系数是影响氧气扩散作用的主要因素<sup>[33]</sup>。相比之下,焦炭缩核燃烧模型反映了颗粒粒径和氧气扩散系数对氧气扩散作用的影响,煤颗粒温度及其表面气体温度对氧气扩散作用的影响亦可通过氧气扩散系数体现。因此,相较于Coats-Redfern积分法和动力/扩散速率模型,焦炭缩核燃烧模型更适合应用于CFB锅炉内燃料燃烧过程的相关分析。

通过利用三种模型对CFB锅炉内燃料的燃烧行为分析可知,焦炭燃烧速率受燃料种类、给煤粒径、床温、一二次风氧气体积分数等因素的影响。与一二次风氧气体积分数相比,一二次风量、过量空气系数和一二次风配比对燃烧速率影响较小<sup>[42]</sup>。因此,以下主要分析给煤粒径、床温、一二次风氧气体积分数和燃料种类对燃烧速率的影响。

表1 常见焦炭燃烧速率模型  
Table1 Common coke combustion rate models

Combustion rate model	Equation	Influence factors	References
Coats-Redfern integral method	$\frac{d\alpha}{dT_p} = k(T_p)f(\alpha)$ $k(T_p) = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT_p}\right)$	Coal particle size, bed temperature, volume fraction of oxygen in primary and secondary air, fuel type	[22-27]
Kinetics/diffusion limited model	$\frac{dm_p}{dt} = -\pi d_p^2 \left( \frac{1}{1/R_d + 1/R_c} \right) p_{ox}$ $R_d = C_1 \left( \frac{T_p + T_g}{2} \right)^{0.75} \quad R_c = C_2 \exp\left(-\frac{E}{RT_p}\right)$	Coal particle size, bed temperature, volume fraction of oxygen in primary and secondary air, fuel type, primary and secondary air ratio	[28-33]
Shrinking-core model	$\frac{dm_p}{dt} = -\pi d_p^2 \frac{1}{(1/k_d) + (1/k_s)} C_{ox}$ $k_d = \varphi \frac{ShD_{ox}}{d_p} k_s = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_p}\right)$	Coal particle size, bed temperature, volume fraction of oxygen in primary and secondary air, fuel type, coal feed rate, primary and secondary air volumes, excess air coefficient	[34-43]

## 2 CFB 锅炉炉内燃料燃烧速率影响因素分析

炉膛内煤颗粒的燃烧速率在很大程度上决定了CFB锅炉变负荷速率,直接关系着循环回路内即燃碳总量<sup>[18]</sup>。根据焦炭燃烧速率模型的分析可知,给煤粒径、床温、氧气体积分数和燃料种类是影响锅炉燃烧速率及燃烧行为的关键因素。

### 2.1 给煤粒径

由于传统CFB锅炉为宽筛分给料,给煤多为毫米量级,运行床温较低(850℃~950℃),致其燃烧速率低,部分粗颗粒燃尽耗时超过10 min,需在CFB循环回路内多次循环流动才能彻底燃尽<sup>[44]</sup>,从而造成了CFB锅炉的循环回路内存在大量的未燃尽即燃碳,致使CFB锅炉产生较大的燃烧惯性与较慢的炉内燃烧响应速率<sup>[18]</sup>。同时,大量床料集聚亦导致CFB锅炉产生较大的流动惯性与传热惯性,不利于锅炉的灵活性提升。

给煤粒径显著影响着CFB锅炉内燃料的燃烧速率,降低给煤粒径可提高CFB锅炉内燃料的燃烧速率,有利于锅炉灵活性提升<sup>[45-46]</sup>。索疆舜等<sup>[47]</sup>研究表明当CFB锅炉中燃煤颗粒粒径小于30 μm时,其燃尽时间明显低于颗粒停留时间,因而这部分颗粒在炉内可以充分燃尽;粒径介于30 μm~60 μm间的燃煤颗粒在炉内停留时间与其燃尽时间基本持平,在70%及以上锅炉负荷下可实现给煤全部燃尽;而粒径大于60 μm给煤颗粒的燃尽时间显著长

于停留时间。据测算,当某燃煤颗粒粒径由5 mm降至1 mm时,颗粒燃尽时间将缩短98.6%<sup>[18]</sup>。以上研究充分表明随着给煤粒径增大,其燃烧速率与燃尽特性显著变差。

姜秀民等<sup>[48]</sup>分析了合山煤煤粉的燃烧速率,结果表明,当煤粉粒径由57.40 μm减小到10.90 μm时,表观活化能由142.64 kJ/mol减小到95.53 kJ/mol,煤粉的着火温度和燃尽温度随煤粉粒径减小呈指数增加。这是由于随着煤粉粒径减小,煤粉参与燃烧反应的比表面积增加,从而降低了煤粉燃烧过程的表观活化能与着火温度,加快了煤粉的燃烧速率<sup>[49-51]</sup>。刘仍帅<sup>[37]</sup>研究表明随给煤粒径由1.2 mm减小到0.8 mm,密相区床温明显升高,这是由于随着给煤粒径减小,氧气扩散阻力降低,燃料燃烧过程加快。

图1所示为给煤粒径对印尼褐煤煤粉和阳泉无烟煤煤粉燃烧稳定性指数和燃尽特性指数的影响<sup>[52]</sup>。由图1可知,随煤粉粒度范围由小于71 μm增至200 μm以上时,褐煤煤粉和无烟煤煤粉的燃烧稳定性指数分别减少了36.2%和29.0%,燃尽特性指数分别减小了46.8%和38.5%,表明燃煤颗粒粒径增加亦会使其燃烧稳定性与燃尽特性变差。相较于细颗粒,在燃烧过程中粗颗粒上的灰分不易脱落,易在颗粒表面形成灰壳,增加了氧气在灰层中扩散阻力,从而导致煤粉燃烧过程变差。王勇<sup>[53]</sup>研究亦表明给煤颗粒中形成灰分的无机矿物在研磨过程中被逐渐剥离,随给煤粒径减小,给煤颗粒的灰分质量分数减小,挥发分和固定碳的占比增大,有利于给煤颗粒的燃烧。

综上所述,降低给煤粒径可降低其燃烧过程的

活化能,增大燃料的总反应面积,使燃煤参与反应的活性位点增多,同时氧气向煤焦上活性位点的扩散阻力下降,有利于其稳定燃烧与顺利燃尽,从而显著提高给煤的燃烧速率和释热速率,降低燃煤的燃尽时间。同时,炉内燃煤燃烧速率增加也会促进CFB全回路内即燃碳存量与物料量的降低,有利于降低床内物料的传热惯性。总之,燃煤粒径降低可提高CFB锅炉内的燃烧响应速率,有利于CFB锅炉变负荷速率的提升。

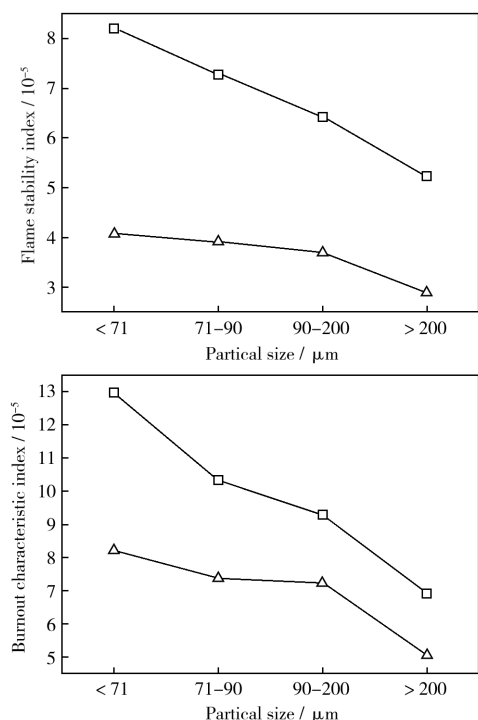


图1 给煤粒径对燃烧稳定性指数和燃尽特性指数的影响  
Fig. 1 Effect of coal particle sizes on flame stability index and burnout characteristic index

□—Anthracite;  $\Delta$ —Lignite

此外,燃料粒度降低对CFB锅炉的流动特性有影响。于艺<sup>[54]</sup>研究表明当床料中粒径由1.5 mm降至0.5 mm时,临界流化风速由0.83 m/s降至0.13 m/s,这是由于细颗粒自身质量轻,且具有更大的比表面积和较小的相互作用力,更容易被气体携带和悬浮,提供的流动阻力也较小,从而整体上降低了临界流化风速,进而可适当地降低一次风比例。同时,流化风携带颗粒的能力增强,降低了炉膛密相区高度并增大了稀相区颗粒浓度,导致床料中更多颗粒被携带至炉膛上部参与外循环,使得锅炉循环流率增加,有利于锅炉变负荷速率的增加,从而增强CFB锅炉的运行灵活性<sup>[45]</sup>。

## 2.2 床温

床温是CFB锅炉稳定运行的重要参数。根据阿累尼乌斯定律,燃料的燃烧速率随温度升高呈指数级增加,炉膛内的高温环境有利于加快燃料的化学反应速率。

CFB锅炉内温度的变化受负荷影响较大。蔡晋等<sup>[55]</sup>研究表明350 MW CFB锅炉在40%~60%负荷下床温和锅炉负荷呈正相关。莫鑫等<sup>[56]</sup>研究表明随CFB锅炉负荷升高(66%~100%),密相区床温稳定在850℃~950℃范围内,而稀相区床温显著增大(720℃~820℃),认为炉内温度分布依赖于颗粒浓度分布,随锅炉负荷升高,给煤量和二次风量增加,导致二次风口以上区域的颗粒浓度增大,强化了锅炉稀相区的燃烧。TANG et al<sup>[57]</sup>发现随着负荷由50%升高到75%,CFB锅炉燃烧侧负荷变化率为0.69%/min,随着负荷由75%升高到100%,CFB实验平台燃烧侧负荷变化率为0.81%/min,这是由于高负荷运行时,CFB锅炉内床温升高加快了炉内燃料的燃烧速率,缩短了CFB锅炉燃料侧负荷响应时间。由此可见,CFB锅炉负荷增加,床温升高,炉内燃料燃烧速率加快,锅炉升负荷速率增加。

煤焦的反应活性也与床温(热解温度)有关<sup>[58]</sup>。给煤颗粒进入CFB锅炉后经历干燥、挥发分析出与燃烧、焦炭燃烧等过程。热解温度不同,煤焦的比表面积也不同,导致煤焦的反应活性存在差异<sup>[59]</sup>。杨海平等<sup>[60]</sup>研究表明当热解终温高于800℃时,煤焦孔隙率和比表面积随之增大,有利于煤焦和氧气充分接触,从而增大了燃料的燃烧速率。热解温度对给煤中矿物质催化作用的影响比较复杂<sup>[59]</sup>。黎永<sup>[46]</sup>研究表明,煤中矿物质对炉内燃烧的催化作用因热解温度升高而降低,某种程度上不利于燃料的燃尽,对于粒径小于60  $\mu\text{m}$ 的燃煤颗粒,矿物质的催化作用无明显变化。为探究温度对燃烧速率的影响规律,本研究以135 MW CFB锅炉为例,在700℃~1000℃温度范围内进行焦炭燃烧速率计算,燃料为西山洗矸<sup>[19]</sup>,燃料粒径为0.6 mm,反应气氛为空气气氛,计算结果如图2所示。由图2可知,当温度由700℃升高到1000℃,焦炭燃烧速率提升了7.53倍。这主要受到两方面的影响:一方面,随温度升高,中间产物增加,焦炭燃烧的本征化学反应阻力减小,表观反应速率升高<sup>[61]</sup>;另一方面, $\text{O}_2$ 的扩散系数与温度呈正相关关系,扩散系数提高

减小了氧气的扩散阻力,提高了煤颗粒燃烧速率<sup>[62]</sup>。当温度由700℃升高到1000℃,本征化学反应动力学速率常数提高了29.32倍,而扩散速率常数仅提高了1.48倍,这表明温度对本征化学反应速率的提升效果更大,提高温度后,扩散反应对整个燃烧反应的制约作用加强。因此,温度升高对燃烧的促进效果优于其抑制效果<sup>[58]</sup>。

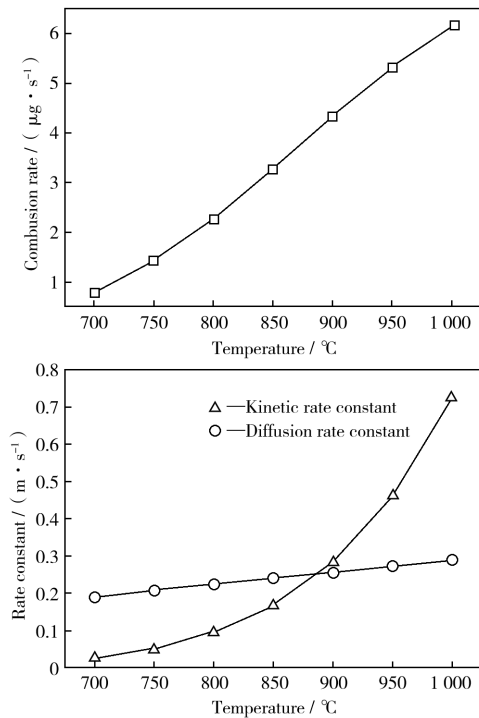


图2 温度对焦炭燃烧速率的影响

Fig. 2 Effect of temperature on coke combustion rate

随着挥发分的析出与焦炭的燃烧,进入锅炉内的给煤颗粒先后经历一次破碎与二次破碎过程<sup>[63-64]</sup>。LEE et al<sup>[65]</sup>研究了在750℃~900℃下热解温度对无烟煤粒径的影响,发现随热解温度和加热速率的升高,无烟煤颗粒发生破碎,粒径减小。这是由于一方面,当温度升高时,无烟煤颗粒内部温度梯度和热应力增大,导致颗粒剧烈破碎;另一方面,当热解温度较高时,燃煤挥发分析出加快,颗粒内部的膨胀压力增大,促进了炉内燃料颗粒的破碎<sup>[66]</sup>。同2.1节所述,燃煤粒径降低,可提高燃料燃烧速率与CFB锅炉灵活性。

综上所述,CFB锅炉床温随着锅炉负荷增加而上升,床温高有利于提高燃料的燃烧速率,同时,床温升高亦能促进燃料颗粒的破碎,可进一步促进燃料的快速燃烧,从而提升锅炉负荷变化速率。但CFB锅炉在降负荷时床温下降,如何保证低/超低

负荷下炉内燃料的稳定燃烧是该型锅炉需要关注的,可采取降低燃料粒径的措施减小温度对燃料燃尽特性的影响<sup>[46]</sup>。

### 2.3 一二次风氧气体积分数

增大一二次风氧气体积分数可促进CFB锅炉内的燃烧行为。图3所示为无烟煤和烟煤在不同气氛下燃烧,床温沿炉膛高度的分布(40%O<sub>2</sub>/60%CO<sub>2</sub>指由体积分数为40%的O<sub>2</sub>和体积分数为60%的CO<sub>2</sub>组成的气氛,30%O<sub>2</sub>/70%CO<sub>2</sub>和21%O<sub>2</sub>/79%CO<sub>2</sub>以此类推)<sup>[67]</sup>。由图3可知,当一次风氧气体积分数由21%上升至40%时,CFB锅

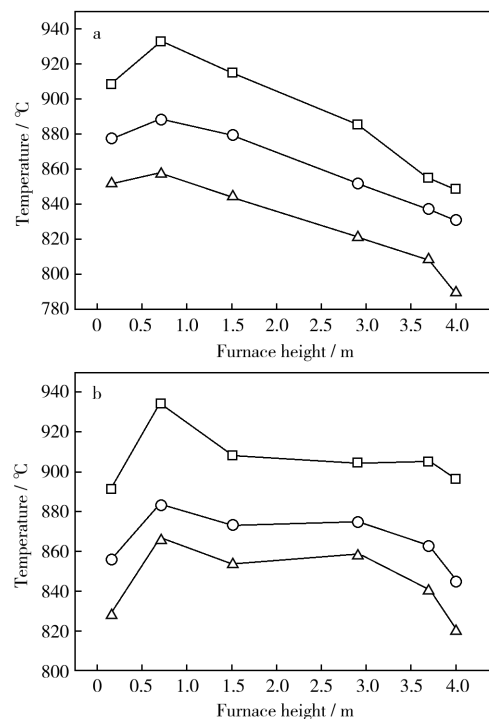


图3 不同气氛下床温沿炉膛高度的分布

Fig. 3 Bed temperature with furnace height in different atmospheres

a—Anthracite; b—Bitumite

□—40%O<sub>2</sub>/60%CO<sub>2</sub>; ○—30%O<sub>2</sub>/70%CO<sub>2</sub>; △—21%O<sub>2</sub>/79%CO<sub>2</sub>

炉内各高度床温均升高了60℃~80℃,这是由于氧气体积分数升高使得挥发分和焦炭剧烈燃烧而大量放热,床温迅速升高<sup>[38]</sup>。蒋勇<sup>[68]</sup>研究表明,随CFB锅炉返料器中的氧气体积分数由21%提升到35%,炉内密相区温度升高了52℃~69℃,稀相区温度升高了55℃~119℃,认为提高返料风氧气体积分数补充了给煤燃烧所需氧气,促进了CFB炉内燃烧<sup>[69]</sup>。王智微等<sup>[70]</sup>研究表明氧气体积分数在稀相区中上部呈现核-环分布,靠近壁面处氧气体积分

数高于2%，中心区氧气体积分数低于2%，使中心区焦炭颗粒难以燃尽，认为焦炭颗粒的燃尽时间主要与氧气体积分数分布和床温相关，提高一二次风氧气体积分数与锅炉负荷可加快炉内燃烧，缩短了焦炭颗粒的燃尽时间。卜昌盛<sup>[71]</sup>采用DamKöhler数表征燃煤颗粒燃烧反应放热与颗粒和外界换热的比值，结果表明当一次风氧气体积分数由10%提升至30%，煤颗粒的DamKöhler数大于1，煤颗粒温度升高，煤燃烧速率升高，但随一次风氧气体积分数进一步升高，由于煤颗粒换热能力增强，煤颗粒的DamKöhler数等于1，导致煤颗粒温度几乎不变，其燃烧速率变化不明显。因此，在0%~30%内提升氧气体积分数，可显著提升炉内燃烧速率，当氧气体积分数大于30%时，燃烧速率的提升效果显著下降，此时若要进一步提高燃烧速率，调整燃料种类与降低给煤粒径是主要手段。

总之，提高一二次风氧气体积分数可显著提高CFB锅炉内燃煤的燃烧速率，同时提高了稀相区中心处氧气体积分数，导致稀相区燃烧份额增大，减小密相区和稀相区温差，有利于CFB锅炉灵活性的提升。

## 2.4 燃料种类

燃料特性(尤其是燃料的低位热值、挥发分和灰分的质量分数)对CFB锅炉灵活性调整(低负荷稳燃、升负荷速率)有显著影响<sup>[72]</sup>。朱川等<sup>[73]</sup>对比了不同煤种煤粉的热重实验数据，结果表明，随煤样 $w(\text{FC}_{\text{daf}})$ 由75%增大到95%，其着火温度由330℃升高至520℃，燃尽温度由450℃升高至670℃，燃烧所需能量增大，这是因为随着煤的炭化程度加深，其挥发分的质量分数逐渐减小，增大了煤燃烧表观活化能，升高了其着火温度和燃尽温度。周俊虎等<sup>[74]</sup>分析了烟煤和无烟煤的燃烧特性，结果表明，在着火阶段无烟煤表观活化能约为烟煤表观活化能的2.3倍，而在燃烧阶段无烟煤表观活化能约为烟煤表观活化能的1.4倍，认为挥发分的燃烧有利于煤焦的燃烧与燃尽。陈建原等<sup>[75]</sup>总结了不同煤种的工业分析结果和燃烧特性，表2对比了该文中各煤种的 $(w(\text{FC}_{\text{ad}})/w(\text{V}_{\text{daf}}))$ 与着火温度的关系。由表2可知，燃料的着火温度随 $w(\text{FC}_{\text{ad}})/w(\text{V}_{\text{daf}})$ 增大而升高，但灰分含量过高不利于燃料着火。这是由于高挥发分含量意味着燃料在加热时能够迅速产生大量可燃气体，在燃料受热时，挥发分首先析出并与周围空气中的氧气混合，在达到燃

点后迅速点燃，产生初始火焰，进而提升燃料温度，促进燃料顺利着火；灰分导热率低且在高温条件下能吸收燃料燃烧释放的热量，导致燃料燃烧时的热量传导能力减弱，使得燃料需要更高温度才能足够使其达到着火点<sup>[76-77]</sup>，而炭化程度较高煤的挥发分质量分数较低，其结构趋于致密石墨化结构，较低的孔隙度和比表面积致其反应面积较低和氧气扩散通道较少，导致了煤的反应活性下降<sup>[78]</sup>。

表2 不同煤种工业分析与着火温度的关系

Table 2 Relationship between proximate analysis results of different coals and ignition temperature

Coal type	$w(\text{FC}_{\text{ad}})/w(\text{V}_{\text{daf}})$ %	$w(\text{A}_{\text{ad}})/w(\text{V}_{\text{daf}})$ %	$w(\text{FC}_{\text{ad}})/w(\text{V}_{\text{daf}})$ %	Ignition temperature/ °C	
Longkou lignite	43.34	45.66	15.15	0.95	150
Zhalainuoer lignite	40.00	45.61	16.80	0.88	160
Datong bitumite	56.55	32.10	13.98	1.76	160
Pingdingshan bitumite	47.04	33.08	29.10	1.42	165
Yuanhua bitumite	53.39	13.70	35.69	3.90	210
Zixing bitumite	27.60	37.33	54.91	0.74	220
Xiaozhuang bitumite	65.83	13.33	22.95	4.94	230
Shaowu coal	49.62	17.75	38.04	2.80	250
Jinzhusan anthracite	61.53	8.72	31.49	7.06	270
Heshan bitumite	33.48	27.95	51.87	1.20	280
Yongan anthracite	65.51	3.55	28.57	18.45	447

低碳燃料如生物质等的掺烧亦有利于燃煤燃烧速率的提高。WANG et al<sup>[79]</sup>对无烟煤掺混松木屑的热重分析表明，随着松木屑掺混质量分数由25%增加至100%，挥发分燃烧活化能降低了9.2%~16.9%，焦炭反应活化能降低了13.3%~26.7%，混合燃料的着火温度由447℃降至277℃，燃尽温度降低了120℃，其原因为掺烧松木屑后混合燃料的挥发分质量分数增加，同时松木屑焦炭燃烧活性高，有利于无烟煤的着火与燃尽，降低了混合燃料的表观活化能，提高了燃烧速率。UNCHAISRI et al<sup>[80]</sup>进行了褐煤掺烧稻秆和桉木屑的燃烧实验，结果表明，随生物质的掺烧比(质量分数)由0%增大到50%，炉膛密相区温度升高了50℃~60℃，而稀相区温度则降低了30℃~35℃，炉膛顶部、竖管和回料阀处温度降低更严重。而潘智<sup>[81]</sup>研究表明，随高硫煤掺混的糖醛渣质量分数由0%增大到50%，由于密度较小的糖醛渣颗粒在锅炉稀相区燃烧致使稀相区、竖管和回料阀处的温度上升100℃~160℃，而炉膛密相区温度无显著变化。混合燃料的热解及燃烧特性与掺烧比例相关，混合燃料中炭化程度低的煤及生物质等反应活性

较高的燃料占比越高,越有利于提升混合燃料的着火与燃烧性能<sup>[82]</sup>。总之,掺烧生物质等反应活性高的燃料不但可以提高CFB炉内燃烧速率,还会导致炉内燃烧份额分布的改变,有利于CFB锅炉低负荷稳燃特性及其灵活性的提升。

综上所述,炭化程度较低的煤种挥发分含量较高,而相应的煤焦反应活性较高,着火温度较低,因此,该煤种燃烧速率要高于炭化程度较高煤种的燃烧速率,有利于运行温度较低、给煤粒径较大的CFB锅炉的低负荷稳燃与变负荷速率的提升。由于CFB锅炉多燃用劣质煤,掺烧挥发分含量较高的煤或生物质等燃料,可利用炭化程度较低煤的挥发分的燃烧放热加快低品质燃料的着火过程与燃烧过程。

### 3 提高CFB锅炉升负荷速率的措施

国内CFB锅炉的升负荷速率主要维持在 $0.9\%/min \sim 1.7\%/min$ <sup>[83]</sup>,基于颗粒粒径、燃料特性等因素对CFB炉内燃煤燃烧行为的影响,国内外研究者采用了PC-CFB燃烧技术和燃料高温预热技术来提高CFB锅炉的变负荷速率。

#### 3.1 PC-CFB燃烧技术

目前大部分CFB锅炉的燃煤粒径多在 $0\text{ mm} \sim 10\text{ mm}$ 范围内。采用细化燃煤颗粒与掺烧煤粉的措施,有效增大了单位质量下燃煤颗粒与周围氧气的接触面积,提高了燃煤燃烧速率。对于宽筛分给煤的CFB锅炉,参与外循环的细颗粒对炉内传热具有决定影响<sup>[84-85]</sup>。吕俊复等<sup>[45]</sup>提出了PC-CFB燃烧技术,将燃料粒度由 $0\text{ mm} \sim 10\text{ mm}$ 缩减为 $0\text{ mm} \sim 1\text{ mm}$ ,可提高锅炉燃烧速率与燃料释热响应速率,且降低燃料粒度必然导致床料粒度降低,在合理的配风条件下可显著提高物料的循环流率,炉膛上部悬浮物料浓度增加,炉内传热增强,因此,PC-CFB燃烧技术可提高燃煤释热响应速率,增强CFB锅炉的灵活性。同时,燃料粒度降低使得最小流化速度降低,促进了锅炉低负荷下的稳定运行。潘雄峰等<sup>[86]</sup>在 $169\text{ MW}$  CFB锅炉中采用低热值煤-高热值煤粉动态复合燃烧技术,短期内可使炉膛稀相区平均固体物料的质量浓度提升 $0.2\text{ kg/m}^3 \sim 0.5\text{ kg/m}^3$ ,增加了稀相区燃料释热速率。此外相较于常规燃烧,采用二次风管输送煤粉方式和给煤管输送煤粉

方式可使锅炉升负荷速率分别达到 $3.57\%/min$ 和 $2.46\%/min$ 。LIU et al<sup>[87]</sup>对比了PC-CFB燃烧技术的给煤方式、煤粉热值和煤粉掺混比对锅炉升负荷速率的影响,发现采用二次风管输送热量掺混比为 $0.6$ 的高热值煤粉时升负荷速率最高( $3.69\%/min$ )。采用低热值煤-高热值煤粉动态复合燃烧技术不但提高了CFB锅炉热量释放速率和燃烧效率,还降低了其脱硫脱硝成本<sup>[45]</sup>。但采用PC-CFB燃烧技术需要控制煤粉粒径,控制粒径意味着锅炉需配置更强分离能力的旋风分离器,否则会增大CFB锅炉的飞灰不完全燃烧损失,导致其经济性降低<sup>[88]</sup>。

#### 3.2 燃料高温预热技术

燃料高温预热技术指低空气当量比的一次风携带着燃煤颗粒进入燃料预热改性装置(多为流化床),进行燃料部分燃烧和气化后产生温度超过 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 的由煤气和多孔焦炭组成的气固混合燃料。煤气中含有 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 等可燃气体,其气相燃烧反应可促进炉内焦炭的气固燃烧过程<sup>[89]</sup>。经预热后的高温半焦在预热装置内发生燃烧破裂,与原料相比粒径减小且孔隙结构更发达,亦有利于燃烧反应的进行。高温气固混合燃料进入锅炉后,与二次风混合后迅速着火燃烧,并辅以三次风燃尽。HUI et al<sup>[90]</sup>研究表明加装了炉外燃料预热改性装置后,在较低负荷范围( $10\% \sim 30\%$ )时升负荷速率明显上升,在 $25\%$ 负荷下达到最大升负荷速率( $4.17\%/min$ )。TANG et al<sup>[91]</sup>研究结果表明 $30\% \sim 100\%$ 额定负荷下的燃料预热后,CFB锅炉实验装置平均升负荷速率为 $1.62\%/min$ ,是常规燃烧情况下的 $2.5$ 倍以上。朱建国等<sup>[92]</sup>在某CFB锅炉投用预热燃烧器,结果表明预热燃烧器对炉膛温度分布在满负荷时无影响,但锅炉负荷调节深度降低了 $18\%$ 。采用燃料高温预热技术可减小CFB锅炉内燃料的燃烧惯性,维持了其低负荷下低氮燃烧和 $98.6\%$ 以上的燃烧效率<sup>[93]</sup>。但采用燃料高温预热技术需要在CFB锅炉外配置气化炉,提高了机组的初期投资与后期维护成本。

## 4 总结与展望

CFB锅炉燃烧热惯性大、升负荷速率慢等灵活性问题亟待解决,本研究探讨了多种燃烧模型,并分析了给煤粒径、床温、一二次风氧气体积分数和

燃料特性对炉内燃烧速率和其他燃烧行为的影响,总结了国内外提升CFB锅炉升负荷速率的技术。降低给煤粒径可有效降低燃料燃烧过程的活化能与氧气的扩散阻力,显著提高给煤的燃烧速率与释热速率,降低CFB锅炉的燃烧惯性与传热惯性,提高CFB锅炉内的燃烧响应速率与CFB锅炉升负荷速率。CFB锅炉床温提高,可使燃煤颗粒破碎为更小粒子,促进炉内燃烧速率的提高,并导致稀相区燃烧份额增大,有利于锅炉灵活性的提升。一二次风氧气体积分数的提高亦可增大炉内燃料的燃烧速率,改善了燃料燃烧过程,减小密相区与稀相区床温温差。选择炭化程度低、反应活性好的煤或掺烧生物质等易燃燃料可改善CFB锅炉内燃料的着火特性,提高燃烧速率。未来将从以下几个方面对提升锅炉升负荷速率进行深入探究。

1) 通过改善燃煤燃烧特性、降低粒径及采用燃料预热等手段快速调节燃料释热速率,建立燃煤燃烧机理模型,探索燃料特性改变后炉内燃烧份额分布规律,研发燃煤燃烧干预技术,以提升CFB锅炉燃烧速率响应速度。

2) 探索农林生物质及氨、氢等低碳多元燃料掺烧对CFB锅炉低负荷下稳燃特性及升负荷时炉内燃烧行为的影响,探讨燃料调整对炉内燃烧份额分布的影响规律,研发多元低碳燃料掺烧干预技术,以提升锅炉升负荷速率。

3) 探究CFB锅炉压火条件下床料内即燃碳燃烧特性,开发即燃碳燃烧过程机理模型,探讨床料内即燃碳燃烧活性及浓度对压火热备时长的影响规律以及燃料燃烧特性对压火后快速启动速率的影响规律。

### 符号说明

$A$ —频率因子, $\text{min}^{-1}$	$m_p$ —煤颗粒质量, $\text{kg}$
$C_1$ —扩散速率常数, $(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{1.33})/\text{s}$	$p_{\text{ox}}$ —焦炭颗粒周围的气相氧化剂分压, %
$C_2$ —化学反应速率常数, $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)/\text{s}$	$R$ —通用气体常数, $\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
$C_{\text{ox}}$ —氧气摩尔浓度, $\text{mol}/\text{m}^3$	$R_c$ —化学反应速率系数, $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)/\text{s}$
$d_p$ —煤颗粒粒径, $\text{m}$	$R_d$ —氧气扩散速率系数, $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)/\text{s}$
$D_{\text{ox}}$ —氧气扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$	$Sh$ —舍伍德数
$E$ —活化能, $\text{kJ}/\text{mol}$	$t$ —煤颗粒燃烧时间, $\text{s}$
$f(\alpha)$ —反应机理模型函数的微分形式	$T_p$ —煤颗粒温度, $\text{K}$
$k$ —燃烧速率常数, $\text{m}/\text{s}$	$T_g$ —煤颗粒表面气体的温度, $\text{K}$
$k_0$ —指前因子, $\text{m}/\text{s}$	$\alpha$ —转化率
$k_d$ —扩散速率常数, $\text{m}/\text{s}$	$\beta$ —升温速率, $\text{K}/\text{min}$
$k_s$ —本征化学反应速率常数, $\text{m}/\text{s}$	$\varphi$ —机械因子
$k(T_p)$ —样品温度为 $T_p$ 时的反应速率常数, $\text{K}^{-1}$	

### 参 考 文 献

- [1] 杨倩鹏, 林伟杰, 王月明, 等. 火力发电产业发展与前沿技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3787-3794.  
YANG Qianpeng, LIN Weijie, WANG Yueming, et al. Industry development and frontier technology roadmap of thermal power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3787-3794.
- [2] 马汀山, 王 妍, 吕 凯, 等. “双碳”目标下火电机组耦合储能的灵活性改造技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(增刊1): 136-148.  
MA Tingshan, WANG Yan, LYU Kai, et al. Research progress on flexibility transformation technology of coupled energy storage for thermal power units under the “dual-carbon” goal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(Supplement 1): 136-148.
- [3] 潘 博, 陈晓龙, 宋大勇, 等. 600 MW 四角切圆燃煤锅炉灵活性改造后燃烧优化的数值模拟及验证[J]. 煤炭转化, 2025, 48(1): 124-133.  
PAN Bo, CHEN Xiaolong, SONG Dayong, et al. Numerical simulation and verification of combustion optimization of a 600 MW tangentially coal-fired boiler after flexibility retrofit[J]. Coal Conversion, 2025, 48(1): 124-133.
- [4] 胡相余, 许仁发, 孟 涛, 等. 超超临界二次再热锅炉关键技术研究进展[J]. 煤炭转化, 2022, 45(6): 89-100.

- HU Xiangyu, XU Renfa, MENG Tao, et al. Research progress on key technology of ultra-supercritical double reheat boiler[J]. Coal Conversion, 2022, 45(6): 89-100.
- [5] 赵 强, 傅 斌, 金 燕, 等. 350 MW 大型循环流化床锅炉 SO<sub>2</sub>和 NO<sub>x</sub>超低排放运行特性研究[J]. 煤炭转化, 2022, 45(6): 80-88.
- ZHAO Qiang, FU Bin, JIN Yan, et al. Study on operating characteristics of ultra-low SO<sub>2</sub> emission and NO<sub>x</sub> emission of 350 MW large circulating fluidized bed boiler[J]. Coal Conversion, 2022, 45(6): 80-88.
- [6] 王 虎, 范浩东, 辛胜伟, 等. 超临界循环流化床锅炉深度调峰技术研究与应用[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(12): 11-17.
- WANG Hu, FAN Haodong, XIN Shengwei, et al. Research and application of depth peak regulation technology for supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(12): 11-17.
- [7] 彭 中, 杨光兰, 邹万竹, 等. 600 MW 超临界 CFB 机组深度调峰运行技术[J]. 能源科技, 2020, 18(1): 55-58.
- PENG Zhong, YANG Guanglan, WU Wanzhu, et al. 600 MW supercritical CFB units deep peak-regulating operation technology [J]. Energy Technology, 2020, 18(1): 55-58.
- [8] 袁登友, 欧志中, 廖 鹏, 等. 300 MW 循环流化床锅炉机组压火的特性分析[J]. 中国电力, 2008, 41(7): 43-46.
- YUAN Dengyou, OU Zhizhong, LIAO Peng, et al. Characteristic analysis of banked fire for 300 MW CFB boilers[J]. Electric Power, 2008, 41(7): 43-46.
- [9] 申 欣, 赵 强, 乔晓磊, 等. 超临界 CFB 锅炉压火特性现场试验与数值模拟[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2797-2807.
- SHEN Xin, ZHAO Qiang, QIAO Xiaolei, et al. Field test and numerical simulation of banked fire characteristics of supercritical CFB boiler[J]. Journal of the China Coal Society, 2022, 47(7): 2797-2807.
- [10] 吕俊复, 蒋 苓, 柯希玮, 等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 514-522.
- LYU Junfu, JIANG Ling, KE Xiwei, et al. Future of circulating fluidized bed combustion technology in China for carbon neutralization[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 514-522.
- [11] 吕俊复, 杨海瑞, 郭庆杰, 等. 水冷方形分离循环流化床锅炉的启动与压火[J]. 电站系统工程, 2000, 16(6): 323-325.
- LYU Junfu, YANG Hairui, GUO Qingjie, et al. Start-up and hold-down performance of a CFB boiler with water cooled square cyclone[J]. Power System Engineering, 2000, 16(6): 323-325.
- [12] 杨俏发. 循环流化床机组深度调峰试验研究[J]. 山西电力, 2018, 38(6): 51-53.
- YANG Qiaofa. Experimental study on deep load regulation of circulating fluidized bed units[J]. Shanxi Electric Power, 2018, 38(6): 51-53.
- [13] 张洪福, 高明明, 于海洋, 等. 300 MW 深度调峰循环流化床机组负荷响应特性研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(9): 1116-1122.
- ZHANG Hongfu, GAO Mingming, YU Haoyang, et al. Study on load response characteristics of a 300 MW circulating fluidized bed unit with deep peak regulation[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(9): 1116-1122.
- [14] WANG Long, YANG Dong, SHEN Zhi, et al. Thermal-hydraulic calculation and analysis of a 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler with annular furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95: 42-52.
- [15] CASTILLA G M, MONTAÑÉS R M, PALLARÈS D, et al. Comparison of the transient behaviors of bubbling and circulating fluidized bed combustors[J]. Heat Transfer Engineering, 2023, 44(4): 303-316.
- [16] 董中豪, 卢啸风, 史丽超, 等. 炉膛耐火材料热惯性对循环流化床锅炉调峰速率的影响[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 514-524.
- DONG Zhonghao, LU Xiaofeng, SHI Lichao, et al. Influence of thermal inertia of refractory material in furnace on the peak regulating rate of circulating fluidized bed boiler[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 514-524.
- [17] 李金晶, 李 燕, 吕俊复, 等. 循环流化床锅炉炉内传热的影响因素[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(11): 2026-2030.
- LI Jinjing, LI Yan, LYU Junfu, et al. Factors affecting of the heat transfer in circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(11): 2026-2030.
- [18] 胡仙楠, 邓博宇, 刘欢鹏, 等. 循环流化床锅炉负荷快速调节技术现状及发展趋势[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(6): 11-23.
- HU Xiannan, DENG Boyu, LIU Huanpeng, et al. Status and development trend of rapid load regulation technology for circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 11-23.
- [19] 吕俊复, 佟博恒, 董建勋, 等. 循环流化床内煤矸石一维燃烧模型[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2418-2425.
- LYU Junfu, TONG Boheng, DONG Jianxun, et al. One-dimensional model of coal gangue combustion in circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of the China Coal Society, 2016, 41(10): 2418-2425.
- [20] 马李洋, 杨宇轩, 王晓霞, 等. 长焰煤贫氧燃烧放热特性参数实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(1): 10-12.

- MA Liyang, YANG Yuxuan, WANG Xiaoxia, et al. Experimental study on exothermal parameters of long-flame coal combustion in oxygen-depleted air[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(1): 10-12.
- [21] 汪 军, 马其良, 张振东, 等. 工程燃烧学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 205-206.  
WANG Jun, MA Qiliang, ZHANG Zhendong, et al. *Engineering combustion*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 205-206.
- [22] COATS A W, REDFERN J P. Kinetic parameters from thermogravimetric data[J]. *Nature*, 1964, 201: 68-69.
- [23] 廖艳芬, 马晓茜. 城市污水污泥燃烧特性和动力学特性分析[J]. *燃料化学学报*, 2009, 37(3): 296-301.  
LIAO Yanfen, MA Xiaoqian. Combustion behavior and kinetic characteristics of a city sewage sludge[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2009, 37(3): 296-301.
- [24] 王 擎, 吴吓华, 孙佰仲, 等. 桦甸页岩半焦燃烧反应动力学研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(7): 29-34.  
WANG Qing, WU Xiahua, SUN Baizhong, et al. Combustion reaction kinetics study of Huadian oil shale semi-coke[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(7): 29-34.
- [25] 何爱玲. 生物质燃气与煤耦合燃烧规律及掺混比检测方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021: 53-57.  
HE Ailing. Study on the coupling combustion law of bio-syngas and coal and the determination methods of blending ratio[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021: 53-57.
- [26] 寿恩广. 生物质与煤循环流化床混合富氧燃烧特性研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2014: 40-42.  
SHOU Enguang. Study on oxy-fuel combustion characteristics of biomass and coal blending in circulating fluidized bed[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 40-42.
- [27] 温宏炎. 油泥焦化床燃烧处理技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020: 58-60.  
WEN Hongyan. Research on combustion treatment technology of oil sludge char in fluidized bed[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020: 58-60.
- [28] SMOOT L D, SMITH P J.  $\text{NO}_x$  pollution formation in a turbulent coal system in coal combustion and gasification[M]// SMOOT L D, SMITH P J. *Coal Combustion and Gasification*. New York: Springer, 1985.
- [29] HASHIMOTO N, SHIRAI H. Numerical simulation of sub-bituminous coal and bituminous coal mixed combustion employing tabulated-devolatilization-process model[J]. *Energy*, 2014, 71: 399-413.
- [30] 王 芳. 循环流化床锅炉掺烧煤矸石炉内数值模拟与燃烧优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 46-50.  
WANG Fang. Numerical simulation and combustion optimal of co-combustion with coal gangue in circulating fluidized bed boiler[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 46-50.
- [31] 贾东坡. 循环流化床锅炉燃烧优化数值模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014: 39-52.  
JIA Dongpo. Research on numerical simulation of combustion optimization for circulating fluidized bed boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014: 39-52.
- [32] 门冠华. 循环流化床锅炉燃烧系统数值模拟及优化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018: 30-45.  
MEN Guanhua. Numerical simulation and optimize research of combustion system of circulating fluidized bed boiler[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2018: 30-45.
- [33] RAJAN R R, WENA C Y. A comprehensive model for fluidized bed coal combustors[J]. *AIChE Journal*, 1980, 26(4): 642-655.
- [34] FIELD M A, GILL D W, MORGAN B B. Combustion of pulverized coal[J]. *BCURA*, 1967, 14(2): 237-248.
- [35] 张冲冲. 循环流化床锅炉变负荷过程中污染物排放动态特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019: 39-42.  
ZHANG Chongchong. Study on dynamic characteristics of pollutant emission from CFB boiler under variable load[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019: 39-42.
- [36] 张 力. 300 MW 循环流化床锅炉燃烧系统建模与优化控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2022: 38-51.  
ZHANG Li. Combustion system modeling and optimization control of 300 MW circulating fluidized bed boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022: 38-51.
- [37] 刘仍帅. 660 MW 超临界 CFB 锅炉炉膛内煤燃烧特性的数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 52-55.  
LIU Rengshuai. Numerical investigation of coal combustion characteristics in a 660 MW supercritical CFB boiler[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018: 52-55.
- [38] 李振杰. CFB 内多组分颗粒和富氧燃烧下流动和燃烧特性的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 46-60.  
LI Zhenjie. Numerical simulation of fluidization and combustion characteristics of multicomponent particles and oxygen-enriched combustion in CFB[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 46-60.
- [39] 杜 奇. 循环流化床密相区颗粒扩散与燃烧研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 51-56.

- DU Qi. Study on solids diffusion and combustion in the dense-phase zone of a CFB boiler[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 51-56.
- [40] 霍志红. 增压富氧燃烧CFB传热特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 43-45.  
HUO Zhihong. Study on heat transfer of the pressurized oxygen-enriched combustion circulating fluidized bed[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011: 43-45.
- [41] PILAR G, JUAN A, LUIS F D, et al. Circulating fluidised bed co-combustion of coal and biomass[J]. Fuel, 2004, 83(3): 277-286.
- [42] 帅志昂. 660 MW 循环流化床锅炉流动和燃烧特性的数值模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 44-47.  
SHUAI Zhiang. Numerical simulation of the flow and combustion characteristics of the 660 MW circulating fluidized bed[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 44-47.
- [43] XIE Jun, ZHONG Wenqi, JIN Baosheng, et al. Three-dimensional Eulerian-Eulerian modeling of gaseous pollutant emissions from circulating fluidized-bed combustors[J]. Energy and Fuels, 2014, 28(8): 5523-5533.
- [44] BASU P. Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(22): 5547-5557.
- [45] 吕俊复, 尚曼霞, 柯希玮, 等. 粉煤循环流化床燃烧技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 430-437.  
LYU Junfu, SHANG Manxia, KE Xiwei, et al. Powered coal circulating fluidized bed combustion technology[J]. Journal of the China Coal Society, 2023, 48(1): 430-437.
- [46] 黎永. 循环流化床燃烧条件下焦炭反应性实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2004: 83-84.  
LI Yong. Experimental study on coal char reactivity under circulating fluidized bed combustion conditions[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004: 83-84.
- [47] 索疆舜, 崔志刚, 马素霞, 等. CFB 锅炉飞灰含碳量影响因素分析[J]. 热力发电, 2016, 45(7): 84-87.  
SUO Jiangshun, CUI Zhigang, MA Suxia, et al. Influence factors of carbon content in fly ash in circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(7): 84-87.
- [48] 姜秀民, 杨海平, 刘辉, 等. 粉煤颗粒粒度对燃烧特性影响热分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 143-146.  
JIANG Xiumin, YANG Haiping, LIU Hui, et al. Analysis of the effect of coal powered granularity on combustion characteristics by thermogravimetry[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 143-146.
- [49] JAYARAMAN K, KOK M V, GOKALP I. Pyrolysis, combustion and gasification studies of different sized coal particles using TGA-MS[J]. Applied Thermal Engineering, 2017: 125: 1446-1455.
- [50] KÖK M V, ÖZBAŞ E, KARACAN O, et al. Effect of particle size on coal pyrolysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1998, 45(2): 103-110.
- [51] ADÁNEZ J, ABÁNADES J C, DIEGO L F D. Determination of coal combustion reactivities by burnout time measurements in a batch fluidized bed[J]. Fuel, 1994, 73(2): 287-293.
- [52] 张晓博, 赵虹, 杨建国. 不同粒径煤粉煤质变化及燃烧特性研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 999-1003.  
ZHANG Xiaobo, ZHAO Hong, YANG Jianguo. Study on the variation of coal properties for different coal diameters and its effects on combustion characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 999-1003.
- [53] 王勇. 煤样粒径对煤质分析特性及燃烧特性的影响研究[J]. 山西化工, 2023, 43(8): 4-6.  
WANG Yong. Effect of coal particle size on coal quality analysis results and combustion characteristics[J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(8): 4-6.
- [54] 于艺. 循环流化床锅炉炉内宽筛分颗粒流动特性数值模拟研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2024: 28-29.  
YU Yi. Numerical simulation study of fluidization characteristics of wide size distribution particles in furnace of circulating fluidized bed boilers[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2024: 28-29.
- [55] 蔡晋, 单露, 王志宁, 等. 超临界 350 MW 循环流化床锅炉变负荷特性[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 98-103.  
CAI Jin, SHAN Lu, WANG Zhining, et al. Variable load characteristics of a supercritical 350 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 98-103.
- [56] 莫鑫, 蔡润夏, 吕俊复, 等. 600 MW<sub>c</sub> 超临界循环流化床锅炉的运行特性[J]. 锅炉技术, 2016, 47(4): 34-38.  
MO Xin, CAI Runxia, LYU Junfu, et al. The performance evaluation of the 600 MW<sub>c</sub> super-critical circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 2016, 47(4): 34-38.
- [57] TANG Zihua, SONG Guoliang, YANG Xueting. Research on combustion and emission characteristics of circulating fluidized bed during load changes[J]. Journal of the Energy Institute, 2022: 105: 334-341.

- [58] CAI H Y, GUELL A J, CHATZAKIS I N, et al. Combustion reactivity and morphological change in coal chars: effect of pyrolysis temperature, heating rate and pressure[J]. *Fuel*, 1996, 75 (1): 15-24.
- [59] 张守玉, 黎永, 吕俊复, 等. 煤焦反应活性影响因素的探讨[J]. *煤炭转化*, 2003, 26(2): 25-28.  
ZHANG Shouyu, LI Yong, LYU Junfu, et al. Discussion on the effect of heating treatment on the intrinsic reactivity of coal-char[J]. *Coal Conversion*, 2003, 26(2): 25-28.
- [60] 杨海平, 陈汉平, 鞠付栋, 等. 热解温度对神府煤热解与气化特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(8): 40-45.  
YANG Haiping, CHEN Hanping, JUN Fudong, et al. Influence of temperature on coal pyrolysis and char gasification[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(8): 40-45.
- [61] 刘洋. 煤焦反应动力学控制区富氧燃烧机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
LIU Yang. Study on the mechanism of coal char oxyfuel combustion in reaction kinetics-controlled regime[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [62] 金则陈, 卢骏营, 胡维杰, 等. 污泥流化床富氧燃烧及污染物排放特性研究[J/OL]. *洁净煤技术*. <http://link.cnki.net/urlid/11.3676.TD.20230919.1514.002>.  
JIN Zechen, LU Junying, HU Weijie, et al. Oxy-fuel combustion of sludge in fluidized bed reactor and characteristic of pollutant emission[J/OL]. *Clean Coal Technology*. <http://link.cnki.net/urlid/11.3676.TD.20230919.1514.002>.
- [63] HONG Feng, CHEN Jiyu, WANG Rui, et al. Realization and performance evaluation for long-term low-load operation of a CFB boiler unit[J]. *Energy*, 2021, 214: Article 118877.
- [64] 李东雄, 韩豪杰, 王菁, 等. 循环流化床锅炉数值模拟研究进展[J]. *煤炭转化*, 2021, 44(3): 83-95.  
LI Dongxiong, HAN Haojie, WANG Jing, et al. Research progress of numerical simulation of circulating fluidized bed boiler[J]. *Coal Conversion*, 2021, 44(3): 83-95.
- [65] LEE S H, KIM S D, LEE D H, et al. Particle size reduction of anthracite coals during devolatilization in a thermobalance reactor[J]. *Fuel*, 2002, 81(13): 1633-1639.
- [66] 何宏舟. CFB锅炉洁净燃烧福建无烟煤的理论及试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 26-27.  
HE Hongzhou. Experimental and theoretical study on the cleaning combustion of Fujian anthracite in CFB boiler[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 26-27.
- [67] 段伦博, 周鸷, 屈成锐, 等. 50 kW 循环流化床  $O_2/CO_2$  气氛下煤燃烧及污染物排放特性[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(5): 7-12.  
DUAN Lunbo, ZHOU Wu, QU Chengrui, et al. Combustion and pollutant emission characteristics of coal in a 50 kW circulating fluidized bed under  $O_2/CO_2$  atmosphere[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(5): 7-12.
- [68] 蒋勇. 循环流化床局部富氧燃烧特性实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014: 35-36.  
JIANG Yong. Experimental study on characteristics of circulating fluidized bed with local oxygen-enriched combustion[D]. Changsha: Central South University, 2014: 35-36.
- [69] WU Zhou, ZHAO Changsui, DUAN Lunbo, et al. A simulation study of coal combustion under  $O_2/CO_2$  and  $O_2/RFG$  atmospheres in circulating fluidized bed[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 223: 816-823.
- [70] 王智微, 孙宝洪, 王立双, 等. 循环流化床燃烧室内细焦碳颗粒的燃尽特性分析[J]. *动力工程*, 2002, 22(2): 1697-1699.  
WANG Zhiwei, SUN Baohong, WANG Lishuang, et al. Burn-out characteristic of micro-char particles in the circulating fluidized bed combustor[J]. *Power Engineering*, 2002, 22(2): 1697-1699.
- [71] 卜昌盛. 煤颗粒流化床富氧燃烧机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2015: 79-80.  
BU Changsheng. Investigation on mechanism of oxy-fuel coal combustion in fluidized beds[D]. Nanjing: Southeast University, 2015: 79-80.
- [72] 仇韬, 丁艳军, 孔亮, 等. CFB锅炉动态特性与负荷和煤质的关系研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(32): 46-51.  
QIU Tao, DING Yanjun, KONG Liang, et al. Research of relationship between CFBB dynamic behavior and power and coal quality[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(32): 46-51.
- [73] 朱川, 罗鹏飞, 张宇宏, 等. 煤燃烧特征温度与变质程度的关系[J]. *动力工程学报*, 2015, 35(6): 445-450.  
ZHU Chuan, LUO Yunfei, ZHANG Hongyu, et al. Relationship between combustion characteristic temperature and metamorphic grade of coal[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2015, 35(6): 445-450.
- [74] 周俊虎, 平传娟, 杨卫娟, 等. 混煤燃烧反应动力学参数的热重研究[J]. *中国动力工程学报*, 2005, 25(2): 207-210.  
ZHOU Junhu, PING Chuanjun, YANG Weijuan, et al. Thermo-gravimetric research on dynamic combustion reaction parameters of blended coals[J]. *Chinese Journal of Power Engineering*, 2005, 25(2): 207-210.

- [75] 陈建原,孙学信. 煤的挥发分释放特性指数及燃烧特性指数的确定[J]. 动力工程,1987,7(5):13-18.  
CHEN Jianyuan,SUN Xuexin. Determination of volatile release characteristic index and combustion characteristic index of coal [J]. Power Engineering,1987,7(5):13-18.
- [76] 胡文斌,杨海瑞,吕俊复,等. 煤着火特性的热重分析研究[J]. 电站系统工程,2005,21(2):8-9.  
HU Wenbin,YANG Hairui,LYU Junfu, et al. Study on ignition properties of coals by using thermogravimetry [J]. Power System Engineering,2005,21(2):8-9.
- [77] 翟胜兵,李 伟,关靖宇. 某电厂CFB锅炉混煤着火特性分析[J]. 锅炉制造,2018,40(6):13-16.  
ZHAI Shengbing,LI Wei,GUAN Jingyu. Analysis to ignition properties of blended coals in CFB combustion [J]. Boiler Manufacturing,2018,40(6):13-16.
- [78] WANG Chunbo,SHAO Huan,LEI Ming, et al. Effect of the coupling action between volatiles, char and steam on isothermal combustion of coal char [J]. Applied Thermal Engineering,2016,93:438-445.
- [79] WANG Guangwei,ZHANG Jianliang,SHAO Jiugang, et al. Characterisation and model fitting kinetic analysis of coal/bio-mass co-combustion [J]. Thermochimica Acta,2014,591:68-74.
- [80] UNCHAISRI T,FUKUDA S. Investigation of ash formation and deposit characteristics in CFB co-combustion of coal with various biomass fuels [J]. Journal of the Energy Institute,2022,105:42-52.
- [81] 潘 智. 糠醛渣与重庆高硫煤在循环流化床中混合燃烧的试验研究 [D]. 重庆:重庆大学,2014:45-46.  
PAN Zhi. The experimental study of furfural residue and Chongqing high sulfur content coal co-combustion in circulating fluidized bed [D]. Chongqing:Chongqing University,2014:45-46.
- [82] 聂其红,孙绍增,李争起,等. 褐煤混煤燃烧特性的热重分析法研究 [J]. 燃烧科学与技术,2001,7(1):72-76.  
NIE Qihong,SUN Shaozeng,LI Zhengqi, et al. Thermogravimetric analysis on the combustion characteristics of brown coal blends [J]. Journal of Combustion Science and Technology,2001,7(1):72-76.
- [83] 葛宪福,张建生,辛胜伟,等. 超超临界循环流化床锅炉深度调峰技术可行性探讨 [J]. 锅炉技术,2022,53(6):34-40.  
GE Xianfu,ZHANG Jiansheng,XIN Shengwei, et al. Discussion on the feasibility of in-depth peak regulation for an ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Boiler Technology,2022,53(6):34-40.
- [84] YUE Guangxi,LYU Junfu,ZHANG Hai, et al. Design theory of circulating fluidized bed boilers [C]. Toronto:18th International Conference on Fluidized Bed Combustion,2005:135-146.
- [85] ZHANG Hai,LYU Junfu,YANG Hairui, et al. Heat transfer measurements inside the furnace of a 135 MW<sub>e</sub> CFB boiler [C]. Hangzhou:Proceedings of the 8th Circulating Fluidized Bed Technology,2005:254-260.
- [86] 潘雄峰,马素霞,陈 俊,等. 循环流化床低热值煤-高热值煤粉动态复合燃烧试验研究 [J]. 动力工程学报,2018,38(6):447-451.  
PAN Xiongfeng,MA Suxia,CHEN Jun, et al. Dynamic co-combustion experiments with low calorific raw coal and high calorific pulverized coal in a CFB boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2018,38(6):447-451.
- [87] LIU Zhongyuan,MA Suxia,PAN Xiongfeng, et al. Experimental study on the load response rate under the dynamic combined combustion of PC coal and CFB coal in a CFB boiler [J]. Fuel,2019,236:445-451.
- [88] 黄 中,孙献斌,时正海,等. 循环流化床锅炉旋风分离器数值模拟及改造 [J]. 热力发电,2008,37(6):38-41.  
HUANG Zhong,SUN Xianbin,SHI Zhenghai, et al. Numerical simulation of cyclonic separator for one CFB boiler and retrofit thereof [J]. Thermal Power Generation,2008,37(6):38-41.
- [89] ZHU Shujun,HUI Jicheng,LYU Qinggang, et al. Experimental study on pulverized coal combustion preheated by a circulating fluidized bed:preheating characteristics for peak shaving [J]. Fuel,2022,324(Part B): Article 124684.
- [90] HUI Jicheng,ZHU Shujun,ZHANG Xiaoyu, et al. Experimental study of deep and flexible load adjustment on pulverized coal combustion preheated by a circulating fluidized bed [J]. Journal of Cleaner Production,2023,418: Article 138040.
- [91] TANG Zihua,SONG Guoliang,SONG Weijian, et al. Experimental study on variation characteristics of combustion heat load in circulating fluidized bed under fuel high-temperature preheating modification [J]. Journal of the Energy Institute,2024:114: Article 101610.
- [92] 朱建国,韩会忠,李 栋,等. 240 t/h循环流化床锅炉深度灵活调峰工程示范 [J]. 中国特种设备安全,2024,40(10):89-93.  
ZHU Jianguo,HAN Huizhong,LI Dong, et al. The demonstration of 240 t/h circulating fluidized bed boiler with deeply flexible peak-shaving [J]. China Special Equipment Safety,2024,40(10):89-93.
- [93] MAN Chengbo,ZHU Jianguo,OUYANG Ziqu, et al. Experimental study on combustion characteristics of pulverized coal pre-heated in a circulating fluidized bed [J]. Fuel Processing Technology,2018,172:72-78.

## Research progress on combustion behavior of circulating fluidized bed boiler during peak shaving

WU Zhenguo<sup>1</sup> YANG Chuke<sup>1</sup> ZHANG Shouyu<sup>1,2,3</sup> XIAO Hongliang<sup>2</sup> WANG Junfeng<sup>2,4</sup>  
LYU Junfu<sup>2,5</sup> KE Xiwei<sup>2,3</sup> LYU Bangyong<sup>1</sup> HUANG Jiantian<sup>1</sup> LIANG Ning<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 200093 Shanghai, China; 2. Beijing Huairou Laboratory, 101499 Beijing, China; 3. Shanxi Research Institute of Huairou Laboratory, 030032 Taiyuan, China; 4. Harbin Boiler Company Limited, 150046 Harbin, China; 5. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China)

**ABSTRACT** Under the “dual carbon” strategy, coal power serves as a security guarantee for grids primarily powered by renewable energy. Circulating fluidized bed (CFB) combustion technology plays a crucial role in deep peak shaving for coal power, but its high thermal inertia limits the load variation rate of CFB boilers. Combustion control measures, such as reducing particle size and improving fuel combustion characteristics, can effectively reduce the flow, heat transfer, and combustion inertia of CFB boilers, significantly enhancing their flexibility. The primary heat release process during solid fuel combustion is char combustion. The common char combustion rate models, including the kinetics/diffusion surface reaction rate model, the shrinking core combustion model, and the Coats-Redfern integration method were summarized and compared. The results indicate that the main factors affecting char combustion rate include coal particle size, bed temperature, volume fraction of oxygen in primary and secondary air, and fuel type. The effects of these factors on combustion rate and other combustion behaviors in the furnace were summarized. Reducing coal particle size, increasing bed temperature, raising volume fraction of oxygen, and improving fuel characteristics all contribute to improving the combustion process and enhancing the load variation rate of CFB boilers. Based on the impacts of particle size, fuel characteristics, and other factors on combustion behavior in CFB furnaces, researchers both domestically and internationally have developed various technologies to improve CFB flexibility, including powdered coal circulating fluidized bed combustion and high-temperature fuel preheating. Additionally, green low-carbon multi-fuel co-combustion technologies can also be employed to increase the load-ramping rate of CFB boilers.

**KEYWORDS** circulating fluidized bed, char combustion, load-ramping rate, particle size, bed temperature, volume fraction of oxygen, characteristics of fuel

### HIGHLIGHT

1. This paper summarizes and compares common char combustion rate models. It was found that the main influencing factors of combustion include coal particle size, bed temperature, volume fraction of oxygen in primary and secondary air, and fuel type.

2. The influence of factors such as coal particle size, bed temperature, volume fraction of oxygen in primary and secondary air, and fuel type on combustion rate and other combustion behaviors was studied. Based on these findings, measures to improve the load fluctuation rate of CFB boilers were proposed.

(责任编辑 牛晓勇)