文章编号:1674-7607(2026)01-0010-09 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240663

掺烧棉秆对1 000 MW旋流对冲锅炉最低稳燃负荷的影响

宋红宇[1]， 马达夫[2]， 张守玉[1,3,4]， 徐梓航[1]， 周 义[1]，
吕邦勇[1]， 武振国[1]， 赵坤龙[1]， 胡 南[5]
(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093； 2. 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司，上海 200240； 3. 怀柔实验室山西研究院，山西太原 030032；
4. 北京怀柔实验室，北京 101499； 5. 长春工程学院 能源动力工程学院，吉林长春 130012)

摘 要：为探究掺烧生物质对锅炉最低稳燃负荷的影响，以某电厂1 000 MW超超临界旋流对冲锅炉为研究对象，模拟了不同负荷下纯煤工况以及添加掺烧比为10%的棉秆后锅炉内的燃烧状况，分析对比了不同负荷下炉膛内的温度分布和烟气氧气浓度分布，探讨了掺烧生物质后锅炉最低稳燃负荷的演变。结果表明：与纯煤工况相比，掺烧棉秆后燃烧器中心截面温度高于1 400 K的区域增大，着火距离缩短0.24%～3.45%，炉膛出口氧气浓度上升0.22%～0.24%，燃烧稳定性增强；该锅炉燃用设计煤种的最低稳燃负荷为40%，掺烧棉秆后锅炉最低稳燃负荷可降至30%，因此掺烧生物质可以有效地促进旋流对冲锅炉内的稳燃性能，降低锅炉的最低稳燃负荷，增强锅炉的深度调峰能力。

关键词：旋流对冲锅炉；生物质；掺烧；最低稳燃负荷；数值模拟
中图分类号：TK6 **文献标志码**：A **学科分类号**：470.30

Effect of Co-firing Cotton Stalks on the Lowest Steady Combustion Load of a 1 000 MW Swirl-opposed Boiler

SONG Hongyu[1]， *MA Dafu*[2]， *ZHANG Shouyu*[1,3,4]， *XU Zihang*[1]， *ZHOU Yi*[1]，
LÜ Bangyong[1]， *WU Zhenguo*[1]， *ZHAO Kunlong*[1]， *HU Nan*[5]
(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China; 3. Shanxi Research Institute of Huairou Laboratory, Taiyuan 030032, Shanxi Province, China; 4. Beijing Huairou Laboratory, Beijing 101499, China; 5. School of Energy and Power Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, Jilin Province, China)

Abstract: To investigate the effect of biomass co-firing on the lowest steady combustion load of the boiler, a 1 000 MW ultra-supercritical swirl-opposed boiler was taken as the research object. The combustion conditions of pure coal and the addition of cotton stalk(CS) with a co-firing ratio of 10% were simulated under different loads in the boiler. The temperature distribution and oxygen concentration distribution in the furnace under different loads were analyzed, and the evolution of the minimum stable combustion load of the

收稿日期：2024-10-24 **修订日期**：2025-01-04
基金项目：吉林省科技发展计划资助项目(20240304088SF)
作者简介：宋红宇(1996—)，男，江苏南通人，硕士研究生，主要研究方向为锅炉灵活性运行/改造。
张守玉(通信作者)，男，教授，博士，E-mail：zhangsy-guo@163.com。

boiler after co-firing biomass was explored. Results show that compared with pure coal conditions, the area with the temperature above 1 400 K of the central section of the burner increases after co-firing cotton stalks, the ignition distance is shortened by 0.24%-3.45%, the oxygen concentration at the furnace outlet increases by 0.22%-0.24%, and the combustion stability is greatly enhanced. The lowest steady combustion load of the designed coal is 40%, and the lowest steady combustion load of the boiler mixed with CS can be reduced to 30%. Therefore, biomass-mixed combustion can effectively enhance the steady combustion performance and decrease the lowest steady combustion load of the swirl-opposed boiler, and thus the peaking capability of the boiler can be promoted.

Key words: swirl-opposed boiler; biomass; co-firing; lowest steady combustion load; numerical simulation

面对日趋严重的气候变暖、环境恶化等问题，我国于 2020 年 9 月明确提出“双碳”目标。为实现该目标，新能源发电势在必行[1]。但是，以风、光为代表的新能源发电具有波动性与不确定性的特点[2]。为保障我国电网安全，火电机组需要承担调峰的任务并长期在较低负荷下运行，这对火电机组的低负荷稳定运行能力提出了挑战[3]。

在《煤电低碳化改造建设行动方案(2024—2027年)》中提到了生物质掺烧、绿氨掺烧和碳捕集利用与封存 3 种技术，其中生物质掺烧技术最容易实现，成本最低[4-5]。生物质作为一种具有天然碳中和属性的可再生燃料，与燃煤发电的 CO_2 排放强度1 001 g/(kW•h)[6]相比，其 CO_2 排放强度仅有 18 g/(kW•h)，因此生物质能在促进碳减排方面有巨大的潜力。此外，生物质氮含量较低、挥发分较高，掺烧生物质能减小锅炉的 NO_x 排放量并提高锅炉燃烧稳定性[7-8]。利用生物质能源代替传统煤炭燃料，是当前实现煤电低碳化、助力“碳中和”战略的有效途径[5,9]。

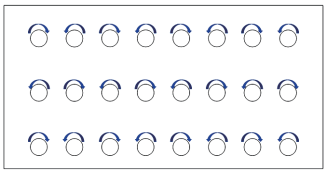
数值模拟是目前研究锅炉燃烧特性的一种常用方法[10]。煤粉锅炉在低负荷运行时存在燃烧稳定性差、污染物排放量高等问题[11-12]，在燃煤锅炉中掺烧生物质有利于燃烧以及减少污染物的排放。宫健等[13]对某 350 MW 四角切圆锅炉进行掺烧生物质的数值研究，结果表明掺烧生物质有利于锅炉的稳定燃烧。李加护等[14]数值模拟了 300 MW 燃煤锅炉掺烧生物质燃气，结果表明掺烧生物质燃气能降低炉膛出口处的 NO_x 排放。马达夫等[15]对比研究了 350 MW 四角切圆锅炉在 20%负荷下掺烧生物质颗粒前后炉内的燃烧特性，结果表明生物质颗粒的掺烧有利于着火及稳定燃烧，炉膛出口处 NO_x 含量明显下降。此外，Li 等[16]研究表明，使用相同热值的生物质完全取代煤炭，NO_x 排放量几乎减少了一半。然而，有关生物质掺烧对燃煤锅炉最低稳燃负荷影响的研究较少，需要进一步探究。

本文以某 1 000 MW 旋流对冲锅炉为研究对象，模拟了不同负荷下纯煤燃烧工况，获得了纯煤工况下的最低稳燃负荷。在此基础上，添加掺烧比为10%的棉秆进行研究，考察了棉秆掺烧对锅炉内燃烧特性的影响。最后，探索了生物质掺烧工况下该锅炉的最低稳燃负荷，以探明生物质掺烧对锅炉最低稳燃负荷的降低作用，为生物质资源的利用和锅炉深度调峰提供一定的指导。

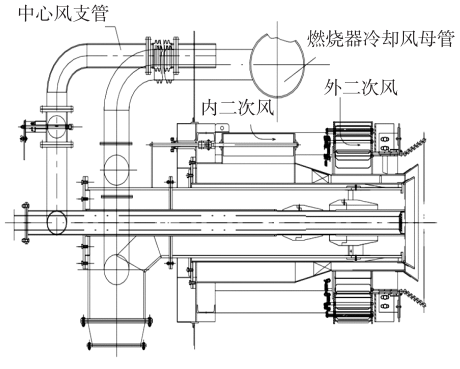
1　研究对象

1.1　锅炉概况

本研究对象为 1 000 MW 前后墙旋流对冲锅炉，炉膛的宽度为 33 973.4 mm、深度为 15 558.4 mm、高度为 66 737.9 mm。锅炉采用 48 台低 NO_x 旋流煤粉燃烧器，前、后墙各 3 层布置，制粉系统采用 6 台中速磨煤机。图 1 给出了燃烧器布置和燃烧器结构示意图。在前、后墙旋流煤粉燃烧器的上方各布置



(a) 燃烧器布置图



(b) 燃烧器结构图

图 1　燃烧器概况

Fig. 1　Schematic diagram of the burner

了 3 层燃尽风，每层 8 只燃尽风喷口。

1.2 网格划分

本文使用 GAMBIT 软件对锅炉 1∶1建模，考虑到锅炉结构复杂，对整个计算模型进行适当的简化：锅炉炉膛在宽度方向是对称的，取宽度的一半作为计算区域，以减少网格数量。忽略燃烧器的结构，将其简化为圆形和圆环[17-18]。

为兼顾计算量和计算精度，对网格无关性进行验证，最终选用 166 万网格数量的模型用于后续计算，所建网格见图 2。

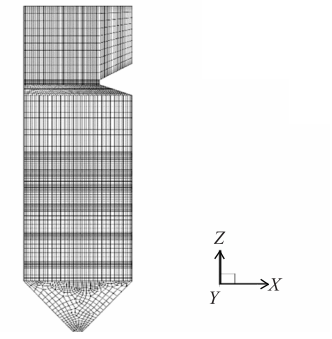


图 2 锅炉网格划分

Fig. 2 Boiler grid division

2 研究工况

首先，模拟了不同负荷下锅炉内纯煤燃烧工况。其次，对纯煤工况下能够稳燃的棉秆进行模拟，探究其对锅炉内稳燃特性的影响。最后，对掺烧棉秆的工况进行降负荷模拟，探究掺烧棉秆的最低稳燃负荷。模拟采用的煤和棉秆的元素分析及工业分析见表 1。各工况的数值模拟参数如表 2 所示。其中，前墙从上到下依次为 1、2、3 号磨煤机，后墙燃烧器从上到下依次为 4、5、6 号磨煤机；风粉配比为单个燃烧器的一次风量加二次风量与燃料量之比。煤粉在下层燃烧器停留时间最长，与停中、下层磨煤机相比，停上层磨煤机时煤粉燃尽率更高、飞灰含碳量更低[19]，且机组设计时等离子或者油燃烧器等稳燃系统都在下层，因此降负荷运行时优先停用上层磨煤机。

表 3 为纯煤燃烧时炉膛出口烟温计算值与模拟结果的对比。由表 3 可见，炉膛出口烟温误差均在±5%以内，表明模拟结果较为准确，模型选择合理，可以用于后续模拟研究。

表 1 煤和棉秆的元素分析及工业分析

Tab. 1 Elemental analysis and industrial analysis of coal and cotton stalks

燃料	元素分析					工业分析				低位发热量 $Q_{net,ar}$/(MJ·kg^{-1})
	$w(C_{ar})$/%	$w(H_{ar})$/%	$w(O_{ar})$/%	$w(N_{ar})$/%	$w(S_{ar})$/%	$w(M_{ar})$/%	$w(A_{ar})$/%	$w(FC_{ar})$/%	$w(V_{ar})$/%	
设计煤种	57.03	2.87	2.39	0.94	1.29	9.00	26.48	53.98	10.54	21.22
棉秆	47.60	3.29	34.94	0.17	0.40	10.70	2.90	11.30	75.10	17.50

表 2 数值模拟参数设置

Tab. 2 Numerical simulation parameter settings

工况		磨煤机组合	风粉配比	总煤量/(t·h^{-1})	总生物质量流量/(t·h^{-1})	一次风速/(m·s^{-1})	内二次风速/(m·s^{-1})	外二次风速/(m·s^{-1})	燃尽风速/(m·s^{-1})
纯煤	1 000 MW	1、2、3、4、5、6	5.91	395.45	0	21.03	27.74	37.34	30
	750 MW	1、2、3、5、6	7.10	296.59	0	18.93	24.97	33.61	30
	500 MW	2、3、5、6	8.79	197.72	0	15.77	20.81	28.01	30
	400 MW	2、3、6	12.32	158.18	0	16.82	22.19	29.87	30
	350 MW	2、3、6	11.83	138.41	0	14.72	19.42	26.14	30
掺烧棉秆	1 000 MW	1、2、3、4、5、6	5.68	355.9	47.85	20.61	27.19	36.59	30
	750 MW	1、2、3、5、6	6.81	266.93	35.89	18.55	24.47	32.93	30
	500 MW	2、3、5、6	8.96	177.95	13.92	15.46	20.39	27.44	30
	400 MW	2、3、6	11.36	142.36	19.14	16.49	21.75	29.27	30
	350 MW	2、3、6	11.36	124.57	16.75	14.43	19.03	25.62	30
	300 MW	3、6	17.04	106.77	14.35	18.54	24.46	32.94	30
	250 MW	3、6	17.03	88.98	11.96	15.45	20.38	27.45	30

表 3　炉膛出口烟温模拟结果与计算值

Tab. 3　Simulation results and calculated values of furnace outlet flue gas temperature

工况	出口烟温计算值/K	出口烟温模拟值/K	误差/%
1 000 MW	1 284	1 335	3.97
750 MW	1 207	1 246	3.23
500 MW	1 111	1 156	4.05
400 MW	1 066	1 092	2.44

3　计算结果及分析

3.1　纯煤工况的最低稳燃负荷

一般使用着火距离、火焰形状和燃烧区域温度等评定锅炉最低稳燃能力[20]。对于旋流对冲锅炉，炉膛内能否稳定燃烧主要取决于燃烧器出口能否形成稳定的高温区域，燃烧器中心截面高于 1 400 K 的连续高温区域面积越大，二次风卷吸至回流区的烟气量越多，锅炉的燃烧稳定性越强[21]。

图3 为纯煤工况不同负荷下沿炉膛高度方向的炉内截面平均温度，图 4 为纯煤工况不同负荷下炉膛纵截面温度分布云图。如图 3、图 4 所示，随着锅炉负荷从 1 000 MW 降至 400 MW，炉膛最高温度逐渐下降，燃烧器中心截面温度高于 1 400 K 的区域面积逐渐减小，主燃烧区的截面平均温度不断降低。原因是随着旋流对冲锅炉负荷不断降低，进入炉膛的煤粉量减少，导致炉内燃烧产生的热量减少，炉膛内的燃烧稳定性降低。当负荷降至 350 MW 时，炉膛整体温度急剧下降，表明此时炉内稳燃工况恶化。

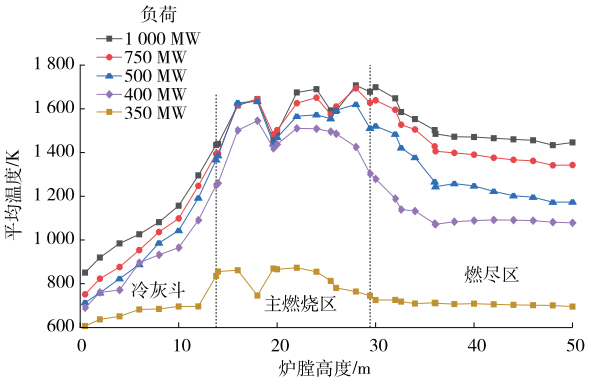


图 3　纯煤工况不同负荷下沿炉膛高度方向炉内截面平均温度

Fig. 3　Average temperature of the furnace section along the height direction of the furnace under different loads in pure coal operating conditions

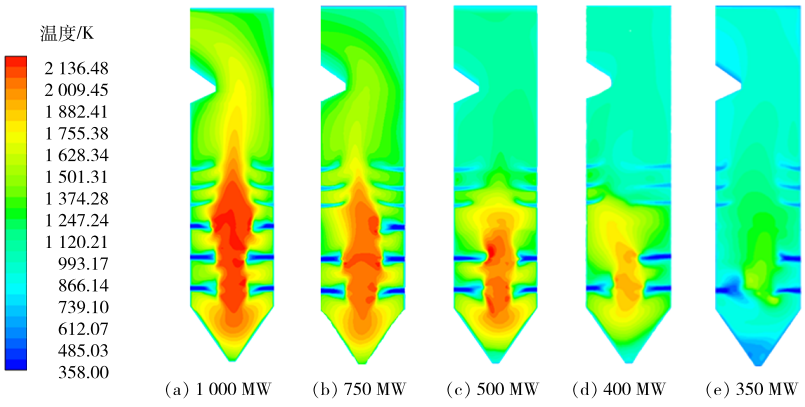


图 4　纯煤工况不同负荷下炉膛纵截面温度分布云图

Fig. 4　Cloud map of furnace longitudinal section temperature distribution under different loads in pure coal operating conditions

根据灰平衡原理，各工况下煤粉的燃尽率 B 可根据式(1)计算得到。

$$B=[1-(\omega_0/\omega_1)]\times 100/(1-\omega_0/100) \quad (1)$$

式中：ω_0 为入炉时煤粉干燥基灰分质量分数，为已知值；ω_1 为炉膛出口飞灰的灰分质量分数。

可以通过 ω_0、模拟时输入的干燥基煤粉的煤焦质量分数和模拟统计获得的煤焦转化率数据计算得到 B[22]。同理，生物质的燃尽率也可通过此方法测得。表 4 为纯煤工况不同负荷下煤粉的燃尽率。由表 4 可知，随着锅炉负荷从 1 000 MW 降至 400 MW，煤粉的燃尽率从 99.92%降至 98.13%。当负荷降至 350 MW 时，煤粉的燃尽率急剧下降至 33.46%，进一步表明此时该型锅炉炉内稳燃工况恶化。

表 4　纯煤工况不同负荷下煤粉的燃尽率

Tab. 4　Burnout rate of coal powder under different loads in pure coal operating conditions

负荷/MW	煤粉的燃尽率/%
1 000	99.92
750	99.59
500	99.21
400	98.13
350	33.46

煤粉的着火距离是研究炉膛中煤粉气流着火性能的关键参数，可反映炉内燃烧的稳定性[15]。根据谢苗诺夫着火理论[23]，燃料达到着火条件需满足：

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}\geqslant 0,\quad \frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}x^2}=0 \tag{2}$$

式中：x 为沿射流方向距离喷口的长度，m；T 为该点的温度，K。

着火点为温度曲线的拐点，该点所对应的温度即为着火温度，由燃烧器喷口至该点的距离即为着火距离。图 5 为纯煤工况不同负荷下锅炉内沿煤粉射流方向的温度分布。如图 5 所示，随着锅炉运行负荷从 1 000 MW 降至 400 MW，煤粉气流的着火距离从 3.76 m 逐渐延长至 4.67 m，表明随着负荷的降低，煤粉气流中煤粉浓度降低，挥发分燃烧释放出的热量减少，同时煤粉颗粒间的距离增大，难以形成集中的均相火焰，进而导致煤粉气流的着火距离延长[24]。

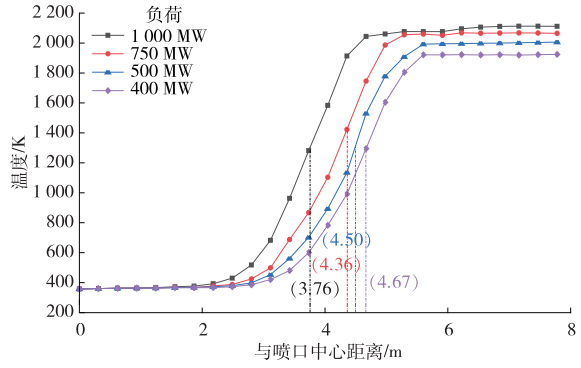


图 5 纯煤工况不同负荷下锅炉内沿煤粉射流方向的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along the coal powder jet direction inside the boiler under different loads in pure coal operating conditions

结合图 3～图 5 及表 4 可知，纯煤工况 350 MW 负荷下，沿炉膛高度方向的截面平均温度与其他工况相比显著下降，最高平均温度不足 900 K，煤粉燃尽率降至 33.46%，表明此工况下锅炉无法维持稳定燃烧。因此，本研究范围内此锅炉燃用设计煤种的最低稳燃负荷定为 400 MW。

3.2 掺烧棉秆工况与纯煤工况的对比

程宇婷[25]对小型旋流燃烧试验台进行生物质与煤粉共燃的数值模拟和实验研究，发现随着生物质掺烧比增大，燃烧器内的平均温度逐渐下降，CO 浓度逐渐降低。Huang 等[26]研究表明，生物质掺烧比过大，炉内燃烧效率会降低。因此，本研究范围内选用生物质的掺烧比为 10%。

3.2.1 温度分布对比

图 6 为不同负荷下各层燃烧器中心截面温度分布云图。

如图 6 所示，炉膛中间温度高，两边温度低，中心区域温度最高，炉膛的整体温度分布对称性良好，火焰充满度良好。与纯煤工况相比，掺烧棉秆后，燃烧器中心截面高于 1 400 K 的高温烟气回流区面积增大，燃烧稳定性增强，其原因是生物质高挥发分、高氢、高氧、低氮的特性使得生物质的燃烧性能优良、极易着火和燃尽，其燃烧性能优于国内典型煤种[27]。但是，由于生物质的发热量低于煤，导致炉膛的最高温度降低[18]。

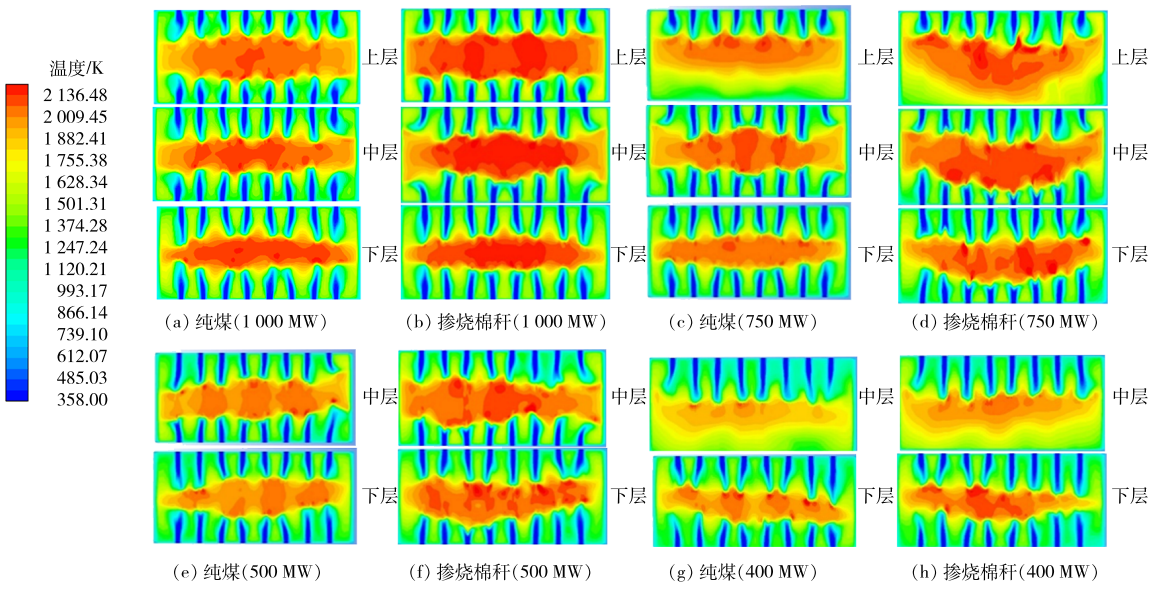


图 6 不同负荷下锅炉各层燃烧器中心截面温度分布云图

Fig. 6 Cloud map of temperature distribution at the center section of each burner layer of the boiler under different loads

图 7 为不同负荷下沿掺烧棉秆锅炉炉膛高度方向炉内截面平均温度。如图 7 所示，随炉膛高度增加，混燃工况下的炉膛截面平均温度分布与纯煤工况分布趋势一致，但是混燃工况下炉内平均温度较纯煤工况略低。在主燃烧区，燃料燃烧放出大量的热量，这是炉膛温度最高的区域，且在最上层燃烧器之后、燃尽风输入之前达到最大值，其原因是气流的上升导致下层燃烧器促进了上层燃烧器的燃烧[18]。

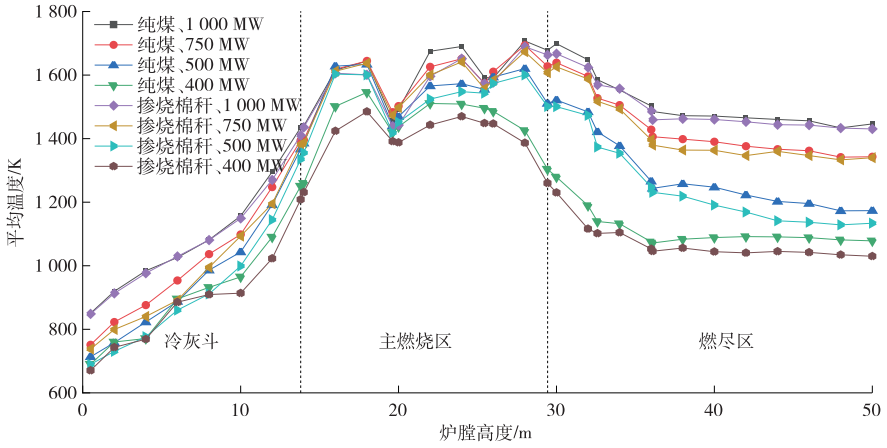


图 7　不同负荷下沿掺烧棉秆锅炉炉膛高度方向炉内截面平均温度

Fig. 7　Average temperature of the furnace section along the height direction of the co-fired cotton straw boiler under different loads

3.2.2　燃尽率对比

表 5 为不同负荷下掺烧棉秆锅炉炉膛内燃料的燃尽率。由表 5 可知，随着锅炉负荷从 1 000 MW 降至 400 MW，煤粉的燃尽率从 99.94% 降低至 98.51%，棉秆的燃尽率从 96.56% 降低至 95.03%。与纯煤工况相比，混燃工况下煤粉的燃尽率略微上升。

表 5　不同负荷下掺烧棉秆锅炉炉膛内燃料的燃尽率

Tab. 5　Burnout rate of fuel in the furnace of the co-fired cotton straw boiler under different loads

工况		生物质的燃尽率/%	煤粉的燃尽率/%
纯煤	1 000 MW		99.92
	750 MW		99.59
	500 MW		99.21
	400 MW		98.13
掺烧棉秆	1 000 MW	96.56	99.94
	750 MW	96.23	99.61
	500 MW	95.93	99.26
	400 MW	95.03	98.51

3.2.3　着火距离对比

图 8 为不同负荷下沿煤粉射流方向的温度分布。如图 8 所示，混燃工况下，随着锅炉运行负荷从 1 000 MW 降至 400 MW，煤粉气流的着火距离从 3.75 m 逐渐延长至 4.51 m。与纯煤工况相比，随着负荷的降低，着火距离变化趋势与其保持一致，但是同一负荷下，混燃工况的着火距离缩短了 0.24%～3.45%。

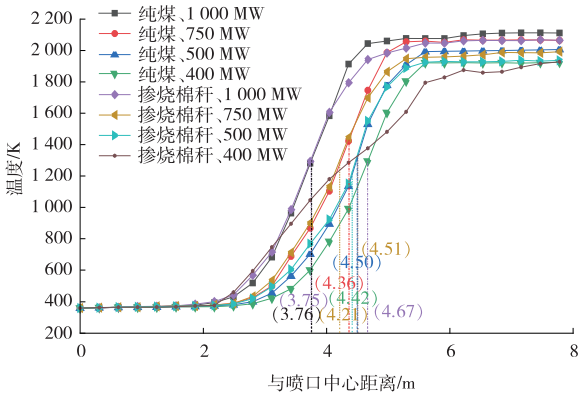


图 8　不同负荷下沿煤粉射流方向的温度分布

Fig. 8　Temperature distribution along the direction of coal powder jet under different loads

3.2.4　氧气浓度对比

烟气氧气浓度的变化可反映炉膛内燃烧状况[28]。图 9 为不同负荷下沿炉膛高度方向的炉膛截面平均氧气浓度。如图 9 所示，随炉膛高度升高，混燃工况下炉膛截面的平均氧气浓度与纯煤工况变化趋势一致，冷灰斗区平均氧气浓度呈上升趋势，主燃烧区平均氧气浓度在燃烧器喷口处出现峰值后逐渐下降，原因是由于一、二次风的投入，平均氧气浓度在喷口高度附近突然升高，而后由于强烈的燃烧反应消耗了大量氧气，致使平均

氧气浓度下降。燃尽区平均氧气浓度先上升后趋于平稳，主要是由燃尽风的引入及煤粉的燃尽所致[18]。同一工况下，随着负荷的降低，炉膛出口烟气氧气浓度增加，其原因是燃尽风风量在降负荷运行时并未改变，而送入炉膛的煤粉不断减少，但低负荷时一次风量未随燃料量相应变小，导致锅炉负荷降低时，炉膛出口氧气浓度增加。随着锅炉负荷从 1 000 MW 降至 400 MW，纯煤工况时炉膛出口氧气浓度从 5.11%升高到 8.90%，混燃工况下炉膛出口氧气浓度升高 0.22%～0.24%。同一负荷下，混燃工况的炉膛出口烟气氧气浓度较纯煤工况略高，可能是由于本研究所用棉秆与设计煤种的元素分析之间的差异，释放相同热量时棉秆消耗的空气量更少。

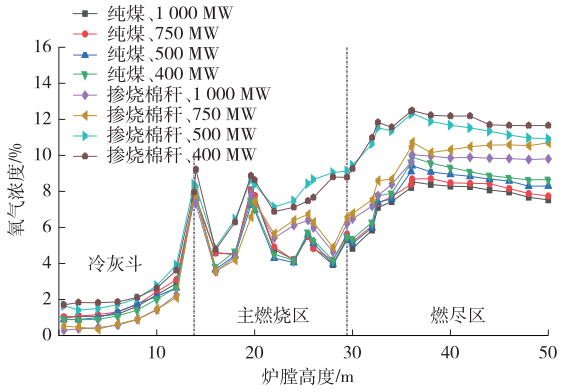


图 9 不同负荷下沿炉膛高度方向的炉膛截面平均氧气浓度

Fig. 9 Average oxygen concentration along the height direction of the furnace section under different loads

3.3 掺烧棉秆后的最低稳燃负荷

图 10 为掺烧棉秆后沿炉膛高度方向炉内截面平均温度。如图 10 所示，在 400、350 及 300 MW 下，随着炉膛高度升高，冷灰斗区平均温度不断上升；主燃烧区平均温度呈上升趋势并达到峰值；燃尽区平均温度缓慢下降，最终趋于稳定。但是，在 250 MW 下，其炉内整体截面平均温度降幅很大，表明此时炉内稳燃工况急剧恶化。

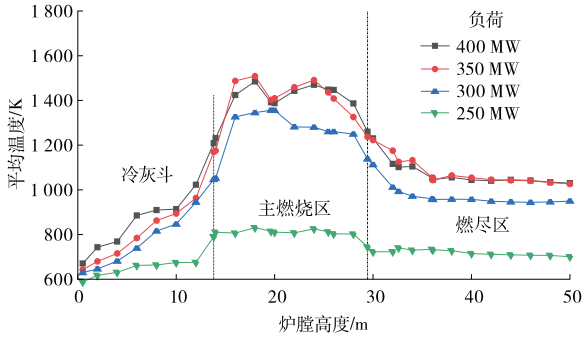


图 10 混燃工况不同负荷下沿炉膛高度方向炉内截面平均温度

Fig. 10 Average temperature of furnace cross-section along the height direction of the furnace under different loads in mixed combustion conditions

图 11 为掺烧棉秆后不同负荷下炉膛纵截面温度分布云图。如图 11 所示，当负荷降至 250 MW 时，火焰形状消失，表明此工况下炉内难以维持稳燃状态。

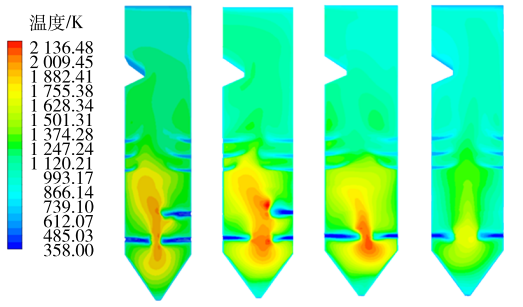


图 11 混燃工况不同负荷下炉膛纵截面温度分布云图

Fig. 11 Cloud map of furnace longitudinal section temperature distribution under different loads in mixed combustion conditions

表 6 为混燃工况不同负荷下炉内燃料的燃尽率。当负荷从 400 MW 降低至 250 MW 时，煤粉的燃尽率从 98.51%下降至 29.15%，棉秆的燃尽率从 95.03%下降至 26.74%。

表 6 混燃工况不同负荷下炉内燃料的燃尽率

Tab. 6 Burnout rate of fuel in the furnace under different loads under mixed combustion conditions 单位：%

工况	煤粉燃尽率	棉秆燃尽率
400 MW	98.51	95.03
350 MW	98.46	95.06
300 MW	97.37	93.96
250 MW	29.15	26.74

图 12 为混燃工况不同负荷下沿煤粉射流方向的炉内温度分布。如图 12 所示，当负荷从 400 MW 降至 300 MW 时，着火距离增大，与纯煤工况相比变化趋势类似，表明随着负荷的降低，炉内燃烧稳定性下降。

结合图 10～图 12 以及表 6 可知，在锅炉负荷降至 250 MW、棉秆掺烧比为 10%的工况下，主燃烧区沿炉膛高度方向的截面平均温度不足 900 K，燃料的燃尽率不足 30%，表明此时锅炉无法维持稳定燃烧。因此，在本文研究范围内，添加掺烧比为 10%的棉秆时最低稳燃负荷定为 30%。

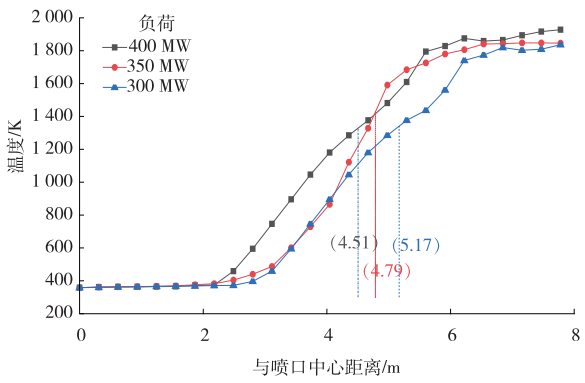


图 12　混燃工况不同负荷下沿煤粉射流方向的炉内温度分布

Fig. 12　Temperature distribution in the furnace along the direction of coal powder jet under different loads in mixed combustion conditions

4　结论

（1）随着负荷由 1 000 MW 降至 400 MW，纯煤及添加掺烧比为 10%棉秆的旋流对冲锅炉炉膛温度与燃料燃尽率均下降，着火距离增加。

（2）与纯煤工况相比，掺烧棉秆后，旋流对冲锅炉内燃烧器中心截面温度高于 1 400 K 的区域面积增大，着火距离缩短，炉膛出口氧气浓度增加，表明掺烧生物质可以促进锅炉内的稳燃。

（3）在本研究范围内，旋流对冲锅炉纯煤燃烧时的最低稳燃负荷为 40%，而掺烧棉秆后该锅炉的最低稳燃负荷下探至 30%，表明生物质的掺烧可以有效地降低锅炉的最低稳燃负荷，增强锅炉的深度调峰能力。

参考文献：

[1] 李政，张东杰，潘玲颖，等. “双碳”目标下我国能源低碳转型路径及建议[J]. 动力工程学报，2021，41(11)：905-909，971.
LI Zheng，ZHANG Dongjie，PAN Lingying，et al. Low-carbon transition of China's energy sector and suggestions with the 'carbon-peak and carbon-neutrality' target[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2021，41(11)：905-909，971.

[2] SPERSTAD I B，DEGEFA M Z，KJØLLE G. The impact of flexible resources in distribution systems on the security of electricity supply：a literature review[J]. Electric Power Systems Research，2020，188：106532.

[3] WANG Zhu，LIU Ming，YAN Hui，et al. Optimization on coordinate control strategy assisted by high-pressure extraction steam throttling to achieve flexible and efficient operation of thermal power plants[J]. Energy，2022，244：122676.

[4] 国家发展改革委，国家能源局. 煤电低碳化改造建设行动方案(2024—2027 年)[EB/OL]. (2024-07-15)[2024-10-21]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202407/t20240715_1391663.html.

[5] 孙月巧，郑宏飞，孔慧. 碳中和背景下煤电转型关键技术研究与展望[J]. 动力工程学报，2022，42(11)：1013-1023.
SUN Yueqiao，ZHENG Hongfei，KONG Hui. Key technologies and prospects of coal power transformation under carbon neutrality background[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2022，42(11)：1013-1023.

[6] 高清林，高嘉锜，李毅，等. 燃煤机组耦合生物质直燃发电综合分析[J]. 可再生能源，2023，41(12)：1571-1578.
GAO Qinglin，GAO Jiaqi，LI Yi，et al. Comprehensive analysis of coupled biomass direct combustion power generation of coal-fired units[J]. Renewable Energy Resources，2023，41(12)：1571-1578.

[7] 周义，张守玉，郎森，等. 煤粉炉掺烧生物质发电技术研究进展[J]. 洁净煤技术，2022，28(6)：26-34.
ZHOU Yi，ZHANG Shouyu，LANG Sen，et al. Research progress of biomass blending technology in pulverized coal furnace for power generation[J]. Clean Coal Technology，2022，28(6)：26-34.

[8] 杨章宁，卢啸风，倪刚，等. 生物质气与煤粉耦合燃烧再燃还原 NO 热态试验研究[J]. 动力工程学报，2020，40(10)：781-785，814.
YANG Zhangning，LU Xiaofeng，NI Gang，et al. Hot-state experiments on coupled reburning of biomass gas and pulverized coal for NO reduction[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2020，40(10)：781-785，814.

[9] 洪瑜，邬晨，王润煜，等. 双碳背景下农林生物质利用新趋势[J]. 中国科技信息，2024(2)：122-126.
HONG Yu，WU Chen，WANG Runyu，et al. New trends of agricultural and forestry biomass utilization under dual-carbon background[J]. China Science and Technology Information，2024(2)：122-126.

[10] MOUSAVI S M，FATEHI H，BAI X S. Numerical study of the combustion and application of SNCR for NO_x reduction in a lab-scale biomass boiler[J]. Fuel，2021，293：120154.

[11] 马达夫，张守玉，何翔，等. 煤粉锅炉超低负荷运行的技术问题和应对措施[J]. 动力工程学报，2019，39(10)：784-791，803.
MA Dafu，ZHANG Shouyu，HE Xiang，et al. Technical problems occurring in ultra-low load operation of pulverized coal-fired boilers and the solutions[J].

Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(10): 784-791, 803.

[12] 马达夫，刘平元，张守玉，等. 超低负荷下运行氧量对切圆锅炉燃烧稳定性和 NO_x 排放特性的影响[J]. 动力工程学报，2023，43(2)：174-184.
MA Dafu, LIU Pingyuan, ZHANG Shouyu, et al. Effect of boiler operation oxygen on combustion stability and NO_x emission characteristics of a tangentially fired boiler under ultra-low load[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(2): 174-184.

[13] 宫健，马达夫，管玉保，等. 基于数值模拟的燃煤锅炉耦合生物质的燃烧特性研究[J]. 发电设备，2023，37(6)：362-367.
GONG Jian, MA Dafu, GUAN Yubao, et al. Research on combustion characteristics of coal-fired boiler coupled with biomass based on numerical simulation[J]. Power Equipment, 2023, 37(6): 362-367.

[14] 李加护，王小涛，高硕，等. 300 MW 燃煤锅炉掺烧生物质燃气的数值模拟[J]. 动力工程学报，2020，40(6)：440-446.
LI Jiahu, WANG Xiaotao, GAO Shuo, et al. Numerical simulation on co-firing characteristics of coal and biomass gas in a 300 MW boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(6): 440-446.

[15] 马达夫，何翔，张守玉，等. 切圆锅炉不同负荷掺烧黑颗粒的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报，2024，45(7)：2186-2197.
MA Dafu, HE Xiang, ZHANG Shouyu, et al. Numerical simulation of black particles co-combustion in tangentially fired boiler under different loads[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(7): 2186-2197.

[16] LI Jun, BRZDEKIEWICZ A, YANG Weihong, et al. Co-firing based on biomass torrefaction in a pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching[J]. Applied Energy, 2012, 99: 344-354.

[17] LU Hao, HUANG Shangwen, LI Hongchang, et al. Numerical simulation of combustion characteristics in a 660 MW tangentially fired pulverized coal boiler subjected to peak-load regulation[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 49: 103168.

[18] 李加护，王智，马驰，等. 1 000 MW 燃煤锅炉掺烧生物质的数值模拟[J]. 华北电力大学学报(自然科学版)，2023，50(5)：97-104.
LI Jiahu, WANG Zhi, MA Chi, et al. Numerical simulation of mixed biomass in 1 000 MW coal-fired boiler [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023, 50(5): 97-104.

[19] 李想. 1 000 MW 超超临界前后墙旋流对冲锅炉燃烧数值模拟[D]. 武汉：华中科技大学，2012.

[20] 吕洪坤，童家麟，齐晓娟，等. 对冲燃烧锅炉低负荷运行优化数值模拟研究[J]. 热能动力工程，2020，35(7)：89-94.
LYU Hongkun, TONG Jialin, QI Xiaojuan, et al. Numerical simulation of low-load operation optimization for opposite firing boilers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7): 89-94.

[21] 袁来运. 超临界煤粉锅炉变负荷燃烧的数值模拟及配风优化[D]. 南京：东南大学，2019.

[22] 陈鑫科，马启磊，方庆艳，等. 混煤燃烧中的交互作用：掺烧方式和配风对着火和燃尽特性的影响[J]. 动力工程学报，2019，39(7)：524-530.
CHEN Xinke, MA Qilei, FANG Qingyan, et al. Interaction in blended coal combustion process: effects of coal blend way and air distribution mode on ignition and burnout characteristics of the blended coal [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(7): 524-530.

[23] 周俊虎，聂欣，周志军，等. 无油点火燃烧器着火距离的影响因素[J]. 浙江大学学报(工学版)，2006，40(10)：1797-1800.
ZHOU Junhu, NIE Xin, ZHOU Zhijun, et al. Influencing factors of ignition distance in no-oil ignition combustor[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(10): 1797-1800.

[24] 聂欣，吕明，周志军，等. 煤粉气流在高温空气中着火距离的数值试验研究[J]. 热力发电，2010，39(3)：13-18.
NIE Xin, LÜ Ming, ZHOU Zhijun, et al. Test study on ignition distance of pulverized coal flow in the high-termperature air[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(3): 13-18.

[25] 程宇婷. 煤粉与生物质混燃的数值模拟[D]. 保定：华北电力大学，2013.

[26] HUANG Junxuan, LIAO Yanfen, LIN Jianhua, et al. Numerical simulation of the co-firing of pulverized coal and eucalyptus wood in a 1 000 MWth opposed wall-fired boiler[J]. Energy, 2024, 298: 131306.

[27] 刘家利，王志超，邓凤娇，等. 大型煤粉电站锅炉直接掺烧生物质研究进展[J]. 洁净煤技术，2019，25(5)：17-23.
LIU Jiali, WANG Zhichao, DENG Fengjiao, et al. Research progress on direct blending biomass in pulverized coal fired boilers of large power plants[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 17-23.

[28] 李秋松. 燃尽风位置对 600 MW 超临界锅炉燃烧特性的影响研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2016.