



江投集团能源技术研究院
JXIC ENERGY TECH. RESEARCH INSTITUTE

前后墙对冲锅炉燃烧调整研究

报告人：吴建群

研究院及团队介绍

➤ 研究院简介:

江投集团能源技术研究院成立于2021年6月。

致力于成为能源碳中和领域的“问题解决者、价值创造者”，围绕能源供给和能源消费全产业链，成长为在碳中和领域具有核心竞争力的一流能源技术研究院。

聚焦于可再生能源（风、光、水）、综合智慧能源、煤炭高效清洁利用、储能（电化学、抽蓄、机械）、氢能、天然气、碳排“双控”等产业领域。

围绕火储联合、灵活性调峰、源网荷储、多能互补、CCUS、智慧能源、减污降碳协同等相关技术开展科研攻关。

锅炉环保技术团队介绍

主要从事热电厂污染物检测、锅炉及其附属设备性能测试及考核、燃烧调整、智慧电厂技术开发。目前有专业技术人员13名，其中博士3名，硕士6名。

近两年累计承担省部级以上科研项目3项，技术服务项目100余项，发表SCI/EI及北大核心期刊论文10篇，授权国家发明专利3项，参编标准3项。

目录

CONTENTS

01 对冲炉燃烧调整常见问题

02 冷态调整试验

03 制粉系统运行优化

04 配煤及磨组运行优化

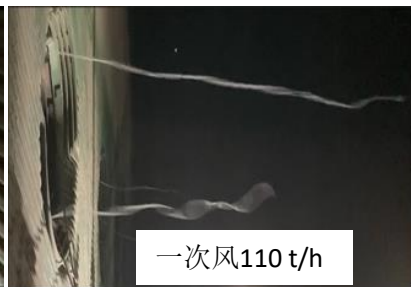
05 总结

1 对冲炉燃烧调整常见问题

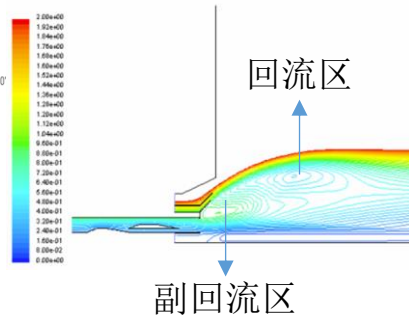
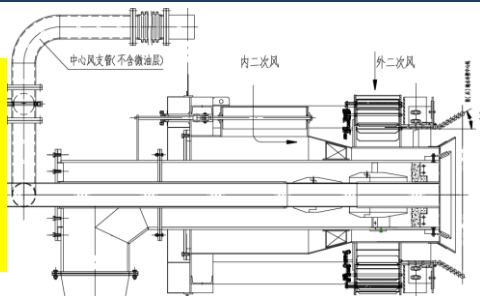
- 磨出口煤粉浓度偏差大、制粉达不到设计细度
壁温、汽温偏差大，屏式换热器局部超温，省煤器出口左右侧O₂偏差大，未燃碳高
- 旋流燃烧器就地风门开度不合理
燃烧器烧损、火检波动、飞灰未燃碳高、侧墙贴壁气氛CO浓度偏高
- 燃料与设计煤种偏差大（**负荷越低对差异性容忍度越有限**）
再热汽温偏低、火检波动、飞灰未燃碳高、排烟损失大
- 炉膛烟气充满度差
汽温偏差大、难控，再热汽温偏低，炉膛出口CO大幅度波动
- 燃料混配不合理
排烟损失大、飞灰未燃碳高、炉膛出口NO_x偏高

2.1 冷态调整-燃烧器就地风门流动特性

一次风影响

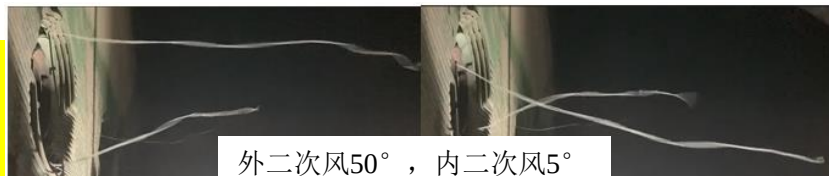


燃烧器结构

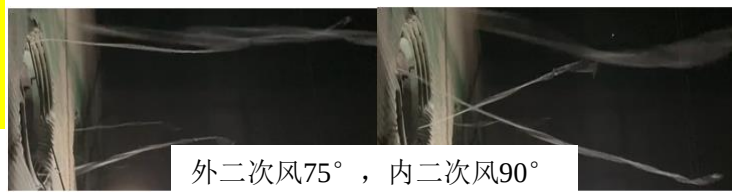
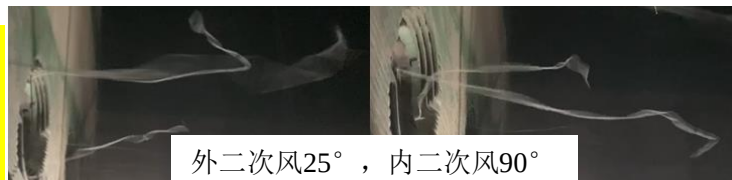


- 一次风刚性强，对烟气卷吸和煤粉加热不利。

内二次风影响

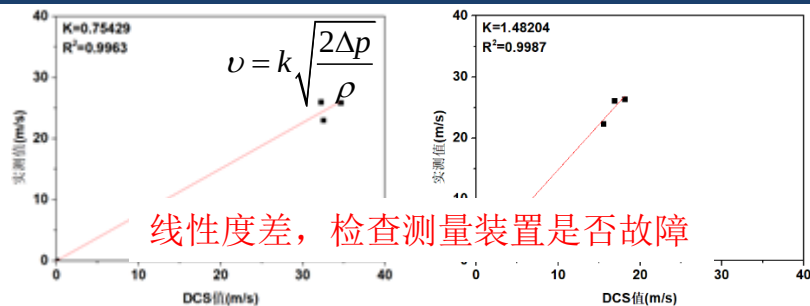
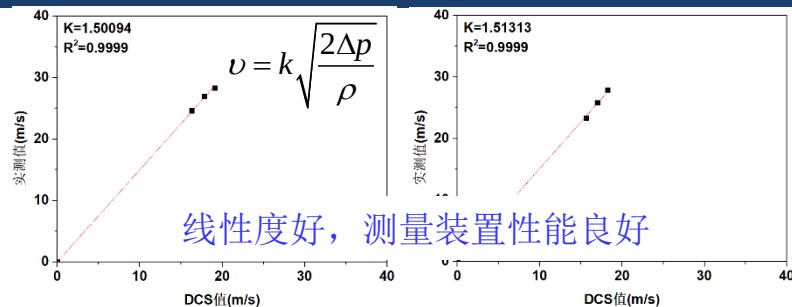


内外二次风影响

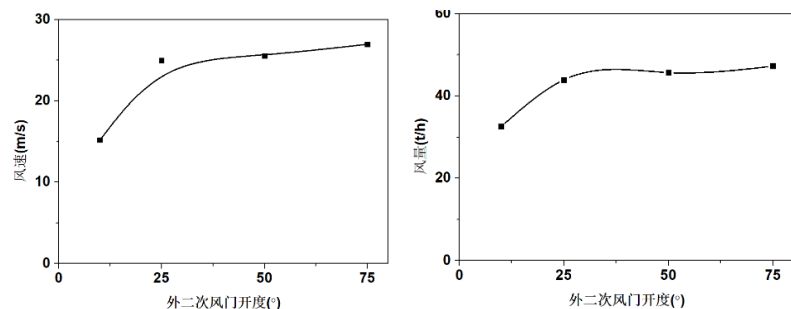
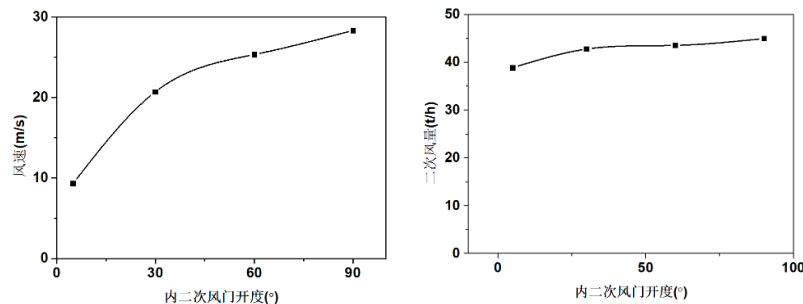


- 内二次风可以有效控制回流区的闭合，调整着火距离；
- 外二次风可有效控制回流区的大小，避免火焰贴墙。

2.2 冷态调整-燃烧器就地风门流量特性

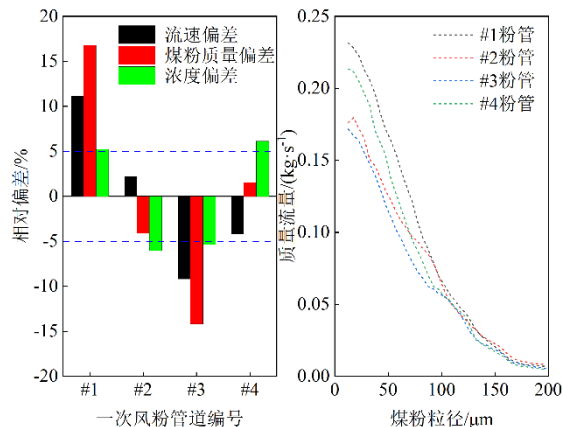
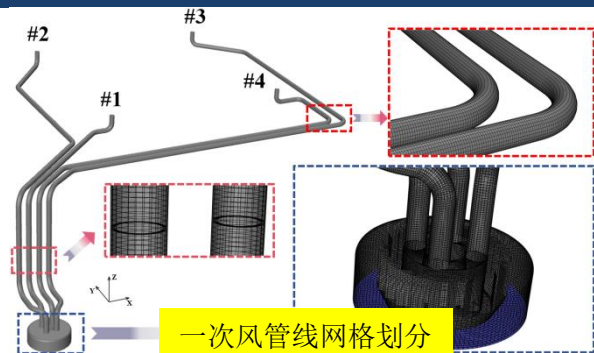


➤ 准确的标定方法：基于皮托管的风量和风速标定，严格上应该采用三个流量标定，并采用过原点的多点拟合。

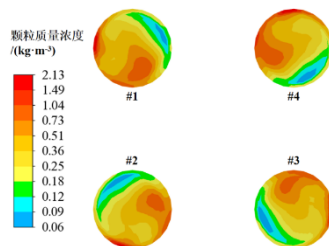


- 内二次风门开度变化对旋流内二次风量有较好的控制效果，对整体风量影响较小；
- 外二次风在二次风中占比较大，总二次风量变化与外二次风量变化一致，对风量分配控制效果有限。

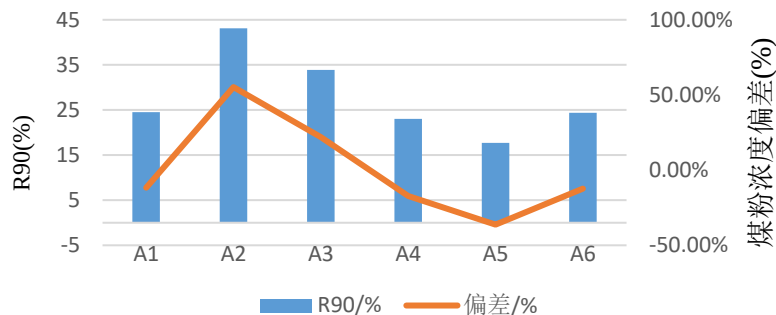
3.1 制粉系统优化-粉管煤粉浓度偏差分析



风粉系统CFD模拟



磨出口煤粉浓度分布计算



粉管煤粉R₉₀及煤粉浓度偏差测量

煤粉颗粒在制粉受力分析: $m_p \frac{du_p}{dt} = F_D + \sum_i F_i + m_p \frac{\rho_p - \rho_s}{\rho_p} g$

F_D : 气流曳力, 受气体粘性和流速影响; F_i : 惯性力, 受颗粒质量影响。

- 磨内部结构对流场影响及管线沿程阻力的差异导致颗粒流动出现差异;
- 提高煤粉均匀性和降低煤粉细度的行为均可以有效弱化不同粉管煤粉浓度偏差, 如: 磨中合适的煤层厚度、优质的磨辊材料以及合适的分离器转速。

3.2 制粉系统优化-粉管煤粉浓度偏差调整

(1) 冷态一次风调平（单相流）

局部阻力

$$\frac{\rho_a}{2} u_1^2 \left(\underbrace{\sum \lambda_{1i} \frac{L_{1i}}{D_{1i}}}_{\text{沿程阻力}} + \underbrace{\sum \xi_{1i} + \xi_1'}_{\text{缩孔阻力}} \right) = \frac{\rho_a}{2} u_2^2 \left(\sum \lambda_{2i} \frac{L_{2i}}{D_{2i}} + \sum \xi_{2i} + \xi_2' \right)$$

沿程阻力

缩孔阻力

- 冷态调平受风速影响不明显。

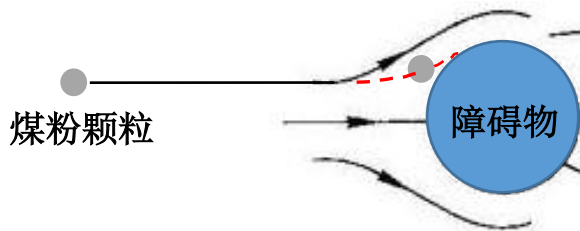
(2) 热态一次风调平（气固两相流）

$$\Delta P_t = \frac{\rho_a}{2} u_a^2 \left(\underbrace{\sum \lambda_{ai} \frac{L_{ai}}{D_{ai}} + \sum \xi_{ai}}_{\text{气体流动引起阻力}} \right) + \frac{\rho_p}{2} u_p^2 \left(\underbrace{\sum \lambda_{pi} \frac{L_{pi}}{D_{pi}} + \sum \xi_{pi}}_{\text{固体流动引起阻力}} \right)$$

气体流动引起阻力

固体流动引起阻力

- 煤粉特性的差异必然带来固体颗粒受力的不均匀。



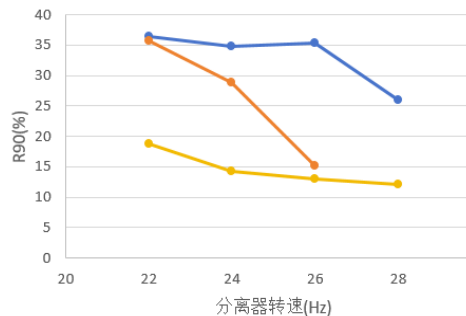
$$Stk = \frac{\rho_p d_p u}{\mu L}$$

值越小偏离气体流线越小

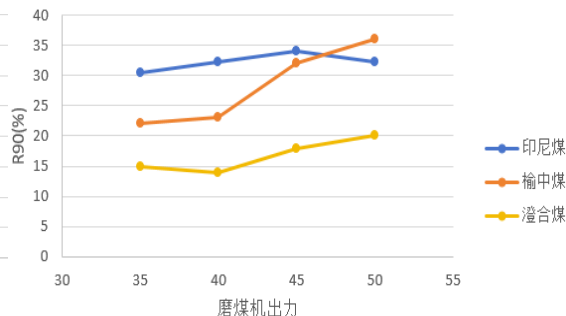
煤粉粒径 d_p 越小、流速 u 越小、障碍物特征尺寸 L 越小， Stk 越小。

- 颗粒在体积力作用下偏离气体流线产生分离；
- 较小煤粉细度、降低一次风流速或合适位置假装导流板均有利于控制粉管煤粉浓度偏差。

3.3 制粉系统优化-磨运行参数优化



分离器转速-煤粉细度曲线



磨煤机出力-煤粉细度曲线

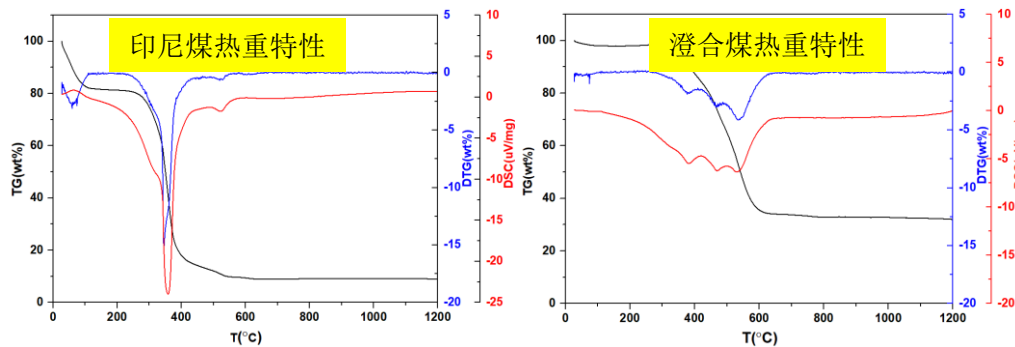
- 磨选型合适时，存在敏感分离器转速，高于敏感分离器转速煤粉细度发生明显变化；
- 不同特性煤出力变化对细度影响程度不同，通常可磨性较差的褐煤煤粉较粗，受出力影响不明显；
- 虽然磨最佳运行参数受煤种影响较明显，但是对煤阶相同的同类煤，具有相似的规律，因此即使电厂用煤种类很多，仍然有必要进行磨组运行参数优化。

磨组运行优化参数

	出力, t/h	建议磨出口温度 (露点及自燃)	推荐细度R ₉₀ (燃烧及电耗)	建议分离器转速	实测R ₉₀	实测R ₂₀₀	磨煤单耗
褐煤（印尼煤）	35	68（不低于57℃， 不高于75℃）	34	22	29	1.66	9.57
	40			22	25	1.74	8.85
	45			24	24	2.24	8.20
	50			24	25	2.80	7.65
贫煤（澄合煤）	35	105	14	24	15	0.11	10.05
	40			24	14	0.32	8.85
	45			26	15	0.32	8.33
	49			24	18	0.40	7.90

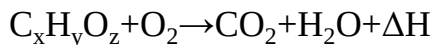
4.1 配煤磨组优化-煤粉关键特性分析

煤种	煤阶	全水分(%)Mt	干燥无灰基挥发分(%)Vdaf	收到基低位热值(MJ/kg)
印尼煤	褐煤	20.08	48.27	21.28
澄合煤	烟煤/贫煤	8.42	21.82	19.35



煤种	R90, %	着火点, °C	挥发分析出温度, °C
印尼煤	30.77	322	219
澄合煤	13.06	445	295

绝热火焰温度计算: (辐射与对流换热的平衡)



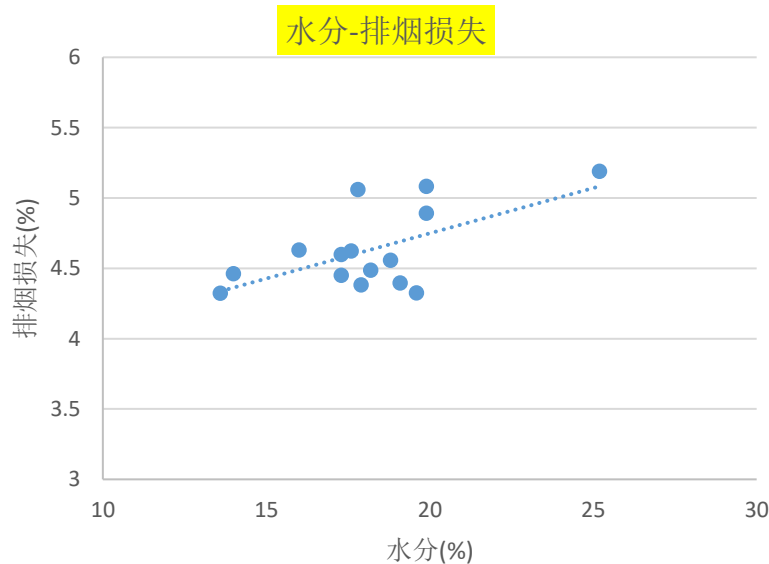
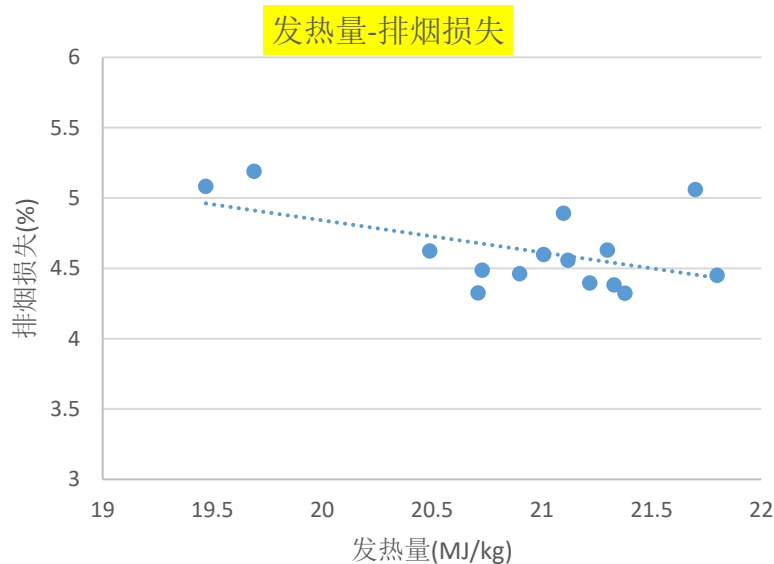
	印尼煤	澄合煤
330 MW燃烧器附近温度, °C	1233	1308

- 贫煤挥发分低, 石墨化程度高, 着火点和挥发分析出温度高, 反应动力学常数K较小, 灰分含量高; (稳燃及燃尽问题)
- 贫煤水分含量低, 燃烧温度高; (辐射换热比例改变)
- 贫煤挥发分氮比例低, 焦炭氮比例高, 燃烧焦炭孔隙不发达; (NO_x 浓度高)
- 褐煤水分含量高, 烟气量大。 (排烟损失大)

4.2 配煤磨组优化-高效优选

试验工况		1	2	3	优化工况			最优工况	设计煤
Mt	%	19.9	19.9	16	18.8	17.6	14	19.6	17.3
Mad	%	6.72	5.66	2.56	3.8	3.55	1.49	4.43	5.87
Aad	%	11.37	16.92	16.5	12.28	17.15	20.15	12.89	10.62
Vad	%	34.55	32.53	30.86	33.98	30.27	27.87	33.26	35.83
Qnet, ar	MJ/kg	21.1	19.47	21.3	21.12	20.49	20.9	20.71	21.8
St, ad	%	0.94	1.14	0.94	0.67	0.88	0.72	0.49	1
Vdaf	%	42.18	42.02	38.13	40.49	38.17	35.57	40.23	35.83
Car	%	54.77	51.15	55.79	55.67	53.95	55.10	54.80	58.12
Har	%	3.49	3.17	3.47	3.65	3.37	3.27	3.58	3.40
Nar	%	1.32	1.23	1.28	1.32	1.24	1.00	1.29	0.60
Oar	%	9.95	9.22	8.43	9.63	8.43	8.40	9.48	9.46
机组平均负荷	MW	660	660	600	600	600	600	600	THA
A磨		榆中（烟）	榆中（烟）	榆中（烟）	榆中（烟）	榆中（烟）	榆中（烟）	榆中（烟）	设计煤
B磨		榆中（烟）	华中（烟）	华中（烟）	宾印（褐）	宾印（褐）	华中（烟）	华中（烟）	
C磨		高印（褐）	高印（褐）	榆中（烟）	榆中（烟）	榆中（烟）	榆中（烟）	榆中（烟）	
D磨		华中（烟）	华中（烟）	华中（烟）	华中（烟）	华中（烟）	华中（烟）	华中（烟）	
E磨		华中（烟）	华中（烟）	华中（烟）	华中（烟）	澄合（贫）	澄合（贫）	华中（烟）	
F磨		高印（褐）	高印（褐）	高印（褐）	高印（褐）	榆中（烟）	华中（烟）	华中（烟）	
锅炉热效率	%	94.60	94.30	94.86	95.01	94.81	94.88	95.27	95.08
过热器减温水量	t/h	130	161	98	121	53	62	67	123
SCR入口折算NO _x	mg/m ³	185	197	221	182	220	231	185	180

4.3 配煤磨组优化-排烟损失

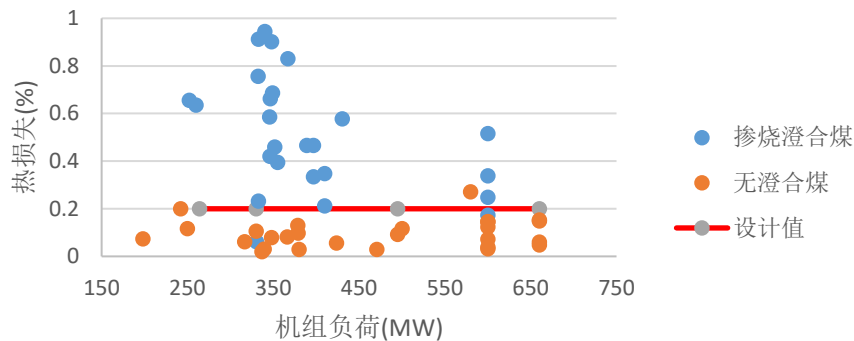


排烟损失本质是热量在尾排烟气中的分布，主要是热量的传递和转移问题。

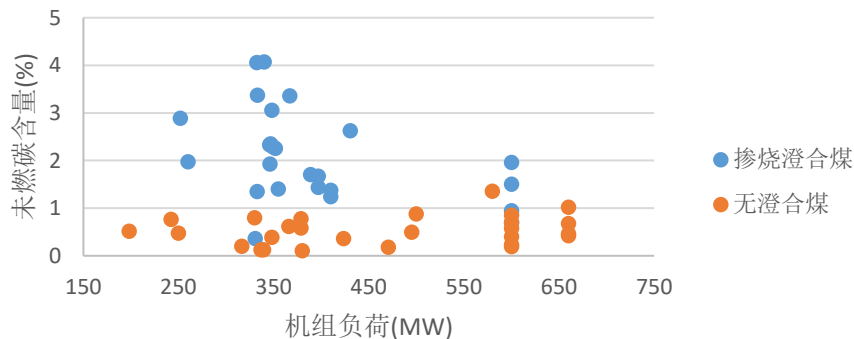
- 不同配煤工况下，排烟损失的差异是导致热效率不同的主要原因，整体上排烟损失和煤发热量呈负相关，和煤水分呈正相关，为保证热效率，不宜过多掺烧低发热量和高水分的褐煤。

4.4 配煤磨组优化-未完全燃烧损失

未完全燃烧损失



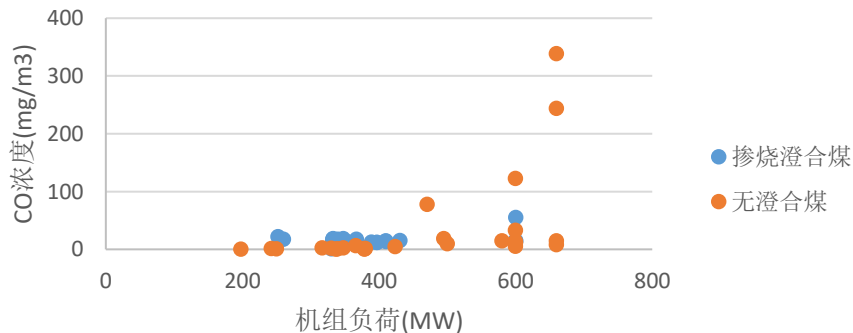
未燃碳



动力学常数 $K=A \cdot \exp(-E_a/RT)$; 反应速率: $\gamma=A_p \cdot K \cdot P_{O_2}$

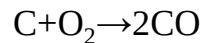
- 掺烧贫煤通常会导致未完全燃烧偏高，在低负荷条件下尤其明显；
- 贫煤反应性差导致的未完全燃烧损失高主要特点是未燃碳高，CO整体浓度在正常水平；
- 降低贫煤未完全燃烧损失思路是降低煤粉细度、提高炉膛温度以及增加高温区停留时间。

省煤器出口CO



4.5 配煤磨组优化-未完全燃烧损失

工况		比工况			优化工况	
机组平均负荷		349	347	367	355	333
A磨		\	\	\	\	\
B磨		华中	低印	低印	华中	低印
C磨		榆中	高印	榆中	榆中	华中
D磨		\	华中	\	\	榆中
E磨		澄合	澄合	澄合	澄合	澄合
F磨		高印	\	高印	华中	\
排烟温度	℃	119	128	116	119	121
空预器出口O ₂	%	5.25	5.14	4.67	5.10	5.14
排烟烟气中CO含量	%	14.49	9.83	17.03	12.30	18.38
飞灰可燃物含量	%	2.29	2.35	3.36	1.41	1.35
排烟损失	%	4.915	5.542	4.582	4.834	5.006
气体不完全燃烧损失	%	0.005	0.003	0.006	0.004	0.006
固体未完全燃烧损失	%	0.687	0.662	0.831	0.299	0.233
锅炉热效率	%	94.05	93.45	94.27	94.44	94.45
SCR出口NO _x 浓度	mg/m ³	296	286	218	250	262



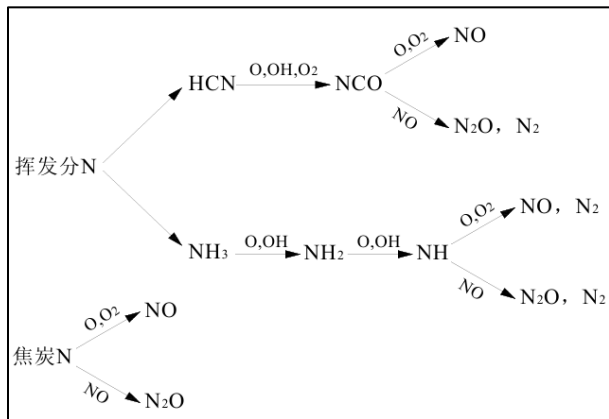
动力学常数: $K = A \cdot \exp(-E_a/RT)$;

反应速率: $\gamma = A_p \cdot K \cdot P_{\text{O}_2}$

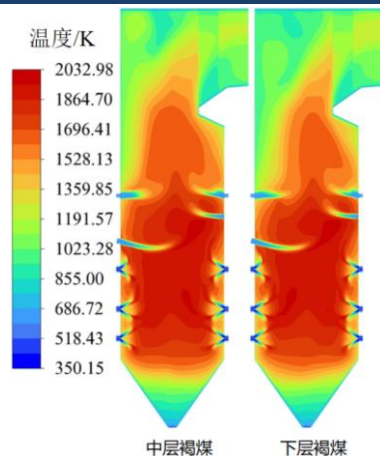
未燃碳比例: $\eta = 1 - \frac{\int_0^t \gamma dt}{m}$

- 通过优化磨组运行模式以及配煤模式，成功将飞灰未燃碳降至2%以下，SCR入口NO_x控制在约250 mg/m³;
- 进一步的配风优化，已成功将NO_x浓度进一步降至250 mg/m³以下。

4.6 配煤磨组优化-高负荷降NO_x



燃料中氮的转化机理



配煤优化CFD模拟

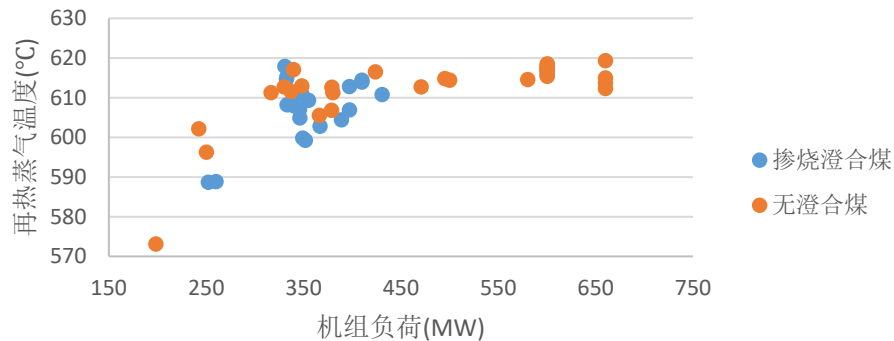
试验工况	单位	600MW比对	600MW优化
A磨	\	榆中(烟)	榆中(烟)
B磨	\	华中(烟)	宾印(褐)
C磨	\	榆中(烟)	榆中(烟)
D磨	\	华中(烟)	华中(烟)
E磨	\	澄合(贫)	澄合(贫)
F磨	\	华中(烟)	榆中(烟)
SCR入口折算NO _x mg/m ³		283	220

- 合适的掺烧褐煤有利于降低高负荷NO_x;
- 中层掺烧褐煤,可以减少高温区NO_x生成比例;
- 通过风量调配寻找燃尽风和二次风最优比。

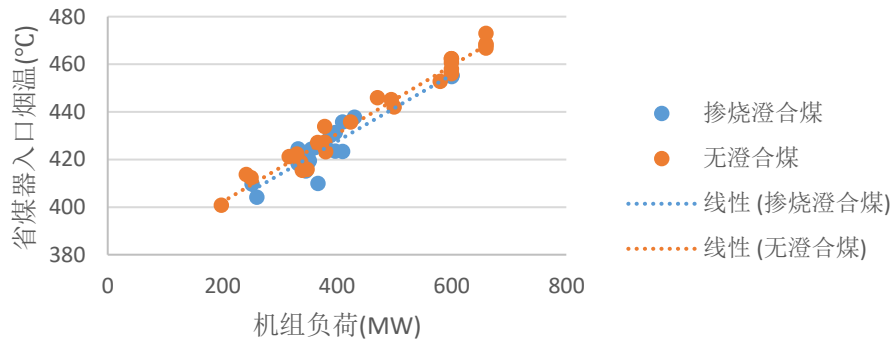
工况	比对工况	优化工况
配煤模式	ABDE烟煤CF褐煤 (下层褐煤)	ACDF烟煤BE褐煤 (中层褐煤)
氧量/%	2.64	2.80
炉膛出口温度/K	1117	1105
高过进口温度/K	1255	1238
炉膛出口NO _x /ppm	186	176

4.7 配煤磨组优化-低负荷炉膛烟气充满度差

再热蒸汽温度



省煤器入口烟温



- 燃料水和挥发分负偏离设计煤种或者炉膛出口 O_2 控制明显低于设计值均可能加剧低负荷炉膛烟气充满度差的问题；
- 炉膛烟气充满度差会导致局部存在积煤、积灰、高 CO ，汽温和壁温存在偏差和再热汽温偏低等问题；
- 提高烟气在炉膛循环比例、合适的提高风量均有利于缓解充满度差导致的问题，但是会导致排烟损失增大，对于安装低低温省煤器的机组影响较小。

5 总结

- 充分了解设备性能和特性是燃烧调整的前提，其中燃烧器特性是核心，作为锅炉的心脏，必须阶段性准确并完整分析其关键特性，主要包括流场特性和燃烧特性。
- 制粉系统优化是实现锅炉提效减排的关键，也是燃烧调整中耗时最长、工作量最大的工作。必须基于设备及燃料特性对系统运行参数进行优化，并在后期制粉系统性能试验中不断迭代更新。
- 燃料特性的掌握是配煤优化和磨组运行优化的基础，避免燃料与设计燃料特性的大幅度偏移是保证锅炉热效率和污染物排放达到设计值最重要的保障，通过合理的配煤和磨组运行组合优化可以弱化燃料特性偏移带来的负面影响。
- 配风的目的是各性能指标的精细化调整，可实现各指标的平衡分配。在低负荷下，必须重点关注烟气对能量的携带和传递作用，保证烟气在炉膛的充满度。在炉膛烟气充满度较差时可考虑掺配低发热量褐煤，对于安装低低温省煤器机组，可合适提高炉膛过量空气系数，由此导致的排烟损失增加可通过低低温省煤器回收。
- 为兼顾 NO_x 和未完全燃烧损失，必须寻找分级燃烧时燃尽风与二次风比例的平衡点。

致谢

本研究由江投能源技术研究院和江投国华
信丰发电有限责任公司共同完成，在此特
别感谢团队每位成员！！



谢 谢