



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

正压直吹式中速磨煤机仿真试验研究

郭修文 2025年1月

01

风粉偏差现状及影响

02

风粉偏差原因

03

制粉系统节流调平

04

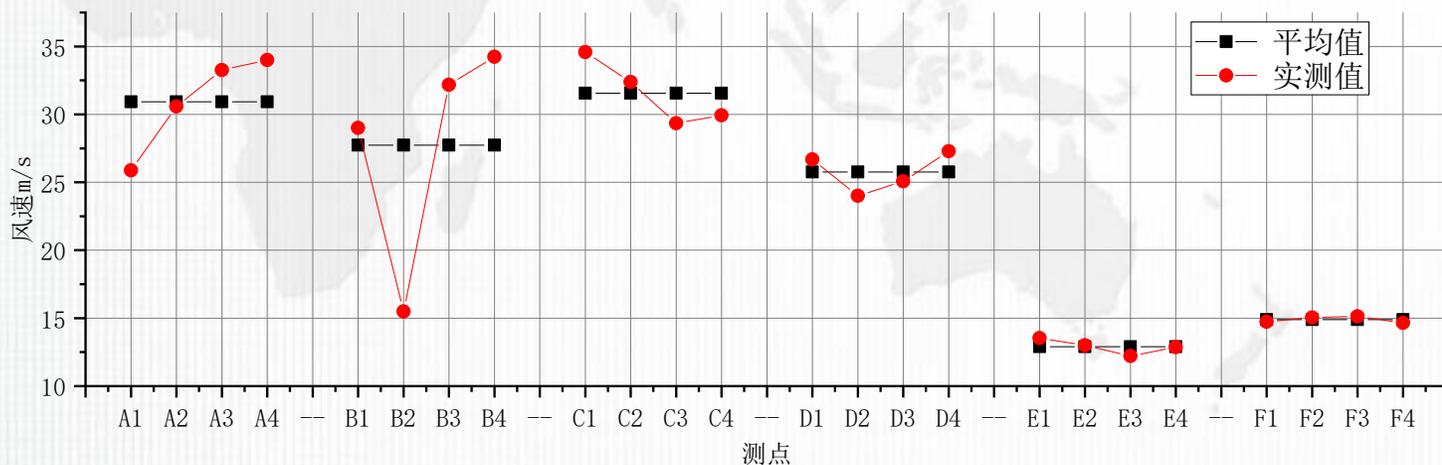
风粉调平建议

风粉偏差现状及影响

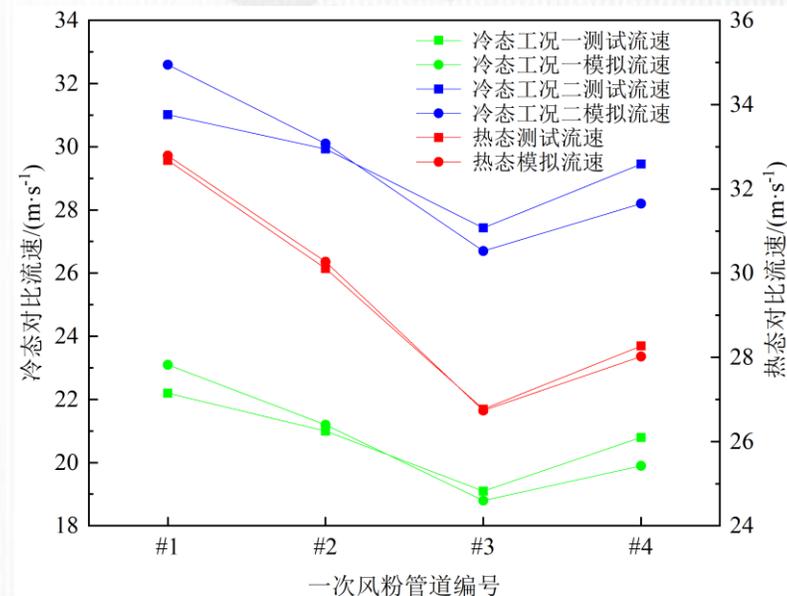
风粉偏差现状及影响

制粉系统风粉分配偏差现状

- 大容量燃煤锅炉基本采用正压直吹式制粉系统，制粉系统和燃烧系统没有明确界限，已成为密切相关整体；
- 同层燃烧器各一次风粉分配偏差达**10%~30%**，严重时中速磨出口煤粉质量偏差甚至能超过**50%**；
- 风粉分配偏差大，不受足够重视，试验过程中也仅对一次风速调平做要求，煤粉量分配偏差大的现象普遍存在；



某电厂制粉系统一次风速



磨煤机出口一次风速试验值和模拟值

风粉偏差现状及影响

制粉系统风粉分配偏差影响机组安全经济性运行

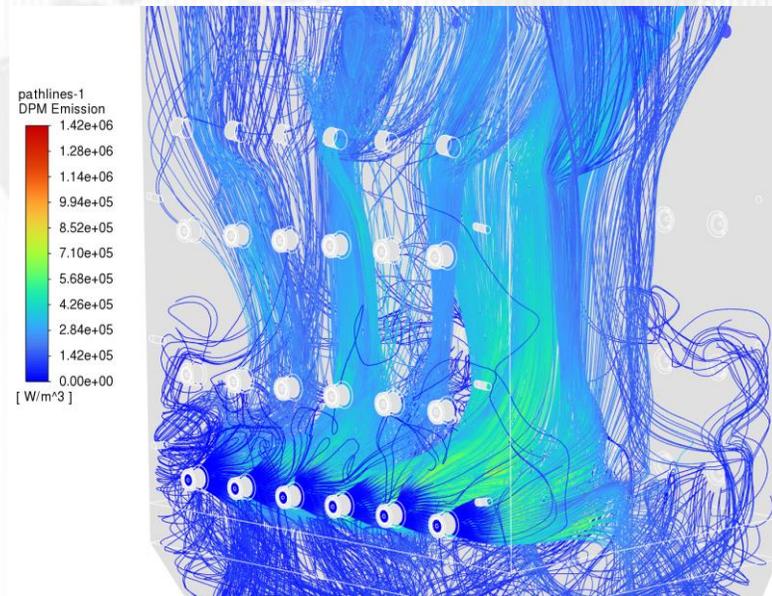


风粉偏差现状及影响

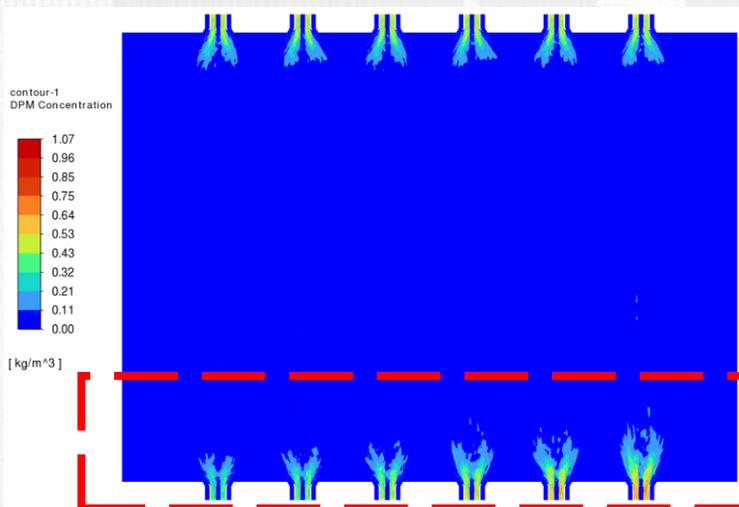
制粉系统风粉分配偏差对锅炉燃烧影响

举例：某对冲锅炉前墙最下层煤粉量偏差导致右墙燃烧器风煤比较小，煤粉不完全燃烧，右墙还原性气氛强，容易发生高温腐蚀问题，煤粉颗粒燃尽率较低，出口飞灰含碳量高，**风粉偏差影响锅炉燃烧安全性和稳定性**；

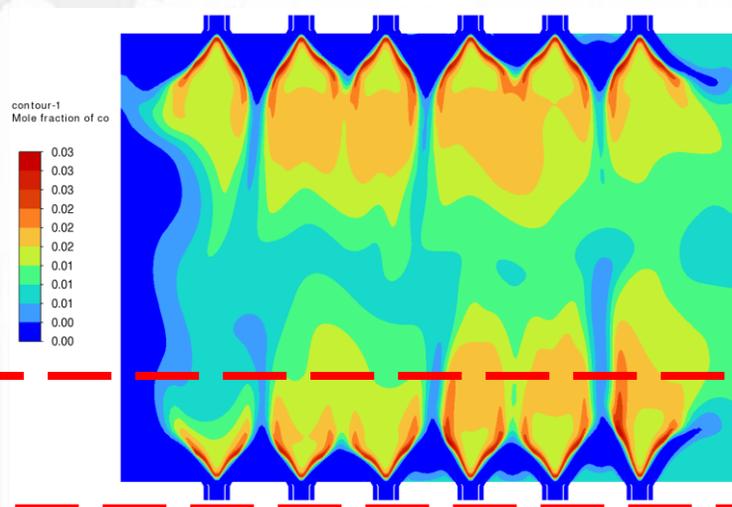
● 深负荷调峰阶段，2-3台磨煤机运行期间，对风粉均衡要求更高，此时风粉偏差影响更大；



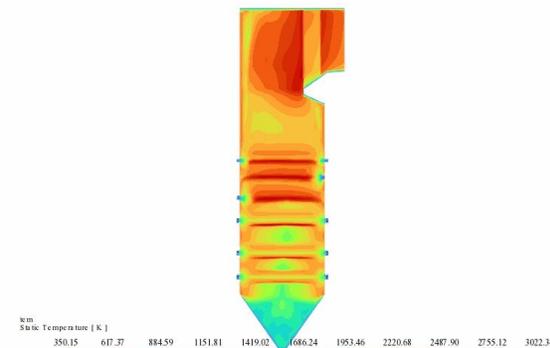
颗粒释放



煤粉浓度偏差



煤粉偏差燃烧CO分布



锅炉燃烧温度场变化

风粉偏差原因

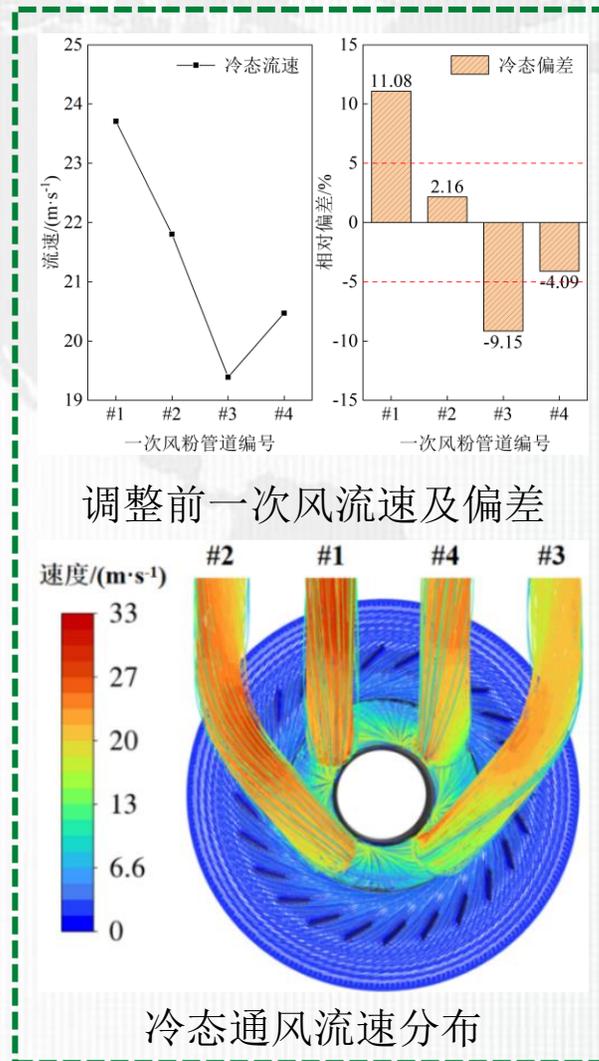
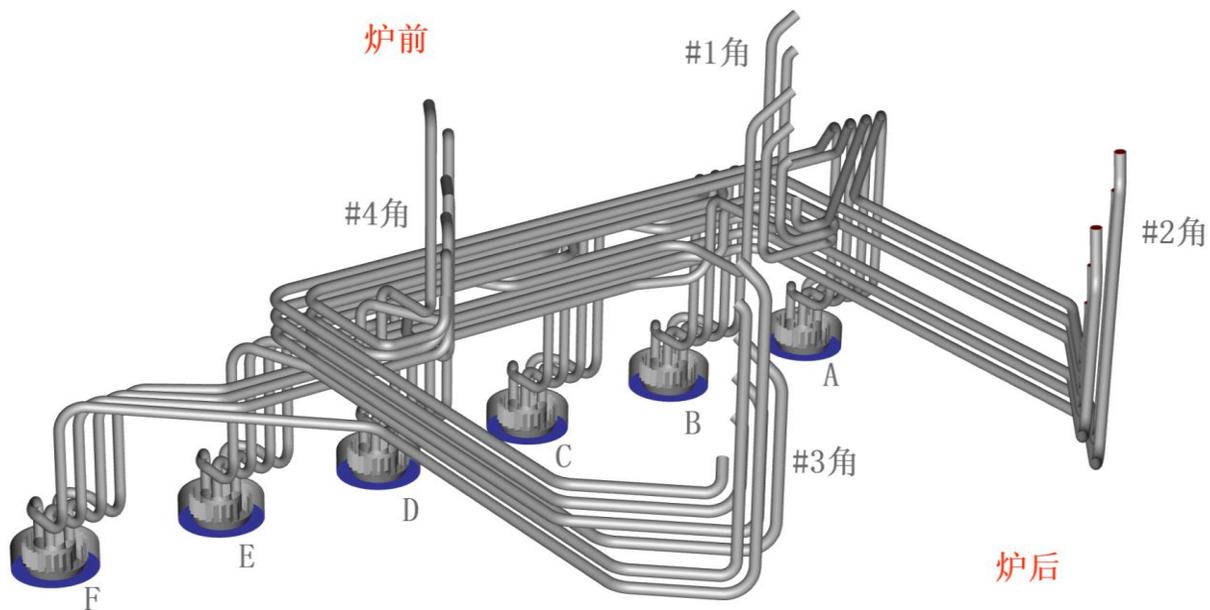
风粉偏差原因

风量分配偏差原因

风量偏差

最主要原因：送粉管道阻力系数差异

两相流耦合作用，颗粒对流体反向作用力差异



风粉偏差原因

煤粉量分配偏差原因

粉量偏差

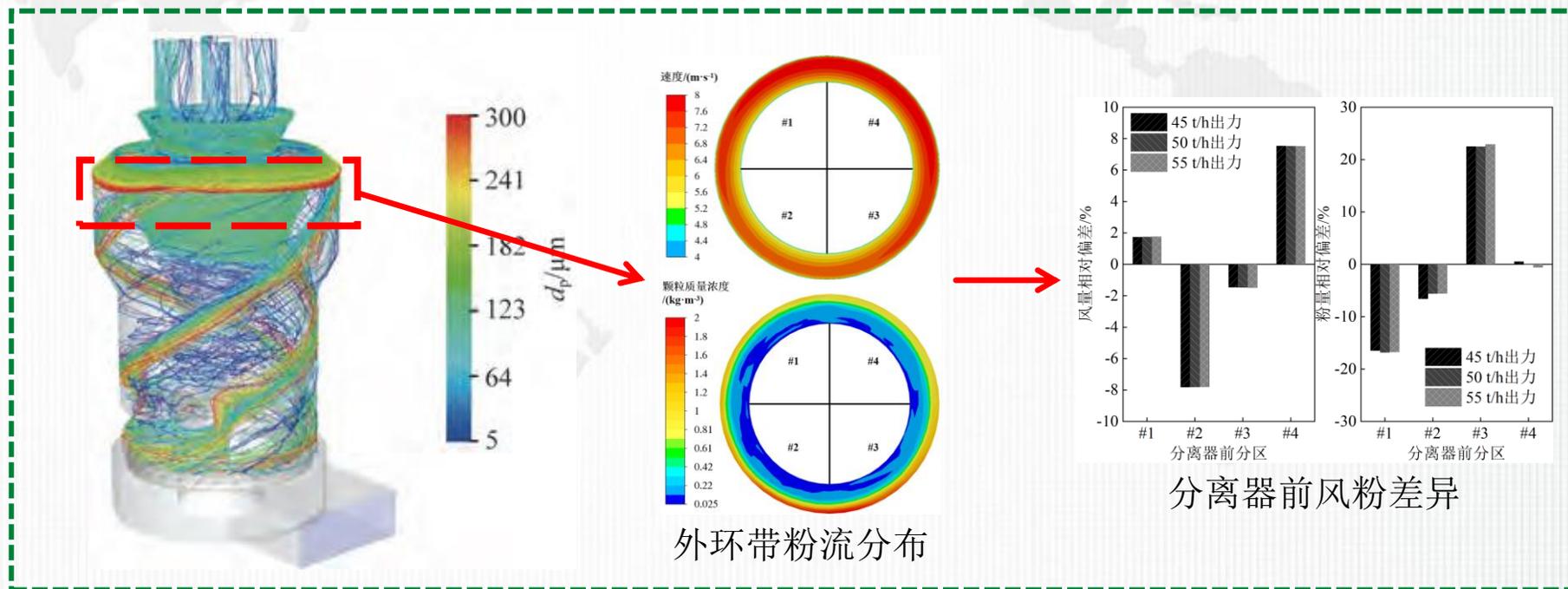
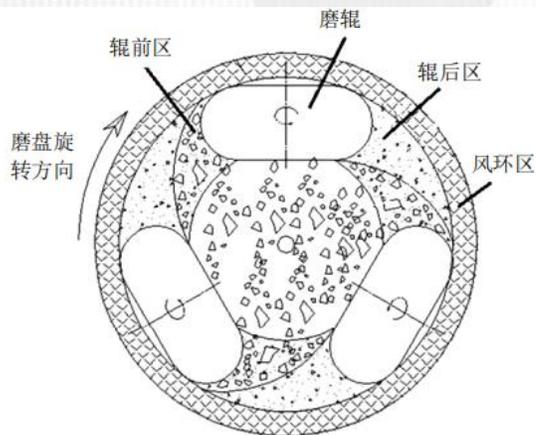
送粉管道阻力系数差异

磨煤机内部带粉流不均

一次风入磨非对称，风环动压不均

风环磨损、卡石子煤

磨辊影响，原煤溢出动态不均



制粉系统节流调平

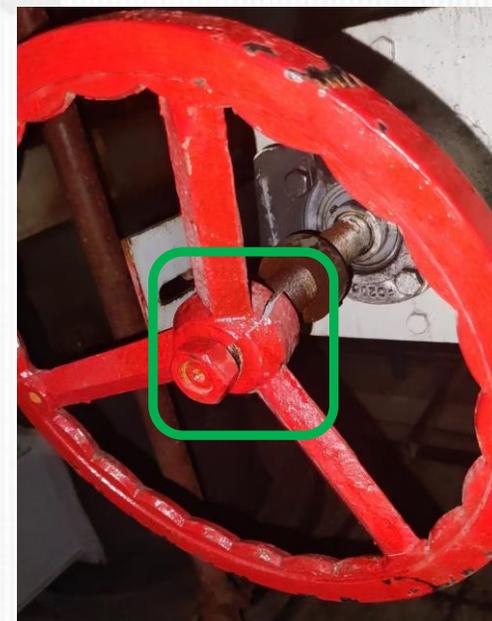
制粉系统节流调平

现场试验节流调平设备卡涩

- DL/T 5145-2012 《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》，出口并联粉管风量分配偏差应满足不大于5%且煤粉浓度偏差不大于10%；
- 往往通过各种节流元件来平衡各管道间的流阻实现一次风动力场均衡；
- 单芯、双芯可调缩孔门结构简单、应用广泛，是常用的制粉系统一次风节流调平元件；



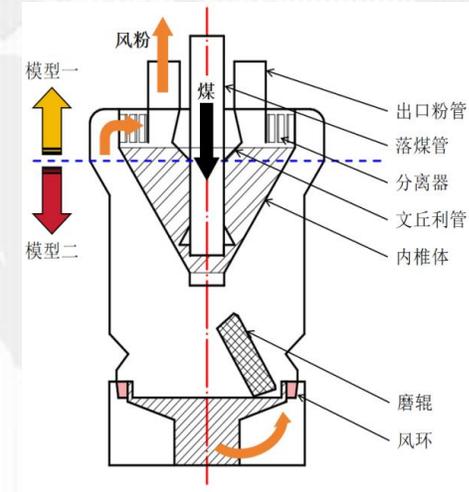
- 一般只在启机前和制粉系统性能试验期间会对可调缩孔门进行调整，调整后元件处于闲置状态，由于工作环境粉尘浓度大，可调缩孔门手轮调节丝杆易卡涩，甚至卡死，除锈清扫效果差，调平工作难以开展；
- 新换元件在短时间内就会出现卡涩现象，需要专人维修保养；



制粉系统节流调平

节流调平CFD数值计算模型

- 以某四角切圆锅炉制粉系统为对象，CFD数值模拟方法研究单台中速磨煤机气固两相流过程；
- 对该制粉系统磨煤机到燃烧器进口处通流段进行等比建模，以分离器前进口水平面为切割面，将整体模型结构一分为二，物理模型一包括磨煤机出口至旋转分离器、文丘利管、部分内锥体和出口一次风管道，模型二包括磨煤机进口风管道、风环、部分内锥体等主要结构；
- 用带旋流修正的Realizable K-epsilon双方程湍流模型模拟气相湍流，由于两相流煤粉体积占比小于10%，属于典型的稀相两相流，用DPM离散相模型对两相流进行求解计算；



气相湍流
(Realizable K-epsilon)
双方程湍流模型)

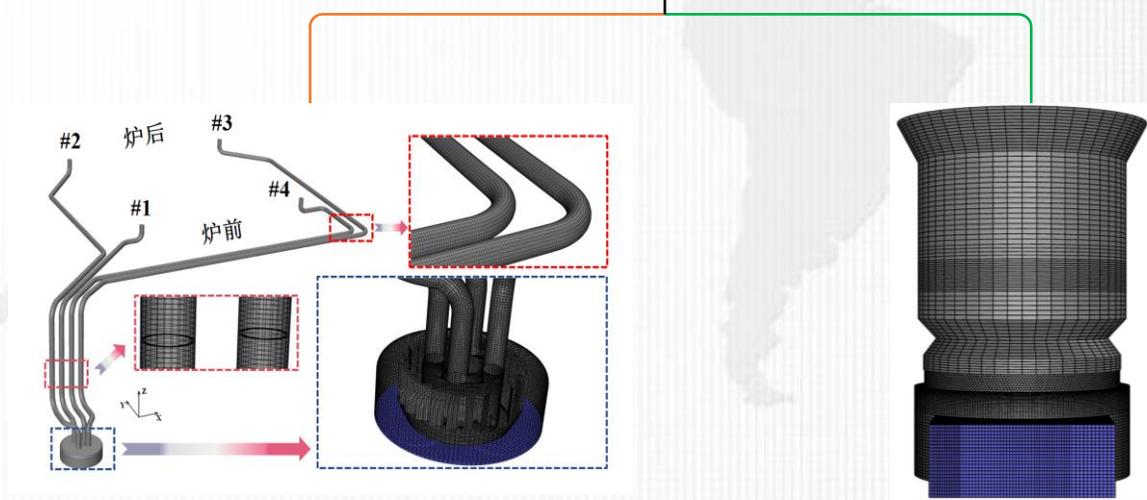
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2)$$

颗粒相（稀相流）
(DPM离散)

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_D + \sum_i F_i + m_p \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_p} g \quad (3)$$

控制方程



管道长度大小依次为#3>#4>#2>#1

制粉系统节流调平

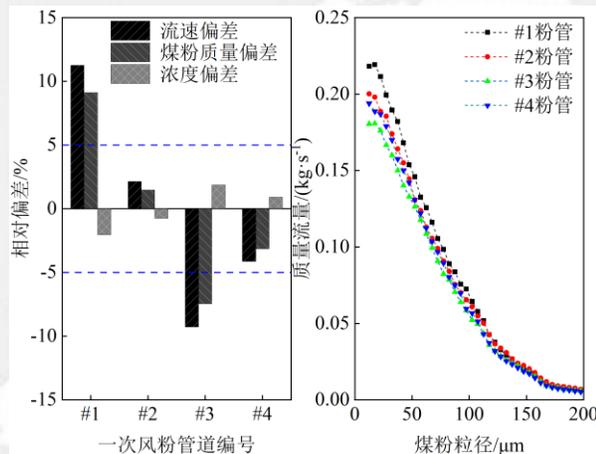
理想情况

● 假设分离器前截面上风粉均匀分布，管道阻力差异造成风量相对偏差达到**11.26%**，煤粉量相对偏差**9.12%**，各角煤粉粒径存在差异；

假设

分离器前风粉均匀

● 仅考虑管道流阻差异影响，节流调平后能有效调整出口管道内的风粉均衡性，风量和煤粉量相对偏差 $< 5\%$ ，送粉管道间煤粉粒径差异不大，可以提供稳定的风粉组织；



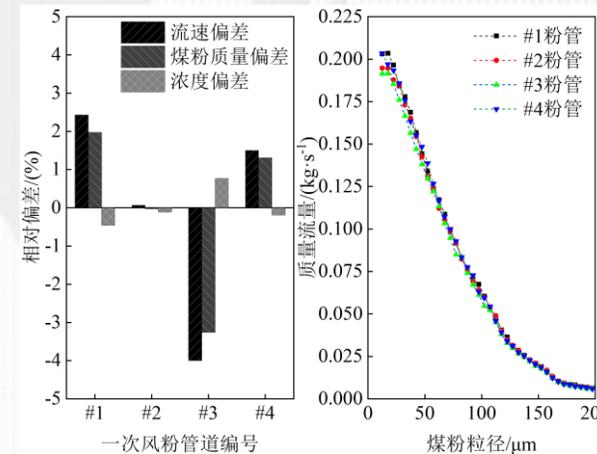
调前分配偏差和粒径分布

风: 11.26%

粉: 9.12%



节流调平



调后分配偏差和粒径分布

风: $< 5\%$

粉: $< 5\%$



节流调平

风粉均衡

制粉系统节流调平

实际情况

- 分离器前水平截面上的风粉分配差异很大;
- 考虑管道阻力和磨煤机内部风粉不均, 耦合影响造成出口送粉管道间风量相对偏差为 **11.14%**, 煤粉量相对偏差 **16.78%**;
- 因管道阻力影响风量分配偏差为 11.26%, 和实际偏差差异不大, 可以认为 管道固有阻力是出口管道间风量分配不均的最主要原因;

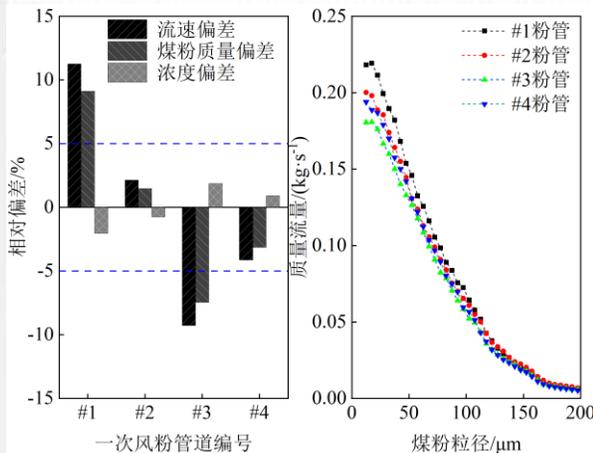
假设

分离器前风粉均匀

实际

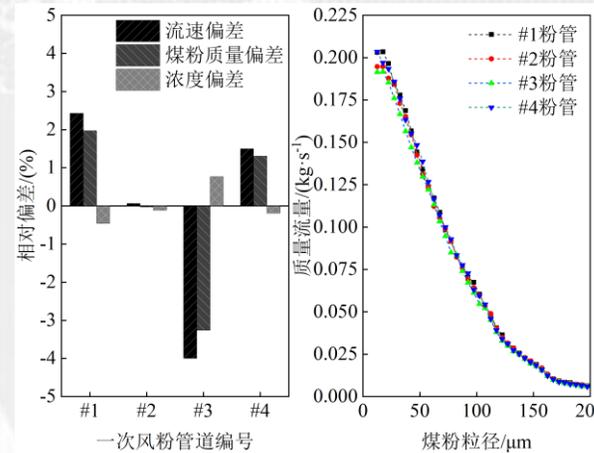
分离器前风粉不均

风: **11.26%**; 粉: **9.12%**



调前分配偏差和粒径分布

风: **<5%**; 粉: **<5%**



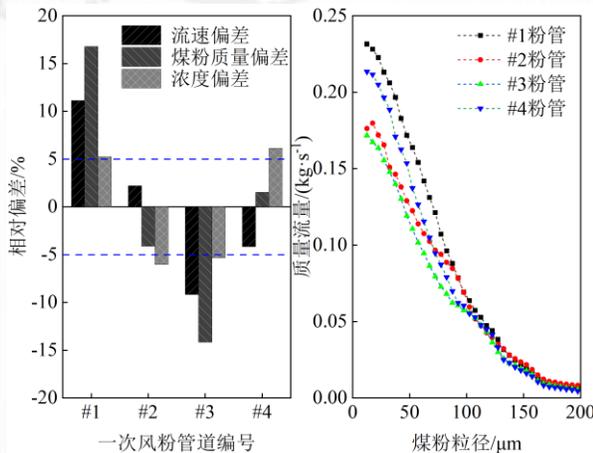
调后分配偏差和粒径分布



节流调平

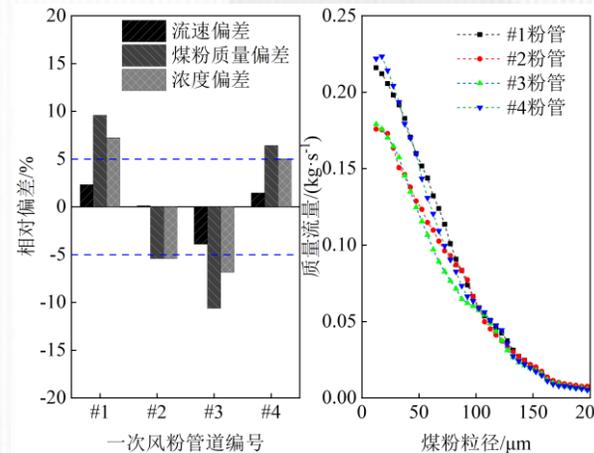
风粉均衡

风: **11.14%**; 粉: **16.78%**



调前分配偏差和粒径分布

风: **<5%**; 粉: **>10%**



调后分配偏差和粒径分布



节流调平

风平粉不平

制粉系统节流调平

● 考虑管道阻力和磨煤机内部风粉不均，节流调平无法有效调整煤粉分配，煤粉量分配偏差仍超过10%，煤粉粒径仍存在很大差异；

● 分离器前煤粉量分配不均和管道固有阻力系数差异共同影响出口一次风管道间煤粉分配偏差；

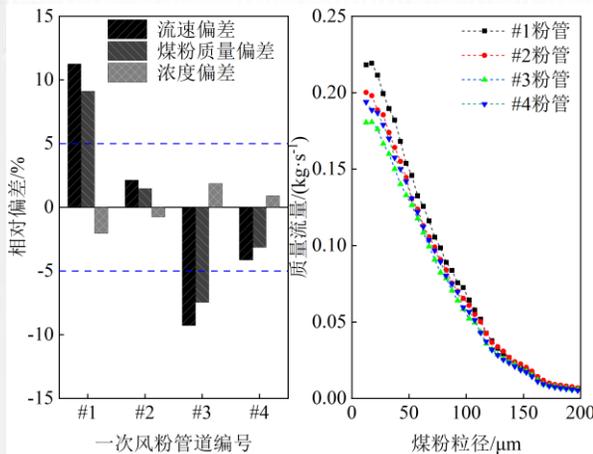
假设

分离器前风粉均匀

实际

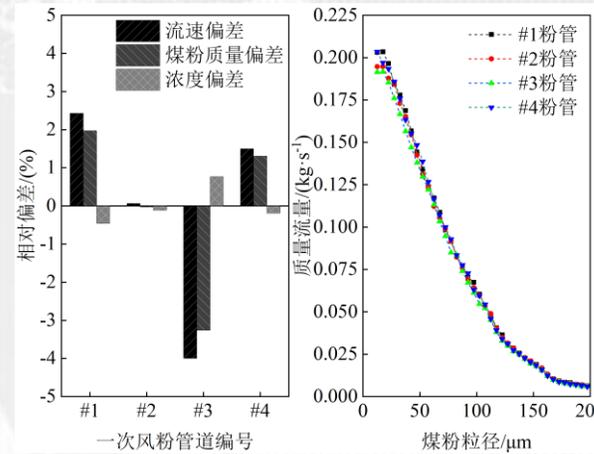
分离器前风粉不均

风: 11.26%; 粉: 9.12%



调前分配偏差和粒径分布

风: <5%; 粉: <5%



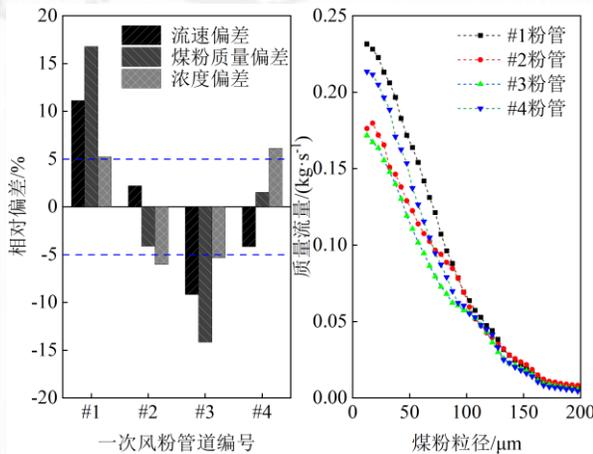
调后分配偏差和粒径分布



节流调平

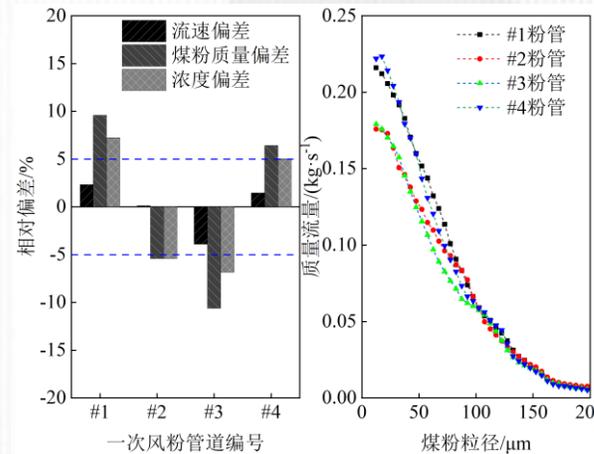
风粉均衡

风: 11.14%; 粉: 16.78%



调前分配偏差和粒径分布

风: <5%; 粉: >10%



调后分配偏差和粒径分布



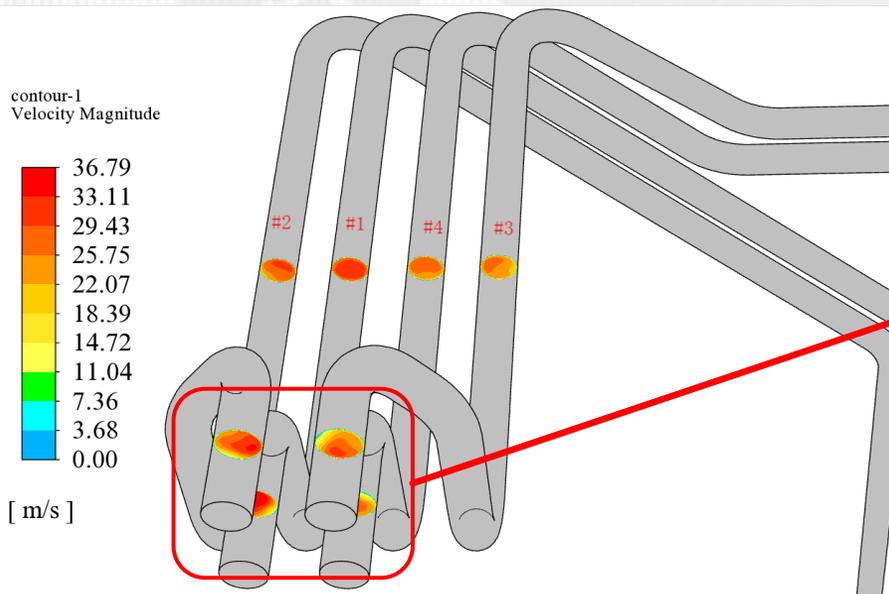
节流调平

风粉不平

制粉系统节流调平

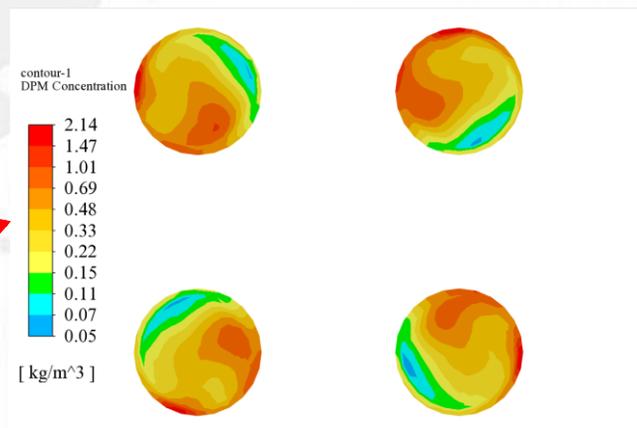
节流调平无法有效调整煤粉分配

- 模拟实际不均条件下，可调缩孔门对出口一次风管道间的煤粉均衡调节作用有限，即使在调平一次风速后，**煤粉量偏差仍超过10%，且会增大煤粉浓度偏差**；
- 模型考虑了磨煤机一次风进口非对称和内部部分结构的影响，而部分风环吹损或内部结构出现问题，磨煤机内部带粉流紊乱，不均现象会更严重，因此**实际粉管间的煤粉量相对偏差会更大**；



调前热态送粉管道内风速

#1角距离最近，风量更大
#3角距离最远，风量最小

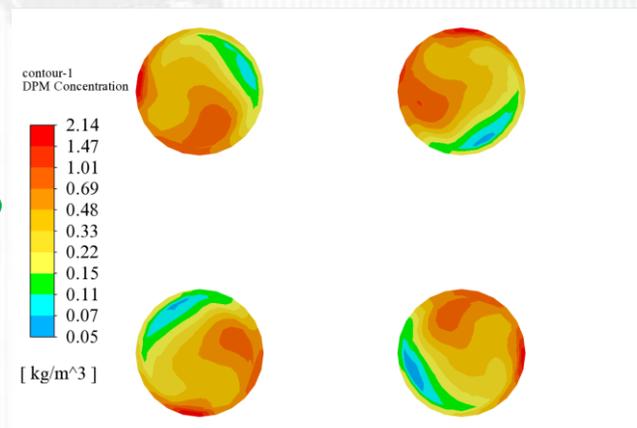


调前热态磨煤机出口煤粉浓度

#1、#4角带粉浓度高



节流调平



调后热态磨煤机出口煤粉浓度

#1、#4角带粉浓度高

制粉系统节流调平

通过制粉系统性能试验针对性了解风速调平后煤粉分配偏差情况

常规性能试验

- 1.冷态通风风速调平及标定;
- 2.热态工况风速调平及标定;
- 3.磨煤机常用工况运行性能摸底;
- 4.制粉系统出力特性试验;
- 5.煤粉细度特性试验;
- 6.风量特性试验;

参考标准:

《电站锅炉性能试验规程》(GB/T 10184-2015);
《电站磨煤机及制粉系统性能试验》(DL/T 467-2019);
《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》(DL/T 5145-2012) ...

试验内容

印尼煤、尚一煤适应性试验

针对常用磨组,磨辊改造后的磨煤机和未经改造的磨煤机对印尼煤、尚一煤的适应性试验。

煤粉浓度、细度分配差异试验

各台磨煤机出口4根粉管间的煤粉浓度、煤粉细度分配差异摸底研究

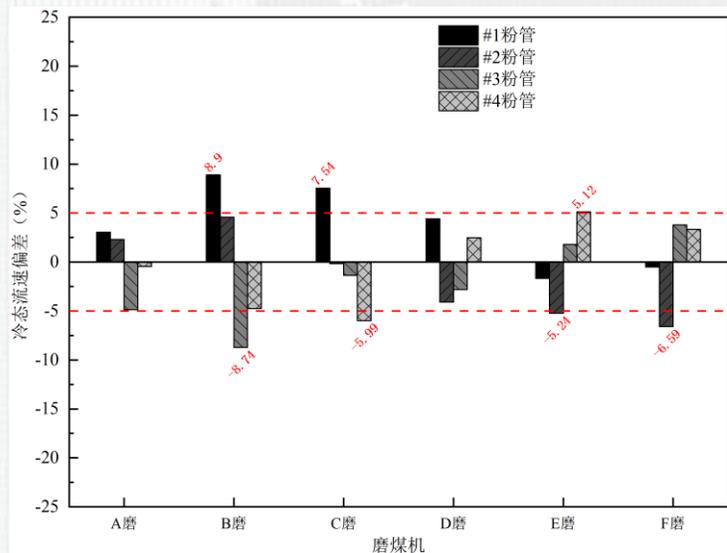


制粉系统试验现场

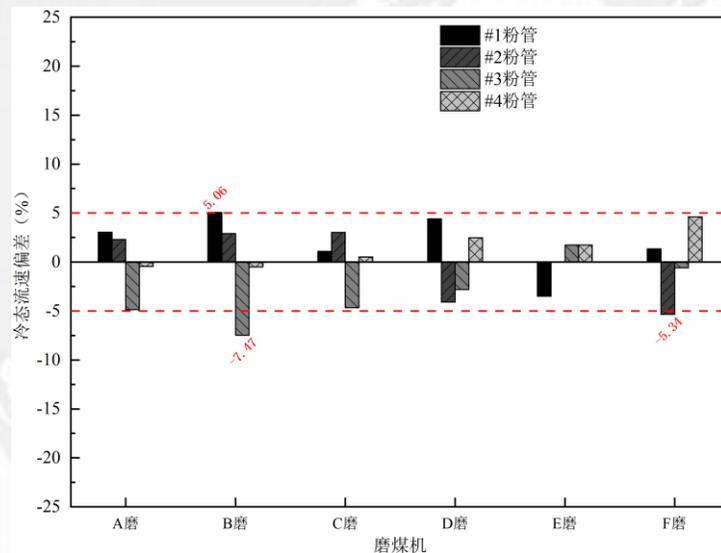
很多情况下,制粉试验未对煤粉分配情况做深入研究,但煤粉分配对燃烧温度场影响是不可忽略的

制粉系统节流调平

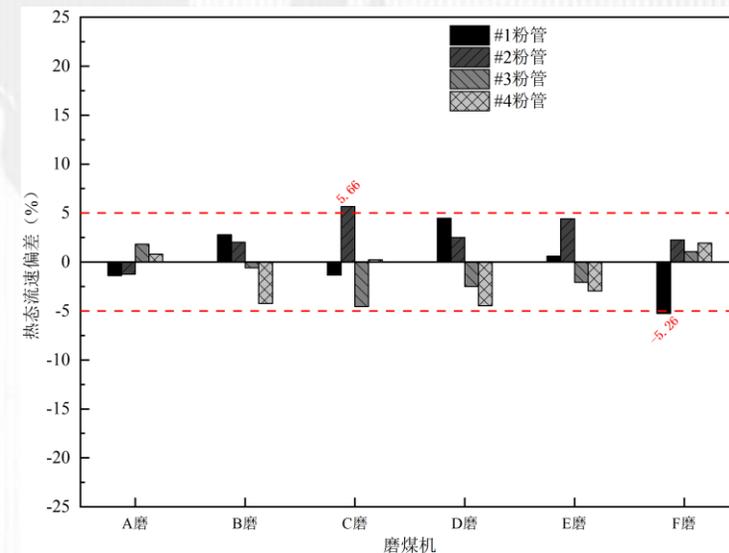
- 冷热态运行期间，对制粉系统出口送粉管道间风速进行了调平；



制粉系统冷态一次风速偏差
(调平前)



制粉系统冷态一次风速偏差
(调平后)



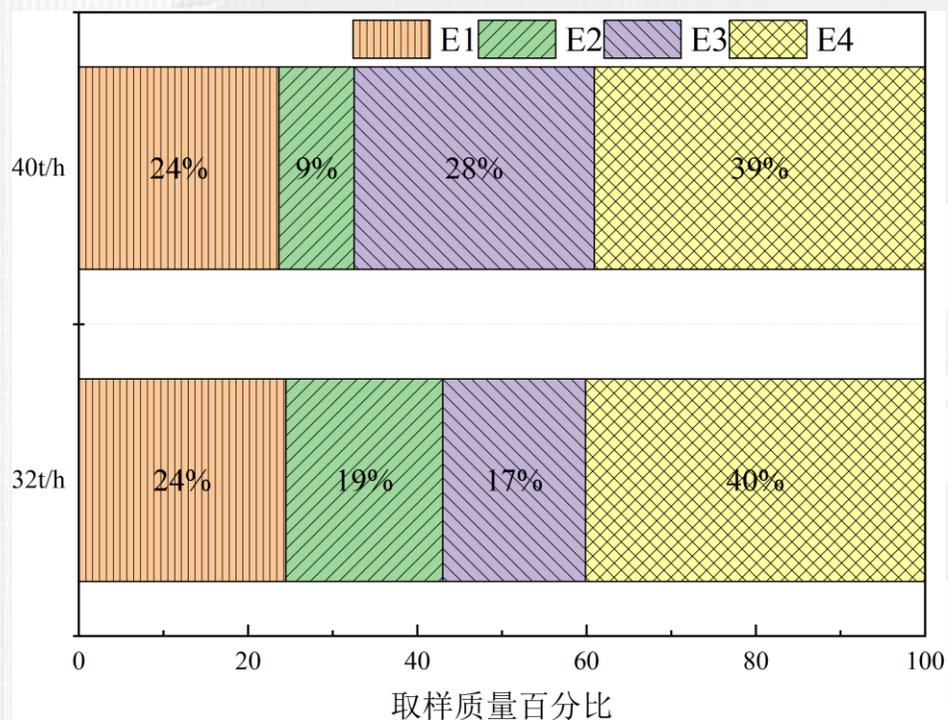
制粉系统热态一次风速偏差
(调平后)

可以看到，未调整前的偏差稍高，调整后基本满足要求，冷态调整防止启机后风速偏差过大，热态调整是针对带粉影响后偏差再次增大后的细调，能够为炉膛切圆燃烧提供稳定一次风动力组织。

制粉系统节流调平

风速调平后看煤粉分配偏差情况

● 实际中调整可调缩孔门只能进行风量分配平衡，出口煤粉浓度和细度偏差很大，有必要对制粉系统各工况下出口煤粉浓度和细度偏差进行试验；



变出力工况出口粉管等时间取样质量百分比

● 同样煤质，对E磨煤机做变出力工况下的等时间等速取样，变出力后#4粉管内煤粉量占比总是在40%左右，**煤粉量分配相对偏差达到了60%**；

● 出力变化对粉管间煤粉量最大分配偏差影响作用较小，#4角燃烧器总是煤粉浓度偏高，炉内不均衡燃烧；

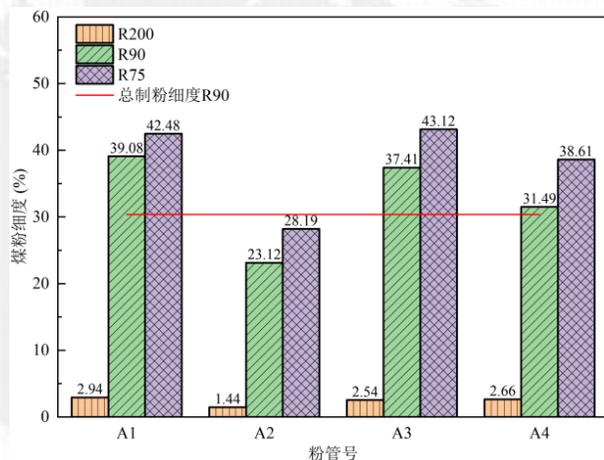
制粉系统节流调平

试验还对所有磨煤机调平后的煤粉细度进行测试

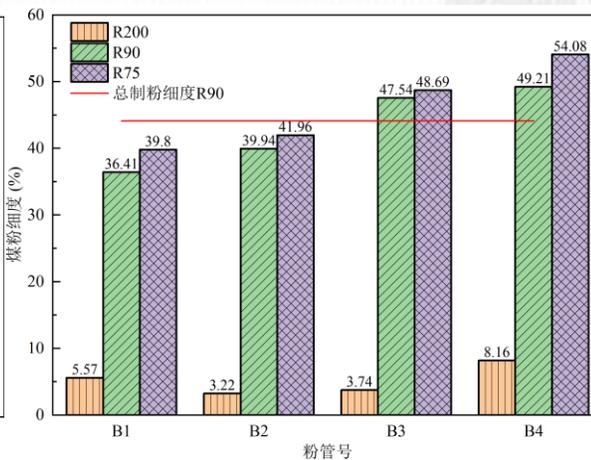
● 不同磨煤机煤粉分配特性不一，例如ADE三台磨煤机总制粉细度、粉管间煤粉分配偏差存在较大差异；

● 即使风速调平后能保证稳定动力组织，节流无法实现煤粉细度的平衡，而带粉浓度和细度将影响四角燃烧器的着火速度和强度，切圆温度场不均衡，从而影响炉内燃烧效率；

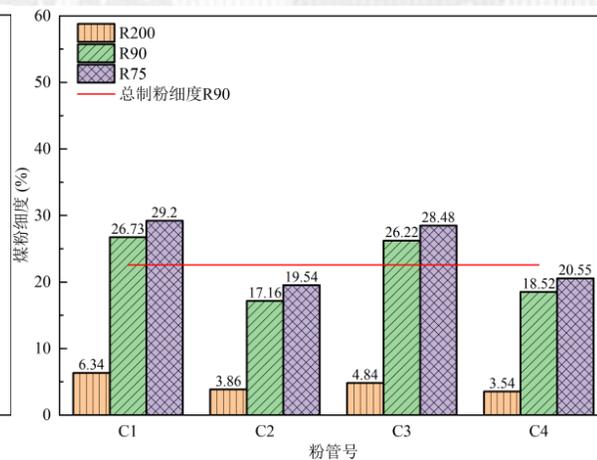
● 以总制粉细度为参考，各台磨煤机出口粉管间的煤粉细度偏差基本都超过20%，尤其是E磨煤机，煤粉分配非常不均匀，细度相对偏差最大值超过60%；



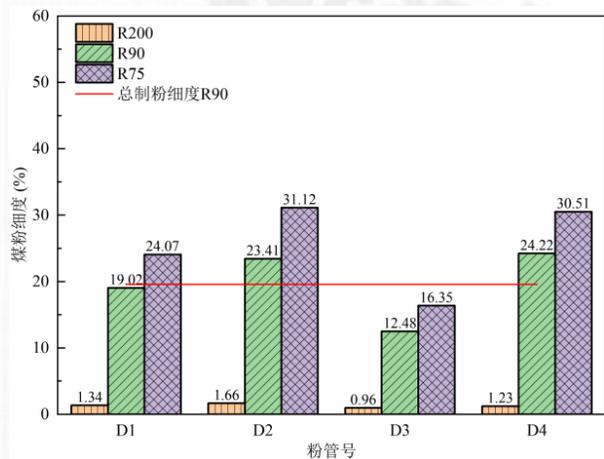
(a)A磨煤机(华中长耀)



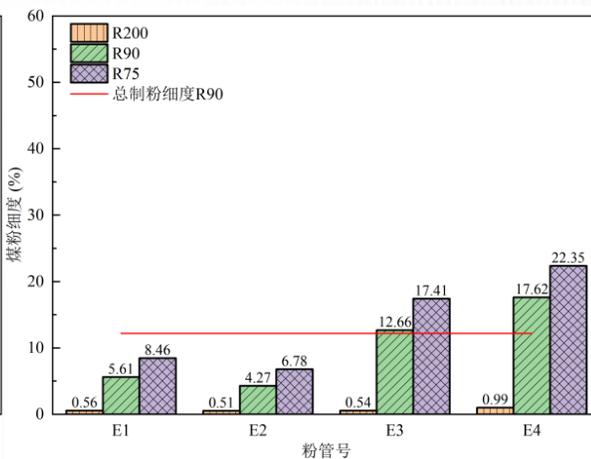
(b)B磨煤机(荆州)



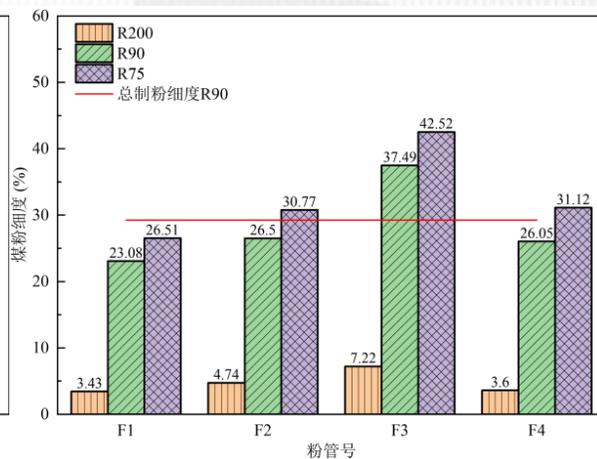
(c)C磨煤机(印尼)



(d)D磨煤机(华中长耀)



(e)E磨煤机(华中长耀)



(f)F磨煤机(榆中)

制粉系统节流调平

其中，E磨煤机情况比较特殊

● 同样运行华中长耀煤，A、D磨正常运行通风阻力3.9kPa，但E磨煤机明显通风受限，热风门开度到顶也无法有效带粉；

● 受流场紊乱影响，通风不畅的磨煤机出粉过细，此时粉管间的煤粉浓度、煤粉细度等参数相对偏差更为严重，运行应尤其关注，适当降低分离器频率；

A、D、E磨煤机性能试验结果

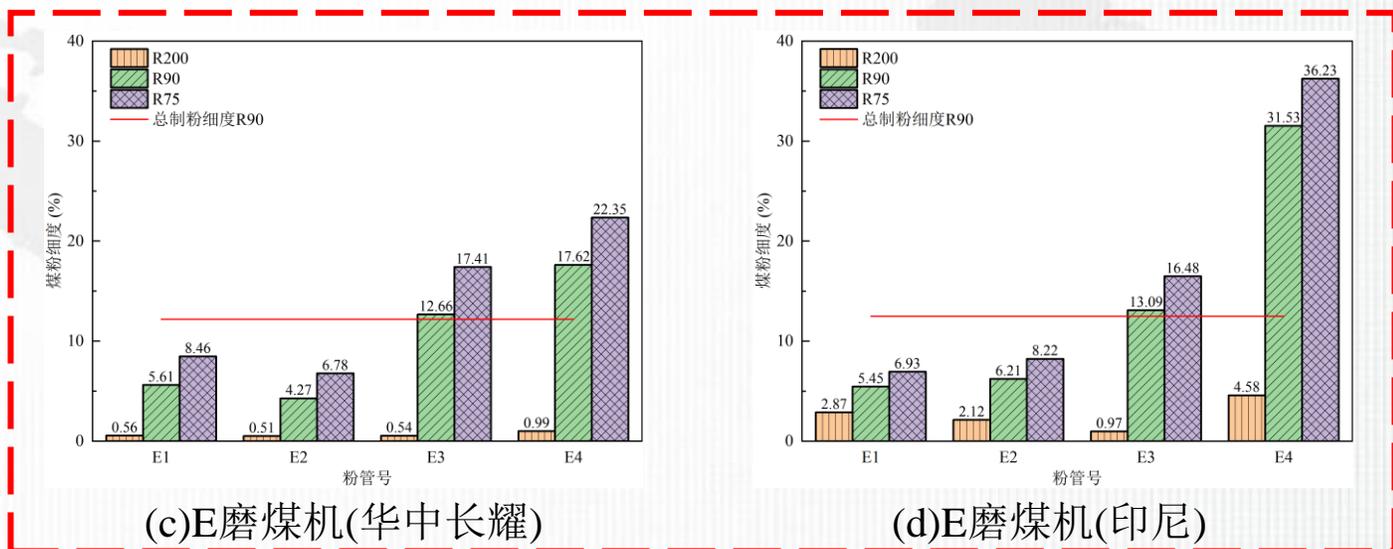
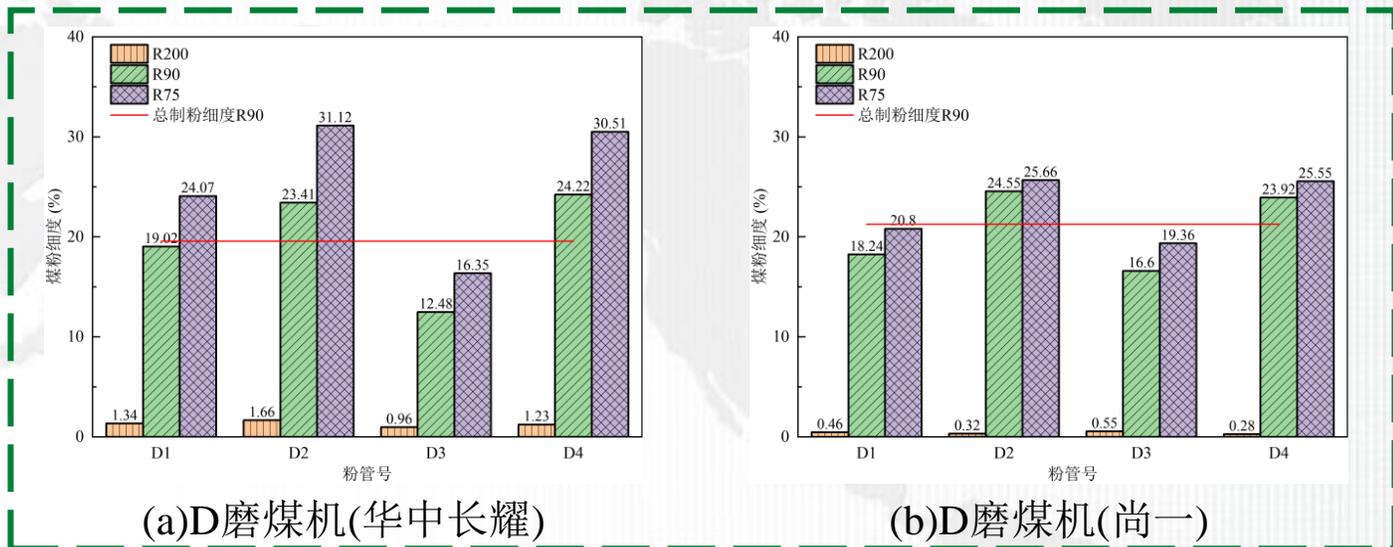
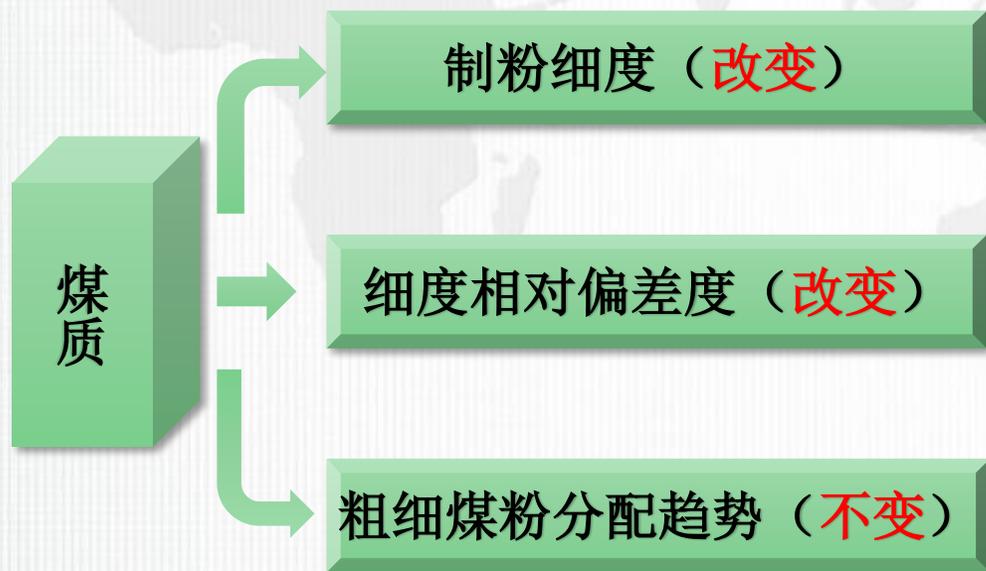
磨组	A	D	E
煤种	华中长耀	华中长耀	华中长耀
煤量 (t/h)	40.141	40.522	40.525
风量 (t/h)	80.415	80.714	78.345
风煤比	2.003	1.992	1.933
分离器频率 (Hz)	25.283	25.250	24.933
出口风温 (°C)	87.953	87.621	87.160
热一次风风压 (kPa)	8.688	8.572	8.196
一次风进口风压 (kPa)	6.665	6.051	7.438
磨出口风压 (kPa)	2.777	2.143	2.810
磨煤机差压 (kPa)	3.888	3.908	4.628
热风门开度 (%)	40.834	38.651	84.332
冷风门开度 (%)	7.964	5.404	36.125
磨煤机电流 (A)	52.641	54.258	53.899
磨煤机单耗 (kW·h/t)	11.58	11.83	11.75
R ₂₀₀ (%)	2.18	1.31	0.72
R₉₀ (%)	30.34	19.56	12.19
R ₇₅ (%)	35.70	25.28	16.28
均匀性系数	1.37	1.19	1.03

制粉系统节流调平

试验还基于煤质影响煤粉细度差异做了研究

● 对D磨煤机，总是#2和#4粉管内煤粉较粗，而#3粉管内煤粉较细， R_{90} 最大相对偏差绝对值分别为**36.20%**和**21.92%**；

● 对E磨煤机，总是#4粉管很粗，而#1和#2粉管内煤粉很细， R_{90} 最大相对偏差绝对值分别为**64.97%**和**152.64%**；

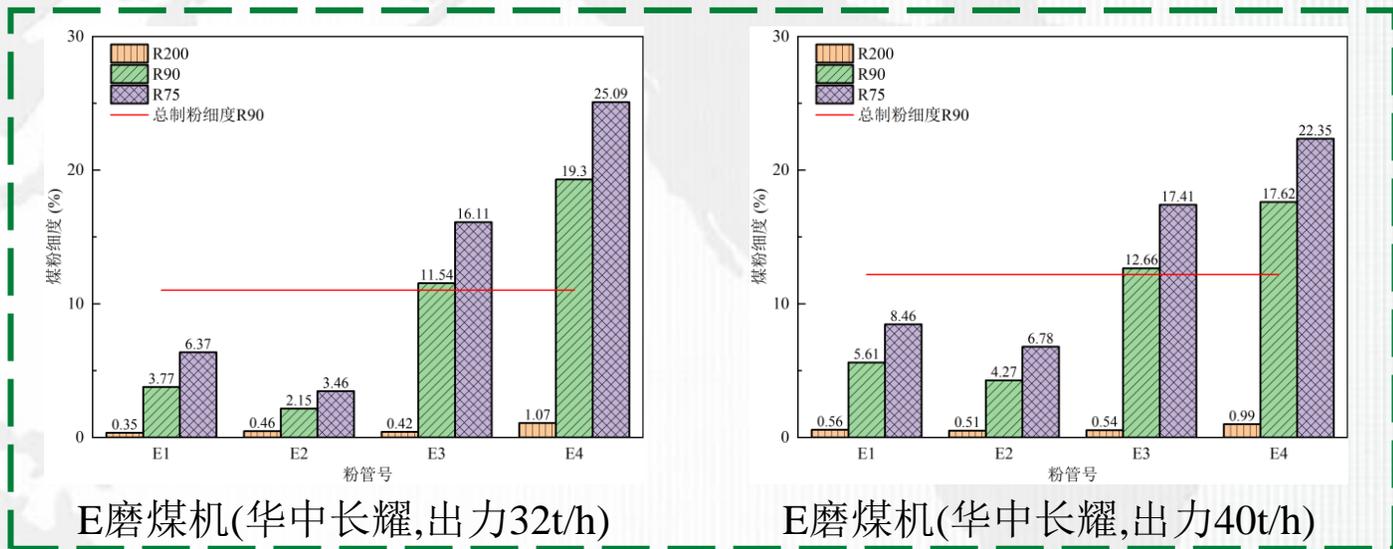
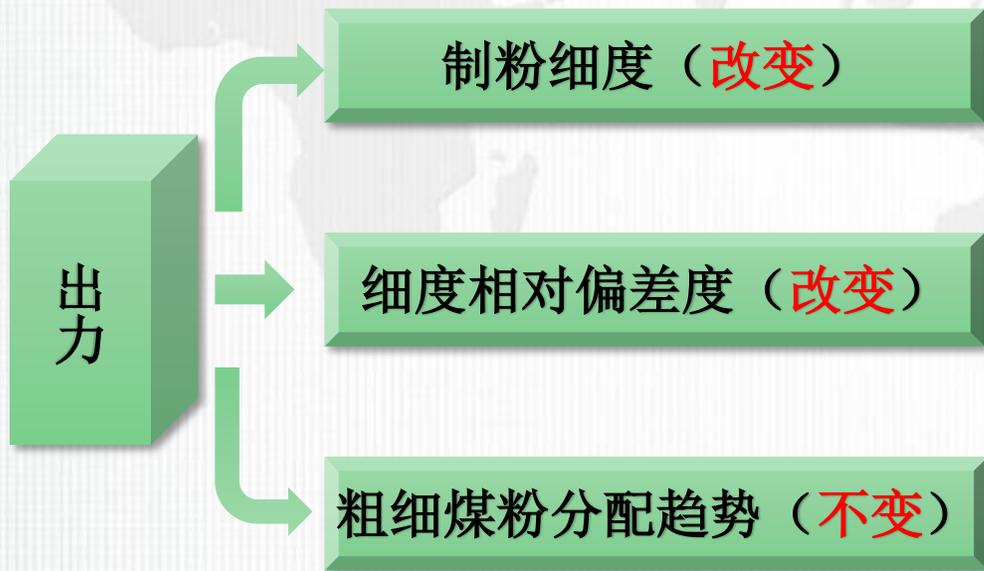


制粉系统节流调平

出力影响制粉性能是明确的，但对于影响细度偏差情况了解较少

● 由于单位时间内磨制煤量增大弱化了研磨效果，出力增加后煤粉变粗；出力32t/h时R₉₀最大相对偏差绝对值为**80.49%**，出力40t/h时最大相对偏差绝对值为**64.97%**；

● 出力变化并不影响粉管间粗细煤粉分配趋势，#4粉管内煤粉总是较粗；



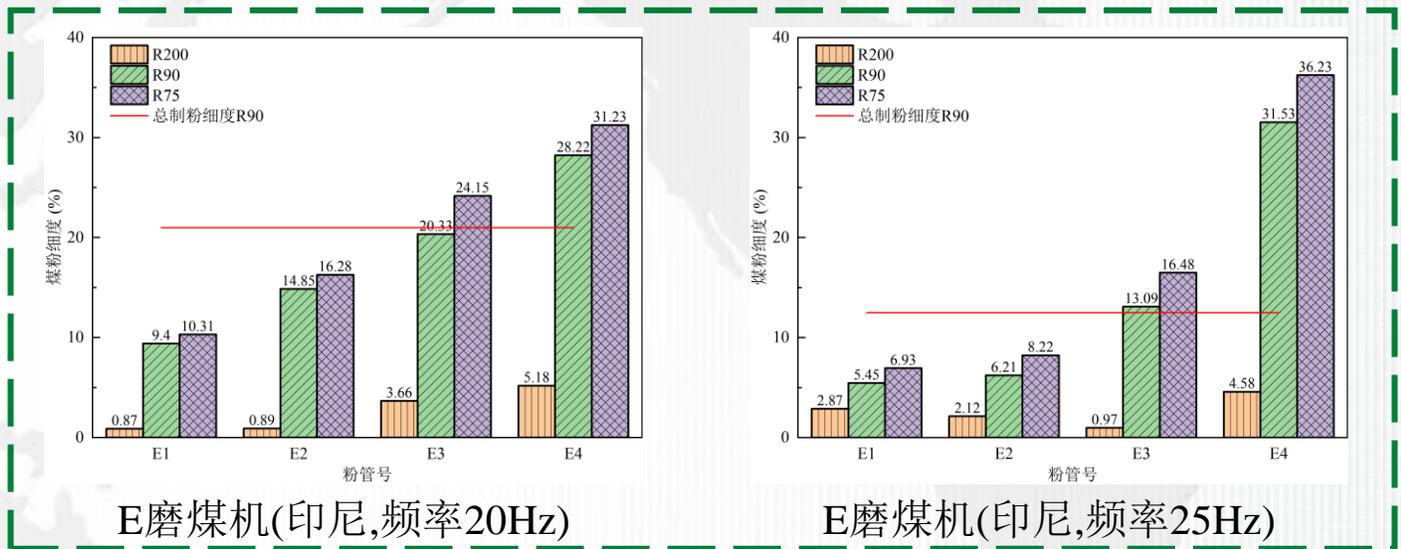
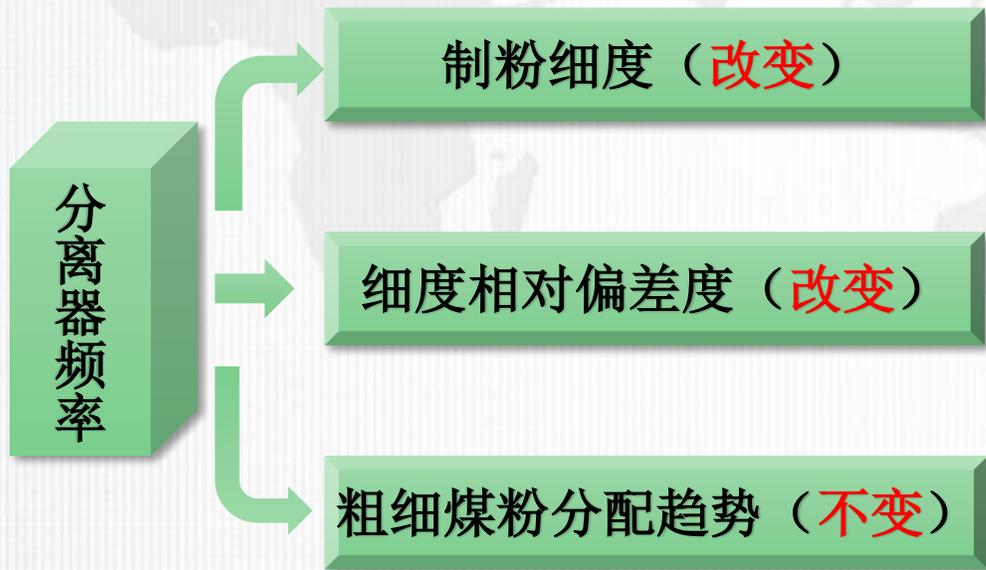
制粉出力增大后，落煤分摊均匀性增强，溢出煤粉量增多，风环处煤粉量增大，稍微缓解了煤粉粗细分配偏差，但对通风受限磨煤机，四角煤粉细度偏差仍严重

制粉系统节流调平

试验还得到了分离器频率影响细度偏差情况

● 调整动态分离器频率是最为有效的控制磨煤机出口煤粉细度的方法，分离器频率由20Hz增加到25Hz后，总制粉细度 R_{90} 从20.98%迅速降低到12.48%；

● 频率增加后，细度 R_{90} 最大相对偏差绝对值由55.20%显著提升至152.64%；



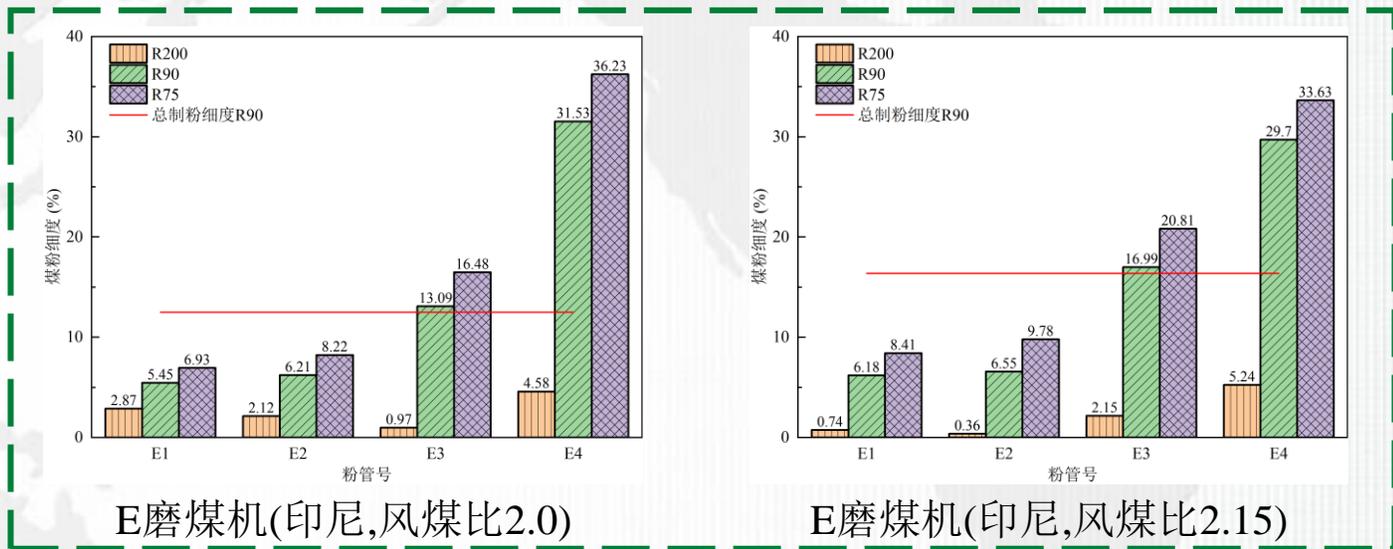
磨煤机内部通风不良问题发生后，其内部风粉流动已出现严重失衡，靠近#4粉管区域的带粉浓度很大，粗煤粉直接从#4粉管送入炉膛，分离器频率应根据制粉细度效果合理控制，20Hz频率下出粉细度已经满足推荐要求

制粉系统节流调平

从风煤比对煤粉细度偏差影响结果看出

● 风煤比通过影响煤粉受曳力大小进而影响制粉细度，提升风煤比后制粉总细度 R_{90} 从12.48%增大到16.35%；

● 风煤比对粗细煤粉分配趋势无影响，总是#4粉管内煤粉很粗，细度 R_{90} 最大相对偏差绝对值由152.64%降低到81.65%；



加强通风能力能缓解粉管间煤粉细度偏差，典型通风阻力大、出粉很细的磨煤机运行褐煤应在满足运行安全条件下适当提升风煤比，并在后期检修过程中检查通风流道，尤其是风环处磨损和脱落情况，必要进行技术改造；运行褐煤制粉干燥出力下降，适当提高风煤比也能增加一次风刚性，推迟着火点，避免喷口处结焦；

风粉调平建议

制粉系统风粉调平建议

- 可调缩孔门设备简单，在保证稳定均衡的燃烧动力场组织上非常重要，但现场测试调整较难，日常工作繁琐，目前少部分电厂应用了风粉在线测量及均衡系统；
- 可调缩孔门等节流元件作用于冷、热态风速调平效果好，其对出口一次风管道间的风粉均衡调节作用有限，即使在**调平一次风速后煤粉量偏差仍超过10%**，有些偏差甚至会超过60%，应对各磨煤机出口煤粉量、煤粉细度分配情况进行试验，煤粉量最大偏差在40%以下可以通过二次风配风调整（如开大粉量大的燃烧器辅助风）、风煤比调整等常规燃烧调整手段缓解偏烧问题，但**偏差超过60%往往伴随着制粉系统存在较大问题，必须借助煤粉侧和二次风侧的改造才能从根本上解决偏烧**；
- 煤粉量分配偏差往往伴随着煤粉细度相对偏差，一般带粉越多则越粗，出口粉管间煤粉细度偏差是普遍现象，**运行工况变化也仅仅改变相对偏差度，无法有效解决偏差问题**，通风受限磨煤机偏差更为严重，**提高风煤比能稍缓解**；
- 在燃煤机组调峰能力要求高、灵活性改造运行现状下，加装煤粉分配器是有效可行调整煤粉量的手段，**频繁出现偏烧问题的燃煤机组在燃烧调整效果不佳时，可以考虑加装煤粉分配器**；

请批评指正!

郭修文

联系电话：13161334346