

第二届燃煤锅炉耦合生物质发电技术应用研讨会



卓建坤

清华大学煤清洁燃烧国家工程中心总工程师，教授，负责清华大学工业及民用锅炉煤清洁燃烧国家工程研究中心的管理工作，促进科研成果的工程示范研究开发。主要从事天然气低氮燃烧技术、先进发电及灵活调峰技术、生物质能高效利用等应用基础研究和技术开发，发表论文40多篇。“大型燃煤电站大气污染物近零排放技术研究及工程应用”获2016年度中国电力科学技术进步奖一等奖。

生物质混烧特性及对锅炉运行影响

2019年4月17-18日 中国·石家庄



生物质耦合燃煤发电的锅炉运行影响 及控制技术研究

报告人：卓建坤 副研究员

清华大学能源与动力工程系

2019年04月16日



国家工程中心简介:



清华大学
Tsinghua University

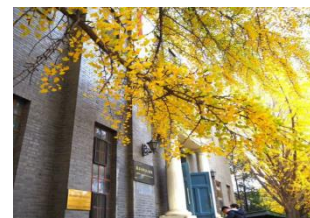
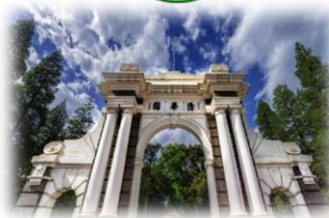
清华大学民用煤与工业锅炉煤燃烧国家工程研究中心于1996由国家发改委批准建立。为国内能源、动力与环保骨干企业在科研、技术开发、技术服务、培训等方面提供高质量的服务和解决方案。

中心在成果转化方面采取二种模式：**一是通过技术服务和技术转让来实现；二是与企业紧密合作联合开展成果转化与产业化工作。**在循环流化床锅炉燃烧技术、煤粉及天然气低氮燃烧技术、燃煤多污染物协同脱除技术、智能燃煤发电与灵活性改造、废弃物资源化利用技术等取得了丰硕的产业化应用，获得国家 and 省部级奖项十余项。

紧扣当前燃煤电厂**机组灵活性发电改造及控制技术**和多污染物**协同深度治理**的需求，提供的核心关键技术服务包括：

- 燃烧系统优化技术
- 燃烧器模拟及优化技术
- 清洁、高效、低负荷稳燃技术
- 智能燃煤发电技术
- 煤与可再生能耦合发电技术

- 壁温监测与灰渣防控技术
- 空预器防堵与在线监测技术
- 低低温电除尘精细化设计及运行优化
- 可凝结颗粒物与多污染物深度脱除技术
- 燃煤烟气污染物测试技术

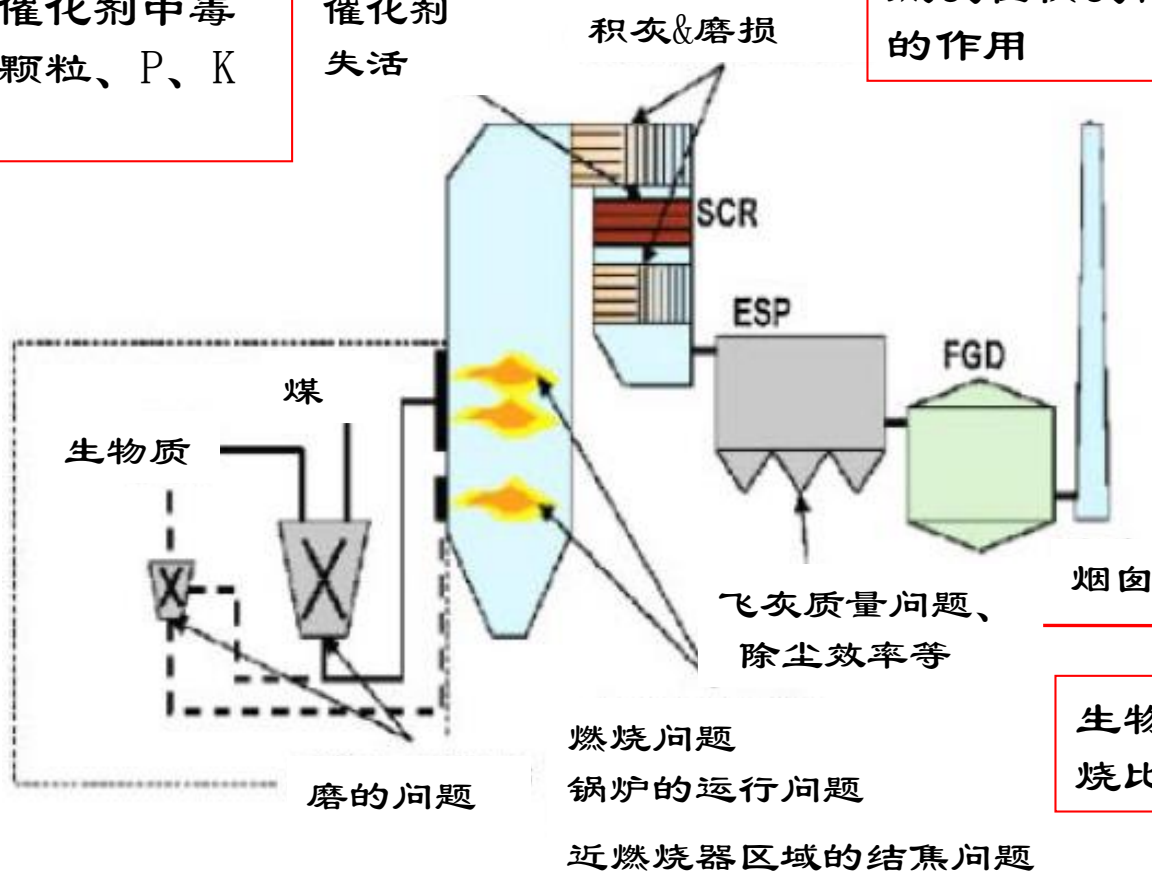


生物质直接混烧的关键问题

堵塞、催化剂中毒
亚微米颗粒、P、K
等

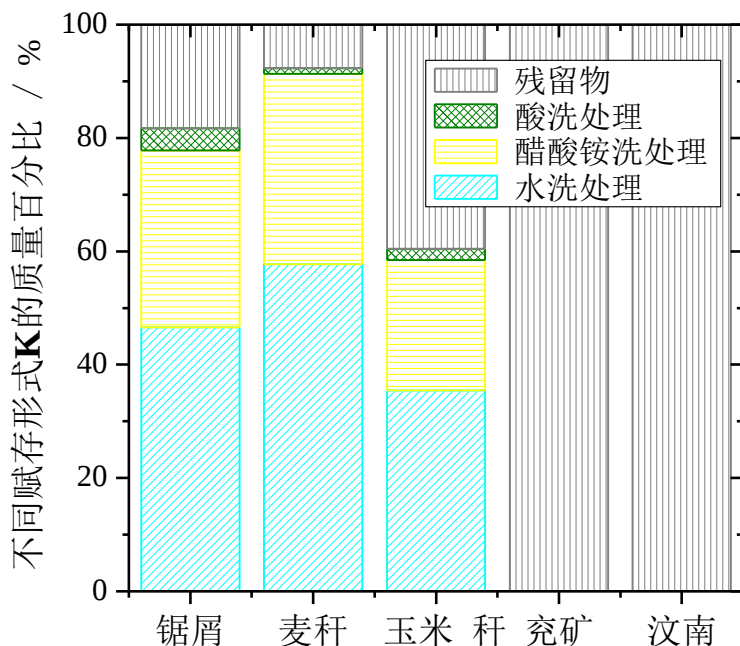
催化剂
失活

亚微米颗粒，尤其是低熔
点灰在积灰初期起着关键
的作用

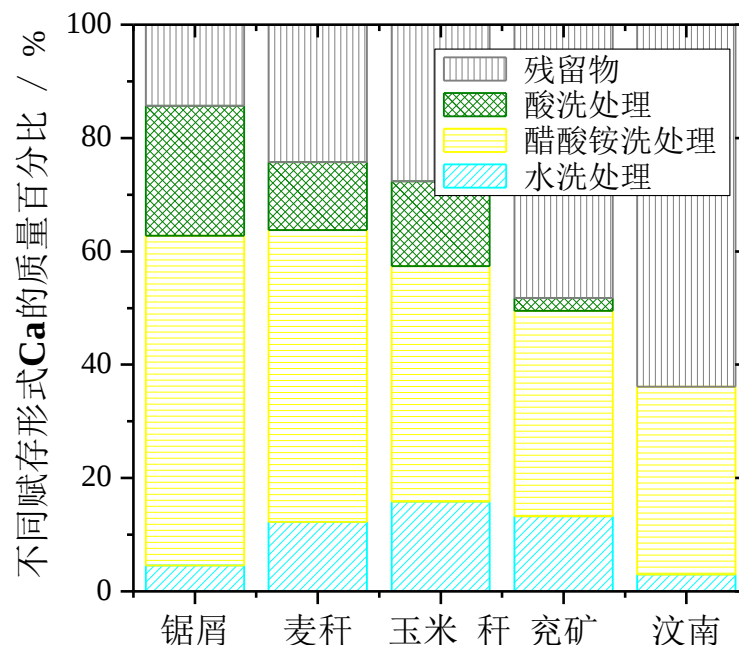


无机矿物质的迁移和转化是核心的问题

1. 生物质中碱金属和碱土金属的赋存形式



K

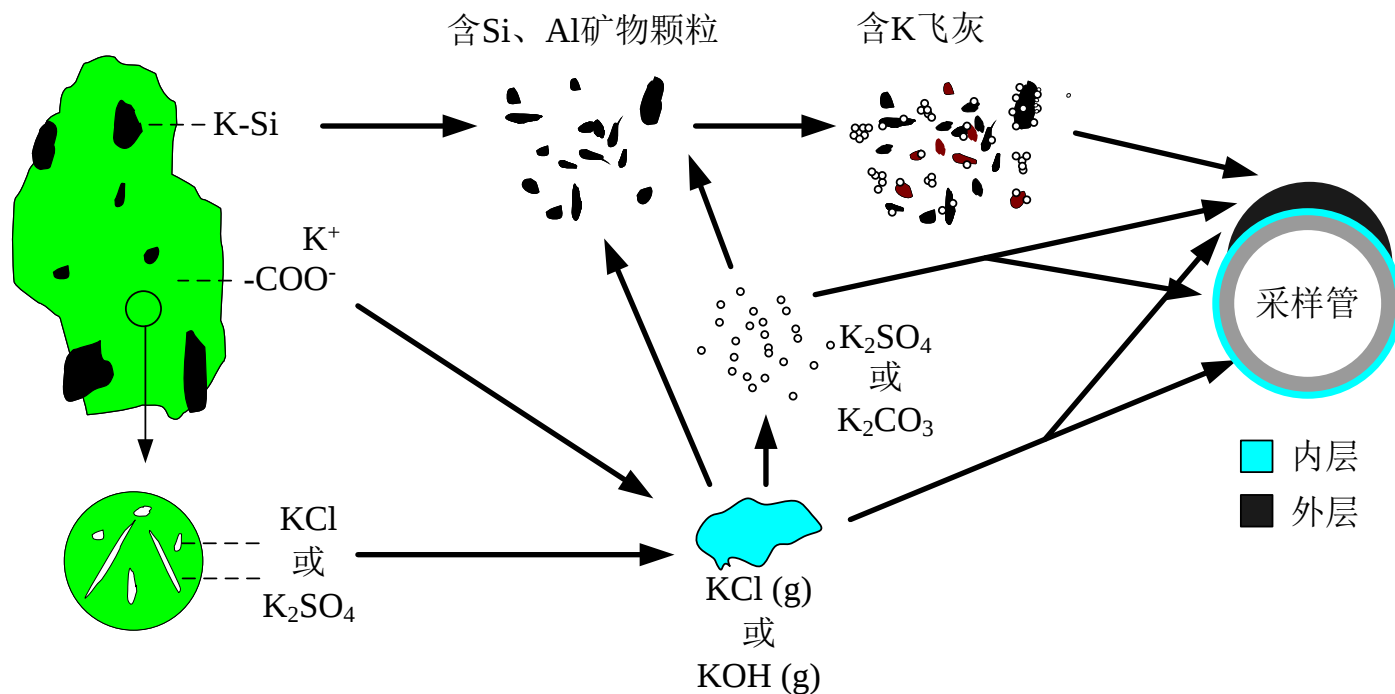


Ca

- 生物质中的碱金属主要以水溶性盐和有机键存在形式;
- 生物质中的Cl,S,P等均以高反应性成灰物质存在;



煤/生物质燃烧飞灰颗粒物的形成



燃烧多途径复杂成灰过程

矿物质析出

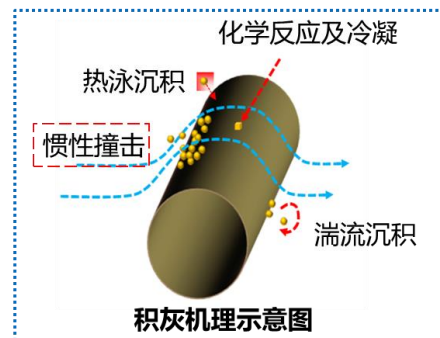
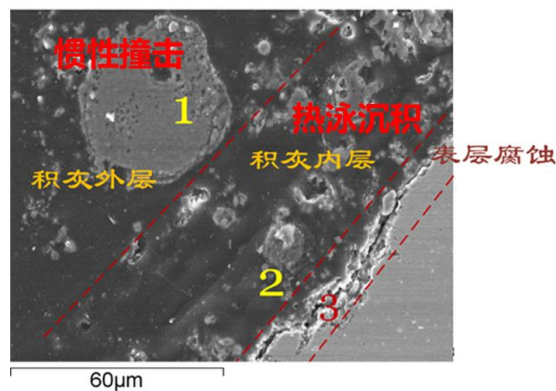
矿物质气固转化

矿物质聚合

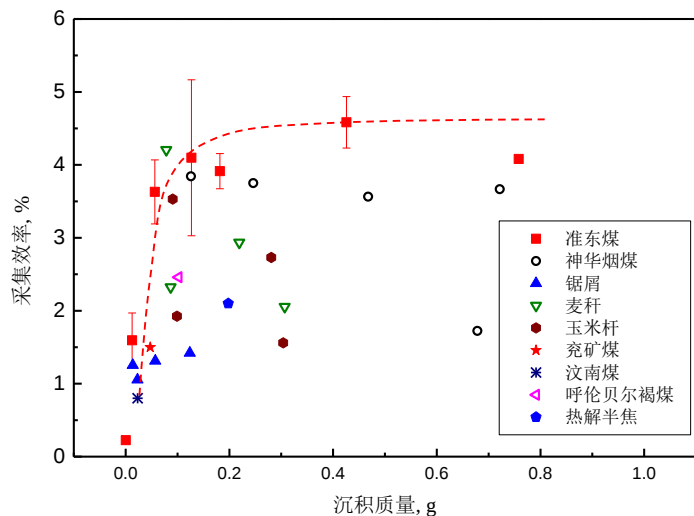
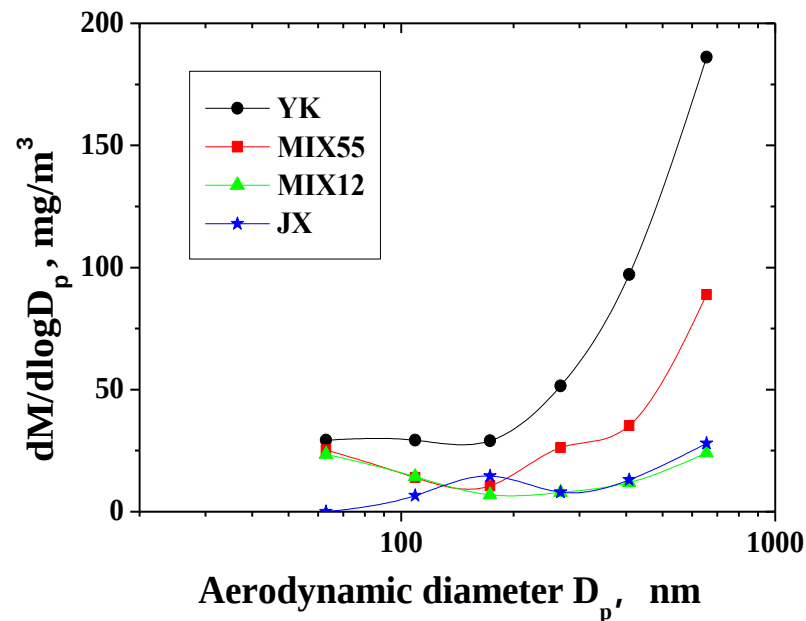
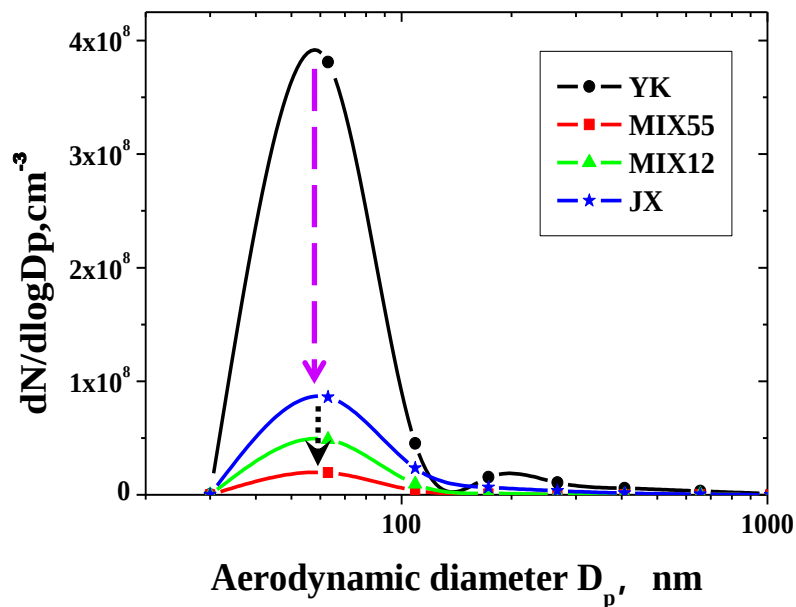
矿物质破碎

矿物质直接转化

颗粒物碰撞聚并



燃烧或混烧后的细颗粒生成和积灰的影响



YK

Co-firing

JX

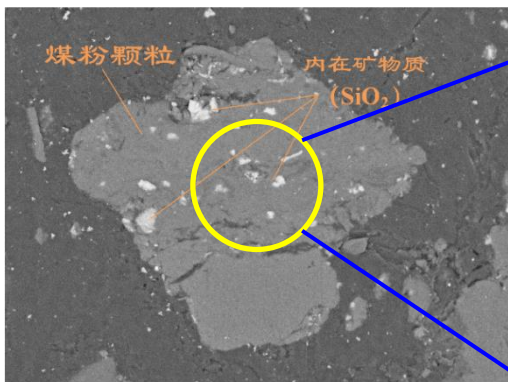




炉内飞灰生成-积灰结渣关联

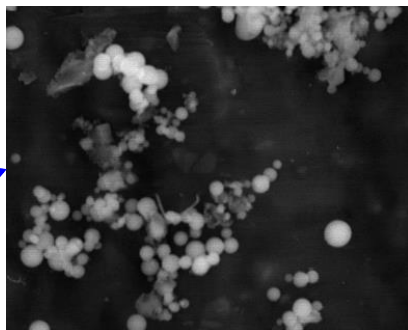
煤中矿物质

(Na, K, Ca, Mg, Si, Al, Fe等)

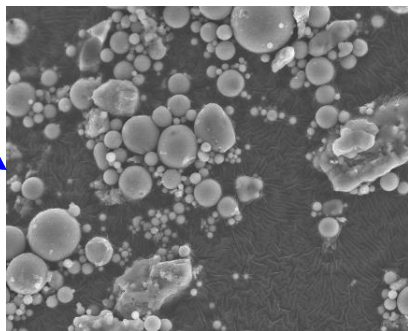


- 成灰特性
- 结渣特性
- 积灰特性

成灰特性预测



细模态颗粒物

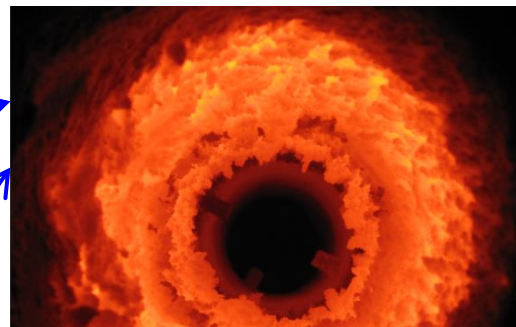


粗模态颗粒物

辐射换热区
水冷壁
屏过

对流换热区
一过、二过
一再、二再

结渣特性预测



积灰特性预测

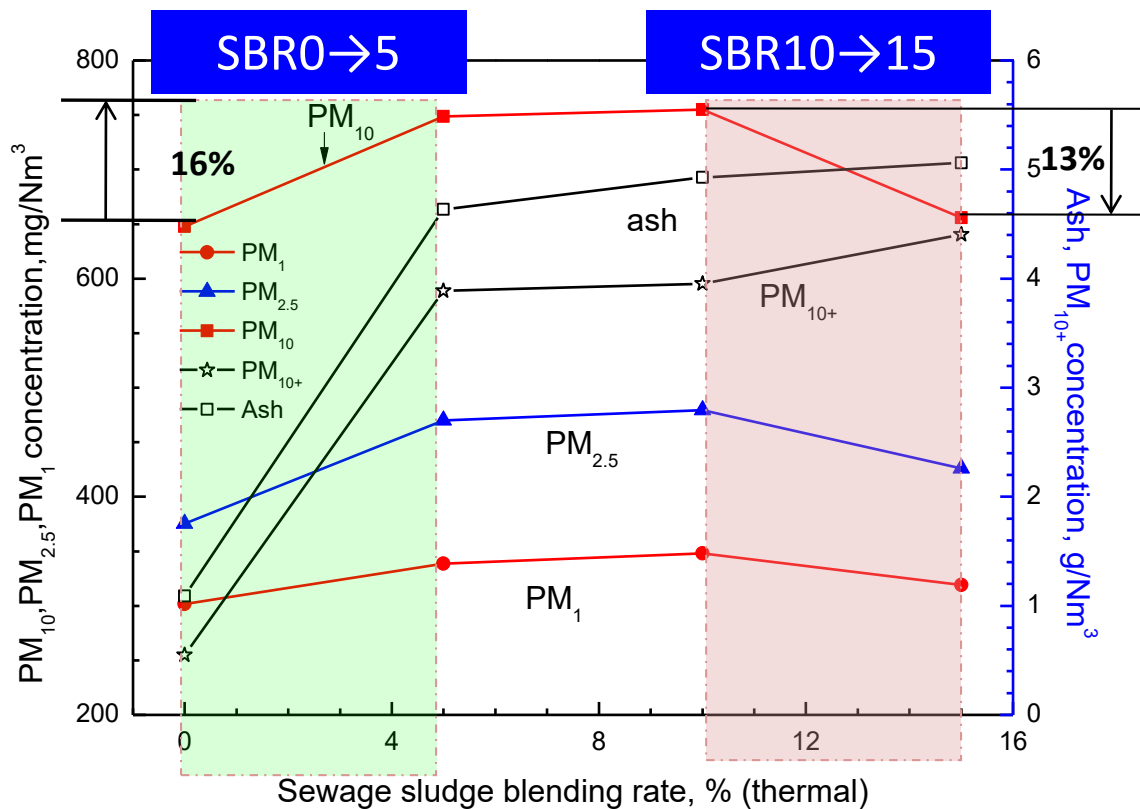


(关注的煤种: 高碱煤、高铁煤、生物质混烧)

混烧比例的影响 (以污泥为例)

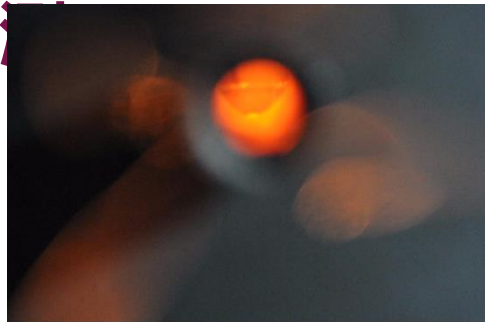
◆ 掺烧比例的改变, PM10、PM1等粒径范围颗粒物急剧变化

◆ 烟气冷却过程中的磷酸盐化和硫酸盐化过程是影响细颗粒生成量减少的一个重要原因, 当污泥掺烧量达到15%, 超细颗粒物中除了磷酸盐含量的增加, P_2O_5 细颗粒也急剧增加



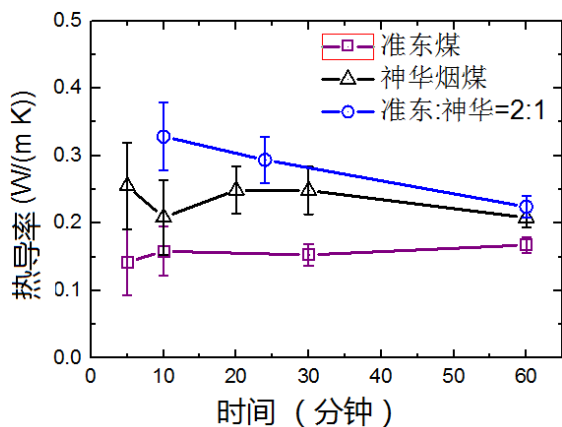
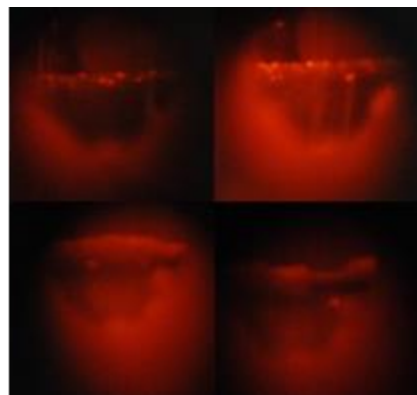
烟气冷却过程的磷酸盐化和硫酸盐化增加了尾部受热面堵塞的风险

1. 炉内积灰结渣实时监测及受热面壁温监测



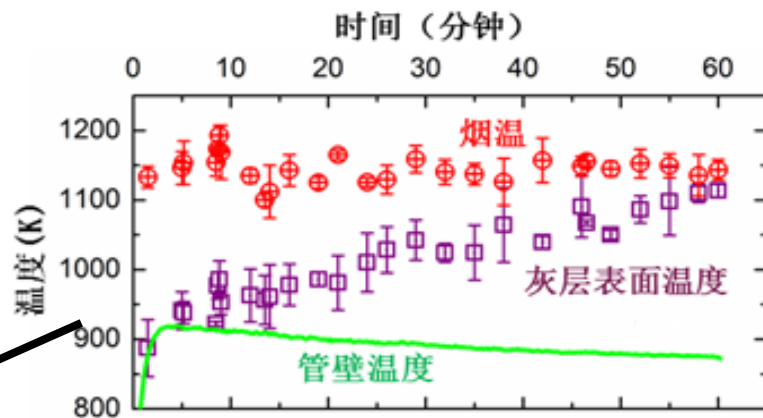
- ❑ 新型RGB相机三色测温方法
- ❑ 系统简单可靠，灵活度高
- ❑ 可实现对炉内积灰结渣的动态监测与表面温度在线测量
- ❑ 可结合灰渣层热阻对壁温动态特性进行监测

RGB相机监测系统



积灰层热阻

壁面灰渣层温度监测

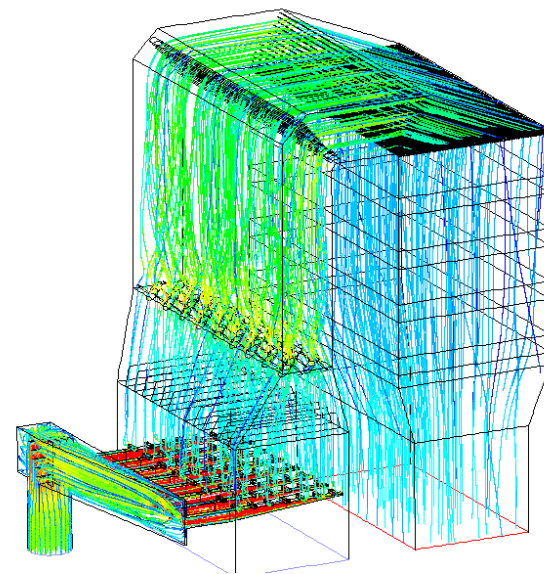
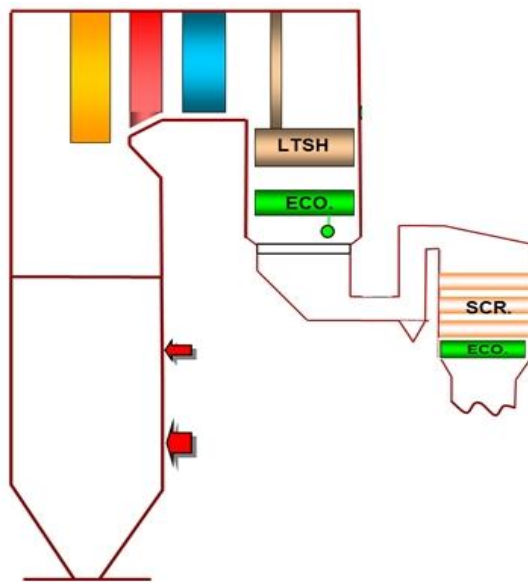
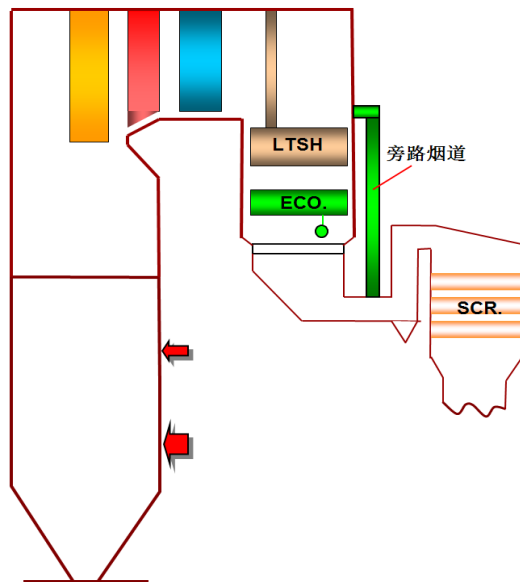


- 积灰表面温度: 800-1150 K (烟温: ~850°C)
- 灰层热导率: 0.14-0.32 W/(m.K)



2.空气预热器防堵与在线监测技术

□全负荷脱硝技术



■全负荷脱硝方案

- ✓烟气旁路方案
- ✓分级省煤器方案
- ✓烟气旁路+分级省煤器

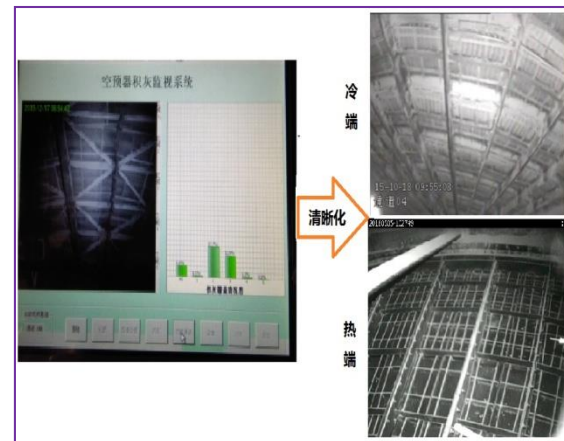
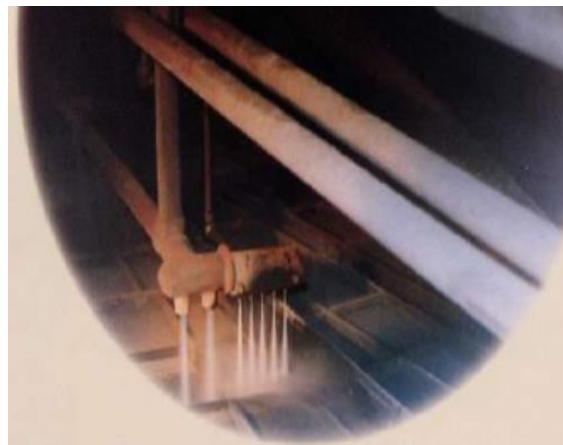
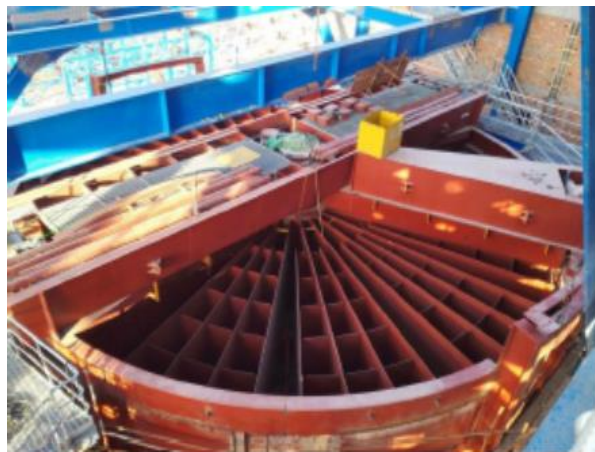
■优化脱硝入口NO_x

- ✓SCR脱硝全流程仿真
- ✓低负荷下脱硝入口NO_x检测

■低负荷下喷氨策略

- ✓增加喷氨阀门达到不同负荷下喷氨均布
- ✓全断面氨残留检测

空气预热器防堵与在线监测技术



主动控制——预防

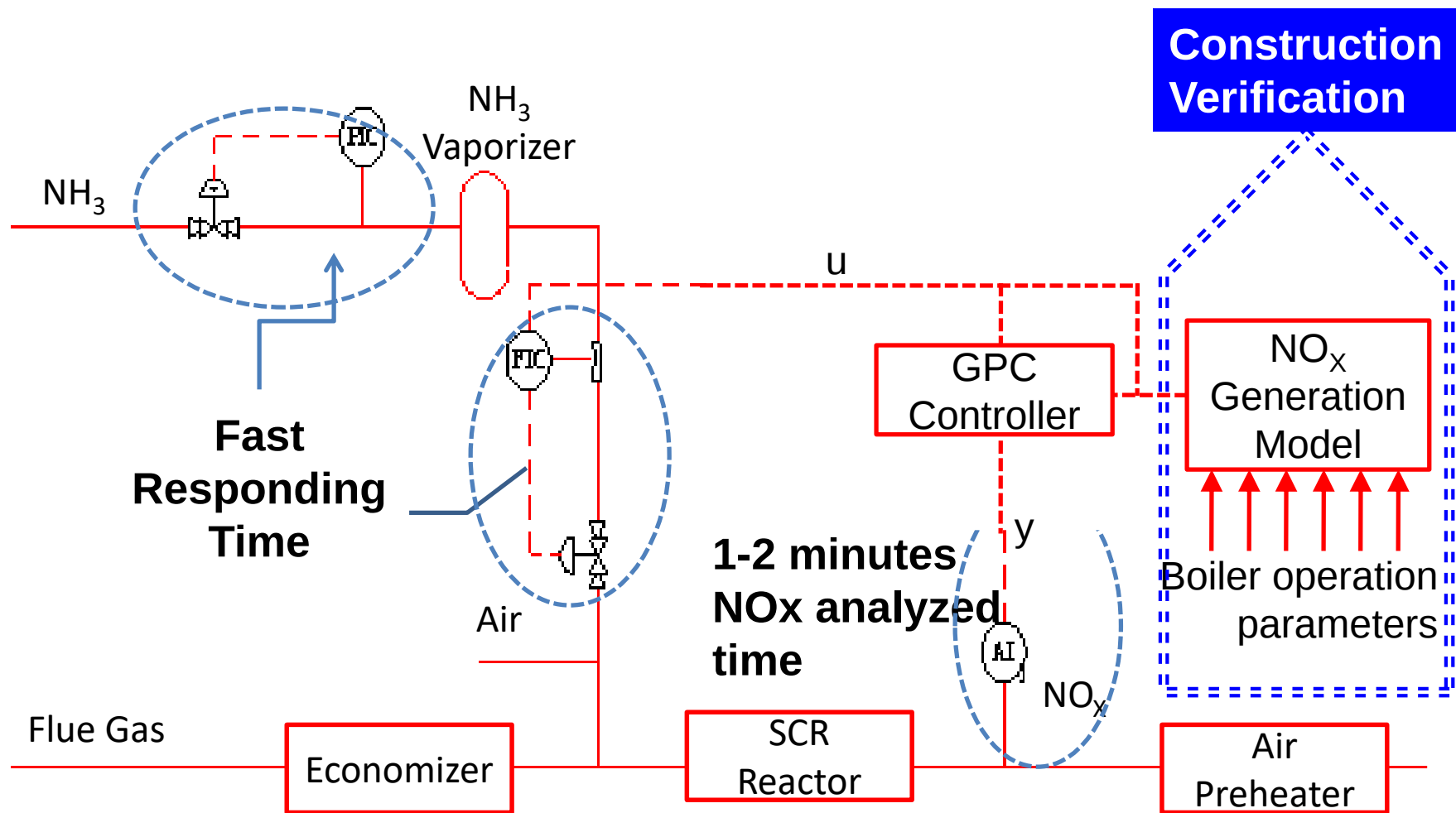
- 锅炉低氮燃烧与SCR 系统运行协调关系优化
NO_x生成
- SCR氨逃逸调控
喷氨、流场优化、控制逻辑(NO_x预测)、
- 空预器出口烟温调控

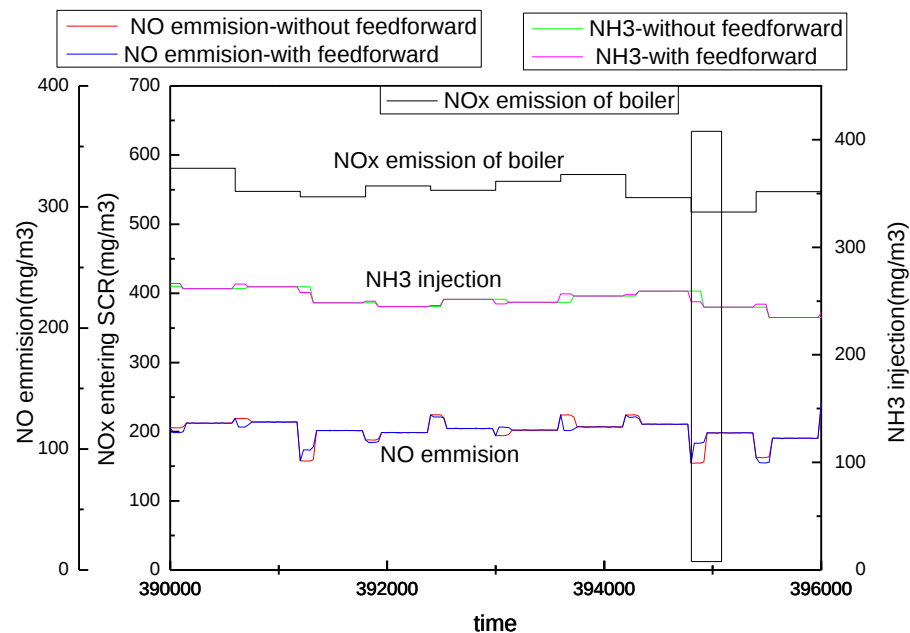
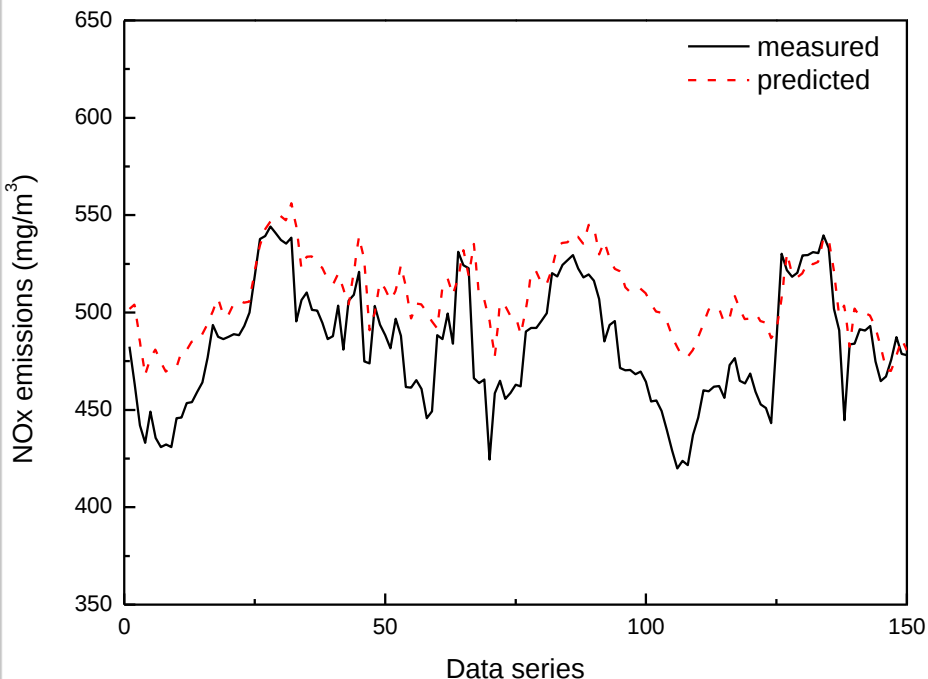
被动控制——清灰

- 阻力特性分析
- 风机电流监测
- 表面堵塞及壁温监测
在线清灰、暖风器逻辑

提出基于SO₃转化NH₃逃逸预报与喷氨调控的全过程闭环逻辑及控制方法。¹²

带有NO_x预测的氨控制逻辑

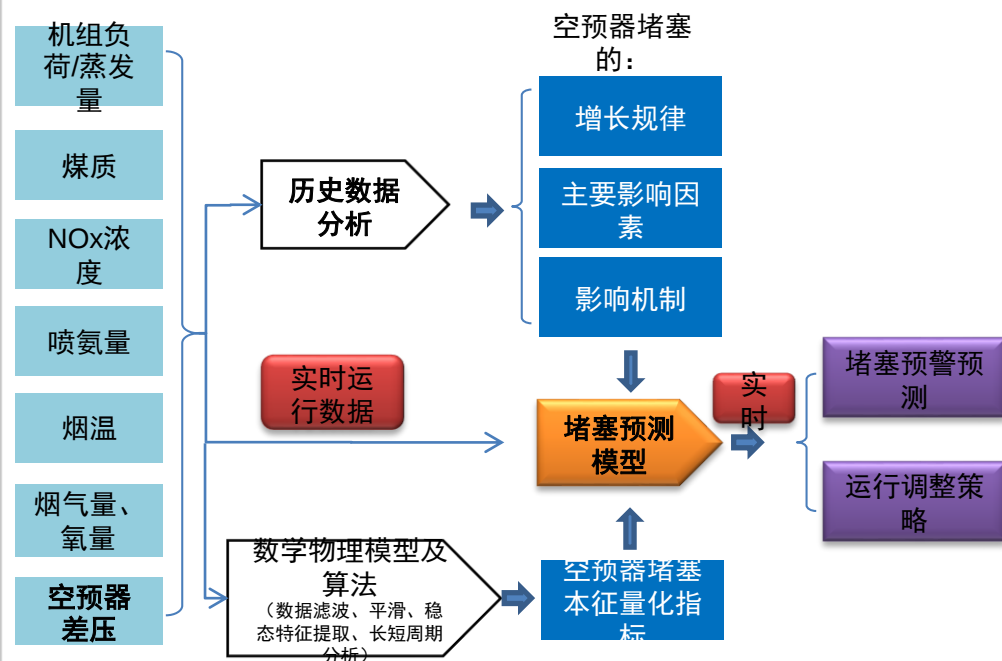




带有NOX生成预测的前馈控制:

- NOX生成预测，可以快速跟踪NOX生成的变化;
- 有效的降低NH3的过喷或少喷;
- 降低了NH3的逃逸率
- 提高NOX的调节精度

空预器沉积堵塞预测



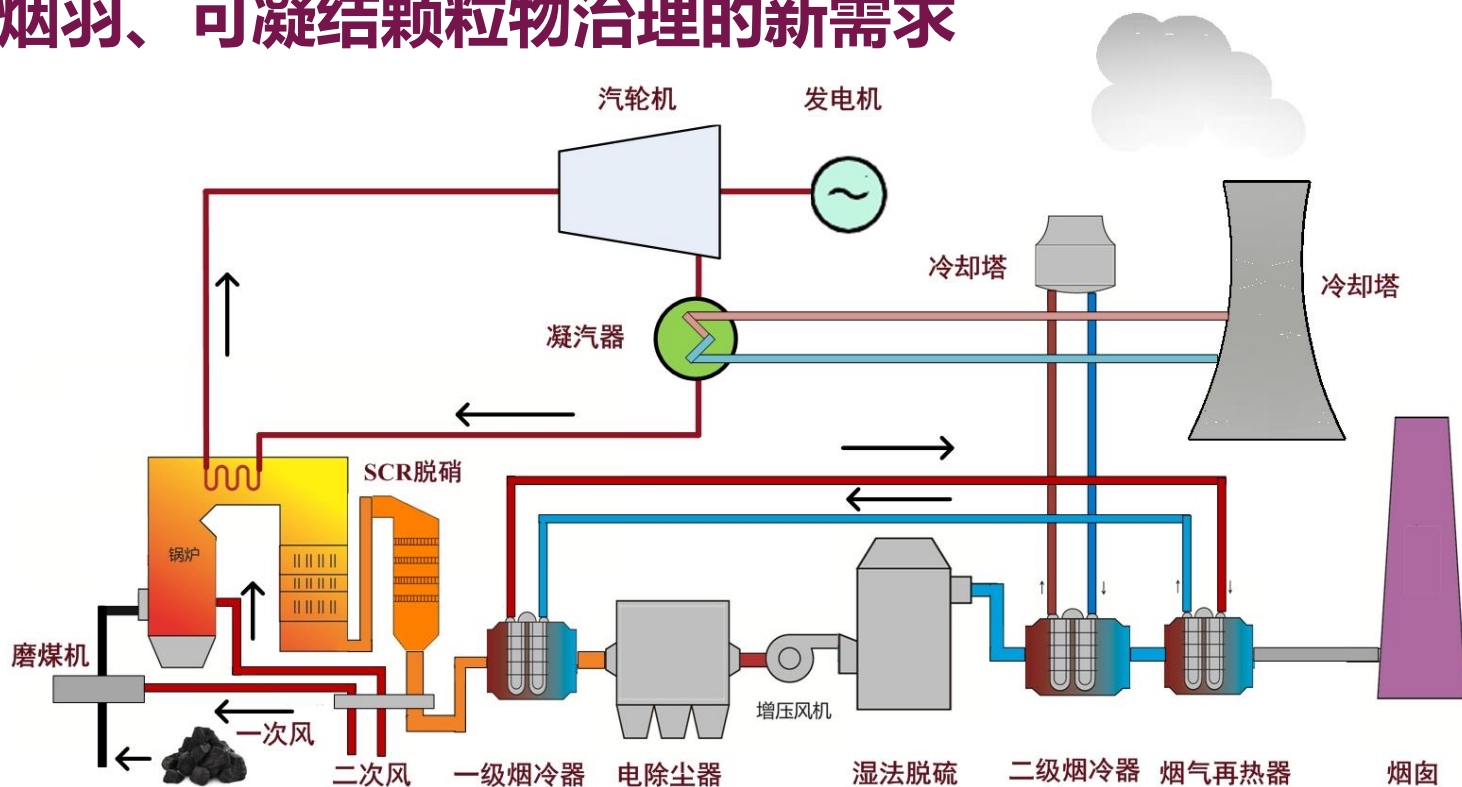
- 建立硫酸氢铵生成倾向数学模型，空预器堵塞本质特征提取，结合历史数据进行分析、比对，实时监测和趋势预测；
- 提高堵塞程度的量化精度，并大幅缩短空预器堵塞的预警周期。

3.多污染物协同深度治理及水分回收技术



清华大学
Tsinghua University

有色烟羽、可凝结颗粒物治理的新需求

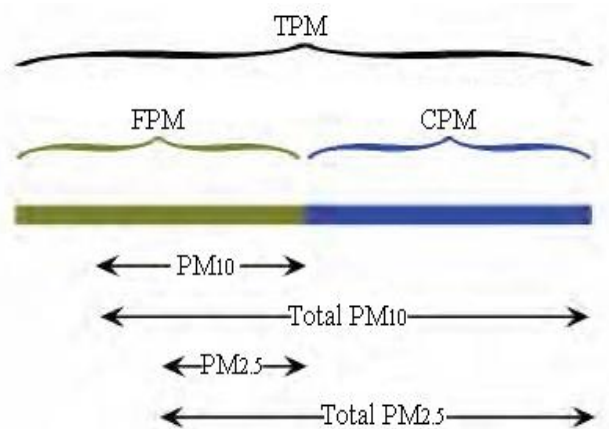


生物质混烧带来了有机污染物、可凝结颗粒物排放的增多，
对于后超低排放时代带来新的挑战

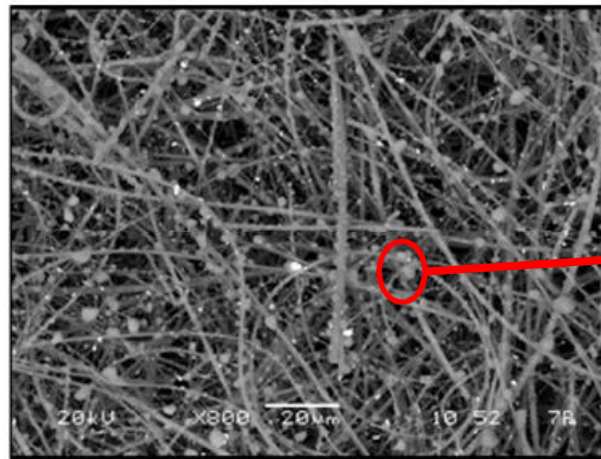
**高效低成本地协同治理烟气中颗粒物、可凝结颗粒物及水分
深度治理是关键！！！！**

可凝结颗粒物 (CPM, Condensable Particulate Matter)

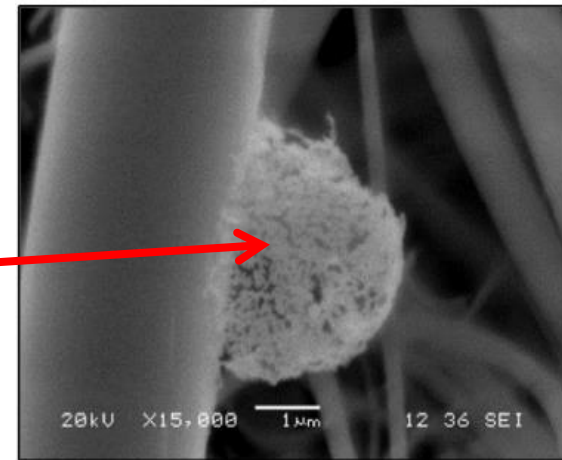
- (1) **定义**: 在烟道温度状况下在采样位置处为气态, 离开烟道后在环境状况下降温数秒内凝结成为液态或固态;
- (2) **粒径范围**: 由“气化-凝结”机理产生, 粒径一般小于1 μm ;
- (3) **化学组份**: 以无机组分为主, 约占80%, 无机组分中以 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl 、 SO_3 、痕量挥发性金属为主; 有机组分主要包括烷烃、酯类、有机酸、有机碳及复杂的有机化合物等;



可凝结颗粒物粒径分布



可凝结颗粒物分布



单可凝结颗粒物形貌

(5) 测试方法： EPA Method 202方法。

(6) 排放现状：

□对于燃煤锅炉而言，以质量计，可凝结颗粒物排放占到总 PM10 排放的 76%，总颗粒物排放的 49%（US EPA）；

□2014年，上海市环境监测中心测得上海燃煤电厂烟气中可凝结颗粒物排放浓度为 $21.2 \pm 3.5 \text{ mg/m}^3$ ，占总颗粒物排放的 50.7%（裴冰，2014）；

□2015年，北京市环境保护监测中心测试超低改造后的燃煤电厂，常规粉尘（颗粒物）排放浓度低于 1 mg/m^3 ，可凝结颗粒物排放浓度在 12 mg/m^3 以上，占总颗粒物比例高达 92.6%（胡月琪，2016）；

(7) 治理方法：

➤降温冷凝方法，利用直接喷淋或间接喷淋降温促进“均相成核”和“异相凝结”；

➤直接物理/化学吸附。





颗粒物、有色烟羽协同治理主要工艺

湿式电除尘器

效果： $\text{PM}_{2.5} \geq 70\%$ ； $\text{SO}_3 \geq 60\%$ ； $\text{Hg} \geq 60\%$ 问题：湿烟羽

高效除尘除雾器

效果： $\text{PM} \leq 5\text{mg}/\text{Nm}^3$

问题：湿烟羽、蓝烟羽

烟气加热

效果：烟温 $\geq 75^\circ\text{C}$ 有效消除湿烟羽，冬季不能完全消除湿烟羽

问题：蓝烟羽、浪费能源，增加污染物排放

烟气冷凝

效果：节水、多污染物协同脱除

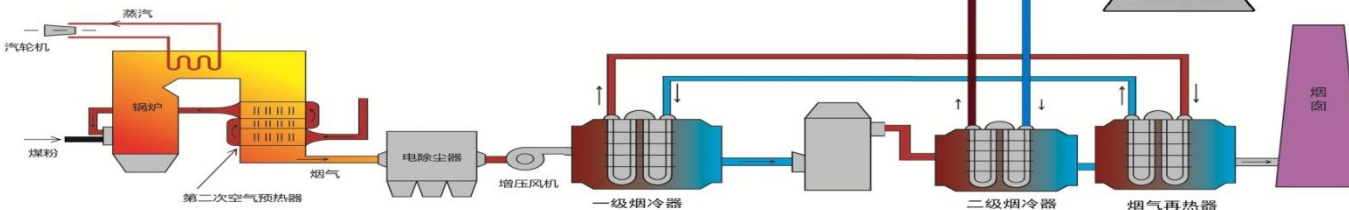
问题：温降幅度不大，减弱但不能完全消除湿烟羽

烟气冷凝/再热

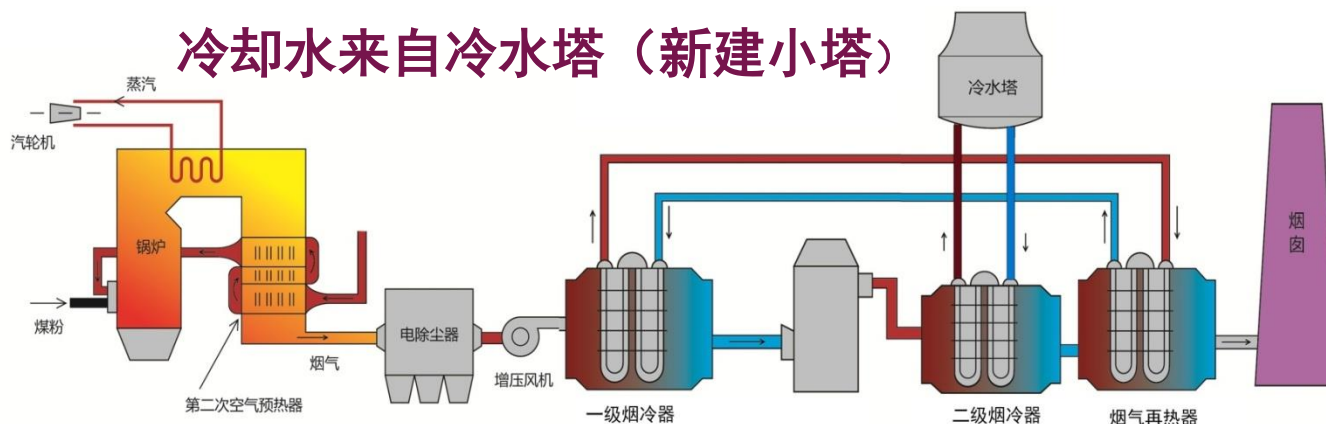
效果：节水、多污染物协同脱除；再热烟温低；烟温 $\geq 80^\circ\text{C}$ 冬季能完全消除湿烟羽



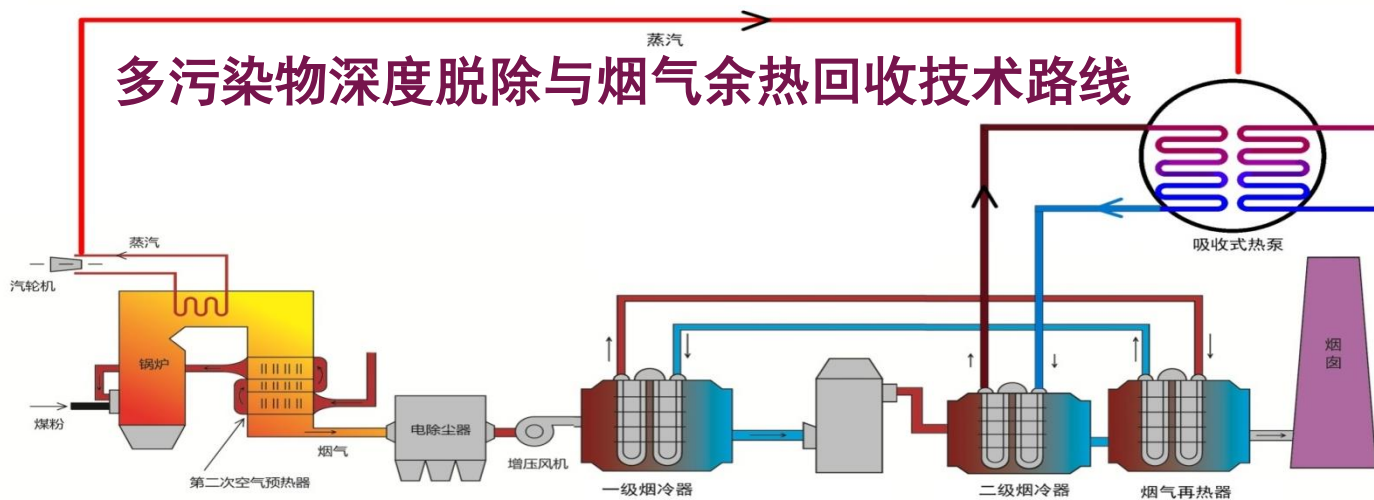
冷却水来自冷水塔



冷却水来自冷水塔（新建小塔）



多污染物深度脱除与烟气余热回收技术路线

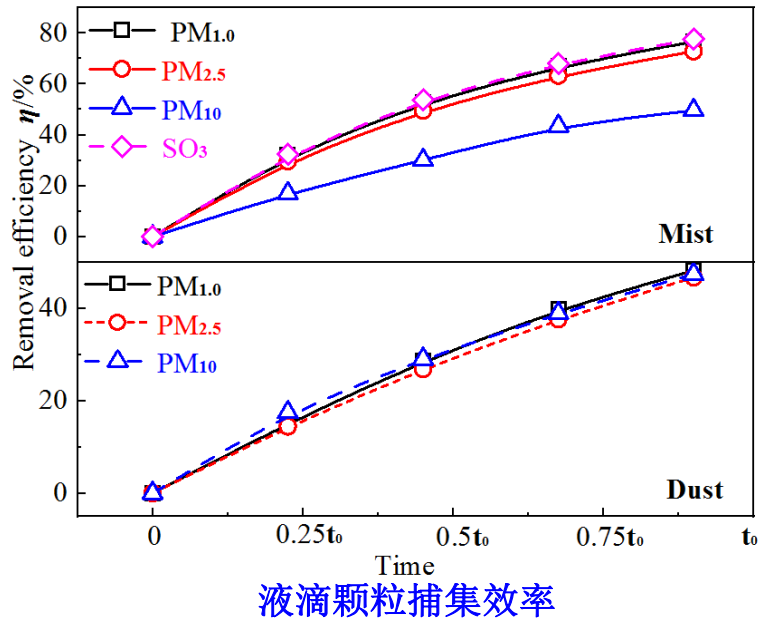
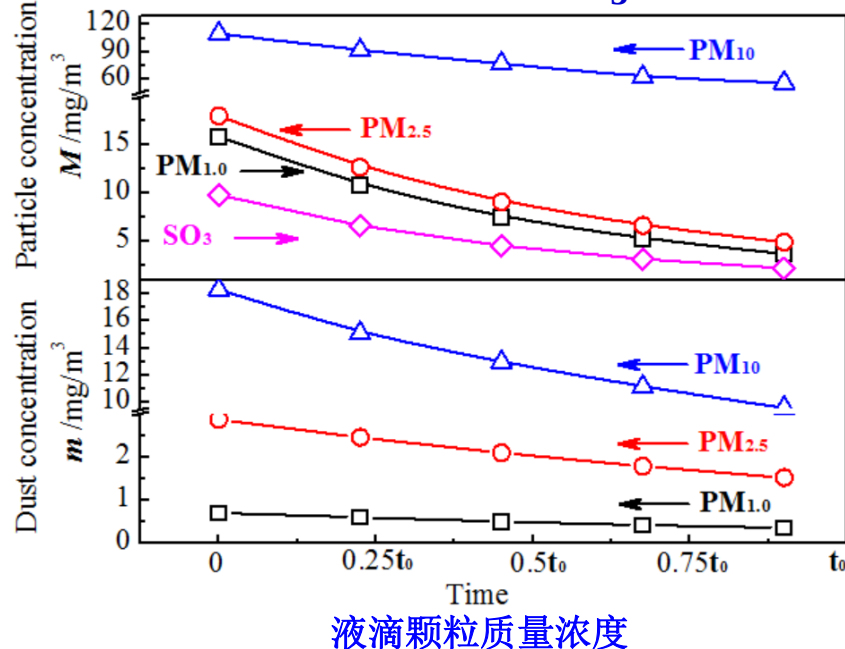


- 工艺路线选取
- 换热器初步设计
- 材料比选
- 过冷度优化
- 比核化面积确定
- 管束布置
- 管束直径、间距

城市
供热

☆☆ 全方位冷源
比选、烟气余热
回收方案！

间接式烟气冷却技术-PM、SO₃演化特性分析



参数	实验值	计算值	误差分析
冷凝器温降	5.3	5.3	0
冷凝器出口颗粒浓度	8.1	9.61	+18.6%
颗粒物脱除效率	49.4	47.4	-4%
冷凝器出口液滴浓度	22.6	35.52	+57%
液滴脱除效率	49.1	49.6	+0.8%
出口SO ₃ 浓度	3	2.185	-27.1%
冷凝器SO ₃ 脱除效率	54.5	77.72	+42.6%

➤准确预测烟气降温冷凝过程中颗粒物演化特性：
SO₃降低 30~75%
烟尘降低 15~50%
液滴降低 50~70%

WFGD后烟气温度调控颗粒物（FPM、CPM） 控制技术

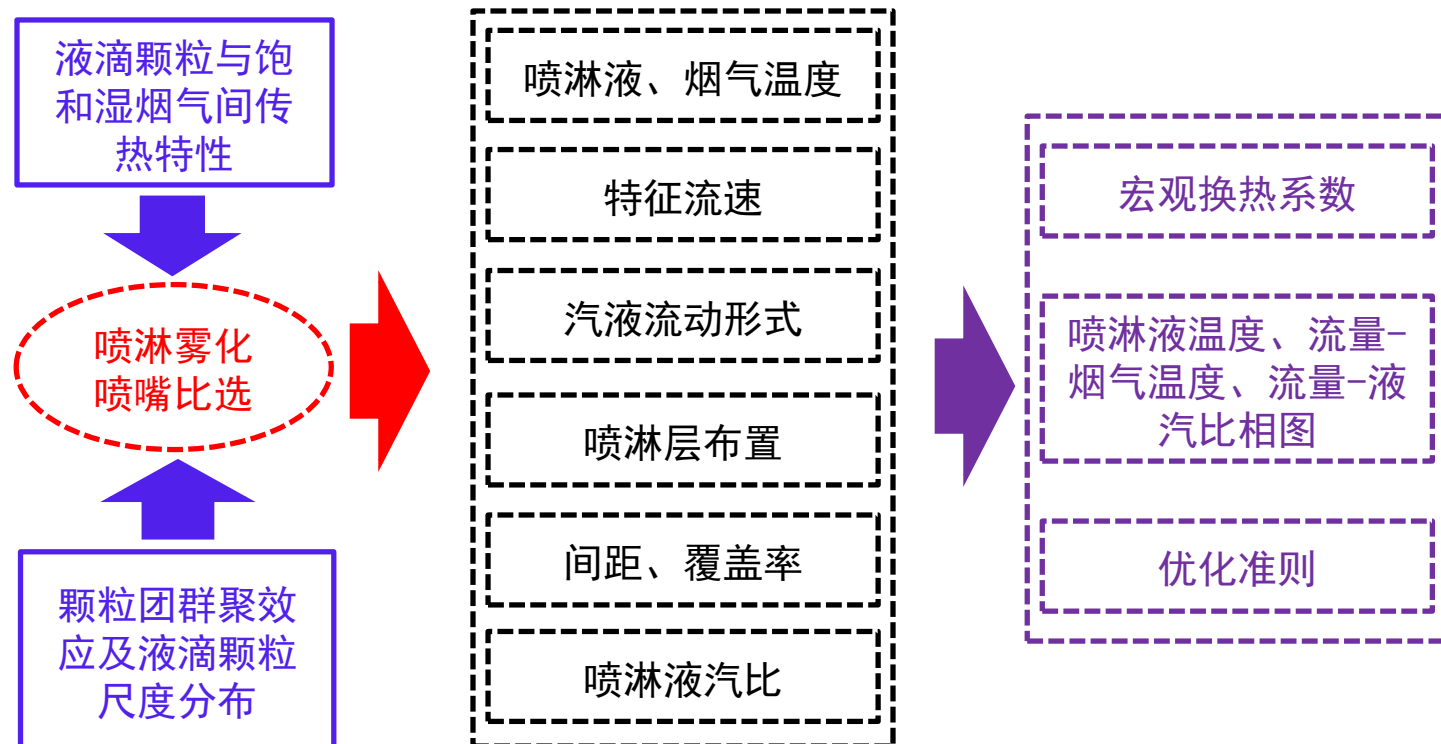


清华大学
Tsinghua University

直接接触式烟气冷却技术

➤ 烟气深度冷却

➤ 湿沉降理论多污染物协同脱除、节水、低品位烟气余热回收利用



□ 塔结构设计

□ 冷源选取

□ 高低温分区布置

□ 喷嘴比选

□ 液气比确定

□ 系统经济性评估

□ 流速

□ 停留时间²²

生物质/煤耦合发电优化控制策略



清华大学
Tsinghua University

在热力计算、计算流体动力学计算和**在线检测**、**性能测试**的基础上，
通过数据挖掘和学习，提供电厂优化解决方案

燃烧系统优化

■ 燃烧器运行优化

低负荷稳燃 (火焰检测)

负荷与炉膛出口NO_x关联
燃烧器浓淡分离和空气分级

■ 风煤比调整和配风优化

各磨间的煤量分配/生物质
不同负荷段下合适的风煤比
二/三次风、燃尽风的优化

受热面检测和灰防控

■ 受热面安全策略

受热面超温位置确定
汽温测点布置及控制策略
壁面灰温检测及吹灰逻辑

■ 吹灰控制策略

积灰位置确定
吹灰器安装及控制策略
变负荷工况吹灰控制

烟风系统优化

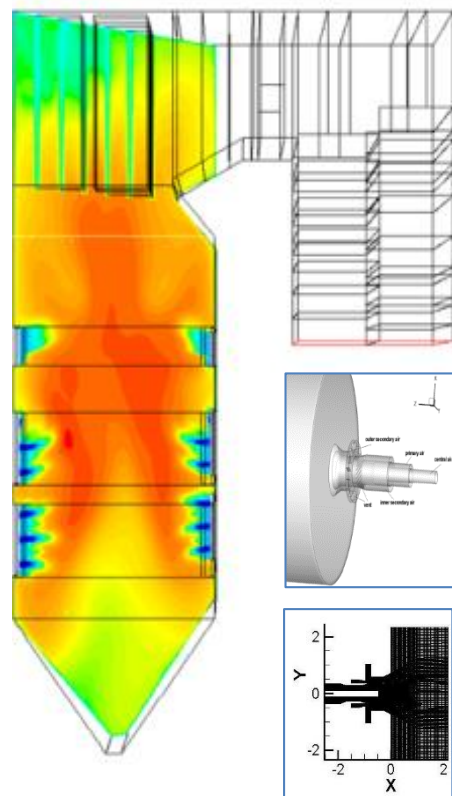
■ 全负荷脱硝及系统优化

提高SCR烟温和优化
低负荷氨逃逸及喷氨控制
空预器防堵检测及控制

■ 低负荷多污染物协同

低低温电除尘器调整
相变凝聚器深度协同治理
烟气节水及智能水平衡

燃烧优化：双尺度





清华大学
Tsinghua University

谢 谢！

清洁煤技术与污染控制团队

