



清华大学
Tsinghua University

CFB机组节能及污染物控制

清华大学 热能工程系
杨海瑞

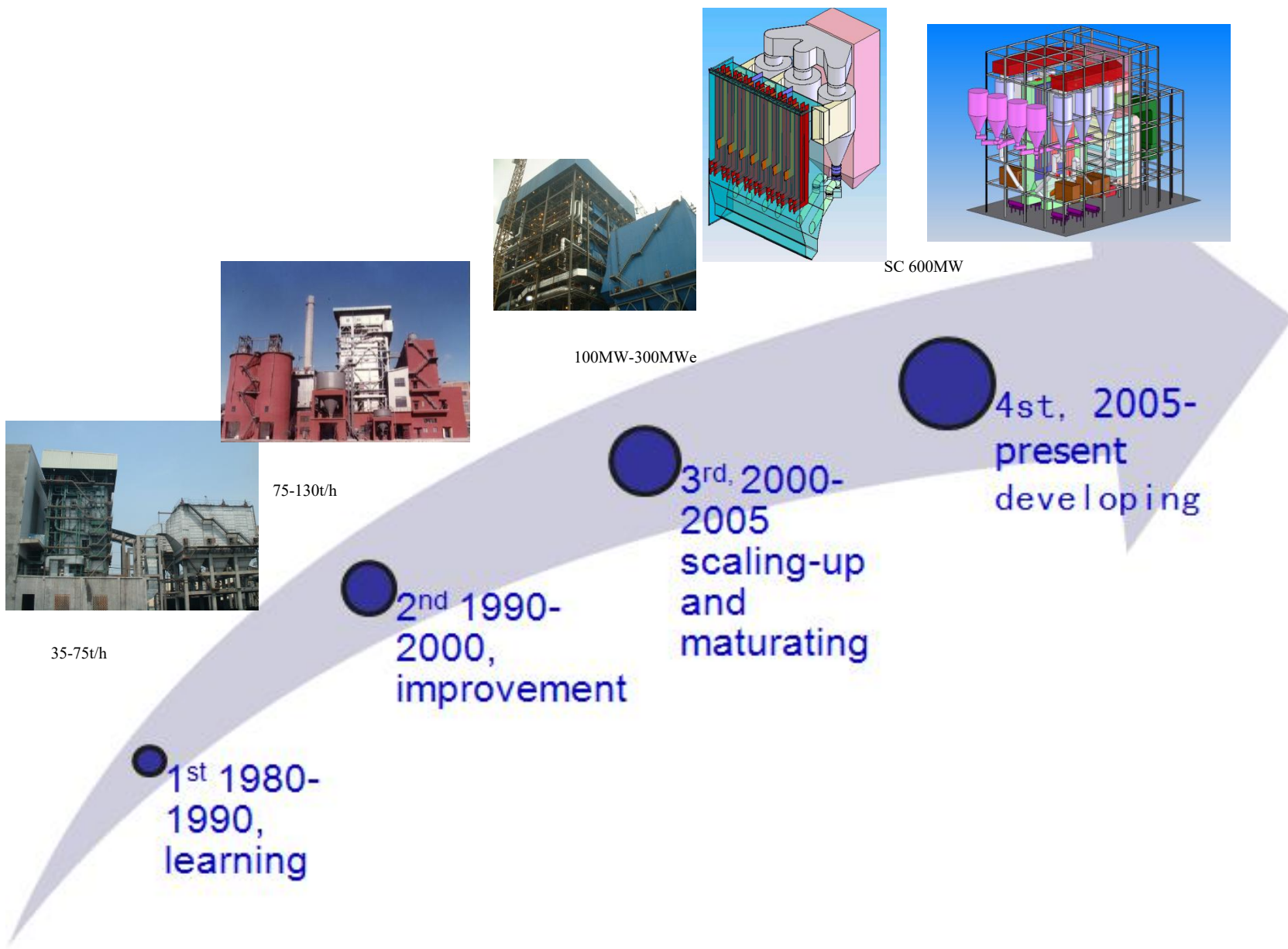
13691058057 yhr@tsinghua.edu.cn

2014. 6. 15

1. 循环流化床燃烧技术发展历程及挑战
2. 循环流化床锅炉节能技术发展方向
3. CFB锅炉的流动分析与流态重构的理论基础
4. 流态重构对CFB性能的影响
5. 循环流化床流态重构的条件
6. 流态重构对CFB污染物排放性能的影响
7. 污染物控制技术



1 中国CFB锅炉发展历史时期





中国循环流化床燃烧技术发展

- 循环流化床燃烧在洁净煤领域的地位

- CFB, IGCC, PFBC, PC+FGD 四大清洁煤技术中技术成熟度最好的为CFB和PC+FGD。
- 我国已经形成了300MWe 以下采用CFB燃用劣质煤，300MWe以上采用PC+FGD的清洁煤发电大格局。
- 在运行的CFB锅炉机组3000多台；135-200MW等级机组200多台；300MW机组（在建）117台
- 世界最大600MW超临界机组在2013年4月14日上午顺利通过168h考核运行

不同发展阶段面临的技术问题

● 始终面临的问题

- 供电效率（燃烧效率、排烟温度、厂用电、排渣热损失）
- 燃料品质差（恶化锅炉效率、提高厂用电、加重磨损、煤、灰渣系统负荷、脱硫负担、整体经济性）

● 2000年前

- 燃烧效率低，飞灰含碳量高- 分离器效率改进
- 大型化过程中系统的优化设计

● 2000-2005

- 可靠性问题（水冷壁磨损、换热床、冷渣器、风室漏渣）
- 燃烧效率低-分离器效率低、贫氧区、炉膛温度

● 2005-今

- 可靠性问题
- 节能问题（燃烧效率、排烟温度、厂用电）
- 污染物排放-新排放标准的影响



典型的节能技术

● 燃烧效率方面

- 提高分离器效率- d50, 芯筒长度的摸索 (延长停留时间)
- 优化二次风系统—排数, 喷口面积, 二次风射速 (改善O₂分布及扩散)
- 提高炉膛温度—超高温燃烧技术 (温度决定化学反应速率, 劣质煤, 福建龙岩无烟煤, 污染物无法控制)
- 中心供氧 - (改善O₂分布)
- 飞灰再循环 (延长停留时间)

● 排烟温度

- 各种吹灰技术 (维持原有的传热系数)
- 低温省煤器 (余热利用, 需系统地考虑效率)
- 溴化锂低温烟气利用 (余热利用, 制热制冷)

● 排渣热损失

- 风水联合冷渣器的水土不服 (高灰量、粒度控制不严)
- 滚筒冷渣器 (稳定可靠, 无分选功能)

● 厂用电

- 风机变频
- 汽动泵
- 取消外置床



2 大容量(>300MWe)CFB锅炉技术的发展方向

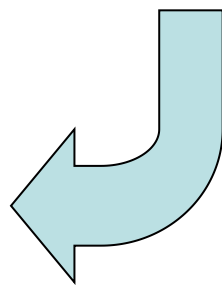
- 提高供电效率——超临界
- 提高可靠性——流态选择优化与结构优化
- 提高脱硫效率——深度脱硫
- 降低NOX排放——深度脱硝
- 燃料选择——不应局限于低热值劣质燃料



2 (<300MW)CFB锅炉节能技术发展方向

- 提高供电效率  **降耗——**
提高燃烧效率
降低厂用电

简约型设计
简化系统
便于运行



- 提高可靠性——结构优化
基础：流态优化

- 兼顾污染物排放

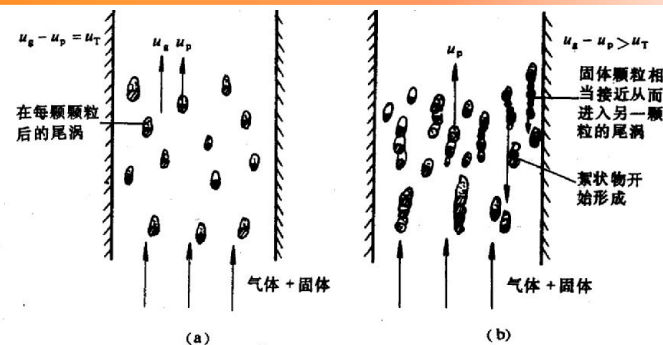
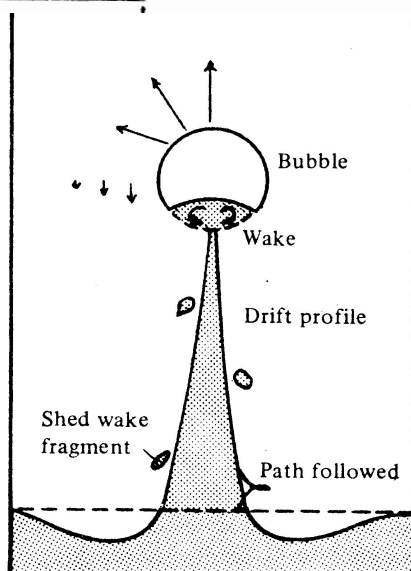
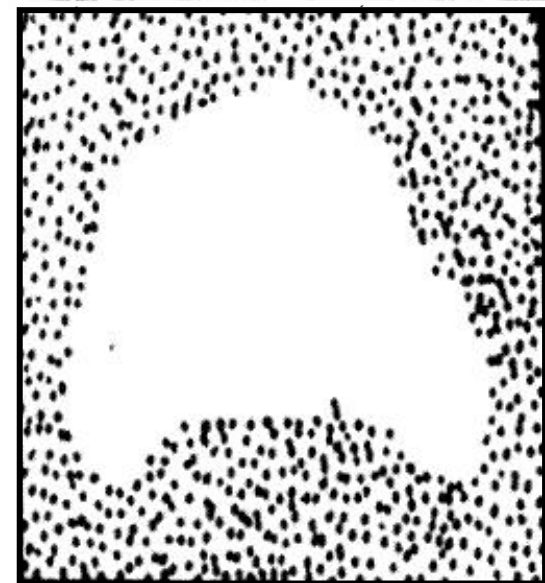
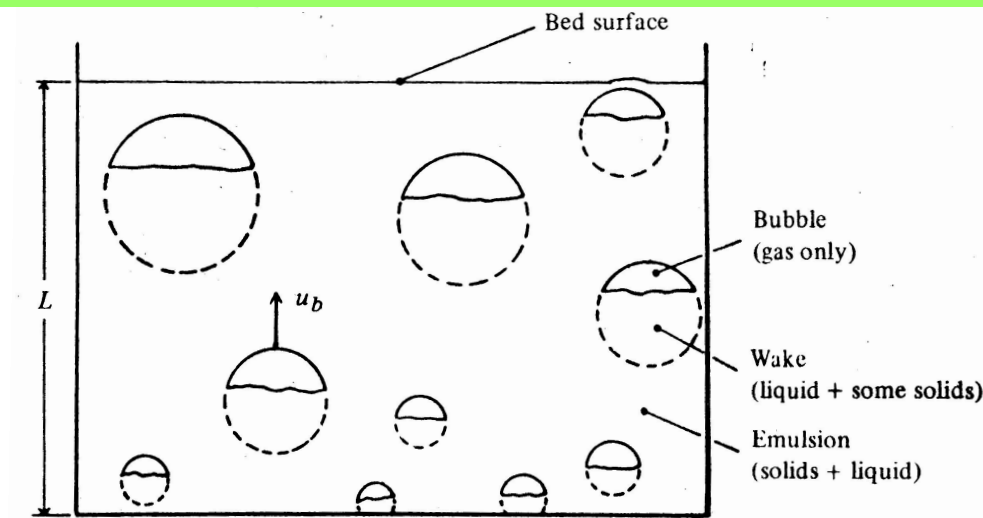
低温运行，强化氧气分布及扩散

不仅治标
更要治本
了解机制
原始创新

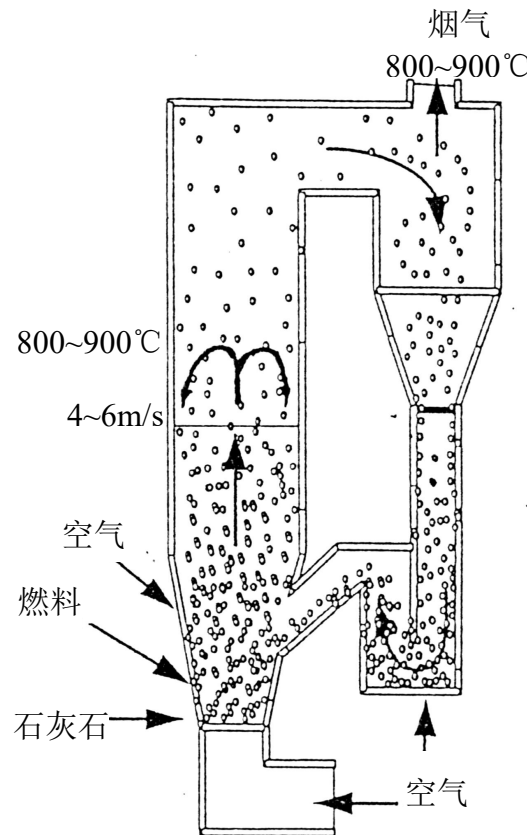


3 CFB的流动分析与流态重构的理论基础

循环流化床的内外循环

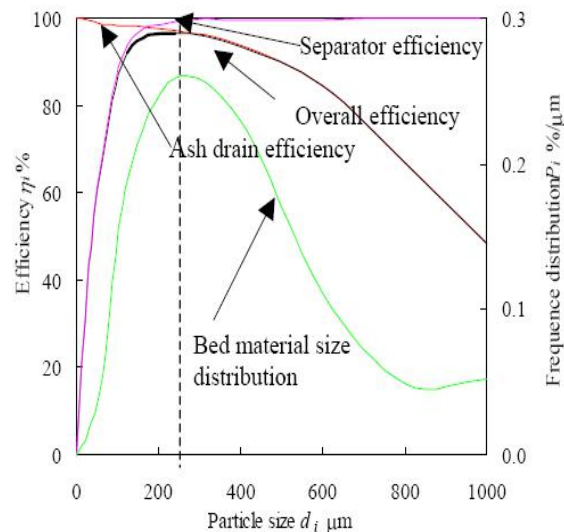


团聚

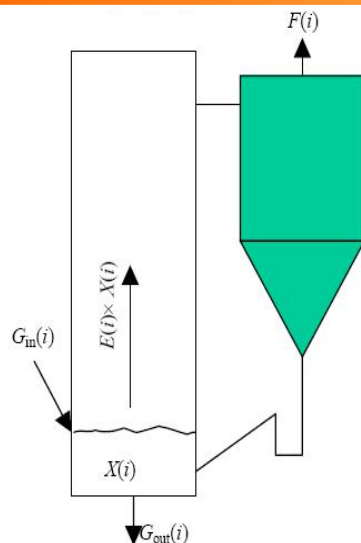




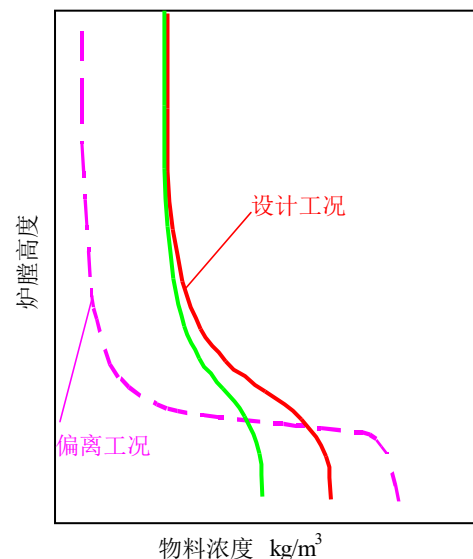
CFB的流态基础-物料浓度分布



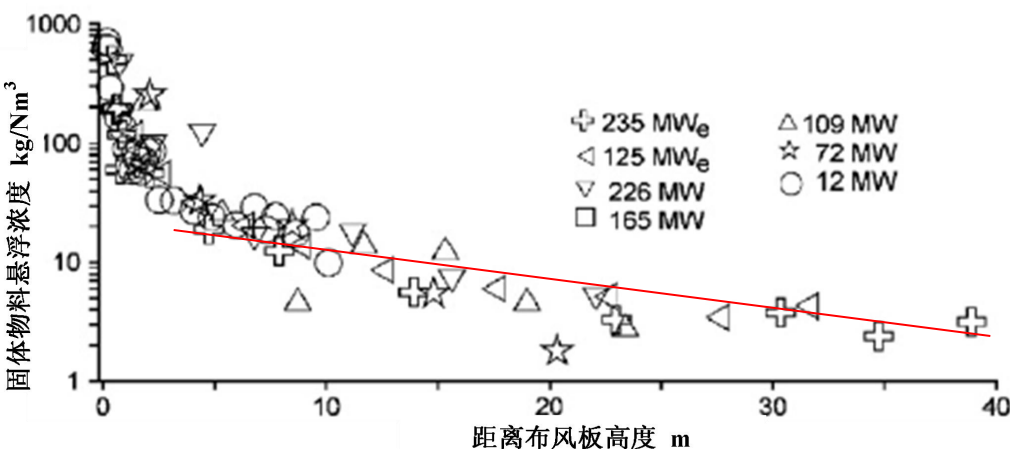
系统累计效率



CFB物料平衡

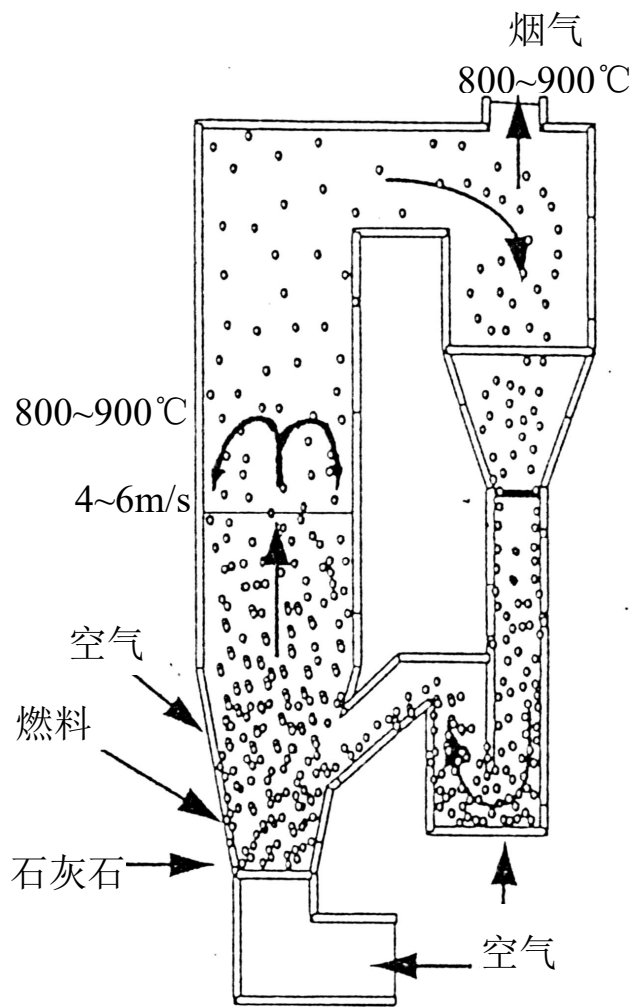


流态重构

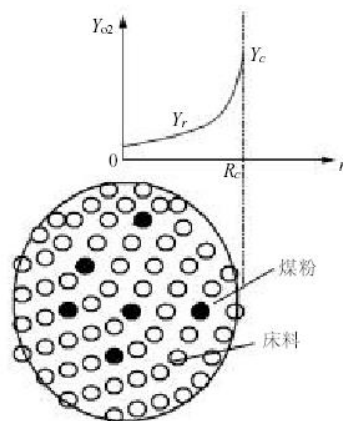


快速床流型
多粒度系统物料平衡
煤成灰及磨损决定的粒度演变
气固两相流传热
燃烧份额分配
相间传质阻力
稀相气体混合

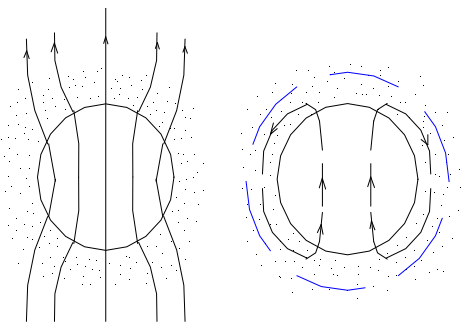
CFB的流态基础—循环的作用



循环流化床的内外循环



颗粒团



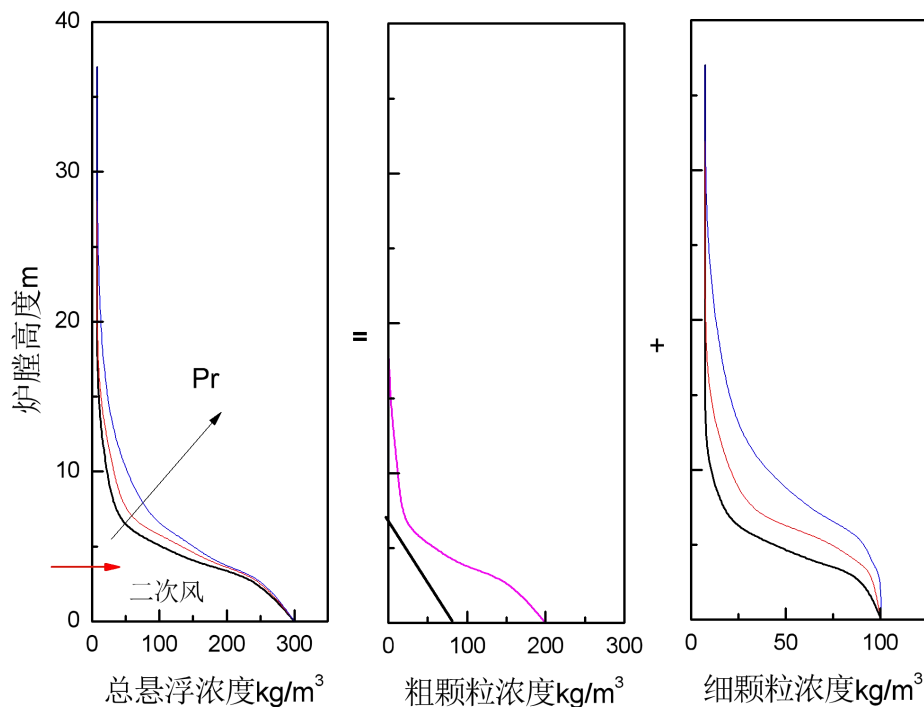
汽泡

循环目的：直接目的是为了**流动**，
间接实现高效燃烧但不是**循环燃烧**

通过对流态进行重构，在保持原有循环床煤种适应性强和污染排放控制成本低的优势条件下，寻找一个最佳循环床流化状态实现在厂用电、燃烧效率和可用率大幅度提高的目的

循环流化床流态重构的可行性

- 根据循环流化床物料开口系多粒度平衡原理，用终端沉降速度可以将床内物料区分为有效和无效床料。
- 可夹带的有效床料，构成燃烧室上部的快速床和形成外部循环，影响炉膛内和外部循环回路的受热面布置。**用设计图谱解决有效床料量的优化问题。**
- 不可夹带的无效床料，无法参与循环，**底部密相区粗颗粒的床存量受限于粗颗粒燃料燃烬时间**，其副作用是增加风机能耗、受热面磨损。

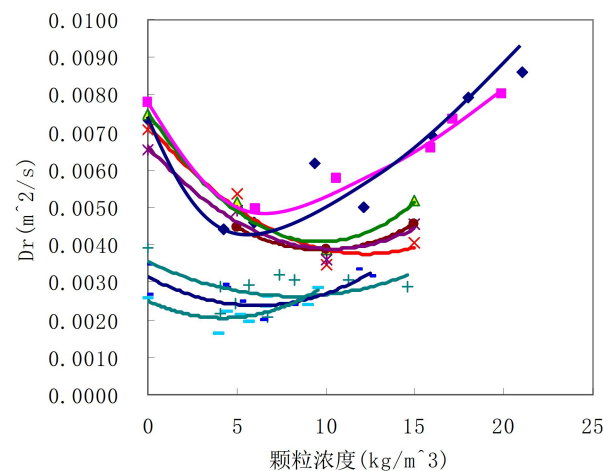


有效床存量或无效床存量均有优化调整的空间，从而实现流态重构，提高床料质量，降低床存量，达到减少能耗和磨损目的。



流态重构对燃烧效率的双重影响——最低优化床压降

- 停留时间随有效床压降的降低而降低
- 二次风射入深度随局部悬浮浓度降低而增加
- 氧气扩散随局部悬浮浓度呈非线性变化



Harris et al, 2003, CES

Chen et al, 2008, PT

O₂

t

ΔP

最低优化床压降，即可以维持快速流化状态，保证传热性能要求，又降低过渡区物料浓度，减轻受热面磨损及风机电耗并获得最高燃烧效率



4流态重构对CFB性能的影响

上部快速床的流态没有变化  

- 燃烧没有变化
- 污染物没有变化
- 传热没有变化

下部过渡段浓度下降  

- 二次风穿透增强：
燃烧改善
磨损下降
- 很小的区域内传热有下降的趋势，但变化很小

下部密相区细颗粒增加，粗颗粒减少  

- 密相区本来传热很少：对传热影响可以忽略
- 粗颗粒的停留时间问题：减少粗颗粒流量

$$\text{停留时间} = \frac{\text{存量}}{\text{流量}}$$



5 循环流化床流态重构的条件

- 低床压不是手段，是结果！！！！
- 技术路线是提高床质量，实现优化低床存量运行，达到减少能耗和磨损的目的。
- 对循环流化床物料平衡系统的分析证明，实现流态重构的条件：
 - 足够高的分离器效率
 - 优化合理的物料回送装置（结构及布风）
 - 针对性的燃料粒度（成灰和磨损特性分析）
 - 燃烧份额分配设计运行导则（二次风量及风口优化）。



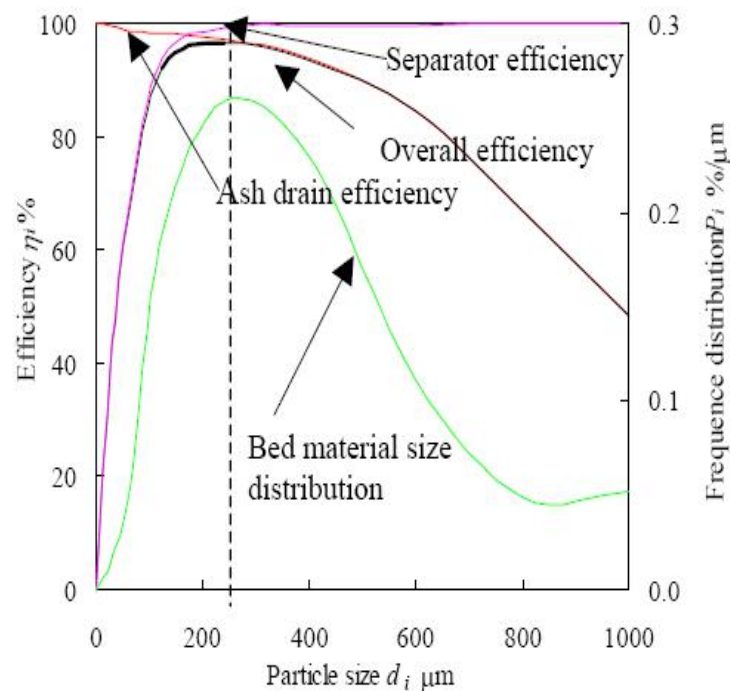
分离器效率的要求

- 例1：某200MW分离器改造后，飞灰中位粒径由改造前 $55.95\mu\text{m}$ 降低至 $20.93\mu\text{m}$ ，床温降低约 50°C
- 例2：某电厂330MW3#机组分离器芯筒加装导流旋片，相比4号机组，炉膛温度有所降低
- 例3：某发电厂330MW机组分离器入口水平烟道扩宽，分离器效率下降，循环流率降低，床温提高。



分离器效率的要求

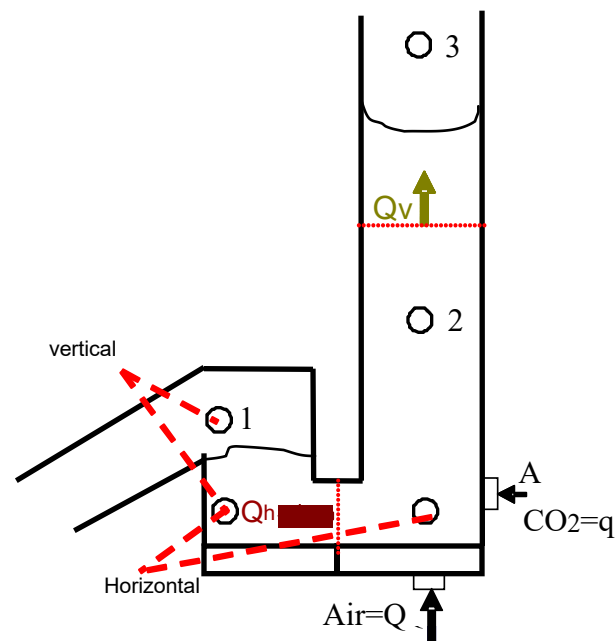
- 分离器的分离效率要求: $d_{50} < 20\mu\text{m}$, $d_{99} < 100\mu\text{m}$





回料阀的要求

- 回料阀的作用
 - 连续稳定输送物料
 - 防止烟气从炉膛反窜进入分离器
- 回料阀存在问题
 - 结构不合理，流通阻力大（翻腕过高、横段过长）
 - 气体反窜导致分离器下降（配风不合理，料腿过粗）





回料阀的要求

- 要求

- 合理料腿结构（直径，翻腕高度）
- 优化的配风（容积式罗茨风机单料腿松动风系统）
- 目前国内多数锅炉机组料腿直径过粗，建议控制炉膛截面积/料腿截面积约60左右
- 松动风控制在0.2~0.3m/s

排渣方式及排渣口的优化

- 滚筒冷渣器
 - 稳定可靠，但无分选功能，容易导致有效物料丢失
- 位置选择
 - 远离给煤口
 - 远离排渣口



二次风量及二次风系统的优化

- 床料质量的提高，上部燃烧份额增加，要求
 - 二次风量增加
 - 二次风位置上移
- 为提高燃烧效率，减少贫氧区，要求二次风的穿透深度增加，因此
 - 二次风排数减少（由早期三排，现在**2**排，**1**排）
 - 二次风口面积增加，增加刚度



给煤粒度的问题

- 对于良好的物料平衡系统（分离器效率、回料阀及排渣系统）来讲，给煤粒度的要求并不敏感
 - 低灰分高热值煤种，反应活性好，燃尽时间短，分离器效率要求高，给煤粒度不敏感（小龙潭褐煤）
 - 高灰分低热值煤种，灰分大，已形成足够循环量，反应活性差，大颗粒燃尽时间长，需控制大颗粒份额，排渣要求高（防止有效灰丢失，准能矸石）
 - 高灰分高热值煤种，最适合节能型流态重构运行（龙岩无烟煤），对分离器效率要求不高
- 不同煤种，最佳优化床压降不同



飞灰粒度分析结果

劣质烟煤

褐煤

烟煤

无烟煤



节能型循环流化床开发中的一些经验

- 节能型循环床技术核心是优化物料平衡系统，使床质量提高。从而给降低床存量提供空间。对原有锅炉不能简单降床压降运行。否则高负荷运行困难，排渣含碳量增加。只有个别旧锅炉在燃料及其粒度适当，物料平衡系统良好才可降床压降运行。
- 对新设计的循环流化床锅炉欲达到迁移流化点，必须先进行燃料和石灰石成灰特性实验，确定最佳床存量范围。设计时需采用高效旋风筒模型，高流率回送伐设计导则，容积式罗茨风机单料腿松动风系统，受热面新传热系数设计导则设计才能完美实现节能型循环流化床。
- 相当一批已运行循环流化床锅炉存在严重设备缺陷，连正常设计温度下的满负荷运行都困难。这些锅炉首先需通过技改解决缺陷，然后才能考虑能否做节能改造调整。



6 流态重构对CFB污染物排放性能的影响

1. 控制入炉煤粒度：增加有效床料份额，形成足够上部悬浮浓度，提高上部燃烧份额及含碳量，**低温运行的前提**
2. 床温：低温运行控制污染物排放
3. 氧量优化及炉膛内氧化还原气氛优化重整：底部维持还原气氛，上部强化氧化气氛
 - 增加二次风比例及二次风口上移，增加二次风穿透能力，加快气固混合，抵消低温对气固反应的负面影响(**燃烧效率**)
 - 优化石灰石品质（**控制Ca/S**）、粒度（**增加停留时间**），优化石灰石给入位置，避开还原区域，建议在二次风口下给入
4. 优化系统的物料平衡性能：分离器效率及回料阀的结构优化，配风优化



CFB锅炉正常运行是污染物排放控制前提

1. 合理可靠的破碎筛分系统-根据成灰磨耗特性选择合理入炉粒度
2. 布风系统-保证布风均匀
3. 优化的二次风系统-合理位置及动量，减少炉内贫氧区
4. 高效的分离器-满足做够的物料外循环
5. 合理的外循环运行-合理结构尺寸，返料风量



CFB锅炉正常运行的设备要求

6. 合理的受热面布置-优化炉膛温度，不能只顾燃烧效率而不断提高温度，需兼顾脱硫脱硝
7. 排渣口位置及排渣方式优化-保证连续稳定，避免燃料短路，避免有效床料丢失
8. 辅机的选择-保证给煤系统，石灰石系统，风机可靠
9. 加强检修及维护-避免非停



CFB锅炉SO₂排放控制关键因素

- 合理的温度范围-既要提高反应速率，又要避免高温CaO表面烧结及SO₂二次析出
- 石灰石的反应活性及粒度-粒度影响停留时间，考虑石灰石的爆裂磨耗对粒度影响
- 可靠的石灰石输送系统-稳定可靠输送是炉内脱硫的前提
- 优化的喷口位置-避免进入还原区，提前和氧气接触



CFB锅炉SO₂排放控制关键因素

合理的温度范围



CFB锅炉SO₂排放控制关键因素

石灰石的反应活性及粒度控制-**必须考虑爆裂过程中粒度变化的影响** $d_{50} = 120 \sim 150 \mu\text{m}$

神东电力石灰石活性

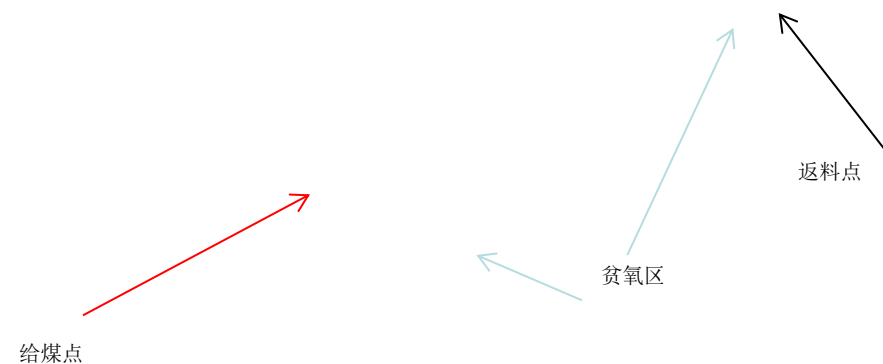
石灰石不同气氛下爆裂特性

石灰石磨耗特性



CFB锅炉SO₂排放控制关键因素

优化的喷口位置-避免还原气氛，尽快与氧接触



石灰石喷入点要避开贫氧区



石灰石注入位置的选取

现有石灰石注入点一般有：

1. 给煤管中给入-效果差
2. 二次风中给入-二次风穿透力差+难以接触 SO_2
3. 独立开口-混合扩散差+位置过低+离给煤口近
4. 回料阀给入-效果较好

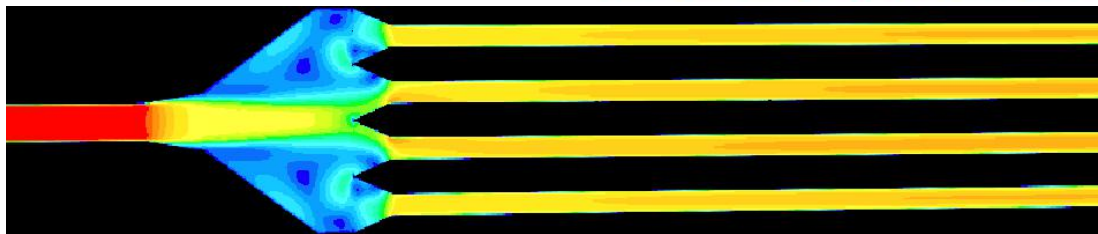
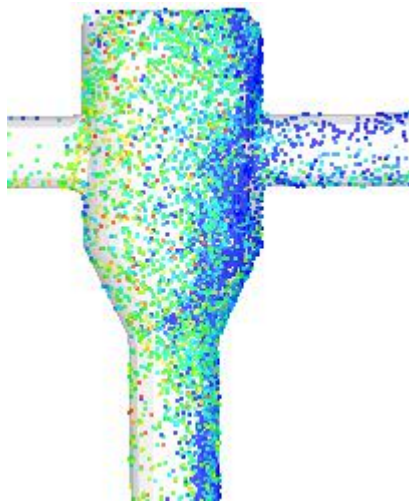
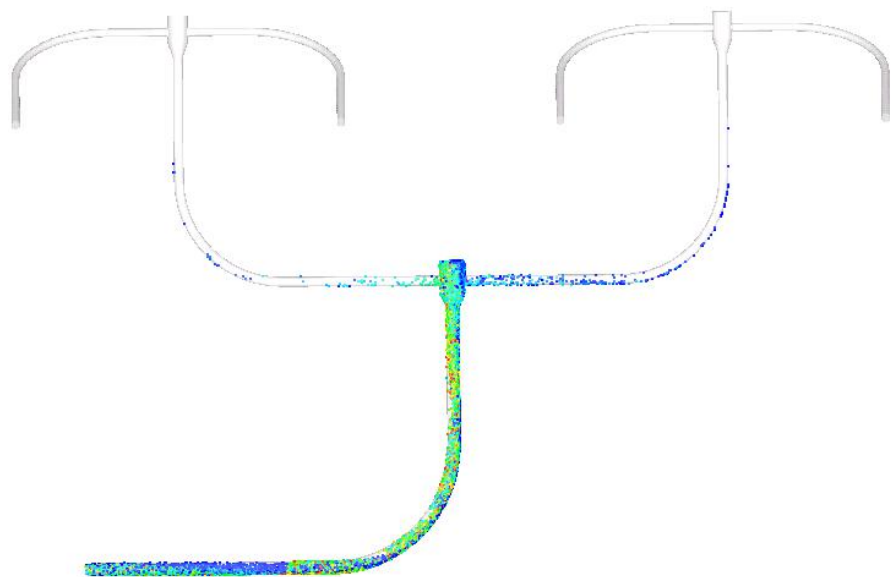
建议给入位置

1. 前墙给煤：后墙+位置上移+上二次风口下独立开口
2. 后墙给煤：前墙+位置上移+上二次风口下

关键在于提高上二次风的动量和穿透能力，利用二次的卷吸左右，强化石灰石和 SO_2 ， O_2 混合接触



石灰石气力输送管路布置的优化



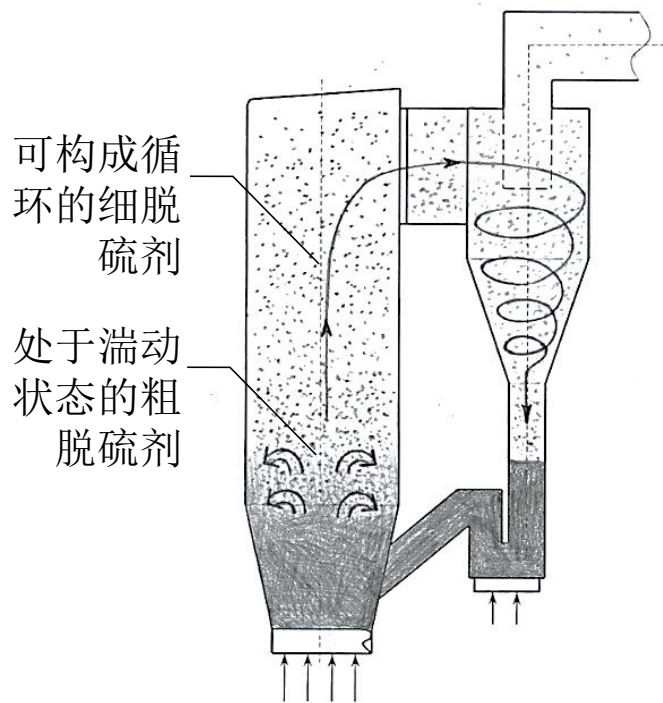


多粒度多流态炉内喷钙脱硫技术

>>即首先通过气力输送，向炉内喷入细石灰石粉，并通过给煤中掺混较大粒径的石灰石颗粒，实现多粒度石灰石的共同给入，以发挥各自的优势，实现协同深度脱硫

湍动流态下粗脱硫剂的优势

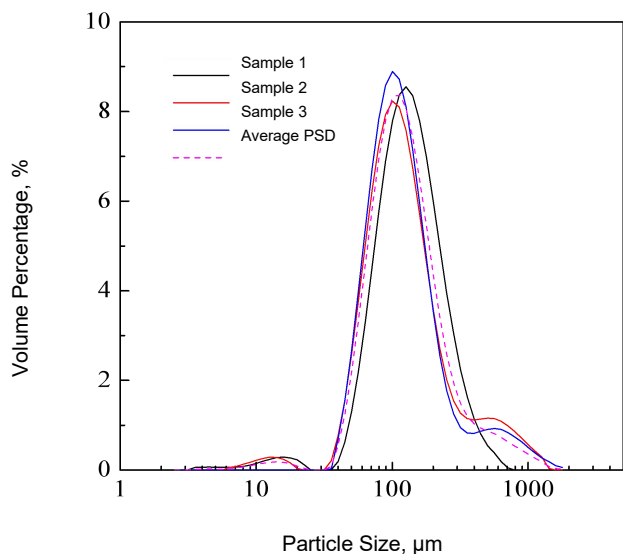
- 1 足够提留时间
- 2 湍动状态下剧烈混合
- 3 氧化氛围



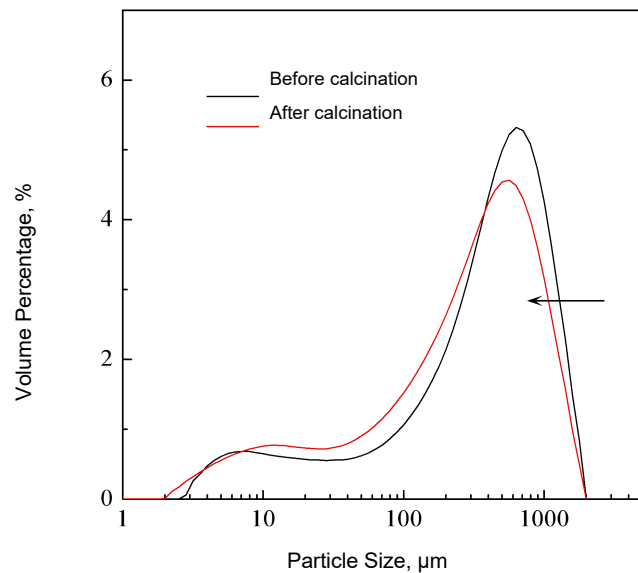
粗、细脱硫剂在炉膛内的分布示意图



300MW CFB锅炉机组工业验证



300MW机组循环灰粒度分布



石灰石爆裂特性

>>1~2 mm 粗石灰石通过给煤掺混从炉前给入;

300~500 μm 细颗粒从已有输送系统给入.

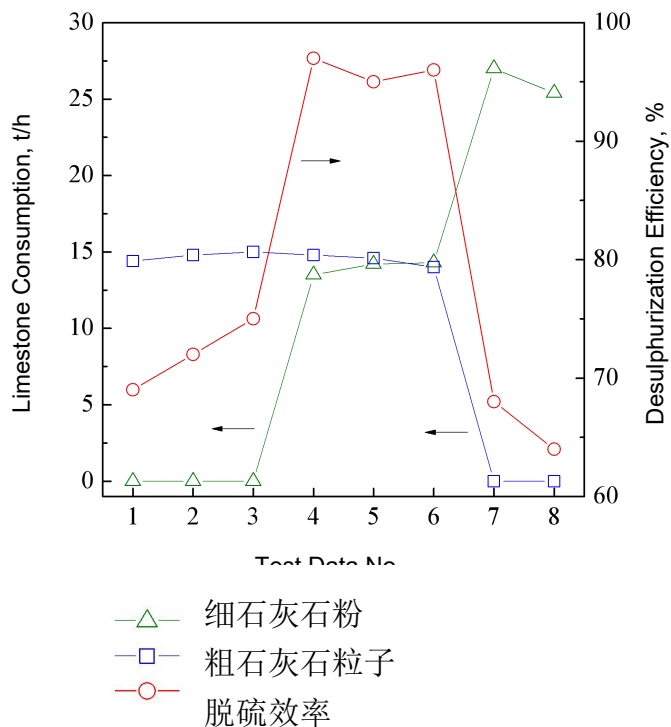
>>需考虑石灰石的爆裂性能, 爆裂后主体应与循环一致



300MW CFB锅炉机组工业验证

300MW CFB机组运行参数

Item	Load, MWe	Coal Consumption, t/h	Average Bed Temperature, °C	Primary-Air Flow, kNm ³	Secondary-Air Flow, kNm ³	Average Bed Pressure, kPa	Initial SO ₂ Emission, ppm
Value	325	181	896	345	530	7.2	1300



>>单纯采用粗石灰石粒，脱硫效率
75%，15 t/h (Ca/S≈1.2).

>>添加14 t/h细粉后，效率高于
95% (Ca/S≈2.3).

>>单纯采用细石灰石粉，效率只有
65%，25t/h (Ca/S ≈2.0)

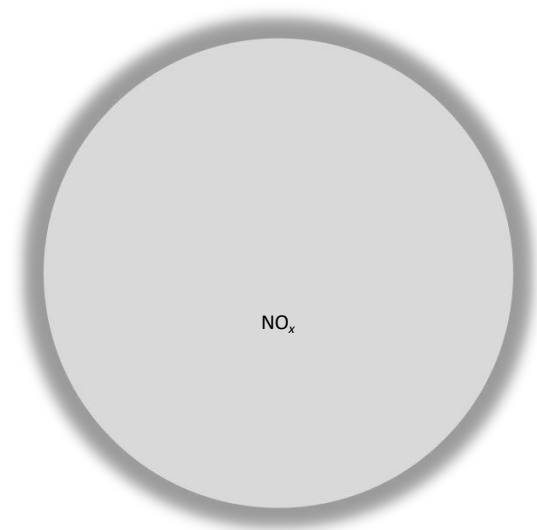


NO_x生成机理简介

NO_x的产生主要分为两块：

1 燃料中的氮，在燃烧时，产生燃料型NO_x，控制困难；

2 高温燃烧时，产生热力型NO_x，可以通过温度调整，控制NO_x的生成量；系统碳存量降低，从而削弱了NO_x的还原影响，

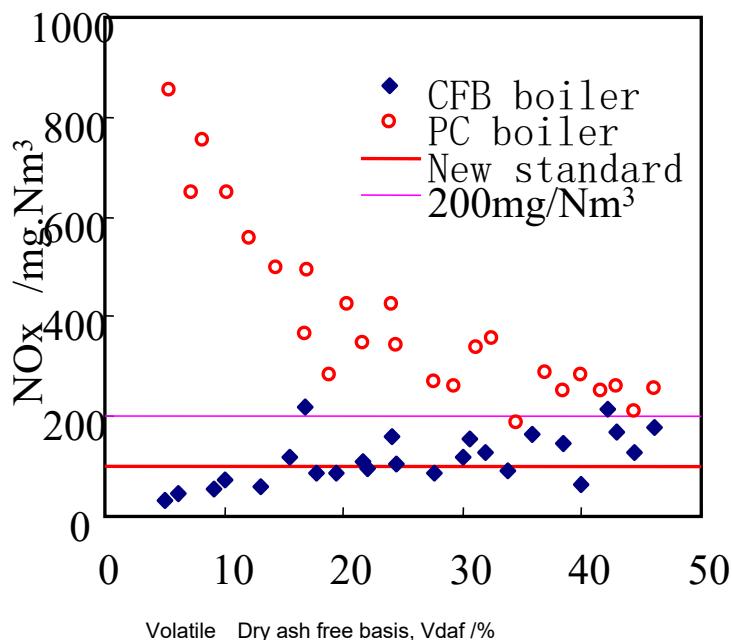


挥发分N和焦炭N生成示意图



CFB锅炉 NO_x 排放特点

- 较低的燃烧温度
 - 热力型 NO_x 较少
 - 主要为燃料型 NO_x
- 较高的含碳量- C颗粒频率高，促进了 NO_x 的还原
- 底部还原性气氛- 一二次风配比进行调节





CFB 锅炉 No_x 控制策略

- CFB锅炉的 No_x 控制一般分几步走：
 1. 控制炉温- 关键在于炉膛中燃烧温度的控制；在不影响锅炉出力、经济性的前提下降低床温、均匀床温；热力型 No_x ，提高碳存量，强化还原
 2. 优化给煤粒度：粒度细， No_x 排放降低
 3. 合理优化氧量，一二次风配比—重构氧化还原气氛
 4. 提高二次口位置：增加底部还原区域
 5. 采用SNCR技术，在分离器入口优化设计喷嘴，喷入尿素溶液或氨水，还原 No_x

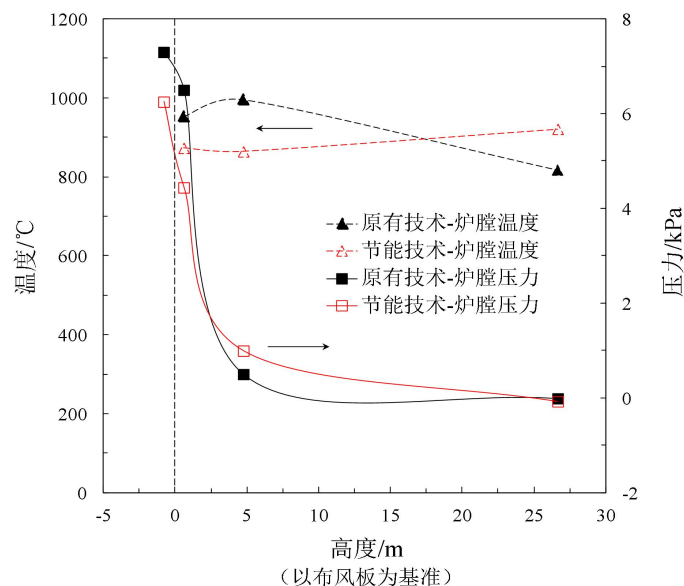


CFB 锅炉No_x控制策略

维持低温运行的条件

- 设计过程中，选取较低传热系数，增加受热面布置
- 现有锅炉- 优化物料平衡系统，控制给煤粒度，提高床料质量，增加炉膛上部悬浮浓度，提高传热系数

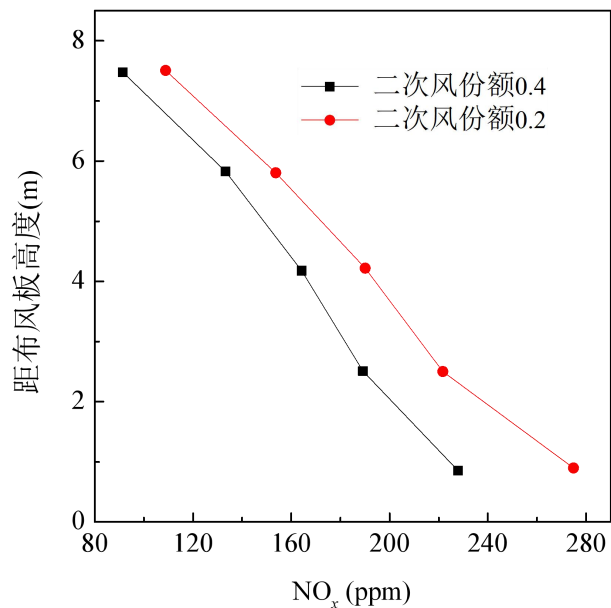
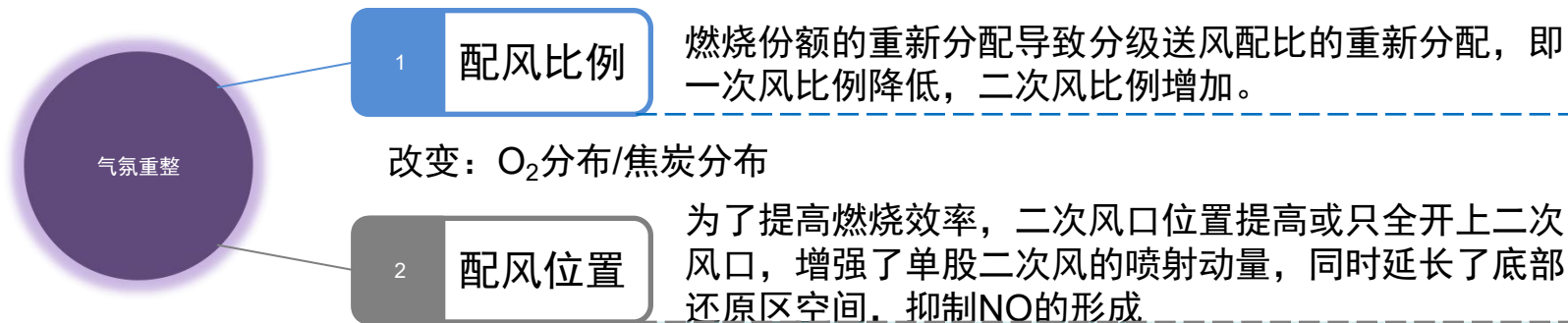
需要优化下部浓度分布，强化二次风穿透及扩散，强化燃烧，弥补低温燃烧导致的燃烧效率下降



流态重构节能型CFB改造前后炉膛温度及NO_x排放



CFB 锅炉 NO_x 控制策略



二次风份额对 NO_x 浓度沿高度分布的影响

二次风高度的影响



SNCR是流化床锅炉脱硝的最佳选择

CFB锅炉旋风分离器是理想的SNCR还原剂喷入点，相比煤粉炉而言，CFB锅炉采用SNCR可得到更高的脱硝效率。

CFB炉：50-90%

温度区间

分离器入口烟温在800-950℃之间，恰好处于SNCR的最佳反应温度。

混合效果

烟气在分离器内的停留时间较长（一般为1.5-2.5s），烟气和尿素溶液可以充分混合。

分离器内烟气旋流强烈，有助于还原剂溶液的快速扩散。

催化作用

循环灰是富含多种金属氧化物的多孔介质，是还原剂与NO_x反应的催化剂。



SNCR脱硝性能保证

SNCR关键技术的开发的关键：

喷射点的选择—CFD流场模拟；

喷射器的设计—根据锅炉结构及流场开发；

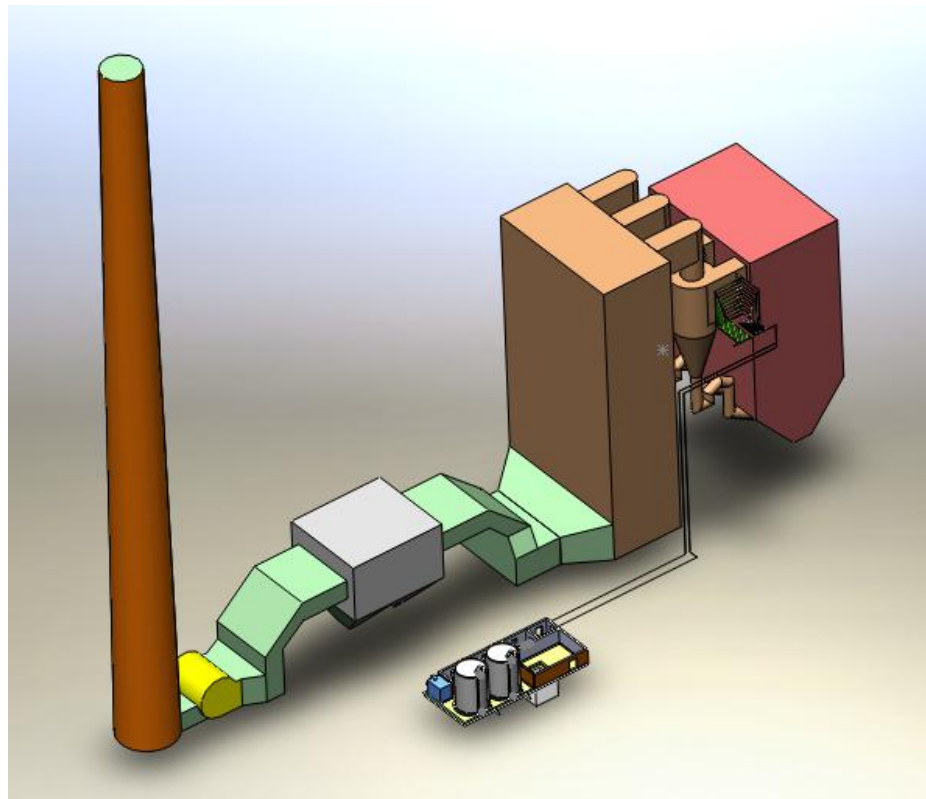
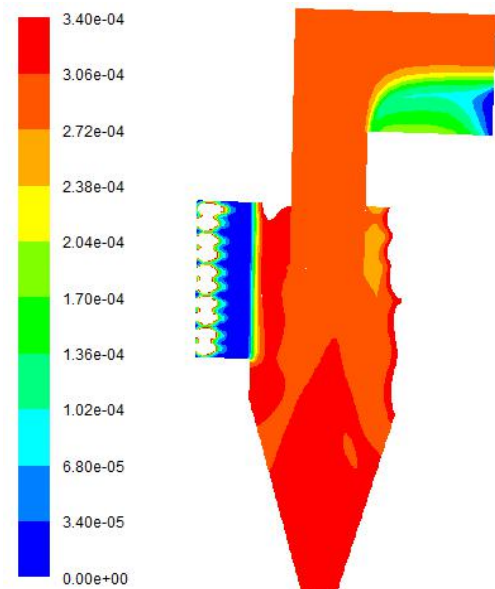
喷射控制策略—适应不同负荷需求。

注意事项：

1. 锅炉正常运行时前提，低温运行时保证，炉内燃烧优化调整是首选
2. 切勿盲目追求脱氮效率，喷入过多还原剂而导致NH₃的逃逸增加



SNCR脱硝性能保证



米东2*300MW CFB锅炉SNCR系统



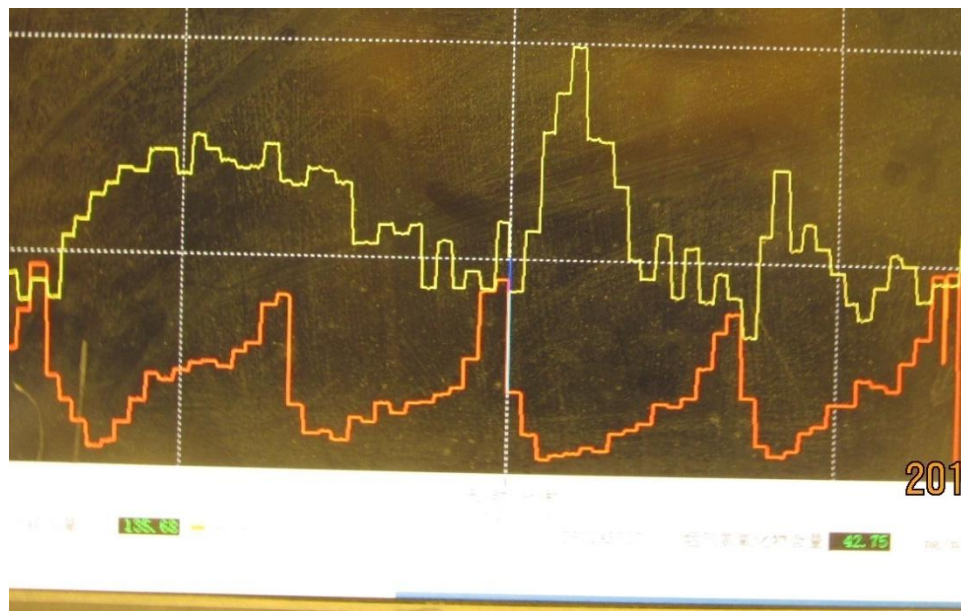
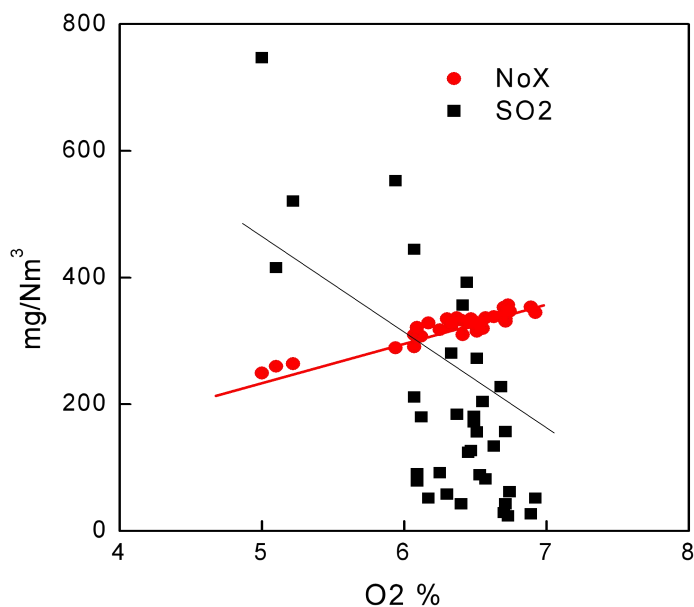
燃烧效率、脱硫及脱硝的辩证关系

- 燃烧效率与脱硫脱硝存在一个优化共存点
 - 温度：高温利于燃烧，低温利于减排
 - 低过量空气系数利于脱硝，不利于燃烧
- 从减排角度，需要严格控制炉膛温度，如何避免燃烧效率降低
 - 优化物料平衡系统，提高颗粒的系统停留时间
 - 给煤粒度，分离器，回料阀结构及运行
 - 根据燃烧份额分布，优化一二次风配比，二次风口位置及孔径，优化炉内氧化还原气氛
 - 通过提高气固混合扩散，弥补低温及低过量空气系数带来负面影响



脱硫及脱硝的相互影响

- 床温：低温运行对双方均有利
- 氧量：低过量空气系数利于脱硝，不利于脱硫
- 增加二次风比例及二次风口上移：还原区增加，利于脱硝，不利于脱硫
- 炉内喷钙：CaO 对催化 NH_3 以及HCN向 NO_x 生成，不利于燃烧中控制 NO_x ，但催化促进提高SNCR效率





可行的控制策略

1. 控制入炉煤粒度：增加有效床料份额，形成足够上部悬浮浓度，提高上部燃烧份额及含碳量，**低温运行的前提**
2. 床温：低温运行控制污染物排放
3. 氧量优化及炉膛内氧化还原分布：底部维持还原气氛，上部强化氧化气氛
 - 增加二次风比例及二次风口上移，增加二次风穿透能力，加快气固混合，抵消低温对气固反应的负面影响(**燃烧效率**)
 - 优化石灰石品质（**控制Ca/S**）、粒度（**增加停留时间**），优化石灰石给入位置，避开还原区域，建议在二次风口下给入
4. 优化系统的物料平衡性能：分离器效率及回料阀的结构优化，配风优化