



扫描二维码订阅微信公众号
关注《中国循环流化床发电》

循环流化床燃烧发展回顾及 前景分析

岳光溪

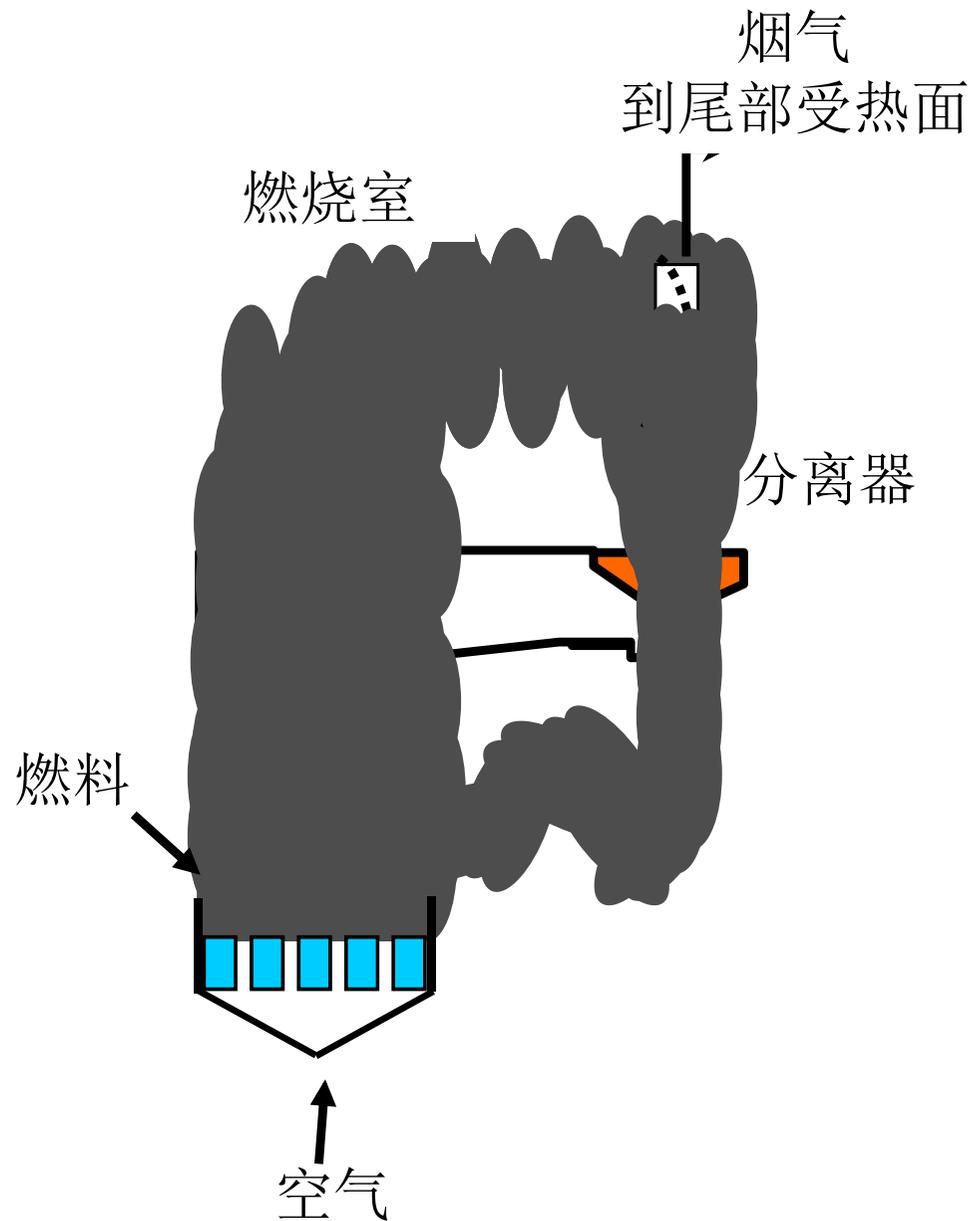
清华大学热能工程系教授



清华大学

Tsinghua University

循环流化床燃烧特点



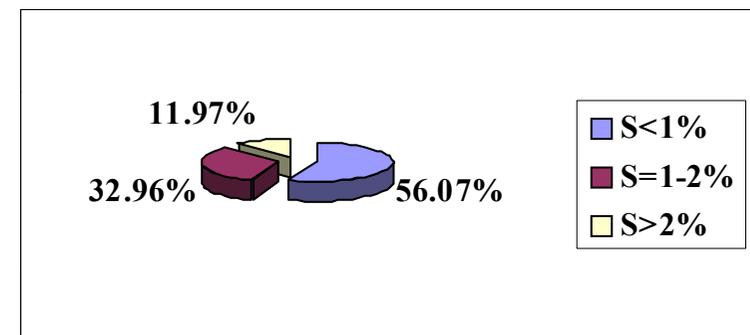
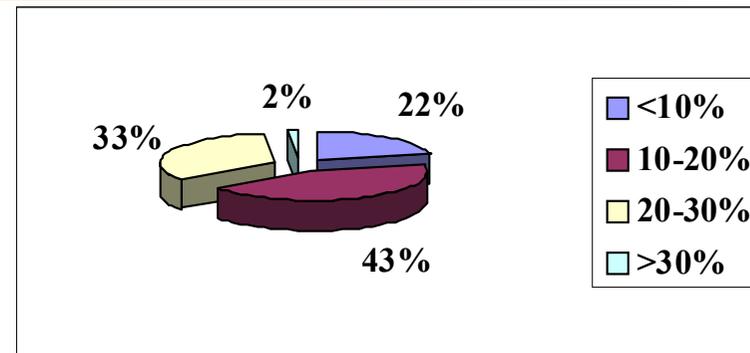
特点

- 适合劣质燃料
- 中温燃烧稳定 (850~900°C)
- 燃料停留时间长
- 加入石灰石燃烧中脱硫
- 低氮氧化物排放

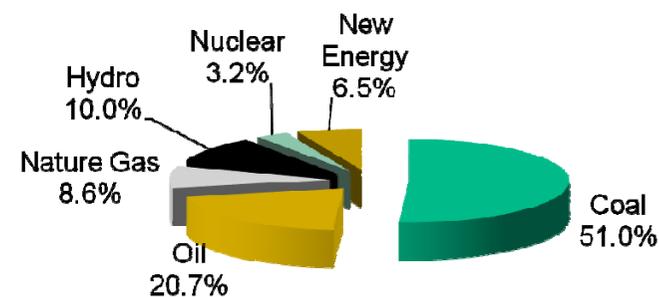
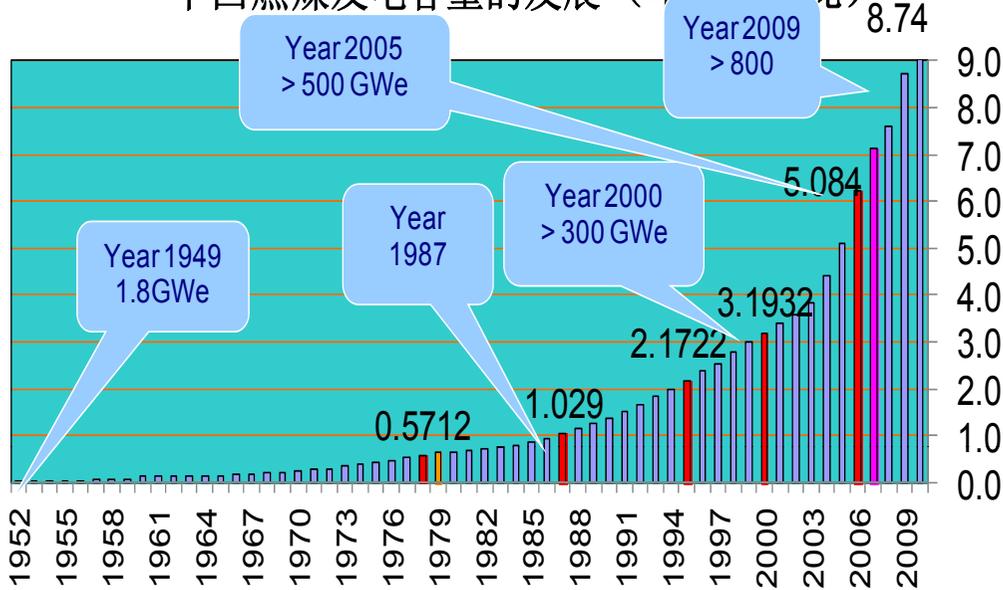


循环流化床燃烧技术在中国的地位

- 我国能源工业高速发展
- 煤炭仍然我国电力工业主要能源
- 我国煤炭资源中高灰，高硫煤炭比重较大。洗煤过程产生大量矸石，洗中煤，煤泥需要利用。
- 循环流化床燃烧具备燃料适用性强,低成本干法燃烧中脱硫，低氮氧化物排放的优点。流化床燃烧仍然是大规模清洁利用此类燃料的最佳基本方式。



中国燃煤发电容量的发展 (单位:亿千瓦)



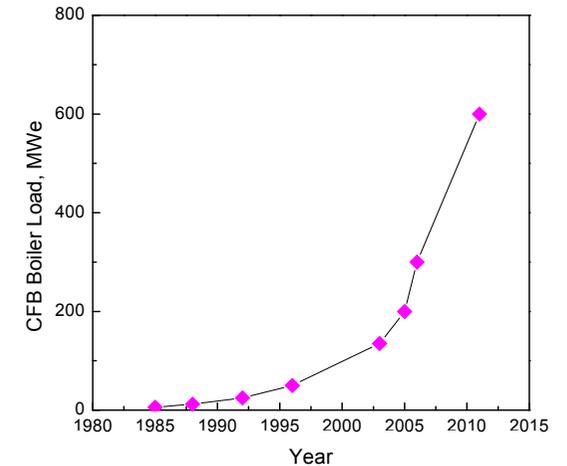
2020年我国发电方式构成预测



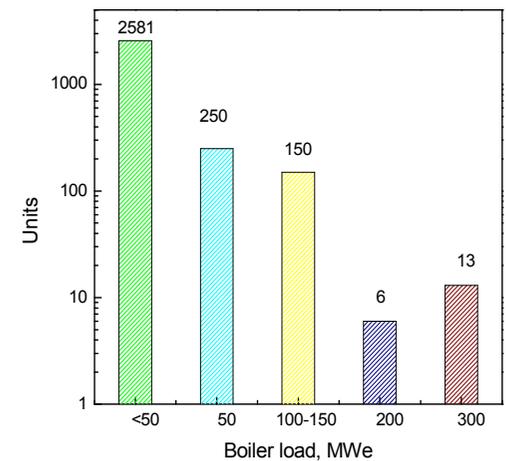
我国循环流化床锅炉发电市场

循环流化床燃烧总容量：近一亿千瓦。

总循环流化床锅炉台数：大于3000台。为世界第一。



中国循环流化床煤燃烧发电容量



中国循环流化床锅炉台数



我国循环流化床燃烧研究开发状况

中国科技人员通过多年的实践—理论研究—实践的反复，针对循环床工程设计的需要，搭建了我们独立的循环床煤燃烧理论体系。

该理论体系的主要创新点全面涵盖了气固两相流、燃烧、炉内传热和污染控制等方面。是国际循环流化床燃烧理论的重要进展。也为建立我国自己的循环流化床设计体系提供了理论支撑。



1) 循环床气固两相流理论方面的贡献:

- 证实了循环床锅炉下部为鼓泡床，上部流型为“快速床”，因此循环床锅炉内的流型具备多态性。
- 提出了循环床锅炉为开口系多粒度平衡概念，将影响物料平衡的因素归纳为两点：煤的成灰磨损特性和循环系统的综合分离效率。结论为国内外运行锅炉所证实，

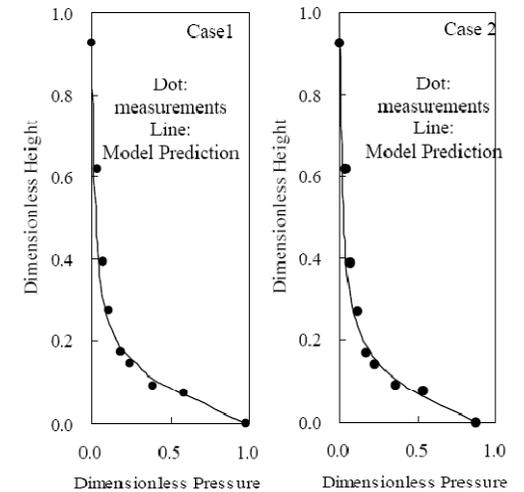
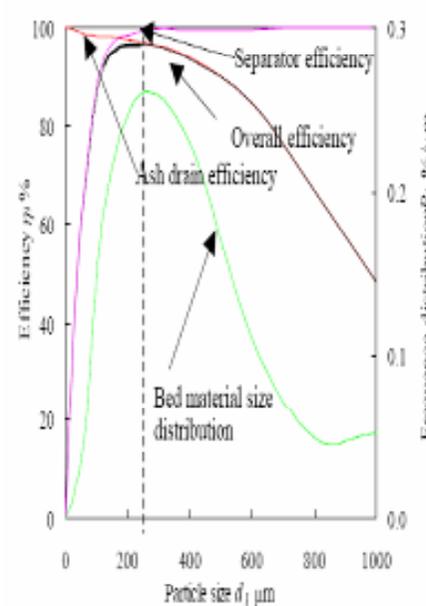
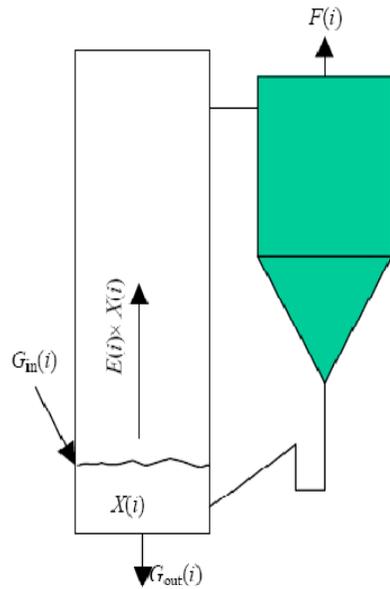
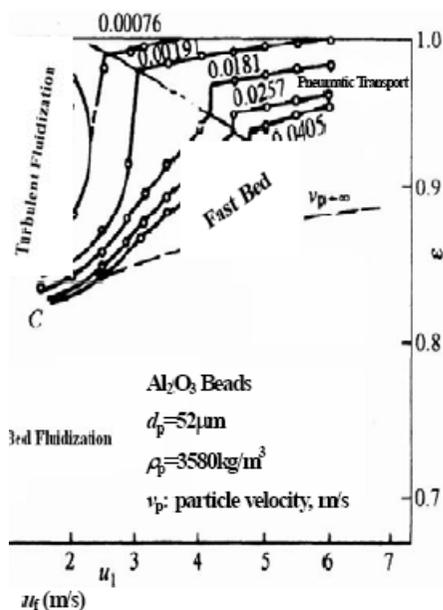
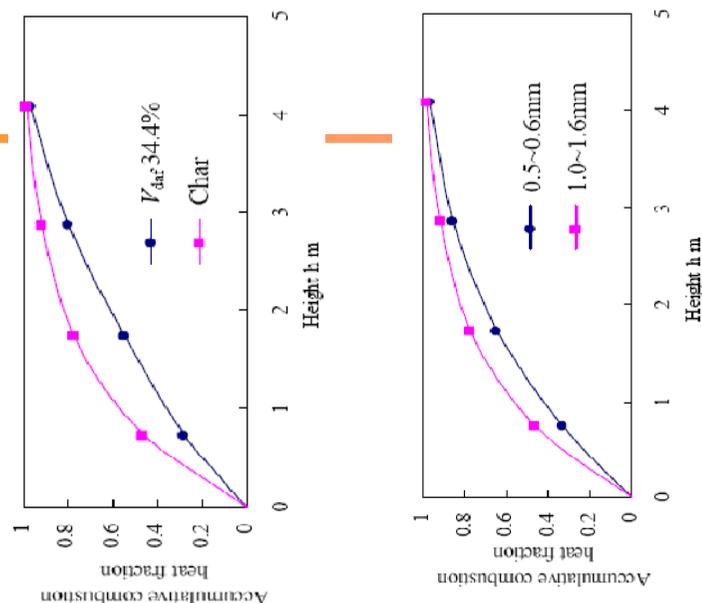


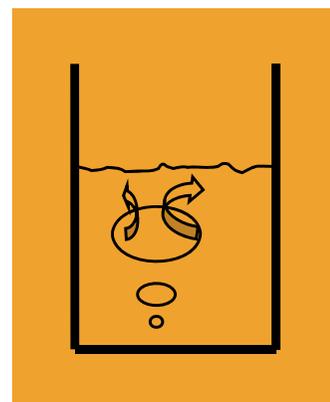
Figure 6 Comparison of model prediction on the pressure drop profiles along the furnace height with the data measured in the field for a 250MWe CFB

2) 在循环床燃烧理论方面的贡献:

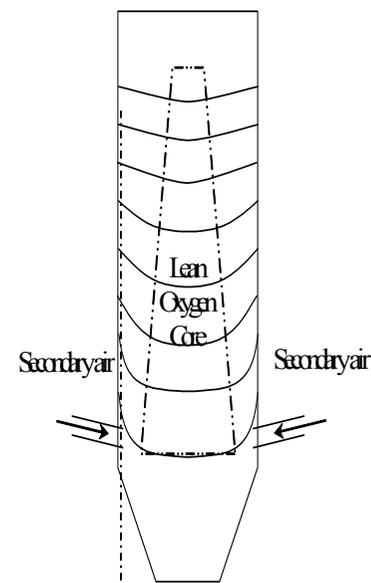
- 提出了燃烧份额沿高度一维分配概念和测试方法。明确并测定了燃料性质和粒度对燃烧份额分配的影响。找到了燃料粒度基配设计的理论根据。
- 实验发现了燃烧室密相区富氧条件下的欠氧燃烧现象，找到了密相区燃烧份额的确定依据，成为设计锅炉一二次风配比的理论根据。
- 发现了循环床锅炉由于二次风穿透不足造成燃烧室中心区欠氧现象，找到二次风风量设计依据。



燃料粒度与性质对燃烧份额的影响



燃烧室密相区欠氧燃烧现象

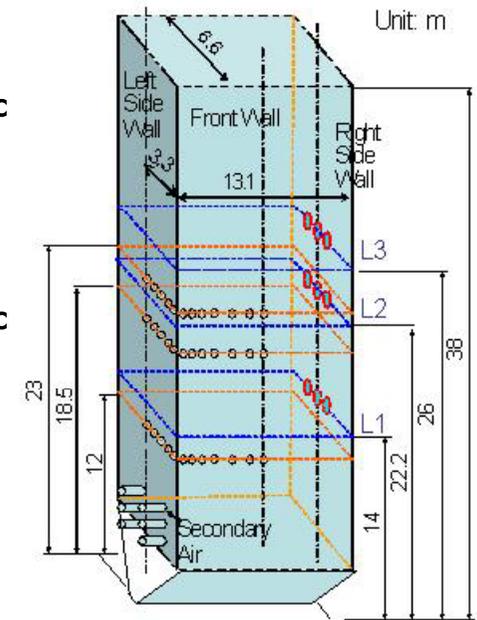


燃烧室中心欠氧现象

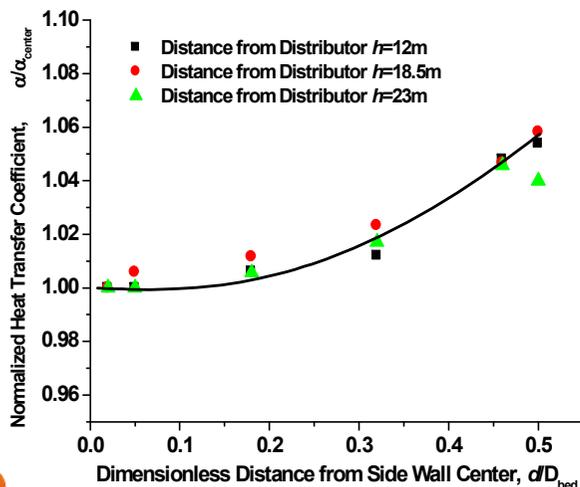


3) 在循环床传热理论上的贡献:

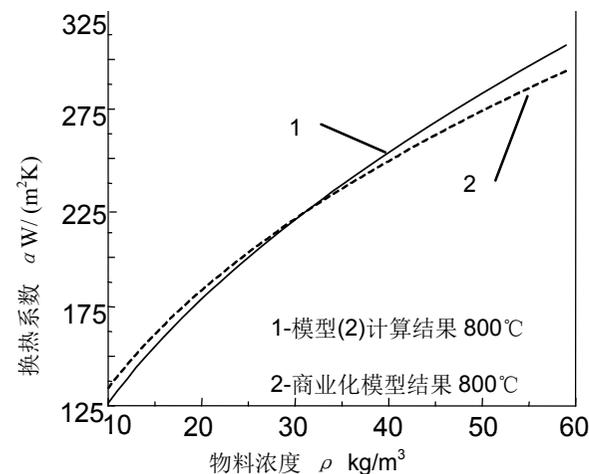
- 将工程用循环床锅炉传热系数控制机制简化为空间辐射及颗粒对流两项。并开发了传热系数测试手段，展开了工业测试。
- 建立了通用循环床燃烧室一维传热工业计算方法。
- 提出并测试了循环床锅炉二维传热系数分布，为发展超临界循环床奠定了水冷壁水动力计算基础。



现场测试示意



传热系数水平分布特性



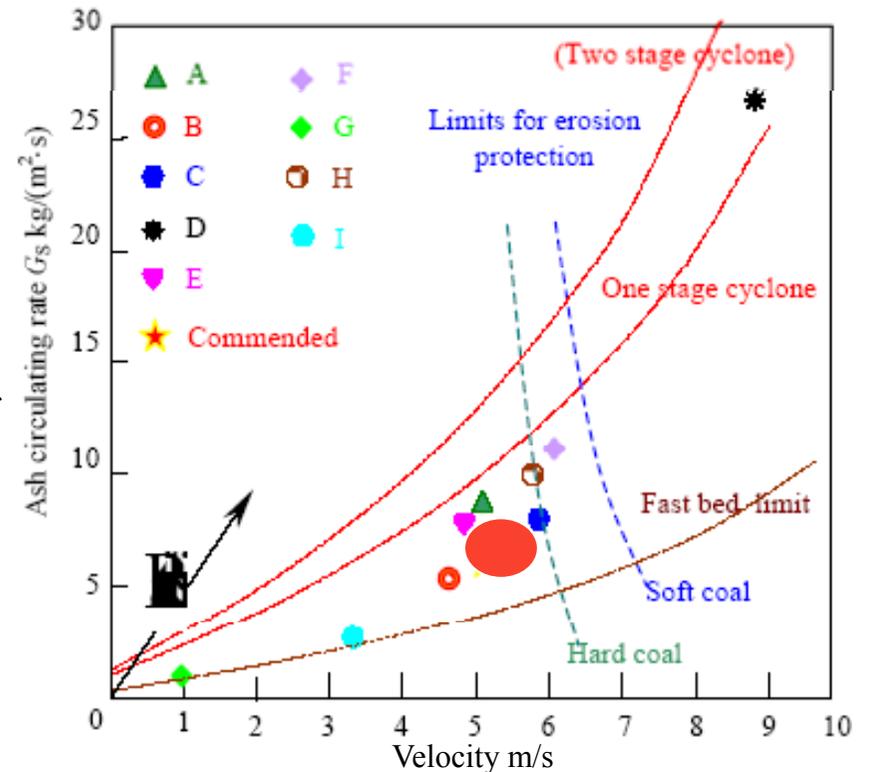
传热系数沿高度（物料浓度）变化规律



我国独立知识产权的循环床锅炉设计体系

建立循环床锅炉流态设计体系

1. 提出“定态设计”的概念以解决“快速床”流型的多态性的原则。
2. 世界首次公布了数循环床锅炉流态图谱，给出定态设计参数选择的指导。
 - 该图谱标识了循环床锅炉流态可选择区域和世界所有循环床燃烧技术在图谱中的位置。
 - 给出了循环床锅炉流态设计的评价依据。
 - 从而使循环床锅炉流态设计进入自由王国。
 - 依此建立了我国自己的循环流化床设计体系



循环床锅炉流态设计图谱



中国循环流化床锅炉的技术进步与发展

里程碑之一 工业循环流化床锅炉

自1980年开始，用我国设计体系开发了从35-560吨/时工业锅炉，116MW以下容量供暖热水锅炉。

中国开发的循环流化床工业锅炉对设计流态进行了修正调整，大大缓解了燃烧室磨损，提高了可用率和煤种适应性。完全占领了中国市场，并出口到国外。



里程碑之二

循环流化床电站锅炉的发展

自2000年后，国产135MW-300MW亚临界循环流化床技术进入发电域。

简化流程

流化状态加以调整

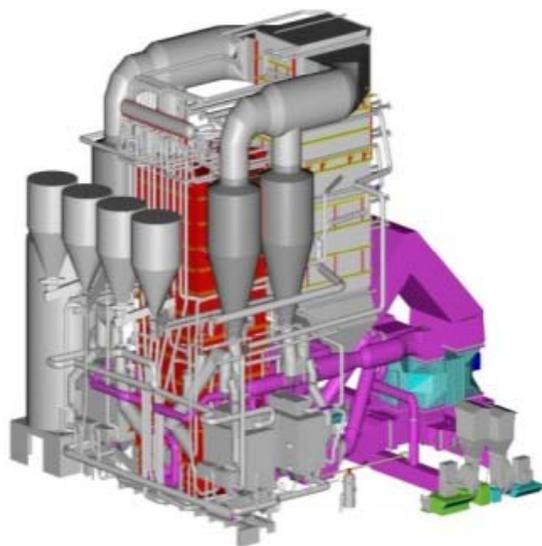
煤种适应性广

磨损小提高了可用率

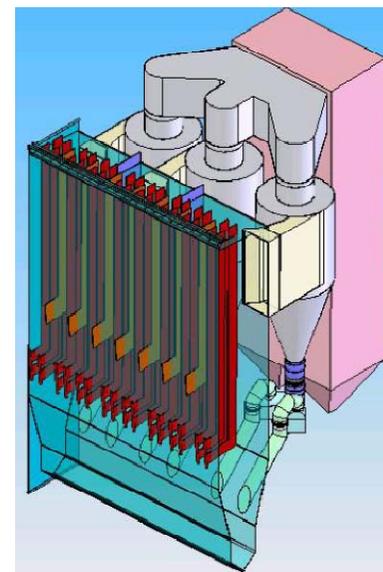
降低维修难度。



典型国产简易流程300MW亚临界循环流化床



结构流程复杂的引进300MWCFB技术



结构流程简单性能
优异的国产300MW
CFB技术



里程碑之三

从追赶到超越 -600MW超临界循环流化床技术开发

中国从2000年起，与世界同步启动了超临界直流循环流化床锅炉的研究。在国家的支持下，采用产学研方式，集合了国内最有经验的研究单位，锅炉厂在十一五期间实施世界最大容量超临界循环流化床示范工程。



清华大学
Tsinghua University

超临界循环流化床关键技术研究突破

我国是与国外同步，没有任何国外可借鉴的经验完全自主开展的超临界循环流化床锅炉技术研究。
但是我国的前期理论与工程实践为超临界循环流化床开发打下了坚实的理论与工业制造基础。

开发600MW超临界循环流化床锅炉面临三个关键挑战：

- 1 流化床燃烧室放大带来的气固两相流动，传热，燃烧，混合系列未知问题的挑战
- 2 将直流强制循环与循环流化床燃烧结合引发的水动力学安全性，水动力设计方法的挑战。
- 3 强制循环水系统和大惯性循环流化床燃烧系统结合带来的动态特性问题及控制问题挑战。



关键技术研究分解

在国家两部委支持下，清华牵头组成了国内主要研究机构和大型锅炉厂及潜在用户的产学研团队。将开发超临界循环流化床的关键科学及技术问题分解：

科学层面

超高燃烧室的气固两相流规律-物料浓度分布规律
直流锅炉燃烧室二维传热和热流分布规律
物料平衡规律
超大截面炉膛，多路循环稳定性及分配规律
本生低质量流率水动力学和热负荷分配交联规律

技术层面

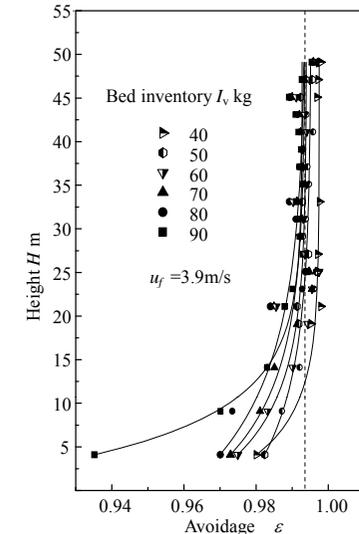
大容量超临界循环流化床锅炉基本结构形式
外置换热床的选择及物料循环流路热负荷分配
质量流率选取与安全性计算
水冷壁强度及安全性
锅炉动态仿真
DCS控制模式



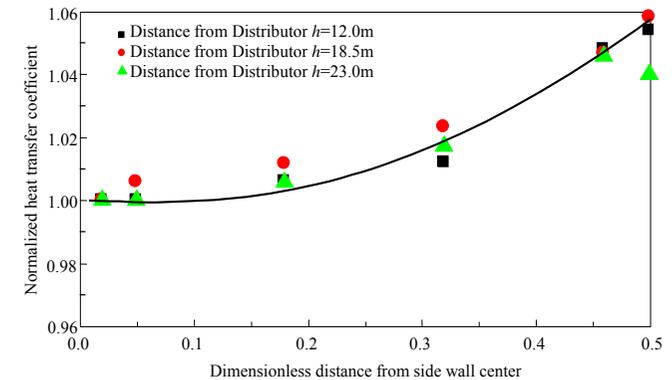
核心研究突破举例

(1) 在白马电厂协助下建设了世界最高的60米冷态循环流化床模型，世界首次以实验回答了超高炉膛物料平衡及物料浓度与流化风速和床存量的关系。

(2) 在东方锅炉厂的协助下，在一台300MW亚临界循环流化床锅炉28米宽燃烧室水冷壁上（与600MW超临界CFB锅炉燃烧室同等宽度）进行了二维产热系数及热流分布实验。为水动力安全和壁温安全计算奠定了基础。也为热力计算提供了可靠数据。所得结论证明国外所有的模型计算的结果有原则性错误。



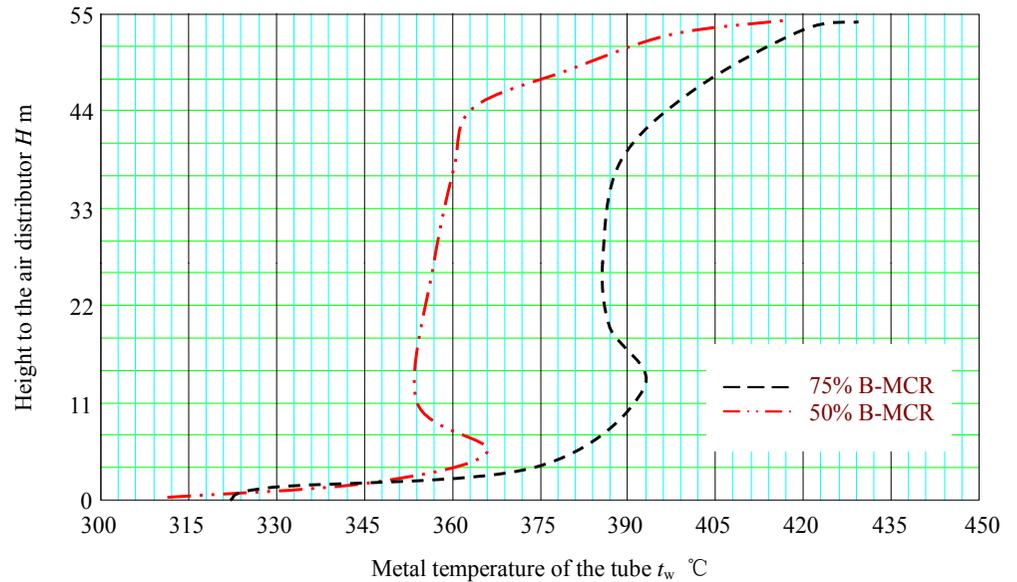
Voidage distribution in extreme high riser



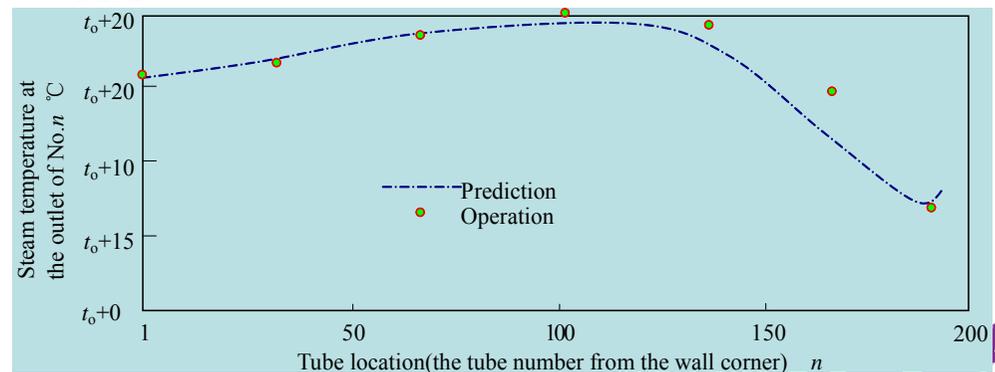
Heat flux distribution along horizontal direction in CFB furnace



(3) 水动力与热流分配结合的模型给出了光管和内螺旋管在不同质量流率下的壁温预测。(安全判据) 结果与实际锅炉完全吻合



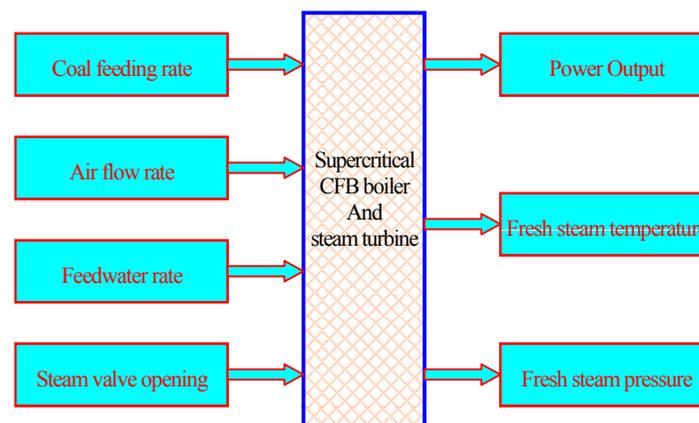
理论预测的变负荷时燃烧室水冷壁管沿高度的金属温度变化



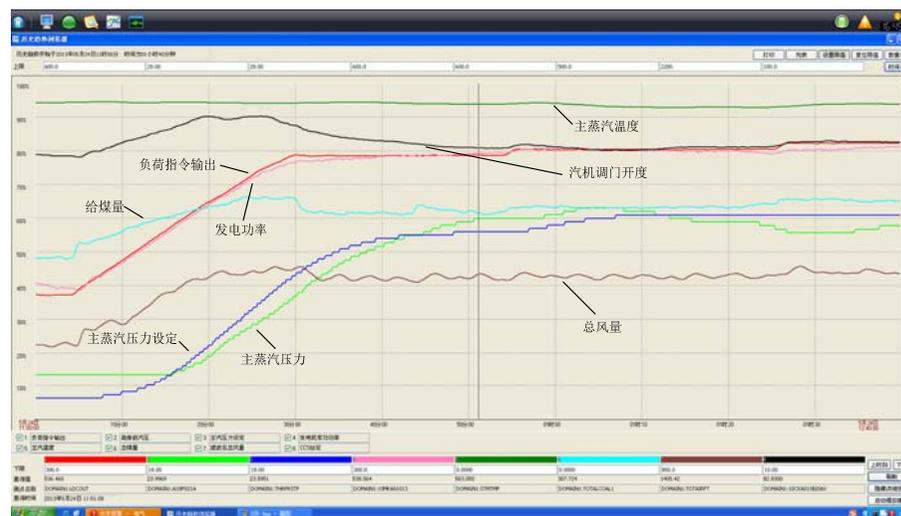
膜式壁出口管壁温水平方向变化理论预测与运行实测的比较



(4) 建立在“即燃残炭”概念下的四输入，三输出锅炉负荷自动控制模块解决了超临界循环流化床负荷控制的世界难题。该模块在600MW超临界循环流化床锅炉发电的DCS系统上得到证实和应用。



4输入三输出超临界循环流化床负荷控制模块



600MW超临界CFB采用研发的控制模块跟踪电网调度对负荷的调节效果



清华大学
Tsinghua University

自主研发600MW超临界循环流化床锅炉的工程设计

设计煤种(高灰高硫低热值贫煤)

Item	Unite	Value
Mar	%	7.58
A _{ar}	%	43.82
V _{daf}	%	14.74
Q _{net,ar}	kJ/kg	15173
C _{ar}	%	41.08
H _{ar}	%	1.62
O _{ar}	%	2.06
N _{ar}	%	0.54
S _{ar}	%	3.3

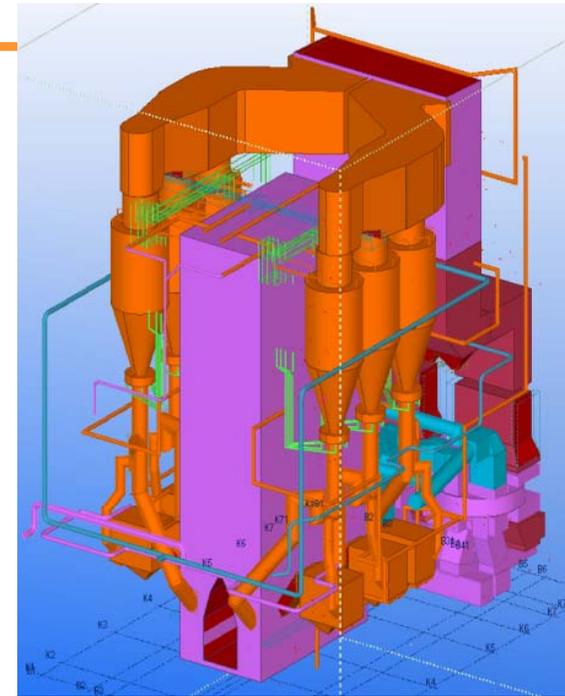
基本设计参数(BMCR工况)

Item	Unit	Value
蒸发量	t/h	1900
主蒸汽压力	MPa	25.5
主蒸汽温度	°C	571
再热蒸汽流量	t/h	1568.2
再热器进出口压力	MPa	4.592/4.352
再热器进出口温度	°C	317/569
给水温度	°C	284
炉膛平均温度	°C	890
排烟温度	°C	129
SO _x 排放	Mg/Nm ³	< 380 Ca/S=2.1 η=96.7%
NO _x 排放	Mg/Nm ³	< 200
粉尘排放	Mg/Nm ³	< 30

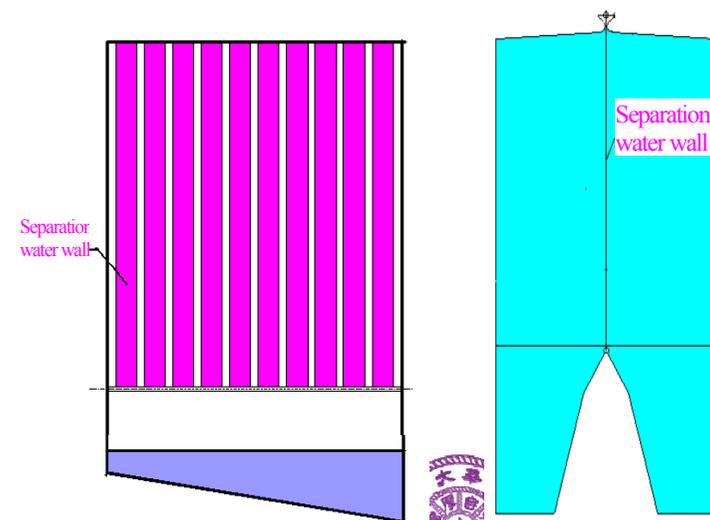


600MW 超临界循环流化床锅炉结构设计

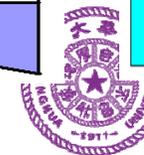
- H型布置解决截面放大
- 双炉膛炉膛中间加带联通间隙的吊屏保持双炉膛压力平衡
- 6个直径10米的汽冷旋风分离器
- 6个外置换热器布置再热器和一级过热器。
- 炉膛底部设置6个水冷滚筒冷渣器
- 炉膛尺寸设计为15.03m×27.9m×55m
- 采用Benson 低质量流率(800Kg/s.m^2)，水冷壁管圈具备正向自补偿能力。



Schematic of 600MW CFB boiler



Partition wall



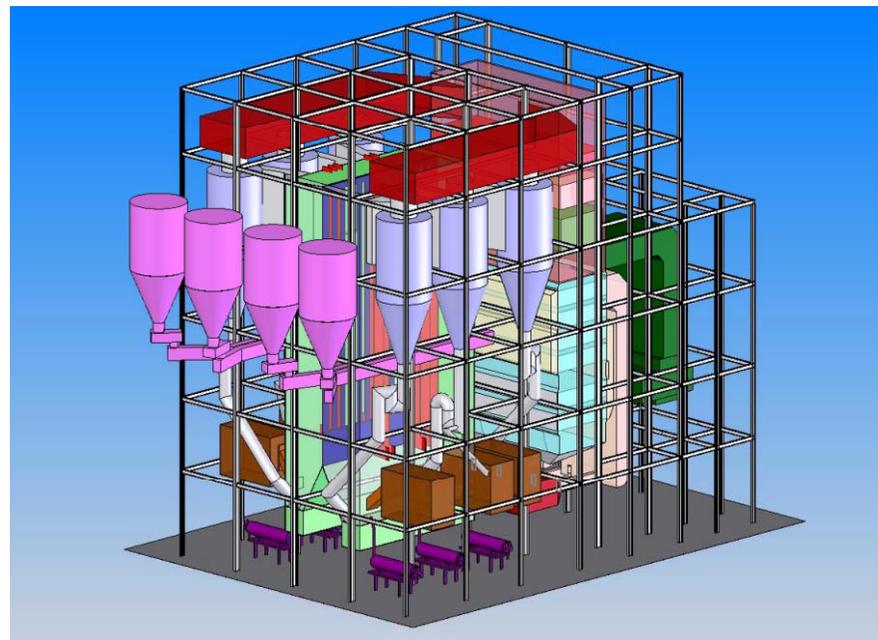
Furnace division



白马电厂600MW超临界循环流化床锅炉示范工程示意图



600MW超临界循环流化床发电厂鸟瞰



600MW超临界循环流化床锅炉结构布置示意图



600MW超临界循环流化床示范工程性能

600MW超临界循环流化床性能测试结果

性能测试结论

测试性能全面达到设计预期，部分指标高于预期。膜式壁管间最大温差<17度,双曝光吊屏管间最大温差<28度.超临界循环流化床锅炉燃烧室的安全性指标优于超临界煤粉炉证实benson 低质量流率水动力设计成功；

NO_x, SO_x 排放指标好于预期，证实燃用劣质煤的循环流化床可以低成本达到相关排放标准；锅炉受热面设计精确；燃烧室温度设计与运行一致。而国外460MW超临界循环流化床设计运行温度误差39度。造成NO_x排放超过设计值，达300mg/Nm³。因此不得不加装SNCR。

这是我国循环流化床研发，制造，运行水平达到世界领先的标志。

项目	单位	设计值	测试值
机组负荷	MW	600	620.05
主汽压力	MPa	25.39	23.64
主汽温度	°C	571	570.02
蒸发量	t/h	1819.1	1823.01
再热蒸汽压力	MPa	4.149	3.98
再热蒸汽温度	°C	569	567.64
减温水总量	t/h	142	109.2
床温	°C	平均890	密相区下部 854炉顶890
排烟温度	°C	128	141.47
锅炉效率	%	91.01	91.52
平均二氧化硫 排放浓度	mg/Nm ³	<380	192.04
钙硫摩尔比	mol/mol	2.1	2.07
脱硫效率	%	96.7	97.12
氮氧化物排放 浓度	mg/Nm ³	<160	111.94
粉尘排放	mg/Nm ³	30	9.34
除尘效率	%		99.95

说明：锅炉测试在BECR负荷下进行，排放测试在额定负荷下进行。



超临界循环流化床锅炉的推广

白马示范成功后，三大锅炉厂已经签订4台600MW，36台350MW超临界循环流化床锅炉的订单。首台东锅和上锅350MW超临界循环流化床锅炉已经进入调试运行。



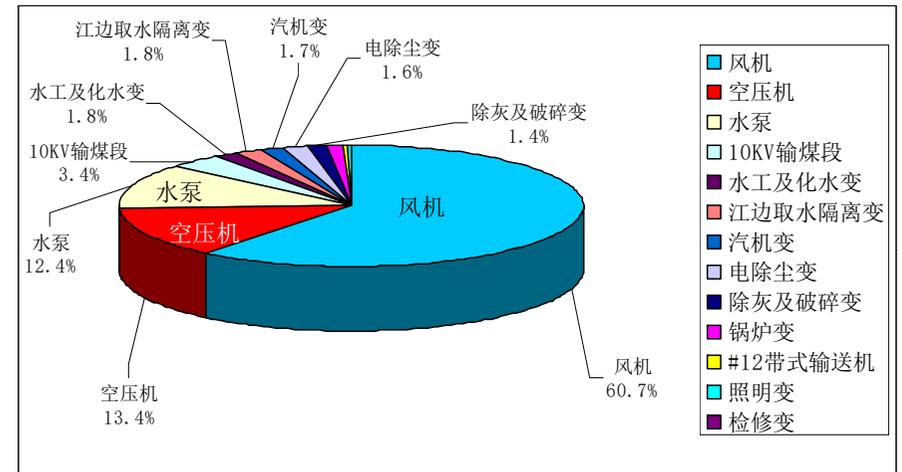
里程碑之四

基于流态重构节能型循环流化床燃烧技术的发展

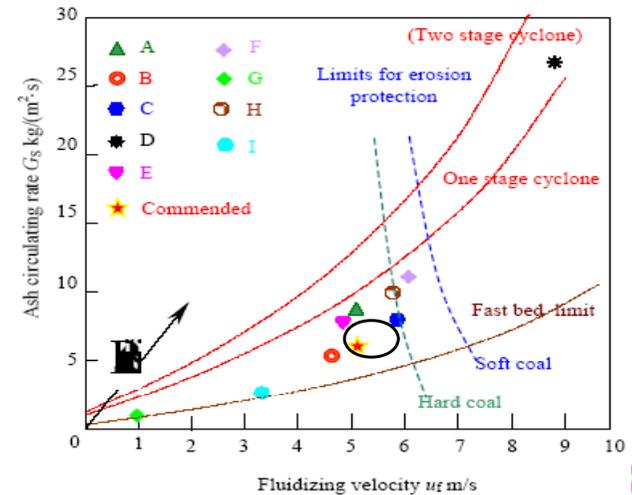
●传统循环流化床技术存在：送风机压头高，厂用电比煤粉炉高2-3%。大颗粒物料流化引发燃烧室膜式壁下部严重磨损，影响可用率。

●为解决上述问题。清华大学根据循环流化床流态图谱建议改变传统循环流化床流态设计定态区域，以达到减少流化风机压头节能和减少燃烧室磨损的建议。

●该设想突破了循环流化床燃烧原有基础流程专利范围。是世界首创的新技术。

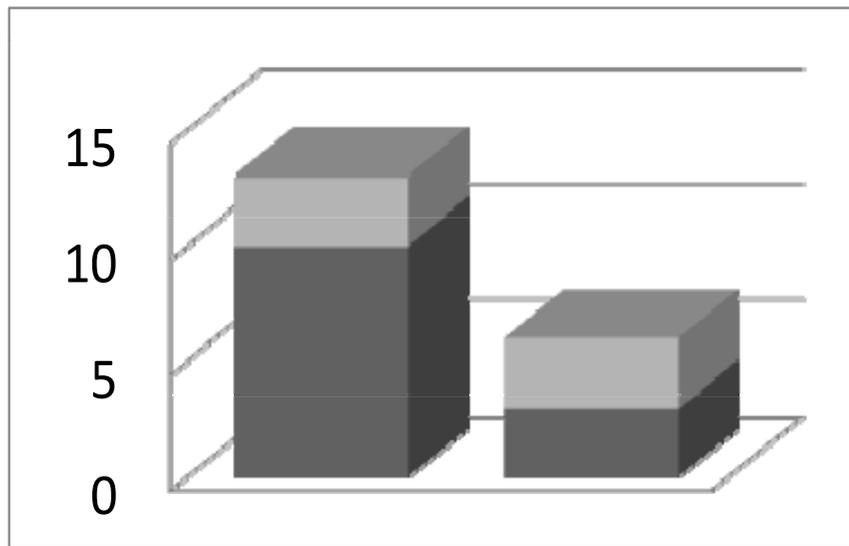


传统循环流化床厂用电分析-风机电耗占了60%



流态重构节能型循环床的核心原理及技术关键

实现低床压降节能运行的核心就是提高床质量，从而可以减少床存量。而不是外界简单认为的低床压降运行



关键技术是1) 改进物料平衡系统，使循环流化床物料平衡系统能形成更细物料的循环。2) 加大二次风动量，解决二次风穿透深度，

强化燃烧室上部燃烧强度。

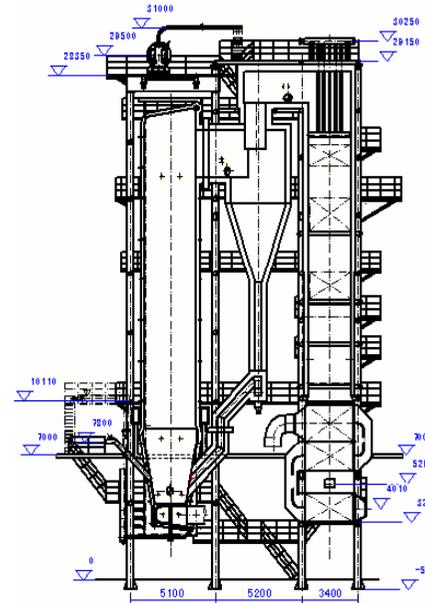


节能型循环流化床的实践

清华大学与太原锅炉厂在节能型循环流化床技术上形成产学研合作伙伴

例一：山西离石大土河电厂

- 在三台 75T/h 燃用洗中煤和泥煤的循环流化床锅炉实验结果证明可以将床压降运行在3.2KPa而不影响满负荷。
- 运行一年没有发生燃烧室水冷壁磨损。可用率超过95%。
- 一年运行节约厂用电5百万度。



Schematic of tested boiler



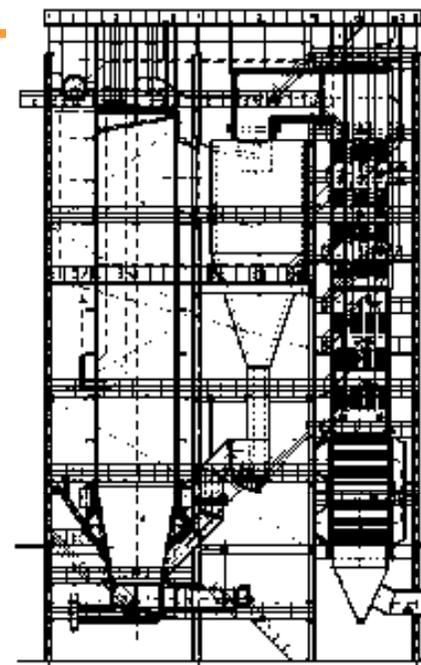
Overview of the tested boiler



例二：海拉尔东热电厂220T/h循环流化床锅炉

燃料: 2800Kcal/Kg 低热值褐煤
辅机设计电机容量:

item	节能型循环流化床	原厂旧机组
一次风机设计功率 (KW)	900	1420
二次风机设计功率 (KW)	560	710
返料伐松动风机设计功率 (KW)	37	110
引风机设计功率 (KW)	1260	1420
风机总功率 (KW)	2757	3660
设计功率差异 (KW)	903	
节能比例	32. 7%	

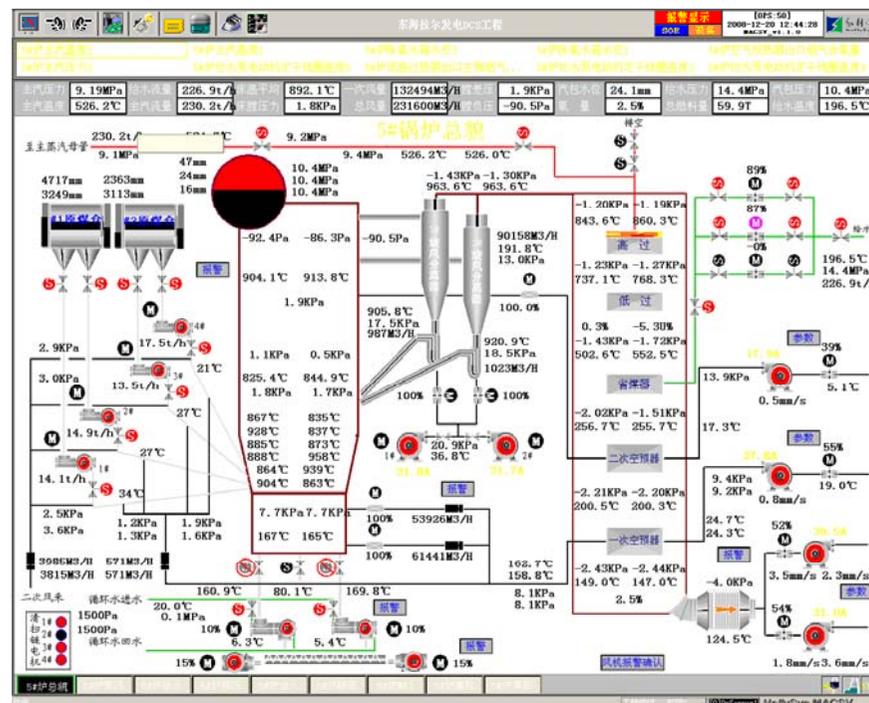


运行辅机电耗

item	节能型循环流化床	旧机组	节能比例
一次风机电流 (A)	34	51	33%
二次风机电流 (A)	18	22	18%
引风机电流 (A)	61	76	20%
返料风机电流 (A)	65	190	66%

运行性能

- 风室压降: 7.7KPa
- 飞灰含碳量: 0.49%
- 排渣含碳量: 0.32%
- 磨损情况: 三年运行燃烧室水冷壁无明显磨损。



DCS screen

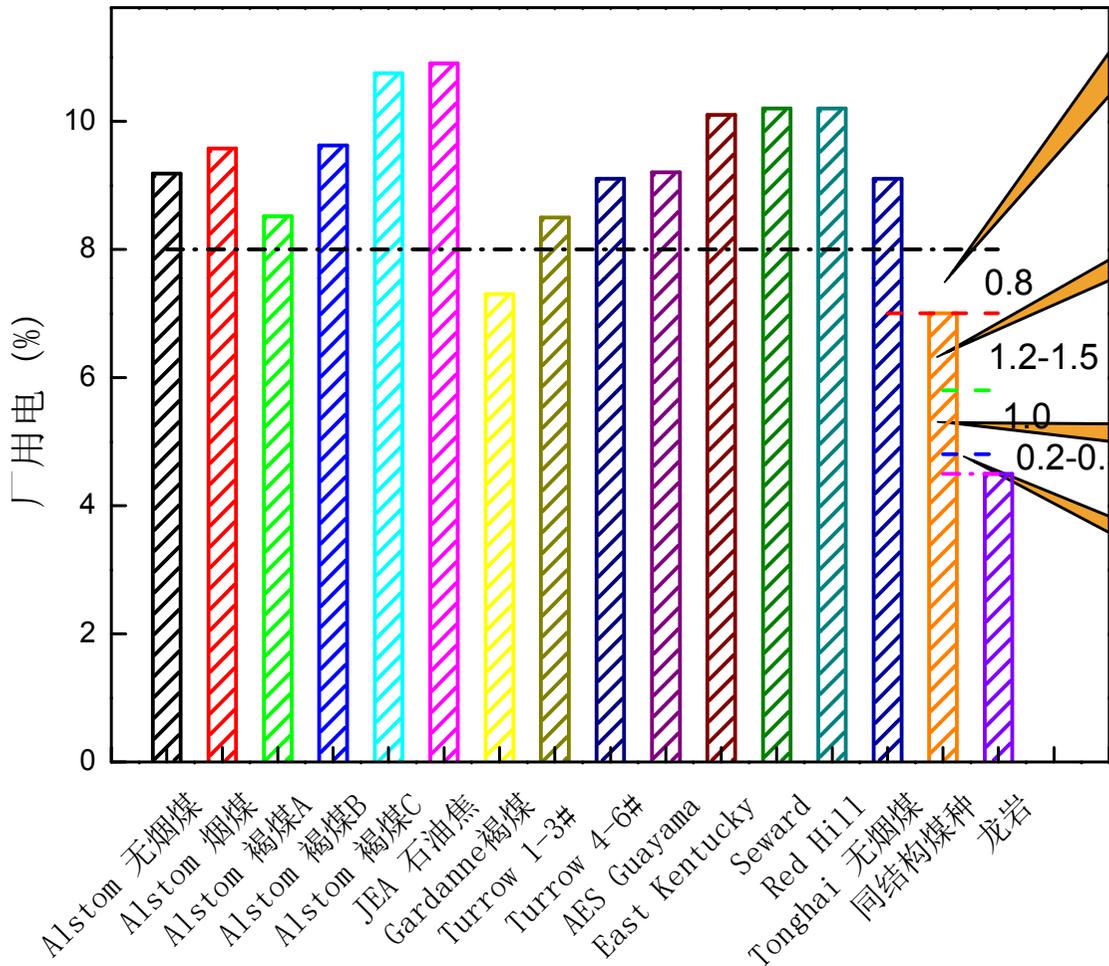


清华大学
Tsinghua University

例三：福建龙岩电厂300Mw循环流化床

辅机电耗降至4.6%，接近同容量煤粉炉的水平

比较
 龙岩示范：4.6%
 同容量原设计炉：7.1%
 全国平均：8%
 国外平均：>9%



本体设计优化

锅炉岛设计优化

运行优化

燃料因素等

国内外类似容量循环流化床锅炉厂用电率比较



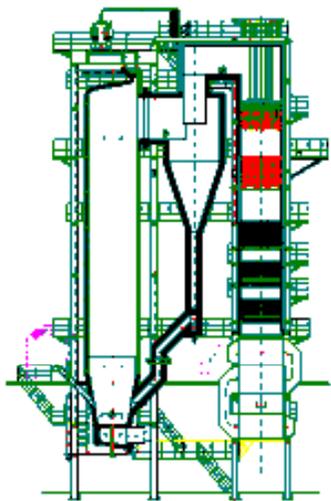
流态重构节能型循环流化床技术的发展

自07年第一台投运后已经在太原锅炉厂形成产品系列，在国内中小容量

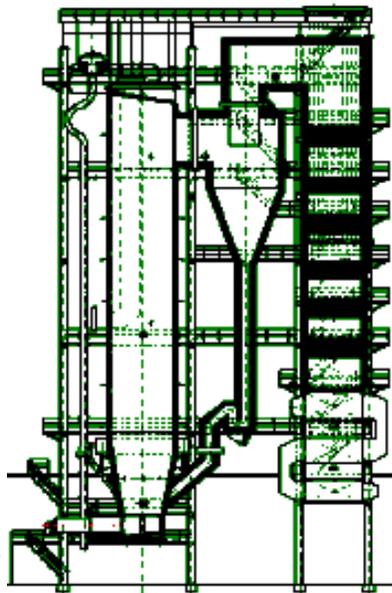
循环流化床市场快速扩展占有率，并打入国外市场。

1025t/h

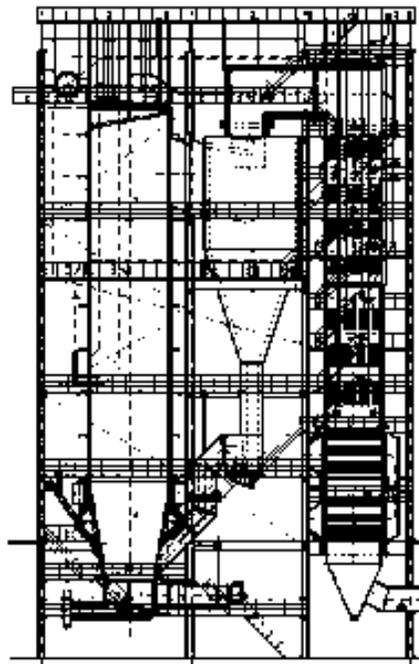
75t/h



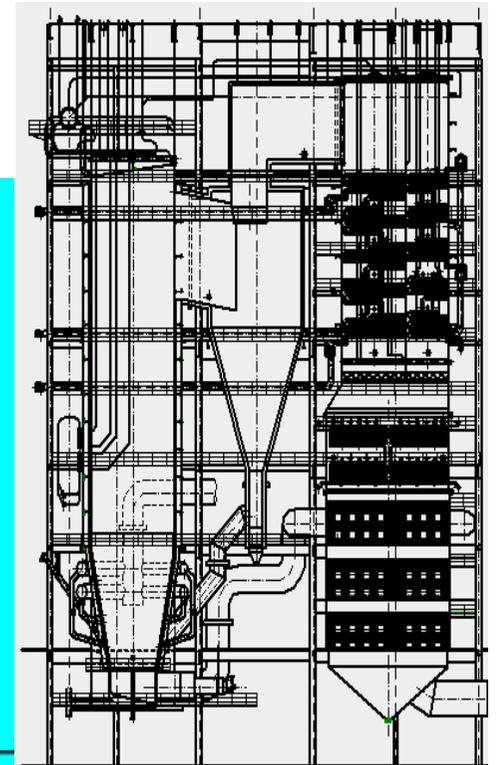
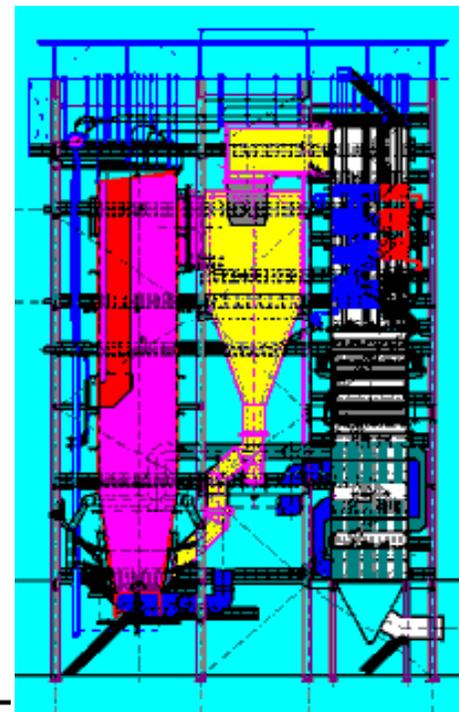
130t/h



220t/h



480t/h



流态重构节能型循环流化床技术优势

- 在经济性与可靠性两方面取得了本质突破
- 节电：风机节电30%
- 节煤：节煤达到2-3%
- 低磨损：飞灰中位粒径降至 $d_{50}=12\mu\text{m}$ （传统循环流化床 $d_{50}=20\mu\text{m}$ ）；

受热面几乎没有磨损；连续运行不小于6500小时；年运行不小于8000小时

2008年该技术通过鉴定，结论为：“具有完全自主知识产权…在节能降耗和防止磨损方面取得重大突破，处于国际领先水平。”

2009年获教育部科技进步一等奖。

2010年部十二科技五支撑项目立项支持。

2011年国际循环流化床和流态化学术界授与清华大学《国际循环流化床技术成就奖》。

至今投运的节能型循环流化床达到数百台。在国内中小热电市场取得重要地位。



循环流化床燃烧技术新的发展方向

循环流化床燃烧本来是一种低成本脱硫，脱硝的清洁煤技术。

但是我国2013年公布的燃煤污染排放标准给循环流化床燃烧污染控制技术提出了第一个挑战。

发改委新公布的供电煤耗标准也给超临界循环流化床节能高效发电提出了第二个挑战。

对两个挑战的应对：

1 进一步提高蒸汽参数：循环流化床高参数超超：

29MPa 605/623 标煤耗 $<285\text{g/KWh}$

2 采用在十二五期间已经在300MW以下容量循环流化床得到商业运行证实的流态重构节能型流程，把厂用电压降低到煤粉炉相同的水平。

3 为避免采用尾部烟气脱硫，脱硝的煤粉炉污染控制模式，需要在循环流化床污染控制技术上实现突破，



近期循环流化床在超低排放技术的突破

传统循环流化床污染控制的能力

炉内脱硫: $\text{Ca}/\text{S} = 2=2.5$ 高硫煤 脱硫效率 $>95\%$ 排放 $<300\text{mg}/\text{Nm}^3$

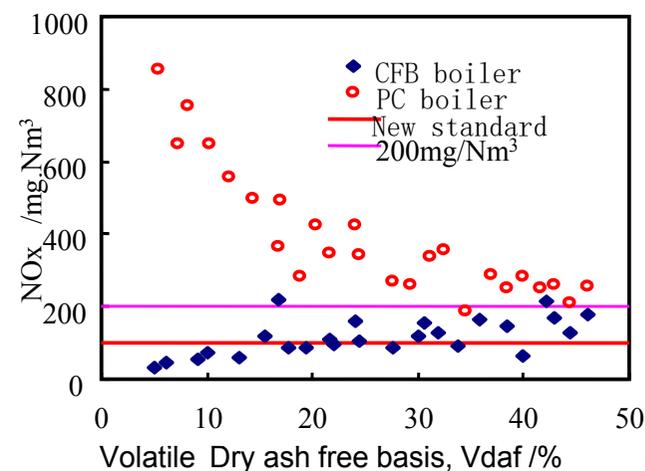
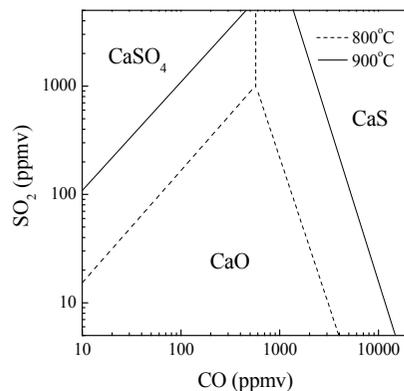
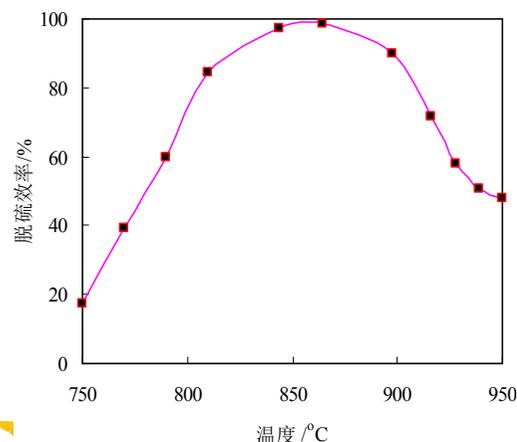
低硫煤脱硫效率 $=90\%$

排放 $<200\text{mg}/\text{Nm}^3$

炉内脱硝: 高挥发分煤 $<200-300\text{mg}/\text{Nm}^3$ 低挥发分煤 $100-150\text{mg}/\text{Nm}^3$

降氮基本手段: 低温, 残炭降解, 还原气氛氧量控制,

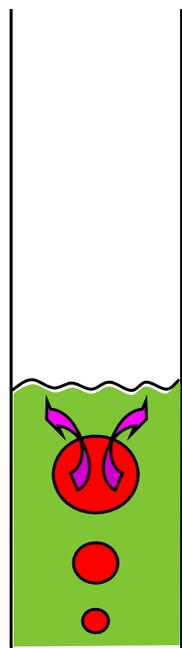
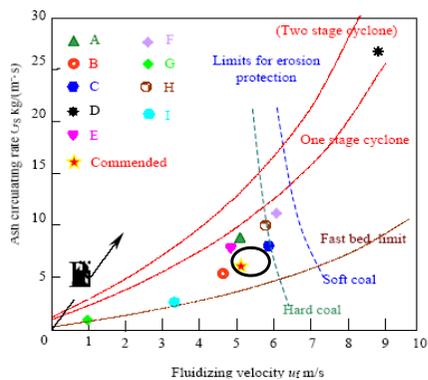
炉内脱硫手段: 低温, 石灰石粒度, 停留时间。



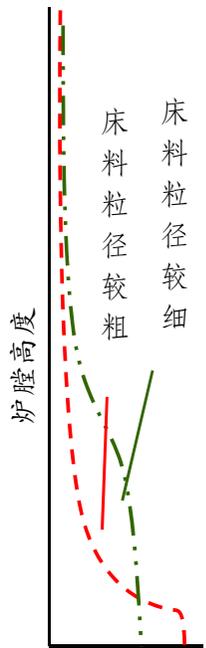
清华大学
Tsinghua University

循环流化床燃烧污染控制的新思路

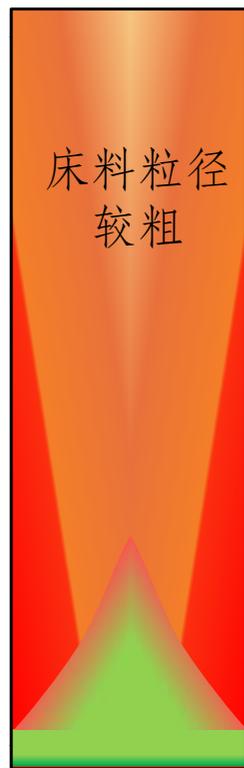
在流态重构节能型循环流化床基础上进一步提高床质量（即循环物料平均粒径），有可能降低石灰石粒度，提高比表面积，加强炉内脱硫效率。在传统控制温度，过量空气系数，分级送风三原则以外，控制流化状态：稀相区的物料粒度减小，浓度进一步提高，扩展还原性气氛的高度，强化主要燃烧过程还原性，有可能进一步降低NO_x排放。



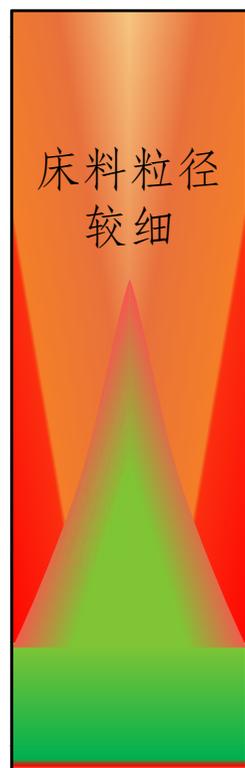
清华早期发现的密相区燃烧还原性气氛



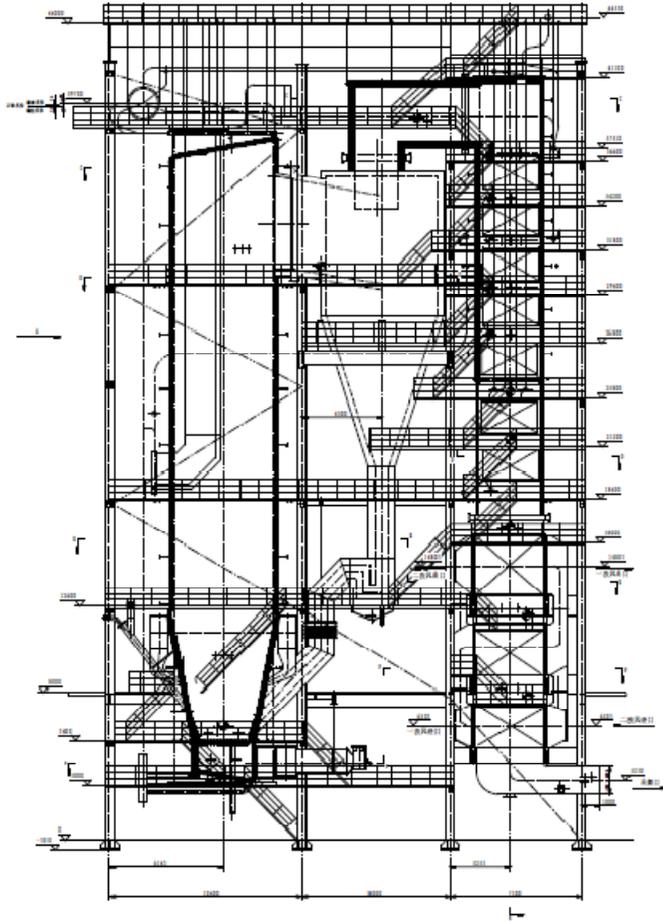
物料浓度分布



炉内还原性气氛



超低排放循环流化床工程示范

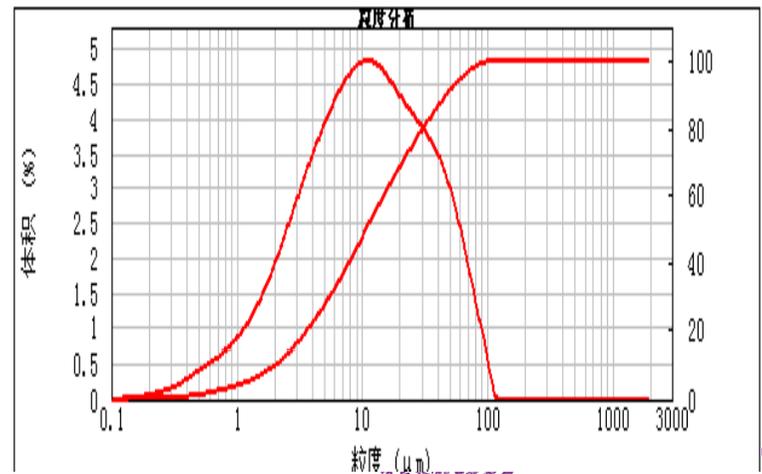


山东淄博热电厂260吨/时超低排放循环流化床锅炉
 燃煤种 4000大卡 烟煤。2015年投运

在流态重构节能型循环流化床技术基础上进一步提高分离器效率。

飞灰切割粒径降至10微米。
 循环灰中位粒径接近100微米。

炉膛上部平均压降提高到
 60Pa/m。



编号	moisture	Ash	volatile	Fix carbon	Sulfur	High Heat value	Low heat value
	Mt	Aad	Vad	FCad	St, ad	Qgr, ar	Qnet, AR
	%	%	%	%	%	J/g	cal/g



示范工程排放效果

经反复多单位测试

NO_x原始排放稳定在20-30mg/Nm³

炉内脱硫实验

Ca/S=1.5 SO₂<50mg/Nm³

本工程之后，

江西560吨/时循环流化床锅炉在燃用4000

大卡烟煤

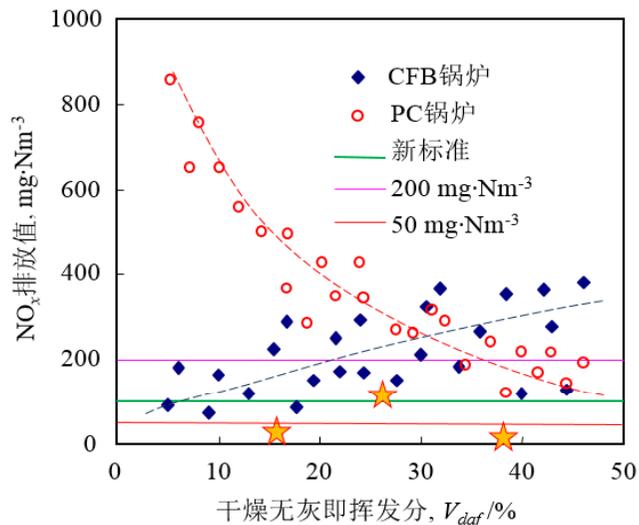
山西霍州260吨/时燃用烟煤煤泥循环流化床得到相同超低排放结果。

山西山阴上锅300MW和国峰东锅300MW循环流化床在高物料浓度运行时，也显示NO_x排放降低的明显趋势。

上述成果超出了国内外对循环流化床污染控制能力的认知底线。震惊了国外学术界。引起国内政府环保部门的注意。



出口CEMS参数	
SO ₂	24.49 mg/Nm ³
O ₂	4.13 %
NO _x	19.91 mg/Nm ³



大学

Tsinghua University

Tsinghua University

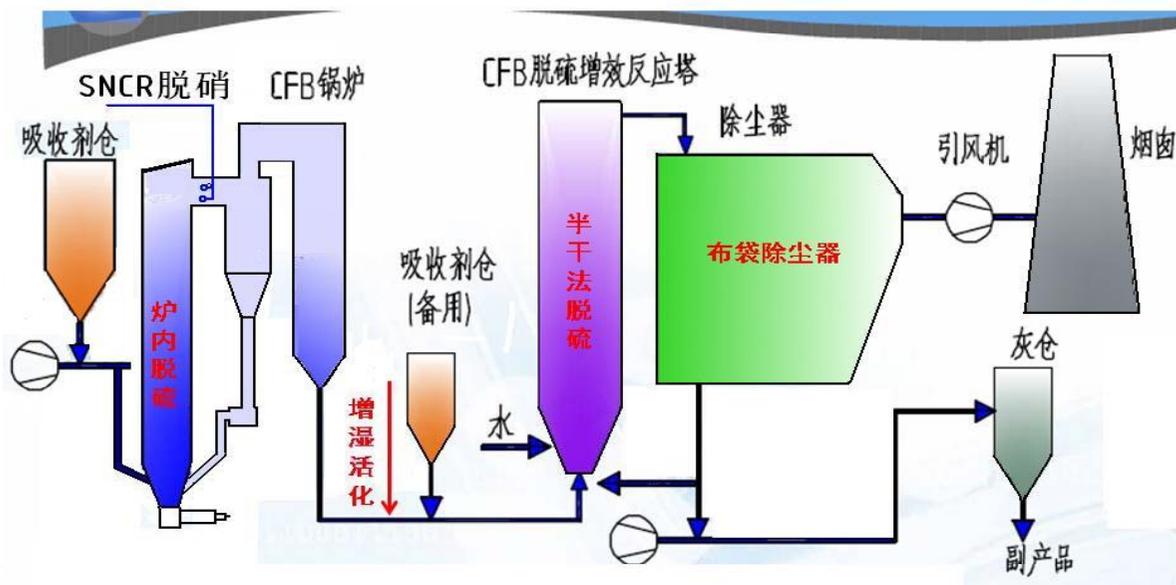
超低排放循环流化床技术路线

清华大学正在开展本技术内在机理的研究，以期能够在所有煤种和不同容量锅炉上推广。

太原锅炉厂正在更多的新建工程和改造工程推进实施。

双方确认在现阶段比较理想的低成本循环流化床燃煤锅炉的超低排放技术路线应当是：

超高循环效率CFB+炉内细石灰石粉脱硫+袋式除尘为基础装备，SNCR及半干法增湿活化二次脱硫作为热备用，保证全工况，全煤种达标。



这条技术路线已经在吉林某热电工程得到成功。

在山西国峰300M循环流化床发电项目168小时运行结果得到证实。



结论

- ▶ 循环流化床燃烧技术对我国燃煤污染控制和消纳大量洗煤矸石，泥煤有重要意义。
- ▶ 我国在循环流化床燃烧大型化，高参数方面达到世界领先。
- ▶ 基于流态重构的节能型循环流化床技术，是我国自主创新的循环流化床发展新方向。
- ▶ 在循环流化床流态图谱的第三轴（循环物料粒度轴）可以找到循环流化床低成本超低排放的突破点。
- ▶ 在十三五期间启动600MW等级超低排放，超超临界循环流化床锅炉示范的开发。形成最高发电效率，最高可用率超低排放的的循环流化床燃烧技术。可能把循环流化床技术应用空间从劣质煤推向高硫无烟煤，以致优质煤发电市场。

