

# ANSYS Fluent在电站锅炉低污染燃烧设计中的应用

- 李德波 博士、高级工程师、数值计算中心负责人
  - 广东电网有限责任公司电力科学研究院
    - [ldbyx@126.com](mailto:ldbyx@126.com)
    - 2016.8.25 中国 上海

一

- 电站锅炉低污染燃烧存在问题

二

- ANSYS FLUENT模型发展

三

- 工程数值模拟应用效果分析

四

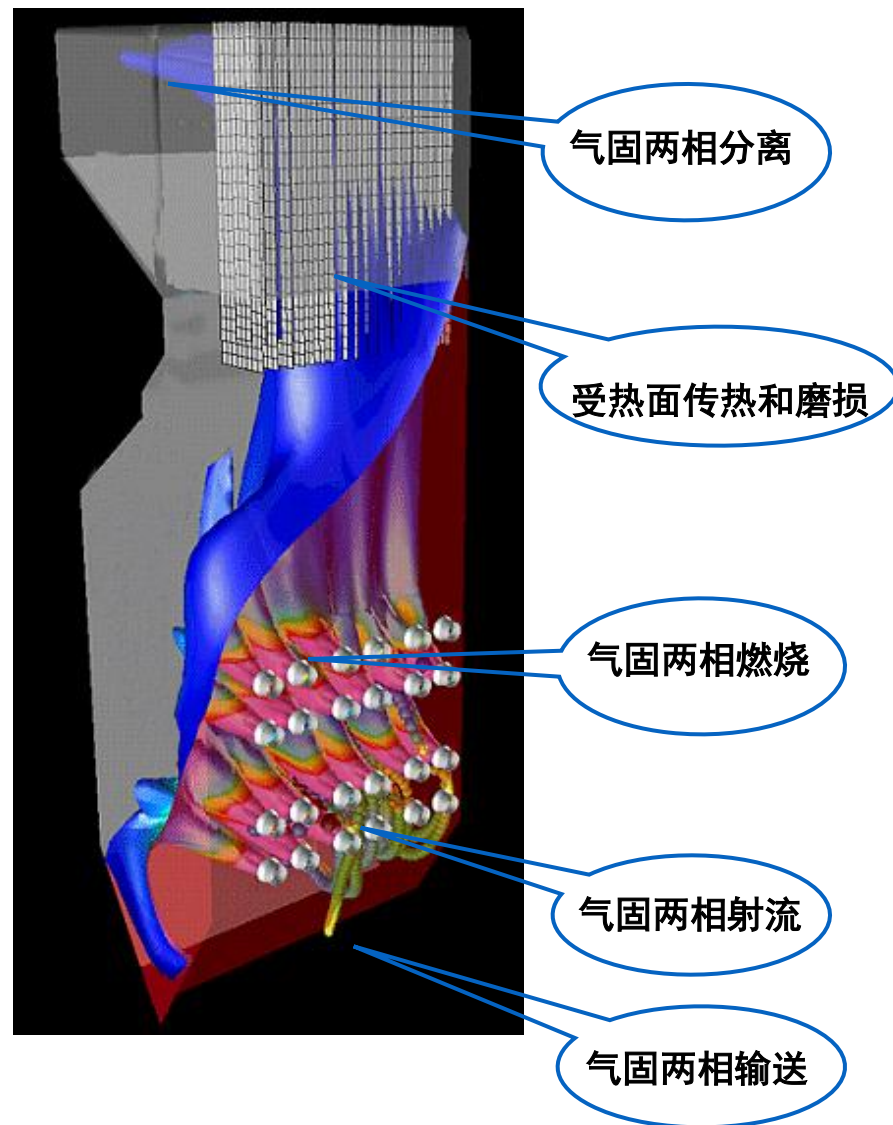
- 工程数值模拟技术存在难点

五

- 总结与展望

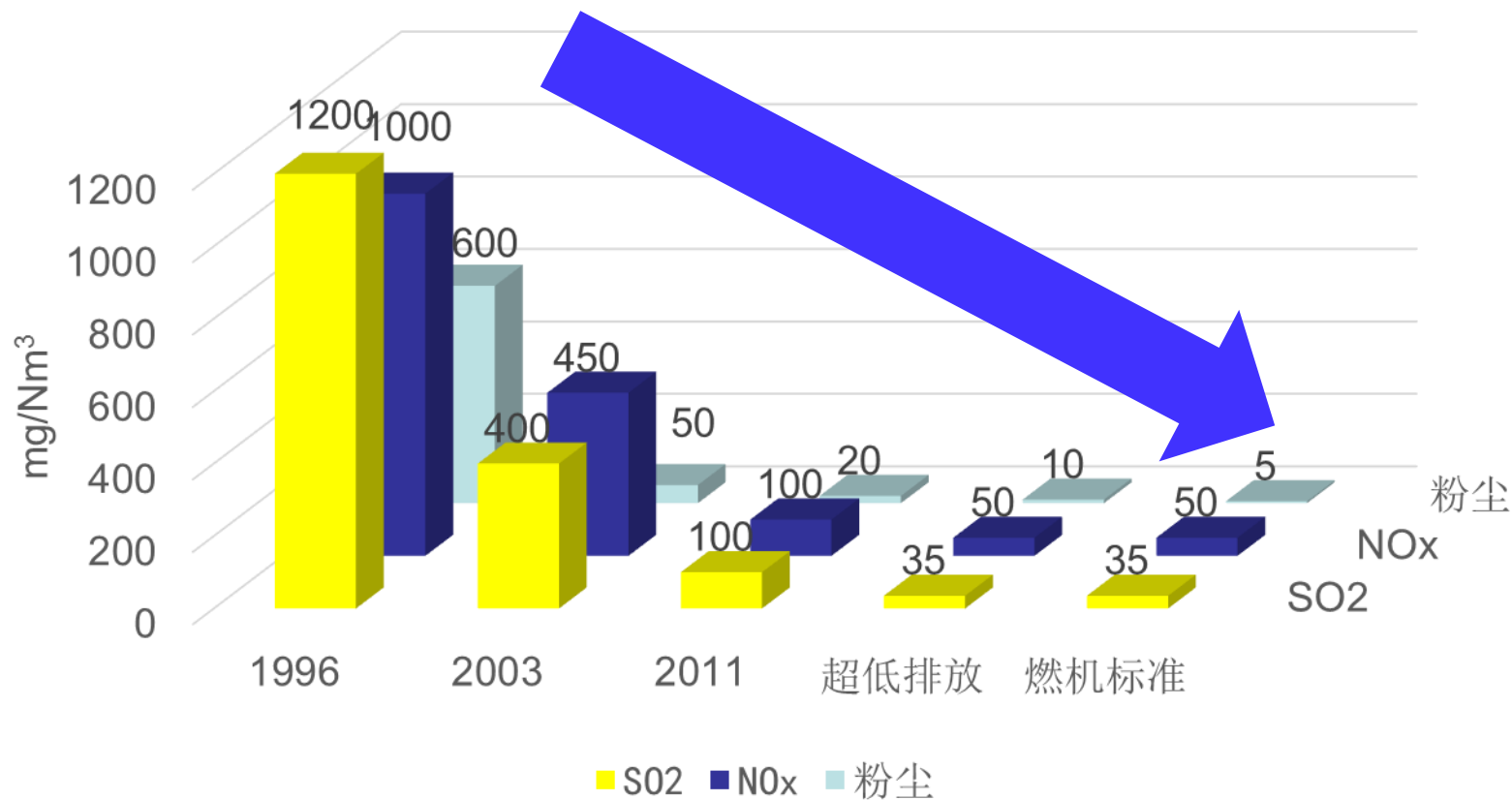
# 电站锅炉现场存在关键问题

在能源动力工程领域，广泛存在着**湍流流动**、**多相燃烧**、**相间传热传质**等复杂的物理化学现象，现场诸多技术难题，到目前为止，**很难采用传统的手段解决。**



# 日益严格的环保要求 - 火电厂面临全面超低排放改造

## 火电厂大气污染物排放要求变化



## 难题1：火电厂氮氧化物超标

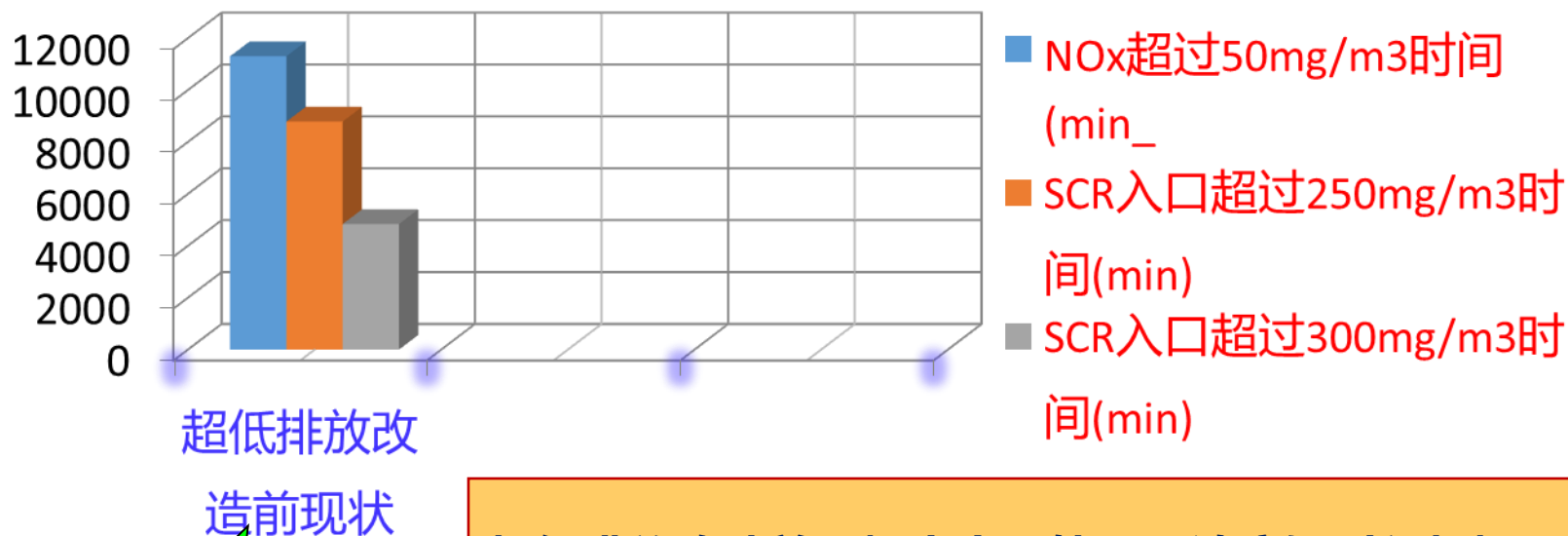
负荷	SCR入口烟温	炉膛出口NO <sub>x</sub> 浓度
MW	°C	mg/Nm <sup>3</sup>
600	327	250
450	314	315
300	278	410

### 问题一

锅炉炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度普遍偏高，尤其是低负荷时，低氮改造效果较差。

炉膛出口NO<sub>x</sub>浓度偏高

## 难题2：火电厂氮氧化物超标



超低排放改造前，烟尘出口处NO<sub>x</sub>浓度短时间超标，即使在增加催化剂层后仍然存在超标的情况。

问题二

烟囱NO<sub>x</sub>浓度短期超标



## 难题3：火电厂氮氧化物超标



催化剂磨损和塌陷图

### 问题三

由于SCR脱硝系统导流板设计存在的缺陷，导致催化剂出现大面积磨损和塌陷，脱硝效率显著降低，影响氮氧化物减排。

## 催化剂磨损和塌陷

## 难题4：超（超）临界锅炉高温腐蚀



◆靖海电厂水冷壁发生大面积高温腐蚀，平均厚度只剩下6mm，最薄处只有5.7-5.8mm。



◆红海湾电厂水冷壁发生高温腐蚀，多根水冷壁壁厚小于6mm，个别小于5mm。

**超（超）临界锅炉高温腐蚀严重影响锅炉安全运行！**



# 电站锅炉数值模拟涉及学科

## 涉及专业学科

- 计算流体力学
- 计算燃烧学
- 计算传热学
- 气固两相流
- 气液两相流
- 化学反应动力学

**电站锅炉燃烧及污染物生成过程模拟难度极大！**

# 大规模数值计算的重要性和意义

## 实验测量

由于大型电站锅炉几何尺寸很大，炉内两相湍流和燃烧的过程十分复杂，实验研究非常困难。

## 理论分析

两相湍流和燃烧的理论分析仅限于描述基本现象，锅炉设计主要依靠经验和半经验的方法。

## 工程数值计算

随着高性能计算机的飞速发展，数值计算成为人类探索未知世界的有力工具。随着商业软件ANSYS FLUENT、ANSYS CFX逐步发展，采用商业软件开展电站锅炉涉及到多相湍流流动、燃烧、及相关问题，发挥重要的作用，具有十分重要的工程应用价值。

一

- 电站锅炉低污染燃烧存在问题

二

- **ANSYS FLUENT模型发展**

三

- 工程数值模拟应用效果分析

四

- 工程数值模拟技术存在难点

五

- 总结与展望

## 二、数值计算理论-数学控制方程

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = S_m$$

动量方程：

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u V) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v V) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w V) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{aligned} \right.$$

## 二、数值计算理论-数学控制方程

温度方程：

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial \rho T u_i}{\partial x_i} + \frac{P}{C_v} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \Phi \right] / C_v$$

状态方程：

$$P = \rho \frac{R_r}{\bar{W}} T$$

上述的连续性方程、动量方程、温度方程和状态方程，进行耦合求解，得到**速度、压力、温度**等物理量的解。数学上称上述耦合方程组是适定的。

## 二、数值计算理论-数学控制方程

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{u}_p \longrightarrow \text{离散相颗粒运动方程}$$

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_{LS} + \mathbf{F}_{LR} \longrightarrow \text{离散相颗粒受力方程}$$

$$I_p \frac{d\boldsymbol{\omega}_p}{dt} = \mathbf{T} \longrightarrow \text{离散相颗粒旋转方程}$$



## 二、数值计算理论-湍流模拟方法

湍流是自然界和工程装置中非常普遍的流动类型，在我们的周围可以随时的观察到湍流。当流动的Reynolds数大于临界值时，流动会出现一系列复杂、随机、无序的混乱状态，湍流最基本的特征就是流体的速度场在空间上和时间上存在着显著、无序的变化。相比层流运动，湍流运动的一个重要特点是能够更有效地运输和掺和流体（S. B. pope, 2000）。

目前湍流的数值计算大致可分为三类：**直接数值模拟（DNS）**、**大涡模拟（LES）**和**雷诺平均法（RANS）**，另外还有分离涡模拟（DES）。工程上应用比较广泛。

## 二、数值计算理论-数学控制方程

连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$$

动量方程 (Navier-Stokes 方程)：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{\mathbf{u}}) &= \text{div}(\mu \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \left[ -\frac{\partial(\rho \overline{u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{\mathbf{u}}) &= \text{div}(\mu \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \left[ -\frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \bar{\mathbf{u}}) &= \text{div}(\mu \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + \left[ -\frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w'^2})}{\partial z} \right] + S_w \end{aligned}$$

## 二、数学控制方程(续)

麻雀虽小、五脏俱全

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{u}\phi) = \text{div}(\Gamma \text{ grad } \phi) - \frac{\partial p}{\partial y} + \left[ -\frac{\partial(\rho\overline{u'\phi'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho\overline{v'\phi'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho\overline{w'\phi'})}{\partial z} \right] + S$$



非稳态项



对流项

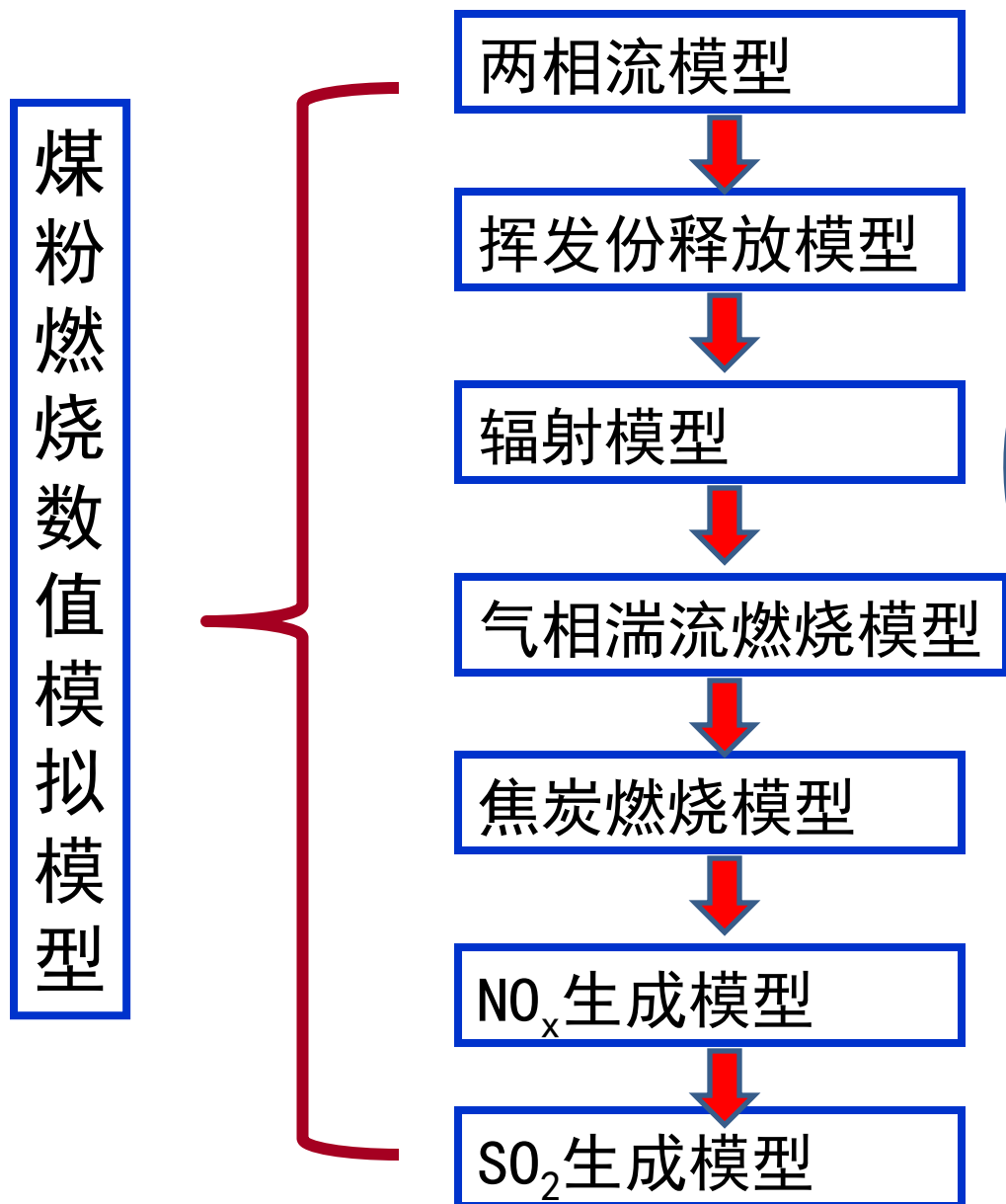


扩散项



源项

## 二、数值计算理论-煤粉燃烧模型



电站锅炉煤粉燃烧复杂过程数学模型，是数值模拟关键技术！

## 二、数值计算理论-两相流模型

气固两相流动实验研究以及半经验和解析法的研究已有较长的历史，但数值计算则是近一、二十年发展起来的。由于气固两相流数值计算能密切配合工程运用，因而受到越来越广泛的重视。

描述多相流体流动的理论模型综合起来有以下四种：无滑移连续介质模型、小滑移连续介质模型、滑移-扩散连续介质模型和分散的颗粒群轨道模型。前三种是在欧拉坐标中考虑多相流的运动，最后一种模型则是运用拉格朗日方法，也就是跟踪颗粒运动轨迹的方法来描述颗粒运动。

## 二、数值计算理论-挥发份释放模型

### 挥发份释放模型:

(1) 定挥发份模型

(2) 单方程模型:

$$\frac{dV}{dt} = k(V_{\infty} - V) \quad V_{\infty} = Q(1 - v_c)v_p \quad k = A_{\text{exp}} \left( -\frac{E}{RT} \right)$$

单方程模型认为煤的热解是在整个煤粒中均匀发生的，其总的全过程可近似为一组分解反应。应用此方程有三点值得注意：

1. 最终挥发分产量 $V_{\infty}$ 往往超过按工业分析标准得到的挥发分量 $V_{\text{daf}}$ 。
2. 不同的煤粉 $E$ 与 $k_0$ 差异巨大，这主要是把实验数据带入一个带有任意性的动力学模型所致。
3.  $V_{\infty}$ 在高温下往往会转变为温度的函数，所以该模型仅仅适合在中等温度下的热解，而在高温下则不适用。

单方程模型仅可用于粗略的估算和比较，要进行准确一些的计算，用该模型是不适合的。



## 二、数值计算理论-挥发份释放模型

### 挥发份释放模型：

(3) 双匹配速率模型：

$$k_1 = B_1[-\frac{E_1}{RT}] \quad k_2 = B_2[-\frac{E_2}{RT}]$$

(a) 煤粉转化为挥发份 $V_1$ +焦炭 $C_1$

(b) 煤粉转化为挥发份 $V_2$ +焦炭 $C_2$

该模型认为有速度常数  $k_1$ 和 $k_2$  两个反应同时竞争, 挥发份转化率为：

$$\frac{dV}{dt} = -(\alpha_1 \cdot k_1 + \alpha_2 \cdot k_2) \cdot m_c$$

## 二、数值计算理论-挥发份释放模型

### 双方程模型优缺点

本模型的一个重要特征在于，即两个反应的活化能 $E_1$ 和 $E_2$ 不同，这样能比较好的描述整个高低温区间的热解特性。**双方程模型在实际数值模拟中应用极广，其主要原因是由于在数值模拟时计算比较简单，而计算结果又有一定的准确性**，但当要专门进行热解产物的精确描述时，本模型误差仍太大。

## 二、数值计算理论-挥发份释放模型

### 挥发份释放模型：

(4) 多步平行反应模型：

该模型确定热解由一系列多种化学反应组成。每一种分解反应可以表述为：

$$\frac{dV}{dt} = k_i (V_i^* - V_i)$$

Suuberg等采用上述方法，提出了一个15个一组反应所构成的方程组，考虑了8种热解产物（ $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_n\text{H}_m$ 、焦油、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2$ ）。该模型在描述褐煤热解方面相当成功，但是这组反应方程对于预测其他煤种在不同实验条件下所得到的气态热解产物误差较大。**由于动力学参数会随着实际的煤种变化而变化，所以使模型的应用受到了极大的限制。**

## 二、数值计算理论-辐射传热模型

火焰热辐射性质主要与介质的吸收和散射能力有关，在燃烧室中的辐射介质主要是**气相、颗粒相、非发光和发光颗粒的辐射**。辐射传输方程的求解的精确度大大取决于精确了解燃烧产物气体和煤粉颗粒、灰粒、烟煤的辐射性质。因为通常液滴迅速蒸发，对辐射传热不会影响很大。然而，由于颗粒在整个光谱中连续的发射、吸收、散射能量，因此**颗粒的辐射强度占主导地位**。而燃烧的气体产物的影响集中在很窄的离散波段中。

模拟火焰辐射换热数值方法目前常用的是**区域法、热流法、蒙特卡洛法(概率模拟法)、数论法**。在ANSYS FLUENT 14.0数值模拟大型电站锅炉炉内辐射换热时，应用较多的**P1辐射换热模型**。

## 二、数值计算理论-气相燃烧模型

- (1) 通用有限速率模型
- (2) 非预混合燃烧模型
- (3) 预混合燃烧模型
- (4) 部分预混合燃烧模型

数学模型选择的大致方针如下：

- (1) 通用有限速度模型主要用于：化学组分混合、输运和反应的问题；壁面或者粒子表面反应的问题（如化学蒸气沉积）；
- (2) 非预混合燃烧模型主要用于：包括湍流扩散火焰的反应系统，这个系统接近化学平衡，其中的氧化物和燃料以两个或者三个流道分别流入所要计算的区域；
- (3) 预混合燃烧模型主要用于：单一、完全预混合反应物流动；
- (4) 部分预混合燃烧模型主要用于：区域内具有变化等值比率的预混合火焰的情况；

## 二、数值计算理论-煤粉燃烧计算器

Figure 17.11 The Coal Calculator Dialog Box

ANSYS FLUENT 14.0软件首次加入了煤粉燃烧计算器，能够根据现场锅炉煤的元素分析和工业分析、低位发热量计算煤粉燃烧挥发份反应平衡方程。

煤的元素分析输入

煤的工业分析输入



## 二、数值计算理论-煤粉非预混燃烧模型

### (1) 混合分数-概率密度函数模型

数学模型的特点：

- (1) 对于煤粉炉的燃烧模拟多采用混合分数-概率密度函数方法 (Mixture Fraction/PDF) 方法进行模拟，该模型严格考虑了湍流流动与化学反应之间的耦合；
- (2) 在非预混燃烧中，燃料和氧化剂以不同的空间流进入反应区。采用混合分数方法，是在一定的假设条件下，将化学反应简化成一个单一的参数-混合分数；
- (3) 这个模型的特点是能够模拟反应中间产物的生成或者分解，严格考虑了湍流与化学反应之间的耦合，**由于不需要求解大量的物质输运方程，因此计算效率较高。**

## 二、数值计算理论-焦炭燃烧模型

- (1) 扩散控制模型
- (2) 动力学/扩散控制模型
- (3) 内部控制反应模型
- (4) 多组分表面燃烧模型

数学模型选择的大致方针如下：

- (1) 扩散控制模型：该模型假定表面反应速率等于由气相氧化剂向颗粒表面扩散的速率；
- (2) **动力学/扩散控制模型假定反应速率同时受到反应动力学和扩散过程综合影响；**
- (3) 内部控制反应模型：考虑了反应动力学和扩散过程的综合影响，但是在反应动力学方面，考虑了颗粒内表面反应和空隙内的扩散；
- (4) 多组分表面燃烧模型：定义多种组分在焦炭颗粒表面发生的气固异相反应。

## 二、数值计算理论- $\text{NO}_x$ 生成模型


在湍流火焰的分子级别中的 $\text{NO}_x$ 的形成可以分为四个不同的化学过程：**热力型 $\text{NO}_x$** 的生成过程，**快速型 $\text{NO}_x$** 的生成过程，**燃料型 $\text{NO}_x$** 的生成过程和 **$\text{NO}_x$ 的还原**过程。

热力型和快速型 $\text{NO}_x$ 的机制决定其计算只需要解决 $\text{NO}_x$ 输运方程，而燃料型 $\text{NO}_x$ 因为自身反应过程有大量的中间产物（HCN和 $\text{NH}_3$ 等），因此在计算燃料型 $\text{NO}_x$ 时除需要 $\text{NO}_x$ 的输运方程，还要解决含氮中间产物HCN和 $\text{NH}_3$ 的输运方程。 $\text{NO}_x$ 的输运方程通过给定的流场和燃烧结果来解。

## 二、数值计算理论-NO<sub>x</sub>生成模型


NO输运的控制方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO}$$

 NO生成源项

HCN输运的控制方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{HCN}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{HCN}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{HCN}) + S_{HCN}$$

 HCN生成源项

NH<sub>3</sub>输运的控制方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NH_3}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NH_3}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NH_3}) + S_{NH_3}$$

NH<sub>3</sub>生成源项

N<sub>2</sub>O输运的控制方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{N_2O}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{N_2O}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{N_2O}) + S_{N_2O}$$

N<sub>2</sub>O生成源项

## 二、数值计算理论-SO<sub>2</sub>生成模型

ANSYS FLUENT 14.0通过求解SO<sub>2</sub>的质量传递方程，考虑了SO<sub>2</sub>对流、扩散、产生项和消耗项以及相关的组分。这种方法是一种通用的方法，由质量守恒方程得到。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{SO_2}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{SO_2}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{SO_2}) + S_{SO_2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{H_2S}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{H_2S}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{H_2S}) + S_{H_2S}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{SO_3}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{SO_3}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{SO_3}) + S_{SO_3}$$

一

- 电站锅炉低污染燃烧存在问题

二

- ANSYS FLUENT模型发展

三

- 工程数值模拟应用效果分析

四

- 工程数值模拟技术存在难点

五

- 总结与展望



# 应用1：DBC-OPCC型旋流燃烧大面积烧损（汕尾红海湾电厂3、4号机组）



燃烧器设计特点

# 应用1-DBC-OPCC型旋流燃烧大面积烧损（汕尾红海湾电厂3、4号机组）



燃烧器设计特点

# 燃烧器设计特点



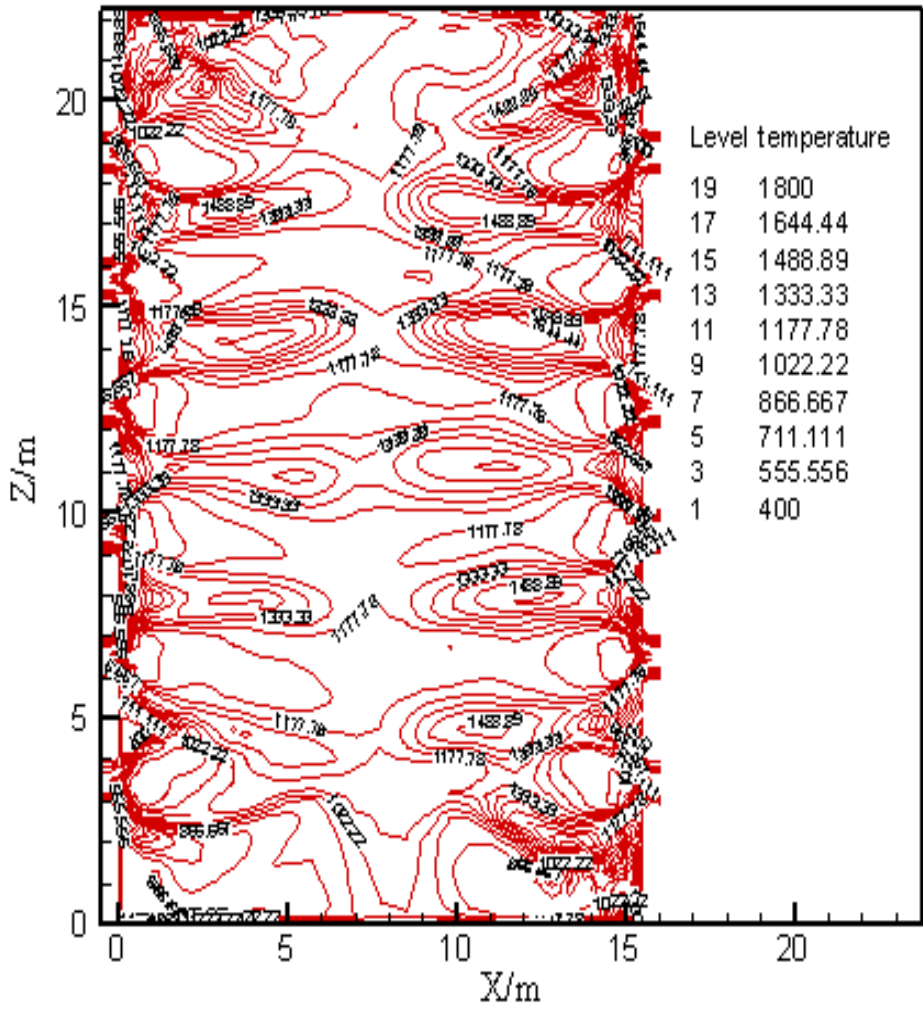


# 燃烧器烧损图

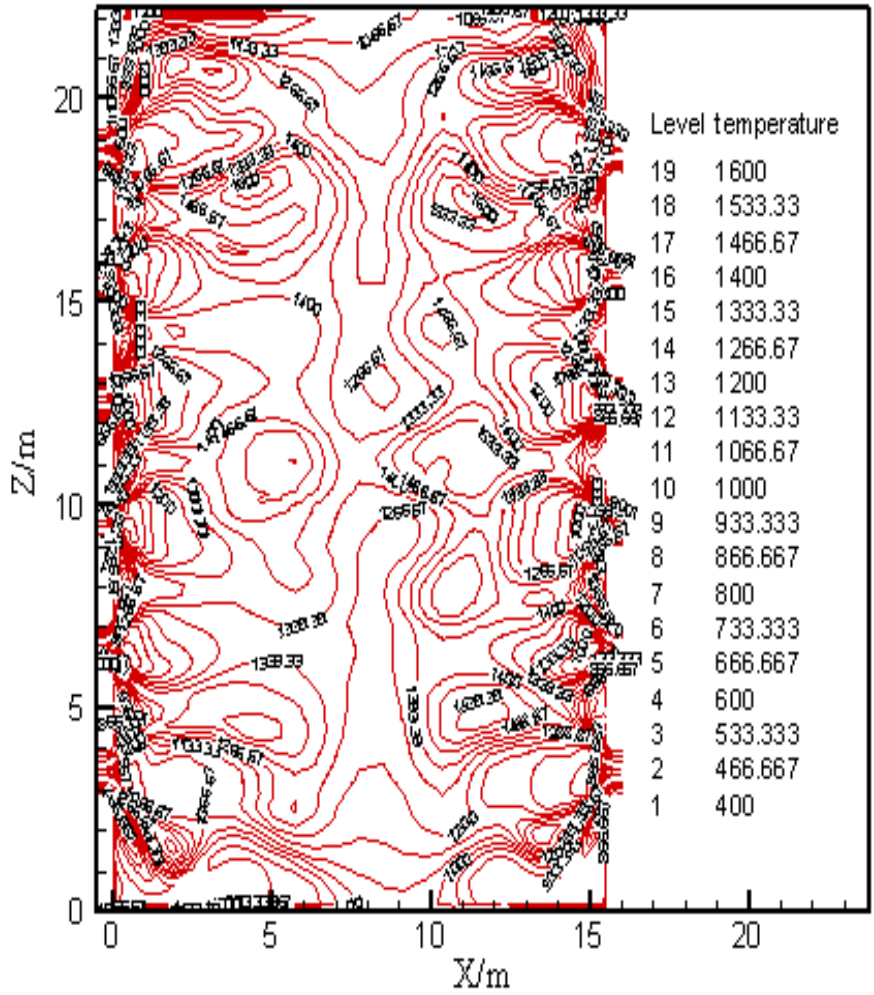


下层燃烧器烧损图

# 温度场分布图



第一层燃烧器截面温度分布



第二层燃烧器截面温度分布

# 数值模拟结果分析

- 燃烧器喷口出口的最高温度达到了**900°C**以上，中、上层旋流燃烧器的温度明显比下层旋流燃烧器温度高，解释在现场中发现，**上层旋流燃烧器烧坏的程度明显比中下层旋流燃烧器高**。
- 通过现场观察和数值模拟结合，充分证实了本文数值模拟的结果是有效的。

# 燃烧器改造措施

- 一次风筒应该采用**高温耐磨合金钢**整体铸造。
- **减小内二次风旋流强度**，减小内二次风轴向叶片的角度。
- 提高**中心风筒材料制造的工艺**。
- 改进**陶瓷黏贴工艺**，避免陶瓷脱落。
- 对于挥发份较高的印尼煤，应该适当**提高一次风的风**。
- DBC-OPCC型旋流燃烧器，内二次风轴向叶片角度**设计成可调**，减小内二次风旋流强度，扩展这种旋流燃烧器对煤种的适应性。

1、李德波等，运用燃烧数值模拟分析某台660M\_省略\_超临界锅炉旋流燃烧器喷口烧损事故，机械工程学报，49（16），2013。



# 应用2-SCR脱硝系统导流板优化数值模拟



## 脱硝系统布置特点

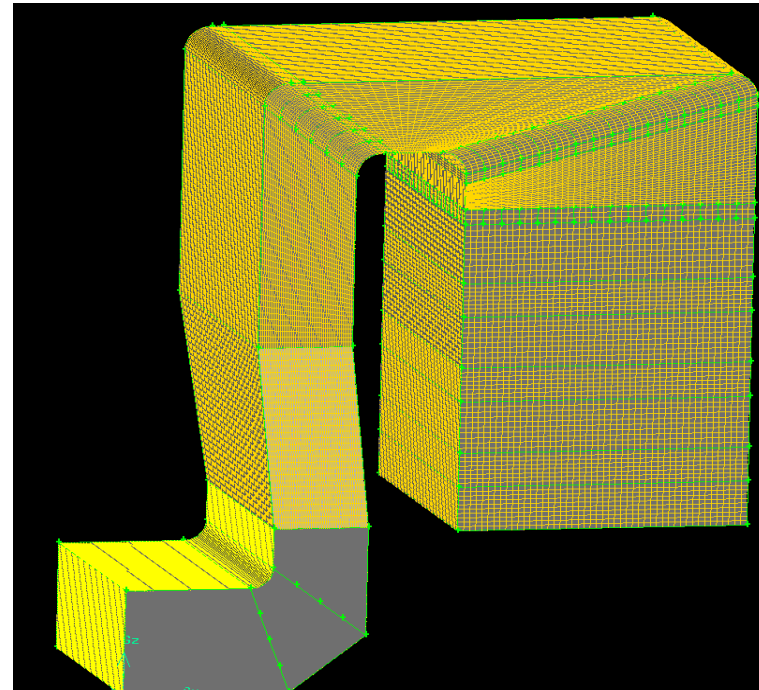
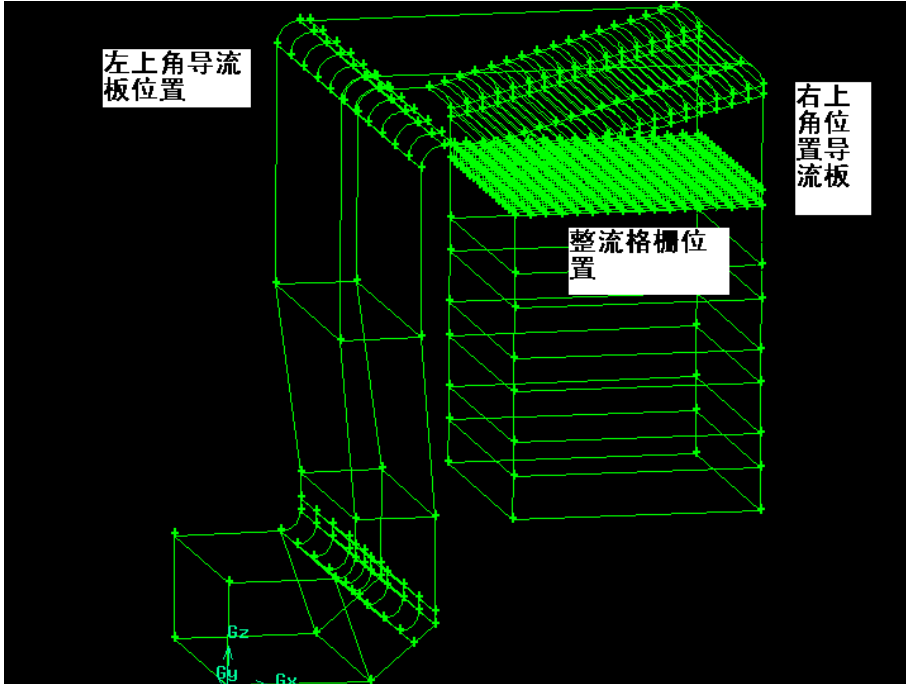




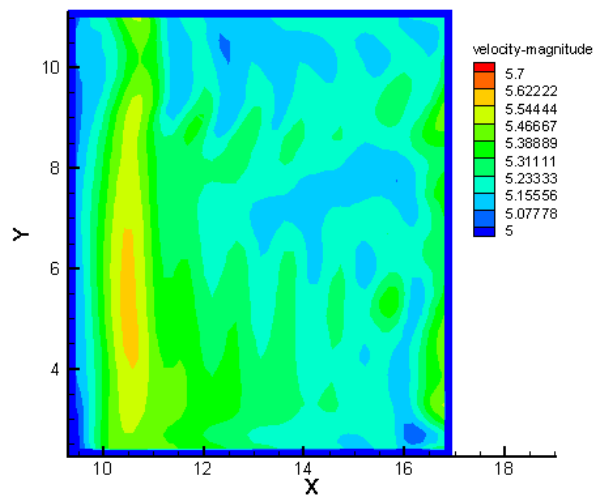


## 催化剂磨损和塌陷图特点

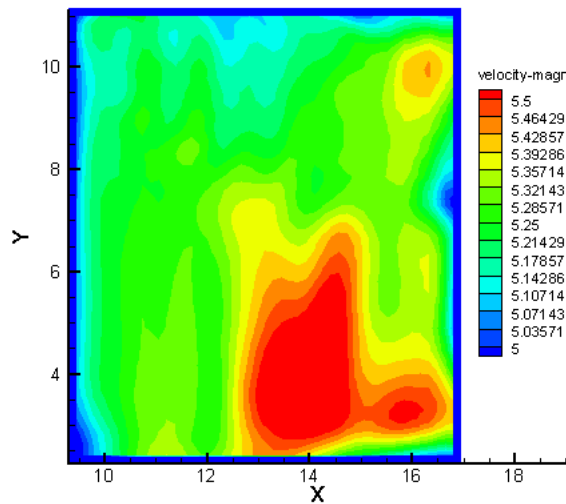
催化剂催着较为严重的磨损和塌陷。为了分析导致出现催化剂磨损和塌陷的原因，采用数值模拟方法，研究现有导流板布置情况下，反应器内速度场分布的规律，同时提出相应的导流板优化布置方案。



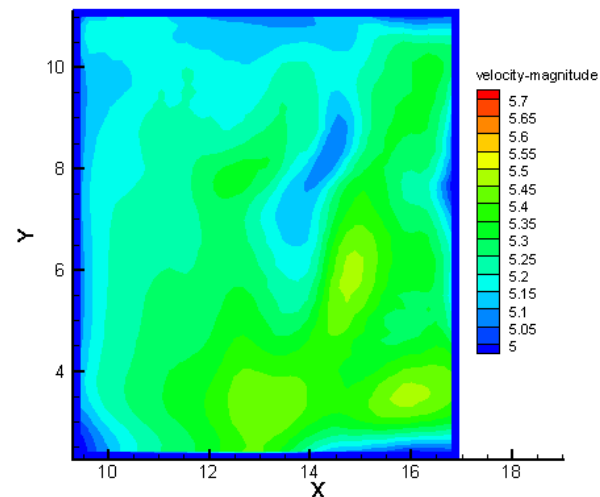
- 工况1：烟气成分按照设计，导流板布置根据设计图纸；
- 工况2：在原有基础上（工况1），反应器右上角最内部加上一块**弧形和直形导流板**（弧-直型导流板）
- 工况3：在原有基础上（工况1），反应器右上角导流板之间增加1块弧-直型导流板，共增加8块弧-直型导流板。右上角共7+8=15块弧-直型导流板
- 工况4：在原有基础上（工况1），反应器左上角增加直形导流板，右上角导流板不变（还是原来的7块）
- 工况5：在原有基础上（工况1），反应器左上角增加直形导流板，反应器右上角导流板之间增加1块弧-直型导流板，共增加8块弧-直型导流板。右上角共7+8=15块弧-直型导流板



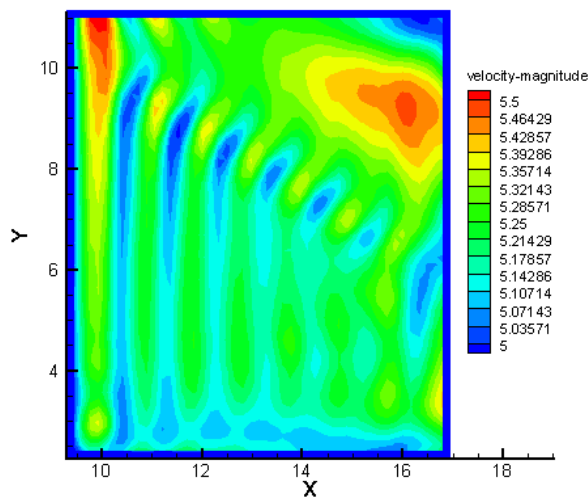
工况1



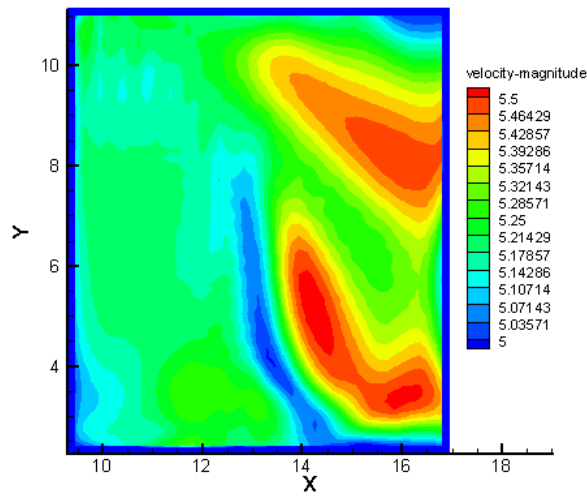
工况2



工况3



工况4



工况5

1、李德波等，SCR脱硝系统导流板优化数值模拟，广东电力，27（7），2014。

# 数值模拟结果分析

(1) 最佳的导流板布置方案为：反应器左上角增加直形导流板，反应器右上角导流板之间增加1块弧-直型导流板，共增加8块弧-直型导流板，得到速度不均匀系数为10%，已经完全满足工程要求；

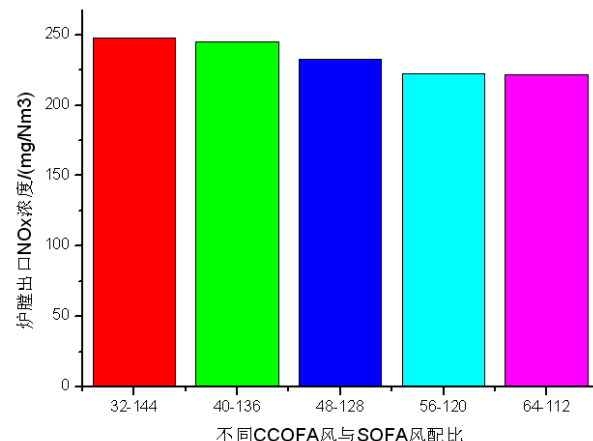
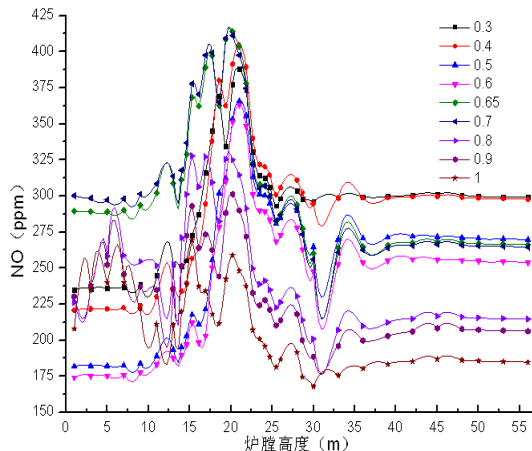
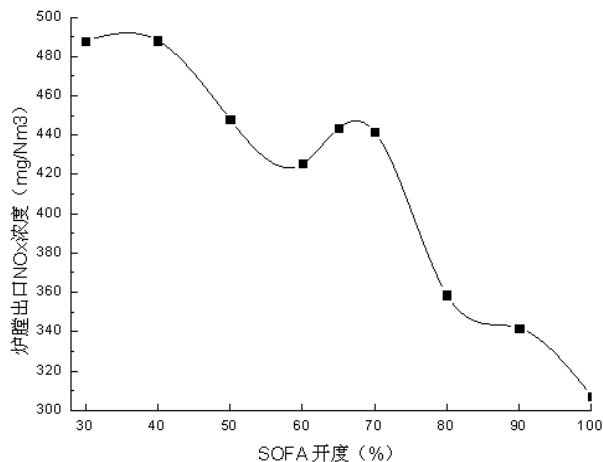
(2) 较好的导流板布置方案为：反应器右上角导流板之间增加1块弧-直型导流板，共增加8块弧-直型导流板，得到速度不均匀系数为13%，已经完全满足工程要求；

(3) 现有的导流板布置方案，第一层催化剂入口截面上速度分布标准偏差系数为22%，要大于工程上允许的速度标准偏差系数15%，因此可以得出，现有导流板布置情况下，第一次催化剂入口截面上速度显著不均匀；

# 应用3：基于数值模拟电站锅炉 精细燃烧调整



中国南方电网  
CHINA SOUTHERN POWER GRID






## 数值模拟结果表明：

(1) CCOFA风门开度对主燃烧区域下部风量影响大于对SOFA风量的影响，CCOFA风量加大，加强了主燃烧区域的分级燃烧效果，但是CCOFA风门开度变化对SOFA风量影响较小；

(2) 中、低负荷区域，空气燃料比增加是NO<sub>x</sub>浓度升高的重要原因，实际运行中，应控制不同负荷下周界风开度，尤其是低负荷时要保持较小的周界风开度；

(3) 上述数值模拟研究结果为现场调整提供了重要的方向。

# 锅炉精细燃烧调整试验研究

负荷	炉膛出口NO <sub>x</sub> 浓度 (调整前)	炉膛出口NO <sub>x</sub> 浓度 (调整后)	调整效果
MW	mg/Nm <sup>3</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
600	250	180	 70
450	315	250	 65
300	344/339	260/270	 80

燃烧伊泰煤、神华煤、菲律宾煤为主的煤种时，NO<sub>x</sub>排放较低;

350MW以上负荷，NO<sub>x</sub>可以达到250 mg/Nm<sup>3</sup>以内

**第一阶段燃烧调整取得了较好改造效果**





煤种	负荷	A侧SCR入口NO <sub>x</sub>	B侧SCR入口NO <sub>x</sub>
2*山西+4*烟煤	560	202	197
2*山西+2*烟煤	300	203	207
2*印尼煤+2*烟煤	310	153	129
2*印尼煤+2*山西煤	310	216	188

600MW时锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度降低至少50mg/Nm<sup>3</sup>以上，降低了20%；  
300MW时锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度降低200mg/Nm<sup>3</sup>以上，降低了50%；  
燃烧调整试验取得圆满结果，对降低SCR入口NO<sub>x</sub>排放起到了重要的作用。

## 数值模拟技术指导现场精细燃烧优化调整发挥重要作用

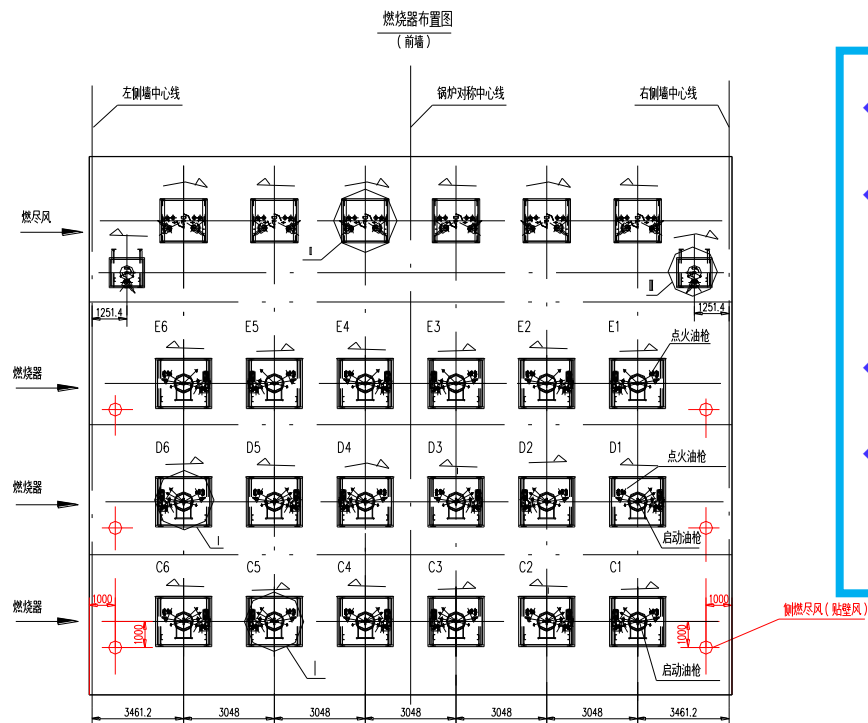
1、李德波等，燃煤机组SCR脱硝系统近零排放下热工控制关键技术与工程实践，动力工程学报，2016（录用）



# 应用4-超（超）临界锅炉高温腐蚀改造的数值模拟

改造拟定方案

改造后数值模拟验证



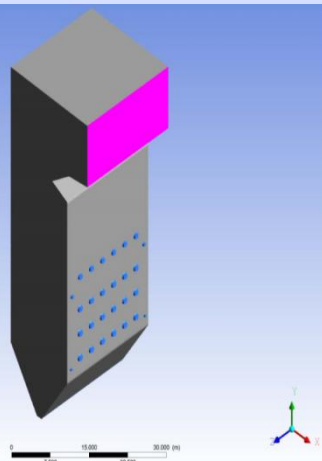
- ◆ 增加燃烧器35°的外二次风扩锥；
- ◆ 燃烧器内二次风扩锥（导流筒）角度由45°改为35°，长度缩短为原来的2/3；
- ◆ 增大燃烧器内二次风量；
- ◆ 在燃烧器层靠两侧墙位置，增设3层侧燃尽风（贴壁风）

1、李德波等，对冲旋流燃烧煤粉锅炉高温腐蚀现场试验与改造的数值模拟研究，广东电力，2015，28（11）

# 应用4-超（超）临界锅炉高温腐蚀改造的数值模拟

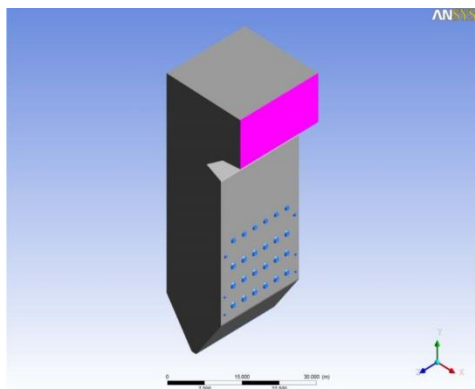
改造拟定方案

改造后数值模拟验证

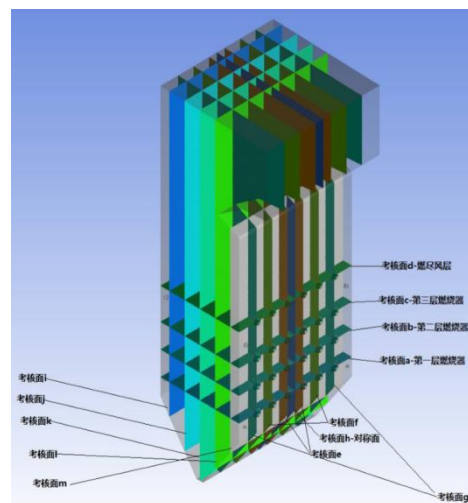


	一次风率/%	内二次风率/%	贴壁风率/%
工况一	25.9	7.35	0
工况二	25.9	7.35	2.9
工况三	25.9	8.82	5.8
工况四	25.9	7.35	4.2

单层贴壁风锅炉全炉膛模型



双层贴壁风锅炉全炉膛模型

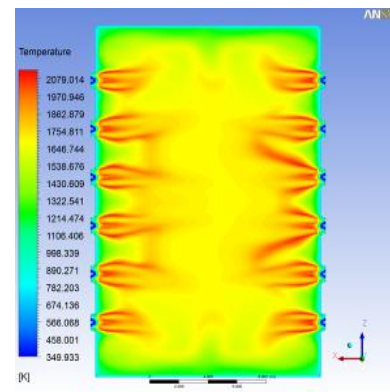
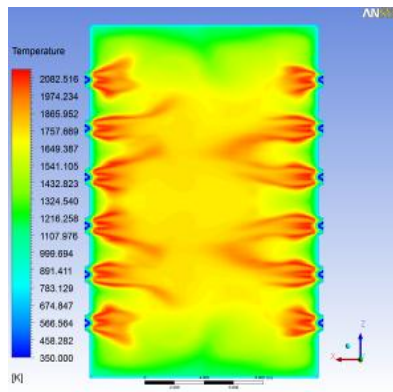
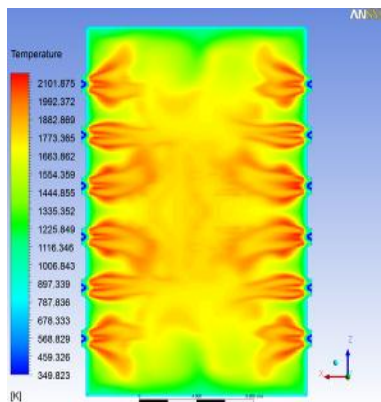
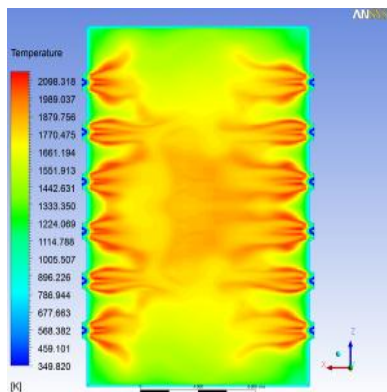


各考核面示意图

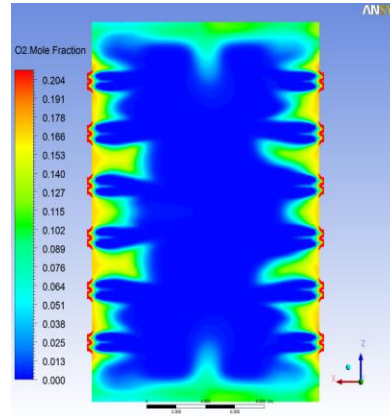
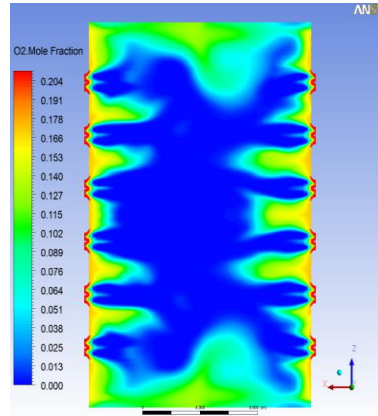
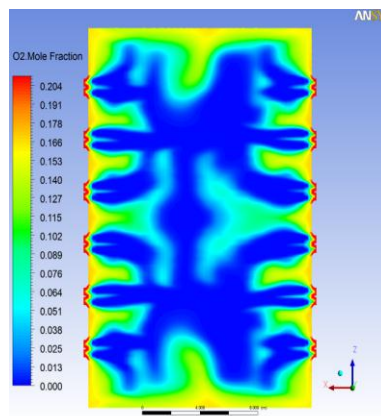
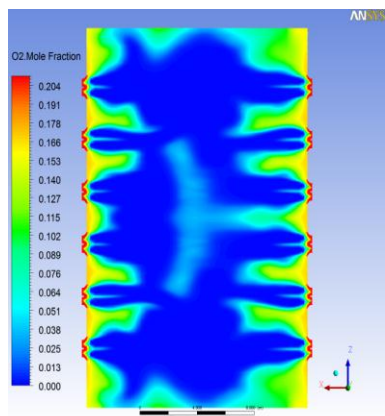
# 应用4-超（超）临界锅炉高温 腐蚀改造的数值模拟

改造拟定方案

改造后数值模拟验证



不同工况下温度场分布

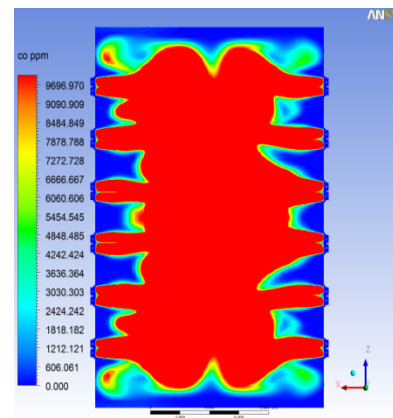
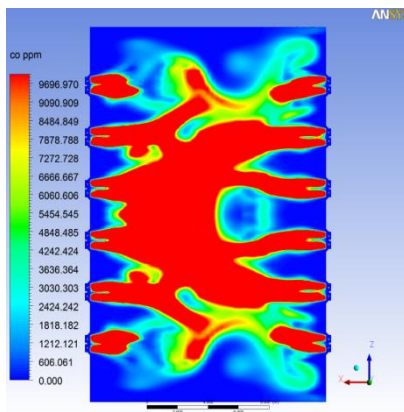
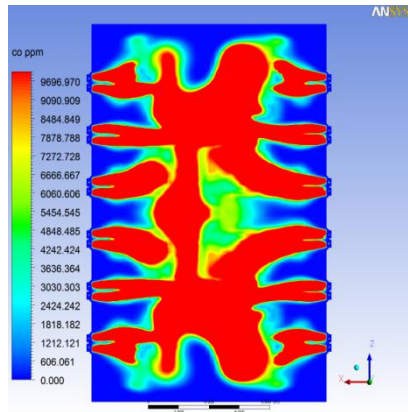
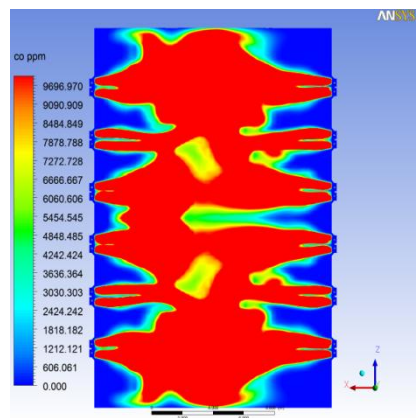


不同工况下O<sub>2</sub>分布

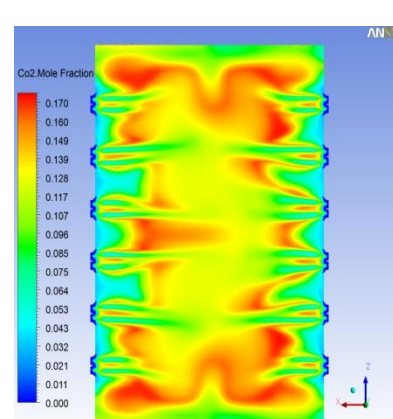
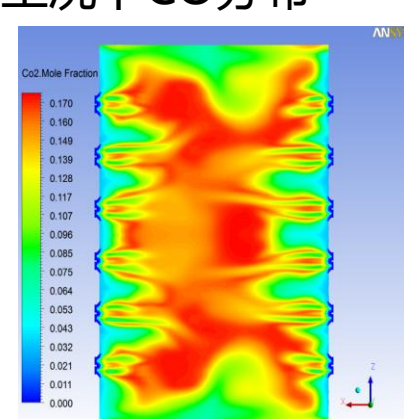
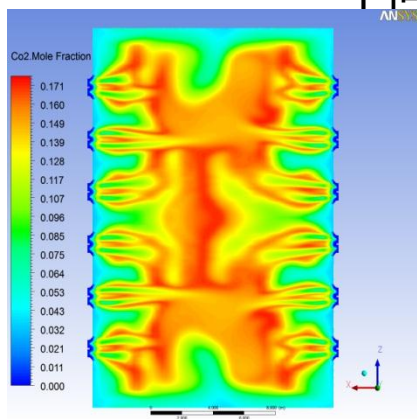
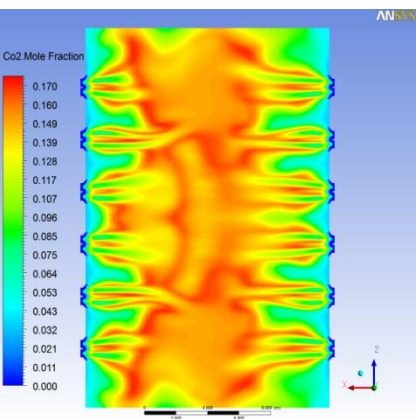
# 应用4-超（超）临界锅炉高温腐蚀改造的数值模拟

改造拟定方案

改造后数值模拟验证



不同工况下CO分布



不同工况下CO<sub>2</sub>分布



一

- 电站锅炉低污染燃烧存在问题

二

- ANSYS FLUENT模型发展

三

- 工程数值模拟应用效果分析

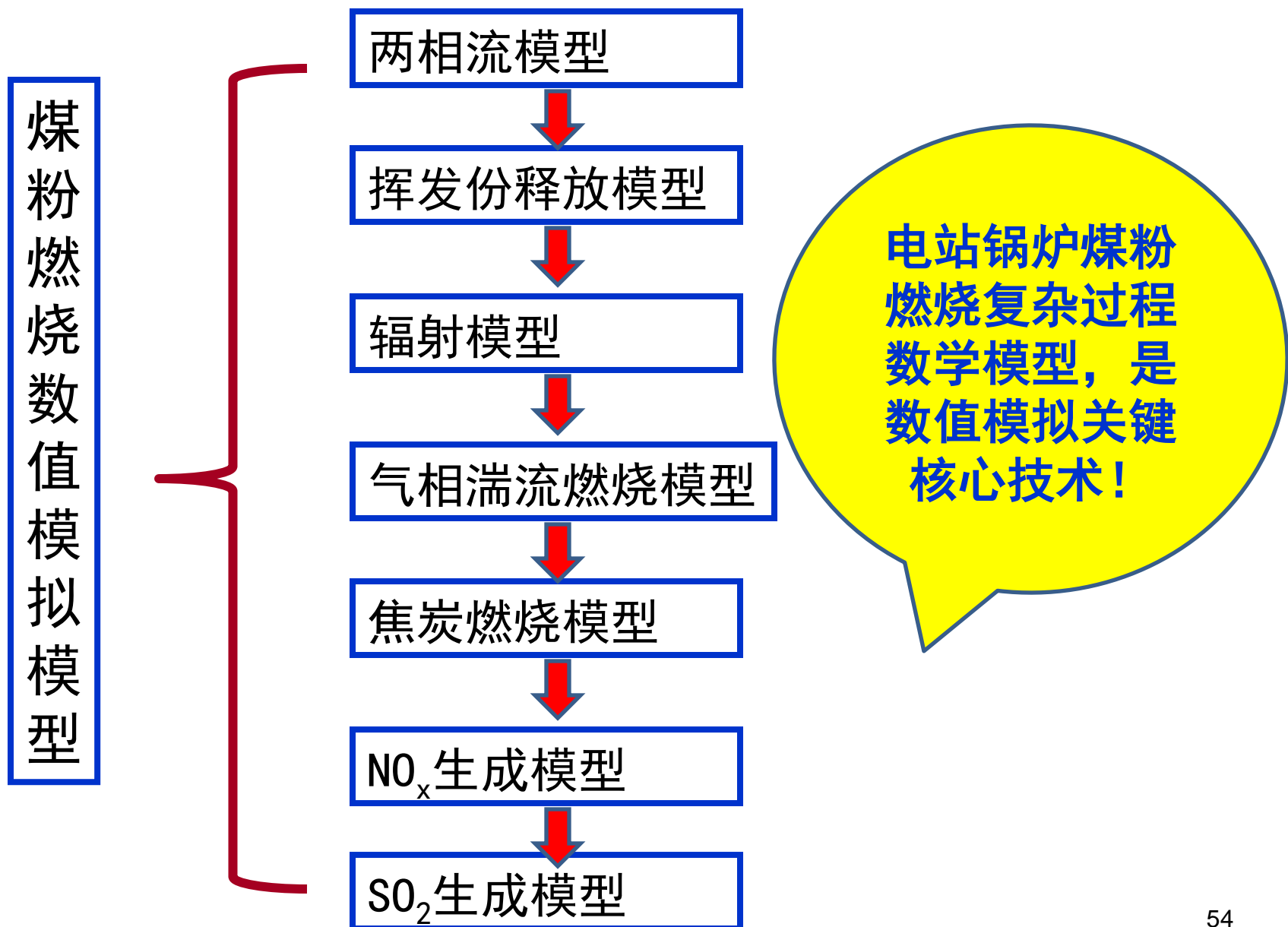
四

- 工程数值模拟技术存在难点

五

- 总结与展望

# 问题1：数值计算理论-煤粉燃烧模型



# 问题1：数值计算理论-煤粉燃烧模型

问题1：ANSYS FLUENT 17.0最新版本，在煤粉燃烧模型方面，还是10年前的陈旧的数学模型，没有吸收国际上最新的煤粉燃烧理论研究成果，无法适应新型燃烧器设计、燃烧优化的需要，迫切需要加入最新的煤粉燃烧模型；

希望ANSYS FLUENT最新版本能够吸收国际上最新煤粉燃烧数值模拟成果，提高工程数值模拟精度！

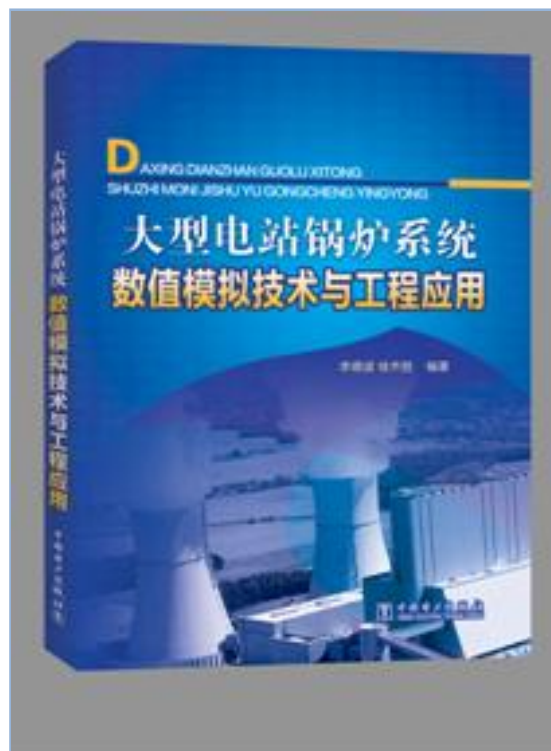
## 问题2：工程计算效率

问题2：现有1000MW煤粉锅炉燃烧数值模拟，网格规模在300万左右，计算一个工况需要1个星期时间（64G 内存，8核），与现场需要1天有极大的差距，迫切需要提高煤粉燃烧并行计算效率，这是真正实现数值模拟工程应用关键。

提高工程问题数值模拟计算效率是当前面临关键问题！



# 电站锅炉数值模拟专著



国内首部系统总结电站锅炉系统数值模拟技术与工程应用的专著，2015年出版，详细介绍了电站锅炉数值模拟应用情况及存在的问题。

- 1、李德波等，大型电站锅炉数值模拟技术工程应用进展与展望，广东电力，2013，26（11）
- 2、李德波等，循环流化床全热态数值模拟方法的研究进展，广东电力，2015，28（4）

一

• 电站锅炉低污染燃烧存在问题

二

• ANSYS FLUENT模型发展

三

• 工程数值模拟应用效果分析

四

• 工程数值模拟技术存在难点

五

• 总结与展望

# 总结与展望

- ◆数值模拟技术在电站锅炉炉内精细燃烧调整优化、超低排放下多种污染物脱除装置优化、脱硝系统导流板优化、超（超）临界锅炉高温腐蚀改造方案数值模拟等方面发挥越来越重要的作用；
- ◆煤粉燃烧模型方面，要吸收国际上最新的数学模型，加入到最新的ANSYS FLUENT商业软件中，提高电站锅炉领域数值模拟精度水平；
- ◆提高工程数值模拟精度和计算效率，实现数值模拟技术与现场优化运行更好衔接；

ANSYS®



2016 | ANSYS中国技术大会  
中国·上海

感谢聆听