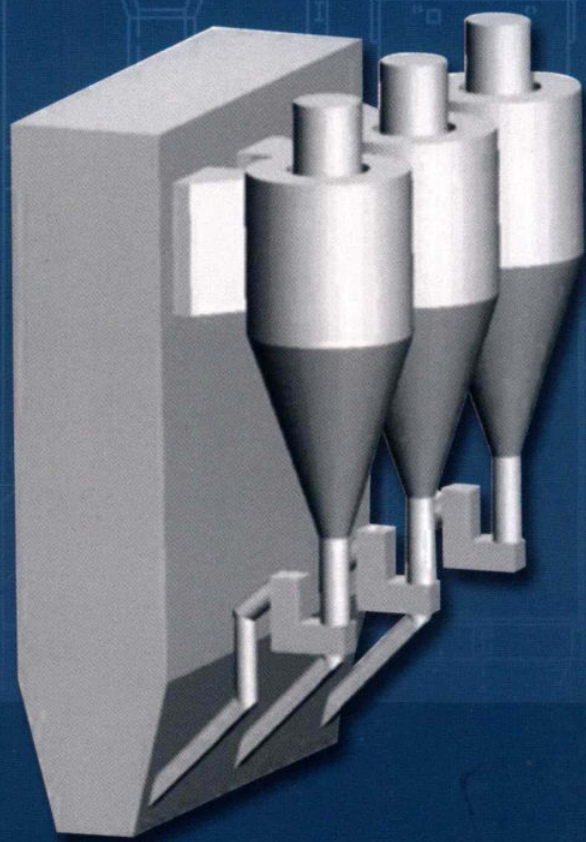



NUMERICAL SIMULATION AND COMBUSTION OPTIMIZATION OF
LARGE-SCALE CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER

大型循环流化床锅炉 数值模拟与燃烧优化

孙超凡 彭泽宏 李德波 邓剑华 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



NUMERICAL SIMULATION AND COMBUSTION OPTIMIZATION OF
LARGE-SCALE CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILER

大型循环流化床锅炉 数值模拟与燃烧优化

广东电网有限责任公司电力科学研究院 编著
孙超凡 彭泽宏 李德波 邓剑华



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

循环流化床锅炉是一种新型洁净煤燃烧技术设备,具有煤种适应广、燃烧温度相对较低、污染排放小、燃烧效率高等特点,在世界各国得到了广泛应用。

作者对多年来承担的循环流化床锅炉相关科研、调试、试验及数值模拟等工作进行归纳总结,写成本书。全书共分九章,重点介绍了国内外循环流化床技术发展现状和趋势、循环流化床数值模拟方法、循环流化床冷模试验、300MW 循环流化床锅炉热态并行数值模拟、600MW 循环流化床锅炉热态并行数值模拟、大型循环流化床锅炉现场测试技术、大型循环流化床锅炉燃烧优化调整试验方法、不同煤种优化调整试验研究、循环流化床锅炉节能新技术等内容。

本书在介绍循环流化床数值模拟理论与方法的基础上,大量介绍了现场试验测试技术及燃烧优化调整方法,内容丰富,实用性强,对从事大型循环流化床锅炉研究、冷态实验、数值模拟、现场试验、机组调试、运行、设计等工作的技术人员具有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型循环流化床锅炉数值模拟与燃烧优化/孙超凡等编著. —北京: 中国电力出版社, 2018.9

ISBN 978 - 7 - 5198 - 1846 - 3

I. ①大… II. ①孙… III. ①循环流化床锅炉—锅炉燃烧—燃烧技术 IV. ①TK229.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 045549 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 赵鸣志 (010-63412385)

责任校对: 黄 蓓 王开云

装帧设计: 王红柳

责任印制: 石 雷

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

版 次: 2018 年 9 月第一版

印 次: 2018 年 9 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本


印 张: 11

字 数: 271 千字

定 价: 68.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换



前言

循环流化床锅炉是一种洁净煤燃烧设备，具有煤种适应广、燃烧温度相对较低、污染排放少、燃烧效率高等特点，在世界各地得到了大力发展和广泛应用。近些年来，随着中国超临界 300MW 和 600MW 等级循环流化床锅炉机组的成功研制及商业应用，循环流化床锅炉机组在国内电力行业得到了迅速的发展和推广应用，中国循环流化床锅炉技术已迈入世界先进水平行列。

随着大型循环流化床锅炉机组得到越来越多的应用，迫切需要对其开展更加深入的研究，以解决在实际运行过程中暴露出来的一些新情况、新问题。随着数值模拟技术的不断发展，本书作者借助国家超级计算广州中心的资源，首次利用更加专业、更加适合循环流化床锅炉数值模拟计算的软件 Barracuda 和 GPU 加速技术，对大型循环流化床锅炉机组进行全尺寸、热态、大规模并行数值模拟计算。并将计算结果与现场试验结合起来，寻求更加优化的运行模式，对运行存在的问题找到更加合理的解决办法并进而指导运行操作和设计优化。

全书共分九章，分别介绍了国内外循环流化床技术发展现状和趋势；循环流化床数值模拟方法，侧重介绍 Barracuda 软件；循环流化床冷模实验台的搭建及冷模试验方法，重点介绍了粒子图像测速技术 (PIV)，以及一次风量、筛分、一二次风配比等因素对运行特性的影响；300MW 循环流化床锅炉热态并行数值模拟，详细介绍了一、二次风量对锅炉运行特性的影响；600MW 循环流化床锅炉建模；大型循环流化床锅炉现场测试技术和燃烧优化调整试验方法；着重介绍了燃烧不同煤种时的优化调整试验研究方法；最后介绍了几种循环流化床锅炉节能新技术。

本书既有循环流化床数值模拟理论、实验室试验知识介绍，更有大量现场试验测试技术实践，内容丰富详实、通俗易懂、实用性强，对从事大型循环流化床锅炉研究、冷态试验、数值模拟、现场试验、机组调试、运行、设计等工作的技术人员和高校相关专业师生均具有一定的参考价值，对正在从事大型循环流化床锅炉数值模拟和试验研究的人员更具借鉴意义。

在本书的编写过程中，参考、引用、借鉴了国内外同行、制造厂、发电厂的一些设备资料和研究成果，在此一并致谢。在进行依托项目研究、建模、试验、测试过程中，得到了广东电网有限责任公司电力科学研究院锅炉所同事们的大力支持和帮助，在此也深表谢意。

本书能得以出版，尤其要感谢中国南方电网有限责任公司和广东省粤电集团有限公司给予的科研资金支助，更要感谢相关发电厂提供的现场试验机会及成果转化应用的平台。

本书由教授级高级工程师孙超凡主编，华南理工大学进站研究生彭泽宏协助参与了冷模试验及 300MW 循环流化床锅炉热态数值模拟章节的编写；李德波高级工程师主要协助参与了 Barracuda 软件介绍、300MW 循环流化床锅炉热态数值模拟、600MW 循环流化床锅炉建模等章节的编写；邓剑华高级工程师协助参与了循环流化床锅炉测试技术章节的编写。全书最后由孙超凡进行统稿和修订。由于作者水平所限，加之相关技术发展迅速，疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

孙超凡

2018 年 6 月于广州

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 国内外循环流化床技术发展现状.....	1
第二节 国内外循环流化床数值模拟技术发展.....	4
第三节 循环流化床锅炉试验研究现状	11
第四节 主要研究内容与方法	18
第二章 循环流化床数值模拟方法介绍	20
第一节 ANSYS FLUENT 软件介绍	20
第二节 Barracuda 软件介绍.....	24
第三节 Barracuda 软件与 ANSYS FLUENT 软件比较	30
第三章 循环流化床冷模试验	32
第一节 冷模试验研究现状	32
第二节 冷模试验方法	33
第三节 试验器材与方法	34
第四节 试验过程	39
第五节 数据与分析	47
第四章 300MW 循环流化床锅炉热态并行数值模拟	58
第一节 并行技术	58
第二节 基于 CPF _D 的循环流化床数值模拟方法介绍	58
第三节 300MW 循环流化床锅炉热态并行数值模拟	74
第四节 一、二次风量对 300MW 循环流化床锅炉运行特性的影响	79
第五章 600MW 循环流化床锅炉热态并行数值模拟	85
第一节 600MW 循环流化床锅炉概述	85
第二节 锅炉主要部件简介	91
第三节 600MW 循环流化床锅炉建模	92
第四节 600MW 循环流化床锅炉热态并行数值模拟概述	94
第六章 大型循环流化床锅炉现场测试技术	96
第一节 现场测试内容概述	96
第二节 主要测量项目、方法和仪器	99
第七章 大型循环流化床锅炉燃烧优化调整试验方法	111
第一节 试验研究背景与意义.....	111

第二节	试验目的	112
第三节	设备概况	112
第四节	试验依据	115
第五节	试验内容	116
第六节	试验工况	116
第七节	测试内容及方法	118
第八节	试验条件及要求	119
第九节	试验所需主要仪器	120
第八章	不同煤种优化调整试验研究	121
第一节	燃烧菲律宾煤调整试验研究	121
第二节	混煤掺烧调整试验	128
第三节	燃烧印尼褐煤调整试验	144
第九章	流化床锅炉节能新技术	149
第一节	流化床锅炉油枪运行优化技术	149
第二节	基于流态重构的 CFB 锅炉节能技术	158
第三节	高压变频器节能技术	159
第四节	综合节能改造技术	159
参考文献		162

第一章

概 述

第一节 国内外循环流化床技术发展现状

一、国外超临界循环流化床锅炉研究现状

经近多年的竞争，国外几大主要循环流化床（circulating fluidized bed，下文简称 CFB）锅炉生产厂商进行重组和兼并，目前逐渐形成了美国 Foster Wheeler（以下简称 FW 公司）公司和法国 Alstom 公司两大 CFB 锅炉技术集团。FW 公司的技术特点是采用了紧凑型布置、Intrex 换热器和汽冷旋风分离器，锅炉结构及系统简洁；Alstom 公司的技术特点则是采用了分体式炉膛和外置换热器，采用钢板加耐磨保温厚壁构成的分离器，易于床温控制。

目前国外在运的唯一一台超临界 CFB 锅炉是 FW 公司为波兰 Lagisza 电厂生产的 460MW 本生直管炉膛超临界 CFB 直流锅炉（27.5MPa/560℃/580℃），这是目前国外单台容量最大的 CFB 锅炉，如图 1-1 所示。该炉基于波兰 Turow 电厂 235MW 锅炉上进行的热流测量和炉膛流动的三维模型进行设计，于 2009 年 6 月投产。该锅炉为单炉膛形式，布置有 8 个方形分离器，采用西门子公司本生直管直流（OUT）技术，在炉膛热负荷较高区域采用内螺纹管。锅炉最大连续主蒸汽流量为 359.8kg/s，最小连续主蒸汽流量为 143.9kg/s；汽轮机入口处蒸汽压力为 27.5MPa，温度为 560℃；再热蒸汽流量为 306.9kg/s，锅炉进口再热蒸汽压力为 5.46MPa，温度为 314.3℃；汽轮机入口再热蒸汽温度为 580℃。

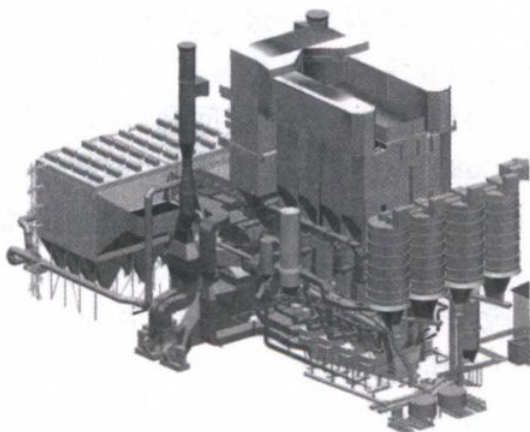


图 1-1 Lagisza 电厂 460MW 超临界 CFB 锅炉

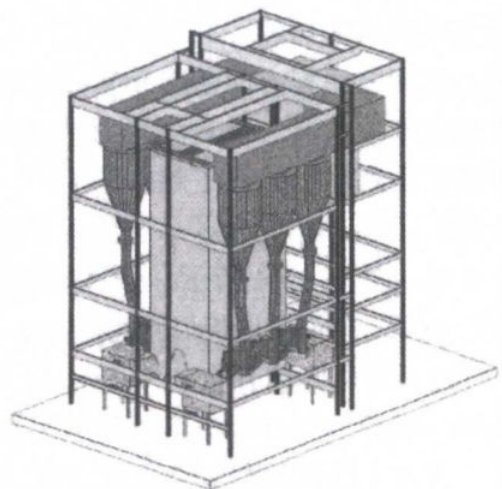


图 1-2 Alstom 600MW CFB 锅炉结构示意图

FW 公司还致力于开发 600MW 以上的超临界 CFB 锅炉。在美国能源部的资助下，FW

公司进行了设计参数分别为 400MW、31.1MPa/593℃/593℃，600MW、31.1MPa/593℃/593℃，600MW、37.5MPa/700℃/700℃ 三项超超临界 CFB 锅炉的研发计划。此外，在 2004 年，FW 公司还在西班牙 Endesa Generación 电力公司的委托下进行了 800MW 超超临界直流锅炉的概念设计。

Alstom 公司已完成了 600MW 超临界 CFB 锅炉的概念设计（如图 1-2 所示）。在整合了 Stein 和 ABB-CE 两大公司的技术之后，Alstom 公司沿用了 Lurgi 型 CFB 锅炉特有的外置式换热器（EHE）设计特点，该设计用以解决大型化中的受热面布置问题；另外 Alstom 公司的 CFB 炉膛下部采用“裤衩型”结构，以解决大型 CFB 锅炉二次风穿透性差的问题，并保证良好的流化状态。Alstom 公司的 600MW 设计方案同样采用这种“裤衩腿”型结构结合外置换热器（EHE）的设计，该锅炉布置有垂直管型水冷壁，6 个汽冷旋风分离器，对每组 3 个旋风分离器配置 1 个蒸汽冷却旋风分离器出口导管。过热器和再热器受热面布置于炉膛中后部通道的 EHE 中，利用 EHE 调节炉温以达到适应各种燃料、最佳脱硫效率和不喷水调节再热汽温的能力。该锅炉蒸发量为 1738.8t/h，过热汽压为 27.6MPa，过热汽温为 600℃，烟气 SO₂ 排放浓度为 200mg/m³，NO_x 排放浓度为 150mg/m³。

二、国内超临界循环流化床锅炉研究现状

作为世界上 CFB 锅炉装机容量最大的国家，我国的 CFB 锅炉技术已从高压、超高压发展到亚临界，并积极开展 350MW 和 600MW 超临界 CFB 锅炉的研发。“十五”期间，哈尔滨锅炉厂和清华大学在共同承担的国家“十五”科技攻关项目中就已开始进行 600MW 超临界 CFB 锅炉的自主研发工作，对水冷壁水动力特性、管壁温度等重大技术难点进行了详细研究计算。“十一五”规划纲要中则明确提出要建设单机 600MW 级 CFB 电厂，科技部则将超临界 CFB 列入“十一五”国家科技支撑计划。三大锅炉厂和多家高校及科研单位均提出了超临界 350MW 和 600MW CFB 锅炉方案。

吕俊复等提出了清华大学的 600MW CFB 锅炉方案，如图 1-3 所示。锅炉水冷壁采用无中间混合联箱的垂直内螺纹管，炉膛上部稀相区为 18.22m×18.22m 正方形截面，净高 58m。炉膛底部也采用“裤衩腿”分叉结构。但炉膛设有 4 个旋风分离器，每个分离器下部连接 1 个外置式换热器，2 个布置二级过热器以控制床温，2 个布置中间级再热器以控制再热汽温。沿烟气流程方向依次布置有三级过热器、末级再热器、一级过热器、初级再热器、省煤器和空气预热器。过热汽温由两级喷水减温进行调节。

浙江大学刘静等研究了超临界 CFB 锅炉设计时会面临的一些关键问题，如受热面布置和变负荷运行等，并提出了一套设计参数为 28MPa/580℃/580℃ 的 600MW 超临界 CFB 锅炉设计方案，如图 1-4 所示。炉膛下部采用“裤衩管”结构形式以保证良好的流化状态和二次风穿透性，单个布风板尺寸为 21m×7m。炉膛净高 62m，上部稀相区截面尺寸为 21m×18m。炉膛上部两侧墙开有 6 个 5.9m×2.3m 的炉膛出口烟窗，对应 6 只汽冷旋风分离器，每只旋风分离器下方连接 1 台外置式换热器（EHE），其中 2 台布置再热器，另外 4 台布置过热器。分离下来的固体颗粒大部分经 EHE 冷却后再送回炉膛，另外一小部分则通过返料装置直接返回炉膛。炉膛设上下两排二次风，上排二次风口中心距布风板的高度为 2m，下排为 1m。锅炉布置有三级过热器和两级再热器，高温过热器和低温再热器布置在尾部烟道内，低温、中温过热器以及高温再热器布置在 EHE 内。

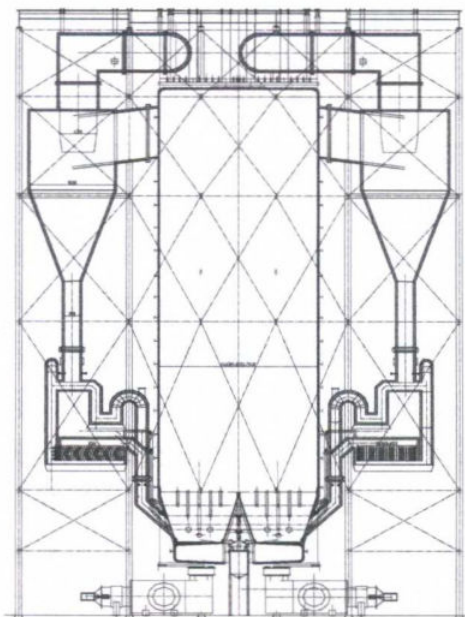


图 1-3 清华大学 800MW 超临界 CFB 锅炉结构布置总图

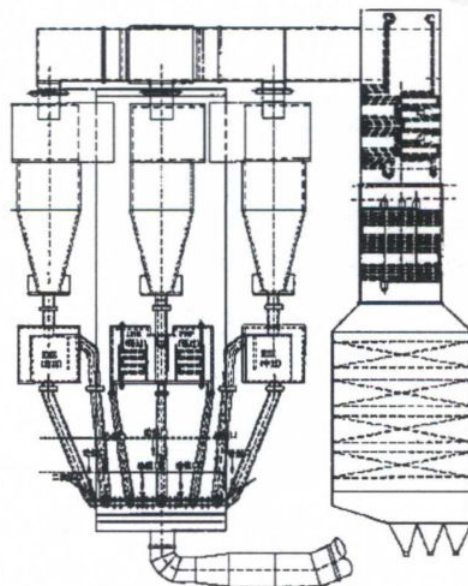


图 1-4 浙江大学 600MW 超临界直流 CFB 锅炉方案简图

中科院工程热物理研究所与上海锅炉厂共同研制了 600MW 等级的大容量超临界 CFB 锅炉，过热蒸汽参数为 25.4MPa/571℃。该锅炉采用单炉膛单布风板结构，水冷壁管采用了中质量流速部分内螺纹管技术，分离器为 6 只蜗壳式高温绝热旋风分离器，采用两侧对称布置，其下分别对应连接 6 台外置换热器。该锅炉的开发充分借鉴了我国 300MW 亚临界 CFB 锅炉及超临界和超超临界煤粉炉的运行经验，具有自主知识产权。

清华大学吴玉新等根据国外超临界技术发展经验，提出主蒸汽压力为 25MPa、温度为 600℃、一次再热的 800MW CFB 锅炉方案。该方案也采用单炉膛下部“双裤衩腿”结构。炉膛布置 14 个给煤点，在炉膛两侧布置 6 只绝热旋风分离器，每个分离器下面设置 1 个换热床，其中 2 个布置高温再热器、2 个布置二级过热器、2 个布置三级过热器。料腿下布置 1 个机械冷却式分配阀，调整直接回送炉膛和进入换热床的循环灰比例。尾部竖井的上部采用双烟道，分别布置低温段再热器和一级过热器。再热蒸汽汽温通过调节低温段再热器烟气量与换热床一起控制，过热蒸汽温度由在过热器之间布置的两级喷水减温器调节。尾部竖井下部合并上部双烟道成单烟道，布置有省煤器和空气预热器。锅炉采用平衡通风方式，压力平衡点位于炉膛出口。

西安热工研究院在总结开发 210MW 及 330MW CFB 锅炉经验的基础上，也完成了 600MW 超临界 CFB 锅炉方案设计。该锅炉采用“裤衩腿”型炉膛下部结构，炉膛截面积为 385m²，炉膛高度为 56m，炉膛水冷壁采用一次上升垂直管圈结构，布置 6 个直径 8.5m 的分离器，并配有 6 台自主开发的紧凑式分流回灰换热器。

东方锅炉（集团）股份有限公司（以下简称东锅）从 2006 年启动国产 600MW 超临界 CFB 燃煤示范工程锅炉的设计研制工作。该项目采用东锅自主开发设计的全新技术，兼备了 CFB 燃烧技术和超临界蒸汽循环的优点，其可靠性得到了国家发改委专家、电厂业主的高度认可。2008 年 8 月，国家发改委能源〔2008〕1776 号文批复：“该项目机组锅炉由东方锅炉牵头自主开发、自主设计、自主制造”。作为新一代高效洁净燃烧技术代表，该项目采

用带外置式换热器的 600MW 等级 CFB 锅炉，其电厂效率比目前国内外普遍采用的亚临界 300MW CFB 电厂高 2%~4%，平均可达 40%~42%，脱硫、脱硝等综合效益更佳。东锅自主研发的 600MW 超临界 CFB 锅炉为直流、单炉膛、H 型布置、平衡通风及一次中间再热，采用外置式换热器调节床温及再热蒸汽温度，并利用高温汽冷旋风分离器进行气固分离。锅炉整体呈左右对称布置，支吊在锅炉钢架上。水冷壁采用全焊接的垂直上升膜式管屏，上炉膛采用光管，下炉膛采用优化的内螺纹管。炉膛底部采用“裤衩型”结构，布置有 6 个旋风分离器及对应的回料器，给煤口及石灰石给料口均布置在回料腿上。旋风分离器分离出来的物料一部分经回料器直接返回炉膛，另一部分则经过布置在炉膛两侧的外置式换热器后再返回炉膛。2009 年 2 月 23 日，由东锅自主开发设计的四川白马电厂 600MW 超临界 CFB 示范锅炉合同签字仪式在北京举行，于 2013 年 4 月 14 日一次性通过 168h 满负荷运行。上海锅炉厂生产的首台超临界 350MW CFB 也已于 2012 年底交货，2013 年投入运行发电。这标志着我国在自主研制低煤耗、低成本污染控制的洁净煤燃烧技术方面走在了世界的前列，对国家重大装备制造企业全面掌握 600MW CFB 原始设计技术，提高自主创新和自主开发能力具有重大意义。

第二节 国内外循环流化床数值模拟技术发展

一、基于 ANSYS FLUENT 软件数值模拟研究现状

目前，国内外研究者利用 ANSYS FLUENT 商业软件，进行了 CFB 锅炉数值模拟研究，研究了气固流动、传热、燃烧及污染物生成过程，为深入理解 CFB 流动机理奠定了理论基础，同时利用数值模拟结果指导现场燃烧优化及污染物控制。

刘汉周等对 300MW 级 CFB 锅炉分离器入口烟道气固流动特性进行了试验及数值模拟研究。他们应用高速摄影机，拍摄了示踪粒子在两种结构入口烟道中的运动轨迹，并进行了示踪粒子运动轨迹的数值模拟。研究表明：长烟道内颗粒速度的增幅性能比短烟道内颗粒的增幅性能好，但是前者压降要比后者大。

王超等利用 ANSYS FLUENT 软件对某 600MW 超临界裤衩腿六分离器 CFB 锅炉炉膛的气固流动规律进行了研究。数值模拟中采用双流体模型，分离炉膛颗粒浓度轴向分布，颗粒浓度与轴向速度的径向分布，以及六分离器气固流率的不均匀性（见图 1-5）。研究表明：颗粒浓度的轴向分布呈稀密两相区分布，裤衩腿区内墙有较浓颗粒回流，稀相区颗粒呈双环核分布，中隔墙及前后墙回流明显，中隔墙边壁及间隙区颗粒浓度高于侧墙边壁浓度，悬吊屏屏间区域颗粒浓度比悬吊屏外侧区域颗粒浓度低，六分离器中中间位置固相颗粒质量流率高于两边位置。

周星龙等结合颗粒动力学的双流体模型，采用 ANSYS FLUENT 软件计算了 600MW 级 CFB 锅炉炉膛内气固三维流场，将水冷壁、中隔墙表面气固三维流场结果与 CFB 颗粒团更新传热模型相结合，从而得到水冷壁、中隔墙传热系数三维分布和热流密度（见图 1-6）。研究表明，炉膛的气固流动呈双环核结构分布，在水冷壁及中隔墙表面均存在贴壁下降颗粒团，炉膛受热面传热系数受其表面的气固流场参数影响大，尤其是颗粒浓度。水冷壁、中隔墙传热系数轴向分布相似，沿着床高增加，对流传热系数减少，辐射传热系数增大，总

传热系数和热流密度逐渐减小。炉膛四角及水冷壁和中隔墙的夹角处存在相对较高的传热系数和热流密度。

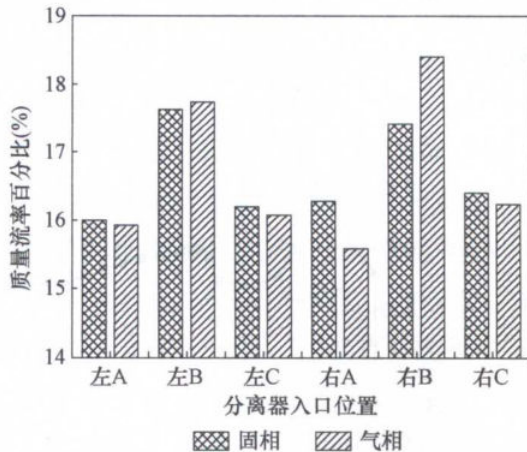


图 1-5 6 个分离器入口气固质量流率分布的不均匀性

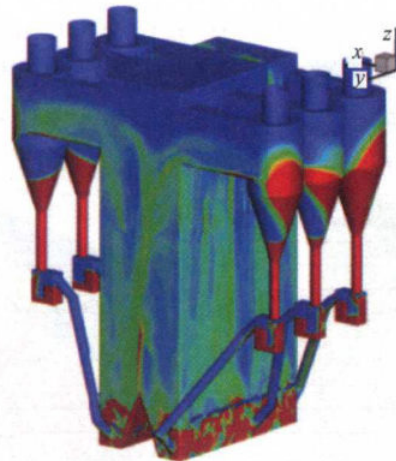


图 1-6 600MW 主回路数值模拟得到气固流场

周星龙等在六回路 CFB 冷态试验台上, 采用压差法和积料法分别测量床内的颗粒浓度分布和物料循环流率。研究表明: 六回路 CFB 颗粒浓度分布与单回路 CFB 相似, 沿着炉膛高度呈下浓上稀的分布, 炉膛出口区域的颗粒浓度和速度决定了物料循环流率 (见图 1-7)。当空截面风速增加时, 炉膛出口区域的颗粒浓度和速度均增大, 六回路的循环流率大幅度增加。当二次风率小于 30% 时, 对颗粒浓度和循环流率影响不大。颗粒浓度和循环流率随静止床高增加而增加。颗粒粒径增大时, 密相区颗粒浓度增加, 稀相区颗粒浓度减少, 循环流率减少。

许霖杰等针对 1000MW 超临界 CFB 锅炉环形炉膛气固流动特性进行了数值模拟研究。研究者基于欧拉双流体模型和 Gidaspow 曳力模型, 计算结果表明: 固相密度沿着炉膛轴向呈近 S 型分布。密相区转角处存在颗粒堆积, 稀相区固相截面浓度分布较为均匀。在接近炉顶时固相则更多地集中在炉膛出口附近, 悬吊屏区固相浓度要高于炉膛内部。同侧三分离器入口固相质量流率存在差异, 中间位置固相颗粒质量流率低于两边, 瞬时最大相对偏差可以达到 7%~9.5%。

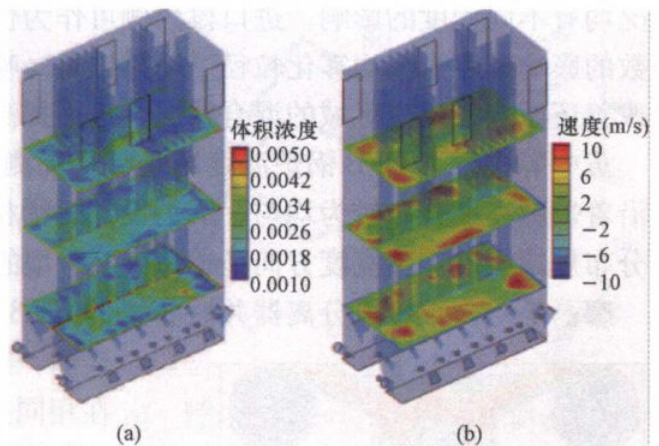


图 1-7 炉膛不同高度横截面的颗粒浓度和颗粒速度 (a) 颗粒体积浓度; (b) 颗粒轴向速度

程乐鸣等对 600MW 超临界 CFB 锅炉

关键问题进行了综述性研究。这些问题主要包括双布风板大炉膛密相区颗粒混合问题, 床料平衡与控制问题, 高炉膛中气固浓度分布、二次风穿透问题, 悬吊受热面表面颗粒流动问题, 六分离器循环回路物料平衡问题, 炉膛水冷壁、中隔墙和悬吊受热面的热流分布规律 (见图 1-8), 超临界水动力特性, 回料系统受阻对炉膛运行的影响和水冷壁的防磨等。

曹昊等进行了 CFB 二次风射流相关影响因素的数值模拟研究。研究者主要进行了二次风动力、床内颗粒浓度、温度、颗粒物性等因素对二次风穿透性和气固两相混合的影响。研究表明: 穿透深度与射流动量成正比, 与颗粒浓度、颗粒密度和直径成反比。在二次风

量一定情况下，为保证二次风对炉内燃烧的混合效果，可以降低下二次风的比例来保证上二次风，在一次风完全可以满足流化要求的情况下，可以取消下二次风。

宋景慧等对 50MW 生物质 CFB 炉膛燃烧过程进行了二维数组模拟。研究结果表明炉膛下部处生物质燃料燃烧最为剧烈的位置发生在炉膛下部 4m 截面位置处，炉膛内截面温度沿着高度方向总体呈现下降的趋势（见图 1-9）。

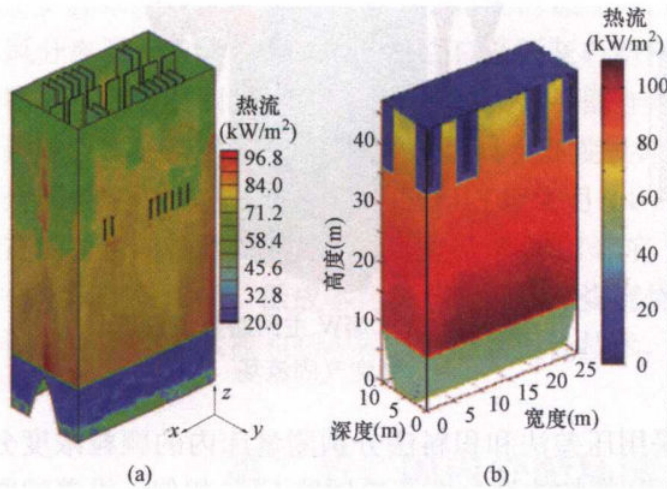


图 1-8 水冷壁热流密度分布
(a) 浙江大学；(b) FW 公司

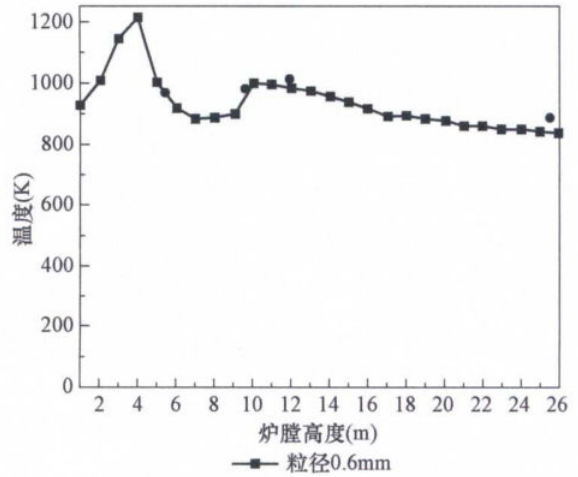


图 1-9 验证炉膛高度方向的温度分布

李竞岌等对 CFB 锅炉烟气脱硝系统 (SNCR) 优化过程进行了数值模拟研究。数值模拟结果表明：喷入点位置、个数及喷射参数等因素对还原剂在分离器及附属尾部烟道内的分布状况均有不同程度的影响。进口段内侧可作为优化喷入点位置，喷入点数量不宜过少，喷射参数的影响排序为平均雾化粒径 > 喷雾锥角 > 喷射速度，增加雾化粒径和喷雾锥角，可以有效改善还原剂在反应区域的混合状况，进而提高 SNCR 脱硝反应效果。

黄中等进行了 CFB 锅炉温度场及氧量场测试与数值模拟研究。研究结果表明：炉膛温度沿着炉膛高度分布较为均匀，锅炉设计时稀相区的温度可以采用一个固定值代替。氧气浓度分布规律沿着炉膛宽度方向呈近似“M”型的分布。

廖磊等对六个旋风分离器并联布置的 CFB 进行了试验和数值模拟研究。试验研究结果

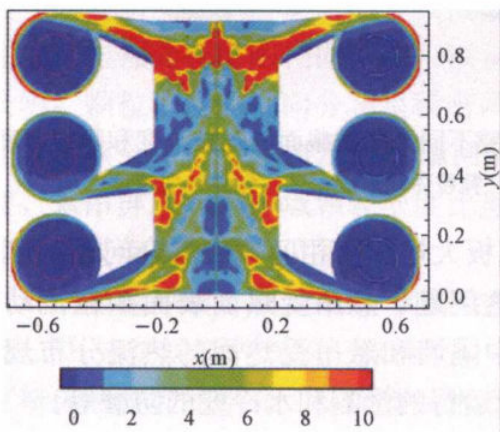


图 1-10 $z=2.05\text{m}$ 处横截面上颗粒浓度分布图

表明：六个旋风分离器之间存在分配不均匀的现象。在相同条件下，不同位置的旋风分离器压降和返料流率均有一定的差异。在炉膛同一侧，位于中间的旋风分离器的压降和返料流率均低于位于两端的旋风分离器的压降和返料流率。数值模拟研究结果表明：不同位置的旋风分离器之间气相流率分配基本均匀，在炉膛同一侧，进入两端的旋风分离器的颗粒流率要高于进入中间的旋风分离器的颗粒流率。位于两端的旋风分离器，颗粒贴着入口烟道外壁进入，处于较好的分离状态；而位于中间位置的旋风分离器，有部分颗粒冲击进入入口烟道内壁，不利于分离（见图 1-10）。

杨梅等进行了 CFB 烟气 SNCR 脱硝机理与试验研究。研究者用电加热 CFB 模拟实际烟气，在炉膛出口喷入氨水或者同时添加 H_2 、 CH_4 进行脱硝试验。试验结果表明：最佳停留时间、氨氮比分别为 0.6 和 1.5，氨水最佳反应温度为 $920^{\circ}C$ ，添加 H_2 最佳温度降低至 $750^{\circ}C$ ，添加 CH_4 最佳温度降低至 $840^{\circ}C$ 。同时研究者采用基元反应动力学对氨水与 NO_x 反应进行了数值模拟计算，模拟结果表明，基元反应模型能够比较好地解释反应机理。

方立军等进行了 CFB 锅炉尾部喷氨水深度烟气脱硫试验流场优化的数值模拟研究。研究者分析了不同喷嘴位置和角度时氨水在烟道中的运动轨迹、质量浓度分布和烟气进出口压降，确定了气液混合效果较好时的最佳喷嘴位置和角度。研究表明：当喷嘴进口氨水质量流量为 0.056kg/s 、上层喷嘴在 $y=2.4\text{m}$ 处、角度为水平方向、下层喷嘴在 $y=1.6\text{m}$ 处、与水平方向成 45° 斜向下时，氨水在烟道中的充满度及与烟气的混合效果最好。

李德波等采用欧拉双流体模型进行了 50MW 生物质 CFB 锅炉三维冷态数值模拟研究。数值模拟结果表明：床层压力分布与现场测量得到的床层压力分布有良好的一致性；流化床前后墙壁面不同截面处的固相颗粒体积分数呈现上稀下浓的分布，前后墙磨损量最大位置出现在 $y=0.95\text{m}$ 的位置，且前墙所受的磨损大于后墙（见图 1-11）。

王威等进行了流化床流动和燃烧特性对 SNCR 脱硝影响的数值模拟研究。为了研究 CFB 锅炉内流动和燃烧产生的 NO_x 的不均匀性对 SNCR（选择性非催化还原）脱硝效率的影响，针对炉内燃烧、喷氨和 SNCR 脱硝反应等一系列过程，建立了稠密气固流动耦合化学反应的数学模型，全面模拟了 CFB 锅炉的气固流动、燃烧反应、 NO_x 生成和脱硝反应，研究了非均匀入口时不同喷氨方式对脱硝效率和氨逃逸量的影响（见图 1-12）。

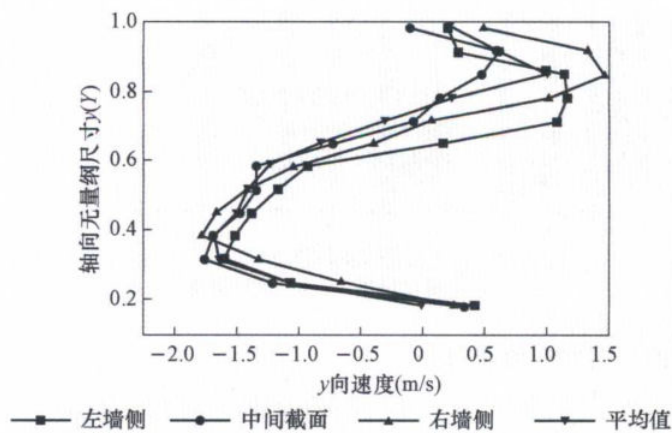


图 1-11 前后墙 y 向速度随轴向高度的分布

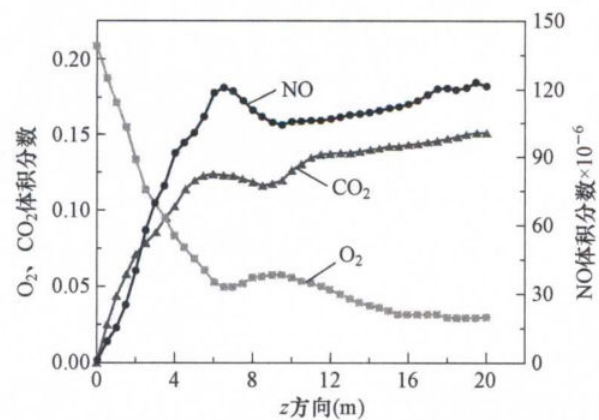


图 1-12 沿着炉膛高度方向不同水平截面气体浓度分布

二、基于 Barracuda 软件数值模拟研究现状

最近几年计算颗粒流体力学（以下简称 CPFD）方法进行 CFB 锅炉流动、传热、燃烧及污染物生成锅炉模拟成为国内外学术界的热点。基于 CPFD 方法开发的商业软件 Barracuda 也在国内外得到应用。Barracuda 软件相比传统的 ANSYS FLUENT 软件，首先在数值模拟方法上能够模拟工程上存在大量颗粒的背景，同时可以模拟不同粒径分布的颗粒。与传统的数值模拟软件 ANSYS FLUENT 不同，Barracuda 软件能够模拟真实粒径分布颗粒。因此采用 Barracuda 软件为进行工业尺度 CFB 锅炉数值模拟提供了一种可行的技术手段，对

于深入了解工业尺度 CFB 流动机理、燃烧特性等具有十分重要意义。最近几年来国内外研究者利用 Barracuda 软件开展了一些数值模拟研究，研究集中在数值模拟方法验证、煤气化反应过程的数值模拟、煤燃烧过程数值模拟等方面，取得了较为丰富的学术成果。

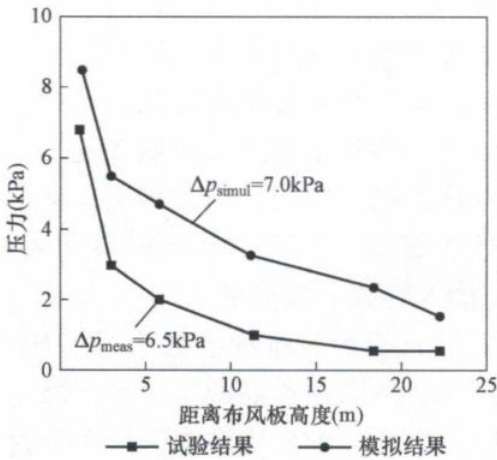


图 1-13 炉膛内部压降试验与数值模拟值对比

张瑞卿等利用 CFPD 软件 Barracuda 对工业 CFB 锅炉中的气固流动和燃烧过程进行了数值模拟。数值模拟对象是一台早期示范性 CFB 锅炉，满负荷运行时的容量大约为 72MW，蒸汽流量为 95315kg/h，蒸汽温度和压力分别为 6205kPa 和 496℃。数值模拟计算结果在气固流动方面，体现了 CFB 锅炉中炉内颗粒的整体流动形态和特性，并准确预测出磨损发生的位置（见图 1-13）。燃煤方面计算结果表明采用简化的煤燃烧机制是合理有效的，得到的炉膛温度分布和气体成分分布均与实际测试情况吻合，从而验证了利用 CFPD 手段预测循环流化床中气固流动和燃烧过程的可行性（见图 1-14 和图 1-15）。

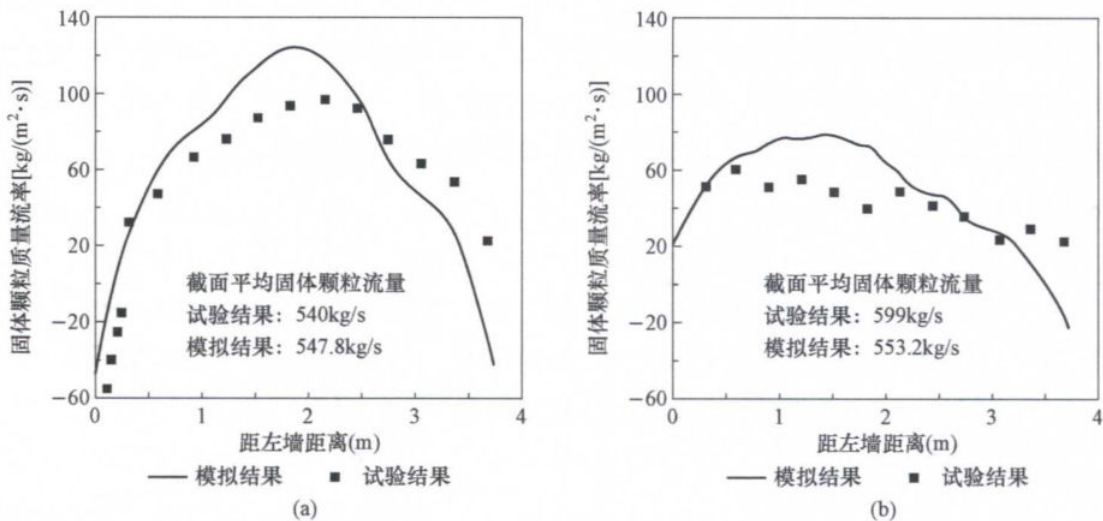


图 1-14 沿 y 方向的平均颗粒流率分布

(a) $H=11.3\text{m}$; (b) $H=18.7\text{m}$

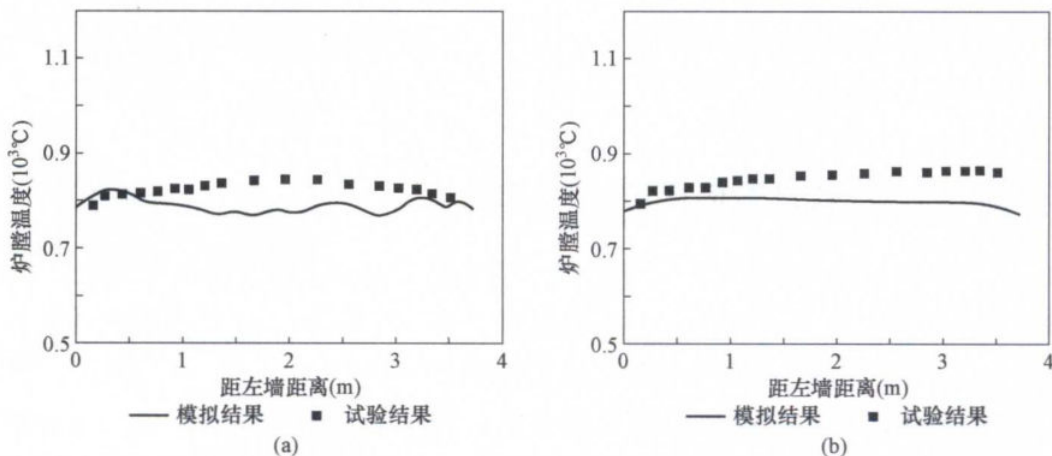


图 1-15 沿 y 方向的流体温度分布

(a) $H=11.3\text{m}$; (b) $H=18.7\text{m}$

Wang Qinggong 等开展了利用 CPFDF 方法进行 CFB 数值模拟的关键模拟参数研究。研究者主要进行了网格尺寸、颗粒紧密堆积的体积分数 θ_{cp} 、曳力模型，以及颗粒粒径分布函数 (Particle density function) 等对数值结果的影响，数值模拟计算与试验结果进行了验证。研究表明：在进行 CPFDF 方法数值模拟时，中等规模的网格就可以实现较好的数值模拟计算精度，并不需要很精细的网格，显示了 CPFDF 方法的优势。颗粒紧密堆积体积分数为 $\theta_{cp} = 0.58$ 时能够比较好地模拟得到颗粒循环流率和压降的分布。在曳力模型方面，Wen-Yu 和 Ergun 联合是最好的选择。在进行 CFB 数值模拟时，采用考虑颗粒粒径分布函数相比单一粒径可以得到比较好的 CFB 流动特性 (见图 1-16 和图 1-17)。

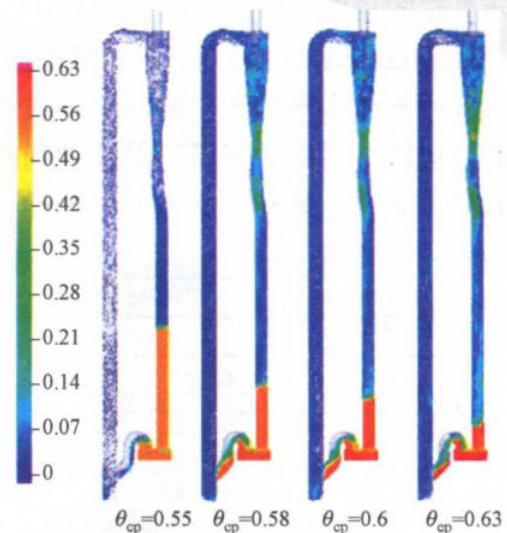


图 1-16 不同颗粒紧密堆积体积分数下数值模拟结果

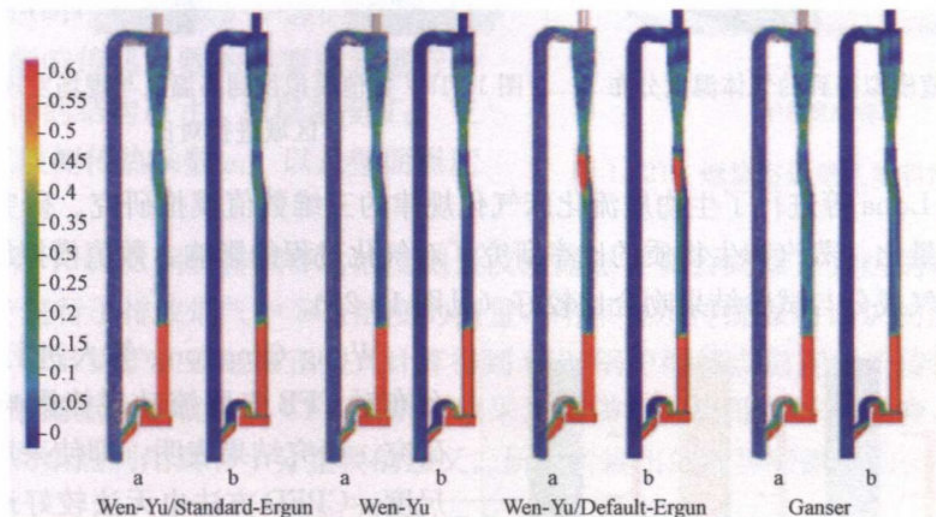


图 1-17 不同曳力模型计算得到的结果

R. K. Thapa 等开展了 CFB 中一次风、二次风喷口位置对循环流率影响的数值模拟和试验研究。研究表明：最佳的一次风、二次风喷口位置相对整个流化床高度的比值为 0.125 和 0.375。

Alireza Abbasi 等研究了 CFB 气化炉中速度场、组分场、温度场分布的规律。研究表明：采用 CPFDF 方法可以比较好地模拟出气化炉中的化学反应规律。

Cheng Chen 等进行了 CFB 数值模拟研究。研究表明：基于 CPFDF 方法曳力模型数值模拟结果与试验结果相比，数值模拟结果要明显大于试验结果，因此需要对 CPFDF 方法曳力模型进行完善，可以采用 EMMS 方法进行修改。

Yu Jiang 等进行了 6 个旋风分离器的 CFB 锅炉数值模拟研究。研究中 CFB 锅炉包括燃烧器、分离器、立管、回料阀等。为了验证数值模拟结果，ECT (electrical capacitance tomography) 用于试验测量。研究表明：气固流动在分离器区域是不均匀的。在四角上的分离器的颗粒浓度要明显高于中间 2 个分离器的颗粒浓度，因此分离器的布置及烟气进

入分离器的角度需要进一步的优化。

Stephan Kraft 等进行了 50MW 生物质鼓泡流化床锅炉数值模拟研究。研究者主要研究不同运行参数影响导致生物质锅炉结渣的规律，通过数值模拟得到水冷壁温度分布，进而得到超过灰熔点温度的区域为结渣的判断提供理论基础。然后进行了 3 个工况的数值模拟，发现工况 3 能够显著减少结渣的可能性（见图 1-18 和图 1-19）。

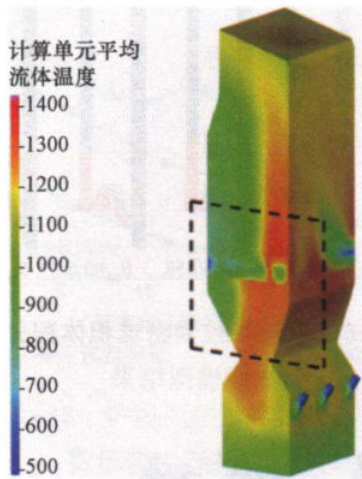


图 1-18 数值模拟得到的气体温度分布

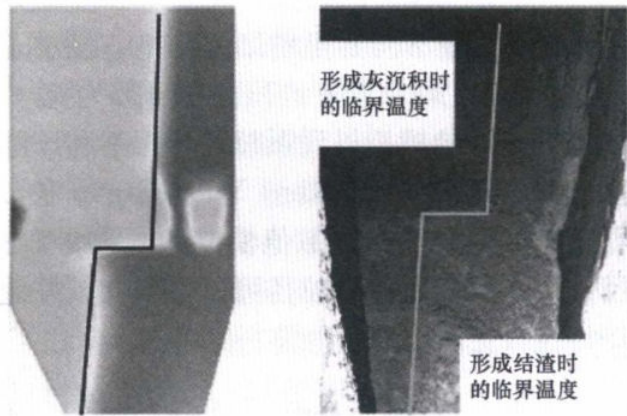


图 1-19 数值模拟得到高温区与现场发现结渣区域进行对比

Chanchal Loha 等进行了生物质流化床气化规律的三维数值模拟研究。研究者通过改变气化温度、当量比、蒸汽和生物质的比率研究了对气化过程的影响。数值模拟结果得到的流化床出口的烟气成分与试验结果吻合比较好（见图 1-20）。

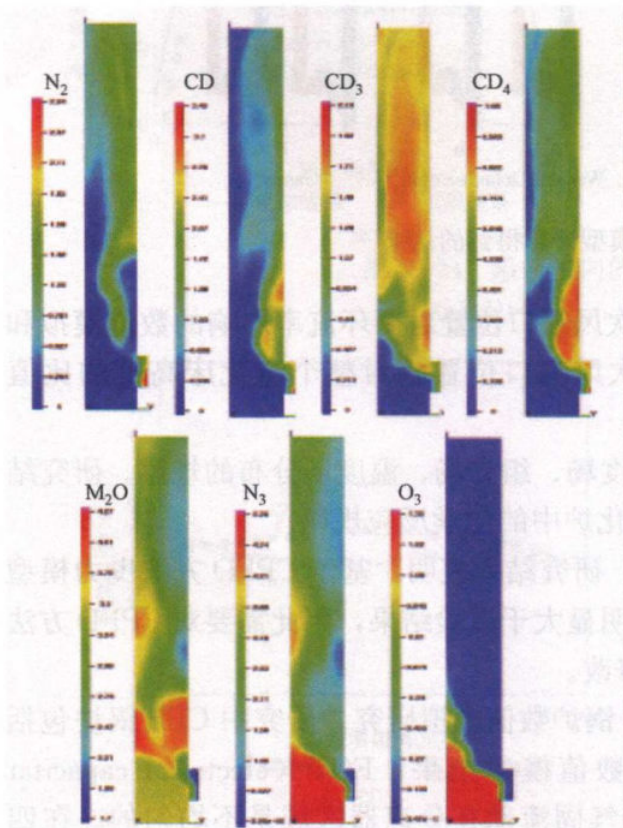


图 1-20 数值模拟得到的组分浓度分布

Wang Qinggong 等人进行了颗粒粒径分布对 CFB 气固流动规律影响的数值模拟研究。研究表明：即使采用精细的网格尺度，CPFD 方法也无法较好地模拟密相区的气固两相流动。而在密相区以上的区域，使用 CPFD 方法得到的颗粒体积分数和颗粒速度与试验结果都比较吻合。CPFD 方法的最大优势是可以考虑颗粒多粒径的分布，与 ANSYS FLUENT 采用单粒径数值模拟方法相比，可以用较少的计算资源获得较好的计算结果。

李德波等对 CFB 全热态数值模拟方法进行了综述性研究。研究者分析了大型工业化 CFB 锅炉全热态数值中传统方法的缺陷，以及 CPFD 方法的优势，详细介绍了 CPFD 方法的基本原理和控制方程。研究表明：将 CPFD 方法应用于 CFB 锅炉磨损、气固非均相燃烧反应过程的数值模拟中，数