

多喷嘴对置式煤气化研究与技术进展

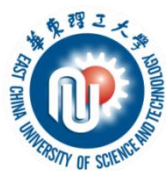
华东理工大学

李伟锋

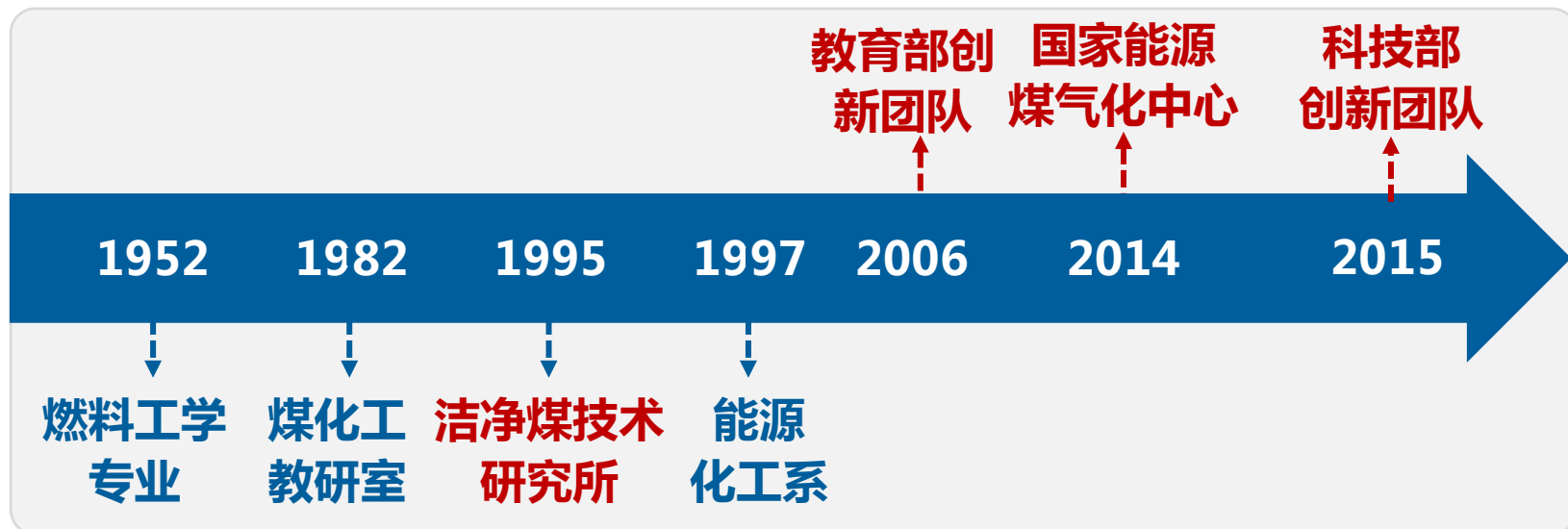




-
- 一 团队概况
 - 二 多喷嘴煤气化研究进展
 - 三 多喷嘴煤气化技术进展



一、团队概况——历史沿革



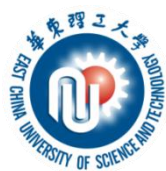
创始人
于遵宏教授



依托学科：

- 化学工程与技术 (A⁺)
- 动力工程与工程热物理

六十余年团队发展历程，深厚的学术积淀



一、团队概况——研究队伍

教育部创新团队	1
科技部创新团队	1
“教育部长江学者奖励计划”特聘教授	2
国家万人计划领军人才	2
973首席科学家	2人次
“新世纪百千万人才工程”国家级人选	1
中国青年科技奖	1
“教育部新世纪优秀人才”资助计划	4
科技部中青年科技创新领军人才	1
上海市科技领军人才	1
上海市青年杰出贡献奖	1
上海市优秀学科带头人	1
上海市浦江人才计划	3
上海市启明星计划	1
上海市曙光学者	2
上海市晨光学者	1

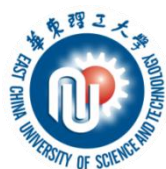
研究所固定人员**19**人

教授**8**人，博士生导师**8**人

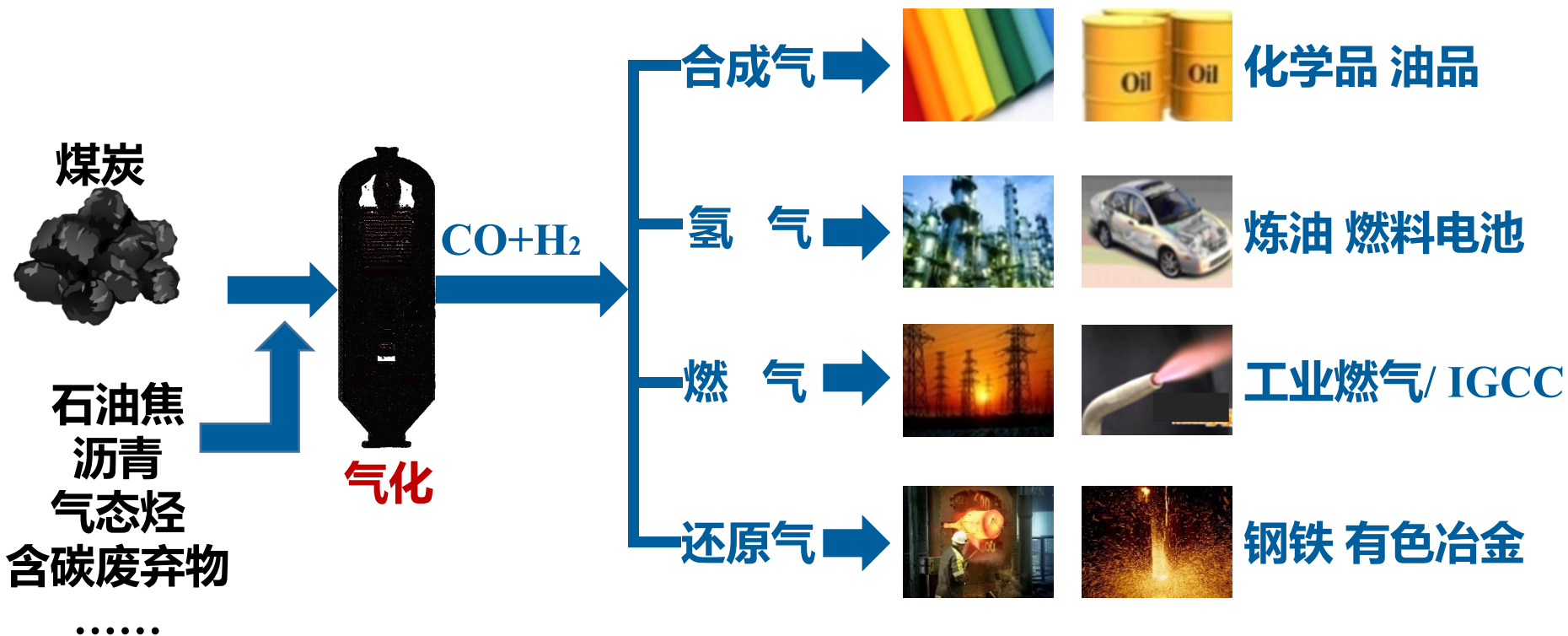
在读硕士、博士研究生**90**余人



高素质、有创新活力的科研团队



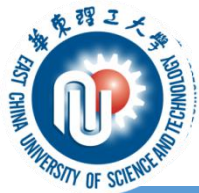
一、团队概况——研究方向



重大挑战

- 原料多样与劣质化
- 系统清洁高效化

- 装备大型化
- 产品网络化

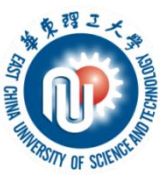


一、团队概况——创新内涵

高温、高压、多相湍流反应流动



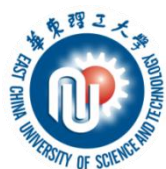
应用基础研究与工程实际紧密结合



一、团队概况——承担项目

- 超大规模水煤浆气化放大关键技术及污水减量化研究
-----国家“十三五”重点研发计划
- 低阶煤热解半焦规模化高效利用技术与工程化
国家“十三五”重点研发计划
- 固体产物清洁高效利用技术开发
国家“十三五”重点研发计划
- 粉煤空气气化制备燃气新技术开发
国家“十二五”863计划
- 3000吨/日级大型煤气化关键技术研发与示范
国家“十二五”863计划
- 日处理2000吨煤新型水煤浆气化技术
国家“十一五”863计划
- 200MW等级IGCC关键技术研究开发与工业示范
国家“十一五”863计划
- 百万吨级煤间接液化及电联产系统工业试验与示范
国家“十一五”863计划
- 高灰熔点煤加压气化技术研究开发与工业示范
国家“十一五”863计划
- 高效化学热回收煤气化新技术应用研究
国家“十一五”863

计划



一、团队概况——承担项目

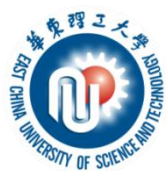
国家重点基础研究发展计划(973项目)

- 煤等含碳固体原料大规模高效清洁气化的基础研究 (首席单位 2010 - 2014)
- 大规模高效气流床煤气化技术的基础研究 (首席单位 2004 - 2009)

国家自然科学基金项目

(>20)

- 煤浆液滴的快速热解机理及热解半焦气化动力学研究 (1999-2004) 2014-2017
- 气流床煤气化过程中煤焦结构演变过程研究和离散网络模型模拟 2014-2017
- 气流床气化炉内颗粒破碎及沉积特性研究 2014-2017
- 秸秆类生物质基添加剂在粉煤气流床气化中的作用机制 2014-2016
- 高浓度煤粉在文丘里管内流动机理与规律研究 2013-2015
- 气流床气化炉熔渣激冷相变过程矿物质迁移、断裂和破碎机理研究 2012-2014
- 气流床煤气化辐射废锅内的多相流动、传热及熔渣行为研究 2012-2014
- 水葫芦与煤共气化实现资源化利用的关键科学问题研究 2012-2014
- 煤粉料仓下料过程机理与规律研究 2011-2013
- 气流床气化过程中细颗粒物形成机理及残碳气化反应特性的研究 2011-2013
- 基于气流床煤气化的蓝藻大规模快速利用技术的应用基础研究 2010-2012
- 气流床气化炉壁面熔渣流动的实验研究与数值模拟 2010-2012
- 气流床气化多相湍流扩散火焰结构特征与气化燃烧机理研究 2009-2011
- 污泥与煤制浆共气化新工艺及其应用基础研究 2008-2010
- CO₂输送粉煤过程的机理与规律研究 2006-2008
- 水煤浆气化炉内气化机理研究 1996-1998



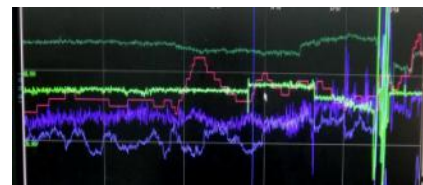
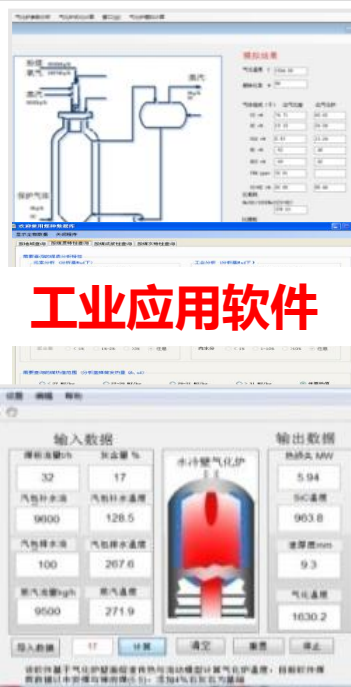
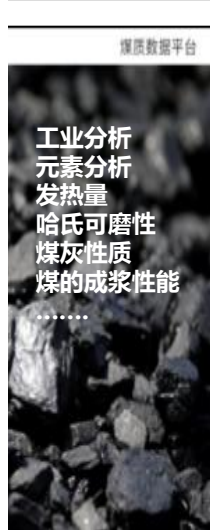
一、团队概况——优势特色

建成了国内最齐全的煤气化大数据平台

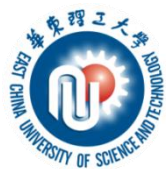
煤质数据库
(800多个煤样)

工业应用软件
煤质调控 / 趋势预测
运行监测 / 操作优化

工业运行数据
(60余套装置)



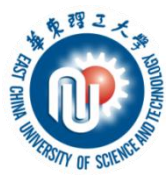
服务煤气化领域科技创新，发挥了重要支撑作用



一、团队概况——优势特色



- **2016年国家科技进步二等奖**
- 2015年上海市技术发明特等奖
- 2015年上海市科技进步一等奖
- 2015年山东省科技进步一等奖
- 2013年中国石油和化学工业科技进步一等奖
- 2010年上海市科技进步一等奖
- **2007年国家科技进步二等奖**
- 2007年第十届中国专利奖优秀奖
- 2006年中国石油和化学工业科技进步特等奖两项
- **2006年全国高校十大科技进展**
- 2006年中国高等学校专利奖
- 2006年中国高校 - 企业合作创新十大案例
- 2004年煤炭工业十大科技成果
- 2001年“九五”科技攻关优秀成果奖
- 1998年上海市科技进步一等奖



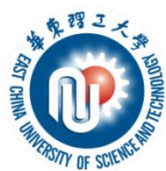
一、团队概况——优势特色



刘延东同志对团队讲话

- 第一，祝贺大家取得了很大成绩。
- 第二，感谢大家为国争光作出的贡献。
- 第三，还要更加攀登高峰，占领市场，占领这个领域的制高点，为国家作出更大的贡献！

国内设备最齐全的气化技术研究基地



二、多喷嘴煤气化研究进展——研发历程



技术发明及
中试
22TPD

1996~2000

化工部
国家计委

工业示范

1150TPD
750TPD

2001~2005

科技部

大型化

2000TPD

2006~2010

科技部

大型化

3000TPD

2011~2015

科技部

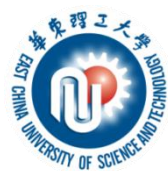
超大型化

4000TPD

2016~2020

科技部

国家需求导向，三十余年持续研究



二、多喷嘴煤气化研究进展——科学内涵

需求

大规模煤制油、煤制烯烃、大炼油等重大工程急需高效、高可靠性大型水煤浆气化

重大挑战



结构受限



雾化强化

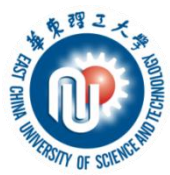


设备寿命

科学问题

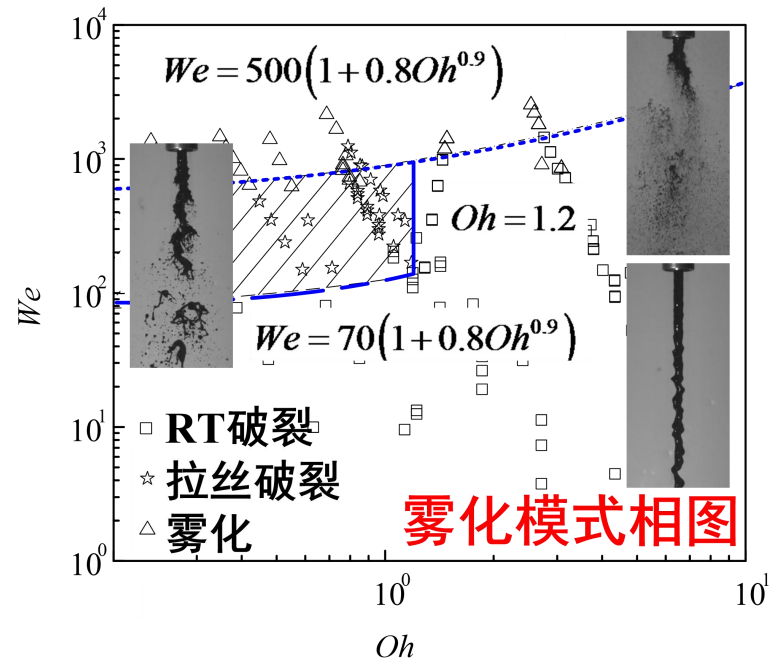
- 复杂浆体雾化机理
- 撞击流混合强化机制
- 高温气化反应过程强化
- 壁面熔渣流动和传热

**大型化理论基础
与科学方法**



二、多喷嘴煤气化研究进展——喷嘴雾化

● 复杂流变性水煤浆同轴气流式雾化机理与规律



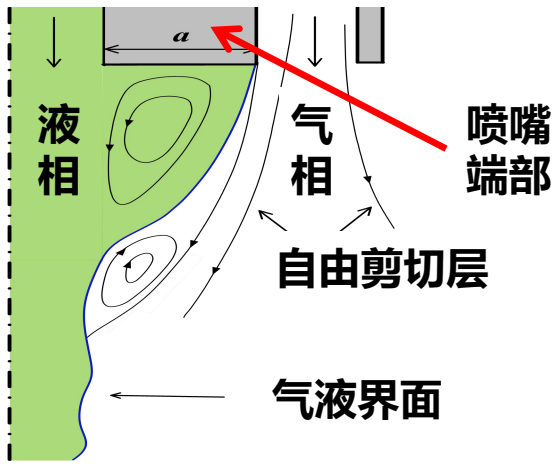
- 发现水煤浆初次雾化破裂模式
- 获得水煤浆气流式雾化的破裂特性与规律
- 建立水煤浆雾化模式相图

■ *Chem. Eng. Sci.*, 2012, 78

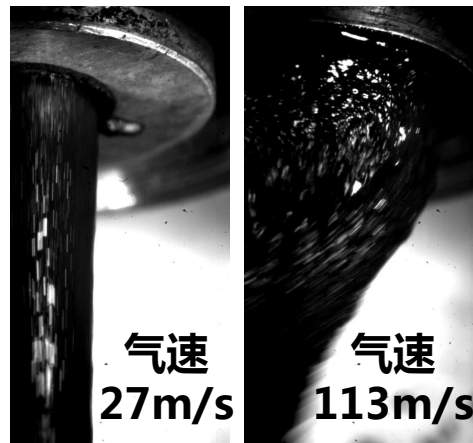
■ *J. Non-Newton Fluid*, 2014, 211

二、多喷嘴煤气化研究进展——喷嘴雾化

● 气液流场耦合特性与喷嘴磨蚀机理



喷嘴近场涡结构

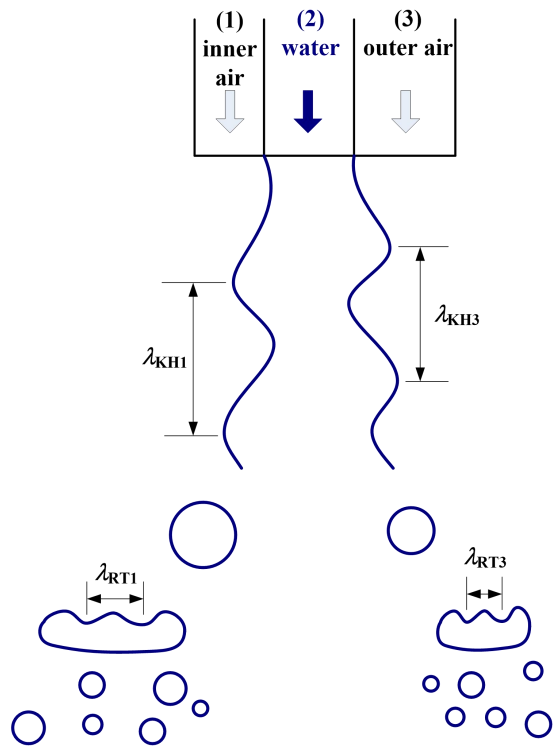


喷嘴出口卷吸

- 发现气流式**喷嘴端部回流**行为机制
- 基于总压守恒理论，获得液体**卷吸临界条件**

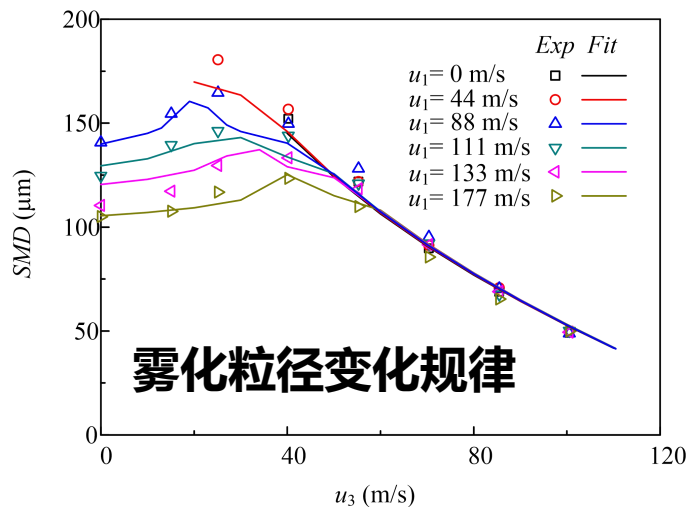
二、多喷嘴煤气化研究进展——喷嘴雾化

● 预膜式喷嘴雾化特性与机理



双气流雾化机理

■ *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2018, 57



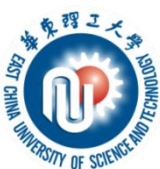
雾化粒径变化规律

预膜雾化公式

$$\frac{SMD}{h_2} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.097(1-1.7m_{21}^{-0.43}) \left[\left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/4} \text{Re}_1^{-1/4} \text{We}_1^{-1/2} \right]^{0.054} \\ 0.14(1-0.56m_{23}^{-0.95}) \left[\left(\frac{h_3}{h_2} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/4} \text{Re}_3^{-1/4} \text{We}_3^{-1/2} \right]^{0.22} \end{array} \right\}$$

- 发现预膜雾化粒径非单调性
- 建立预膜式喷嘴雾化模型

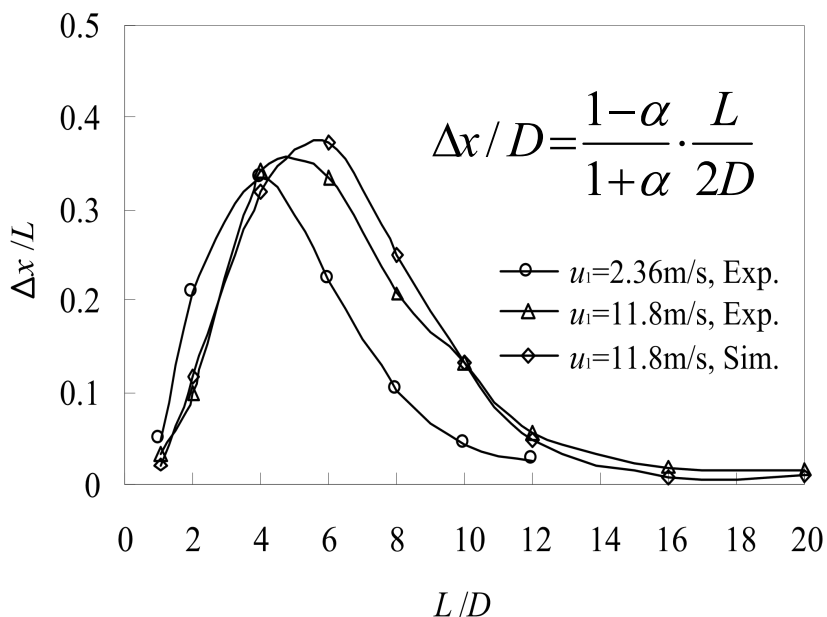
建立水煤浆气化喷嘴放大设计准则



二、多喷嘴煤气化研究进展——撞击混合

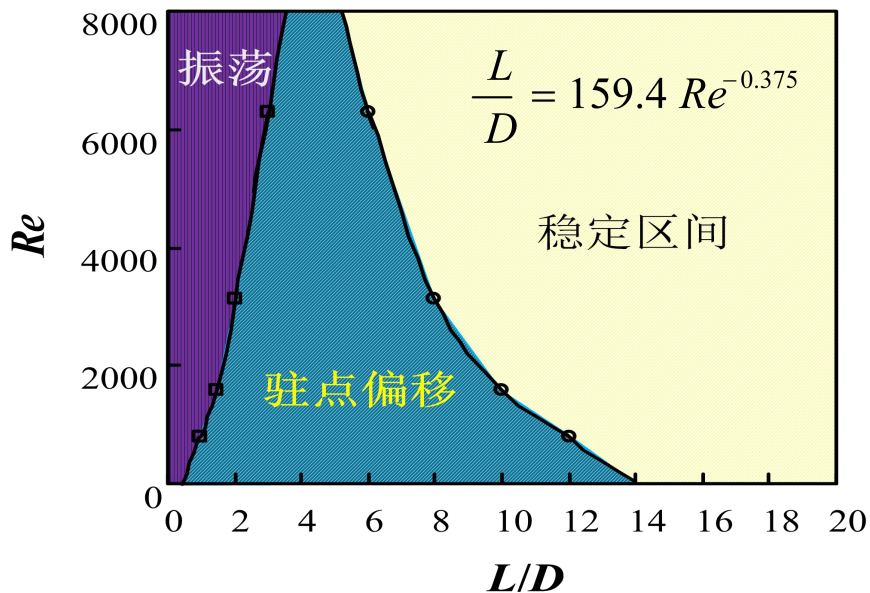
● 撞击流驻点偏移规律及稳定性

- 揭示了气化炉的流场特征和撞击流驻点偏移规律
- 提出了撞击流流场调控和过程强化方法



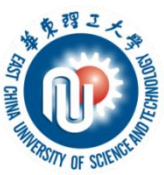
不同喷嘴间距下驻点偏移规律

■ *AIChE J.*, 2010, 56: 2513-2522



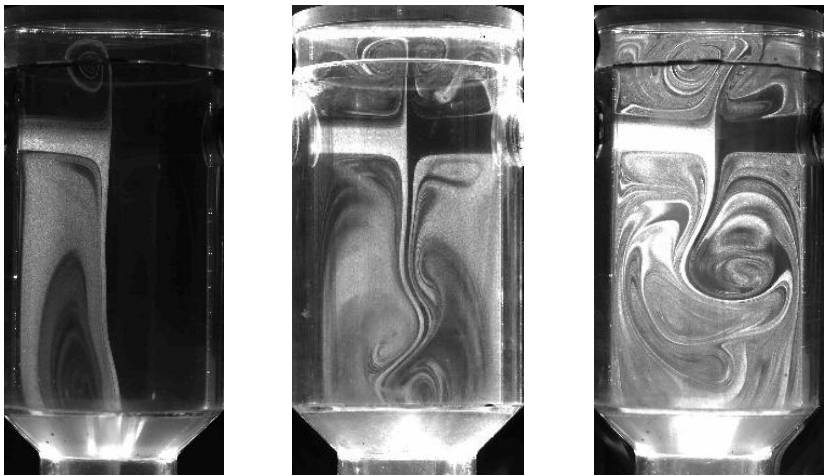
撞击流特性及稳定性

■ *AIChE J.*, 2011, 57(6): 1434-1445



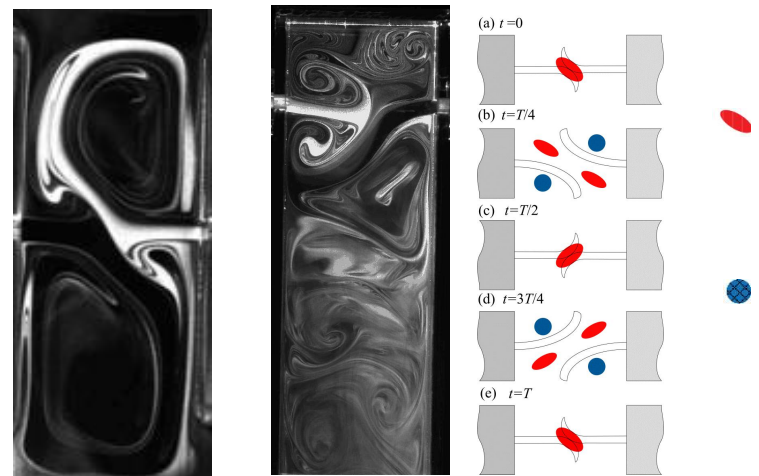
二、多喷嘴煤气化研究进展——撞击混合

- 撞击流反应器内撞击面不稳定性及产生机制
 - 揭示了撞击面自持振荡是撞击流强化混合的主要机理
 - 揭示了平面撞击流偏斜振荡及产生机制



圆柱受限反应器撞击面自持振荡

- *AIChE J.*, 2014, 60, 3033
- *Chem. Eng. Sci.*, 2015, 138, 216
- *Chem. Eng. J.*, 2014, 247, 125



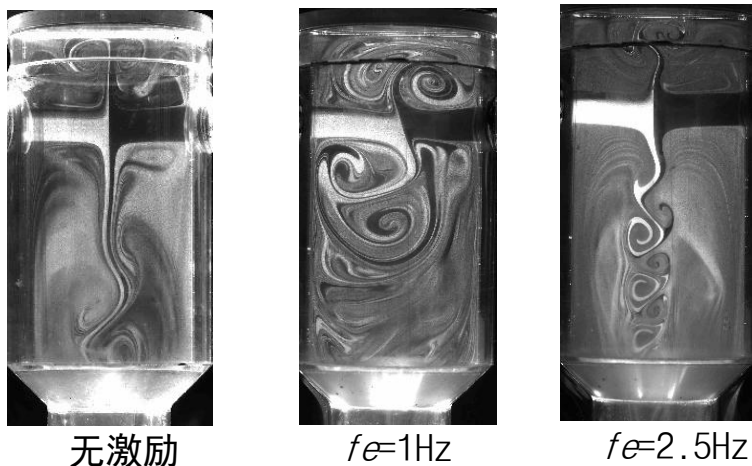
平面撞击流反应器偏斜振荡

- *Chem. Eng. Sci.*, 2014, 116, 737
- *Phys. Fluids*, 2013, 25, 014108

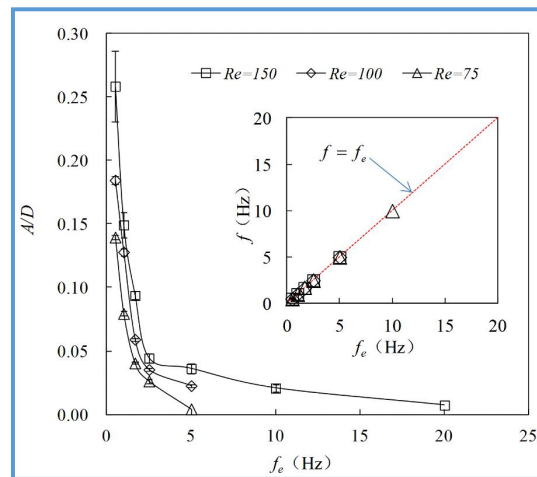
二、多喷嘴煤气化研究进展——撞击混合

● 撞击流激励振荡和稳定性调控

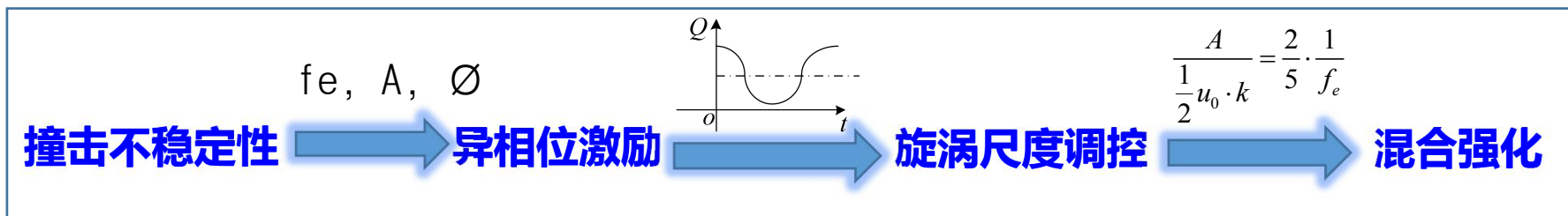
- 揭示了低雷诺数下撞击流激励振荡原理
- 创新性提出了撞击流激励调控和混合强化方法

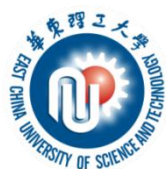


撞击流反应器激励调控



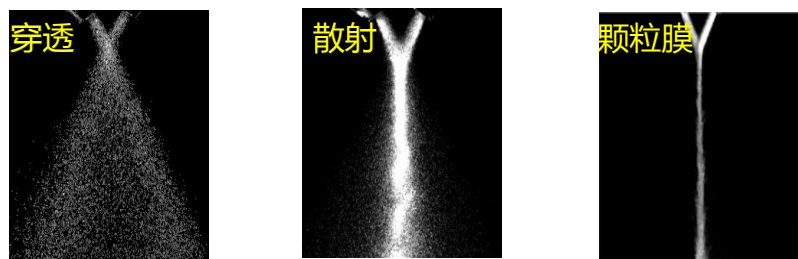
激励振荡振幅和频率





二、多喷嘴煤气化研究进展——撞击混合

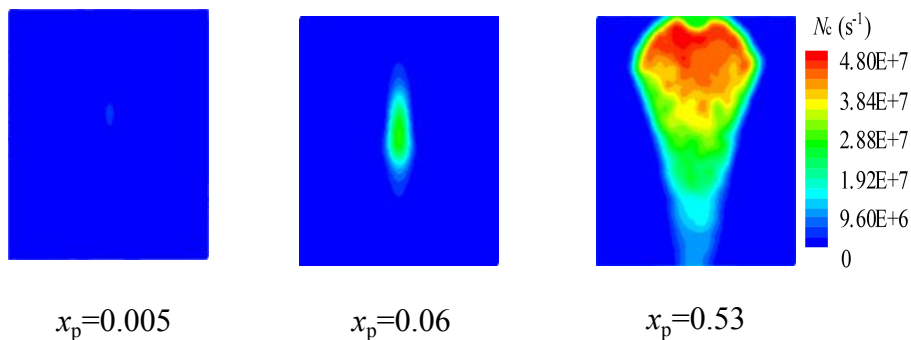
- 稠密气固撞击流介尺度机理及调控
 - 揭示了多相撞击流介尺度模式及形成机理
 - 提出的多相撞击流稳定性调控方法，强化了多相混合



含固率增加，碰撞概率增加，呈现颗粒膜



流速增加，不稳定性增强，出现振荡



气固撞击模式及机理



气固撞击不稳定性模式及机理

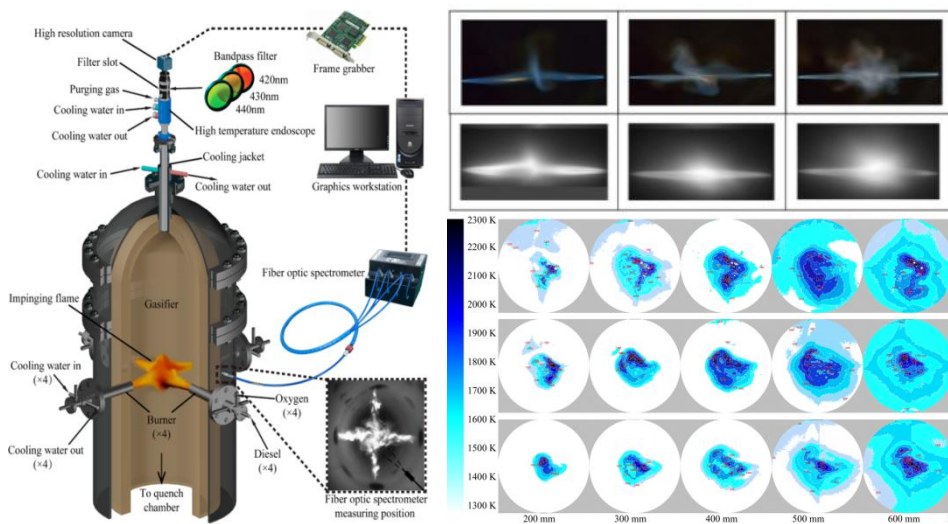
- *AIChE J.*, 2019, 65, 49-63
- *Powder Technol.*, 2018, 336, 199-209

- *Chem. Eng. J.*, 2019, 368, 175-185
- *Acta Phys. Sin-Ch. Ed.*, 2018, 67, 10451

二、多喷嘴煤气化研究进展——多相火焰

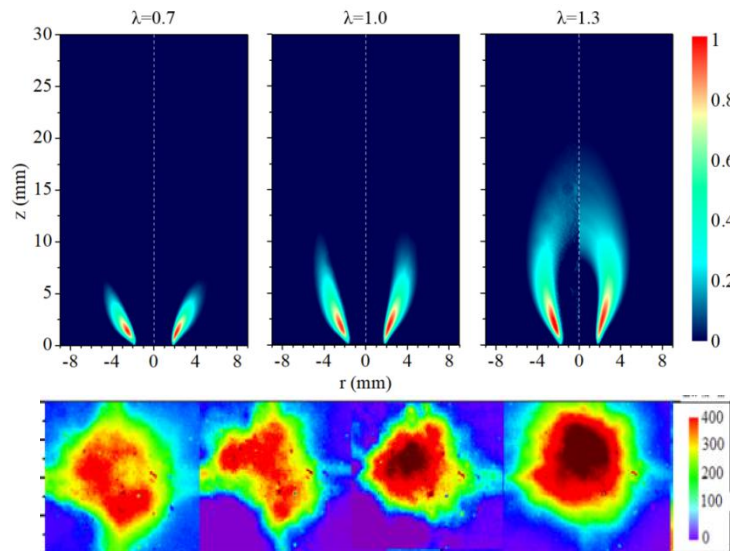
● 炉内还原火焰调控

- 实现了温度场及火焰结构的单视角三维数值重建
- 拓展了单喷嘴及多喷嘴撞击还原性火焰反应机理



撞击火焰结构及温度分布

- *Energ. Fuel.*, 2014, 28(8): 4895
- *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2013, 52(8): 3007



火焰自由基分布

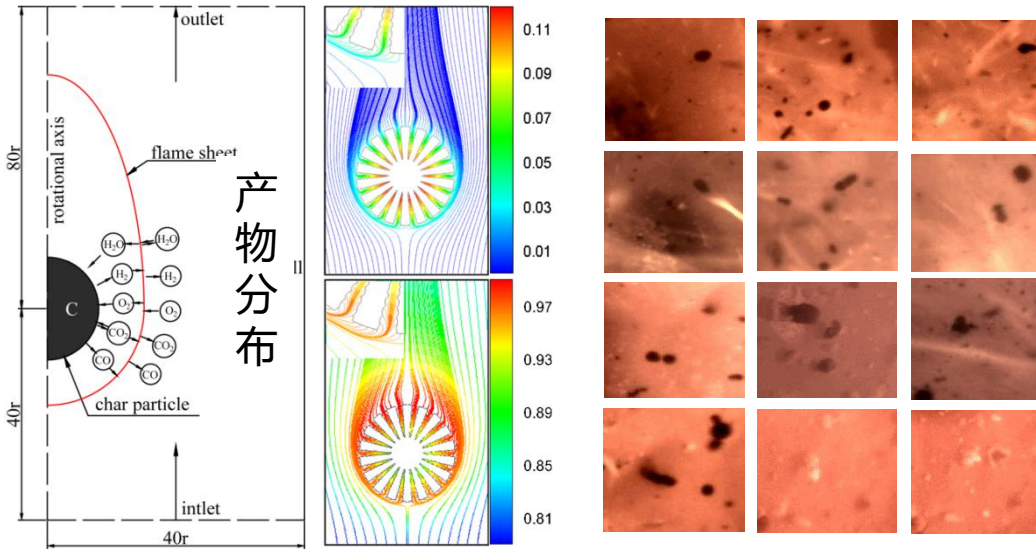
- *AIChE J.*, 2017, 63(6): 2007
- *Combust. Sci. Technol.*, 2017, 189(12): 2195

奠定了气化炉火焰调控的理论基础

二、多喷嘴煤气化研究进展——多相火焰

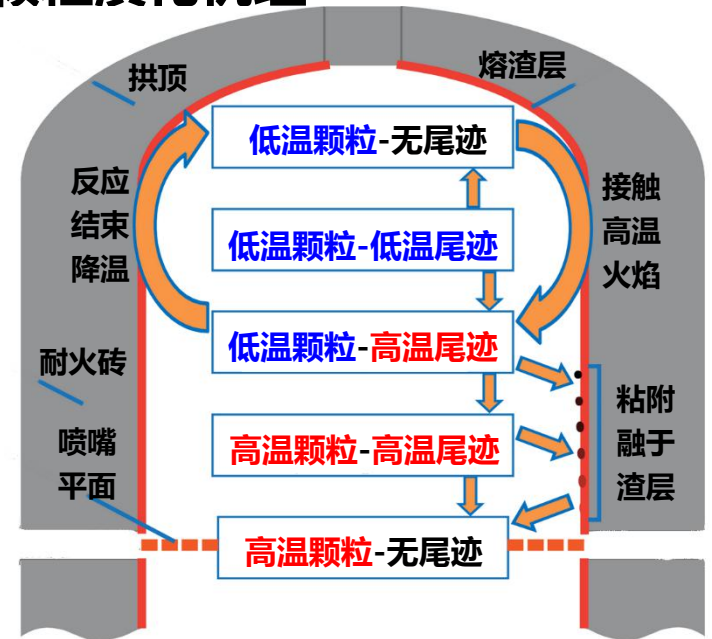
● 高温颗粒演化机理

- 获得了炉内颗粒空间行为
- 揭示了不同类型颗粒间转化规律及热态颗粒演化机理



单颗粒反应特性

颗粒群动态行为



炉内颗粒反应演化规律

- *Chem. Eng. Sci.*, 2017, 162
- *Chem. Eng. Sci.*, 2015, 138

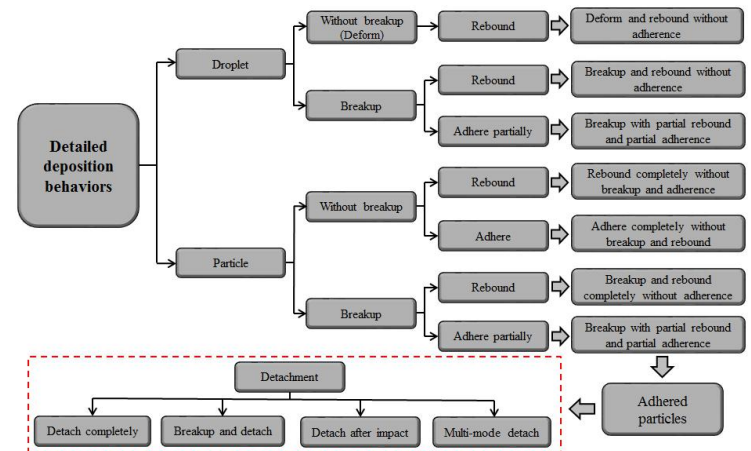
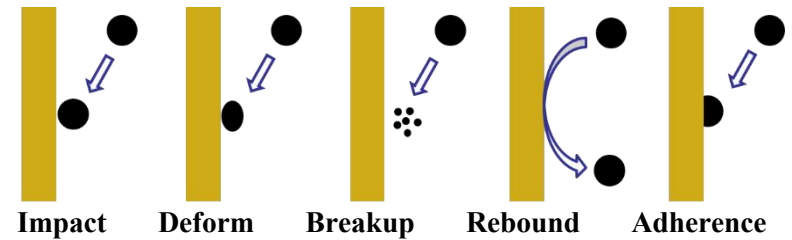
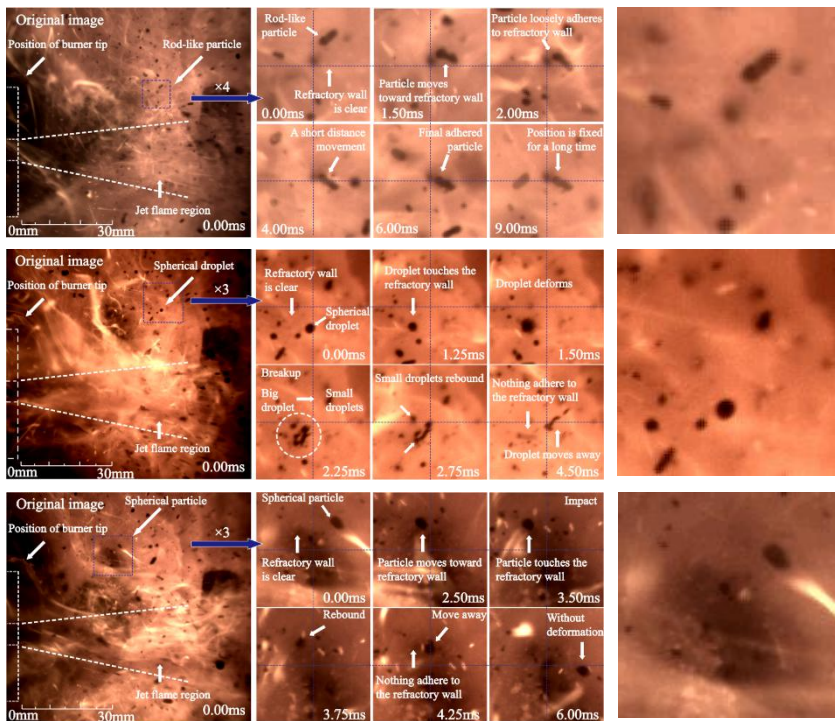
- *Chem. Eng. Sci.*, 2014, 117
- *Appl. Energ.*, 2017, 206

确立了气化过程强化及颗粒浓度场调控的理论基础

二、多喷嘴煤气化研究进展——多相火焰

● 高温颗粒在壁面沉积过程的特性及机理

基于多喷嘴对置式气化试验平台，通过实验手段研究了OMB气化炉内颗粒于壁面沉积过程的特性及机理。



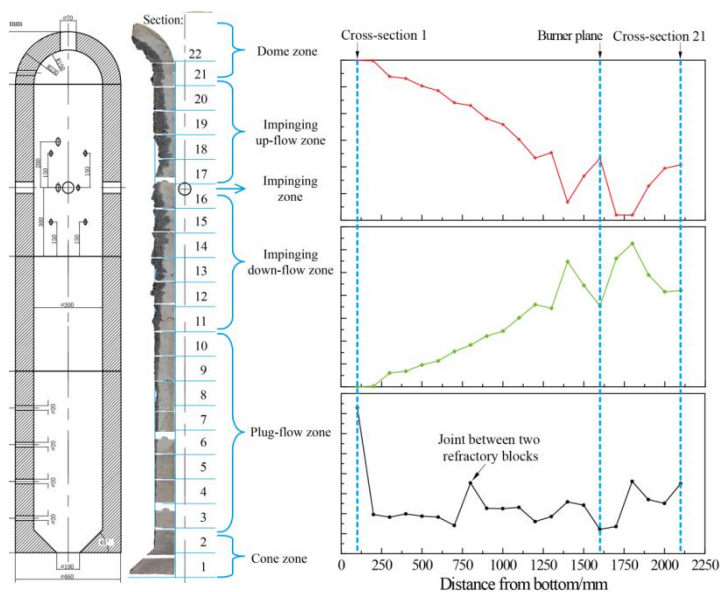
沉积过程中的颗粒运动行为

颗粒沉积模式分类

二、多喷嘴煤气化研究进展——多相火焰

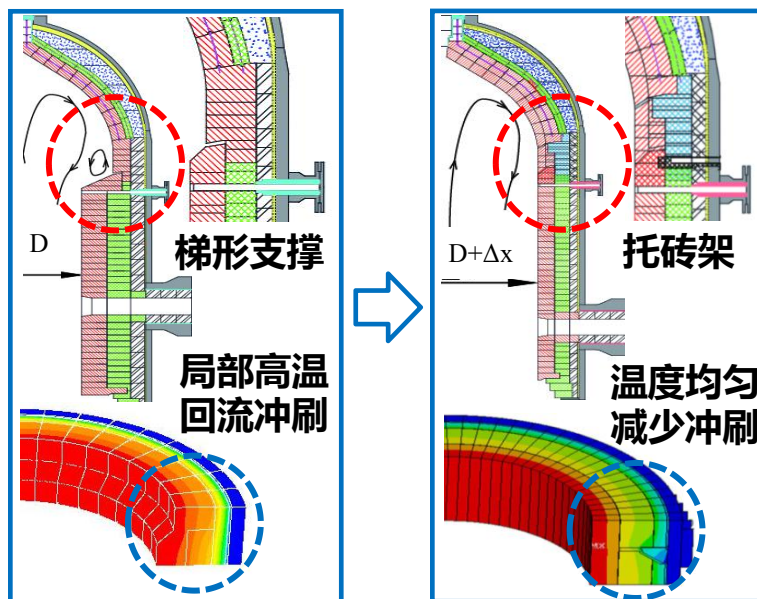
● 耐火衬里侵蚀机理及结构优化

- 建立了耐火砖分区蚀损模型
- 形成了新型耐火衬里支撑结构及配置方式



耐火砖分区蚀损特性

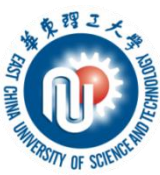
- *Appl. Energ.*, 2017, 206: 1184



耐火衬里结构优化

- 发明专利, ZL201410150760

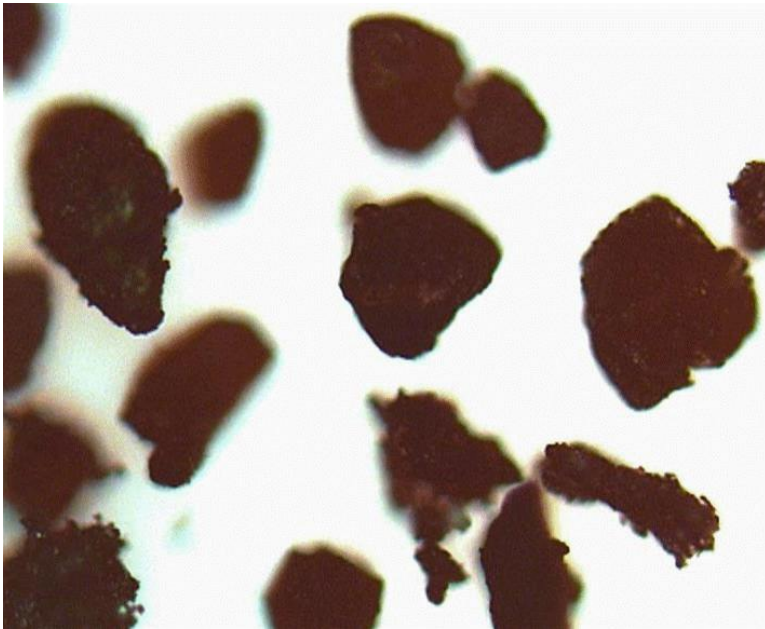
耐火砖总体寿命延长2倍以上，气化炉有效容积增加15%



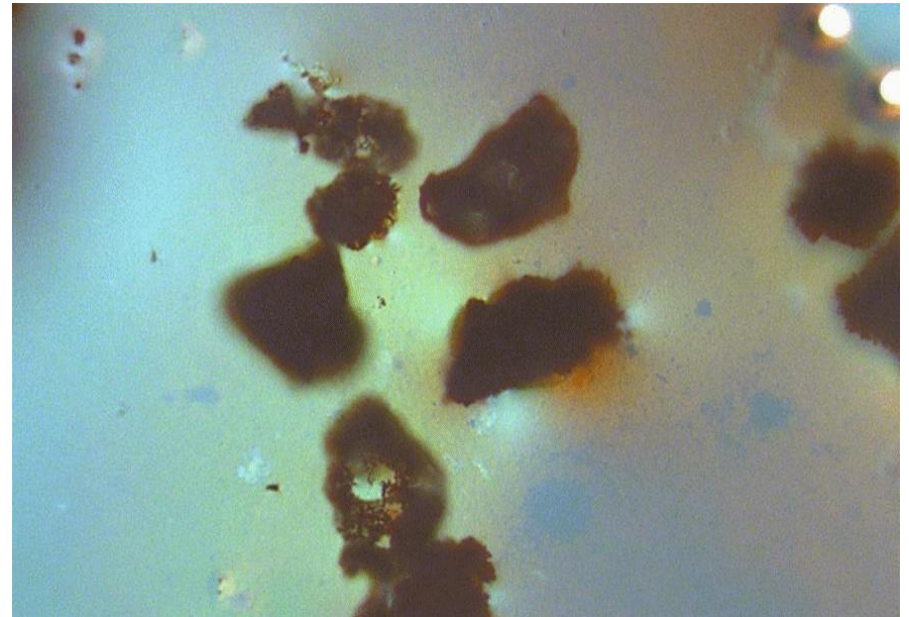
二、多喷嘴煤气化研究进展——熔渣相变

● 熔渣界面焦炭气化反应动力学

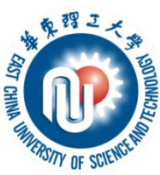
- 煤焦与 CO_2 常压气化转化时间约为10-20s；
- 熔渣界面煤焦气化反应速率是自由煤焦气化反应速率的**2倍**。



自由煤焦原位气化反应过程



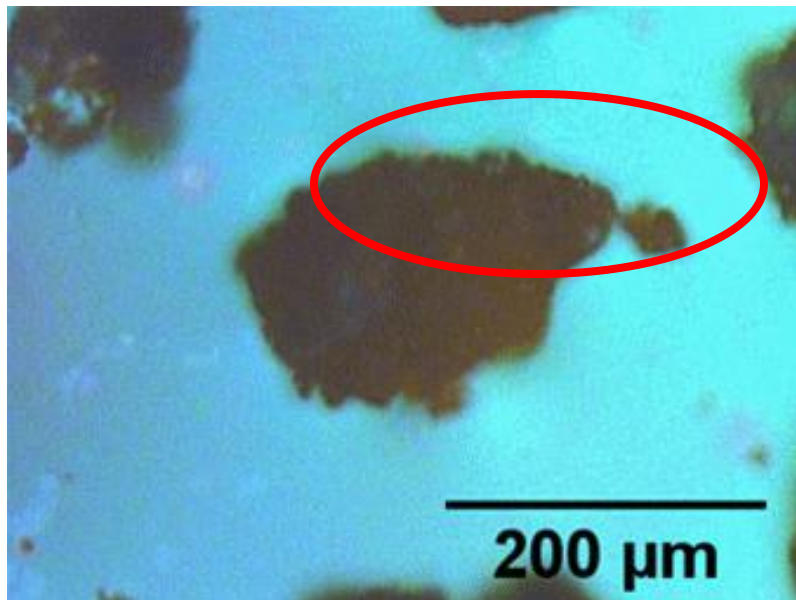
熔渣界面煤焦原位气化反应过程



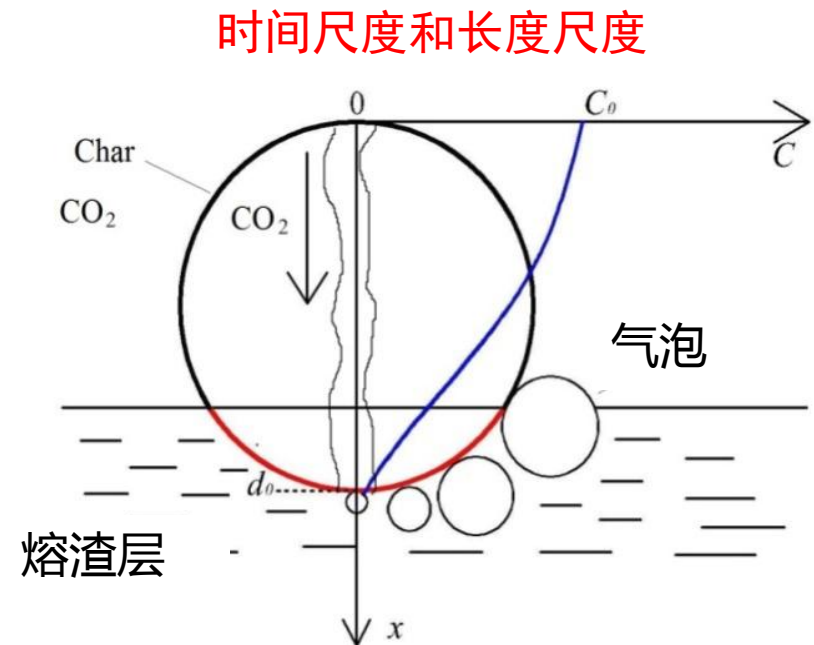
二、多喷嘴煤气化研究进展——熔渣相变

● 熔渣内气泡生成机理

- 工业运行和实验过程均发现气化熔渣层内存在气泡；
- 熔渣界面煤焦孔道扩散反应是气泡产生的根本原因。



实验观察气泡生成过程

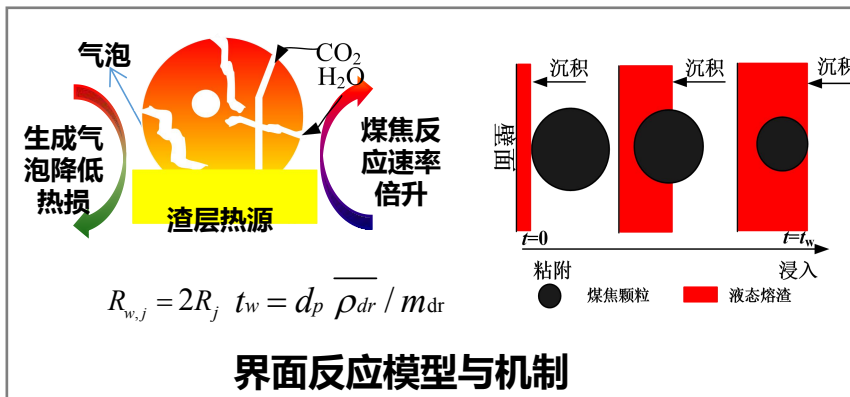
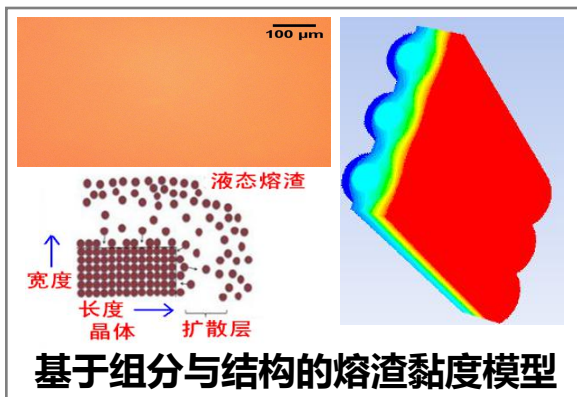


气泡生成机理

二、多喷嘴煤气化研究进展——熔渣相变

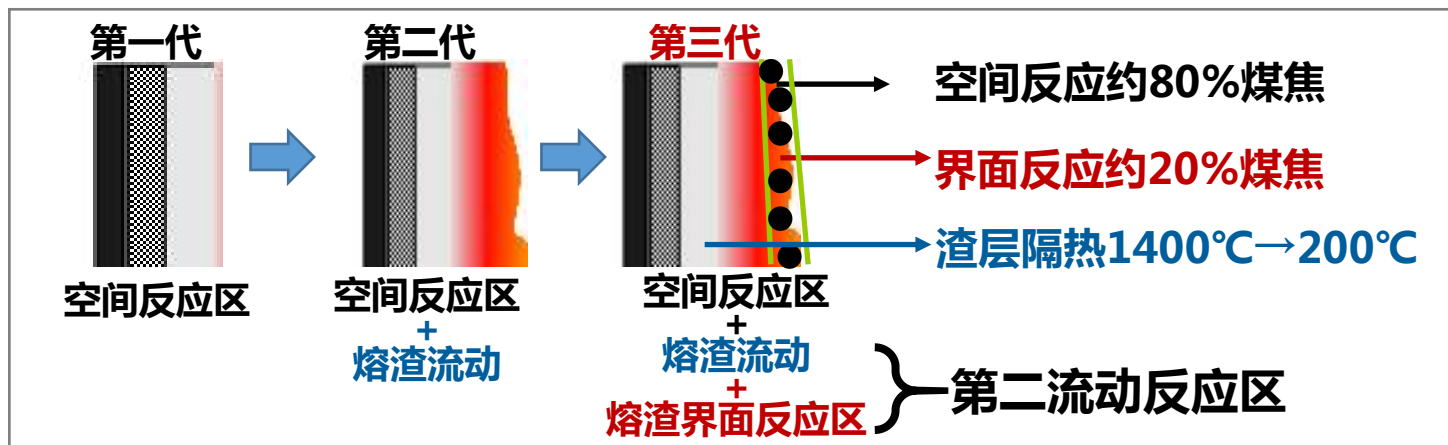
● 揭示液态熔渣微观相变规律，建立综合气化反应模型

熔渣流动



界面反应

综合气化反应模型

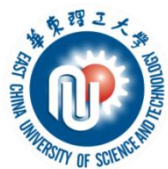


Fuel, 2016, 184

AIChE J., 2017, 63(2)

Combust. Flame, 2016, 166

基于熔渣界面反应，提出了炉内流动反应过程强化新方法

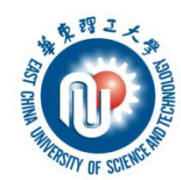


三、多喷嘴煤气化技术进展——应用情况

多喷嘴对置式水煤浆气化技术应用分布图



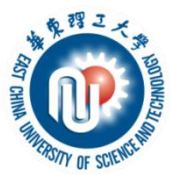
国内55个项目，国外2个项目，合计158台气化炉
国内外广泛应用



三、多喷嘴煤气化技术进展——应用情况

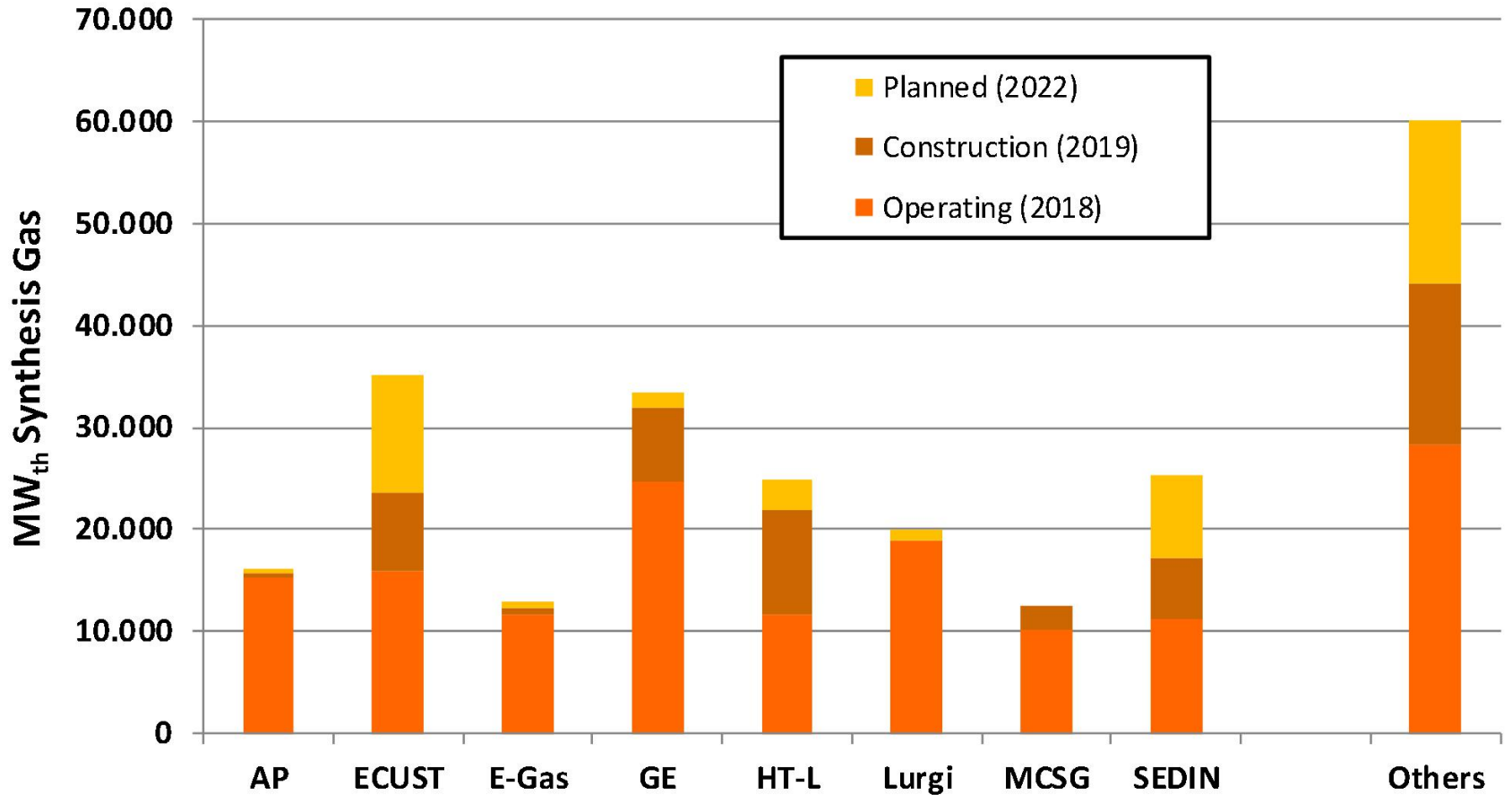


装置运行28家企业，74台气化炉
国内外广泛应用



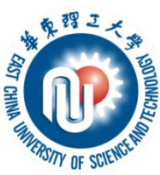
三、多喷嘴煤气化技术进展——应用情况

Gasification by Technology – Coal Feed Only



Source: GSTC Database, 2018

煤气化技术产能世界第一



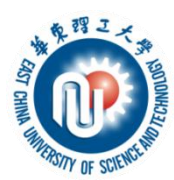
三、多喷嘴煤气化技术进展——最新进展

4000吨级超大型水煤浆气化工艺 ——国家“十三五”重点专项

所属项目：大规模水煤浆气化技术开发及示范

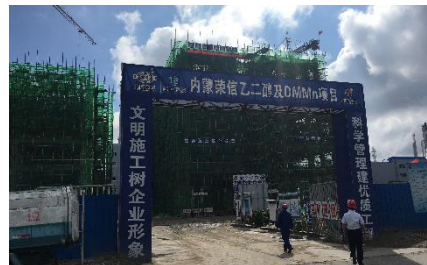
课题名称：超大规模水煤浆气化放大关键技术
及污水减量化研究

围绕高温高压下湍流混合与复杂气化反应的相互作用的复杂科学问题研究，掌握实现水煤浆气化过程高效化、大型化的基本理论指导原理。



三、多喷嘴煤气化技术进展——最新进展

4000吨级水煤浆气化装置建设现场



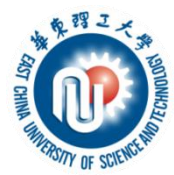
渣水处理框架

气化及净化框架

煤浆泵房

磨煤框架



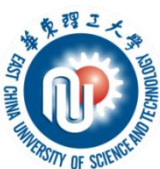


三、多喷嘴煤气化技术进展——最新进展



2018年12月三台气化炉到厂
2019年1月三台气化炉吊装就位
预计2019年底投入运行





三、多喷嘴煤气化技术进展——最新进展

废锅-激冷型水煤浆气化技术

采用废锅-激冷流程，辐射废锅可回收相当于原料煤热值8~10%的能量，用于产生高压蒸汽，作动力蒸汽或驱动透平，可以大大降低动力煤消耗，从而明显降低系统的能耗。合成气水气比能满足后工序部分变换的要求。

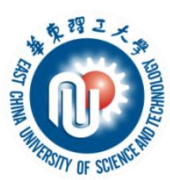
提高煤炭资源利用效率

实现热量回收

满足煤基多联产、IGCC发电

适合F-T合成、甲醇、SNG等煤化工装置



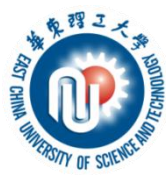


三、多喷嘴煤气化技术进展——最新进展



废锅-激冷型 水煤浆气化技术





三、多喷嘴煤气化技术进展——最新进展

项目		单位	设计煤种
工业分析	M_t	wt%	15.28
	M_{ad}	wt%	8.23
	A_d	wt%	7.05
	V_d	wt%	31.45
	FC_d	wt%	61.50
元素分析	C_d	wt%	70.20
	H_d	wt%	3.61
	N_d	wt%	0.98
	$S_{t,d}$	wt%	0.23
	O_d	wt%	17.93
成浆浓度		wt%	60
灰熔融性	DT	°C	
	ST	°C	
	HT	°C	
	FT	°C	1264

- 单台气化炉有效气(CO+H₂)
135000Nm³/h ;
- 煤量：2068TPD (干)
- 锅炉给水压力11.57MPa ,
温度215°C ;
- 给水压力11.57MPa、温度
105°C ;
- 过热蒸汽压力11.07MPa ,
温度540°C。

谢谢各位领导、专家！

