



## 强化传热传质实验室

强化传热传质实验室是以能源、化工、环境、冶金和机械电子等过程工业和新兴产业为研究背景，研究其中的热质传递和能量利用等关键热物理问题，形成了以高效强化传热传质、相变换热、多孔介质内多相流与传输、节能减排技术和热管技术为优势特色研实验室。

强化传热传质实验室目前建有含尘烟气余热回收实验台、钢渣离心粒化实验台、烟气余热深度回收实验台、高温熔渣液滴撞面可视化实验台、二氧化碳静态平衡吸收实验台、吸收/吸附法捕集分离二氧化碳性能测试实验台、喷雾冷却实验台等系统；拥有式干涉纹影仪、二氧化碳红外气体分析仪、高速摄影仪、安捷伦数据采集仪等仪器设备。形成了实验元件/吸收剂制备-实验及数拟研究-传递机理和系统分析优化的完整科研系统。

强化传热传质实验室现有教授4名，在读博士研究生5名，在读硕士研究生24名。近年来承担了国家重点研发计划项目2项、重点基础研究发展计划项目课题1项、国家自然科学基金项目4项、省部级项目及企业合作项目10余项，近五年发表SCI论文27篇权发明专利8项。

## 主要研究方向

中低温含尘烟气余热回收，液态熔渣高效余热回收与资源化利用技术，吸收/吸附法捕集分离烟气二氧化碳热质传递机理及特性，液滴凝固相变传热机理及特性，微纳复合表面结构强化相变换热技术。



## 主要科研项目

- 国家重点研发计划项目 (No. 2017YFB0603600)：液态熔渣高效热回收与资源化利用技术
- 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFB0601100)：工业含尘废气余热回收技术
- 国家重点基础研究发展计划 (No.2012CB720400)：基于物料品质调控的高温熔渣余热回收能质传输机理
- 国家自然科学基金面上项目 (NO.51676022)：电场力作用下液滴撞击过冷环境中发热体表面凝固相变传热机理及特性
- 国家自然科学基金面上项目 (No. 51576022)：多级有序结构柔性颗粒固定床内含湿混合气体热质传递及吸脱附特性
- 国家自然科学基金面上项目 (No.51276205)：功能离子液体复合工质降膜法吸收/解吸CO<sub>2</sub>过程气液两相界面现象及传递强化研究
- 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 50906102)：喷雾蒸发过程中近壁场两相流动及蒸发界面液固耦合作用特性
- 重庆市自然科学基金项目(No. CSTC2011JJA90015)：微毛细结构表面的喷雾相变冷却传热特性研究
- 重庆市自然科学基金面上项目(No. CSTC,2009BB6212)：燃料电池非均匀毛细多孔扩散层内含相变现象两相流动热质传输特性
- 中央高校基本科研业务费自然科学类面上项目 (No. CDJZR12140035)：降膜化学吸收捕集CO<sub>2</sub>气液两相界面现象及传递特性研究
- 中央高校基本科研业务费自然科学类创新专项 (No. CDJXY145501)：多级孔隙结构堆积床内含湿CO<sub>2</sub>混合气吸脱附机制及特性

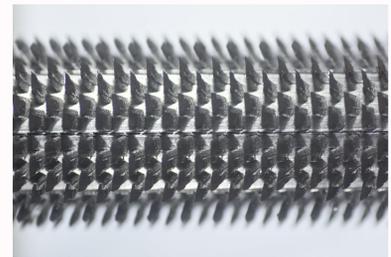




# 中低温含尘烟气余热深度回收技术

## 一、中低温含尘烟气余热深度回收技术简介

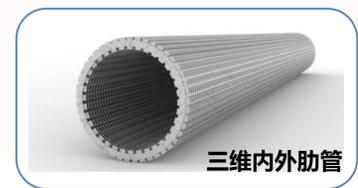
工业排放的烟气大多处于中低温范围，且含有大量的飞灰。中低温烟气普遍存在能量密度低，余热回收困难，管道磨损腐蚀和飞灰沉积严重影响换热等问题。为了提高中低温烟气余热回收率，各种强化换热管如螺旋翅片管、H型翅片管等在工业中获得一定应用，但此类换热管实际应用中由于积灰严重，强化换热受到限制。三维肋管具有肋排列和肋结构调整方便，传热布置灵活，近壁面流体扰动强烈等特点，因此强化换热的同时还可降低壁面的结垢，具有一定的抗积灰能力，是实现中低温含尘烟气余热连续高效深度回收的先进技术。



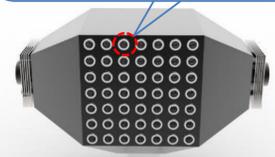
钢质三维肋传热管

## 二、中低温含尘烟气余热深度回收研究思路

本课题组重点研究基于三维拓展表面强化换热技术的含尘烟气余热连续高效深度回收技术。通过建立三维拓展表面多相流动传热模型，获得多物理场作用下换热表面磨损腐蚀、多相流动和换热特性；结合实验研究揭示肋结构尺寸、工质物性、流态等对三维内外肋管流动及换热特性的影响规律，获得换热和流动阻力实验关联式；提出完整的三维内外肋管换热器设计理论计算方法；结合表面处理工艺和三维可调肋结构，研发新型三维拓展表面处理工艺，提出协同防积灰、抗磨损、耐腐蚀的三维拓展换热表面处理技术；基于参数化CAD换热器设计方法，提出换热器一体化设计和制造加工工艺，从而获得中低温含尘烟气高效连续余热深度回收利用技术。



三维内外肋管



气-气换热三维肋管换热器

## 三、主要研究内容

### 1. 空气横掠三维肋管流动阻力及换热特性

#### 三维肋管流动换热性能测试平台

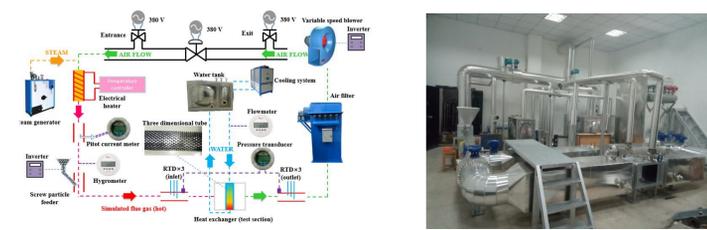


图1 实验系统示意图



图2 实验系统实物图

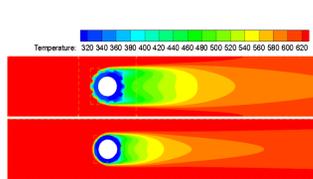


图6 光管和三维肋管温度场分布云图

#### 三维肋管流动换热特性数值模拟

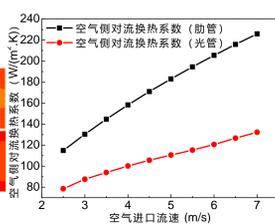


图7 三维肋管对流换热系数

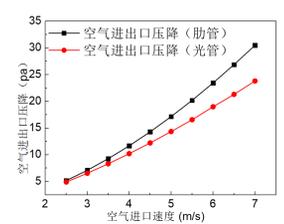


图8 空气横掠三维肋管压降

#### 三维肋管流动换热特性及肋结构影响

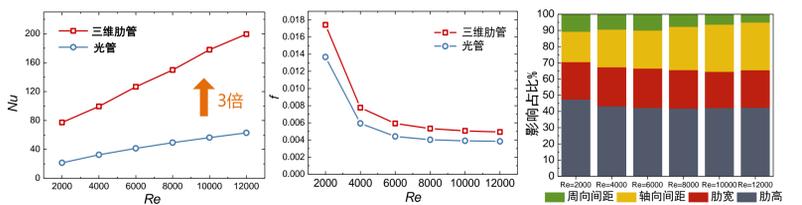


图3 三维肋管强化换热特性

图4 三维肋管流动阻力特性

图5 肋结构参数对换热性能影响

#### 三维肋管管束换热特性数值模拟

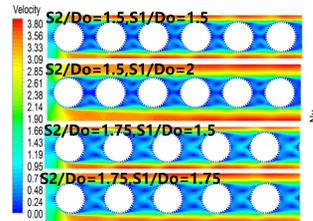


图9 三维肋管管束温度场云图

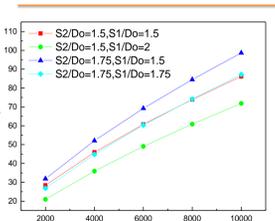


图10 管束结构对换热性能的影响

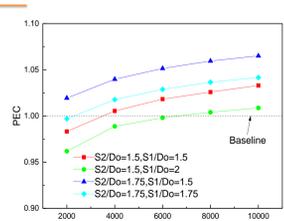


图11 管束结构对综合换热性能的影响

### 2. 高不凝性气体含量下烟气余热深度回收研究

#### 不凝性气体对水蒸气凝结换热影响实验

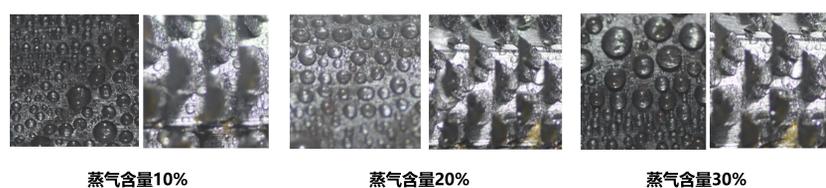


图12 实验系统示意图

图13 实验系统实物图

图14 蒸汽含量的影响

#### 含不凝性气体的水蒸气凝结换热可视化实验



蒸气含量10%

蒸气含量20%

蒸气含量30%

图15 不同蒸汽含量下凝结情况

### 3. 烟气横掠三维肋管磨损和积灰特性研究

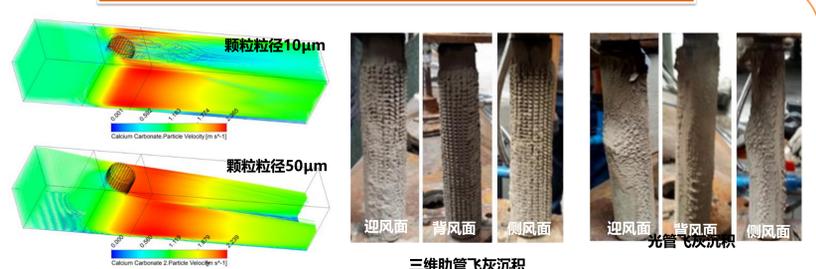


图16 不同颗粒粒径的颗粒轨迹图

图17 不同位置飞灰沉积量

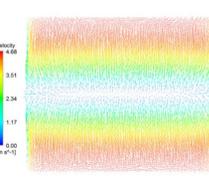


图18 迎风侧速度矢量图

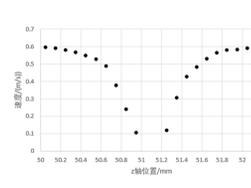


图19 迎风侧速度分布图

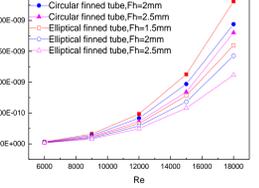


图20 肋高对磨损率的影响



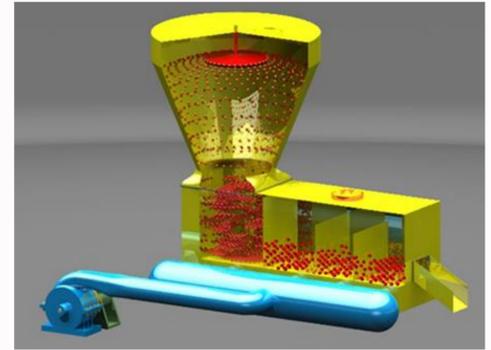
Welcome to CQU



# 液态熔渣高效余热回收与资源化利用技术

## 一、液态熔渣离心粒化余热回收技术简介

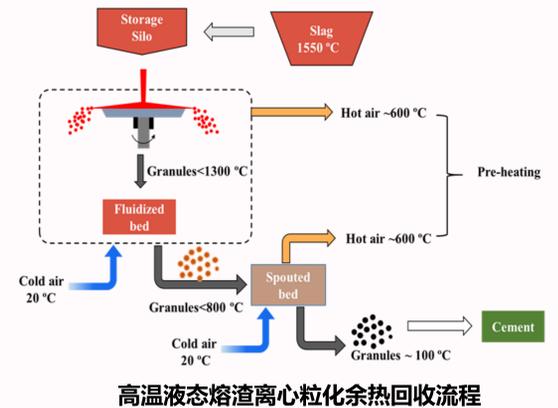
冶金液态熔渣排渣量大且不连续、温度高、成分复杂、物性变化大，现有水淬工艺造成水资源浪费、余热损失、环境污染等问题，因此液态熔渣干法余热回收和资源化利用对节能减排战略的实施具有重要作用。干法技术中的离心粒化余热回收技术利用离心力得到细小颗粒，并采用冷空气急冷，得到高品质渣粒。此方法具有装置简单紧凑、能耗低、粒化品质高、余热回收率高的优点，成为了最具发展潜力的干式粒化方法。



液态熔渣离心粒化余热回收技术

## 二、液态熔渣离心粒化余热回收技术研究思路

本课题组重点研究基于物料品质调控的高温液态熔渣离心粒化余热回收技术。针对液态熔渣离心粒化过程，研究高温熔渣的离心粒化特性，实现了粒化过程的强化；针对半熔融粒化颗粒撞击壁面过程，研究了熔渣颗粒撞击固壁动力学特性及换热特性，实现壁面防粘结。针对液态熔渣的冷却相变过程，研究了液态熔渣的相变换热和物相演变耦合作用机制，实现物料品质的调控；针对余热回收过程，研究了颗粒群的运动和换热特性，实现了高效热回收。相关成果将突破技术瓶颈，为液态熔渣离心粒化余热回收技术的工业化应用提供了理论和技术支撑。



高温液态熔渣离心粒化余热回收流程

## 三、主要研究内容

### 1. 液态熔渣离心粒化特性

#### 离心粒化机理

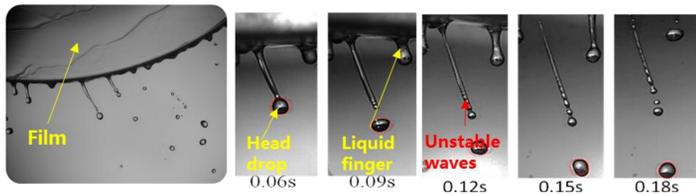


图1 液滴的形成过程

#### 高温熔渣离心粒化及其强化技术

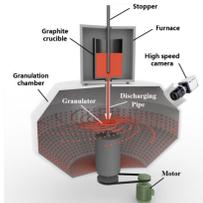


图2 实验示意图

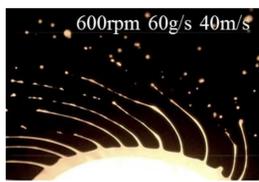


图3 熔渣离心-气淬粒化

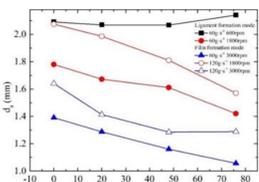


图4 气淬风的影响

### 2. 熔渣颗粒撞击壁面动力学行为与换热机制

#### 熔渣液滴撞击壁面动力学行为

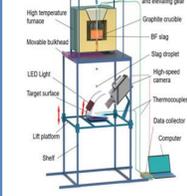


图5 实验系统示意图

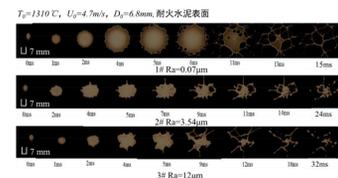


图6 熔渣液滴撞击壁面铺展特性

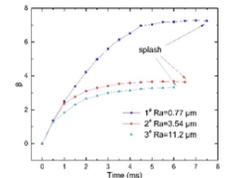


图7 铺展因子变化规律

#### 熔渣颗粒撞击壁面换热特性

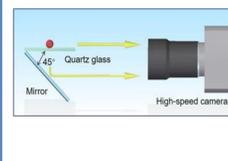


图8 实验原理示意图

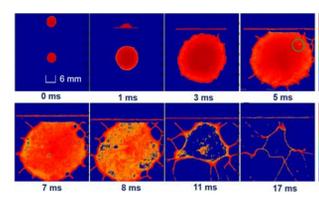


图9 撞击壁面过程表面温度演化

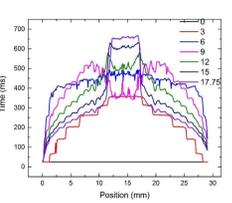


图10 壁面温度分布

### 3. 液态熔渣的相变换热和物相演变机理

#### 液态熔渣相变冷却特性



图11 实验系统

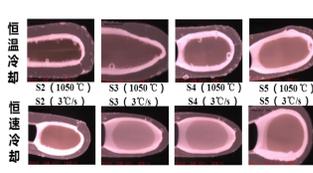


图12 热丝实验

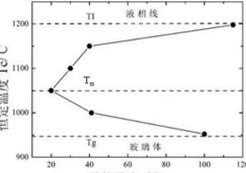


图13 恒温冷却曲线

#### 高温物料相变冷却与物相结构演变特性

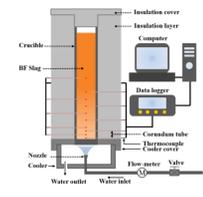


图14 实验原理示意图

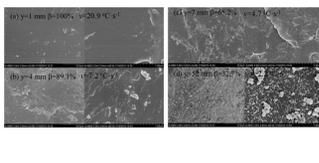


图15 不同位置处SEM图谱

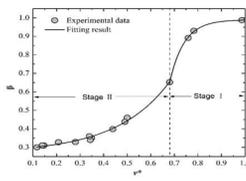


图16 晶体含量变化

### 4. 颗粒群多相流动和相变传热传质机理及特性

#### 颗粒群流动特性



图17 实验原理图



图18 颗粒流态化

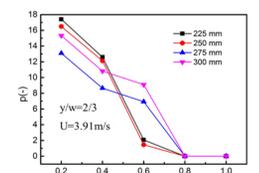


图19 颗粒分布

#### 颗粒群换热特性数值模拟

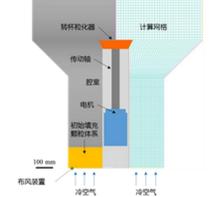


图20 物理模型

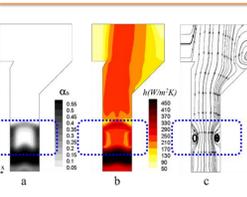


图21 换热系数及浓度分布

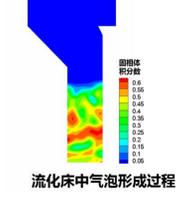


图22 气泡形成过程





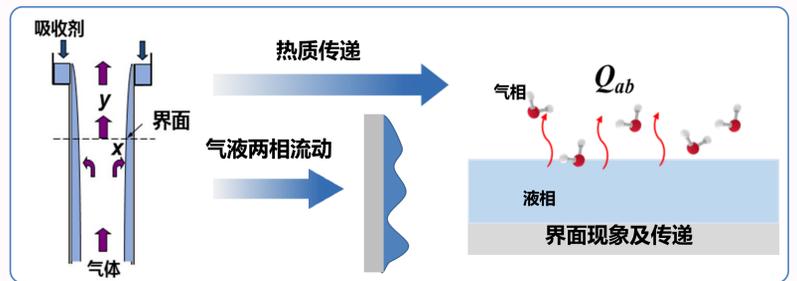
# 烟气CO<sub>2</sub>捕集分离技术

## 一、烟气CO<sub>2</sub>捕集分离技术简介

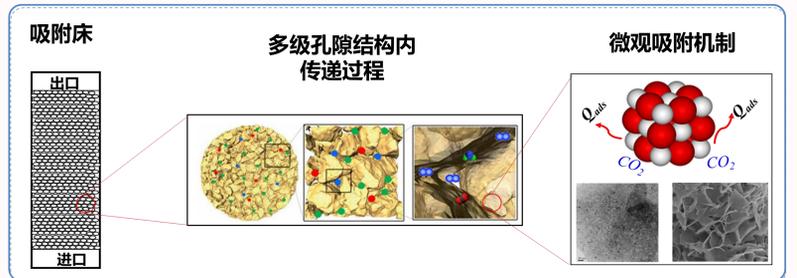
我国电力生产是煤炭消耗和CO<sub>2</sub>排放量最大的行业，因此针对电厂烟气中CO<sub>2</sub>进行捕集分离是缓解CO<sub>2</sub>排放危机的有效手段。目前常用的捕集分离方法包括吸收/吸附法、膜分离法、低温蒸馏法及生物固碳法等，其中吸收/吸附法工作温度区间大，易于连续处理大量的CO<sub>2</sub>分压低的混合气，是电厂烟气中CO<sub>2</sub>捕集分离极具前景技术之一。现有吸收/吸附法捕集分离烟气中CO<sub>2</sub>存在能耗高、热质传递受限、捕集过程与原能量利用过程简单叠加等问题。因此研究吸收/吸附过程热质传递机理及特性，提出基于多过程和多场耦合强化传递方法和系统集成理论，为烟道气CO<sub>2</sub>高效低能耗捕集技术的发展及应用奠定基础，对工业节能减排具有重要作用。

## 二、烟气CO<sub>2</sub>捕集分离物理过程及研究方向

本课题组重点研究吸收/吸附法捕集分离烟气CO<sub>2</sub>过程热质传递特性及强化方法。首先通过开发高性能吸收/吸附材料，研究含湿CO<sub>2</sub>混合气体组分变化及捕集分离循环过程热质传递机理及特性，获得竞争/促进吸收/吸附行为预测模型和热力学模型。其次构建小型吸收/吸附反应单元，结合介观尺度和REV尺度数值模拟研究方法，研究气体组分、工质流态、材料物性、界面对流形态、孔道结构等对质量扩散、热扩散、CO<sub>2</sub>吸收/脱除速率等动力学和热力学参数影响规律，获得介观尺度和REV尺度的热质传递及吸/脱附模型。最后开展降膜式吸收/解吸反应器和颗粒堆积固定吸附床层次的含湿CO<sub>2</sub>混合气体在反应器内流动及热质传递特性，获得多过程耦合、非稳态演化过程的流动和热质传递理论，提出强化传递方法和高效吸收/吸附反应器构建方法。从而获得高效CO<sub>2</sub>捕集分离技术，促进吸收/吸附技术和节能减排技术的发展。



降膜反应器内CO<sub>2</sub>吸收物理过程



颗粒堆积床内CO<sub>2</sub>吸附物理过程

## 三、主要研究内容

### 1. 高性能吸收/吸附材料制备与性能研究

#### 液相吸收剂制备及性能研究

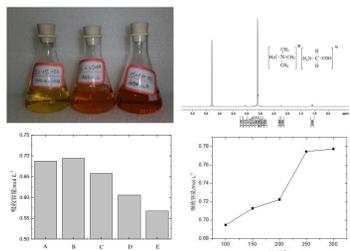


图1 [N<sub>111</sub>][Gly]复配吸收剂及其吸收性能

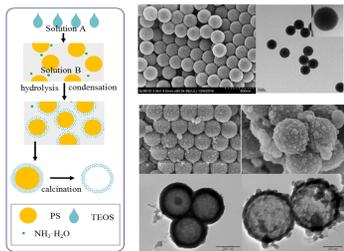


图2 中空硅基球形吸收剂制备

#### MgO吸附剂制备及性能研究

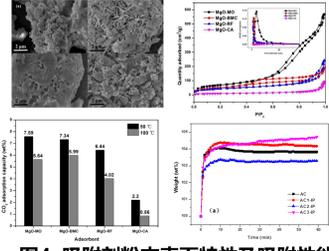


图4 吸附剂粉末表面特性及吸附性能

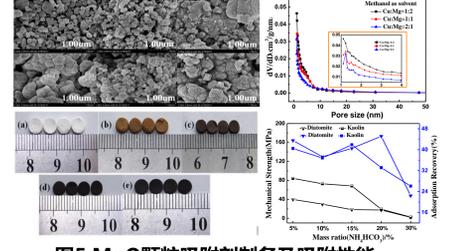


图5 MgO颗粒吸附剂制备及吸附性能

#### MOF材料吸附剂制备及性能研究

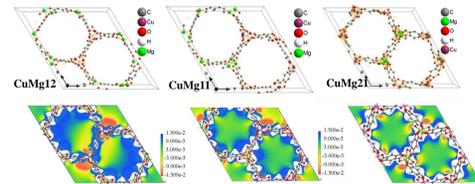


图6 Cu掺杂Mg-MOF-74吸附剂晶格结构与静电势

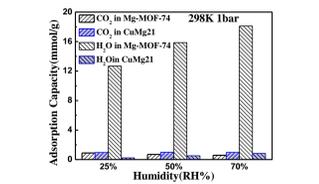


图7 双金属掺杂MOF材料吸附性能

### 2. 反应单元内热质传递及CO<sub>2</sub>吸/脱附特性研究

#### 吸收剂降膜铺展特性

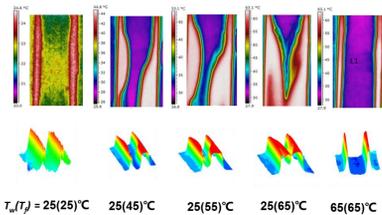


图8 均匀冷却条件下液膜铺展特性

#### 气液界面现象及传递特性

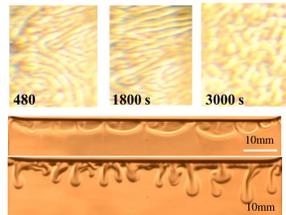


图9 吸收/解吸CO<sub>2</sub>过程气液界面现象

#### 降膜吸收流动及热质传递模型

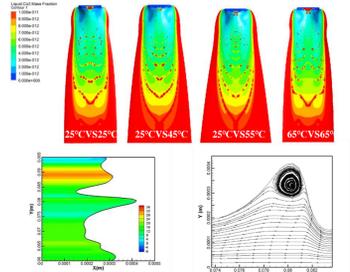


图10 非均匀温度场降膜吸收强化模拟

#### 吸附动力学模型及传质分析

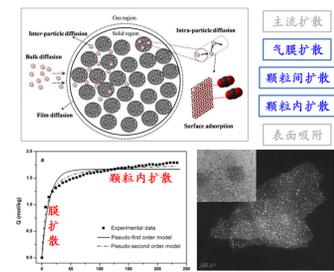


图11 吸附剂颗粒吸附动力学分析

### 3. 高效反应器构建及CO<sub>2</sub>捕集分离流程模拟与优化

#### 堆积床内多组分气体CO<sub>2</sub>吸/脱附特性

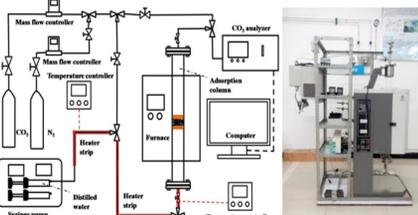


图12 多组分气体CO<sub>2</sub>吸/脱附系统

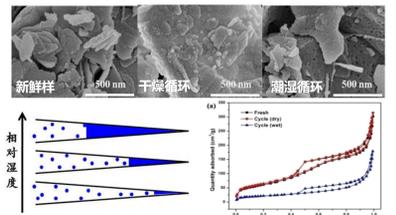


图13 含湿混合气体CO<sub>2</sub>吸/脱附循环特性

#### 高效反应器设计

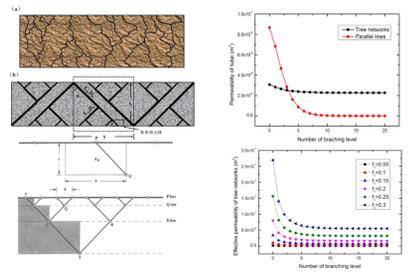


图14 树形结构吸附反应器设计

#### 捕集系统流程模拟与优化

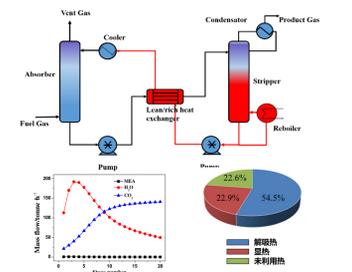


图15 胺基溶液CO<sub>2</sub>捕集流程模拟优化



Welcome to CQU



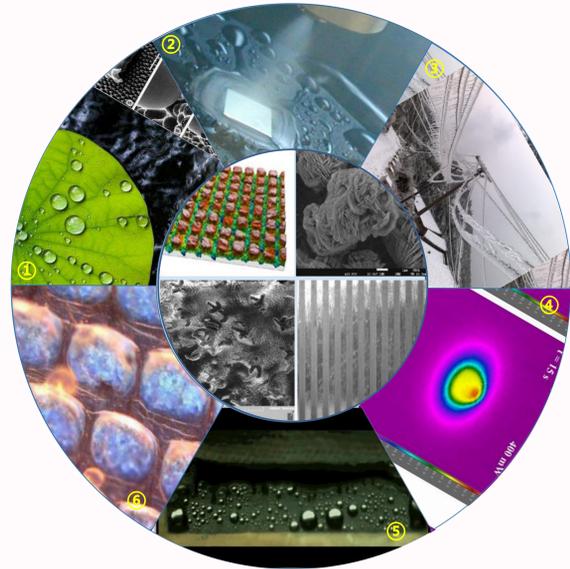
# 微纳复合表面结构强化相变换热技术

## 一、微纳复合表面结构强化换热简介

微纳米材料因其具有表面效应、体积效应等特征，使得其表面的沸腾和凝结换热得到强化，结合微纳复合结构的相变换热技术成为解决高热流密度散热需求的关键技术。通过对表面微纳结构的设计可以实现表面润湿性调控、表面能梯度化以及生物表面的结构仿生等，以此实现对流体运输的操控和相变传热过程的强化。相应发展起来的技术可以应用到电子器件散热、储能、各种工业换热器以及输电线防结冰等重要的领域。

## 二、微纳复合表面结构强化换热应用领域介绍

微纳复合表面的界面效应不仅涉及了化学、物理和生物材料等学科之间的相互交叉和渗透，而且对蒸发和凝固过程、油水分离、微流反应器中的多相流动与热质传递有着重要意义。耦合界面作用的多相流动与热质传递机理的研究为能源和微流控等领域的技术研发奠定了坚实的理论基础，主要技术包括：高热流密度电子器件的喷雾相变冷却技术、高压输电线的防结冰和除冰技术、换热器蒸发和凝结强化换热技术、表面自清洁技术等，如右图所示。



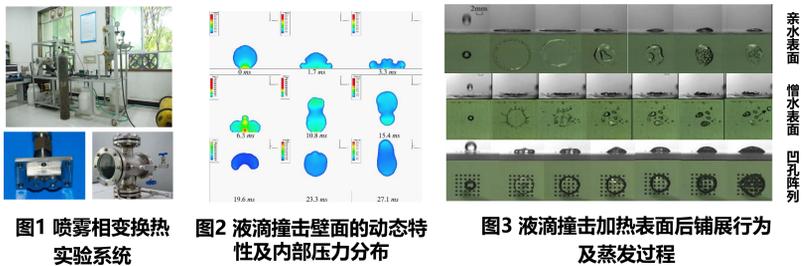
- ① 自清洁表面
- ② 喷雾相变冷却
- ③ 固壁表面结冰
- ④ 表面蒸发
- ⑤ 滴状凝结换热
- ⑥ 抗菌表面

基于界面效应的多相流动与热质传递及其强化应用领域

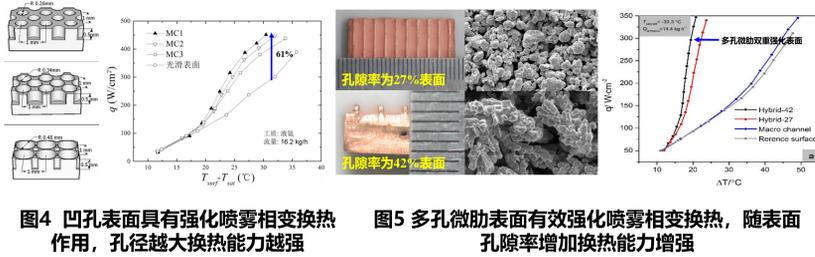
## 三、主要研究内容

### 1. 喷雾相变传热及液滴运动特性研究

#### 喷雾过程中液滴动态行为及传热特性

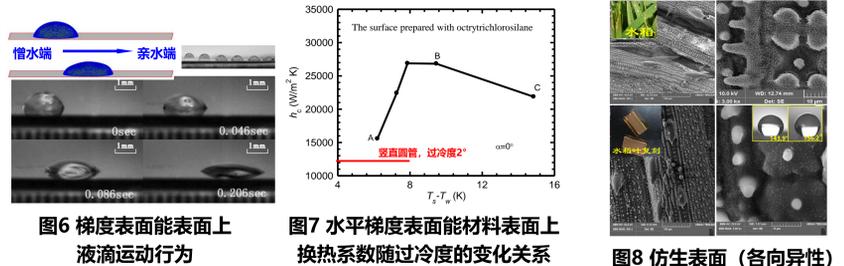


#### 喷雾相变传热特性及强化

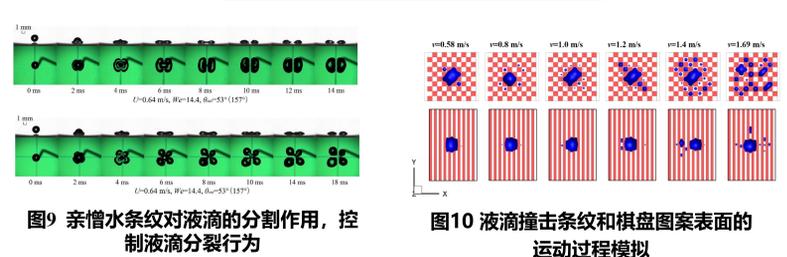


### 2. 功能材料表面上液滴运动及传热特性研究

#### 梯度表面能材料表面上液滴运动及凝结换热特性



#### 亲憎水间隔条纹对液滴运动行为的影响



### 3. 低温壁面上液滴凝固相变特性研究

#### 液滴的凝固相变传热特性研究

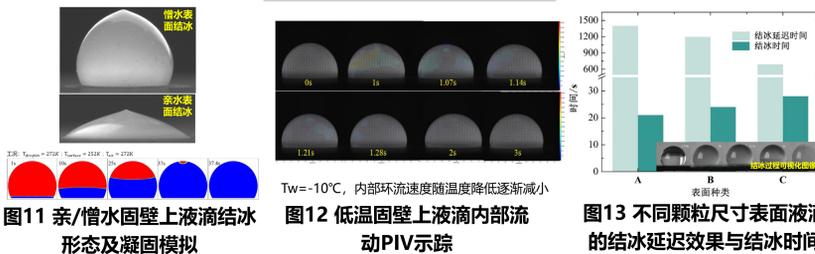


图13 不同颗粒尺寸表面液滴的结冰延迟效果与结冰时间

#### 液滴撞击过冷超疏水壁面的动态特性

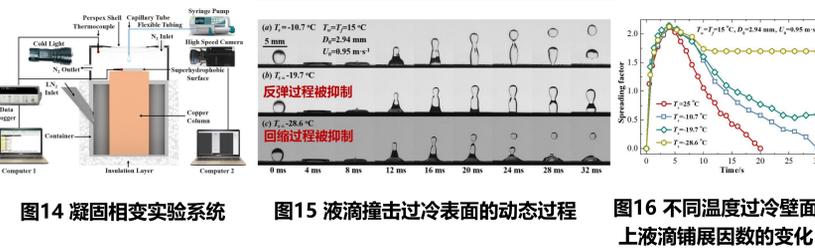
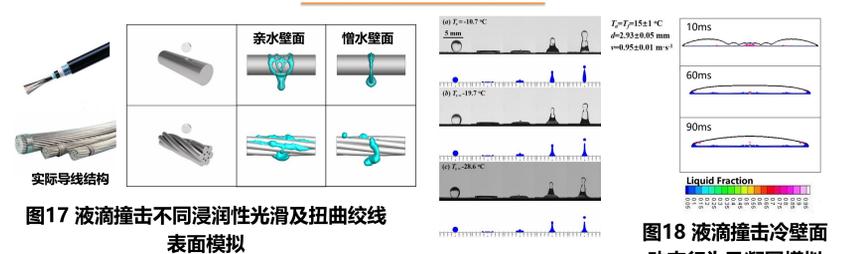


图16 不同温度过冷壁上液滴铺展因数的变化

### 4. 电场作用下液滴运动及凝固特性研究

#### 撞击液滴运动及凝固特性



#### 电场作用下极板上液滴的运动特性

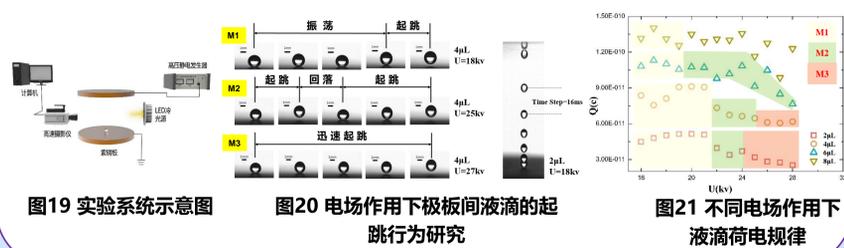


图21 不同电场作用下液滴荷电规律



Welcome to CQU