

大连化物所国际英才培养计划申请表

姓 名	郭强	性 别	男	出生年月	1992 年 5 月
所在部门	DNL1206	博士毕业生 <input checked="" type="checkbox"/> 博士后 <input type="checkbox"/> 职工 <input type="checkbox"/>			
申报项目类别	成才项目 <input type="checkbox"/> 优秀青年博士人才入选时间：_____年___月				
	育才项目 <input checked="" type="checkbox"/> 拟毕业（出站）时间： 2019 年 6 月				
	助才项目 <input type="checkbox"/> 获得国家(院)公派项目时间：_____年___月				
拟留学期限	2019 年 9 月 至 2022 年 9 月（共计 36 个月）				
拟合作专家	Christopher M. Boyce				
拟留学国家	美国	拟留学单位	Columbia University (哥伦比亚大学)		
联系方式	电话：18242067151 邮箱： guoqiang@dicp.ac.cn gq0502@foxmail.com				
<p>学习及工作经历：（从高中开始填起，内容包括时间、单位、学位、所学专业、从事专业、专业技术职务情况，时间段要连续，准确到月份，在职学习请注明）</p> <p>2007.09——2010.06 山西省实验中学 高中，理科</p> <p>2010.09——2014.07 云南大学 工学学士，化学工程与工艺</p> <p>2014.09——2015.07 中国科学院大学 研究生课程学习（直博，化学工程）</p> <p>2015.08——2019.06 中国科学院大连化学物理研究所 直博，化学工程</p>					

如内容较多，本栏目填不下时，可另纸接续（下同）。

主要学术成就、科技成果及创新点：

气固流化床反应器因具有传质传热效率高等优点而被广泛应用于多个过程工程行业，但由于涉及的颗粒两相流流动复杂（颗粒流曾和湍流问题一道入选了 *Science* 杂志在 2005 年创刊 125 周年之际列举的人类理解还远远不够的 125 个问题），迄今为止，其操作和放大还依赖于经验，这不可避免地带来了效率低，高能耗及高污染的问题。因此，研究气固流化床流体力学行为对深入理解其流动规律，进而指导操作和放大具有十分重要的意义。

申请人攻读博士学位期间，在叶茂研究员和刘中民院士两位导师的指导下主要从事气固流化床反应器的测量和模拟研究工作，研究内容主要围绕与英国 University of Manchester 的 Wuqiang Yang (*IEEE Fellow*) 教授国际合作项目展开，致力于将电容层析成像技术用于工业流化床反应器的在线测量。具体地，申请人从在线重构两相分布和在线监测关键流体力学参数两方面入手研究了电容层析成像在线测量气固流化床方法；基于提出的在线测量方法研究了 Geldart A 类颗粒散式流化特性，首次实验证实该流域同时存在类固状与类流状两种状态；结合计算流体力学模拟 (CFD) 和大数据及机器学习等概念提出一种新的多相流测量范式。截至目前，申请人已一作发表 SCI 论文四篇，其中三篇发表在传统化工三大刊物 (2 篇 *AIChE Journal* 及 1 篇 *Industrial & Engineering Chemistry Research*)，另有一篇发表在测量领域重要刊物 *IEEE* 测量汇刊 (*IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*)。代表性的研究成果及创新点如下：

1、电容层析成像在线重构气固流化床两相分布

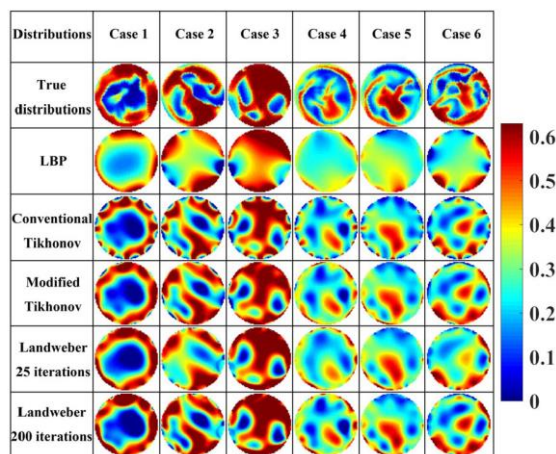


图 1. 不同算法重构的气固流化床两相分布

电容层析成像 (Electrical Capacitance Tomography, ECT) 是一类过程层析成像技术，测量原理与医学上使用的 X 射线 CT 及核磁共振成像 (MRI) 类似。气固流化床反应器中的气相和固相颗粒具有不同的介电常数，通过在反应器外围布置多电极阵列式传感器，当测量截面气相和固相颗粒两相分布或者浓度发生变化时，传感器电极对之间的电容值也会发生变化，通过相应的图像重构算法，即可从测得的电极对之间的电容值获得测量截面的两相分布信息。与其它过程层析成像技术相比，电容层析成像的优点在于测量速度快，成本低廉及发

展成熟，缺点在于由于软场测量特性的限制，图像分辨率较低，且要获得较为满意的图像只能采用耗时的迭代类算法，因此现阶段电容层析成像在线测量气固流化床还存在挑战。

申请人通过计算流体力学模拟和电场仿真建立了电容层析成像测量流化床虚拟实验以评估不同算法重构流化床两相分布的表现，并比较了两种常用的可用于在线重构的非迭代算法，即线性反投影算法和 Tikhonov 正则化算法。研究发现线性反投影算法只能提供定性的结果，但在边壁处成像质量较高，而 Tikhonov 正则化算法在中心区域成像质量高，但在边壁处有伪影的出现。结合敏感场分布，发现 Tikhonov 正则化算法成像伪影的存在与电容层析成像的软场特性有关，而线性反投影算法因为有归一化的操作，在边壁处没有伪影。受此启发，申请人将类似的归一化操作引入以修正 Tikhonov 正则化算法，结果证实该改进算法可以在线获得与 Landweber 迭代算法质量相当的图像，即可在线高质量重构气固流化床两相分布。以上研究结果发表于传统化工三大刊物之一的 *AIChE Journal* (*AIChE Journal*. 2018, 64: 29-41. DOI: 10.1002/aic.15879)。

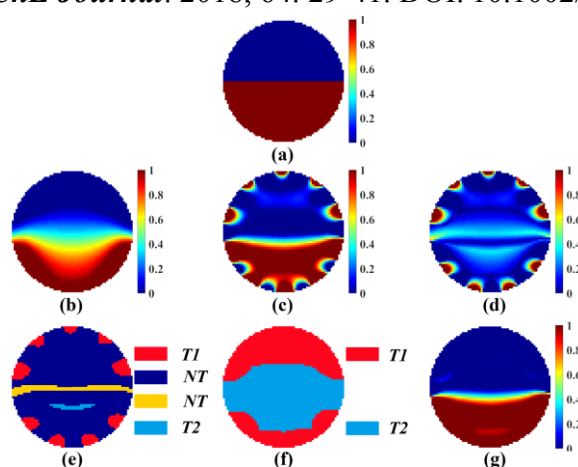


图 2. 图像分割组合原理 (a.真实分布; b.线性反投影算法重构的结果; c. Tikhonov 正则化算法重构的结果; d.图像 b 和 c 之间像素点灰度差值的绝对值; e.图像 d 阈值处理及分区结果; f.图像 e 终端区域的确定; g.最终通过图像分割合并的图像)

从以上的结果可以看出线性反投影算法和 Tikhonov 正则化算法重构气固流化床两相分布的结果在不同区域具有互补性，然而通过简单的灰度加权叠加或者图像堆叠并不能从根本上提高图像质量。申请人与瑞士 University of Lausanne (洛桑大学) 的 Gregoire Mariethoz 教授合作，将图像分割用于组合这两种算法重构的结果，最终合并的图像质量满意，并满足在线重构的要求。以上研究结果发表于测量领域重要刊物 *IEEE* 测量汇刊 *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (*IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019, In Press. DOI: 10.1109/TIM.2019.2905282)。

2、电容层析成像在线监测气固流化床关键流体力学参数

为方便流型鉴别，流化质量分析，故障诊断及后续的反馈控制，有必要监测流化床反应器内的关键流体力学参数，如平均固含率，气泡大小及数量等。传统上，基于电容层析成像获得这些参数需要经过繁杂的图像重构和后处理两个步骤，难以用于在线。而且尽管流化床气固两相流动呈现出典型的非线性混

沌行为，很多流型实际上是反复出现的，因此实际测量过程中涉及大量重复计算。基于这一现状，申请人提出采用机器学习开展数据驱动型的关键参数预测模式。首先，通过气速线性增加的方式开展高通量实验以在短时间内采集遍历了多种可能流型的训练样本。之后，在采集的样本上训练从原始电容测量值到关键流体力学参数的映射关系，获得的机器学习模型即可跳过传统方式需要的图像重构和后处理过程，而直接从测量值获得需要的关键参数。实验结果证实通过以上方式训练的机器学习模型在预测平均固含率及等效气泡大小上表现出良好的预测性能和通用性。以上研究结果发表于传统化工三大刊物之一的 *AIChE Journal* (*AIChE Journal*. 2019, 65: e16583. DOI: 10.1002/aic.16583)，并得到了审稿人的高度评价，其中一位匿名审稿人认为“**I think the underlying idea in this paper is exciting and potentially of significant interest to academia and industry. Indeed, if their approach can be developed and is reliable, it could take ECT from a somewhat niche tool to something that is widely used in industry.**”，即认为申请人的这项工作有很大的潜力将电容层析成像用于工业过程的测量。

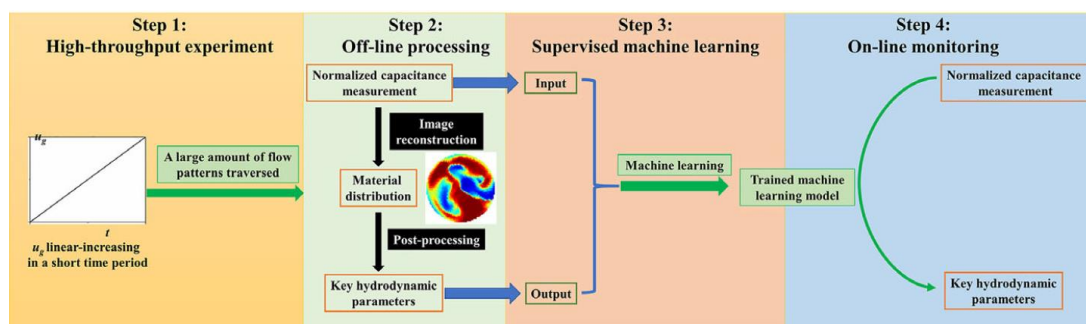


图 3. 用于监测流化床关键流体力学参数的机器学习方法流程图

3、Geldart A 类颗粒类固状与类流状散式流化的实验证实

气固流化床的流化特性和颗粒属性密切相关，Geldart 颗粒分类是流态化领域使用比价广泛的用于预测不同颗粒流化特性的分类标准，其中的 Geldart A 类颗粒（粒径在 30-100 μm ，密度在 1000-2000 kg/m^3 ）流化性能优异，表现出床层膨胀高及气泡小等优点，因此广泛应用于催化等过程的流化床反应器，催化裂化（FCC）及甲醇制烯烃（MTO）催化剂颗粒都是典型的 Geldart A 类颗粒。和其它类型的颗粒不同，Geldart A 类在气速介于最小流化速度和最小鼓泡速度之间有一段床层均匀膨胀且没有明显鼓泡的散式流化流域。长久以来，关于这一流域的状态及稳定性机理一直都存在争议。申请人结合电容层析成像，高速摄像机及压力脉动首次证实该流域同时存在类固状及类流状两种状态：当气速介于最小流化速度和一临界速度时，颗粒保持静止，床层内有屈服应力存在；而当气速超过这一临界速度但还没有达到最小鼓泡速度时，颗粒开始脉动，表现为类似流体的特征，床层的屈服应力消失。这两个状态的证实揭示了流态化过程的转变，并对工业循环流化床颗粒在立管流化条件的确定具有指导意义。以上研究结果发表于传统化工三大刊物之一的 *Industrial & Engineering Chemistry Research* (*Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2018, 57: 2670-2686. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b04559)。

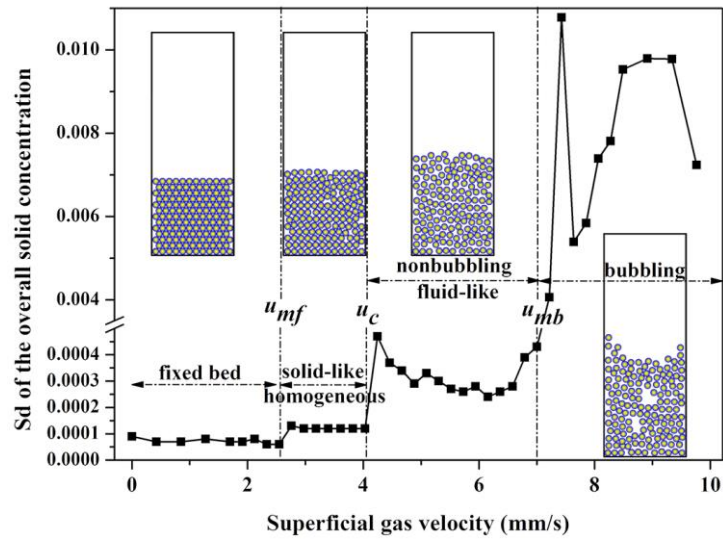


图 4. Geldart A 类颗粒不同流型示意图

4、多相流测量新范式

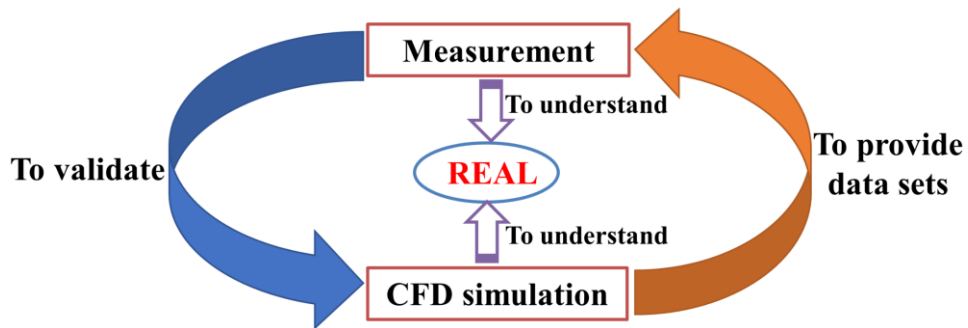


图 5. CFD 模拟和实验测量用于理解气固流化床流体力学行为的相对角色

实验测量和计算流体力学模拟是研究气固流化床等多相流体系的两种重要方法。传统上，实验测量的结果只用来验证计算流体力学模拟的准确性。而实际上，实验测量也有误差存在，比如电容层析成像的缺点就在于图像分辨率低。通过申请人提出的电容层析成像测量气固流化床虚拟实验，计算流体力学模拟也可以提供大规模流化床流型先验数据，并借助大数据及机器学习等概念用于提高电容层析成像测量流化床等多相流体系的准确性，特别地，天气预报等过程广泛采用的数据同化有望用于这一领域。实验测量和计算流体力学模拟两种方法相互促进组合构建的闭路有望建立一种新的范式用来更好地理解多相流内部真实的流动行为。以上结果现正在总结当中，拟整理为 Perspective 发表。

主要成果: (论文、著作、专利、承担参与项目、获各类奖励情况等)

期刊论文:

- (1) **Qiang Guo**, Xue Li, Baolin Hou, Gregoire Mariethoz, Mao Ye, Wuqiang Yang, Zhongmin Liu. A Novel Image Reconstruction Strategy for ECT: Combining Two Algorithms with a Graph Cut Method, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019, In Press.
- (2) **Qiang Guo**, Mao Ye, Wuqiang Yang, Zhongmin Liu. A Machine Learning Approach for Electrical Capacitance Tomography Measurement of Gas - Solid Fluidized Beds, *AIChE Journal*. 2019, 65: e16583.
- (3) **Qiang Guo**, Shuanghe Meng, Dehu Wang, Yinfeng Zhao, Mao Ye, Wuqiang Yang, Zhongmin Liu. Investigation of Gas-Solid Bubbling Fluidized Beds Using ECT with a Modified Tikhonov Regularization Technique, *AIChE Journal*. 2018, 64: 29-41.
- (4) **Qiang Guo**, Shuanghe Meng, Yinfeng Zhao, Likun Ma, Dehu Wang, Mao Ye, Wuqiang Yang, Zhongmin Liu. Experimental Verification of Solid-like and Fluid-like States in the Homogeneous Fluidization Regime of Geldart A Particles, *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2018, 57: 2670-2686.
- (5) Kai Huang, Shuanghe Meng, **Qiang Guo**, Mao Ye, Jingjing Shen, Tao Zhang, Wuqiang Yang, Zhongmin Liu. High-Temperature Electrical Capacitance Tomography for Gas-Solid Fluidised Beds, *Measurement Science and Technology*. 2018, 29: 104002.

申请专利:

- (1) 叶茂, **郭强**, 孟霜鹤, 张涛, 刘中民. 一种耐高温电容层析成像传感器, 发明专利, CN 201510967356.7, 2015-12-18.
- (2) 孟霜鹤, 叶茂, 黄凯, **郭强**, 申敬敬, 张涛, 刘中民. 一种内置电极式电容层析成像传感器, 发明专利, CN 201810432339.7, 2018-5-8.
- (3) 孟霜鹤, 叶茂, 黄凯, **郭强**, 申敬敬, 张涛, 刘中民. 一种耐高温信号传输线和一种耐高温电容层析成像传感器, 发明专利, CN 201810432328.9, 2018-5-8.

会议口头报告:

- (1) **郭强**, 叶茂, Wuqiang Yang, 刘中民. 自适应机器学习提高 ECT 在线测量气固流化床准确度. *第 11 届中国多相流测试学术会议*. 昆明, 中国, 8 月 22-26, 2018.
- (2) **Qiang Guo**, Shuanghe Meng, Yinfeng Zhao, Likun Ma, Mao Ye, Wuqiang Yang, Zhongmin Liu. Experimental Verification of Solid-like and Fluid-like States in Homogeneous Fluidization Regime of Geldart A Particles. In: *8th World Congress on Particle Technology*. Orlando, USA, April 22-26, 2018.
- (3) **Qiang Guo**, Shuanghe Meng, Mao Ye, Wuqiang Yang, Zhongmin Liu. A Novel

Calibration Method for Electrical Capacitance Tomography Applying in High-Temperature Gas-Solid Fluidized Bed Measurement. In: *10th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow*. Hong Kong, China, December 3-7, 2017.

参与的科研项目：

- (1) 科技部资助的国家重点研发计划重点专项（主持人：导师叶茂研究员），项目编号：2018YFB0604904.
- (2) 英国皇家学会资助的 Newton Advanced Fellowship（主持人：导师叶茂研究员），项目编号：NA140308.
- (3) 国家自然科学基金委资助的重大研究计划重点项目（主持人：导师叶茂研究员），项目编号：91334205.

参与的大型中试项目：

- (1) 2016 年 12 月，大连化物所长兴岛中试基地，甲醇甲苯制对二甲苯联产低碳烯烃流化床工艺放大，时长一个月.
- (2) 2015 年 12 月，大连化物所长兴岛中试基地，甲醇制丙烯（MTP）流化床工艺放大，时长一个月.

获奖情况：

- (1) 2018 年 6 月，获渤海化工研究生奖学金三等奖.
- (2) 2017 年 11 月，获博士研究生国家奖学金.
- (3) 2016 年 9 月，获辽宁省颗粒学会优秀论文奖.
- (4) 2016 年 6 月，获中国科学院大学“三好学生”荣誉称号.
- (5) 另外，本科期间曾获国家奖学金、宝钢奖学金、云南省优秀毕业生、全国大学生数学建模大赛赛区一等奖及第二届全国高校环保科技创意设计大赛银奖等奖项或荣誉.

派出后拟开展研究工作的计划（包括拟合作导师介绍，研究计划、方向，拟开展的研究内容和目标，如变更留学单位或合作导师，需重新提交计划并审批）：

申请人在攻读博士学位期间，主要采用电容层析成像技术研究气固流化床反应器的流体力学行为，该技术发展成熟且成本低廉，适用于工业过程的测量，但其最大缺点在于由于软场效应的限制，图像分辨率较低，只能获得一些宏观尺度上与两相分布有关的信息。因此，申请人希望在派出期间学习更先进的测量技术用于气固流化床反应器的测量。另外，申请人的博士课题主要关注气固流化床反应器内的流动，而没有涉及太多的化学反应过程。因此，申请人希望在派出期间也能同时研究流化床流动状态对反应器反应性能的影响。

在文献调研过程中，申请人注意到了核磁共振成像，该技术属硬场测量技术，空间分辨率远高于电容层析成像，已成为临床诊断与医学研究中的标准检测技术，但其测量速度慢的缺点限制了在气固流化床等多相流体系的应用。在 2017 年，瑞士 ETH Zürich（苏黎世联邦理工学院）的 Christoph Müller 与 Christopher M. Boyce 等发展了超快核磁共振成像技术，其时间分辨率达到了 3 ms。这一进展使得核磁共振成像技术可以用于表征气固流化床等多相流体系的动态行为。另外，核磁共振成像技术优于传统过程层析成像技术的地方还在于其同样可以用于测量温度分布及监测化学反应物种。因此，超快核磁成像技术能够满足申请人在派出期间的测量需求。

基于以上考虑，申请人拟与 Christopher M. Boyce 合作。Christopher M. Boyce 现为美国 Columbia University（哥伦比亚大学）化学工程系 Assistant Professor（助理教授）。Columbia University 是美国常春藤盟校之一，也是培养诺贝尔奖获得者最多的大学之一，在 2018 年 ARWU 全球大学学术排名中位列第 8 名，在 2018 年泰晤士报（Times）全球大学排名中位列第 12 名，在 2019 年 US News 全球大学排名中位列第 8 名。

拟合作导师介绍：

拟合作导师 Christopher M. Boyce 1989 年出生于美国，现为美国 Columbia University 化学工程系助理教授，其研究组现有博士后 1 名，博士研究生 2 名，硕士研究生 3 名。

受教育经历

2011.10-2014.12，英国 University of Cambridge（剑桥大学）

化学工程专业博士，Gates Cambridge Scholar（盖茨剑桥学者），2015 年 Danckwerts-Pergamon Prize for the best PhD thesis related to chemical engineering 获得者。

2007.09-2011.09，美国 Massachusetts Institute of Technology（麻省理工学院）

化学工程与物理专业学士。

研究工作经历

2018.01-今，美国 Columbia University（哥伦比亚大学），助理教授

2017.01-2017.12，瑞士 ETH Zürich（苏黎世联邦理工学院），博士后

2015.01-2016.12，美国 Princeton University（普林斯顿大学），博士后

研究概况

Christopher M. Boyce 主要开展气固流化床反应器的测量和模拟研究，测量方法包括核磁共振成像，高速摄像机及压力脉动等，模拟手段包括双流体模型，离散颗粒模型及直接数值模拟模型等。特别是在核磁共振成像测量领域，他发展了同时获得气相和颗粒相速度的方法 (*Physical Review Fluids*. 2016, 1: 074201); 与 Christoph Müller 教授合作开发了全球第一套超快核磁共振成像系统，该系统同时具有很高的时间分辨率和空间分辨率，满足气固流化床等多相流系统动态及微尺度的测量要求 (*Science Advances*. 2017, 3: e1701879)。

截至目前，Christopher M. Boyce 已以第一作者或者通讯作者在传统化工三大刊物 *AIChE Journal*, *Chemical Engineering Science* 及 *Industrial & Engineering Chemistry Research* 以及 *PNAS*, *Science Advances* 及 *Physical Review Fluids* 等重要刊物发表论文 20 余篇，并入选了 2019 年度 Fobes 30 位 30 岁以下杰出科学家名单 (*Forbes 30 Under 30 in Science list*)。

研究计划及方向:

经过与拟合作导师 Christopher M. Boyce 交流，申请人在派出期间拟开展的研究课题是“Magnetic Resonance Imaging of Gas-Solid Fluidized Bed Reactors”，即采用超快核磁共振成像研究气固流化床反应器的动量、质量、热量传递及化学反应以及它们之间的相互耦合。

具体拟开展的研究内容及目标如下:

1. 气固流化床反应器内介尺度非均匀结构的量化与调控

气固流化床涉及的气固两相流是典型的非线性非平衡系统，呈现出复杂的时空多尺度结构。现阶段的研究认为，介于单个颗粒和反应器设备之间的介尺度非均匀结构如气泡和聚团等是实现气固流化床反应器定量设计、放大、优化和调控的瓶颈问题。因此，对流化床内形成的介尺度非均匀结构进行量化具有重要的意义。

在以往的研究当中，由于实验测量的限制，关于流化床反应器内介尺度非均匀结构的量化研究主要局限于采用高速摄像机及粒子图像测速仪等对二维或拟二维流化床进行拍照。得益于超快核磁共振成像的高时空分辨率，申请人将对流化床内的气泡和聚团介尺度非均匀结构的形成与演化进行精确量化，详细描述其形状参数及聚并、破碎和湮灭等动态过程。特别地，申请人将考察反应器尺寸、温度及压力等条件对上述结构的影响，探索流化床反应器的放大效应，并发展介尺度理论模型及关联式用于指导反应器的放大。

另外，申请人还将研究流化床反应器内非均匀结构的调控方法，如声场、电场及机械振动等方式，并将特别关注脉冲式进气与机械振动耦合对气泡和聚团形成和演化的影响。拟合作导师 Christopher M. Boyce 最近发现这一方式可以在表现出混沌行为的流化床反应器内产生有序结构，且这些有序结构对反应器尺寸的变化不敏感 (*Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019, , 116: 9263-9268)，因此有可能在将来成为气固流化床反应器放大的一个方向。

2. 气固流化床介尺度非均匀结构对传热及传质的影响

气固流化床反应器内的介尺度非均匀结构对反应器整体的传质及传热性能有双刃剑的作用：这些结构的在一方面加剧了反应器内的颗粒混合，强化了传热及传质；另一方面又引起气相短路等行为，对传热及传质有不利的影响。现有文献对于流化床反应器的传热及传质研究多集中于单颗粒的微尺度和反应器的宏尺度层次，由于没有考虑介尺度非均匀结构的影响，不同研究者提出的传热及传质模型相差较大。基于超快核磁共振成像具有同时测量相分布（介尺度非均匀结构）、温度分布和追踪化学物种的能力，申请人将系统研究介尺度非均匀结构对传热及传质的影响，并最终发展考虑了介尺度非均匀结构的传热及传质模型。

3. 气固流化床反应器流动状态对反应的影响

在系统研究气固流化床反应器内的介尺度非均匀结构及其对传热和传质影响的基础上，申请人将进一步通过模型反应研究气固流化床反应器流动状态对反应的影响。气固流化床反应器随着操作条件的不同，可以经历散式流化、鼓泡床、湍动床、快速流化及气力输送等多个流型的转变。不同流型具有不同的流动状态，进而呈现不同的介尺度非均匀结构及不同的传热及传质特性，并最终对反应的转化率和选择性等产生影响。所获得的结果有望用于指导不同类型反应所需最佳流动状态的选择。

综上，申请人在派出期间将基于超快核磁共振成像技术系统研究气固流化床反应器内的介尺度结构与三传一反等。预计在派出期间，申请人将能掌握超快核磁共振成像技术，并基于该技术对流化床气固两相流获得更深入的理解，同时为流化床反应器的操作和放大提供理论指导。

