

姓 名	尧超群	性 别	男	出生年月	1989.9	
出生地	江西抚州	婚姻状况	未婚	政治面貌	中共党员	
获博士学位时间	拟于 2015 年 11 月前 答辩	学位授予单位	中国科学院 大学			
博士学位论文题目	微通道内气-液弹状流流动及传质特性研究					
博士论文指导教师 姓名及联系方式	陈光文 84379031					
拟开展的研究方向	微反应器内气液传递及反应					
拟应聘的研究组	DNL0903					
是否有亲属在所内 工作或学习	无					
联系方式	手机	15998657319			办公电话	84379327
	Email	superyao@dicp.ac.cn				
学习及工作经历 ( 从高中阶段开始填, 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 )						
2003.9-2006.7      江西省抚州市临川第一中学      高中						
2006.9-2010.7      天津大学化学工程学院      大学本科						
2010.9-今      中科院大连化学物理研究所      化学工程专业博士研究生						

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:

申请人攻读博士期间主要从事微化工技术、多相流等领域的研究。研究内容主要基于微通道中气-液弹状流在高流速、高压等近工业条件下的流动及传质特征，探索调控传递及反应过程规律。申请人设计双光路照明实验，并利用颗粒示踪法验证了泄漏流（气泡与壁面间液膜流动）的存在，纠正了学术界关于液膜停滞论的认识偏差。首次获取高流速及高压下弹状流的流动数据，揭示了相关条件下泄漏流对流动所产生的影响。以二氧化碳气泡的溶解过程为研究对象，提出单元传质模型并开发出一种在线测量传质系数的方法，成功的用于考察流体性质、系统压力及外场如超声对传质的影响。申请人已发表 9 篇学术文章，其中以第一作者身份发表在化工领域高影响力期刊 *AICHE J*（2 篇）和 *Chem Eng Sci*（3 篇）和《化工学报》（1 篇），代表性的研究成果及创新点如下：

### 1. 首次直接观察泄漏流, 纠正了矩形通道中液膜停滞论的认识偏差(*AICHE J*, 2015, DOI: 10.1002/aic.14895)

气泡与壁面间液膜是气-液传质传热的重要途径，也能显著影响液相混合效率及停留时间分布。矩形通道直角处气-液界面为弧形，对光束有强反射作用，故普通照明法、PIV 及 LIF 等手段难以观察液膜流动特征，因此文献中普遍认为矩形微通道内液膜流动性可忽略。申请人创新性地设计双光路照明法，以悬浮聚苯乙烯微颗粒为示踪剂，成功地观察到示踪粒子在液膜中的运动轨迹，证实了泄漏流的存在。这一发现突破了矩形通道中液膜停滞论的认识偏差。研究表明，泄漏流的驱动力来自气泡两端的拉普拉斯压差，影响因素包括液体粘性、表面张力、气-液界面弹性等。申请人绘制了泄漏流与液弹内循环涡流的相互影响路径图，阐述了相邻液弹间的物质交换原理，为发展弹状流传质计算模型提供理论基础。

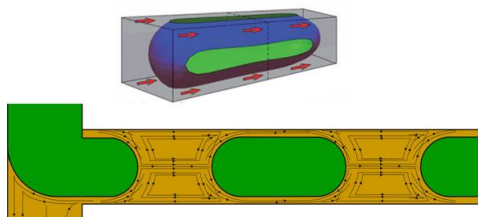


图 1. 泄漏流及其与内循环交互影响示意图

## 2. 首次获取矩形通道内高流速弹状流数据，发现惯性对气泡周围液膜的强增厚作用和泄漏流致液弹变短机理 (Chem Eng Sci, 2013, 95, 246-256)

现有关于弹状流的研究大多集中在低流速、低通量条件下，无法满足工业生产要求。针对这一现实，申请人开展高流速、强惯性作用下弹状流的传递特征。实验发现惯性作用可加速气泡断裂和增加气泡受到的剪应力，使气泡形变和液膜厚度大幅增加。提出泄漏流导致液弹变短机理，解释了液弹长度与液速之间的关系。基于实验数据和现象，提出了预测惯性作用下气泡及液弹长度的关联式，并获取了液膜厚度、气含率、相界面面积等重要参数，为设计工业气-液微反应器提供理论指导。

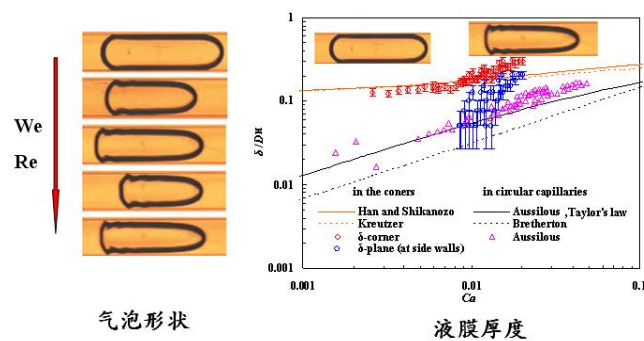


图 2. 惯性作用对气泡及液膜厚度的影响

## 3. 研究高压下气-液弹状流流动特征，为开发高效微反应器提供基础数据 (AIChE J, 2014, 60, 1132-1142)

化学工业中，加氢、氧化和吸收等气-液反应过程一般在高压条件下操作。对于气-液微反应器，因其体积小、传递效率高的特点，选择高压条件以增加反应速率尤为重要。目前，有关微反应器内高压下气-液传递的研究非常匮乏，申请人所在课题组率先开展了相关的研究工作，考察了微通道内高压条件（0.1~3.0MPa）下气-液弹状流的流动特征。研究发现，升高系统压力时气泡周围泄漏流增加，导致气泡的生成机制由过渡模式向挤压模式转变、气泡生成频率降低、气泡速度减小，气含率增加、液弹变短等现象发生。申请人成功地获取了高压下弹状流的气泡/液弹长度、气含率、比表面积等参数，可用于优化高效气-液微反应器设计。

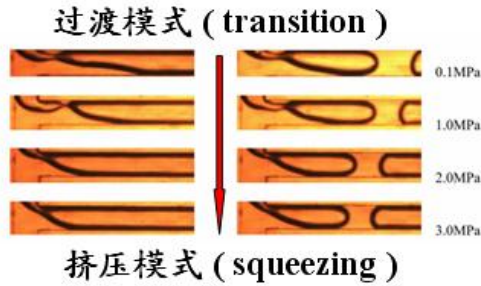


图 3. 系统压力对气泡产生机理的影响

4. 提出单元传质模型和实现传质过程的在线测量 (*Chem Eng Sci*, 2014, 112, 15-24; 2015, 123, 137-145)

传统微反应器传质测量技术需要消除入口及出口段的端效应影响 (Yue et al., *Chem Eng Sci*, 2007, 62, 2096-2108), 无法应用于高压系统。申请人根据弹状流气相分散、有序流动的特征, 提出单元传质模型 (图 4), 通过追踪气泡溶解过程实现了传质系数的在线测量。该在线测量方法方便、快捷, 可有效避免入口及出口处的端效应影响, 解决了高压封闭流动系统传质系数测量的难题。利用该方法研究了溶液性质和系统压力对传质系数的影响, 据此提出了可预测不同流体性质和压力下传质系数的经验关联式。

通过研究 CO<sub>2</sub> 气泡的物理溶解过程, 揭示了微通道内气泡尺寸的演变规律。气泡溶解过程可分为快速传质和慢速传质阶段, 气泡的最终溶解量取决于液弹长度。短液弹内液相循环速率增加, 气泡溶解速率高导致气泡溶解量快速接近理论或饱和值, 但总体溶解能力偏低。上述发现可为选择微通道长度 (或体积) 及入口设计提供理论依据。计算了气泡生成阶段气体吸收量, 并发现入口段气体吸收量与溶解度、传质系数和气泡周期三参数的乘积呈正比关系。

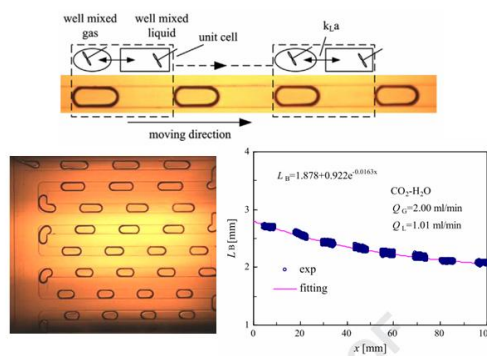


图 4. 单元传质模型

主要论著目录:

(1. 论文作者、题目、期刊名称、年份、卷期、页、总引次数、他引次数、期刊影响因子; 2. 著作: 著者、书名、出版社、年份)

目录列表最后请注明论文总引次数、他引次数、期刊影响因子的查询截止时间和查询数据库。

1. **Chaoqun Yao**, Yuchao Zhao, Chunbo Ye, Minhui Dang, Zhengya Dong, Guangwen Chen. Characteristics of slug flow with inertial effects in a rectangular microchannel. *Chemical Engineering Science*, 2013, 95, 246-256.  
Google 学术: 总引次数 15, 他引 9.  
Web of Science: 期刊影响因子 2.337; 总引次数 10, 他引 5.
2. **Chaoqun Yao**, Zhengya Dong, Yuchao Zhao, Guangwen Chen. The effect of system pressure on gas-liquid slug flow in a microchannel. *AIChE Journal*, 2014, 60, 1132-1142.  
Google 学术: 总引次数 5, 他引 2.  
Web of Science: 期刊影响因子 2.748; 总引次数 1, 他引 1.
3. **Chaoqun Yao**, Zhengya Dong, Yuchao Zhao, Guangwen Chen. An online method to measure mass transfer of slug flow in a microchannel. *Chemical Engineering Science*, 2014, 112, 15-24.  
Google 学术: 总引次数 7, 他引 3.  
Web of Science: 期刊影响因子 2.337; 总引次数 2, 他引 0.
4. **Chaoqun Yao**, Zhengya Dong, Yuchao Zhao, Guangwen Chen. Gas-liquid flow and mass transfer in a microchannel under elevated pressures. *Chemical Engineering Science*, 2015, 123, 137-145.  
Google 学术: 总引次数 4, 他引 1.  
Web of Science: 期刊影响因子 2.337; 总引次数 1, 他引 0.
5. **Chaoqun Yao**, Zhengya Dong, Yuchao Zhang, Yuan Mi, Yuchao Zhao, Guangwen Chen. On the leakage flow around gas bubbles in slug flow in a microchannel. *AIChE Journal*, 2015, In Press. DOI: 10.1002/aic.14895.  
Google 学术: 总引次数 0, 他引 0.  
Web of Science: 期刊影响因子 2.748; 总引次数 0, 他引 0.
6. **尧超群**, 乐军, 赵玉潮, 陈光文, 袁权。微通道内气-液弹状流流通及传质特征. *化工学报*, 2015, 66, 2759-2766.
7. Yuchao Zhao, **Chaoqun Yao**, Guangwen Chen, Quan Yuan. Highly efficient synthesis of cyclic carbonate with CO<sub>2</sub> catalyzed by ionic liquid in a microreactor. *Green Chemistry*, 2013, 15, 446-452.  
Google 学术: 总引次数 31, 他引 28.  
Web of Science: 期刊影响因子 8.02; 总引次数 29, 他引 27.
8. Zhengya Dong, **Chaoqun Yao**, Xiaoli Zhang, Jie Xu, Guangwen Chen, Yuchao

Zhao, Quan Yuan. A high-power ultrasonic microreactor and its application in gas liquid mass transfer intensification. *Lab Chip*, 2015,15,1145-1152.

Google 学术: 总引次数 3, 他引 3.

Web of Science: 期刊影响因子 6.115; 总引次数 2, 他引 2.

9. Chunbo Ye, Minhui Dang, **Chaoqun Yao**, Guangwen Chen, Quan Yuan. Process analysis on CO<sub>2</sub> absorption by monoethanolamine solutions in microchannel reactors. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 225, 120-127.

Google 学术: 总引次数 8, 他引 4.

Web of Science: 期刊影响因子 4.321; 总引次数 6, 他引 3.

检索时间: 2015 年 8 月 13 日

引用汇总:

Google 学术: 总引次数 73, 他引 50.

Web of Science: 总引次数 51, 他引 38.

会议论文

1. **Chaoqun Yao**, Yuchao Zhao, Guangwen Chen. The Inertial effect on the liquid film thickness in Slug Flow. **Poster presentation**, 3rd Asia-Pacific Chemical & Biological Microfluidics Conferences, Seoul, August 2013.
2. **Chaoqun Yao**, Zhengya Dong, Yuchao Zhao, Guangwen Chen. An online method to measure mass transfer of slug flow, **Poster presentation**, 13th International Conference on Microreaction Technology, Budapest, July 2014.
3. **Chaoqun Yao**, Zhengya Dong, Yuchao Zhao, Guangwen Chen. Gas-liquid flow and mass transfer in microchannels under elevated pressures, **Oral presentation**, 13th International Conference on Microreaction Technology, Budapest, July 2014.
4. **Chaoqun Yao**, Guangwen Chen. Gas-liquid slug flow under different pressures. **Oral presentation**, 2013 Annual Meeting of Sino-French Laboratory for Sustainable Energy, Shanghai, October 2013.

主持(参与)科研项目及申请专利(项目来源、项目名称、经费、个人在其中的作用)

自然科学基金面上项目 21376234: 微反应器内 CO<sub>2</sub>吸收/解吸过程的调控和强化机理研究, 80 万, 参与者

获科技奖情况(项目名称、奖项、获奖时间、本人在其中的作用及排名、获奖总人数)

获各类荣誉奖情况:

2011 年	中国科学院“三好学生”荣誉称号
2012 年	大连化学物理研究所“三好学生”荣誉称号
2013 年	国家奖学金
2014 年	大连化学物理研究所“优秀毕业生”荣誉称号
2015 年	延长石油二等奖学金
2015 年	大连化物所“优秀干部”荣誉称号

受聘后拟开展研究工作的计划和思路（包括研究方向、内容和目标）:

气-液两相体系是化学工业中常见的反应类型，如氧化、加氢、氯化、氟化、吸收等，微反应器在处理该类过程具有较大优势。微通道的特征尺寸较小（数百微米），其内的气-液两相流动属受限空间情形，分散相尺寸较为均一，且易于控制，比相界面积高达  $10^4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ，比传统反应器高 1~3 个量级，故从气-液流动、传质两方面看，微反应器有望改善反应过程选择性和效率；另一方面，微尺度下微反应器传热能力强，利于控制反应温度分布，可避免或缓解反应热点的出现，从而拓宽操作温度区间。因此，开展微反应器内的气-液两相传递及反应过程特性研究具有重要意义。申请人基于博士期间的研究基础，拟继续开展微反应器内非均相传递过程基础研究，开发高效气-液反应新过程以及利用超声强化传质及反应三方面的工作。

### **1. 开展非均相传递过程基础研究，发展微通道内介尺度传递理论**

相间传递特性是决定气-液，液-液等反应的关键因素，新型反应器的成功利用依赖于对相间传递过程的准确预测和控制。当前学术界已认识到微尺度下表面张力等界面因素发挥重要作用，然而研究结果多集中于冷模实验，难以反映真实反应过程规律。申请人计划利用本课题组研究优势，拟开展热模条件下非均相传递过程基础研究，在局部相界面与微气泡、场分布与溶液性质等多空间尺度上发展介尺度理论，为反应器设计提供理论指导。

### **2. 气-液微反应新过程的开发、表征与调控**

微反应器因传质传热能力强而特别适用于快速、强放热反应。此类反应为保证选择性及过程安全性，反应一般选择在低温、高溶剂含量条件下以降低反应速率。较之于传统反应器，微反应器可拓宽操作温度区间。气-液反应微型化的瓶颈在于反应时间和传质时间的耦合程度高，二者难于互相匹配，需要通过合理选择反应温度、流动流型和多级操作等工艺条件解决。

### **3. 气液传质和反应过程的超声强化**

微反应器中流动过程雷诺数较小，属层流流动，其传质速率还有提高空间。利用超声强化气-液传质及反应具有广阔的应用前景。一方面，微通道内气泡激发频率与超声频率容易形成共振，声空化效应最强，可引起气-液界面剧烈振动，同时在液相中产生声流和湍动，从而大幅提高传质系数，加速化学反应过程。另一方面，微反应器可高效、有序和可控地产生微气泡，有效解决了常规反应器中声



场和声流不可控的缺点，不仅能量利用效率高，还是研究超声传递机制的理想工具。基于此，申请人计划利用显微高速摄像、在线表征等方法，研究微尺度气泡振动机制和超声强化机理，探讨超声微反应器结构、超声频率、功率与气液流动、传质的定量关系，以实现微反应器中气液传质和反应过程的高效强化。

所需科研条件（包括科研经费、实验室面积、仪器设备、人员等，并简要说明所需条件的必要性和预算依据）

申请人所在研究组已建有完备的金属及塑料基微反应器加工平台及高速显微摄像、在线光谱分析等表征平台。然而针对化学反应过程热效应及温度分布的表征技术缺乏，故拟购买红外成像仪一台另其它专业实验设备。3 年经费总需求 100 万，初步预算如下：

1. 红外成像仪约 50 万
2. 外购耐腐蚀硅质（石英、玻璃、硅等）可视化微反应器 15 万
3. 药品及测试费 10 万
4. 实验装置及研究组微反应器加工费 10 万
5. 人员费 10 万：2-3 名博士生工资
6. 差旅及会议费 5 万

其它说明及希望研究所协助解决的问题

无