



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文评阅书

论文题目 甘油-氮气粘性体系中气泡行为研究

作者姓名 高德扬

学位类别 工学博士

学科（专业） 工业催化

研究所（院系） 大连化学物理研究所

中国科学院大学制

学术道德评价

（一票否决）

评价要素	评价意见（请在相应栏内划“√”）
是否存在剽窃他人成果、伪造数据、由他人代写等严重作假行为	<input type="checkbox"/> 是（具体说明存在的问题）
	<input checked="" type="checkbox"/> 否

评阅意见

评 价 要 素			权重	具体得分 (百分制)
	论文选题	选题的理论意义、实用价值	10%	10
	文献综述	反映该学科及相关领域的前人成果和前沿动态	15%	14
	创新成果	论文成果创新性，对学科发展、技术进步、经济建设、国家安全等方面产生的影响和贡献	40%	34
	基础理论和专门知识	基础理论的宽厚度、坚实度，专门知识的系统性、深入性	10%	9
	科研能力	论文体现科研潜质与独立科研能力	15%	13
	论文写作	论文结构、撰写规范性；文字表达准确、清晰和流畅性；引文严谨、规范性	10%	10
总体评价			总分	90

注：“分数”栏每项均按百分制整数评分，各项满分均为 100 分。评分分为四档：大于等于 90 分为优秀；大于等于 75 分小于 89 分为良好；大于等于 60 分小于 74 分为一般；小于 60 分为差。

对学位论文的学术评语：（请对论文的学术水平、创新性做出简要评述，包括选题意义，文献资料的掌握，论文创新之处，写作规范和逻辑性等。还须明确指出论文中存在的问题和不足之处。可另附页）

论文题目：甘油-氮气粘性体系中气泡行为研究

作者姓名：高德扬

高粘度液-气鼓泡床反应器广泛应用于石油化工、生物化工和食品加工等行业领域，但基础研究比较薄弱，直接影响到此类反应器的优化设计和强化操作。本论文研究高粘度甘油-氮气体系中的气泡行为具有重要的理论意义和应用价值。

该论文对前人的相关研究文献资料有较全面的了解和掌握。论文的主要创新点：

- (1) 基于高速摄像法测量了甘油-氮气粘性体系下单气泡自由上升过程。实验结果与文献基于间歇通气产生单气泡的实验结果相符，同时发现较高体积通气速率下气泡形态与文献中结果存在偏差。
- (2) 通过增加通气速率和通气管数量，对甘油-氮气粘性体系下多气泡自由上升行为进行研究。结果表明，与文献中的低粘体系相比，粘度增加使得气液流动不存在均匀流。发现气泡形变行为与基于不同体系中大量实验数据总结出的关联式相符。
- (3) 建立了粘性体系中，以大气泡聚并产生微气泡作为示踪粒子的气泡追踪测速法(BTV)。实现了多气泡流中曳力系数的测量，并提出了粘性体系中多气泡流的曳力系数计算式。
- (4) 分别采用格子玻尔兹曼方法(LBM)及与气泡群体平衡模型耦合的欧拉-欧拉法(CFD-PBM)对单气泡及多气泡自由上升行为进行模拟计算并与实验结果比较。提出了新的气液计算方法，准确地对单气泡行为的气泡形状、终端雷诺数及曳力系数进行了计算。

论文写作规范，图表清晰，表达清楚，逻辑性强，结果可靠。是一篇优秀博士论文。

论文的不足之处：论文做了大量实验观测，得到很多定性的结果，但对实验数据的定量归纳得到可用的计算模型或公式较欠缺。如能得到高粘度牛顿流体中气泡上升速度与气泡直径的关系式、气泡直径随上升高度而增大的关系式等都是对高粘度液-气鼓泡流动力学有价值的贡献。另外不要仅限于观测气泡的表现行为，而应在强化气-液间的传质方面深入研究，如何增加气液间接触面积，如何减少气模和液膜的传质阻力。

是否同意组织学位论文答辩

（请在相应栏内划“√”）

☒ 同意答辩

☐ 修改后答辩

☐ 不同意答



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文评阅书

论文题目 甘油-氮气粘性体系中气泡行为研究

作者姓名 高德扬

学位类别 工学博士

学科（专业） 工业催化

研究所（院系） 大连化学物理研究所

中国科学院大学制

学术道德评价

（一票否决）

评价要素	评价意见（请在相应栏内划“√”）
是否存在剽窃他人成果、伪造数据、由他人代写等严重作假行为	<input type="checkbox"/> 是（具体说明存在的问题）
	<input checked="" type="checkbox"/> 否

评阅意见

评 价 要 素			权重	具体得分 (百分制)
1	论文选题	选题的理论意义、实用价值	10%	9
2	文献综述	反映该学科及相关领域的前人成果和前沿动态	15%	12
3	创新成果	论文成果创新性，对学科发展、技术进步、经济建设、国家安全等方面产生的影响和贡献	40%	38
4	基础理论和专门知识	基础理论的宽厚度、坚实度，专门知识的系统性、深入性	10%	9
5	科研能力	论文体现科研潜质与独立科研能力	15%	14
6	论文写作	论文结构、撰写规范性；文字表达准确、清晰和流畅性；引文严谨、规范性	10%	9
总体评价			总分	91

注：“分数”栏每项均按百分制整数评分，各项满分均为100分。评分分为四档：大于等于90分为优秀；大于等于75分小于89分为良好；大于等于60分小于74分为一般；小于60分为差。

对学位论文的学术评语：(请对论文的学术水平、创新性做出简要评述，包括选题意义，文献资料的掌握，论文创新之处，写作规范和逻辑性等。还须明确指出论文中存在的问题和不足之处。可另附页)

论文题目：甘油-氮气粘性体系中气泡行为研究

作者姓名：高德扬

本论文针对甘油-氮气粘性体系中气液两相流气泡行为进行了实验和理论研究。气液两相流在生物催化转化中具有重要意义，特别气液反应器的开发。本文选题具有应用价值，是一个典型的应用为背景的基础研究。

论文采用高速摄像法，先后研究了单气泡动力学行为和气泡运动规律。在粘性体系中创新性地发展了以微气泡作为示踪粒子的气泡追踪测量方法，实现了多气泡力学系数测量和实验关联式建立。同时对单气泡和气泡群发展了LBM和CFD-PBM模型，特别是单气泡形状、终端速度和曳力进行了模拟，能较好地获得高粘条件下的结果。论文写作规范，进行了答辩。

是否同意组织学位论文答辩

(请在相应栏内划“√”)

☒ 同意答辩

☐ 修改后答辩

☐ 不同意答辩

本文不是个讨论在于多气泡体系的兼并模型建立不是初步工作，如能细化则非常有意义。作为下一工作方向。



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文评阅书

论文题目 甘油-氮气粘性体系中气泡行为研究

作者姓名 高德扬

学位类别 工学博士

学科（专业） 工业催化

研究所（院系） 大连化学物理研究所

中国科学院大学制

学术道德评价

（一票否决）

评价要素	评价意见（请在相应栏内划“√”）
是否存在剽窃他人成果、伪造数据、由他人代写等严重作假行为	<input type="checkbox"/> 是（具体说明存在的问题）
	<input checked="" type="checkbox"/> 否

评阅意见

评 价 要 素			权重	具体得分 (百分制)
1	论文选题	选题的理论意义、实用价值	10%	92
2	文献综述	反映该学科及相关领域的前人成果和前沿动态	15%	88
3	创新成果	论文成果创新性，对学科发展、技术进步、经济建设、国家安全等方面产生的影响和贡献	40%	90
4	基础理论和专门知识	基础理论的宽厚度、坚实度，专门知识的系统性、深入性	10%	89
5	科研能力	论文体现科研潜质与独立科研能力	15%	92
6	论文写作	论文结构、撰写规范性；文字表达准确、清晰和流畅性；引文严谨、规范性	10%	89
总体评价			总分	90

注：“分数”栏每项均按百分制整数评分，各项满分均为 100 分。评分分为四档：大于等于 90 分为优秀；大于等于 75 分小于 89 分为良好；大于等于 60 分小于 74 分为一般；小于 60 分为差。

对学位论文的学术评语：(请对论文的学术水平、创新性做出简要评述，包括选题意义，文献资料的掌握，论文创新之处，写作规范和逻辑性等。还须明确指出论文中存在的问题和不足之处。可另附页)

论文题目：甘油-氮气粘性体系中气泡行为研究

作者姓名：高德扬

论文研究了高粘度体系(甘油-氮气)中单气泡自由上升和多气泡动力学行为，通过改变甘油-水混合比率来改变粘度与低粘度体系进行了详细的比较。在实验方法上，使用高速摄像获取不同时刻气泡的轮廓和位置，得到单泡和多泡的横纵比运动轨迹等信息；使用BTV分析气泡聚并行为及流场，使用LBM模拟单气泡，CFD-PBM模拟多气泡，与实验结果进行比较。

论文选题对乙二醇加氢等工业应用和可再生资源的利用和工程放大具有重要的学术和应用价值，该文丰富了高粘度气泡行为的实验，研究具有一定的广度和深度，论文工作量大。文献调研充分，系统论述了检测气泡的实验方法和模拟方法；具有较强的创新性；写作规范且逻辑性较强，文章从单气泡到多气泡既包括实验又包括模拟，且对结果的分析合理透彻。对论文的详细修改意见附页。

是否同意组织学位论文答辩

(请在相应栏内划“√”)

☐ 同意答辩

☒ 修改后答辩

☐ 不同意答辩

附页:

博士学位论文详细修改意见

- 1、Page 1, 引言部分介绍该文的应用背景是生物柴油的副产物甘油催化氢解,但本文研究的是甘油-氮气体系。在实验过程中为什么用氮气而不用氦气(氦气既接近于氢气,又比氢气安全),请在本文中稍加解释。
- 2、Page 35, 关于图 2.9, 建议在文章 Page 35 中补加 Ishii、Mei、Tomiya、Rodrigue 的 C_D 公式,便于与本文使用的 C_D 公式直接比较。在分析时,点明本文用的曳力公式和等的曳力公式相同点和不同点,曳力公式中哪一项起到关键作用。
- 3、Page 38、Page 115, 实验装置总共有 12 根进气管,但为什么只有中央 6 根是进气的?第三章和第五章都没有提及原因。
- 4、Page 40, 检查一下口语化表达,如“要不稳定得多”显得非正式。
- 5、Pages 49-50, 图 3.11 和图 3.12 表达的不清楚,纵坐标的数值表示什么?百分数是该区域的瞬态的结果还是时均的结果?请在正文里详细说明其中的一张子图。
- 6、Page 55, “单气泡即使发生较大形变也很难有复杂边界,因此 Ro 很难有效描述单气泡形变”这句话的表达与 Page 53 中“ Ro 越大代表的气泡形变越大”有矛盾。什么才算复杂边界?注意:(1)严谨区分“单气泡”与“单气泡流动”;(2)单气泡在复杂湍流流场中是可能发生复杂形变的,只是本文操作的粘度较高,气泡不易发生形变而已。
- 7、Page 62, 图 3.24 与 Page 51 的图 3.13 内容重复或者相近,造成第三章的部分结构显得多余。
- 8、Page 63, 图 3.25 中 group1、group2、group4、group5、group6 的平均气泡速度一直在升高,尚未达到平衡状态。需在本文的实验部分提及液位高度是多少,气泡速度达到的液位高度。
- 9、Pages 68-69, 表 4.1 和表 4.2 的表示区间范围的符号不统一且不规范,如“-”与“~”。
- 10、Page 76, 第四章需要指出哪些图是 group2 的数据,哪些图是 group5 的数据,两者加以区分。图 4.6 (1) 拍摄视图的尺寸是多少,需要添加标尺/刻度。图 4.6 (2) 中第二张图的“phase3”遮住了数据点。图 4.7 的视图范围是多少需要标明。
- 11、第五章关于 LBM:
 - (1) Page 96, 专业词汇翻译和单位使用错误。 θ_M 翻译为“迁移率”而不是流动系数;LBM 的单位与实际物理量的单位是不同的,如格子速度 c_i 的单位是 lattice unit / time step ($\Delta x/\Delta t$) 而不是 m/s。
 - (2) Page 103, 检查公式 (5-30) 是 $\Delta P=2\sigma/r$ 还是 $\Delta P=\sigma/r$ 。参考文献#Shuli Shu, 2013, Direct Numerical Simulation of Bubble Dynamics Using Phase-Field Model and Lattice Boltzmann Method 或者#Haihu Liu 2010, Phase-field modeling droplet dynamics with soluble surfactants 等文章。
 - (3) Page 99, 检查 ϕ_{bulk} 的表达式是 $\phi_{bulk}=(\rho_l-\rho_g)/2$ 还是 $\phi_{bulk}=(\rho_l+\rho_g)/2$;
 - (4) Page 103, 关于图 5.2 参数变量 θ_M 、边界条件是什么?
- 12、第五章关于 CFD-PBM
 - (1) Page 110, 检查气泡速率单位 (s^{-1}) 是否正确;
 - (2) Page 111, 检查公式 (5-51) 是否正确,是否缺少 x_{jki} ;
 - (3) Page 117, 在分析图 5.11 时,本文实验结果跟 origin、modified 两组的数据差别较大,原因是“二维投影造成的”。那么,如果在数值处理上 origin、modified 也采用投影的方法获取气含率,结果会跟实验结果相同吗?



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文评阅书

论文题目 甘油-氮气粘性体系中气泡行为研究

作者姓名 高德扬

学位类别 工学博士

学科（专业） 工业催化

研究所（院系） 大连化学物理研究所

中国科学院大学制

学术道德评价

(一票否决)

评价要素	评价意见 (请在相应栏内划“√”)
是否存在剽窃他人成果、伪造数据、由他人代写等严重作假行为	<input type="checkbox"/> 是 (具体说明存在的问题)
	<input checked="" type="checkbox"/> 否

评阅意见

评 价 要 素			权重	具体得分 (百分制)
1	论文选题	选题的理论意义、实用价值	10%	10
2	文献综述	反映该学科及相关领域的前人成果和前沿动态	15%	15
3	创新成果	论文成果创新性, 对学科发展、技术进步、经济建设、国家安全等方面产生的影响和贡献	40%	35
4	基础理论和专门知识	基础理论的宽厚度、坚实度, 专门知识的系统性、深入性	10%	10
5	科研能力	论文体现科研潜质与独立科研能力	15%	10
6	论文写作	论文结构、撰写规范性; 文字表达准确、清晰和流畅性; 引文严谨、规范性	10%	8
总体评价			总分	88

注: “分数”栏每项均按百分制整数评分, 各项满分均为 100 分。评分分为四档: 大于等于 90 分为优秀; 大于等于 75 分小于 89 分为良好; 大于等于 60 分小于 74 分为一般; 小于 60 分为差。

对学位论文的学术评语：(请对论文的学术水平、创新性做出简要评述，包括选题意义，文献资料的掌握，论文创新之处，写作规范和逻辑性等。还须明确指出论文中存在的问题和不足之处。可另附页)

论文题目：甘油-氮气粘性体系中气泡行为研究

作者姓名：高德扬

论文利用实验和数值手段对甘油-氮气粘性体系中气泡行为进行研究，填补了粘性体系研究中的一些空白，具有其理论对多相体系设计具有一定的意义，论文写作规范、清晰。就以下问题和作者讨论并希望修正和补充：

1. 在实验方面，如何保证/证明在米列生体系范畴，特别对于多气泡行为中，保证在粘性主导过程，如何用参数表征；

2. 实验产生的微气泡作为示踪粒子，会不会有数据缺失或不准确的问题；

3. 计算方面，看图中网格为非结构化网格，这会对微细行为产生重要影响，值得作者关注。

是否同意组织学位论文答辩

(请在相应栏内划“√”)

☒ 同意答辩

☐ 修改后答辩

☐ 不同意答辩



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文评阅书

论文题目 甘油-氮气粘性体系中气泡行为研究

作者姓名 高德扬

学位类别 工学博士

学科（专业） 工业催化

研究所（院系） 大连化学物理研究所

中国科学院大学制

学术道德评价

（一票否决）

评价要素	评价意见（请在相应栏内划“√”）
是否存在剽窃他人成果、伪造数据、由他人代写等严重作假行为	<input type="checkbox"/> 是（具体说明存在的问题）
	<input checked="" type="checkbox"/> 否

评阅意见

评 价 要 素			权重	具体得分 (百分制)
1	论文选题	选题的理论意义、实用价值	10%	90
2	文献综述	反映该学科及相关领域的前人成果和前沿动态	15%	90
3	创新成果	论文成果创新性，对学科发展、技术进步、经济建设、国家安全等方面产生的影响和贡献	40%	90
4	基础理论和专门知识	基础理论的宽厚度、坚实度，专门知识的系统性、深入性	10%	95
5	科研能力	论文体现科研潜质与独立科研能力	15%	90
6	论文写作	论文结构、撰写规范性；文字表达准确、清晰和流畅性；引文严谨、规范性	10%	95
总体评价			总分	91

注：“分数”栏每项均按百分制整数评分，各项满分均为100分。评分分为四档：大于等于90分为优秀；大于等于75分小于89分为良好；大于等于60分小于74分为一般；小于60分为差。

对学位论文的学术评语：（请对论文的学术水平、创新性做出简要评述，包括选题意义，文献资料的掌握，论文创新之处，写作规范和逻辑性等。还须明确指出论文中存在的问题和不足之处。可另附页）

论文题目： 甘油-氮气粘性体系中气泡行为研究

作者姓名： 高德扬

生物质催化转化过程常涉及高粘流体，本博士论文开展了高粘液相体系中气-液流动过程行为的研究，选题有重要的学术价值和应用前景。

论文首先基于连续通气方式，建立了单气泡与多气泡动力学行为的研究平台。研究表明，单气泡处于粘性控制区域，气泡尺寸并随气体管径、气速和液体粘度的增加而增大，管径影响作用显著。低气速下， $Eo-Re$ 关联式、曳力系数 C_D 关联式均与文献相符；高气速时，因气相的惯性作用，偏差增大。

多气泡流动行为呈非均匀流，且气泡运行轨迹平稳；中心区域气泡相互碰撞聚并形成大气泡，呈现中心聚集效应，该效应随气速和液相粘度增加而增加。建立了气泡追踪测速方法（BTV），研究表明气泡尾流是气泡将作用的主要机理，双气泡受彼此尾流作用而加速和形变。借助于 CFD 和 CFD-PBM 模型，气相分布的模拟结果与实验吻合良好，但均难以获得准确的气泡尺寸分布。

该学位论文阐释了高粘流体中气泡的运行行为，为高粘体系的反应过程设计，提供基础数据，研究结果具有创新性。

根据本文的工作，论文综述全面、研究工作系统深入、书写规范、论述充分、分析合理，反映了高德扬同学具有扎实的理论基础和独立的科研工作能力，已达到博士学位论文要求，同意进行答辩，并建议授予工学博士学位。

建议：

- 1、摘要可更凝练些，侧重于阐明过程的机理机制。
- 2、图 2.2 体系稳定后的气泡上升照片，从打印版来看，似乎并非照片。
- 3、p118，“原低于”改为“远低于”。

是否同意组织学位论文答辩

（请在相应栏内划“√”）

☒ 同意答辩

☐ 修改后答辩

☐ 不同意答辩