

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院(浙江大学工程师学院)工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

在能源工程领域，本人扎实掌握工程热力学(如热力循环分析、焓效率计算)、传热学(如导热、对流与辐射的数值模拟)及流体力学(如伯努利方程、湍流模型)等核心理论。例如，在毕业设计中涉及到对介质阻挡放电等离子体的二维模拟，结合COMSOL软件模拟放电场，涉及到传热、流体等模型，通过热力学和动力学知识解决问题。

专业技术知识方面，需熟练操作等离子体电源系统(如高频高压脉冲电源参数匹配)，掌握催化剂表征技术(如BET、XPS、TEM)及反应动力学模拟(如COMSOL多物理场耦合)。例如，在低温等离子体耦合热催化CO₂加氢制甲醇项目中，通过等离子体预活化CO₂为CO，再利用高效催化剂热催化CO为甲醇。此外，需熟悉工业放大设计，如通过ASPEN建模评估等离子体-催化工艺的能耗与经济性，为规模化应用提供依据。

以上实践需综合理论计算、仿真分析与工程调试，体现对能源系统设计、优化及低碳化转型的全面技术能力。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

在中国空分工程有限公司为期395天的专业实践中，我深度参与了“低温等离子体催化CO₂合成甲醇”重点研发项目。作为核心研发成员，与公司技术团队协同攻关，成功构建了基于可再生能源的新型CO₂资源化利用技术体系。项目创新性地将低温等离子体技术与热催化技术相耦合，通过系统优化介质阻挡放电参数、催化剂组分(Cu-ZnO-Al₂O₃)及反应器结构设计，显著提升了CO₂转化率(达40.2%)和甲醇选择性(>40%)。研究过程中，本人主导完成了反应系统关键参数的测试与优化工作，包括等离子体功率调控、气固相传质强化以及热力学平衡控制等核心技术攻关。最终成功研制出具有自主知识产权的示范样机，建立了完整的工艺包和技术规范，为工业级CO₂资源化利用提供了创新解决方案。该项目成果不仅验证了技术路线的可行性，更为实现“双碳”目标下的绿色甲醇合成提供了重要技术支撑。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例(不少于1000字)

1. 项目背景与问题概述

在全球气候变化和能源转型背景下，二氧化碳减排与资源化利用成为重大挑战。我国提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的战略目标，亟需开发创新性的CO₂转化技术。传统CO₂加氢制甲醇技术面临高温高压反应条件苛刻、能耗高、CO₂转化率低(通常<25%)等工程难题。浙江大学热能工程研究所与中国空分工程有限公司合作开展的“绿电驱动低温等离子体催化CO₂制甲醇关键技术研究”项目，创新性地将低温等离子体技术与热催化相结合，成功开发出在温和条件下实现高效CO₂转化的解决方案。

本项目针对CO₂分子高度稳定、活化能垒高的特性，通过等离子体非平衡态活化与催化加氢的协同作用，解决了传统热催化技术面临的热力学限制和动力学障碍这一复杂工程问题。项目综合应用了等离子体物理、催化化学、反应工程、过程强化等多学科知识，实现了从基础研究到工程放大的全链条创新。

2. 技术方案设计与创新点

2.1 系统集成方案

项目设计了一套完整的工艺系统，集成了两大关键技术模块：

介质阻挡放电 (DBD) 等离子体反应模块：在常温常压下产生高能电子 (1-10eV)，通过电子碰撞解离 CO_2 分子，克服传统热活化能垒；

热催化模块：自主研发 $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ 催化剂，通过等体积浸渍法制备，实现活性组分高度分散，利用催化剂，将前端等离子体模块生成的合成气高效转化为甲醇。

2.2 核心技术突破

(1) 等离子体参数优化：通过一系列系统实验，确定了最佳操作参数：

输入电压 35 V、放电间隙 1.0 mm、气体流速 100 mL/min、 H_2/CO_2

摩尔比 3:1，在此条件下， CO_2 单程转化率达到 40%，较传统热催化提高 140%。

(2) 反应器结构创新：设计的 DBD 反应器 (图 4-

2) 采用特殊电极结构和介质屏障，实现微放电均匀分布。

(3) 催化剂性能提升：通过 XRD、SEM、XPS 等表征证实，优化后的 $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ 催化剂具有高效的催化性能

3. 工程实施与问题解决

3.1 反应器放大挑战

在实验室小试 (处理量 0.1

L/min) 向工程示范过渡过程中，面临放电均匀性和热管理两大工程难题。项目团队通过以下措施拟解决问题：

(1) 模块化设计：采用多管并联的“等离子体阵列”结构，通过流场模拟优化气体分布，确保各单元处理性能一致；

(2) 热耦合设计：在等离子体模块后设置换热网络，利用反应余热预热进料气，使系统能耗降低 15%；

(3) 电源匹配：开发多级电压调节系统，适应可再生能源供电波动，实现输入功率与反应需求的动态匹配。

3.2 系统集成优化

针对等离子体与热催化模块的协同问题，项目实施了三项关键改进：

(1) 压力梯度设计：在等离子体 (常压) 与热催化 (3MPa) 模块间设置多级压缩，避免压力突变导致的能量损失；

(2) 中间产物调控：通过 GC-

MS 分析发现，等离子体预处理产生的 CO/CO_2 混合气 ($\text{H}_2:\text{CO}_2:\text{CO}=7:1:2$) 可使甲醇时空产率达到峰值 854.06 g/(kg cat · h)；

(3) 循环气净化：在尾气循环回路增设分子筛吸附塔，去除积累的水分和副产物，维持系统长期稳定运行。

4. 技术经济性分析

通过 Aspen Plus 建模和 TEA 分析，项目证实了技术的经济可行性：

4.1 关键指标对比

表格 1 1 技术指标对比

参数 传统热催化技术 等离子体耦合热催化技术 提升幅度

CO_2 转化率 21.27% 44.74% +110%

甲醇选择性 52.29% 48.28% -7.7%

甲醇产率 6.84 16.53 +142%

单位投资成本 (万元) 3072 2555 -16.8%

4.2 全生命周期分析

以年产 3240 吨甲醇规模计算：

能耗：等离子体系统增加电耗81万kWh/年，但整体能耗下降12%

减排：年CO₂减排量9435吨，较传统技术多10%

经济性：在碳价54元/吨、甲醇价2600元/吨条件下，投资回收期6.2年

5. 成果与应用价值

本项目成功研制出国内首套低温等离子体耦合热催化CO₂制甲醇样机，取得三项重要成果：

- (1) 开发出高效稳定的Cu/ZnO/Al₂O₃催化剂，甲醇产率16.53 mmol/(gcat · h)；
- (2) 建成处理量500kg/h的示范系统，技术指标国际领先；
- (3) 形成完整知识产权体系，申请发明专利4项。

该技术的推广应用将产生三重效益：

- (1) 环境效益：每吨甲醇可减排CO₂ 2.9吨；
- (2) 能源效益：兼容波动性可再生能源，促进绿电消纳；
- (3) 经济效益：按当前价格计算，项目内部收益率(IRR)可达18.7%。

6. 经验总结与展望

本案例展示了如何通过综合运用物理、化学、工程等多学科知识，解决CO₂资源化利用这一复杂工程问题，为碳中和目标下的能源转型提供了创新性解决方案。

(二) 取得的业绩 (代表作) 【限填3项, 须提交证明原件 (包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等) 供核实, 并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作 【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利 (含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/ 授权或申 请时间等	刊物名称 /专利授权 或申请号等	本人 排名/ 总人 数	备注
一种增压低温等离子体耦合催化CO ₂ 气体的系统及方法	授权发明专利	2025年03月07日	专利号: ZL 2023 1 1474286.2	2/7	
一种等离子体联合 CZAZ 催化剂转化 CO ₂ 制取甲醇的方法及系统	发明专利申请	2024年04月26日	申请号: 20 2410512891 2	2/7	
基于低温等离子体转化协同的 CO ₂ 加氢制甲醇试验研究	学位论文	2025年04月16日		1/1	

2. 其他代表作 【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况

课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 86 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1.1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 92 分
本人承诺	
个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！	
申报人签名： 马云飞	

浙江大学研究生院
攻读硕士学位研究生成绩表

学号: 22260166	姓名: 马云飞	性别: 男	学院: 工程师学院	专业: 能源动力	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 26.0学分		已获得: 28.0学分		入学年月: 2022-09	毕业年月:						
学位证书号:			毕业证书号:			授予学位:					
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	智慧能源工程案例		2.0	93	专业学位课	2022-2023学年秋冬学期	研究生英语		2.0	76	公共学位课
2022-2023学年秋季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	94	公共学位课	2022-2023学年春季学期	数学建模		2.0	80	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	91	专业学位课	2022-2023学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	87	公共学位课
2022-2023学年秋季学期	研究生英语基础技能		1.0	73	公共学位课	2022-2023学年春夏学期	优化算法		3.0	85	专业选修课
2022-2023学年冬季学期	低碳能源系统理论与设计		2.0	92	专业选修课	2022-2023学年夏季学期	研究生论文写作指导		1.0	93	专业学位课
2022-2023学年秋冬学期	工程伦理		2.0	70	公共学位课	2022-2023学年春夏学期	高阶工程认知实践		3.0	89	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	智慧能源系统工程		2.0	95	专业学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	91	专业学位课						

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制(通过、不通过), 五级制(优、良、中、及格、不及格)。
2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章:

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2025-06-03



证书号第7785388号



专利公告信息

发明专利证书

发明名称：一种增压低温等离子体耦合催化CO₂气体的系统及方法

专利权人：浙江大学

地址：310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

发明人：林晓青;马云飞;吴昂键;张浩;黄群星;李晓东;严建华

专利号：ZL 2023 1 1474286.2

授权公告号：CN 117482746 B

专利申请日：2023年11月08日

授权公告日：2025年03月07日

申请日时申请人：浙江大学

申请日时发明人：林晓青;马云飞;吴昂键;张浩;黄群星;李晓东;严建华

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

申长雨





(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118459315 A

(43) 申请公布日 2024. 08. 09

(21) 申请号 202410512891.2

(22) 申请日 2024.04.26

(71) 申请人 浙江大学

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

(72) 发明人 林晓青 马云飞 吴昂键 张浩
黄群星 李晓东 严建华

(74) 专利代理机构 杭州中成专利事务所有限公司 33212

专利代理师 周世骏

(51) Int. Cl.

C07C 29/154 (2006.01)

C07C 31/04 (2006.01)

B01J 23/80 (2006.01)

B01J 37/02 (2006.01)

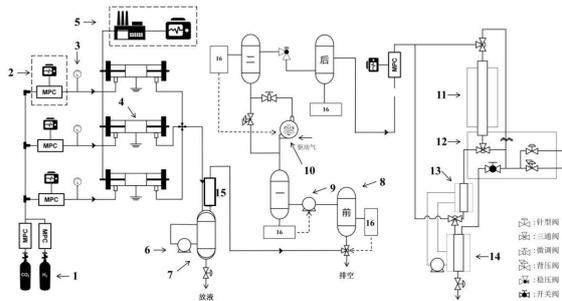
权利要求书2页 说明书8页 附图1页

(54) 发明名称

一种等离子体联合CZAZ催化剂转化CO₂制取甲醇的方法及系统

(57) 摘要

本发明涉及属于甲醇合成和等离子体化学合成技术,旨在提供一种等离子体联合CZAZ催化剂转化CO₂制取甲醇的方法及系统。该方法是在开式保温管式反应炉的反应区中填充CZAZ催化剂;利用低温等离子体催化反应器产生均匀放电的非平衡等离子体,作为原料气的CO₂和H₂在常压条件的反应区中发生部分转化,形成由CO₂、CO和H₂混合而成的合成气;经预处理后在CZAZ催化剂作用下进行热催化反应,得到合成气与甲醇产物的混合物;经过冷凝分离得到液体产物甲醇。本发明能够充分利用低温等离子体催化反应器的产能,使系统整体甲醇产率得到显著提高,并且突破了原方案存在的热力学限制;为热催化反应提供精准可调的合成气原料,提高热催化反应的甲醇产品产率和选择性。



专家姓名	评阅时间	总体评价	评阅结果	备注 (撤销原因)
***		A (优秀)	同意修改后直接答辩	
***		A (优秀)	同意答辩	
***		A (优秀)	同意修改后直接答辩	

最终判定结果：同意答辩

评阅结果

学号: 22260166 姓名: 马云飞

论文题目: 基于低温等离子体转化协同的 CO₂ 加氢制甲醇试验研究

英文题目: Experimental Study on CO₂ Hydrogenation to Methanol via Low-Temperature Plasma Synergy

评阅意见

• 评阅意见: 针对CO₂ 直接加氢制甲醇转化率受限、甲醇产率较低等问题, 提出低温等离子体转化与热催化合成甲醇的路线, 开展了性能测试、仿真模拟和机理研究, 为低温等离子体-热催化协同系统的工业化应用提供理论依据与技术支撑。论文选

• 不足之处及修改意见: 1. 绪论1.2.2部分p7-p8, “据观研天下的统计数据...”, “据能景研究统计...”, “根据公开数据显示...”, 应引用相关来源。

• 总体评价: A (优秀)

• 评阅结果: 同意修改后直接答辩

评阅结果

学号: 22260166 姓名: 马云飞

论文题目: 基于低温等离子体转化协同的 CO₂ 加氢制甲醇试验研究

英文题目: Experimental Study on CO₂ Hydrogenation to Methanol via Low-Temperature Plasma Synergy

评阅意见

• 评阅意见: 本文围绕绿色甲醇制备, 创新性地构建了低温等离子体-热催化协同反应系统, 提出了多尺度研究框架, 揭示了CO₂在低温等离子体中高效转化为CO后通过热催化选择性合成甲醇的反应机制, 并且对关键工艺参数进行了优化, 研究工作

• 不足之处及修改意见: 1. 在第二节的2.3.5节中, 关于DFT计算的部分描述较为笼统, 建议详细说明选用的交换-相关泛函、基组类型、溶剂选择以及能量收敛标准等补充相关内容。

• 总体评价: A (优秀)

• 评阅结果: 同意答辩

评阅结果

学号: 22260166 姓名: 马云飞

论文题目: 基于低温等离子体转化协同的 CO₂ 加氢制甲醇试验研究

英文题目: Experimental Study on CO₂ Hydrogenation to Methanol via Low-Temperature Plasma Synergy

评阅意见

• 评阅意见: 论文围绕CO₂资源化利用, 创新性开展低温等离子体耦合热催化CO₂制甲醇研究, 掌握了不同参数对低温等离子体CO₂加氢过程的影响规律, 揭示了高能电子直接解离CO₂(v)为CO的主导路径, 以及H₂通过消耗O物种提升转化效率的

• 不足之处及修改意见: 1. 建议绪论进一步修改和完善, 论文内容足够充实, 工作量大, 建议适当精炼一下绪论部分的内容, 突出重点与创新性。

• 总体评价: A (优秀)

• 评阅结果: 同意修改后直接答辩

分类号: TK01

单位代码: 10335

密 级: 无

学 号: _____

浙江大学
硕士学位论文



中文论文题目: 基于低温等离子体转化协同的
CO₂ 加氢制甲醇试验研究

英文论文题目: Experimental Study on CO₂
Hydrogenation to Methanol via
Low-Temperature Plasma Synergy

申请人姓名: _____

校内导师 (组): _____

行业导师: _____

专业学位类别、领域: 能源动力, 动力工程

研究方向: 二氧化碳利用

培养类型: 全日制非定向

所在学院: 工程师学院

论文递交日期 2025 年 4 月 15 日