

同行专家业内评价意见书编号: 20250858250

附件1

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）
同行专家业内评价意见书

姓名: 钱圣涛

学号: 22260142

申报工程师职称专业类别（领域）: 能源动力

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2025年05月13日

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)

作为一名专注于阴离子交换膜(AEM)电解水制氢流场优化设计的硕士研究生，我在过去三年的学习与研究中，深入系统地构建了热力学、电化学、流体力学与材料科学等多个领域的知识体系，为后续的技术创新和应用研究奠定了坚实基础。

专业基础理论方面，我深入理解了Butler-Volmer方程与Nernst-Planck方程在电解水反应动力学中的应用，能够定量分析阳极析氧反应(OER)与阴极析氢反应(HER)的活化过电势分布特征。在电化学与热力学领域，我掌握了电解水反应中能量转换与反应动力学的基本原理。此外，我熟练掌握了COMSOL

Multiphysics中电荷守恒、质量守恒、动量守恒的耦合求解方法，特别在流-电-热多场耦合仿真中攻克了收敛性问题，构建了三维多物理场耦合仿真模型，为AEM电解槽性能分析提供了精确的数值模拟工具。通过这些知识，我能够深入研究流道结构对AEM电解槽性能的影响，进一步为设备优化提供理论支持。

专业技术知识掌握方面，我深入调研了现有AEM电解槽流场设计的研究进展，并基于AEM电解槽流场优化设计的理论基础，创新性地提出了金属泡沫镍流道和镍网流道两种低成本替代结构。通过搭建三维多物理耦合的AEM电解槽仿真模型，并与实际实验数据进行对比，验证了模型的准确性。在此基础上，我从传质特性、传热特性和极化特性等多个方面，系统研究了流道结构对AEM电解槽性能的影响。研究结果表明，泡沫镍流道和镍网流道相比传统蛇形流道，在压降、流速均匀性、温差和工作电流密度等方面均有显著改善，尤其在电解槽工作效率和稳定性方面表现突出。

通过这些系统的理论研究与技术创新，我能够将所学理论与实践相结合，为绿色氢气生产设备的国产化提供了有力的技术支持和解决方案。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

在中石化石油化工科学研究所的两年工程实践(2023年9月至2025年6月)期间，我参与了高效阴离子交换膜电解槽研制与应用示范的国家重点项目，并负责AEM电解槽流道结构的设计与优化工作。这一实践经历不仅提升了我的工程技术能力，也加深了我对新能源领域前沿技术的理解与应用。

主要实践工作：

催化剂浆料配比工艺优化：在该项目中，我负责优化催化剂浆料的配比工艺。催化剂是电解水制氢技术突破的关键，制备好的催化剂粉末通常通过与粘结剂、分散剂等溶液按比例混合后喷涂到膜或扩散层上，形成催化层。我探索了阴离子交换膜电解槽的阳极与阴极催化剂浆料的制备工艺，已完成三电极测试阶段的浆料配比优化，并进入膜电极测试阶段，进一步验证优化结果。

阴离子交换膜电解槽流道结构设计优化：在流道设计方面，我承担了搭建三维多物理场阴离子交换膜电解槽模型的任务。通过Comsol

Multiphysics软件，结合电化学反应、气液传输及热传导等多物理场的耦合，搭建了电解槽的仿真模型，并对其进行了实验验证。通过对比实验数据与模拟结果，我验证了模型的准确性，并提出了两种低成本流道替代结构——

金属泡沫镍流道与镍网流道。研究表明，相比传统蛇形流道，这两种流道在最大压降、流速均匀性、温差及工作电流密度等方面具有显著优势。泡沫镍流道和镍网流道的最大压降分别减少了73%和80%，流速均匀性提升了2.9倍和2.0倍，温差降低了55%和57%，电流密度分别提

升了3.10%和3.21%。

实践成果：在工程实践中，我结合理论与实践，深入探索了解析槽的优化设计，并在此过程中发表了两篇科研论文：一篇中文核心期刊论文和一篇SCI论文，均以第一作者身份完成。

通过这些成果，我为电解水制氢技术的创新与实际应用做出了贡献。

通过两年的企业实践，我不仅巩固了理论知识，还积累了丰富的工程经验，在AEM电解槽流道设计优化方面取得了显著成果，为项目的顺利推进提供了技术支持。

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）

在全球“碳中和”背景下，氢能作为一种清洁、可持续的能源介质，在未来能源体系中将扮演着重要角色。而制氢技术是氢能产业链中“制-储-输-用”的关键环节。随着新能源装机量的不断增加，尤其是风能和太阳能的不可调度性，如何高效地将剩余电能转化为氢气，成为一个亟待解决的技术难题。电解水制氢技术，由于其高效、清洁的特性，逐渐成为实现“power to gas”有效循环的重要途径。阴离子交换膜（AEM）电解水技术作为一种低成本、高动态响应的制氢技术，近年来受到了广泛关注。然而，现有的研究多集中在膜和催化剂材料的开发，流道结构的研究相对较少，流道的设计和优化成为制约AEM电解槽性能和经济性的重要因素。

AEM电解水制氢技术的核心部分之一就是电解槽，而电解槽的流道结构对其性能、制造成本和大规模产业化应用具有深远的影响。流道的作用不仅是提供反应物和去除产物的通道，还直接影响着电解槽的气液两相流分布和传质效率。传统的流道结构，如平行流道、蛇形流道和交指流道，通常采用机械加工方法制造，虽然可以优化流场分布和传质效率，但也存在两大问题：高制造成本；传统流道的制造过程通常依赖于精密铣削、化学蚀刻等复杂工艺，这些工艺不仅增加了生产难度，还大幅提高了成本，尤其是在大规模生产时，双极板的制造成本在电解槽总成本中占比高达18%-

20%。流道死区问题：传统的流道结构在肋下侧存在死区，这些死区不仅阻碍了水和气体通过多孔层的有效传输，而且在高电流密度下容易积累气体产物，导致电解槽性能下降。

为了提高AEM电解水技术的经济性与实用性，我的研究致力于优化流道结构，提出了两种低成本替代流道结构——

金属泡沫镍流道和镍网流道。这两种流道结构具有较低的制造成本，同时能够显著提高电解槽的气液流动均匀性和传质效率，从而有效提升电解槽的整体性能。

在这项工作中，我综合运用了热力学、电化学、流体力学、材料科学等方面的知识，并结合数值仿真与实验验证的方法，制定了流道设计优化方案。以下是我在该项目中所应用的知识体系与具体的解决方案：

电解水制氢的核心是电化学反应，因此理解电化学反应过程中的动力学是优化电解槽流道设计的关键。我深入研究了Butler-Volmer方程和Nernst-Planck方程，结合电解水反应中的阳极析氧反应和阴极析氢反应，量化了不同流道设计对反应动力学和电流分布的影响。此外，针对不同流道结构，我分析了其对电化学反应过程的优化作用，确保电解槽在高电流密度下的性能稳定。

为了全面分析不同流道结构对电解槽性能的影响，我利用COMSOL Multiphysics软件搭建了包含电化学反应、气液传质、热量传输等多物理场耦合的三维仿真模型。通过该模型，我能够精确模拟不同流道结构下的流体流动、温度分布、气液传质以及电荷传递等过程。

在仿真过程中，我重点关注了流道的气液流动均匀性、流速分布、压降以及电流密度分布等

关键参数。通过与实验数据的对比，我验证了仿真模型的可靠性，为后续的流道设计提供了理论依据。

针对传统流道存在的高制造成本和死区问题，我提出了金属泡沫镍流道和镍网流道两种低成本的替代方案。这两种材料不仅具有较低的制造成本，还能够通过其多孔结构和网状结构改善气液流动的均匀性和传质效率。通过研究不同孔隙率、渗透率、厚度和孔径的泡沫镍和镍网流道结构，我进一步优化了其在电解槽中的应用性能。

研究表明，泡沫镍流道和镍网流道相比传统蛇形流道，在多个性能指标上均表现出显著优势：最大压降：泡沫镍流道和镍网流道的最大压降分别减少了73%和80%，显著降低了流体阻力。流速均匀性：泡沫镍流道和镍网流道的流速均匀性分别提高了2.9倍和2.0倍，确保了更好的传质效率。温差：两种流道结构的温差分别降低了55%和57%，从而改善了电解槽的热管理。电流密度：在2.3V的工作电压下，泡沫镍流道和镍网流道的电流密度分别提高了3.10%和3.21%。这些实验结果证明，泡沫镍流道和镍网流道不仅在性能上优于传统流道，还具备较低的制造成本，具有广泛的应用前景。

在实验验证阶段，我们进行了实际实验，对比了同工况同流道下的实验测试极化曲线与仿真模拟的极化曲线，验证了仿真结果的准确性。通过与传统流道的对比实验，确认了这两种替代流道在提升电解槽性能方面的显著优势。此外，我还对不同结构参数（如孔隙率、渗透率、厚度等）进行了优化分析，确定了泡沫镍流道和镍网流道的最佳结构配置。

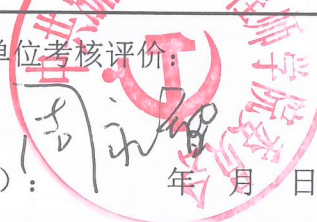
在项目的实施过程中，我与团队成员紧密合作，共同完成了电解槽的优化设计和实验验证。最终，我们的优化方案不仅显著提升了电解槽的性能，还有效降低了制造成本，为AEM电解水制氢技术的产业化应用提供了技术支持。

通过这项工作，我不仅深入应用了所学的工程知识，还通过数值仿真和实验验证相结合的方式，解决了AEM电解水技术中流道设计的关键问题。金属泡沫镍流道和镍网流道的设计优化，不仅提高了电解槽的性能，还为降低其制造成本提供了创新解决方案。

(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
阴离子交换膜电解水制氢技术的研究进展	核心期刊	2024年01月25日	新能源进展	1/5	
Numerical investigation of metal foams as flow channels in anion exchange membrane water electrolyzers	TOP期刊	2025年05月02日	Chemical Engineering Science	1/8	
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: 84 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: 1.5 年(要求1年及以上) 考核成绩: 82 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: 陈圣涛	

二、日常表现考核评价及申报材料审核公示结果

日常表现考核评价	非定向生由德育导师考核评价、定向生由所在工作单位考核评价： ☒优秀 ☐良好 ☐合格 ☐不合格 德育导师/定向生所在工作单位分管领导签字（公章）： 年 月 日
申报材料审核公示	根据评审条件，工程师学院已对申报人员进行材料审核（学位课程成绩、专业实践训练时间及考核、学位论文、代表作等情况），并将符合要求的申报材料在学院网站公示不少于5个工作日，具体公示结果如下： ☒通过 ☐不通过（具体原因： 工程师学院教学管理办公室审核签字（公章）： 年 月 日

浙江大学研究生院
攻读硕士学位研究生成绩表

学号：22260142	姓名：钱圣涛	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：24.0学分			已获得：30.0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	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	90	公共学位课	2022-2023学年冬季学期	工程中的有限元方法		2.0	91	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	90	专业学位课	2022-2023学年秋冬学期	高阶工程认知实践		3.0	77	专业学位课
2022-2023学年秋季学期	新能源发电与变流技术		2.0	94	专业学位课	2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	89	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	低碳能源系统理论与设计		2.0	89	专业选修课	2022-2023学年秋冬学期	研究生英语		2.0	71	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	工程管理		2.0	85	专业选修课	2022-2023学年春季学期	氢能制备和利用		2.0	87	专业选修课
2022-2023学年秋冬学期	工程伦理		2.0	78	公共学位课	2022-2023学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	74	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	综合能源系统集成优化		2.0	80	专业学位课	2023-2024学年冬季学期	研究生英语应用能力提升		2.0	73	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	研究生论文写作指导		1.0	85	专业学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	

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

阴离子交换膜电解水制氢技术的研究进展*

钱圣涛^{1,3}, 何勇^{1,3}, 翁武斌^{1,3}, 王智化^{1,3,†}, 荣峻峰²

(1. 浙江大学, 能源高效清洁利用全国重点实验室, 杭州 310027; 2. 中国石化石油化工科学研究院, 北京 100083;
3. 浙江大学, 青山湖能源研究基地, 杭州 310027)

摘要: 氢能是我国2060年“碳中和”的关键支撑, 氢气制备又是氢能产业链“制、储、输、用”四大环节中的首要环节, 绿色高效地制取氢气是氢能发展的基础。阴离子交换膜电解水(AEMWE)作为新兴的“绿氢”技术, 充分结合了碱性水电解技术与质子交换膜电解技术的优势, 有望成为最具发展潜力的可再生能源制氢技术。对AEMWE的原理与研究现状做了简要分析, 详细论述阴离子交换膜(AEM)水电解槽关键部件的研究进展与发展方向, 包括阴离子交换膜、阳极、阴极催化剂、双功能催化剂、离子膜、膜电极、多孔传输层、双极板及电解液。最后结合研究现状, 展望了AEMWE制氢技术的发展方向。

关键词: 阴离子交换膜; 电解水; 制氢; 电解槽; 膜电极

中图分类号: TK91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2024.01.001

Research Progress of Anion Exchange Membrane Water Electrolysis Technology for Hydrogen Production

QIAN Shengtao^{1,3}, HE Yong^{1,3}, WENG Wubin^{1,3}, WANG Zhihua^{1,3,†}, RONG Junfeng²

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Sinopec Scientific Research Institute of Petrochemical Technology, Beijing 100083, China;
3. Qingshanhu Energy Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Hydrogen energy is the key support for China's "carbon neutrality" in 2060, and hydrogen preparation is the primary link in the four major links of the hydrogen energy industry chain, namely "production, storage, transmission, and use". The green and efficient production of hydrogen is the basis for the development of hydrogen energy. Anion exchange membrane water electrolysis (AEMWE), as an emerging "green hydrogen" technology, fully combines the advantages of alkaline water electrolysis and proton exchange membrane electrolysis technology, and is expected to become the most promising renewable energy hydrogen production technology. This paper briefly analyzes the principle and research status of AEMWE, and discusses in detail the research progress and development direction of key component of anion exchange membrane (AEM) water electrolyzer, including anion-exchange membrane, anode, cathode catalyst, bifunctional catalyst, ionomer, membrane electrodes, porous transport layer, bipolar plate, and electrolyte. Finally, in light of the current research status, the research and development direction of hydrogen production technology by AEMWE is envisioned.

Keywords: anion exchange membrane; water electrolysis; hydrogen production; electrolyzer; membrane electrode

0 引言

在全球“碳达峰”“碳中和”的大背景下, 大幅提高非化石能源的比例、提升能源利用效率和效益、构建以可再生能源为主体的新型电力系统已成为大势所趋。据国际能源署(International Energy Agency,

IEA)发布的《2022年世界能源展望》报告, 可再生能源发电量在总发电量中比重将从2021年的28%上升至2030年的49%, 到2050年将达到80%^[1]。近年来, 我国新能源装机量持续攀升, 从国家能源局公布的数据来看, 2022年我国风电、光伏发电量达到了1.19万亿kW·h, 占全社会用电量的13.8%,

* 收稿日期: 2023-10-20 修订日期: 2023-10-31
基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2022ZJFH004)

† 通信作者: 王智化, E-mail: wangzh@zju.edu.cn

引用本文: 钱圣涛, 何勇, 翁武斌, 等. 阴离子交换膜电解水制氢技术的研究进展[J]. 新能源进展, 2024, 12(1): 1-14.

Citation: QIAN Shengtao, HE Yong, WENG Wubin, et al. Research progress of anion exchange membrane water electrolysis technology for hydrogen production[J]. Advances in new and renewable energy, 2024, 12(1): 1-14.



Numerical investigation of metal foams as flow channels in anion exchange membrane water electrolyzers[☆]

Shengtao Qian^{a,b}, Junfeng Rong^{b,*}, Lufan Zheng^b, Xikang Zhao^b, Yong He^a, Wubin Weng^a, Rui Mu^a, Zhihua Wang^{a,*}

^a State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

^b State Key Laboratory of Petroleum Molecular & Process Engineering, SINOPEC Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083, China

ARTICLE INFO

Keywords:

Anion exchange membrane water electrolyzer
Metal foam flow channel
COMSOL multiphysics model
Hydrogen production

ABSTRACT

The structure of the flow channel significantly affects the electrolytic performance and overall cost of anion exchange membrane water electrolyzer (AEMWE). In this study, the viability of metal foams (MF) as flow path alternatives for AEMWE is validated through numerical simulations. A three-dimensional (3D) numerical model featuring coupled multiphysics fields is developed and validated with experimental results to show excellent precision. Based on this model, simulations are carried out and reveal that the MF configuration achieves 5.1 A cm⁻² at 2.3 V, outperforming serpentine and parallel flow fields by 2.49 % and 2.09 %, respectively. In addition, compared with the serpentine flow field, the MF architecture reduces peak temperature gradients by 25.5 % through enhanced convective dissipation, and its tortuosity-optimized porous network reduces pressure drops by 99.6 %. Concurrently, the velocity uniformity shows a 3.23-fold improvement, ensuring stable mass transfer. These synergistic advancements, including elevated current density, thermal homogeneity and hydraulic efficiency, establish MF flow fields as a potential solution for high performance and low-cost AEMWEs.

1. Introduction

In the context of the ongoing energy transition, hydrogen is considered as a crucial medium for energy storage and conversion due to its cleanliness, extensive energy capacity density, and diverse applications (Squadrito et al., 2023; Yang et al., 2022). Efficient and environmentally friendly production of hydrogen production is the basis for the development of hydrogen energy, and water electrolysis coupled with variable renewable energy (VRE) is widely regarded as an ideal technology. Currently, three dominant water electrolysis technologies have been developed and applied for scenarios of lower temperatures, and their structures are shown in Fig. 1. Alkaline water electrolyzer (AWE) and proton exchange membrane water electrolyzer (PEMWE) are the two commercially available technologies, but AWE struggles with low efficiency and limited adaptability to VRE (Chatenet et al., 2022), whereas PEMWE faces challenges due to high costs and reliance on expensive key materials such as iridium and platinum (Chen et al., 2022). As a comparison, AEMWE, which combines the low cost of AWE and the high compatibility with VRE of PEMWE, has recently garnered increasing

amount of attention (Miller et al., 2020). In the past few years, researchers have spent extensive amount of efforts and made significant progress in the core materials such as anion exchange membranes (AEM) and catalysts with enhanced performance and stability (Du et al., 2022; Chen et al., 2021; Motealleh et al., 2021) which have shown its great potential in the large-scale and low-cost production of hydrogen. However, in order to build effective and durable electrolyzers for real-life applications, the fluid mechanics within the cell must be optimized or the high performance of the core materials would not be delivered.

The performance of electrolyzer is significantly impacted by the fluid mechanics within the cell, which is largely determined by the flow channel. When the fluid mechanics is not regulated properly, the generation of a considerable quantity of gas bubbles that are not promptly removed, especially at higher current densities, will impede the diffusion of reactants to the catalytic layers (CL), thus reducing the efficiency of the electrolyzer (Lin et al., 2022). Meanwhile, local overheating due to gas aggregation would damage the electrolyzer or cause serious safety risks (Li et al., 2018). In many cases, flow channel is realized by constructing slots with various shapes on the bipolar plate (BP) (Jung et al.,

[☆] This article is part of a special issue entitled: 'Sustainable Chemical Engineering' published in Chemical Engineering Science.

* Corresponding authors.

E-mail addresses: rongjf.ripp@sinopec.com (J. Rong), wangzh@zju.edu.cn (Z. Wang).

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121782>

Received 11 December 2024; Received in revised form 16 March 2025; Accepted 2 May 2025

Available online 4 May 2025

0009-2509/© 2025 Published by Elsevier Ltd.