

# 陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

## 一、项目基本情况

项目名称	等离子体协同催化制氢调控氨燃烧的理论及方法
主要完成人	胡二江，单英骥，殷阁媛，宁德忠
主要完成单位	西安交通大学，陕西智库科学技术研究院有限公司，广西玉柴机器股份有限公司

## 二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input checked="" type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
<p>提名意见：</p> <p>该项目在国家自然科学基金、陕西省自然科学基金等的支持下，围绕等离子体协同催化制氢调控氨燃烧的理论及方法，历经 10 余年系统深入地研究，提出了等离子体协同催化增效的新理论和新方法，解决了氨分解传统催化方法启动慢、分解温度高等问题。发展了基础燃烧特性高压宽温域测量方法，开发了基于实验数据全局智能优化的人工神经网络-贝叶斯框架，建立了高保真燃烧反应动力学新模型。提出活性组分强化氨燃烧新途径，建立了分级/分层燃烧、等离子体介入的调控方法，实现了氨氢高效稳定低 NO<sub>x</sub> 排放燃烧，并在内燃机和燃气轮机燃烧室设计中应用。</p> <p>5 篇代表性论文被欧、美、日、韩、中等国院士及学会 Fellow 等引用，产生了广泛的学术影响。等离子体协同催化增效理论、高保真氨氢燃烧反应动力学模型和等离子体催化原位供氢调控氨燃烧方法在绿色航空国际会议、工程热物理燃烧会议等国内外学术会议做大会/特邀报告 14 次。项目第一完成人为国家级领军人才、国际能源领域权威期刊 Fuel 编委、中国内燃机学会燃料与润滑油分会副主任委员、中国工程热物理学会燃烧学年会主席。连续 5 年入选爱思唯尔中国高被引学者、连续 5 年入选全球前 2% 顶尖科学家榜单，获中国内燃机学会史绍熙人才奖、中国动力工程学会首届青年科技奖。</p> <p>推荐本项目申报陕西省自然科学一等奖。</p> <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p>			

### 三、项目简介

该项目属动力工程及工程热物理学科，支撑发动机技术领域。

习总书记在二十大报告中强调，需要加快推动能源结构调整优化，推进工业领域清洁低碳转型，零碳低碳燃料是改善我国能源结构、实现双碳战略的重要途径。“碳达峰、碳中和”承诺的提出将我国交通运输行业的减碳提升到了新的战略高度。氨作为一种零碳燃料，可由绿电规模化制取，以氨为载体的零碳能源发展路线被国际社会广泛关注。美国、欧盟、日本和我国均发布相关战略，推动氨在热力和动力装备上的燃烧应用。然而，氨的反应活性低，存在火焰传播速度慢、点火困难、燃烧稳定性差和  $\text{NO}_x$  排放高等问题，难以直接使用。氢反应活性高，将氨分解制氢形成氨氢融合燃料是氨燃烧利用的关键策略，氨氢融合被认为是清洁能源领域前瞻性、战略性的发展方向。

本项目在国家自然科学基金、陕西省创新人才推进计划—青年科技新星项目和陕西省自然科学基金等项目的持续支持下，围绕等离子体协同催化制氢调控氨燃烧的理论及方法，历经 10 余年系统深入地研究，提出了等离子体催化协同增效理论；发展了基础燃烧特性高温高压测量方法，构建了高保真氨氢燃烧反应动力学模型；提出活性组分介入、富燃-贫燃分级的氨燃烧调控策略，实现了氨氢高效稳定低  $\text{NO}_x$  排放燃烧，并在内燃机和燃气轮机燃烧室设计中得到应用。主要科学发现点有：

(1) 提出了等离子体催化协同增效理论和方法。由于氨分子  $\text{N-H}$  键键能高，难断键，现有热催化氨分解方式启动时间长达数十分钟，完全分解温度高。通过约化场强调控、振动态能级强化的方法，开发出兼具效率与通量的等离子体。开发了具备适宜氮吸附能的高效双金属催化剂，并与等离子体协同增效。建立了分子束质谱和发射光谱等离子体诊断方法，实现激发态粒子和自由基的原位检测。发展了等离子体催化氨分解模型，揭

示了等离子体与催化在氨分解中的协同增效机制,形成了等离子体催化协同增效理论和调控方法。

(2) 构建了高保真氨氢燃烧反应动力学模型。受限于实验手段,现有氨氢火焰速度最高压力和温度与发动机实际工况仍有一定差距,反应动力学模型不准确、氢调控氨燃烧机制复杂、定向调控机理缺失。发展了层流火焰速度高温高压测量方法,解决了氨氢高温高压基础燃烧参数空缺的问题。设计出反向压力密封的双腔高压流反应器,实现高压下  $\text{NO}_x$  浓度的测量,构建支撑氨氢燃烧反应动力学模型的宽温高压数据库。开发基于实验数据全局智能优化的人工神经网络-贝叶斯框架,构建高保真燃烧反应动力学模型。

(3) 提出了活性组分介入的氨燃烧调控策略。由于氨燃烧  $\text{NO}_x$  排放高,缺乏氨燃烧效率和  $\text{NO}_x$  排放的多维度控制策略。结合氨氢燃料实验数据和动力学参数,构建了点火/熄火/回火边界预测模型。耦合可调谐半导体吸收光谱与计算机层析成像技术,实现三维温度场和  $\text{NO}_x$  浓度场的非接触测量。提出富燃-贫燃分级、活性组分介入的  $\text{NO}_x$  燃烧调控策略,实现了氨氢燃料高效稳定低  $\text{NO}_x$  燃烧。验证了新方法在发动机设计中的适用性,支撑了发动机燃烧过程优化。

等离子体协同催化增效制氢理论、高保真燃烧反应动力学模型和等离子体催化原位供氢调控氨燃烧方法在绿色航空国际会议、工程热物理燃烧会议等做大会/特邀报告 14 次。项目第一完成人为国家级高层次人才特聘教授、国际能源领域权威期刊 *Fuel* 编委、中国内燃机学会燃料与润滑油分会副主任委员、中国工程热物理学会燃烧学年会主席。连续 5 年入选爱思唯尔中国高被引学者和全球前 2% 顶尖科学家榜单,获中国内燃机学会史绍熙人才奖、中国动力工程学会首届青年科技奖。

## 四、客观评价

5 篇代表性论文发表于 Combust. Flame, Fuel Process. Technol, Int. J. Hydrog. Energy, Fuel 等国内外, 被美、英、日、韩、中等国院士及学会 Fellow 等引用, 产生广泛的学术影响。以下为国内外知名学者和机构的第三方代表性评价摘录:

1、发现点 1 中等离子体协同双金属催化剂高效制氢理论和方法的客观评价。

1) 美国圣母大学、等离子体催化领域知名教授 Hicks (ACS Catal, 2014, 14, 6749-6798) 评价称“利用双金属掺杂显著提高了氨催化剂性能, 降低了分解温度, 表现出出色的稳定性”、“发现了等离子体与催化协同增效, 实现 550°C 氨的 100% 转化”、“在等离子反应器的创新设计对氨分解制氢是非常必要的”。(引用代表性论文 1)

2) 比利时安特卫普大学 Bogaerts 教授 (Curr Opin Green Sustain Chem, 2024, 47, 100916) 撰文称“发现等离子体能够降低氨的起始反应温度, 揭示等离子体协同催化增效关键是抑制催化剂表面氮化物的形成”。(引用代表性论文 1)

3) 美国内布拉斯加大学 Sarin 教授撰文 (ChemSusChem, e202400776) 称“发现了等离子体能够激活稳定的氮分子以促进氨分解”。(引用代表性论文 1)

4) 中国工程院院士、上海交通大学讲席教授黄震连续撰文评价 (Fuel, 2023, 351, 128796, ACS Sustainable Chem. Eng. 2024, 12, 14349-14362) 称“设计的 CeO<sub>2</sub> 载体在 Ce<sup>4+</sup> 和 Ce<sup>3+</sup> 之间有高的氧化还原能力、独特的电子性质以及容易诱导氧空位的能力”。“在氨分解方面等离子体场比电场效果更佳”。(引用代表性论文 1)

2、发现点 2 中氨氢基础燃烧数据、模型和机理的客观评价。

1) Combust. Flame 编委、德州农工大学 Petersen 教授以及爱尔兰皇家科学院院士、爱尔兰国立大学 Curran 教授 (J Eng Gas Turbine Power, 2013, 35, 021503) 直接采用申请人数据作为化学反应动力学模型验证的重要依据。(引用代表性论文 2)

2) 德国卡尔斯鲁厄理工学院、燃烧与爆炸首席研究员 Kuznetsov 评价称 (Combust Sci Technol, 2012, 184, 1427-1444) “建立了宽压力范围 (1-80 bar) 层流火焰速度和温度的关系式, 与实验结果吻合极好”。(引用代表性论文 2)

3) 雅典国家技术大学, Enegy 和 Energy Convers. Manag 期刊副主编 Rakopoulos 教授评价称 (Int J Hydrog Energy, 2010, 35, 12545-12560) “建立了近发动机的工况下 (宽当量比、高压和高温) 的关联式, 同时将其直接用于 CFD 模拟”。(引用代表性论文 2)

4) 韩国蔚山国家科学技术研究院、氢能与新能源学会主任 Lim 教授(J Energy Inst, 2024, 117, 101817)评价称“模型具极高的精度”,“能够准确预测宽工况下的实验数据”,“活性组分添加使火焰速度提高至3倍”,“发现C-N交叉反应对NO<sub>x</sub>排放的关键作用”。(引用代表性论文3)

5) 德国科学院院士、前国际燃烧学会主席、德国洪堡基金评委会副主席 Kohse-Höinghaus 教授评价称 (Chemical Reviews, 2023, 123, 5139-5219) “活性组分是氨着火延迟期的促进剂、氨火焰传播速度的强化剂”。(引用代表性论文3)

6) 南洋理工大学、美国国际氢能协会杰出科学成就奖获得者 Hwa 教授, 评价称 (Energy, 2022, 260, 125090) “申请人构建模型与实验结果吻合极好”。(引用代表性论文4)

7) 中国工程院院士、上海交通大学讲席教授黄震评价称 (Energy, 260, 2022, 125090) “发现了活性组分能够降低氨自着火温度、促进燃烧”。(引用代表性论文4)

3、发现点3 活性组分强化氨燃烧, 分级/分层、等离子体介入降低 NO<sub>x</sub> 新途径的客观评价。

1) 加利福尼亚州立大学 Agbulut 教授 (Int J Hydrog Energy, 2024, 92, 1236-1247) 称“通过氢气缸内直喷实现分层燃烧策略, 提供了空气和燃料的精准比例, 降低 NO<sub>x</sub>”、“发动机掺氢增加了火焰传播速度、燃烧效率, 加快了燃烧进程”。(引用代表性论文4)

2) 法国国家科学研究中心 Lounici 教授评价称 (Int J Hydrog Energy, 2014, 39, 21297-21306) 评价称“提出的掺氢策略能够强化点火, 提高发动机热效率”。(引用代表性论文4)

3) 芬兰阿尔托大学、国际能源署 IEA 主席 Larimi 教授评价称 (Int J Hydrog Energy, 2021, 46, 37469-37486) “掺氢是强化发动机燃烧的最佳选择”。(引用代表性论文4)

4) 伊朗菲尔多西大学、燃烧领域知名专家 Zareei 教授评价称 (Int J of Eng Research 2023, 24, 2039-2050) “揭示了直喷发动机掺氢后的燃烧和排放规律, 指出最佳点火正时”。(引用代表性论文4)

5) 诺丁汉大学 Paul Shayler 教授撰文称 (Renew. Sust. Energ. Rev. 70 (2017) 666-697) “掺氢能够强化点火提高发动机热效率”。(引用代表性论文4)

**五、代表性论文专著目录**  
(不超过 8 条, 其中代表性论文不超过 5 篇, 代表性专著不超过 3 部)

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Plasma-assisted low temperature ammonia decomposition on 3d transition metal (Fe, Co and Ni)	Fuel Processing Technology	Yibo Gao, Erjiang Hu, Yang Yi, Geyuan Yin, Zuohua Huang	2023 年 244 卷 1076 95 页	2023 年 6 月	Erjiang Hu	Yibo Gao	高一博, 胡二江, 殷阁媛, 仪洋, 黄佐华	37	SCIE	是
2	Experimental and numerical study on laminar burning velocities and flame instabilities of hydrogen-air mixtures at elevated pressures	International Journal of Hydrogen Energy	Erjiang Hu, Zuohua Huang, Jiajia He, Haiyao Miao	2009 年 34 卷 8741-8755 页	2009 年 10 月	Zuohua Huang	Erjiang Hu	胡二江, 黄佐华, 何佳佳, 苗海燕	175	SCIE	是
3	Experimental and kinetic study on laminar flame speeds of ammonia/dimethyl ether/air under high temperature	Combustion and Flame	Geyuan Yin, Jinglun Li, Meng Zhou, Jiaying Li, Chaojun Wang, Erjiang Hu, Zuohua Huang	2022 年 22 卷 1119 15 页	2022 年 4 月	Erjiang Hu	Geyuan Yin	殷阁媛, 李竞伦, 周萌, 李家兴, 王朝君, 胡二江, 黄佐华	96	SCIE	是

4	Combustion and emission characteristics of a spray guided direct-injection spark-ignition	International Journal of Hydrogen	Jianjun Zheng, Erjiang Hu, Zuohua Huang, Dezhong Ning, Jinhua Wang	2011年36卷1115-1163页	2011年8月	Zuohua Huang	Jianjun Zheng	郑建军, 胡二江, 黄佐华, 宁德忠, 王金华	41	SCIE	是
5	“一带一路”国际资本交易中心构建策略研究	商业经济研究	单英骥, 魏修建	2021年, 22卷154-	2021年11月	魏修建	单英骥	单英骥, 魏修建	1	CNKI	是
6											
7											
8											
合 计											
补充说明（视情填写）：											



## 六、主要完成人情况表

姓 名	胡二江	排 名	1
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：是发现点 1、 2、 3 主要学术思想的提出者，代表性论文 1 和 4 的通讯作者，2 的第一作者，提出了等离子体协同催化制氢调控氨燃烧的学术创新思路，建立了等离子体协同催化增效的理论，发展了基础燃烧特性高压宽温域测量方法，提出活性组分强化氨燃烧新途径，建立了分级/分层燃烧、等离子体介入的调控方法，实现了氨氢高效稳定低 NOx 排放燃烧，并在内燃机和燃气轮机燃烧室设计中得到应用。投入本项目的工作量为 80%。			

姓 名	单英骥	排 名	2
行政职务	执行院长		
技术职称	高级		
工作单位	陕西智库科学技术研究院有限公司		
完成单位	陕西智库科学技术研究院有限公司		
对本项目主要学术贡献：是发现点 3 主要学术思想的提出者，代表性论文 5 的第一作者，氨氢燃烧技术契合“一带一路”沿途众多国家能源转型的压力，可应用于工业窑炉、发电厂中，实现资源优势转化为经济优势。此外，基于制氢方法和燃烧技术提出了氢能源标准，推动了氨氢燃烧技术产业在沿线国家和地区的广泛推广。投入本项目的工作量为 50%。			

姓 名	殷阁媛	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：是发现点 2 主要学术贡献者，代表性论文 3 的第一作者，发展了高压宽温域层流火焰速度/NOx/瞬态温度场诊断技术，建立了氨氢发动机全工况全燃烧参数的数据库，构建了高保真燃烧反应动力学模型，揭示了氢影响氨燃烧和 NOx 排放的主导路径，并在内燃机燃烧室结构设计和 CFD 模拟中得到应用。投入本项目的工作量为 50%。			

姓 名	宁德忠	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	正高级工程师		
工作单位	广西玉柴机器股份有限公司		
完成单位	广西玉柴机器股份有限公司		
对本项目主要学术贡献：是发现点 3 的主要贡献者，代表性论文 4 的共同作者，在发动机上将基础燃烧数据库及工程预测模型用于燃烧室结构设计优化，取得了很好的效果。投入本项目的工作量为 40%。			

## 七、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：围绕等离子体协同催化制氢调控氨燃烧的理论及方法，提出了等离子体协同催化增效的新理论和新方法，解决了氨分解传统催化方法启动慢、分解温度高等问题。发展了基础燃烧特性高压宽温域测量方法，开发了基于实验数据全局智能优化的人工神经网络-贝叶斯框架，建立了高保真燃烧反应动力学新模型。提出活性组分强化氨燃烧新途径，建立了分级/分层燃烧、等离子体介入的调控方法，实现了氨氢高效稳定低 NO<sub>x</sub> 排放燃烧，并在内燃机和燃气轮机燃烧室设计中得到应用。</p>	

单位名称	陕西智库科学技术研究院有限公司
<p>对本项目主要学术贡献：氨氢燃烧技术契合“一带一路”沿途众多国家能源转型的压力，可应用于工业窑炉、发电厂中，实现资源优势转化为经济优势。基于制氢方法和燃烧技术提出了氢能源标准，推动了氨氢燃烧技术产业在沿线国家和地区的广泛推广。</p>	

单位名称	广西玉柴机器股份有限公司
<p>对本项目主要学术贡献：在发动机上开展了等离子体协同催化分解氨制氢的研究工作，实现了宽范围氢气比例的高适应性和灵活可控。将基础燃烧数据库及工程预测模型用于燃烧室结构设计优化，取得了很好的效果。</p>	

### 完成人合作关系说明

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	共同立项	胡二江（排名 1） 单英骥（排名 2）	2018 年 10 月	陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设：氢能源碳中和定价关键技术研究与应用	项目合同（任务）书 （其他附件 12）
2	论文合著  论文合著	胡二江（排名 1） 殷阁媛（排名 3）	2016 年 09 月	论文： Experimental and kinetic study on laminar flame speeds of ammonia/dimethyl ether/air under high temperature and elevated pressure.  博士学位论文：殷阁媛，2,4,4-三甲基-1-戊烯基础燃烧特性和化学反应动力学机理研究	代表性论文 3  中国内燃机优秀博士学位论文 （其他附件 18）
3	论文合著	胡二江（排名 1） 宁德忠（排名 4）	2011 年 8 月	论文： Combustion and emission characteristics of a spray guided direct-injection-spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends.	完成人合作关系证明 4
（不限条目）					