

# 陕西省自然科学奖公示信息

(2026年度)

## 一、项目基本情况

|        |                           |
|--------|---------------------------|
| 项目名称   | 高温高压工质热物性精准测量、预测和智能设计理论方法 |
| 主要完成人  | 何茂刚、刘向阳、张颖、薛飒             |
| 主要完成单位 | 西安交通大学                    |

## 二、提名意见（适用于部门、机构提名）

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                    |      |                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------|-------------------------------------------------------------------------|
| 提 名 者                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 中共陕西省委军民融合发展委员会办公室 | 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>该项目针对跨/超临界二氧化碳、铅铋合金、氦/氘、高能燃料等新一代高温高压工质热物性测量精度低、预测误差大和装置匹配难的问题，在国家自然科学基金重大仪器、杰青、重点项目、重大专项等资助下，围绕高温高压工质热物性精准测量预测方法和智能设计理论，开展了 20 余年的深入研究，揭示了高温高压下热物性测量偏差的产生机制，建立了准势差/无势差绝对测量理论和方法，研制了国际领先的高温高压热物性高精度测量装置；揭示了分子作用/运动对热物性的耦合影响机制，提出了宏观状态-分子作用/运动-热物性复杂关联的数理描述，建立了精度和速度协同提高的宽温压域工质热物性预测模型；揭示了热物性稀疏数据下机器学习生成效率低的发生机理，创建了小数据集驱动的原子级工质生成式智能设计方法，建立了热力工质/装置构型耦合设计理论。项目系统性构建了高温高压工质的热物性表征和分子设计理论体系，理论挑战性强，受到了国内外同行专家的高度肯定，研究成果应用于“超碳 1 号”、运载火箭发动机、铅铋快堆、高温气冷堆、大型军民用飞行器风洞等国家重大工程。提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。</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

工质是所有热力系统和热工装置的“血液”，开发新型工质是突破能效瓶颈的根本途径，对实现国家“双碳”战略、保障能源安全至关重要。工质黏度、比热容、导热系数等热物性不但决定了热力系统性能，也是热质传递过程设计必需的基础数据。为实现火箭推进动力、液态金属快堆、高速风洞等技术创新，一批跨/超临界流体、铅铋合金、重气体、离子液体等工质被开发。这些工质的共性是高温高压条件下应用，其热物性数据极难获取，导致无法与热力系统精准匹配。因此，高温高压工质的热物性数据库建立及主动设计是我国能源动力技术原始创新的重大需求。

在高温高压下，温压控制难、材料变形大、临界涨落强，**现有工质热物性测量理论方法存在很大的势差偏移，导致“测不准”**。实验数据的缺乏又导致对微观变化机理认识不足，**现有热物性理论预测模型无法描述构效关系，导致“猜不准”**。稀疏热物性数据下工质结构特征提取难，**现有工质设计方法生成效率低、与热力系统匹配度差，导致“选不准”**。因此，亟需突破高温高压工质热物性测量、预测和分子结构主动设计的理论和方法，推动先进能源动力装备的创新迭代与工程应用。

该项目在国家自然科学基金重大仪器、杰青、重点项目、国家重大专项等资助下，围绕“**高温高压下工质热物性与宏观势差、微观结构的关联机理**”和“**原子级生成式工质智能设计方法**”的关键科学问题，开展了 20 余年的深入研究，揭示了高温高压下热物性测量偏差的产生机制，建立了准势差/无势差绝对测量理论和方法，研制了国际领先的高温高压热物性高精度测量装置；揭示了分子作用/运动对热物性的耦合影响机制，提出了宏观状态-分子作用/运动-热物性复杂关联的数理描述，建立了精度和速度协同提高的宽温压域工质热物性预测模型。揭示了热物性稀疏数据下机器学习生成效率低的发生机理，创建了大数据集驱动的原子级工质生成式智能设计方法，建立了热力工质/系统构型耦合设计理论。主要的科学发现有：

#### 1. 建立了高温高压流体热物性准势差/无势差绝对测量理论和方法

阐明了高温高压下温差、压差等测量势差的变化规律，发现高温高压下剧烈的漏热、毛细管热膨胀是造成势差偏移、测量理论出现严重偏差的根本原因。提出了势差稳定构建和准确测量的方法，确定了势差与热物性的关联方程，建立了高温高压黏度和比热容的准势差绝对测量方法，测量不确定度分别从 3%、2%提高至 0.7%、0.5%。提出了导热系数无势差光散射绝对测量方法，解决了近临界剧烈涨落引起势差大幅波动的问题，测量不确定度从 4%提高至 2%。获得的高温高压工质实验数据，填补了跨/超临界水/CO<sub>2</sub>、铅铋合金、重气体和离子液体等在关键应用区域数据空白。

美国国家标准与技术研究院 NIST 和大型通用流程模拟软件 Aspen Plus 的数据库分别收录了该项目获得的 464 组和 355 组、共 9911 个热物性实验数据，广泛使用于全球工程和科研人员。美国工程院院士 Jefferson W Tester 等引用指出：“开发了可靠的热物性绝对测量方法”。

#### 2. 提出了宽温压域流体热物性的微观分子作用理论预测理论和方法

建立了极性、缔和等分子作用的量化模型，揭示了对热力学性质的差异化影响机理，创建了分子作用简化准则，提出了分子贡献法热力学性质预测模型的构建理论，

解决了传统模型分子作用解析不足导致的精度高而速度慢问题，实现了宽温压域内精度和速度的协同提高。发现了分子微观运动/作用对输运性质的耦合影响机理，创建了宽温压域空穴形成能/活化能耦合黏度模型和分子振动理论导热系数模型，预测精度提高了 1 倍。构建了分子基团与上述热物性模型参数的关联模型，创建了离子/分子不同结构流体纯质和混合物基团联用方法，形成了工质热物性的普适性预测方法。

中国科学院院士张锁江研究员引用指出：“**建立的黏度模型同时考虑了温度和压力影响，在整个温度和压力范围内可以很好地描述温度-压力-黏度间的关联**”。英国皇家工程院院士 J.P. Martin Trusler 教授引用指出：“**国内外唯一同时建立高温高压生物柴油密度与黏度普适性预测模型的研究团队**”。

### **3. 提出了耦合热力系统性能的小数据集工质生成式智能设计理论和方法**

揭示了稀疏数据下传统数字编码无法准确提取工质分子结构特征的发生机理，提出了基于数字/语法混合编码的机器学习方法，建立了热物性导向的离子/分子型工质生成式设计模型，实现了原子层面上小数据集驱动的工质分子结构智能设计，将现有方法十万级的数据量需求降为千级，分子设计有效率由 10% 提高到 90% 以上。设计开发了碳捕集、航空动力冷却等新型高效工质。揭示了“多热源-热物性-热力系统”高度匹配机制，构建了多级余热深度利用的工质/系统构型耦合设计理论，开辟了热动力装置提效新途径。

Chemical Communications 副主编 Kim E. Jelfs 教授和英国皇家化学会 Fellow Tom Welton 教授引用指出：“**解决了数据稀缺的问题，实现了工质的高效生成式设计**”。中国科学院院士舒歌群教授和韩国工程院院士 Kyung Chun Kim 教授引用指出：“**提出的新型发动机余热利用热力循环可以高效回收余热、节省大量燃油**”。

该项目发表学术论文 135 篇，被 WOS 核心合集他引 1300 余次，3 篇学术论文入选 ESI 高被引论文，出版教材 1 本，相关核心技术授权国家发明专利 13 项。代表性论文总他引 726 次，5 篇代表性论文被 WOS 核心合集他引 252 次，2 名核心成员人入选全球前 2% 顶尖科学家。研究成果得到 53 位中外院士和国际知名协会 Fellow、国际期刊主编/副主编的高度评价。

项目研究团队主办工质热物性相关系列国际会议 1 项（亚洲热物性会议）和国内会议 2 项（中国热物性学术会议、工程热物理学会热力学分会青年论坛），受邀作国际会议大会/特邀报告 21 次。第一完成人担任中国高等教育学会工程热物理专委会副理事长，中国计量测试学会热物性专委会副主任。研究成果支撑获得国家级教学成果奖 3 项，2 门国家级一流本科课程，推动了动力工程及工程热物理领域的人才培养。

工质热物性和设计研究成果被中国核动力设计院、中广核研究院、中国空气动力研究与发展中心、北京航天试验技术研究所等单位应用于“超碳 1 号”、运载火箭发动机、铅铋快堆、高温气冷堆、大型军民飞行风洞等国家重大工程。引领了全球工质热物性表征和设计的理论发展和技术进步，为我国航天航空、核能先进动力装置和工业节能减排技术创新提供了核心支撑，产生了近十亿元的经济效益。

## 四、客观评价

### (一) 代表作被大量知名学者高度评价、跟踪研究和应用，项目研究团队多次举办国内外学术会议、受邀做特邀报告，国内外学术影响广泛

该项目发表学术论文 135 篇，被 WOS 核心合集他引 1300 余次，3 篇学术论文入选 ESI 高被引论文，出版教材 1 本，相关核心技术授权国家发明专利 13 项。代表性论文总他引 726 次，5 篇代表性论文被 WOS 核心合集他引 252 次，2 名核心成员入选全球前 2% 顶尖科学家。研究成果得到 53 位中外院士和国际知名协会 Fellow、国际期刊主编/副主编的高度评价，并被跟踪研究。建立的热物性数据库和预测模型被作为基础，广泛应用于前沿能源利用技术研究。

项目研究团队主办了第 12 届亚洲热物性会议、第 1 届中国热物性学术会议、第 9 届中国工程热物理学会热力学分会青年论坛，受邀作国际会议大会/主旨/特邀报告 21 次。受邀作为特邀主编在 Journal of Molecular Liquids、International Journal of Thermophysics、High Temperatures-High Pressures 等权威热物性期刊组织了工质热物性及其应用相关主题的多个专刊。第一完成人为国家自然科学基金杰出青年基金和第 10 届中国青年科技奖获得者、国家教学名师，担任中国高等教育学会工程热物理专委会副理事长，中国计量测试学会热物性专委会副主任，中国学位与研究生教育学会工科委员会副主任。第二完成人为国家自然科学基金优秀青年基金获得者，获亚洲热物性青年科学家奖。研究成果支撑获得国家级教学成果奖 3 项，2 门国家级一流本科课程，推动了动力工程及工程热物理领域的人才培养。

### (二) 对科学发现点 1 的评价和应用：“开发了可靠的比热容绝对测量方法”，被国际权威热物性数据库和通用工业软件数据库收录。

(1) 美国工程院院士、康奈尔大学的 Jefferson W. Tester 教授等对代表性论文 1 评价指出：“开发了可靠的比热容绝对测量方法”。(代表引文 1)

(2) 世界顶尖化工企业巴斯夫欧洲公司经过严格的筛选，认为代表性论文 1 发表的超临界水黏度数据是可靠的，并作为基础数据，改进了 GERG2008 方程。(代表引文 2)

(3) 美国国家标准与技术研究院 (NIST) 的数据库 ThermoLit(<http://trc.nist.gov/thermolit>)、Ionic Liquids Database-ILThermo (<http://ilthermo.boulder.nist.gov>) 和大型通用流程模拟软件 Aspen Plus 的数据库分别收录了项目测量获得的 509 组和 366 热物性实验数据，并在其网站公布供全球使用。(其他学术评价 1，附件 2-1)

(4) 项目测量获得的热物性数据获得了美国工程院院士、德克萨斯大学奥斯汀分校 Joan F. Brennecke 教授，爱尔兰皇家科学院院士、曼彻斯特大学 Christopher Hardacre 教授，美国发明家科学院院士、堪萨斯大学 Mark B. Shiflett 教授，中国科学院院士、河南大学校长张锁江研究员，澳大利亚科学院院士、迪肯大学 Maria Forsyth 教授，美国发明家科学院院士、圣母大学 Edward J. Maginn 教授等 35 名国内外院士、国际知

名协会 Fellow 和国际期刊主编/副主编的高度肯定，并将其应用于超临界流体、离子液体、生燃燃料等热物性预测模型开发和应用的研究。(其他学术评价 2，附件 2-2)

**(三)对科学发现点 2 的评价：“整个温度和压力范围”、“与实验具有很好的一致性”、“国内外唯一”。**

(1) 美国国家发明家科学院院士、英国皇家化学会 Fellow 、康涅狄格大学的 Luyi Sun 教授对代表性论文 2 的评价指出：“黏度模型考虑了自由体积和活化能的耦合作用，计算结果与测量结果具有很好的一致性”。(代表性引文 3)

(2) 中国科学院院士、河南大学校长张锁江研究员对代表性论文 2 评价指出：“黏度模型同时考虑了温度和压力影响，在整个温度和压力范围内可以很好地描述温度-压力-黏度间的关联”。(代表性引文 4)

(3) 英国皇家工程院院士、帝国理工学院的 J.P. Martin Trusler 教授评价指出：“国内外唯一同时建立高温高压生物柴油密度与黏度普适性预测模型的研究团队”。(代表性引文 5)

(4) Industrial & Engineering Chemistry Research 副主编、美国堪萨斯大学 Aaron M. Scurto 教授，中国科学院院士、中国石油大学徐春明教授将代表性论文 2 提出的 Eyring 黏度预测模型认同为经典的黏度预测方法之一。(其他学术评价，附件 2-3)

**(四)对科学发现点 3 的评价：“解决了数据稀缺的问题，实现了工质的高效生成式设计”，“可以节省大量的燃料”。**

(1) Chemical Communications 副主编、帝国理工学院 Kim E. Jelfs 教授和英国皇家化学会 Fellow、帝国理工学院 Tom Welton 教授引用指出：“解决了数据稀缺的问题，实现工质的高效生成式设计，可以获得理想的性质”。(代表性引文 6)

(2) 美国物理学会 Fellow、田纳西大学 Jeremy C. Smith 教授引用指出：分子设计模型可以在宽广的温度压力范围内对二氧化碳吸收能力进行精准预测。(代表性引文 7)

(3) 韩国工程院院士、釜山国立大学 Kyung Chun Kim 教授对代表性论文 5 的评价指出：“提出的 ORC-Kalina 耦合循环系统可以高效回收冷却水的低温余热”。(代表性引文 8)

(4) 中国科学院院士、中国科技大学舒歌群教授对代表性论文 5 的评价指出：“采用提出的内燃机余热利用系统，不但可以节省大量的燃料，而且可以减少大量有害的尾气排放”。(其他学术评价，附件 2-4)

**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<br>(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  | Measurement of isobaric heat capacity of pure water up to supercritical conditions                              | The Journal of Supercritical Fluids     | Maogang He, Chao Su, Xiangyang Liu, Xuetao Qi, Nan Lv                          | 2015 年 100 卷 1-6 页       | 2015 年 2 月 13 日  | 何茂刚  | 何茂刚  | 何茂刚, 苏超, 刘向阳, 齐雪涛, 吕楠          | 21    | SCI   | 是           |
| 2  | Estimating the viscosity of ionic liquid at high pressure using Eyring's absolute rate theory                   | Fluid Phase Equilibria                  | Maogang He, Chenyang Zhu, Xiangyang Liu                                        | 2018 年 458 卷 170-176 页   | 2017 年 11 月 21 日 | 刘向阳  | 何茂刚  | 何茂刚, 朱晨阳, 刘向阳                  | 29    | SCI   | 是           |
| 3  | General models for prediction densities and viscosities of saturated and unsaturated fatty acid esters          | Journal of Molecular Liquids            | Sa Xue, Kun Hou, Ziwen Zhang, Hui Liu, Chenyang Zhu, Xiangyang Liu, Maogang He | 2021 年第 341 卷 1 1737 4 页 | 2021 年 8 月 26 日  | 刘向阳  | 薛飒   | 薛飒, 侯坤, 张子文, 刘辉, 朱晨阳, 刘向阳, 何茂刚 | 23    | SCI   | 是           |
| 4  | Machine Learning-Based Design of Ionic Liquids at the Atomic Scale for Highly Efficient CO <sub>2</sub> Capture | ACS Sustainable Chemistry & Engineering | Xiangyang Liu, Jianchun Chu, Shaoxuan Huang, An Li, Shuanlai Wang, Maogang He  | 2023 年 11 卷 8978 -8987 页 | 2023 年 6 月 1 日   | 何茂刚  | 刘向阳  | 刘向阳, 褚健淳, 黄少轩, 李安, 王栓来, 何茂刚    | 20    | SCI   | 是           |

|             |                                                                                           |         |                                           |                    |            |     |     |                  |     |     |   |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------|--------------------|------------|-----|-----|------------------|-----|-----|---|
| 5           | A combined thermodynamic cycle used for waste heat recovery of internal combustion engine | Energy  | Maogang He, Xinxin Zhang, Ke Zeng, Ke Gao | 2011年36卷6821-6829页 | 2011年11月8日 | 何茂刚 | 何茂刚 | 何茂刚, 张新欣, 曾科, 高可 | 159 | SCI | 是 |
| 6           | 高等工程热力学                                                                                   | 高等教育出版社 | 何茂刚, 张颖, 刘向阳                              | 2024年              | 2024年5月    | 何茂刚 | 何茂刚 | 何茂刚, 张颖, 刘向阳     | 0   |     | 是 |
| 合 计         |                                                                                           |         |                                           |                    |            |     |     |                  | 252 |     |   |
| 补充说明（视情填写）： |                                                                                           |         |                                           |                    |            |     |     |                  |     |     |   |

## 六、主要完成人情况表

|                                                                                                                                                   |           |     |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----|---|
| 姓 名                                                                                                                                               | 何茂刚       | 排 名 | 1 |
| 行政职务                                                                                                                                              | 研究生院常务副院长 |     |   |
| 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：<br>作为项目负责人，对发现点 1、2、3 均做出重要贡献，代表性论文1、4、5 的通讯作者，代表性论文1、2、5 和代表性专著 6 的第一作者，代表性论文专著 1-6 的作者，提出了高温高压工质热物性精准测量、预测和智能设计理论方法的创新思想、研究思路和技术路线。 |           |     |   |

|                                                                                                                                                                       |        |     |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----|---|
| 姓 名                                                                                                                                                                   | 刘向阳    | 排 名 | 2 |
| 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：<br>科学发现点 1、2、3 的主要贡献者。提出了高温高压黏度和比热容的准势差绝对测量方法，建立了宽温压域流体热力学性质和输运性质精确、快速的预测模型，创建了稀疏数据驱动的离子/分子型工质生成式智能设计方法。代表性论文2、3 的通讯作者，代表性论文4 的第一作者，代表性论文 1 和代表性论著 6 的作者。 |        |     |   |

|      |               |     |   |
|------|---------------|-----|---|
| 姓 名  | 张颖            | 排 名 | 3 |
| 行政职务 | 热流科学与工程系党支部书记 |     |   |
| 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：

科学发现点 1、3 的主要贡献者，提出了导热系数无势差光散射绝对测量方法，解决了近临界剧烈涨落引起势差大幅波动的问题；揭示了“多热源-热物性-热力系统”高度匹配机制，构建了多级余热深度利用的工质/系统构型耦合设计理论，代表性论著 6 的作者。

|      |        |     |   |
|------|--------|-----|---|
| 姓 名  | 薛 飒    | 排 名 | 4 |
| 行政职务 | 无      |     |   |
| 技术职称 | 助理教授   |     |   |
| 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：

科学发现点 2 的主要贡献者，揭示了碳氢燃料微观结构对热物性的影响机制，建立了碳氢燃料密度和黏度的普适性预测模型，是代表性论文 3 的第一作者。

## 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：</p> <p>作为项目负责单位，全面负责项目立项、理论创新和应用的工作，围绕“高温高压下工质热物性与宏观势差、微观结构的关联机理”和“原子级生成式工质智能设计方法”的关键科学问题，开展了 20 余年的深入研究，揭示了高温高压下热物性测量偏差的产生机制，建立了准势差/无势差绝对测量理论和方法，研制了国际领先的高温高压热物性高精度测量装置；揭示了分子作用/运动对热物性的耦合影响机制，提出了宏观状态-分子作用/运动-热物性复杂关联的数理描述，建立了精度和速度协同提高的宽温压域工质热物性预测模型；揭示了热物性稀疏数据下机器学习生成效率低的发生机理，创建了小数据集驱动原子级工质生成式智能设计方法，建立了热力工质/装置构型耦合设计理论，研究成果服务于超临界二氧化碳先进动力系统、铅铋快堆、高温气冷堆、重气体风洞等国家重大工程。对发现点 1-3 均做出全部贡献。</p> |        |

## 完成人合作关系说明

在项目第一完成人的组织下，项目所有完成人协同合作，共同完成了“高温高压工质热物性精准测量、预测和智能设计理论方法”项目。项目完成人刘向阳、张颖、薛飒在第一完成人何茂刚的指导下分别在 2009 年、2014 年、2024 年获得博士学位，并形成了以何茂刚为负责人的研究团队。何茂刚、刘向阳共同提出了高温高压黏度和比热容的准势差绝对测量方法，建立了宽温压域流体热力学性质和输运性质精确、快速的预测模型，创建了稀疏数据驱动的离子/分子型工质生成式主动设计方法，并合作发表了代表性论文 1-4 和代表性论著 6。何茂刚、张颖、刘向阳共同开展了提出了无势差光散射绝对测量方法，解决了近临界剧烈涨落引起势差大幅波动的问题，构建了跨/超临界水/CO<sub>2</sub>、铅铋合金、重气体和离子液体等工质在高温高压区域的热物性数据库；揭示了“多热源-热物性-热力系统”高度匹配机制，构建了多级余热深度利用的工质/系统构型耦合设计理论，并合作编写了代表性论著 6。何茂刚、薛飒、刘向阳共同揭示了碳氢燃料微观结构对热物性的影响机制，建立了碳氢燃料密度和黏度的普适性预测模型，并合作发表了代表性论文 3。项目所有完成人互相配合，将研究成果应用至“超碳 1 号”、铅铋核反应堆、中国唯一重气体风洞等国家重大工程以及民用航空先进热工装置和工业节能减排。

完成人合作关系情况汇总表

| 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  | 论文合著 | 何茂刚、刘向阳/1、2      | 2014 年至 2015 年 | Measurement of isobaric heat capacity of pure water up to supercritical conditions                              | 代表性论文 1 |
| 2  | 论文合著 | 何茂刚、刘向阳/1、2      | 2016 年至 2018 年 | Estimating the viscosity of ionic liquid at high pressure using Eyring's absolute rate theory                   | 代表性论文 2 |
| 3  | 论文合著 | 何茂刚、刘向阳、薛飒/1、2、4 | 2020 年至 2021 年 | General models for prediction densities and viscosities of saturated and unsaturated fatty acid                 | 代表性论文 3 |
| 4  | 论文合著 | 何茂刚、刘向阳/1、2      | 2022 年至 2023 年 | Machine Learning-Based Design of Ionic Liquids at the Atomic Scale for Highly Efficient CO <sub>2</sub> Capture | 代表性论文 4 |
| 5  | 专著合著 | 何茂刚、刘向阳、张颖/1、2、3 | 2008 年至 2024 年 | 高等工程热力学                                                                                                         | 代表性论著 6 |