

陕西省科学技术进步奖提名书

(2026年度)

一、项目基本情况

项目名称	工业窑炉复杂烟气污染治理关键技术与装备
主要完成人	任山、赖志强、王嘉庆、石建稳、边靖、艾华、苏伟、杨剑、宋美娟、刘满溢
主要完成单位	西安交通大学，中国重型机械研究院股份公司，北京科技大学，重庆大学

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	☐ 一等奖 ☒ 二等奖及以上 ☐ 三等奖及以上
-------	--------------------	------	---

提名意见：

工业窑炉烟气排放量大、成分复杂、工况波动剧烈，SO₂、NO_x、粉尘、CO、Hg 等多污染物协同治理面临重大技术挑战。该项目针对工业窑炉复杂烟气治理难题，历经多年攻关，在污染物脱除技术、协同净化工艺、关键装备研制及系统集成方面取得系统性突破，开发了具有完全自主知识产权的工业窑炉复杂烟气污染治理技术，研制出了工业窑炉大烟气量协同治理成套装备，构建了多炉型适配的协同集成与宽负荷调控技术，实现了由单污染物分级串联向多污染物一体化协同治理的技术跨越。

项目研究思路和技术路线先进，创新点突出，在我国协同脱硝脱汞催化剂的技术引领、人才培养、推广应用等方面发挥了核心作用，得到了国内外学术和企业同行的广泛认可。项目获授权发明专利 28 项，制定行业标准 2 项。经科技成果评价，整体技术达到国际领先水平。成果已广泛应用于钢铁、玻璃等行业多种工业窑炉烟气治理工程，污染物排放浓度低于超低排放限值，经济、环境和社会效益显著。

提名该项目为陕西省科学技术进步二等奖。

说明：省科学技术奖一、二、三等奖项目，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，“提名二等奖及以上”的评审落选项目不再降格参评三等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。

三、项目简介

(限 2 页)

本项目属于大气污染防治工程领域。工业窑炉是冶金、建材、化工等国民经济基础产业的核心热工装备，其烟气排放量大、污染物种类多、工况波动剧烈，是我国大气污染防治的重点领域。工业窑炉烟气具有低温、高湿、高硫、多污染物耦合及负荷波动大等特征，SO₂、NO_x、粉尘、CO、二噁英及重金属等多污染物协同治理面临重大理论与工程技术难题。传统单污染物分治串联工艺存在反应温区冲突、外部补热能耗高、装备工况适应性差等瓶颈，难以满足工业窑炉复杂烟气条件下超低排放与绿色发展的迫切需求。

针对上述难题，项目组在国家重点研发计划、国家自然科学基金、陕西省科技计划及重庆市重点产业共性关键技术创新专项等项目资助下，历经多年研究与工程实践，在工业窑炉复杂烟气污染物脱除技术、协同净化工艺、关键装备研制及系统集成等方面实现系统性突破，构建了工业窑炉复杂烟气污染治理成套技术体系。主要技术创新如下：

(1) 研制了复杂烟气污染物宽温度窗口高效脱除材料

针对工业窑炉烟气低温、高湿、高硫及多污染物耦合等复杂工况，开发了系列宽温域高效净化材料。研制了分级孔道铈基、锰基抗水耐硫型低温脱硝催化材料，通过活性组分协同与孔结构调控，将 NO_x 高效转化温区拓宽至 60~330℃；开发了高比表面改性活性焦/半焦吸附材料，在 60~150℃低温段实现了 SO₂ 的高效吸附脱除与资源化；研发了高机械强度、抗腐蚀的电极材料，优化了阴阳电极的极配结构，在 90~300℃温区内实现粉尘高效捕集。形成了覆盖多类污染物的宽温域净化材料体系。

(2) 构建了窑炉烟气多污染物协同脱除与热补偿工艺

针对单污染物分治工艺温区冲突、外部补热能耗高的问题，开发了多污染物协同净化工艺。构建了活性焦/半焦低温多功能协同净化工艺，在同一反应单元内实现 SO₂ 吸附、NO_x 催化还原与 Hg⁰ 氧化的协同脱除；研发了陶瓷滤管一体化协同净化技术，将脱硝、脱二噁英活性组分集成于陶瓷滤管表面，实现 NO_x、二噁英和粉尘一体化脱除；构建 NO_x 与 CO 协同脱除及反应热补偿工艺，利用 CO 催化氧化反应热原位补偿低温 SCR 脱硝热需求，较传统工艺脱硝效率提高 10%以上，运行能耗降低 30%以上。

(3) 研发了多炉型适配的协同净化成套装备与宽负荷调控技术

针对传统分级串联装备占地面积大、系统阻力高、宽负荷适应性差等瓶颈，研发了模块化、多功能集成的协同净化成套装备。开发高尘复杂烟气预处理与均流强化关键装备，实现高尘工况下粉尘高效捕集与后续净化单元工况保障；研发了大烟气量多污染物协同净化一体化反应器，通过层叠式整流均流与多反应区耦合设计，实现同一装备体系下多污染物协同脱除；构建了基于工况实时识别的多单元协同联动与宽负荷调控技术，实现了净化装备在 30%~110%宽负荷波动下的稳定低耗运行。

项目获授权发明专利 28 项，制定行业标准 2 项，发表论文 100 余篇，形成了具有自主知识产权的工业窑炉复杂烟气污染治理关键技术体系。“钢铁烟气超低排放多功能耦合关键技术与应用”成果经侯立安、贺泓、柴立元、高翔、李俊华院士等专家组成的评价组认为整体技术达到了国际领先水平，“燃煤烟气协同脱硝脱汞催化剂制备关键技术及应用”成果经评价，整体技术达到国内领先水平，其中催化剂碱金属及汞中毒处理技术达到国际先进水平。成果已推广应用于钢铁、玻璃等行业的烧结机、回转窑、加热炉、玻璃窑炉等多种工业窑炉烟气治理工程共 32 台套，近三年累计产值 27.8 亿元，新增利税 2.6 亿元，经济效益显著。

本项目突破了工业窑炉复杂烟气多污染物协同治理的关键技术瓶颈，推动了工业窑炉烟气治理由“单污染物分治、外部补热”向“多污染物协同净化、反应热原位利用”的技术跨越，为我国工业窑炉行业超低排放改造与绿色转型提供了关键技术支撑，对钢铁、建材等重点行业的减污降碳与高质量发展具有重要意义。

四、客观评价

1. 成果鉴定

(1) 2018 年 7 月 2 日, 重庆科技成果转化促进会在重庆组织召开了“燃煤烟气协同脱硝脱汞催化剂制备关键技术及应用”成果鉴定会。评审专家一致认为该技术已整体达到国内领先水平, 其中在催化剂碱金属及汞中毒方面的处理技术已经达到国际领先水平。

(2) 2021 年 1 月 5 日, 中国环境保护产业协会在北京组织召开了“钢铁烟气超低排放多功能耦合关键技术与应用”成果鉴定会。由侯立安院士、贺泓院士、柴立元院士、高翔院士和李俊华院士等人组成的专家组的鉴定意见如下: “该成果为我国钢铁行业超低排放提供技术支撑和示范引领, 整体达到国际领先水平。”

2. 评价意见

(1) 国家重点研发计划课题绩效评价意见

2021 年 9 月 22 日, 国家重点研发计划“钢铁行业烟气多污染物全过程控制耦合关键技术”项目(编号: 2017YFC0210300) 承担单位北京科技大学在北京组织召开了“多污染物中低温协同催化净化技术及示范”课题(编号: 2017YFC0210303) 的绩效评价会议。专家组审阅了综合绩效材料, 经质询和讨论, 形成意见如下: 课题研发了锰基和钒基高效抗水耐硫型 SCR 脱硝催化剂, 揭示了两类材料在多组分复杂烟气条件下的抗性机理和脱硝、脱汞、脱 CO 协同催化机制, 开发了源头低氮弥散燃烧、过程余热换热回收以及立卧双级脱硫除尘一体化技术, 在高硫氮比脱硝、低氮燃烧及高效换热方面具有创新性, 形成了中低温烟气深度净化与余热高效利用技术及成套装备, 完成了中试研究, 进行了工程示范。

(2) 国家自然科学基金面上项目验收意见

2023 年 3 月 30 日, 国家自然科学基金面上项目“Mn-Ce/AC 催化剂烧结烟气脱硝中毒失活机理研究”(51874058) 按有关规定准予结题。项目围绕烧结烟气低温、高湿、高硫及复杂组分条件下催化剂失活问题, 系统开展 Mn-Ce/AC 催化剂低温 SCR 脱硝性能、SO₂/H₂O 及碱金属等组分影响和中毒失活机理研究, 为本项目复杂烟气净化材料中毒失活机制解析及抗中毒低温脱硝技术研发奠定了理论基础。

2026 年 4 月 1 日, 国家自然科学基金面上项目“碳基催化剂协同脱除烧结烟气中 SO₂、NO_x 和 Hg 的基础研究”(52174298) 按有关规定准予结题。项目围绕烧结烟气多污染物协同控制开展研究, 重点研究 SO₂、NO_x 和 Hg 在碳基催化材料上的协同脱除行为与作用机制, 为本项目多污染物迁移转化规律、协同反应机制及复杂烟气协同净化工艺研发提供了重要理论支撑。

3. 检测报告

(1) 福建青拓镍业有限公司烧结机尾烟气治理项目检测报告

(2) 福建青拓镍业有限公司烧结配料烟气治理项目检测报告

(3) 攀钢集团西昌钢钒有限公司连铸区域环境治理项目监测报告

(4) 新疆华兴玻璃有限公司窑炉烟气治理项目检测报告

4. 同行评价

(1) **低温 SCR 活性调控研究得到国内外同行高度认可。**中国工程院院士贺泓团队多次引用项目组关于低温催化脱硝的研究成果，并将其作为“快速 SCR”催化剂设计的重要依据。日本北海道大学 H. Junya 教授在国际顶级综述期刊 *Chemical Reviews* 中介绍了项目组通过提高催化剂表面酸性和化学吸附氧促进低温 SCR 活性的研究结论，并将其作为活性组分筛选与催化剂设计的重要参考。项目组发表于 *Chemical Engineering Journal* 的低温复合催化剂代表性论文 (2020, 379:122398) 据 2025 年统计已被引用超过 260 次，并入选 ESI 高被引论文。

(2) **催化剂中毒失活机理研究受到国际同行持续引用和肯定。**克兰菲尔德大学 Edward J. Anthony 教授在高水平综述论文中多次引用项目组关于砷等污染物导致 SCR 催化剂中毒失活的研究成果，并将其作为分析商用催化剂中毒机制的重要依据；美国工程院院士、乔治亚理工学院 John C. Crittenden 教授引用并肯定项目组关于重金属与催化剂酸性中心、氧化还原中心作用及中毒失活机理的研究成果，将其作为抗中毒催化剂设计的重要参考。

(3) **项目相关成果具有较高国际学术影响。**围绕低温脱硝活性调控、抗硫抗水及重金属中毒失活机理，项目组形成了一批高水平研究成果，其中多篇论文入选 ESI 高被引论文；相关成果获得国际同行广泛引用，并受邀担任催化领域国际期刊 *Catalysis Today* 客座编辑，组织催化脱硝专题，表明项目相关研究在低温 SCR 及复杂烟气催化净化领域具有较好的国际影响力。

5. 成果入选

- (1) 入选 2019 年中国科协“生态环境十大科技进展”；
- (2) 入选 2020 年中国科协“科创中国”先导技术榜单；
- (3) 入选国家发改委《绿色技术推广目录（2020 年）》；
- (4) 入选生态环境部《国家先进污染防治技术目录（2021 年）》

6. 科技奖励

序号	成果名称	奖项及等级	获奖时间
1	燃煤烟气协同脱硝脱汞催化剂制备关键技术及应用	重庆市科学技术奖一等奖	2018 年
2	烟气脱硝催化剂定向配方优化与应用技术开发	中国发明协会 发明创业奖·成果奖一等奖	2020 年
3	钢铁烟气多功能高效低耗超低排放关键技术集成与应用	冶金科学技术奖一等奖	2021 年
4	适应恶劣燃煤烟气条件的新型脱硝脱汞催化剂制备关键技术	中国产学研合作创新成果奖二等奖	2019 年
5	催化剂 SCR 脱硝过程失活再生关键技术开发	中国发明协会 发明创业奖·创新奖二等奖	2020 年
6	复杂燃煤烟气多污染物协同脱除关键技术及应用	中国产学研合作创新成果奖二等奖	2021 年
7	典型臭氧前体物高效催化体系构建及净化机制研究	陕西省自然科学奖二等奖	2023 年

五、应用情况

1. 应用情况（限 2 页）

本项目面向工业窑炉复杂烟气污染治理重大需求，依托于国家重点研发专项和国家自然科学基金等课题，开展多污染物迁移转化、协同净化工艺及关键装备研究，并在钢铁（含不锈钢/红土镍矿冶炼）、玻璃、建材等行业实现规模化工程应用，覆盖烧结机、回转窑、加热炉、石灰窑、玻璃窑炉等多种工业窑炉，形成了“机理研究-工艺开发-装备研制-系统集成-工程应用”的完整技术链条。项目成果针对不同行业、不同炉型的烟气特征，灵活匹配宽温低温脱硝、CO 氧化反应热利用耦合协同脱除、活性焦/半焦深度净化及多污染物协同治理关键装备，实现了 SO₂、NO_x、CO、Hg、粉尘等多污染物的高效协同脱除。截至目前，相关技术已推广应用至福建、广东、江苏、浙江、山东、四川等全国多个省市，系统运行稳定，各项污染物排放指标低于国家超低排放限值。

（1）烧结/球团大烟气量多污染物协同一体化治理

烧结/球团烟气具有烟气量大、高尘高硫、温度与负荷波动大的特点，是钢铁行业大气污染治理的重点工序。针对该工序烟气特征，项目组将创新点 1 的多污染物协同反应窗口调控方法、创新点 2 的宽温低温脱硝与 CO 氧化反应热耦合协同脱除工艺、创新点 3 的一体化反应器与高尘预处理装备进行系统集成，形成了脱硫脱硝除尘一体化治理技术方案，已在达州泰昕炉料、广元领航、福建青拓实业、福建青拓镍业等企业的球团、烧结机及高炉工序实现工程应用，覆盖从单一污染物深度净化到多污染物协同一体化治理需求，出口 SO₂≤35 mg/m³、NO_x≤50 mg/m³、粉尘≤10 mg/m³，二噁英≤0.3 ng-TEQ/m³，CO≤2800 mg/m³ 全面达到超低排放要求。

（2）回转窑高尘高硫强腐蚀烟气深度净化

红土镍矿冶炼回转窑烟气具有高尘、高硫、含 HCl/HF 强腐蚀性组分的特点，治理难度大。项目组将创新点 2 的活性焦/半焦深度净化工艺与创新点 3 的高尘预处理及均流强化装备相结合，形成了适应高尘高硫强腐蚀工况的烟气治理技术方案，已应用于广东广青金属科技有限公司回转窑烟气脱硫工程，实现了复杂腐蚀工况下的长期稳定运行，SO₂≤35 mg/m³，NO_x≤50 mg/m³、粉尘≤10 mg/m³、二噁英≤0.3 ng-TEQ/m³，为红土镍矿冶炼行业烟气治理提供了工程示范。

（3）玻璃窑炉宽温抗中毒脱硝及协同治理

玻璃窑炉烟气具有温度高、碱金属及硼氟组分易致催化剂中毒、负荷波动大的特点。项目组基于创新点 1 阐明的净化材料中毒失活机理，将创新点 2 的抗中毒宽温低温脱硝工艺与活性焦/半焦深度净化工艺、创新点 3 的多炉型适配协同集成技术进行组合，形成了覆盖脱硫、脱硝、除尘的玻璃窑炉烟气协同治理方案，已在栖霞长裕、广东华兴、新疆华兴等玻璃企业实现工程应用，解决了碱金属中毒和宽负荷稳定运行难题，出口 NO_x≤50 mg/m³、SO₂≤35 mg/m³、粉尘≤10 mg/m³、Hg 及其化合物≤0.002 mg/Nm³。

主要应用情况如下表所示：

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	福建青拓镍业有限公司	创新点 3: 高尘预处理与均流强化装备、流场均化与强化传质传热	烧结机尾烟气, 89 万 m ³ /h	2023.03 至今	杨智兆 15280312487
2	福建青拓实业股份有限公司	创新点 1: 多污染物协同反应窗口调控; 创新点 2: 宽温低温脱硝、CO 氧化反应热耦合协同脱除; 创新点 3: 一体化反应器、均流混合与模块化集成	烧结机头烟, 110 万 m ³ /h	2022.04 至今	黄浩瀚 0593-6600071
3	新疆华兴玻璃有限公司	创新点 3: 多炉型适配装备协同集成与宽负荷调控技术	玻璃窑炉烟气, 3.5 万 m ³ /h	2021.02 至今	荣泳伦 0993-7523001
4	广元市领航科技发展有限公司	创新点 2: 活性焦/半焦深度净化工艺	烧结机头烟气, 40 万 m ³ /h	2020.12 至今	刘先胜 0839-2338303
5	广东华兴玻璃股份有限公司	创新点 2: 宽温低温高效脱硝工艺	玻璃窑炉烟气, 5 万 m ³ /h	2019.10 至今	李深华 0757-8858153 5
6	广东广青金属科技有限公司	创新点 2: 活性焦/半焦深度净化工艺; 创新点 3: 高尘预处理与均流强化装备	回转窑烟气, 100 万 m ³ /h	2018.11 至今	林中杰 15626367000
7	山东长裕玻璃有限公司	创新点 1: 净化材料中毒失活机理; 创新点 2: 抗中毒宽温低温 SCR 脱硝工艺	玻璃窑炉烟气, 6 万 m ³ /h	2018.05 至今	项树国 0535-5571679
8	山东长裕玻璃有限公司	创新点 2: 活性焦/半焦深度净化工艺	玻璃窑炉烟气, 6 万 m ³ /h	2017.04 至今	项树国 0535-5571679
9	达州市泰昕炉料有限责任公司	创新点 2: 活性焦/半焦深度净化工艺	球团烟气, 56 万 m ³ /h	2017.03—2024.08	杨帆 0818-2502919

六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种双层式低温同时脱 NO 和 CO 的催化剂、制备方法及应用	中国	ZL202410779518.3	2025 年 11 月 18 日	第 8668998 号	西安交通大学	任山;李晓娣;王行;何炽;柴守宁
2	发明专利	一种绝热防焦的耐高温泄爆阀、制作及泄爆方法	中国	ZL202510933007.7	2025 年 09 月 19 日	第 8274343 号	中国重型机械研究院股份公司	王嘉庆;王永刚;李新强;赖志强
3	发明专利	一种聚二甲基硅氧烷改性纳米二氧化钛超疏水涂料、涂层及其制备方法	中国	ZL202311095458.5	2023 年 08 月 28 日	第 7698783 号	西安交通大学	石建稳;李露;吴尚原;蒋霆;马丹丹
4	发明专利	一种 CN/BST 同质结光催化剂及其制备方法和应用	中国	ZL202211518596.5	2022 年 11 月 29 日	第 7299286 号	西安交通大学	马丹丹;吕艺璇;石建稳
5	发明专利	一种电炉粉尘提锌尾渣制备 SCR 脱硝催化剂的方法	中国	ZL2023111473786.5	2023 年 05 月 02 日	第 5933250 号	重庆大学	黎江玲;陈扬帆;张雨晨;刘清才;杨剑;任山;刘维燥
6	发明专利	一种 CdS/ZnS-NiS 纳米簇光催化剂及其制备方法和应用	中国	ZL2022110998681.5	2022 年 10 月 25 日	第 5532337 号	西安交通大学	马丹丹;石建稳;孙吕伟
7	发明专利	一种纳米铁钴复合催化剂制备方法	中国	ZL2021810428464.0	2021 年 06 月 22 日	第 4499647 号	重庆大学	杨剑;刘兰;田园梦;刘清才;任山;黎江玲;赵齐;李书兰
8	发明专利	一种测试炭基吸附剂脱汞性能的方法及装置	中国	ZL2021510393354.1	2018 年 07 月 24 日	第 3011409 号	重庆大学	刘清才;孔明;赵冬;杨剑;任山;王小青;姚璐;孟飞
9	发明专利	一种文丘里式喷雾干燥法脱硫装置及其脱硫方法	中国	ZL2021610432628.8	2018 年 10 月 09 日	第 3100234 号	中国重型机械研究院股份公司	艾华;张磊;边靖;赖志强
10	行业标准	湿式电除尘器	中国	JB/T11638-2013	2014 年 03 月 01 日		中国重型机械研究院有限公司、浙江菲达环	艾华;张磊;郇建国;李彦涛;朱建波;

					日		保科技股份有 限公司、浙江大 学、浙江天洁环 境科技股份有 限公司、福建龙 净环保股份有 限公司	赵琴霞;高 翔;陈招妹; 吴祖良;张涌 新;郭俊;唐 亮;林国鑫
--	--	--	--	--	---	--	--	--

七、主要完成人情况表

姓 名	任山	排 名	1
行政职务	无		
技术职称	正高		
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：作为项目第一完成人，本人对本项目的主要贡献是负责总体技术路线设计和研究方案制定，组织协调各参与单位开展技术研发、工程验证与成果集成，组织创新点 1、2、3 工作实施。揭示复杂烟气多污染物迁移转化、交互作用及净化材料中毒失活机制，建立协同反应窗口与 CO 氧化反应热匹配方法；研发宽温低温脱硝、CO 氧化供热耦合多污染物协同脱除及活性焦/半焦深度净化工艺；组织关键装备研制与系统集成，形成宽负荷稳定低耗运行成套技术。本人投入工作量占同期工作总量的 60%。			

姓 名	赖志强	排 名	2
行政职务	副所长		
技术职称	副高		
工作单位	中国重型机械研究院股份公司		
完成单位	中国重型机械研究院股份公司		
对本项目主要学术贡献：作为项目第二完成人，主要负责工业窑炉复杂烟气多污染物协同治理成套装备的研发设计与工程应用工作。承担创新点 2、3 相关的工作，主持研发了大烟气量多污染物协同净化一体化反应器与层叠式整流均流装置，解决了大截面反应器气流分布不均的技术难题；开发了高尘复杂烟气预处理关键装备，优化了除尘器内部流场与极配结构，有效提升了高尘工况下粉尘捕集效率；负责成套装备在钢铁、玻璃等行业烟气治理工程中的推广应用，主持完成了福建青拓烧结机头、广东广青回转窑等多项重大工程的装备设计、安装调试与系统集成，解决了大烟气量、高尘高硫及强腐蚀工况下装备长期稳定运行的关键工程难题。本人投入工作量占同期工作总量的 60%。			

姓 名	王嘉庆	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	中级		
工作单位	中国重型机械研究院股份公司		
完成单位	中国重型机械研究院股份公司		
对本项目主要学术贡献：本人主要承担多污染物协同脱除多功能催化剂的研发与工艺开发工作。承担创新点 1、2 的相关工作，参与揭示了 SO ₂ 、H ₂ O 及碱金属等组分对催化材料的中毒失活机制，明确了复杂烟气条件下催化材料酸性位与氧化还原性能的演变规律，为抗中毒催化材料设计提供了理论支撑；参与开发了宽温低温高效脱硝催化剂配方及成型工艺，完成了催化剂粉体放大与中试验证，实现了催化材料由实验室向工程应用的转化；参与构建了 CO 氧化反应热利用耦合多污染物协同脱除工艺，协助完成了工艺参数匹配与反应窗口优化，形成了多污染物协同净化技术方案。本人投入工作量占同期工作总量的 60%。			

姓 名	石建稳	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	正高		
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：本人对本项目的主要贡献是参与低温脱硝催化材料及复杂烟气催化反应机理研究。承担创新点 1、2 相关工作，开展锰基低温脱硝催化剂活性组分、孔结构及界面调控研究，揭示 SO ₂ /H ₂ O 等复杂组分对低温 SCR 反应及材料稳定性的影响规律；参与宽温低温高效脱硝工艺研发，提高催化剂低温活性、N ₂ 选择性及抗硫抗水性能，为多污染物协同净化提供材料与机理支撑。本人投入工作量占同期工作总量的 50%。			

姓 名	边靖	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	副高		
工作单位	中国重型机械研究院股份公司		
完成单位	中国重型机械研究院股份公司		
对本项目主要学术贡献：本人主要负责工业窑炉复杂烟气多污染物协同治理成套装备的流场优化设计与关键装备研发工作。参与完成创新点 3 的相关工作，针对工业窑炉大烟气量、宽负荷工况下反应器内气流分布不均的问题，通过计算流体动力学模拟对进气烟道、导流板及均流格栅进行结构优化，参与研发了多重调控气流均布关键技术，有效改善了反应器内流场、浓度场与温度场的协同匹配；参与开发了高尘复杂烟气预处理装备，优化了除尘器内部流场与极配结构，提升了高尘工况下的粉尘捕集效率；参与完成了成套装备在烧结机、高炉及回转窑等多种工业窑炉烟气治理工程中的设计实施与工程应用，为成套装备的工程放大与宽负荷稳定运行提供了技术保障。本人投入工作量占同期工作总量的 40%。			

姓 名	艾华	排 名	6
行政职务	无		
技术职称	正高		
工作单位	中国重型机械研究院股份公司		
完成单位	中国重型机械研究院股份公司		
对本项目主要学术贡献：本人主要负责多污染物协同净化工艺的工程化实施与关键装备的研发工作。参与创新点 2、3 的相关工作，完成了脱硫脱硝除尘一体化工艺的研发，完成了一体化工艺在工程装备上的设计集成与实施验证；参与开发了活性焦/半焦多功能深度净化装备，完成了吸附床层结构设计与气流分布优化，实现了残余 SO₂、NO_x、Hg 等多污染物的深度净化；研发了电除尘器绝缘锥套筒旋流反吹及微细颗粒物电凝并等核心装置，有效解决了高尘、高湿及粘性粉尘工况下装备清灰困难与运行稳定性问题；参与完成成套装备在玻璃窑炉、石灰窑等工业窑炉烟气治理工程中的设计与系统集成，推动了多污染物协同治理技术的工程应用与推广。本人投入工作量占同期工作总量的 40%。			

姓 名	苏伟	排 名	7
行政职务	无		
技术职称	正高		
工作单位	北京科技大学		
完成单位	北京科技大学		
对本项目主要学术贡献：本人主要承担多污染物协同净化工艺的基础理论与工艺开发工作。参与完成创新点 1、2 的相关工作，针对工业窑炉复杂烟气多组分共存特征，揭示了多污染物在催化界面的协同效应与非均相反应体系动力学与热力学机制，明确了污染物组分在净化过程中的交互作用规律与能质传输特性；参与研究了烟气净化过程的协同效应及多相体系质能传输规律，为工艺参数匹配与反应窗口优化提供了理论支撑；参与开发了宽温低温高效脱硝工艺，协助完成了催化材料从粉体放大到工程化应用的关键技术攻关；研究节能、增效、减排策略与技术，形成了多污染物协同净化工艺方案，实现污染物的过程减排控制。本人投入工作量占同期工作总量的 60%。			

姓 名	杨剑	排 名	8
行政职务	无		
技术职称	正高		
工作单位	重庆大学		
完成单位	重庆大学		
对本项目主要学术贡献：本人对本项目的主要贡献是参与复杂烟气脱硝脱汞协同催化及净化材料研究，参与完成创新点 1、2 相关工作，开展 NO _x 还原与 Hg 催化氧化协同作用、Hg 迁移转化及 SO ₂ /H ₂ O 等复杂组分影响研究，参与分析净化材料中毒失活规律；参与低温脱硝、协同脱汞及多污染物净化工艺研发，为复杂烟气多污染物协同脱除及工程应用提供技术支撑。本人投入工作量占同期工作总量的 50%。			

姓 名	宋美娟	排 名	9
行政职务	无		
技术职称	副高		
工作单位	中国重型机械研究院股份公司		
完成单位	中国重型机械研究院股份公司		
对本项目主要学术贡献：主要负责工业窑炉复杂烟气多污染物协同治理成套装备的工程应用质量设计与管理及标准化工作。参与完成创新点 3 的相关工作，建立了成套装备设计质量管理体系，对一体化反应器、深度净化吸附床等关键装备的设计方案、制造工艺及检验标准进行全过程质量管控，确保装备在高尘、高硫及波动工况下的长期运行可靠性与安全性；负责成套装备在工程应用中的安装调试质量管理工作，制定了关键工序质量控制点与验收标准，保障了装备在现场复杂条件下的安装精度与调试质量；参与制定了成套装备的设计规范与验收标准，为项目技术成果的规范化推广应用提供了质量保障。			

姓 名	刘满溢	排 名	10
行政职务	无		
技术职称	其他		
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：本人主要参与脱硝脱 CO 协同净化研究，参与完成创新点 1、2 的相关工作。开展低温脱硝及协同净化材料制备、性能评价与参数优化，研究 CO 氧化与 NH ₃ -SCR 协同反应及热量耦合规律，为多污染物协同净化机理及高效低耗工艺研发提供支撑。本人投入工作量占同期工作总量的 70%。			

八、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
对本项目主要学术贡献： 西安交通大学作为项目第一完成单位，负责项目总体技术路线设计、核心技术研发及成果集成。围绕工业窑炉复杂烟气多污染物协同治理，系统开展多污染物迁移转化、界面反应及净化材料中毒失活机理研究，建立协同反应窗口与 CO 氧化反应热匹配方法；研发宽温低温脱硝、CO 氧化反应热利用耦合多污染物协同脱除及深度净化技术，开展关键装备研制、系统集成与工业验证，推动形成工业窑炉复杂烟气多污染物协同、高效、低耗治理成套技术，为项目成果工程应用和推广提供了主要技术支撑。	

单位名称	中国重型机械研究院股份公司
对本项目主要学术贡献： 中国重型机械研究院股份公司作为项目主要完成单位之一，主要负责工业窑炉复杂烟气多污染物协同治理成套装备的研发设计、工程应用与成果转化工作。在装备研发方面，主持研发了大烟气流多污染物协同净化一体化反应器、层叠式整流均流装置及高尘复杂烟气预处理关键装备，完成了活性焦/半焦深度净化装备的结构设计与工程放大，解决了大截面反应器气流分布不均、高尘高湿工况下装备运行稳定性差等关键技术难题。在工程应用与推广方面，负责成套装备在钢铁、玻璃等行业的工程实施与系统集成，完成多项重大工程的装备设计、安装调试与系统集成，实现了成套装备在不同工业窑炉、不同工况条件下的适配集成与宽负荷稳定运行，推动了多污染物协同治理技术在工业窑炉烟气治理领域的大规模工程应用与产业化推广。	

单位名称	北京科技大学
对本项目主要学术贡献： 北京科技大学作为项目主要完成单位之一，围绕工业窑炉复杂烟气多污染物协同净化开展基础理论与工艺技术开发。针对多污染物耦合净化过程的多相体系质能传输进行规律探索，揭示了非均相反应体系的协同效应及动力学与热力学机制，为多污染物协同反应窗口的建立提供了理论支撑；参与研发了锰基和钒基高效抗水耐硫型 SCR 脱硝催化剂，揭示了两类材料在多组分复杂烟气条件下的抗性机理和脱硝、脱 CO 协同催化机制；参与开发了宽温低温高效脱硝工艺及 CO 氧化反应热利用耦合多污染物协同脱除工艺，研究节能、增效、减排策略与技术，实现污染物的过程减排控制；参与制定了行业标准，为项目成套技术的形成与规范化应用提供了重要支撑。	

单位名称	重庆大学
对本项目主要学术贡献： 重庆大学作为项目主要完成单位之一，围绕工业窑炉复杂烟气多污染物协同治理开展技术研发与工程验证。重点开展低温脱硝、协同脱汞及复杂烟气条件下催化材料中毒失活机制研究，参与多污染物协同净化工艺、催化材料工程化及系统集成技术研发；依托工业烟气净化研究基础，推动相关催化剂、脱硝脱汞及多污染物协同治理技术的工程验证与推广应用，为项目成套技术的形成提供重要支撑。	

完成人合作关系说明

本项目主要完成人围绕工业窑炉复杂烟气污染治理重大需求，形成了长期、稳定的科研合作关系，合作涵盖宽温域净化材料创制、多污染物协同净化工艺开发及关键装备研制与系统集成等环节，高校与企业优势互补、产学研用深度融合，构建了联合攻关体系。

第一完成人：任山

2018-2023 年，项目第一完成人任山与第八完成人杨剑共同获得多项授权发明专利，包括：一种测试炭基吸附剂脱汞性能的方法及装置（ZL201510393354.1）；一种纳米铁钴复合催化剂制备方法（ZL201810428464.0）；一种半焦低温 SCR 脱硝催化剂及其制备方法（ZL201810468403.7）和一种电炉粉尘提锌尾渣制备 SCR 脱硝催化剂的方法（ZL202111473786.5）。

2019 年，项目第一完成人任山与第八完成人杨剑共同获得“燃煤烟气协同脱硝脱汞催化剂制备关键技术及应用”重庆市科技进步一等奖（证书编号：2018-J-1-06-R02）。

2019 年，项目第一完成人任山与第八完成人杨剑共同获得“适应恶劣燃煤烟气条件的新型脱硝脱汞催化剂制备关键技术”中国产学研合作创新成果二等奖（证书编号：20199150）；

2019-2024 年，项目第一完成人任山与第四完成人石建稳共同申报秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目，并获立项（S2025-YD-QCYK-0321）。

2020 年，项目第一完成人任山与第八完成人杨剑共同获得“烟气脱硝催化剂定向配方优化与应用技术开发”中国发明创业成果一等奖（证书编号：2020-CAICG-1-M01）。

2020 年，项目第一完成人任山与第八完成人杨剑共同获得“催化剂 SCR 脱硝过程失活再生关键技术开发”中国发明创业创新二等奖（证书编号：2020-CAICX-2-H81）。

2023-2026 年，项目第一完成人任山与第二、三、十完成人赖志强、王嘉庆、刘满溢相继合作发表学术论文：Catalysis Today 2023, 418: 114053; Chemical Engineering Journal, 2025, 524: 169007; Applied Catalysis B: Environment and Energy, 2026, doi: 10.1016/j.apcatb.2026.127365。

第二完成人：赖志强

2015-2018 年，项目第二完成人赖志强与第五完成人边靖、第六完成人艾华共同获得授权专利：一种文丘里式喷雾干燥法脱硫装置及其脱硫方法（ZL201610432628.8）；一种电除尘器绝缘锥套筒旋流反吹方法（ZL201510424186.8）。

2015-2022 年，项目第二完成人赖志强与第五完成人边靖、第六完成人艾华相继合作发表学术论文：重型机械,2016,(2):51-53；中国重型装备,2018,(3):7-8；中国金属通报,2019,(5):243-244；重型机械,2022,(3):32-35。

2021-2023 年，项目第二完成人赖志强与第五完成人边靖、第六完成人艾华、第九完成人宋美娟共同产业合作，完成项目工程应用。包括：福建青拓实业股份有限公司烧结烟气超低排放项目（合同编号：Y2201122）；新疆华兴玻璃有限公司玻璃窑炉烟气治理项目（合同编号：Y2101109）。

2025-2026 年，项目第二完成人赖志强与第三完成人王嘉庆共同获得授权专利，包括：一种绝热防焦的耐高温泄爆阀、制作及泄爆方法（ZL202510933007.7）；一种适用于大型除尘器结构

的双阶段屈服耗能支撑（ZL202520800135.X）。

2024-2026 年，项目第二完成人赖志强与第三完成人王嘉庆、第七完成人苏伟合作发表学术论文：重型机械,2025,(6):69-74；山西冶金,2026,49(5):145-148；重型机械,2026,(4):61-71。

2025 年，项目第二完成人赖志强、第三完成人王嘉庆、第五完成人边靖、第六完成人艾华、第九完成人宋美娟与第七完成人苏伟开展产业合作：高炉煤气预脱氯关键技术开发（合同编号：Y2501134.W17）。

2026 年，项目第二完成人赖志强、第三完成人王嘉庆、第五完成人边靖、第六完成人艾华、第九完成人宋美娟与第八完成人杨剑开展产业合作：催化剂研发及反应机理研究（合同编号 Y2501147.W07）

第三完成人：王嘉庆

2018-2020 年，项目第三完成人王嘉庆与第七完成人苏伟共同获得“钢铁工序烟气多污染物半干法协同超低排放治理技术及应用”中冶集团科学技术奖一等奖（证书编号：2020Y003）。

2018-2025 年，项目第三完成人王嘉庆与第七完成人苏伟合作发表多篇学术论文，包括：Chemical Engineering Journal, 2023, 476: 146390；Fuel, 2022, 321: 124050；Catalysis Science & Technology, 2022, 12: 3863-3873；Fuel, 2026, 407: 137150。

2020-2022 年，项目第三完成人王嘉庆与第七完成人苏伟共同获得授权发明专利，包括：一种同时脱除氮氧化物和一氧化碳的催化剂及制备方法（ZL202110063660.4）；一种选择性脱氯的吸收剂、制备方法及使用方法（ZL202111402502.3）。

2025-2026 年，项目第三完成人王嘉庆与第二完成人赖志强共同立项科研项目，包括：中国重型机械研究院股份公司自立课题（K2505408）；中国机械工业集团有限公司青年科技基金项目（QNJJ-PY-2025-15）。

各完成人通过共同完成科研项目，合作发表学术论文、授权发明专利、完成科技成果评价及工程示范验证，形成了从净化材料创制、协同工艺开发到装备研制、系统集成及工程应用的完整技术链条与稳定合作体系，为本项目三项主要科技创新的形成和成套技术开发奠定了坚实的合作基础。

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	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	共同获奖	任山/1, 杨剑/8	2014-06-01	2017-12-31	“燃煤烟气协同脱硝脱汞催化剂制备关键技术及应用”，重庆市科技进步一等奖	获奖证书
2	共同获奖	任山/1, 杨剑/8	2019-12-01	2019-12-01	“适应恶劣燃煤烟气条件的新型脱硝脱汞催化剂制备关键技术”，产学研合作创新成果奖二等奖	获奖证书
3	共同获奖	任山/1, 杨剑/8	2020-10-01	2020-10-01	“催化剂 SCR 脱硝过程失活再生关键技术开发”，发明创业创新奖二等奖	获奖证书
4	共同获奖	任山/1, 杨剑/8	2020-12-01	2020-12-01	“烟气脱硝催化剂定向配方优化与应用技术开发”，中国发明创业奖·成果奖一等奖	获奖证书
5	共同获奖	任山/1, 杨剑/8	2021-01-01	2021-01-01	“复杂燃煤烟气多污染物协同脱除关键技术与应用”，产学研合作创新成果奖二等奖	获奖证书
6	共同知识产权	任山/1, 杨剑/8	2015-07-07	2018-07-24	一种测试炭基吸附剂脱汞性能的方法及装置， ZL201510393354.1	专利
7	共同知识产权	任山/1, 杨剑/8	2018-05-07	2021-06-22	一种纳米铁钴复合催化剂制备方法，ZL201810428464.0	专利
8	共同知识产权	任山/1, 杨剑/8	2018-05-16	2021-02-02	一种半焦低温 SCR 脱硝催化剂及其制备方法， ZL201810468403.7	专利
9	共同知识产权	任山/1, 杨剑/8	2021-11-30	2023-05-02	一种电炉粉尘提锌尾渣制备 SCR 脱硝催化剂的方法， ZL202111473786.5	专利
10	论文合著	任山/1, 刘满溢/10	2022-12-24	2023-06-01	Recent advance for NO _x removal with carbonaceous material for low-temperature NH ₃ -SCR reaction	论文
11	论文合著	任山/1, 刘满溢/10	2025-05-07	2025-09-26	Facet-dependent reactivity of CeO ₂ by tuning oxygen vacancies to simultaneously promote NH ₃ -SCR and CO oxidation	论文
12	论文合著	任山/1, 王嘉庆/3, 赖志强/2	2026-06-08	2026-08-16	Dynamic Surface Reconstruction Induced by <i>In Situ</i> Bi ⁰ for Efficient and Durable Photocatalytic NO Removal in S-scheme Bi ₄ O ₅ Br ₂ /Bi ₄ TaO ₈ Br Heterojunction	论文
13	共同知识	艾华/6, 边靖/5, 赖志	2015-07-17	2017-04-26	一种电除尘器绝缘锥套筒旋流反吹方法，	专利

	产权	强/2			ZL201510424186.8	
14	共同知识产权	艾华/6, 边靖/5, 赖志强/2	2016-06-17	2018-10-09	一种文丘里式喷雾干燥法脱硫装置及其脱硫方法, ZL201610432628.8	专利
15	共同知识产权	赖志强/2, 王嘉庆/3	2025-04-25	2026-02-03	一种适用于大型除尘器结构的双阶段屈服耗能支撑, ZL202520800135.X	专利
16	共同知识产权	赖志强/2, 王嘉庆/3	2025-07-08	2025-09-19	一种绝热防焦的耐高温泄爆阀、制作及泄爆方法, ZL202510933007.7	专利
17	论文合著	艾华/6, 边靖/5, 赖志强 2	2015-04-01	2016-03-20	地下停车场机动车尾气治理技术的研究[J].重型机械,2016,(2):51-53.	论文
18	论文合著	赖志强/2, 艾华/6	2017-03-15	2018-07-25	高硫球团矿链篦机回转窑烟气脱硫工程实践[J].中国重型装备,2018,(3):7-8.	论文
19	论文合著	赖志强/2, 艾华/6	2018-03-23	2019-05-31	红土镍矿回转窑烟气石灰石膏法脱硫系统设计概况[J].中国金属通报,2019,(5):243-244.	论文
20	论文合著	赖志强/2, 艾华/6	2021-10-25	2022-05-20	炼钢厂热泼渣废气白雾治理及水分回收系统[J].重型机械,2022,(3):32-35.	论文
21	论文合著	王嘉庆/3, 赖志强/2, 苏伟/7	2024-07-15	2025-11-20	烧结烟气脱硝反应器中双功能催化剂的设计及性能优化[J].重型机械,2025,(6):69-74.	论文
22	论文合著	赖志强/2, 王嘉庆/3	2024-12-10	2026-07-20	KOH 改性活性炭对轮胎硫化废气中极性 VOCs 的吸附强化与机理[J].重型机械,2026,(4):61-71.	论文
23	论文合著	赖志强/2, 王嘉庆/3	2025-05-06	2026-05-31	基于磁流变阻尼器的环保隔尘可移动式落砂机的设计与研究[J].山西冶金,2026,49(5):145-148.	论文
24	产业合作	赖志强/2, 边靖/5, 艾华/6, 宋美娟/9	2021-02-07	2022-06-30	新疆华兴玻璃有限公司玻璃窑炉烟气治理项目（合同编号：Y2101109）	合同
25	产业合作	赖志强/2, 边靖/5, 艾华/6, 宋美娟/9	2022-04-19	2023-11-30	福建青拓实业股份有限公司烧结烟气超低排放项目（合同编号：Y2201122）	合同
26	产业合作	赖志强/2, 边靖/5, 艾华/6, 苏伟/7, 宋美娟/9	2025-12-28	2026-12-28	高炉煤气预脱氯关键技术开发（合同编号：Y2501134.W17）	合同
27	产业合作	赖志强/2, 边靖/5, 艾	2026-03-30	2027-09-15	催化剂研发及反应机理研究（合同编号 Y2501147.W07）	合同

		华/6, 杨剑/8, 宋美娟/9				
28	共同获奖	王嘉庆/3, 苏伟/7	2018-08-25	2020-12-30	“钢铁工序烟气多污染物半干法协同超低排放治理技术及应用”中冶集团科学技术奖一等奖	获奖证书
29	共同知识产权	王嘉庆/3, 苏伟/7	2020-09-18	2022-12-02	一种同时脱除氮氧化物和一氧化碳的催化剂及制备方法, ZL202110063660.4	专利
30	共同知识产权	王嘉庆/3, 苏伟/7	2021-11-24	2022-08-16	一种选择性脱氯的吸收剂、制备方法及使用方法, ZL202111402502.3	专利
31	论文合著	王嘉庆/3, 苏伟/7	2018-12-30	2022-03-20	Bifunctional Mn-Cu-CeOx/ γ -Al ₂ O ₃ catalysts for low-temperature simultaneous removal of NO _x and CO[J]. Fuel, 2022, 321: 124050.	论文
32	论文合著	王嘉庆/3, 苏伟/7	2019-11-05	2022-05-09	Promotional effect of Sn additive on the chlorine resistance over SnMnOx/LDO catalysts for synergistic removal of NO _x and o-DCB[J]. Catalysis Science & Technology, 2022, 12: 3863-3873.	论文
33	论文合著	王嘉庆/3, 苏伟/7	2020-12-30	2023-09-30	TiO ₂ -coated CeCoOx-PVP catalysts derived from Prussian blue analogue for synergistic elimination of NO _x and o-DCB: The coupling of redox and acidity[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 476: 146390.	论文
34	论文合著	苏伟/7, 王嘉庆/3	2022-10-23	2025-10-10	PVP modulation of CeCoOx morphology to enhance chlorine resistance and o-dichlorobenzene degradation[J]. Fuel, 2026, 407: 137150.	论文
35	共同立项	赖志强/2, 王嘉庆/3	2025-10-01	2027-03-31	中国重型机械研究院股份公司自立课题“转炉一次烟气中低温余热回收技术”(K2505408)	合同
36	共同立项	赖志强/2, 王嘉庆/3	2026-01-01	2027-12-31	中国机械工业集团有限公司青年科技基金项目“钢铁烧结烟气多污染物协同治理耦合余热梯级利用关键技术研究”(QNJJ-PY-2025-15)	合同