

2026 年度拟提名陕西省科技进步奖项目公示内容

一、项目名称

工业烟气细颗粒物高效控制与健康风险评价关键技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省科技厅

提名意见：

工业烟气治理中，亚微米细颗粒物捕集效率偏低，湿式电除尘设备在高流速、高湿腐蚀工况下稳定运行能力不足，且颗粒物毒性及健康风险认识不清，制约烟气深度治理。该项目围绕细颗粒物高效控制与健康风险评价，研发雾化喷淋—连续水膜协同清灰、高流速流场—电场协同优化、导电防腐及连续稳定运行技术，优化工况除尘效率达 99.6% 以上。创新双极荷电凝并一体化技术，凝并系数达 1.53，显著提升亚微米颗粒捕集效能。构建工业颗粒物毒理基因组学快速评价方法，实现毒性定量与致毒通路解析，明确钢铁典型工序颗粒物差异化毒性，并揭示了末电场微细逃逸颗粒物毒性最高的演变规律。申请专利 13 项，授权发明专利 5 项，发表论文 18 篇，其中 SCI 论文 5 篇，制定行业标准 2 项。成果推动工业烟气治理由“总量除尘、浓度达标”向“微细颗粒深度减排与健康风险协同控制”转变，技术创新性突出，工程应用及推广价值显著。成果有效推动烟气治理向减污护健转型，助力环保产业升级与大气生态综合治理，生态、社会及推广价值显著。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科技科技进步奖提名条件及相关资料要求，项目在单位已完成提名公示且无异议。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。

三、项目简介

工业烟气细颗粒物特别是 $0.1\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 亚微米颗粒具有粒径小、穿透性强、常规除尘设备捕集困难及健康危害潜势高等特征。现有工业烟气治理技术主要以颗粒物质量浓度达标为目标，对微细颗粒物深度脱除能力不足。同时，不同工业工序颗粒物毒性差异、除尘过程中的毒性演变及末端逃逸微细颗粒物健康风险缺乏系统认识，制约了工业烟气污染由“总量控制”向“精准减排与健康风险协同管控”转变。

本项目系陕西省科技统筹创新工程计划项目及多项企业横向项目联合资助项目。针对上述行业共性关键问题，围绕“微细颗粒物高效捕集-亚微米颗粒强化凝并-装备长期稳定运行-毒性效应快速评价-健康风险识别”开展系统攻关，突破雾化喷淋-连续水膜协同清灰、高流速流场-电场协同优化、导电防腐与连续稳定运行、双极荷电凝并强化等关键技术，创建工业颗粒物毒理基因组学评价方法，揭示典型钢铁工序颗粒物差异化毒性及电除尘过程中颗粒物毒性演变规律，形成

了工业烟气细颗粒物高效控制与健康风险评价成套技术体系。

该技术成果集 13 项自主创新的专利技术于一体，切入工业烟气微细颗粒物湿式电除尘过程中“难荷电、难凝并、难捕集、运行稳定性不足及健康风险不明晰”等关键难题，构建了“高效捕集—强化凝并—稳定运行—毒性评价—风险识别”一体化技术体系。

（1）突破湿式电除尘高效捕集与连续稳定运行关键技术，提升微细颗粒物净化能力。

研发雾化喷淋—连续水膜协同除尘清灰技术，优化喷嘴、雾滴粒径、喷淋密度及极板结构，在集尘极表面形成均匀连续水膜。最佳雾滴粒径 100~120 μm 、水雾密度 0.22 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，除尘效率达 99.6% 以上，10 μm 以下颗粒去除率达 92% 以上，同等收尘面积较干式电除尘效率提高约 10%。

研发高流速流场—电场协同优化技术，通过 CFD 优化内部流场与电场匹配，在烟气流速 3.6m/s、电压 20 kV 条件下，小粒径粉尘去除效率仍达 95% 以上，提高单位电场烟气处理能力，为装备小型化提供支撑。

开发导电耐腐蚀专用涂层及连续稳定运行技术，集成连续喷淋、间断冲洗和脱水收尘工艺。工程装备除尘效率达 93.3%~96%，出口含尘浓度低于 10 mg/Nm^3 ，系统阻力低于 350 Pa，使用寿命可达 10 年，有效解决设备腐蚀、导电衰减及长期运行稳定性问题。

（2）研发双极荷电凝并一体化技术，突破亚微米颗粒物难荷电、难捕集瓶颈。

研发双极荷电凝并一体化电凝并器，通过异极性颗粒荷电及电场作用强化碰撞凝并，促进 0.1~1.0 μm 亚微米颗粒团聚长大，凝并系数达 1.53。建立 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 及总尘多粒径减排评价体系，显著提升后续除尘系统对微细颗粒物的捕集能力，为工业烟气亚微米颗粒深度治理提供技术路径。

（3）创建工业颗粒物毒理基因组学快速评价方法，实现由“排放浓度评价”向“毒性效应评价”拓展。

建立工业废气颗粒物毒理基因组学评价方法，开发有机、无机组分分离提取工艺，利用携带 110 种应激启动子 GFP 报告基因的大肠杆菌开展高通量毒性测试，以 $\text{TELI}\geq 1.5$ 为毒性响应阈值，结合基因表达热图和 4PL 模型获得 EC_{50} 、 $\text{EC-TELI}_{1.5}$ 等毒性终点，实现颗粒物毒性强度定量、敏感应激通路识别及致毒机制解析。

（4）揭示典型工业颗粒物差异化毒性及除尘过程毒性演变规律，明确健康风险管控重点。

系统研究钢铁烧结、干熄焦、高炉和转炉颗粒物毒性差异，发现无机组分毒性总体高于有机组分；有机组分毒性为“转炉>高炉>烧结>干熄焦”，无机组分为“高炉>转炉>烧结>干熄焦”。进一步揭示烧结机头多级电除尘过程中颗粒物毒性演变规律，发现末电场微细逃逸颗粒物毒性最高，证实颗粒物排放量降低与残余颗粒毒性风险并非同步变化，突破了传统单纯依据颗粒物质量浓度评价污染

控制效果的局限，为工业烟气末端高毒性微细颗粒物精准识别和深度治理提供了科学依据。

该技术已在钢铁、冶炼、玻璃窑、回转窑、工业锅炉、化工、建材、电力及有色等领域四十余项烟气治理工程中推广应用，装备运行稳定，显著提升了微细颗粒物深度净化能力。相关技术推广单位累计新增销售额 11241.53 万元、新增利润 1516.89 万元；典型工业应用企业近三年累计增收节支 15093 万元，年新增减排微细颗粒物约 5564 t、SO₂约 28552 t。项目实现了核心技术、成套装备与规模化工程应用的有效衔接，经济、环境和社会效益显著。

项目形成的关键技术与装备已在工业烟气治理工程中实现示范应用，表现出微细颗粒物去除效率高、烟气处理能力强、设备阻力低、运行稳定和工程适应性好等特点，形成并验证了由基础机制、关键技术、核心装备到工程应用的完整技术链。项目累计申请国家专利 13 项，获授权发明专利 5 项，发表学术论文 18 篇，其中 SCI 论文 5 篇。同时主持制定《JB/T 12593-2016 燃煤烟气湿法脱硫后湿式电除尘器》、《JB/T 12113-2015 点凝聚器》等行业标准，通过相关标准的制定，推动了电除尘装备设计、制造与应用的规范化，提升了行业装备技术水平和产品质量，促进了电除尘技术的规范应用与良性发展。

项目成果可为燃煤、钢铁、玻璃窑炉等行业烟气深度净化和健康风险管控提供技术支撑，对提升我国工业烟气精细化治理水平、推动环保装备产业升级、改善区域大气环境质量及促进减污降碳协同增效具有重要的工程应用价值和推广前景。

四、客观评价

（1）科技成果登记

“工业烟气细颗粒物高效控制与健康风险评价关键技术及应用”成果经西安生产力促进中心评价：“成果水平国际先进”，并获得了陕西省科技成果登记证书。

（2）项目验收意见

2017 年 8 月 18 日，陕西省科技厅组织有关专家对中国重型机械研究院股份公司、陕西省污染减排工程技术研究中心、西安科技大学、西安理工大学、西安建筑科技大学承担的陕西省科技统筹创新工程计划重大项目“燃煤锅炉细颗粒物污染控制技术与集成示范(项目编号:2012KTZB03-01-02)”进行了会议验收。专家组审查了相关资料，经讨论专家组认为课题完成了任务书规定的任务目标，一致同意通过验收。

（4）项目查新

2026 年 9 月 2 日，经陕西省科学技术情报研究院查新，结果为：

该项目属于大气污染治理领域，聚焦工业烟气细颗粒物超标、微细粉尘捕集效率低、颗粒毒性检测复杂及健康风险机制不明等难题，开展系统性技术攻关。项目研发多项核心除尘技术：一是开发雾化喷淋一连续水膜协同除尘清灰技术，优化设备关键参数，构建一体化除尘清灰机制，细颗粒去除效率超 92%，有效抑制结垢与二次扬尘；二是研发高流速烟气湿式电除尘流场-电场协同优化技术，

依托 CFD 仿真优化结构，突破传统设备低流速运行局限，实现设备小型化、降本增效；三是创制导电防腐专用涂层及配套工艺，结合复合喷淋脱水技术，解决设备腐蚀、导电衰减难题，设备使用寿命可达 10 年；四是双极荷电凝并技术，高效团聚亚微米级细颗粒物，大幅提升超细粉尘捕集效能。同时，项目建立工业颗粒物毒理基因组学分析方法，实现颗粒组分精准分离与毒性定量解析，阐明钢铁多工序颗粒物差异化毒性特征，揭示除尘设备内部颗粒毒性演变规律。

目前多项技术已在 6 项示范工程落地应用，包含 3 家专业环保企业示范项目，工程运行稳定，烟尘排放浓度 $\leq 10\text{mgNm}^3$ ，细颗粒物去除效率超 92%，经济与社会效益显著。

（5）项目鉴定

2026 年 9 月 3 日，西安生产力促进中心组织专家对中国重型机械研究院股份公司、西安理工大学、西安科技大学和宝山钢铁股份有限公司共同完成的成果“工业烟气细颗粒物高效控制与健康风险评价关键技术及应用”开展了线上评价工作，专家组依据《科技成果五元价值评估指南》GB/T 45997—2025 要求，详细审阅分析了成果相关资料和证明文件，听取了成果完成单位的汇报，经质询提问、集体评议和独立评价，形成了如下评价意见：

1.评价资料齐全，符合科技成果评价要求。

2.该成果针对细颗粒物高效控制难题，研发了高效湿式电除尘技术及双极荷电强化凝并技术，建立了颗粒物毒性效应快速评价与健康风险识别方法，形成了工业烟气细颗粒物高效控制技术装备，技术成果具有创新性。

3.成果在府谷县众鑫有限责任公司等多家单位成功应用，颗粒物排放浓度小于 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ ， $\text{PM}_{2.5}$ 捕集率大于 92%，与传统湿电相比降低了运行能耗和成本，延长了设备寿命，成果可复制可推广，社会、环境和经济效益显著。

4.该成果拥有自主知识产权，授权国家发明专利 5 项、实用新型专利 8 项，发表论文 18 篇，制定行业标准 2 项。

专家组评价一致认为该成果整体技术达到国际先进水平。

（6）技术检测报告

2014 年 12 月 31 日，上海市环境监测中心对中国重型机械研究院股份公司承担的上海青浦工业园区热电有限公司锅炉烟气进行监测，检测结果显示，锅炉烟气粉尘排放浓度为 $4.45\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，满足超低排放 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 排放标准。

2018 年 3 月 16 日，西安华测环保技术有限公司对推广应用项目韩城市热力有限公司 2x116MW 链条燃煤角管热水锅炉超低排放改造工程进行环保监测，检查结果显示，锅炉烟气粉尘排放浓度为 $5.7\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，满足超低排放 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 排放标准。

五、应用情况

本项目面向钢铁烧结、冶炼、玻璃窑、回转窑、工业锅炉以及化工、建材等行业烟气中微细颗粒物高效控制与深度净化需求，围绕湿式电除尘、电凝聚强化及成套装备工程化应用开展技术研发与成果转化，形成了“关键技术研发—

核心装备研制—系统集成—工程示范—产业化推广”的完整技术链。项目成果已在山东长裕玻璃有限公司、府谷县众鑫有限责任公司等工业企业实现直接工程应用，并通过杭州宁骏科技有限公司、林州市聚丰环保科技有限公司、湖北恒翔环保科技有限公司、西安宇清环境工程科技有限责任公司、邯郸市国祥防腐设备有限公司等环保装备和工程企业实现规模化推广，应用区域覆盖山东、陕西、浙江、河南、湖北、河北等地，并进一步辐射钢铁、冶炼、玻璃、化工、建材、电力、有色及工业锅炉等行业。相关装备长期运行表明，项目技术能够有效提高烟气微细颗粒物捕集和深度净化能力，降低污染物排放，并取得显著的产业化、经济和环境效益。

（1）玻璃窑烟气微细颗粒物高效捕集与深度净化

针对玻璃窑烟气污染物浓度高、微细颗粒物深度脱除难度大的问题，项目研发的工业烟气细颗粒物高效控制技术装备已应用于山东长裕玻璃有限公司玻璃窑生产线烟气湿法脱硫净化系统。装备投运后，实现了烟气污染物的高效捕集与深度净化，排放指标优于国家环保排放限值，项目总体每年新增减排微细颗粒物约 748 t、SO₂约 2236 t。按照环保税相关规定核算，2023—2025 年企业年均增收节支 1442 万元，三年累计增收节支 4326 万元，取得了良好的环境和经济效益。

（2）冶炼烟气污染物协同深度治理

针对冶炼生产过程中烟气量大、颗粒物浓度高及深度净化要求高等特点，项目研发的高效湿式电除尘及电凝聚技术已应用于府谷县众鑫有限责任公司冶炼生产线烟气净化系统，实现对烟气污染物的高效捕集和深度净化，排放指标优于国家环保排放限值。项目总体每年新增减排微细颗粒物约 4816 t、SO₂约 26316 t；2023—2025 年企业年均增收节支 3589 万元，三年累计增收节支 10767 万元。两项工业生产线示范工程合计每年新增减排微细颗粒物约 5564 t、SO₂约 28552 t，2023—2025 年累计增收节支达到 15093 万元，体现出较显著的污染减排和工程应用效益。

（3）成套装备产业化及多行业规模化推广

项目依托多家环保装备及工程企业，实现湿式电除尘器、电凝聚装备及配套系统的批量化生产、工程集成和市场推广。其中，杭州宁骏科技有限公司累计新增销售额 2705 万元、新增利润 295.04 万元；林州市聚丰环保科技有限公司累计新增销售额 2545.4 万元、新增利润 308.29 万元；湖北恒翔环保科技有限公司累计新增销售额 556.3 万元、新增利润 75.32 万元，相关湿式电除尘装备已在十余个工程项目中应用；西安宇清环境工程科技有限责任公司累计新增销售额 604.83 万元、新增利润 68.24 万元，电凝聚器及湿式电除尘器已在钢铁、电力、建材、有色、化工等领域三十余个工程项目中投运；邯郸市国祥防腐设备有限公司累计新增销售额 4830 万元、新增利润 770 万元，相关技术已在钢铁、化工、建材等领域实现工程推广。依据 5 家产业化应用单位证明所列数据，累计实现新增销售额 11241.53 万元、新增利润 1516.89 万元，表明项目已由单项

技术和示范工程应用进一步形成稳定的装备制造、工程集成与产业化推广能力。

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	府谷县众鑫有限责任公司	创新点一：高流速高效湿式电除尘成套技术；创新点二：双极荷电凝并一体化技术	钢铁烧结除尘	2020.6 至今	郑娟， 18691825558
2	邯郸市国祥防腐设备有限公司	创新点一：高流速高效湿式电除尘成套技术；创新点二：双极荷电凝并一体化技术	钢铁烧结除尘、化工厂除尘、建材制造除尘	2019.5 至今	王雪飞， 13483055551
3	山东长裕玻璃有限公司	创新点一：高流速高效湿式电除尘成套技术	玻璃窑炉厂除尘	2017.03	范志勇， 15269520855
4	林州市聚丰环保科技有限公司	创新点一：高流速高效湿式电除尘成套技术；创新点二：双极荷电凝并一体化技术	钢铁烧结除尘、玻璃窑炉厂除尘	2018.03 至今	贾振宁， 15093979333
5	杭州宁骏科技有限公司	创新点一：高流速高效湿式电除尘成套技术；创新点二：双极荷电凝并一体化技术	钢铁烧结除尘、回转窑除尘、工业锅炉除尘	2023.07 至今	吕晓宁， 18057180130
6	湖北恒翔环保科技有限公司	创新点一：高流速高效湿式电除尘成套技术	化工厂除尘、钢铁厂烧结除尘	2023.07 至今	程良文， 15671767676
7	西安宇清环境工程科技有限责任公司	创新点一：高流速高效湿式电除尘成套技术；创新点二：双极荷电凝并一体化技术	钢铁厂烧结除尘、转炉煤气除尘、燃煤锅炉除尘	2023.07 至今	徐立波， 18629672208

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	一种电除尘器绝缘锥套筒旋流反吹方法	中国	ZL201510424186.8	2017 年 07 月 17 日	2468014	中国重型机械研究院股份公司	艾华，边靖，张磊，赖志强
2	发明专利	一种等离子体法制备 SCO 脱硝催化剂的方法	中国	ZL201710217982.3	2019 年 11 月 26 日	3612339	西安科技大学	张蕾，何会彬，马振华，文欣，陈吉浩，王禹苏
3	发明专利	一种降温电凝并装置及方法	中国	ZL201510369213.6	2018 年 3 月 9 日	2838646	宝山钢铁股份有限公司、西安理工大学	刘道清，周茂军，何剑，徐国胜，胡子国，俞勇梅，王志坤
4	实用新型	一种脱除湿烟气中 PM2.5 的装置	中国	ZL201420141075.7	2014 年 3 月 27 日	3827209	中国重型机械研究院股份公司	张磊，艾华，李彦涛，边靖
5	实用新型	一种煤气脱水除尘装置	中国	ZL201922343332.0	2020 年 09 月 04 日	11405216	中国重型机械研究院股份公司	王迪，艾华，刘建辉，边靖，舒畅，李家黎，张磊

6	论文	The preparation of composite carrier by using diatomite and activated carbon for desulfurization in flue gas	中国	2016, 10(March-April 2016): 273-278.	2016 年 4 月 5 日	Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications	西安科技大学、中国重型机械研究院股份公司	Zhang Lei, Zhang Lei, Ai Hua, Zhang Lixin, Zhang Peng, Chen Rong, Sun Yuxia
7	论文	Study on Synergistic Desulfurization and Chlorine Resistance of Alkaline Metal Oxides@ZrO ₂ /γ-Al ₂ O ₃ -Loaded Catalysts	中国	2025, 27(9): 2500654.	2025 年 5 月 6 日	Advanced Engineering Materials	西安科技大学	Lei Zhang, Yidan Mu, Ya Chen, Xi Lu, Ruikang Song
8	论文	Study on the Application of CuO/Al ₂ O ₃ Cordierite Ceramic Honeycomb Catalystin Cleaning the Flue Gas for NO _x	中国	2016, 15(3): 1071.	2016 年 8 月 1 日	Nature Environment and Pollution Technology	西安科技大学、中国重型机械研究院股份公司	Zhang Lei, Sha Xiangling, Zhang Lei, Ma Zhenhua, He Huibin, Liu Xi
9	论文	基于毒理基因组学的工业废气颗粒物毒性分析方法及应用	中国	2024,37(4):719-727.	2024 年 1 月 7 日	环境科学研究	西安理工大学	何剑，吴兴刚，王珊珊，郑兴，刘玉玲
10	论文	钢铁厂不同工序排放的颗粒物	中国	2024, 44 (11): 386-	2024 年 6	环境科学学	西安理工大学	何剑，王召欣，

		毒理机制探究		395	月 20 日	报		王珊珊，徐志婧
--	--	--------	--	-----	--------	---	--	---------

七、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
张磊	1	无	高级工程师	中国重型机械研究院股份公司	中国重型机械研究院股份公司	(1) 主导湿式电除尘器极配优化方案，构建全过程管控技术体系；(2) 负责水膜调控与喷嘴优化，优化高流速工况运行参数；(3) 对接烟气净化示范工程建设与工程应用，实现技术成果工程转化。
何剑	2	无	讲师	西安理工大学	西安理工大学	(1) 负责进行电凝并器相关实验研究、成果转化工作； (2) 负责开展了工业颗粒物毒性分析方法研究、毒性效应及毒理机制分析。 (3) 申报了系列国家专利。
张蕾	3	无	教授	西安科技大学	西安科技大学	(1) 开展高湿酸性烟气条件下导电防腐关键技术及性能评价研究，参与喷淋增湿、水膜清灰和微细颗粒物净化性能实验，为提高湿式电除尘器耐腐蚀性能、电场稳定性和工程运行可靠性提供技术支撑。 (2) 参与相关专利申报、论文发表及成果总结。
刘道清	4	高级主任研究员	教授级高工	宝山钢铁股份有限公司	宝山钢铁股份有限公司	(1) 参与电凝并器的研制与应用；(2) 协助进行颗粒物毒理研究工作。
叶志刚	5	副总经理	高级工程师	中国重型机械研究院股份公司	中国重型机械研究院股份公司	(1) 深度参与工艺方案的制定与实施，同步开展设备试验性研究；(2) 基于运行数据准确提出优化方案，有效推动系统运行后的改进与效能提升；(3) 搭建信息共享平台，整合市场、研发、推广等资源。

徐志婧	6	无	教授	西安理工大学	西安理工大学	(1) 参与了工业颗粒物的毒性效应分析、毒理特征研究。(2) 参与电凝并技术开发及应用
宋瑞康	7	无	无	西安科技大学	西安科技大学	(1) 参与优化高流速工况运行参数，为湿式电除尘设备提高处理能力、减小设备体积及保持高效除尘提供技术支撑；(2) 参与相关论文发表及项目成果总结。

八、主要完成单位情况及创新推广贡献

完成单位	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献
中国重型机械研究院股份公司	1	中国重型机械研究院股份公司作为项目第一完成单位。(1)负责项目总体技术路线设计、核心技术研发及成果集成;(2)围绕工业烟气为细颗粒物高效控制技术装备研发,系统开展了湿式电除尘技术研究,完成了湿式电除尘器极配优化方案,确定接地极、放电线及最佳结构参数,构建全过程管控技术体系;(3)完成了实施电除尘器水膜调控与喷嘴优化,确定最佳雾滴粒径,揭示了喷嘴安装高度对液膜分布与耗水量的影响规律,优化高流速工况运行参数;并完成多项工业窑炉、冶金烧结等烟气净化工程应用,实现技术成果工程转化。
西安理工大学	2	西安理工大学作为项目第二完成单位。(1)建造了系列工业细颗粒物净化实验装置,开展了电凝并器荷电机理、凝并方法、性能影响要素分析、运行参数优化等深入系统实验研究,研制成功高性能微细粉尘电凝并器,并进行了技术成果转化工作,实现了电凝并技术在钢铁厂烧结机头电除尘提效改造工程中成功应用,相继在宝钢、莱钢、普钢等得以推广;(2)开展了湿式电除尘技术实验研究,技术成果在转炉煤气精除尘、锅炉烟气超低排放改造等领域进行了推广应用;(3)组建毒理研究实验室及科研团队,提出了分层提取、基于毒理基因组学快速分析的方法,解决了工业颗粒物毒性分析难以快速、准确、低成本完成的难题;(4)基于前述方法,对钢铁厂各工序排放的颗粒物进行了全面系统的毒性效应、毒理机制分析,为大气污染治理从以浓度为中心转向健康效益最大化、实现治理效益最大化提供数据与方法支撑;(5)对燃煤电厂烟气净化系统各净化设备进出口颗粒物的毒性进行了测试分析,得到了超低排放系统中颗粒物毒性变化规律,从毒性分析角度支撑了工业烟气超低排放工作的必要性与重要意义;(6)申报系列国家专利,发表学术论文,助力本项目技术成果推广应用。
西安科技大学	3	西安科技大学作为项目第三完成单位。(1)参与优化高流速工况运行参数,为湿式电除尘设备提高处

		理能力、减小设备体积及保持高效除尘提供技术支撑（2）针对高湿、酸性烟气条件下湿式电除尘设备易腐蚀、导电性能衰减等问题，参与导电防腐关键技术与性能评价，协同提升设备耐腐蚀性能、电场稳定性及长期运行可靠性；（3）参与湿式电除尘技术的实验验证、性能评价及工程应用研究，协助开展工业烟气微细颗粒物净化效果分析和技术参数优化，推动相关研究成果在工业烟气深度净化领域的工程化应用；（4）围绕项目关键技术申报国家专利、发表学术论文，为项目技术体系完善及成果推广应用提供支撑。
宝山钢铁股份有限公司	4	宝山钢铁股份有限公司作为项目第四完成单位。（1）建造了电凝并-电除尘研究实验装置，合作开展了电凝并器的实验研究工作，并在宝山基地一烧结电除尘器实施了电凝并器提效改造中试工程，为本项目技术成果推广奠定了基础；（2）协助进行颗粒物毒理研究工作；（3）申报了电凝并器系列国家专利。

九、完成人合作关系说明

工业燃煤锅炉、钢铁等行业烟气中细颗粒物粒径小、扩散性强、常规除尘设备捕集效率有限，尤其是亚微米及微米级颗粒物难以实现高效脱除；同时，传统烟气治理主要以颗粒物质量浓度和去除效率作为评价指标，对不同工序、不同净化环节细颗粒物的毒性效应及健康风险认识不足。细颗粒物“难检测、难捕集、风险不清”已成为制约工业烟气深度治理和大气污染精准防控的重要技术问题。面向工业烟气污染深度治理以及环境健康风险协同控制需求，亟需建立集细颗粒物精准检测、高效凝并捕集、成套装备开发及毒性风险评价于一体的全过程技术体系。

在此背景下，自 2012 年起，中国重型机械研究院股份公司联合西安理工大学、西安科技大学、宝山钢铁股份有限公司，依托陕西省科技统筹创新工程计划项目“燃煤锅炉细颗粒物污染控制技术与集成示范”（项目编号：2012KTZB03-01-02），组织张磊、何剑、张蕾、刘道清、叶志刚、徐志嫱、宋瑞康等科研与工程技术人员开展联合技术攻关及后期应用。项目实施过程中，各完成人围绕“细颗粒物高效减排与毒性风险管控”总体目标，充分发挥科研院所、高校及大型工业企业在装备研发、污染控制机理、测试评价、毒理分析和工程应用等方面的优势，通过联合试验、技术研讨、现场测试、装备开发及示范工程建设等方式，形成了长期稳定、分工明确、优势互补的产学研协同合作关系。

第一完成人：张磊

2012-2015 年，张磊与张蕾、何剑共同承担陕西省科技统筹创新工程计划重

大项目《燃煤锅炉细颗粒物污染控制技术与集成示范》，围绕燃煤锅炉细颗粒物污染控制及技术集成开展联合攻关，并完成项目实施及结题。

2012-2016 年，张磊与张蕾合作开展烟气污染控制研究，共同发表学术论文 The preparation of composite carrier by using diatomite and activated carbon for desulfurization in flue gas。

2018 年，张磊与张蕾共同获得中国循环经济协会科学技术奖三等奖（证书编号：2017-3-44-02）。

第二完成人：何剑

2012-2015 年，何剑与张磊、张蕾共同承担陕西省科技统筹创新工程计划重大项目《燃煤锅炉细颗粒物污染控制技术与集成示范》，围绕燃煤锅炉细颗粒物污染控制技术开展合作研究。

2013-2015 年，何剑与刘道清围绕微细颗粒物电凝并强化控制开展技术研发，共同获得授权发明专利“一种降温电凝并装置及方法”（专利授权号：ZL201510369213.6）。

2021-2024 年，何剑与徐志嫻围绕工业烟气颗粒物毒性效应及健康风险开展合作研究，共同发表学术论文《钢铁厂不同工序排放的颗粒物毒理机制探究》。

第三完成人：张蕾

2012-2015 年，张蕾与张磊、何剑共同承担陕西省科技统筹创新工程计划重大项目《燃煤锅炉细颗粒物污染控制技术与集成示范》，围绕燃煤锅炉细颗粒物污染控制技术开展联合研究，并完成项目立项实施及结题验收。

2012-2016 年，张蕾与张磊围绕燃煤烟气污染控制开展合作研究，共同发表学术论文 The preparation of composite carrier by using diatomite and activated carbon for desulfurization in flue gas。

2018 年，张蕾与张磊共同获得中国循环经济协会科学技术奖三等奖（证书编号：2017-3-44-02）。

2022-2025 年，张蕾与宋瑞康围绕烟气污染物协同净化及催化材料开展合作研究，共同发表学术论文 Study on Synergistic Desulfurization and Chlorine Resistance of Alkaline Metal Oxides@ZrO₂/ γ -Al₂O₃-Loaded Catalysts，DOI：10.1002/adem.20250065 4。

2024 年，张蕾与宋瑞康共同获得陕西省环境保护科学技术奖三等奖（证书号：SNSSES-J-2023-C02R）。

各完成人长期围绕工业烟气细颗粒物污染控制、颗粒物凝并强化、烟气污染物协同净化以及颗粒物毒性效应与健康风险评价等方向开展持续合作，通过共同承担科研项目、合作发表学术论文、形成授权发明专利及共同获得科技奖励，逐步建立了由基础研究—关键技术研发—知识产权形成—成果评价与应用相衔接的稳定合作关系，为本项目工业烟气细颗粒物高效控制与健康风险评价关键技术体系的形成及工程化应用奠定了良好的合作基础。

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	共同立项	张磊/2, 张蕾/19, 何剑/21	2012 年 8 月	2015 年 12 月	《燃煤锅炉细颗粒物污染控制技术与集成示范》立项、结题	陕西省科技统筹创新工程计划重大项目《燃煤锅炉细颗粒物污染控制技术与集成示范》项目合同书、结题证明
2	论文合著	张蕾/1, 张磊/2	2012 年 8 月	2016 年 9 月	The preparation of composite carrier by using diatomite and activated carbon for desulfurization in flue gas	期刊封面及目录、论文原文（入藏号 000376707900 030）
3	论文合著	何剑/1, 徐志嫫/4	2021 年 6 月	2024 年 6 月	钢铁厂不同工序排放的颗粒物毒理机制探究	期刊封面及目录、论文原文 DOI (10.13671/j.hjkkxb.2024.0277)
4	论文合著	张蕾/1, 宋瑞康/5	2022 年 9 月	2025 年 5 月	Study on Synergistic Desulfurization and Chlorine Resistance of Alkaline Metal Oxides@ZrO ₂ /γ-Al ₂ O ₃ -Loaded Catalysts	检索证明及 DOI 号 (10.1002/adem.202500654)

5	共同 知识 产权	刘道清 /1, 何剑 /3	2013 年 6 月	2015 年 6 月	发明专利“一种 降温电凝并装 置及方法”	专 利 证 书 (专 利 授 权 号 : ZL20151036 9213.6)
6	共同 获 奖	张蕾/1, 张磊/2	2012 年 8 月	2018 年 2 月	中国循环经济 协会科学技术 奖, 三等奖(证 书编号: 2017-3- 44-02)	获奖证书
7	共同 获 奖	张蕾/1, 宋瑞康/4	2022 年 8 月	2024 年 5 月	陕西省环境保 护科学技术奖, 三等奖(证书 号: SNSSES-J- 2023-C02R)	获奖证书