

2022 年度重庆市技术发明奖提名公示材料

一、项目名称

工业高温高含尘烟气余热深度回收及净化技术

二、提名者及提名等级

重庆市教育委员会、技术发明奖一等奖。

三、项目简介

本项目属工程传热、传质学理论学科。

冶金、化工、建材等行业耗能占我国工业总能耗 70%以上，而工业炉窑平均能源利用效率仅为 33%，其中高温烟气排放是最大热损失项。因此，冶金、化工、建材等高耗能高排放工业中高温烟气余热回收和净化对我国节能减排基本国策的实施和“双碳”目标的早日实现具有重要作用。但工业高温烟气（800-1200℃）具有成分复杂、含尘量高（ $\geq 2000\text{mg}/\text{m}^3$ ）、腐蚀性强、工况变化大等特点，存在含凝结性尘粒烟气粘附堵塞严重、高含尘烟气易积灰腐蚀、烟气中亚微米级尘粒难以分离、余热回收率低等瓶颈问题。

本项目在国家重点研发计划、国家自然科学基金等项目支持下，为突破工业高温高含尘烟气净化与换热一体化技术瓶颈，研究了复杂孔隙流道内高温含尘烟气多相传输和界面流固作用机制及尘粒分离与换热耦合关系，构建了烟气净化与余热回收一体化技术理论体系基础，发明了除尘与换热协同强化技术，在对工业高含尘烟气进行余热回收的同时能够净化废气，实现了高温烟气净化与换热一体化的技术与装备集成，形成了以下主要技术发明点：

（1）**高温凝尘自适应调控粘附捕集与动态定向置换脱附技术**。建立了含凝尘烟气在颗粒滤层内团聚、粘附、流动、分离及传热过程的输运模型，揭示了凝尘捕获/脱附机理及沿层分布特征，发现了多级滤料颗粒床结构具有更好的过滤效率-阻力损失性能以及更大容尘率的新原理，开发了粒径自动分层与滤料分层定向置换的移动颗粒床凝尘过滤技术，解决了移动床内多级滤料颗粒自适应分层难题，提出了采用低热容空心滤料替代原有技术的实心滤料颗粒，并通过换热管集成布置回收余热，显著提高了单位质量滤料容尘量和脱附性能，降低了滤料置换热损失，增大了热回收率。

(2) **三维超大拓展表面蓄/换热高含尘烟气高效余热回收与净化技术。**揭示了三维超大拓展表面及换热器内的多相流动及传热机理和特性,建立了三维超大拓展表面换热器内流动及传热理论模型及预测方法,阐明了三维超大拓展表面换热表面积灰、磨损、腐蚀的机制及规律,开发了具有梯度孔隙结构三维超大拓展表面蜂巢式蓄/换热带元件,提出了三维内外肋管复合强化传热方法,利用三维肋管非均匀肋结构的加工工艺优势,创新了分别针对顺排和叉排三维肋管换热器的轴向肋结构变化的防积灰高效换热器,并将三维肋管与梯级三维蜂巢体元件有机结合,发明了三维超大拓展表面蓄/换热高含尘烟气余热回收与净化元件,形成了高温高含尘烟气连续高效余热回收与净化一体化新技术和装备。

(3) **梯度孔结构膜过滤元件制备及高温烟气深度净化技术。**研究了陶瓷膜对高温尘粒的超净分离机理及微细尘粒附着特性,提出了抗微细尘粒附着的膜表面修饰技术及分离膜孔径调控方法,开发了满足高温低浓度亚微米级烟尘粒子深度净化的新型膜过滤元件,突破了膜材料温度使用限制的瓶颈,发明了挤压及气压辅助成型工艺,显著提高了陶瓷膜管强度及抗热震能力,攻克了陶瓷膜过滤管一次性整体成型技术难题,发明了低维碳纤维补强的陶瓷/碳复合材料及增加过滤精度技术,有效降低了材料制备的烧结温度和成本,发明了复合耐高温密封材料,实现了刚性陶瓷膜管与金属基座的柔性连接和高温密封。

基于以上主要技术发明,实现了高温高含尘烟气深度净化和高效换热一体化技术集成,同时首次实现了高温高含尘烟气深度净化与高效换热一体化技术装置中试和示范装置,达到了余能回收率 $\geq 70\%$;含凝尘烟气净化后 $\leq 30 \text{ mg/Nm}^3$;高含尘烟气净化后 $\leq 30 \text{ mg/Nm}^3$;亚微米级尘粒烟气净化后 $\leq 10 \text{ mg/Nm}^3$ 等关键技术指标。整体技术达到国际领先水平。

授权发明专利 21 项(含国际发明专利 3 项),发表期刊论文 40 余篇。本项目研究成果已在电力、冶金等行业得到了推广应用,解决了困扰了行业发展的瓶颈性问题,取得了显著的经济社会效益。本项目研究成果的进一步推广应用将有助于我国高耗能产业能耗的大幅降低,促进经济社会可持续发展;同时有助于实现工业烟气余能回收产业的高端化和规模化,促进我国高耗能工业向资源节约型和环境友好型转型,推进我国节能环保行业的产品升级。

四、主要知识产权和标准规范等目录:

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	专利有效状态
1	发明专利	可拆式模块化防磨除灰三维肋管换热器	中国	CN201710701541.0	2019.06.07	3406276	重庆大学	廖强, 陈自勇, 程旻, 张俊楠, 丁玉栋, 付乾, 张亮, 朱恂, 黄云	有效
2	发明专利	周向变化肋结构的防积灰叉排三维肋管束及管壳式换热器	中国	CN201911349107.6	2021.01.29	4228924	重庆大学	廖强, 丁玉栋, 谭颜斯阳, 朱恂, 付乾, 程旻, 王宏	有效
3	发明专利	肋高沿周向变化的防积灰顺排三维肋管束及管壳式换热器	中国	CN201911347406.6	2021.06.01	4459706	重庆大学	丁玉栋, 谭颜斯阳, 廖强, 朱恂, 付乾, 程旻, 王宏	有效
4	发明专利	勾配ハニカム体と三次元リブ管に基づく除塵・換熱一体化装置及び方法	日本	特願2019-538330	2022.02.04	特許第7019154号	重慶大学; 北京科技大学	廖強, 付乾, 丁玉棟, 程旻, 劉向軍, 陳自勇, 曲恒宇, 周芳	有效
5	发明专利	Continuous filtering system for moving bed particle layer with adjustable thickness of filtering layer	欧洲	EP18171667.1	2020.05.06	3401596	北京科技大学	Yin Shaowu, Wang Li, Liu Chuanping, Tong Lige	有效

6	发明专利	Moving granular bed dust filtration device with automatic particle size stratification and stratified filter material replacement	欧洲	EP19181474.8	2021.03.24	3719398	北京科技大学	Wang Li, Wu Ping, Tong Lige, Yin Shaowu, Liu Chuanpin g	有效
7	发明专利	粒径自动分层与滤料分层置换的移动颗粒床粉尘过滤装置	中国	CN201611064127.5	2020.05.08	3787279	北京科技大学	王立, 吴平, 童莉葛, 尹少武, 刘传平	有效
8	发明专利	一种对高温含尘烟气的除尘换热一体化处理装置及方法	中国	CN201710012975.X	2019.01.01	3202223	北京科技大学	夏德宏, 曲恒宇, 刘向军, 蒋滨繁	有效
9	发明专利	一种耐高温的柔弹性密封垫及其制备方法和用途	中国	CN201810529395.2	2020.05.12	3794493	中国科学院过程工程研究所	刘开琪, 孙广超, 熊瑞, 陈运法	有效
10	发明专利	一种多用途含低维碳的陶瓷/炭复合材料及其生产方法	中国	CN201710693269.6	2020.12.11	4148637	唐山贝斯特高温材料有限公司; 中国科学院过程工程研究所	陈永强, 刘开琪, 杨强, 张会军, 苗正, 任小勇	有效

五、主要完成人

第一完成人：廖强，教授，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。为项目负责人，负责项目总体研究方案和技术路线制定以及项目组织实施和管理，同时承担三维肋管换热器强化传热机理与特性、积灰-磨损-腐蚀特性、烟气深度余热回收及净化技术等研究工作。对于本项目的第二项和第三项技术发明点做出了创造性贡献；在该项目研究中投入的工作量占本人总工作量的 70%。创造性贡

献主要有：建立了烟气净化与余热回收一体化技术理论基础，提出了具有超大拓展表面防磨除灰三维肋管换热器强化传热技术和加工工艺，提出了高温高含尘烟气余热深度回收与净化一体化的技术。

第二完成人：王立，教授，工作单位：北京科技大学，完成单位：北京科技大学。在项目中负责高温凝尘自适应调控粘附捕集与动态抑尘置换脱附技术研究。对于本项目的第一项技术发明点做出了创造性贡献，研究中投入工作量占本人总工作量的约 60%。创造性贡献主要有：提出了将分布粒径颗粒堆积流动自发分层特性应用于高温含尘气体除尘净化的新方法，基于凝尘粘附特点和滤层内凝尘分布规律提出了表层定向置换过滤技术，基于床层内多组分颗粒的运动与分离（分布）规律提出了多级滤料自适应调控技术，提出了粒径自动分层与滤料分层置换的移动颗粒床粉尘过滤技术，提出了滤料温变脱附技术，提出了采用多级滤料自适应调控、表层定向置换过滤的除尘换热一体化结构和方法，实现了凝结性尘粒的自适应调控捕集与余热高效回收。

第三完成人：夏德宏，教授，工作单位：北京科技大学，完成单位：北京科技大学。在项目中负责基于超大拓展表面传热部件的蓄/换热耦合高效连续余热深度回收技术开发。对于本项目的第二项技术发明点做出了创造性贡献，在该项目研究中投入的工作量占本人总工作量的 60%。创造性贡献主要有：发明了具有超大拓展表面的三维金属蜂巢体强化换热元件，开发了由螺旋金属丝编制而成、骨架为三维随机结构、孔隙为三维连通的螺旋编织型对流-辐射转换器及气体侧强化传热方法，研发了以螺旋编织型对流-辐射转换器为骨架、以耐高温不锈钢纤维布为滤面的套袋式除尘换热一体化元件，形成了免清灰的高温高含尘烟气连续高效净化与余热回收一体化技术。

第四完成人：刘开琪，研究员，工作单位：中国科学院过程工程研究所，完成单位：中国科学院过程工程研究所。主要负责耐高温梯度陶瓷过滤元件的制备技术及异质管间密封技术。对于本项目的第三项技术发明点做出了创造性贡献，投入工作量占本人总工作量的 70%。创造性贡献主要有：提出了陶瓷膜对微细尘粒的捕捉净化机理及抗尘粒附着的膜表面修饰技术方法，提出了高性能低成本支撑体和耐高温陶瓷膜制备方法，提出了分离膜孔径的调控方法，提出了大尺寸异质管件间的高温密封方法。

第五完成人：程旻，副教授，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。在项目中负责具有超大拓展表面三维肋管换热器的积灰、腐蚀机理和换热特性研

究。对于本项目的第二项技术发明点做出了创造性贡献，在该项目研究中投入的工作量占本人总工作量的 80%。创造性贡献主要有：揭示了三维肋管换热器内的多相流动及传热机理和特性，揭示了三维肋管换热器内的流固耦合机制，建立了三维肋管换热器内流动及传热的理论模型及预测方法，阐明了三维肋管换热表面积灰、腐蚀的机制及规律，为高温高含尘烟气净化和余热深度回收一体化集成装置的优化设计提供了依据。

第六完成人：付乾，教授，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。在项目中负责三维肋管的积灰磨损特性研究以及高温高含尘烟气余热深度回收及净化集成技术中试和工业示范装置。对于本项目的第二项技术发明点做出了创造性贡献，在该项目研究中投入的工作量占本人总工作量的 60%。创造性贡献主要有：研究了三维肋管表面积灰磨损机制，揭示了工业含尘烟气在三维肋管表面的气-固分离及传热特性，组织完成了廊坊中试综合测试平台和山西太钢不锈钢股份有限公司 AOD 精炼炉高温高含尘烟气余热深度回收及净化集成技术工业示范装置的设计、加工、总装及性能测试。

六、主要完成单位

重庆大学，北京科技大学，中国科学院过程工程研究所