

## 2019 年度稀土科学技术奖申报项目简介

1	CRESTA2019-01-033	易面各向异性稀土-3d 金属化合物高频磁性能研究	李发伸	兰州大学	基础研究类	19.18	95.91	一等奖
---	-------------------	--------------------------	-----	------	-------	-------	-------	-----

高频软磁材料是雷达、计算机、通讯器材等产品的关键基础材料，主要用于电磁能量或电磁信号的转换和传输。

本项目致力于高性能稀土高频软磁材料的高频工作机理研究、性能提升及应用推广工作。国内外首创地提出了具有易磁化面高频软磁材料的工作模型——双各向异性模型，从原理上解释了易面型稀土-3d金属高频软磁材料具有更高高频本征磁性的原因。易面型稀土-3d金属高频软磁材料高频磁性可以突破Snoek极限的限制，满足当前高频器件工作频率不断提高的需求。在相同饱和磁化强度的条件下，与传统高频软磁材料比，具有更高的工作频率和磁导率初始值。当前，通过调控易面型稀土-3d金属高频软磁材料各向异性场的大小和方向，改进制备工艺，得到了截止频率达到10GHz，磁导率初始值大于10的高频软磁复合材料，居里温度比传统Co<sub>2</sub>Z铁氧体材料高100℃左右。

本项目已在《Applied Physics Letters》、《Journal of Applied Physics》和《Acta Materialia》等高质量杂志发表SCI论文19篇，他引247次，其中，双各向异性模型解释易面型材料高频磁性能的文章得到了业内的一致认可与肯定，被引102次。申请国内外专利18项，授权9项。

部分专利已实现成果转化，惠州市福益乐永磁科技有限公司购买了《ThMn<sub>12</sub>型软磁材料及其制备方法》（授权号：CN 101707108 B）专利的使用权，并在与钢铁研究总院签订的产品开发协议中，将“易面型稀土软磁材料及其产品的研究开发”作为主要工作内容之一。

2018年国内软磁市场（金属+铁氧体）约260亿RMB，下游器件市场约2600亿RMB。预计到2020年分别可以达到300亿和3000亿RMB。该项工作是我国稀土功能材料体系中为数不多拥有自主知识产权，且研究开发处于世界领先地位的产品之一。

2	CRESTA2019-03-013	高稳定性烧结钕铁硼永磁材料组织结构调控与重稀土减量化技术	闫阿儒	中国科学院宁波材料技术与工程研究所	科技进步类	23.36	93.45	一等奖
---	-------------------	------------------------------	-----	-------------------	-------	-------	-------	-----

本项目基于材料组织结构与磁体综合性能依赖关系的研究,对钕铁硼制备各工艺环节进行系统优化和革新,攻克了材料组织结构的精确调控的技术难点,研发出系列低重稀土高稳定性超高性能磁体,实现了高稳定性烧结钕铁硼的重稀土减量化。

主要科技创新点如下:

(1) 基于建立的速凝片结构生长模型,优化了速凝技术,发展二级脱氢的氢含量控制技术,发明氢化物、DyCo晶界改性技术,调控和优化元素在晶界的分布,开发出工作温度超过220℃的超高矫顽力烧结钕铁硼永磁材料,性能指标达到:Br=12.38 kGs, Hc j=35.87 kOe, (BH)max=37.23 MGOe, 220℃磁通不可逆损失0.97%。

(2) 发展压力辅助低温烧结技术,获得平均晶粒尺寸2.6μ m的细晶磁体。在此基础上提出低硼成分设计原则,并通过工艺调控结合发明的涡流感应热处理技术,优化晶界弱磁性相Nd6Fe13Ga的分布,形成连续增厚的非磁性晶界相薄层,增强晶间磁隔离,提升矫顽力,获得Hc j=19.46kOe, (BH)max=42.43 MGOe的无重稀土高矫顽力磁体。

(3) 发明电泳沉积等均匀可控的重稀土表面涂覆和晶界扩散技术,精确控制重稀土扩散量,实现磁体矫顽力可控增加,解决了产品一致性的难题;进而发展了重稀土氢化物铝复合晶界扩散技术,利用金属铝的强扩散能力,优化晶界结构、弱化晶界铁磁性,显著降低重稀土使用量。开发出磁性能达到:Hc j=37.36kOe, (BH)m=41.70MGOe和Hc j=33.25kOe, (BH)m=45.65MGOe的系列超高性能磁体。

项目实施以来,申请国家发明专利12项,其中授权8项,发表论文20篇,出版专著1部。相关技术已在宁波韵升、宁波松科、宁波科田、宁波同创等企业实现产业化,产品应用于消费类电子、汽车、轨道交通等高端应用领域,近三年新增销售15.22亿元,净利润1.90亿元,出口创汇1.61亿美元。

3	CRESTA2019-03-007	PET用低钍、低铀、低氯根氧化镧制备技术	钟可祥	福建省长汀金龙稀土有限公司	科技进步类	22.46	89.84	一等奖
---	-------------------	----------------------	-----	---------------	-------	-------	-------	-----

### 项目研究内容及创新点:

开发具有自主知识产权的氧化镧 (Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 低钍、低铀、低氯根的提纯技术; 解决氧化镧因含有钍 (Th)、铀 (U)、氯 (Cl) 等杂质造成镧基闪烁晶体的本底放射性高、晶格缺陷多的难题;

采用双溶剂萃取技术实现低钍、低铀、低氯根高纯度氧化镧原料规模化生产; 建立全球产能最大、产品质量最优的氧化镧生产线;

打破PET (正电子发射型计算机断层显像) 用低钍、低铀、低氯根氧化镧长期被国外企业垄断的困境, 掌握氧化镧深度除钍、除铀、除氯的核心技术, 工艺技术达到国际领先水平。

### 主要技术经济指标:

- (1) Tm/Yb/Lu萃取分离线, 产了氧化镧纯度 > 99.999%;
- (2) 自主开发TBP单级除杂工艺, 处理后料液Th<0.5 ppm、U<0.5 ppm;
- (3) 自主开发设计低氯根稀土氧化物沉淀工艺, 实现氧化镧中氯根<20 ppm;
- (4) 实现氧化镧产品 25 吨/年的生产能力;
- (5) 2015-2018年累计销售收入3.3 亿元, 净利润7313万元, 税金1283万元。

### 促进行业科技进步作用及推广应用情况:

采用自主研发氧化镧低钍、低铀、低氯根提纯技术, 建立了全球产能最大、产品质量最优的产品线。产品获得美国 CPI、上海硅酸盐研究所、上海新漫公司等晶体企业或科研单位的认可, 已成为这些企业或科研单位制备闪烁晶体长期、稳定、大批量使用的原料。使用我司生产的氧化镧产品的闪烁晶体完全满足PET医疗设备的性能指标, 并获一致好评。同时, 该产品还推广应用于<sup>u</sup>AG:Ce (Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce) 黄色荧光粉中, 自主开发的低钍、低铀提纯工艺应用于氧化镧等含放射性元素的产品中, 制备出低本底无水溴化镧原料, 供下游溴化镧闪烁晶体客户使用; 低氯根沉淀技术应用于激光晶体领域用氧化钪, 氧化铽, 氧化钕原料的生产中。

项目的实施不仅提高了企业自身的技术水平, 也大幅度提升了企业形象和竞争力, 培养了一批稀土冶炼分离技术的高技能人才, 推动了稀土产业结构调整 and 转型升级的发展, 促进了我国稀土材料及其应用领域, 特别是高端医疗器械设备等新兴战略领域的发展, 为我国高性能医疗器械自主开发做出重要贡献。

4	CRESTA2019-03-016	柴油车尾气后处理催化技术开发及应用	陈耀强	四川大学	科技进步类	22.09	88.36	二等奖
---	-------------------	-------------------	-----	------	-------	-------	-------	-----

据《2018 年中国机动车环境管理年报》，柴油车仅占汽车总量的9.6%，但其NO<sub>x</sub>和PM排放量分别占总排放量的68.3%和90%，严重危害人类健康和生态环境。尾气净化催化剂长期被巴斯夫、庄信和优美科等外企垄断，发展柴油尾气净化催化剂技术对于打赢蓝天保卫战和打破国际垄断具有重要的意义。

**本项目需解决的关键问题有：**

(1) SCR催化剂的温度窗口窄和V205挥发失活；(2) DOC催化剂的HC等四种污染物同时高效转化并抑制SO<sub>2</sub>中毒；(3) 催化剂产业化和整车成套应用关键技术。

本项目在科技部等资助下，采用产学研用四位一体创新模式合作，在SCR和DOC催化剂、产业化关键装备及成套应用技术开发等方面取得突破，为我国柴油车国 V 排放标准的实施提供了技术、产品和应用的全产业链支撑。

**创新点 1：**独创了纳米棒状 FeVO<sub>4</sub> 活性组分，创制了稀土助剂稳定的纳米棒状 FeVO<sub>4</sub>基SCR 催化剂，解决了催化剂低温活性差和温度窗口窄，V205高温挥发失活的重大难题。经世界领先的柴油发动机制造商德国道依茨台架测试表明，优于国内外的欧/国V钒基SCR催化剂。

**创新点 2：**成功研发了包含镧、铈等元素的多种载体材料，创制了在单一催化剂涂层内配置针对CO、HC、NO和PM具有最佳活性的多种催化组分的DOC催化剂，实现了HC等四种污染物的同时高效净化转化和抑制硫中毒。

**创新点 3：**依据具有自主知识产权的催化剂技术，自主研发催化剂的生产工艺及关键装备，建立了国际同等水平年产280万升SCR和90万升DOC催化剂生产线。

**创新点 4：**突破催化器应用技术瓶颈，发展了催化器与发动机及整车的集成和匹配技术，建立了匹配 SCR 和 DOC 催化剂的年产 65 万台柴油发动机生产线，实现了全产业链创新。

生产 30 多种规格SCR 和 DOC 催化剂，在玉柴、潍柴、一汽等企业得到应用。截至2018年12月，配置催化剂的柴油机(车)型公告数达137个，占比30%，居行业首位。近三年完成销售 85.5 亿元，实现污染物减排 266 万吨/年。依托该项目建设了移动源污染控制技术国家工程实验室柴油机/车污染控制技术平台；**获授权国家发明专利9项；发表SCI论文52篇；参与制定行业标准2项**，培养专业人才34人，形成了具有核心竞争力的技术创新和产业化团队，使我国柴油车尾气后处理催化产业跻身国际先进水平。

5	CRESTA2019-03-011	稀土资源开发生态环境成本核算技术与环境损失评估	葛察忠	生态环境部环境规划院	科技进步类	20.46	81.84	二等奖
---	-------------------	-------------------------	-----	------------	-------	-------	-------	-----

针对我国稀土矿山环境管理、稀土贸易谈判策略制定以及构建可持续的稀土资源定价机制的政策需求，项目采用实地调查、问卷调研、重点访谈、数据整合、数据挖掘等方法，调查与评价我国稀土资源开采和冶炼过程中造成的生态破坏和环境污染总体状况。系统总结国际上广泛采用的资源与环境经济核算的主要方法体系，结合国内外资源环境经济核算经验和我国“北轻南重”的稀土资源特性，构建稀土资源开发生态环境成本核算总体框架，并以江西赣州中重稀土和内蒙古包头轻稀土资源为例，验证稀土资源开发生态环境成本核算方法和环境损失评估技术体系的合理性，同时为全国稀土资源开发利用的生态环境影响成本核算提供关键技术参数；设计和构建稀土资源开发环境与经济数据库，基于数据库搭建全国稀土资源开发环境与经济信息平台系统；利用遥感影像解译数据、污染源普查数据、污染源动态更新数据、环境统计数据等多种数据源，全方面地定量分析评估我国2001-2013年稀土资源开发和冶炼的生态环境成本及其空间分布特征，进行稀土资源成本-效益分析和评估；利用DPSIR系统分析模型，对我国稀土资源开发的生态环境影响的驱动力、压力要素以及政策响应进行系统解析，评估我国稀土资源开发利用政策实施绩效，系统设计促进我国稀土资源可持续开发利用的发展战略与政策方案。

本项目发表学术论文16篇，SCI收录论文1篇，EI收录论文2篇，出版专著2本，获得授权国家软件著作权2项，提交政策建议、咨询报告3份，培养1名博士后，2名博士生，10名硕士生。

该项目成果形成了较为系统成套的核算方法，大大提升了我国稀土资源开发生态环境管理的技术水平和保障实施能力，具有重大环境、社会效益。项目研究成果填补了我国稀土资源开发生态环境成本核算与评估的空白领域，核算出的稀土资源开发生态环境成本数据，可以作为不同区域和企业的稀土资源开发的环境投入提供依据；分析了我国稀土资源开采和冶炼导致的生态环境损失成本的空间分布特征，可为帮助环境管理者优化我国稀土资源开发的空间格局；为生态环境部构建可持续的稀土资源开发定价机制，制定行业生态补偿标准等环境政策，提高智慧化、精细化环境管理水平，以及应对国际贸易谈判提供了科技支撑。此外，为赣州、包头等地区的稀土资源开发企业不断改进工艺技术，加大环境治理投入，提高环境管理能力，实现绿色、循环、高质量发展提供了重要技术支持。

6	CRESTA201 9-01-026	热喷涂纳米结构超 高温热障涂层研究	王 铀	哈尔滨工业大学	基础 研究 类	16. 18	80. 91	二 等 奖
---	-----------------------	----------------------	--------	---------	---------------	-----------	-----------	-------------

热喷涂热障涂层广泛应用于航空发动机及地面重型燃机高温合金叶片上,对高温合金基体起到抗高温,抗氧化及耐磨损性能。YSZ 热障涂层被广泛用作航空发动机和地面燃机等高温热端部件上的涂层材料,然而其使用温度不超过1200℃,制约了涂层在更高温域范围内的使用。锆酸盐基热障涂层材料由于具有热导率低、热膨胀系数较高、高温稳定性好,抗烧结能力强等优点被认为用作未来新型热障涂层的候选材料。

本项目聚焦等离子体喷涂热障涂层的隔热及高温失效性能以及新型纳米结构锆酸盐基热障涂层的制备及高温服役性能,主要研究了以下几方面的内容:

(1) 界面对热障涂层隔热的影响规律,深入探讨了层间界面的起伏特征,界面粗糙度,界面的热阻对涂层热传输行为的影响规律,深入研究了涂层与涂层周围的微裂纹(孔隙)之间的界面特征及界面热阻对涂层导热的影响;

(2) 采用原位声发射技术研究涂层在单轴向拉伸过程中的裂纹萌生与扩展的特征,建立声发射信号特征参数,如振铃数、能量、幅值、累积能量、峰频和中心频率与涂层在单轴向拉伸过程中的应力应变曲线,涂层内部裂纹萌生与扩展之间的动态联系;

(3) 深入研究了等离子体喷涂过程中打底层内部孤岛状氧化物的存在及其分布状态对TGO层的应力及TGO周围裂纹扩展状态的影响规律,建立涂层高温氧化寿命预测模型。

(4) 新型纳米结构锆酸盐基热障涂层可喷涂喂料的制备与表征;

(5) 新型纳米结构锆酸盐基热障涂层的等离子体喷涂制备及高温服役性能表征。研发的涂层在1100℃热导率小于1.3W/m.K,涂层的结合强度均在30MPa以上(单独结合层强度60MPa以上)。新型涂层相对于传统涂层高温氧化寿命提高20%以上。

通过项目实施,已经为中船重工725所、解放军5719工厂和几家民营企业等提供技术和产品,带动社会经济效益超过2000万元,合作单位(福建迪龙创新发展股份有限公司)利用本项目成果荣获第五届中国国际新材料产业博览会展品金奖。与此同时,所开发的新型纳米结构高隔热长寿命锆酸盐基热障涂层,正逐步向航空发动机以及地面重型燃机汽轮机高温合金叶片上做应用推广。

7	CRESTA2019-03-019	新型稀土电热元件的产业化	白洋	包头稀土研究院	科技进步类	19.95	79.82	二等奖
---	-------------------	--------------	----	---------	-------	-------	-------	-----

本项目为“中央稀土转型升级试点项目”，编号“2018047100000000878”，所属科学技术领域为电加热领域。

稀土电热元件即铬酸镧电热元件，它可满足电子、粉末冶金、陶瓷、半导体、分析化验、科学研究等领域的加热需求。与同类产品相比具有使用温度高

(1800℃)，高温抗氧化性好的特点，是目前在氧化环境下可长期使用并产业化的陶瓷类电热元件。之前国内生产铬酸镧电热元件是采用模压成型-等静压成型-烧结工艺。该工艺产品规格单一、时生产成本高、不利于市场推广。

包头稀土研究院自主研发出新型稀土电热元件产业化生产工艺。该项技术采用挤出成型-涂敷-烧结工艺取代原有工艺，可实现多规格、大尺寸产品的生产，同时该工艺具有机械化程度高、产量大、人工参与环节少、产品质量稳定的优点。

2016年包头稀土研究院以该专利技术获得中央稀土转型升级专项资金支持。

参评项目的主要研究内容为铬酸镧元件的挤出成型工艺与冷端涂敷工艺研发，采用以上两项工艺可以实现多种规格的铬酸镧电热元件生产，满足市场需求。

工艺成熟后，通过自筹资金及专项资金投入建成国内首条铬酸镧电热元件生产线，粉体产能规模为200吨/年，元件20万支/年。

目前生产的铬酸镧电热元件技术指标如下：铬酸镧粉体粒度：5—7 $\mu$ m；粉体纯度：>99%；热端材料粉体电阻率：10—30 $\Omega$ ·cm，冷端材料电阻率为1—10 $\Omega$ ·cm；长度范围：10mm—2000mm；外径范围：5mm—40mm；形状：元件可为直棒型和异型元件；工作温区：室温—1800℃；工作电压：40V—380V；使用寿命：2000h（工作温度<1600℃）；1500h（1600℃<工作温度<1800）。

近三年经用户使用证实，项目完成后生产的铬酸镧电热元件可完全替代日本进口产品并满足市场对铬酸镧电热元件的需求，打破了日本铬酸镧电热元件高价垄断的局面。项目的成功实施对稀土材料下游产品的应用起到了推广作用，利用铬酸镧电热元件制备的超高温电炉工作温度可达1700—1800℃，促进了电加热行业技术进步，也为相关领域提供了更高的加热温区与新的热处理手段。

8	CRESTA201 9-03-024	高性能镧铈轻稀土 /氟橡胶复合材料 制备及研究	曹 鸿 璋	瑞科稀土冶金及 功能材料国家工 程研究中心有限 公司	科技 进步 类	19. 64	78. 55	二 等 奖
---	-----------------------	-------------------------------	-------------	-------------------------------------	---------------	-----------	-----------	-------------

目前我国橡胶助剂存在有毒有害不环保、整体技术水平相对落后；而稀土行业面临轻稀土大量积压、高端产品核心技术匮乏等，针对以上存在问题，采用镧铈轻稀土元素，引入对橡胶具有热稳定作用的主体元素和自由基捕获剂等功能客体，制备了具有优异性能的新型环保稀土助剂和复合材料。

主要科技内容：（1）采用轻稀土元素研发出新型稀土橡胶助剂，实现了特定粒度、形貌、稀土化合物的可控合成；（2）打破国外高端橡胶助剂技术壁垒，在兼具耐热、耐油与力学性能一体化的设计思想基础上，开发出稀土助剂关键技术；（3）首次开发出新型镧铈轻稀土/氟橡胶复合材料，系统研究复合材料力学、耐热、耐油性能影响。

主要研究结果（1）在硝酸体系下，采用共沉淀法成功制备超细镧铈轻稀土助剂，确定最佳制备工艺参数为：反应温度60~70℃，浓度1.0M，搅拌速度300r/min，焙烧温度550℃，焙烧时间150min。（2）制备的稀土功能助剂经SGS检测，符合欧盟RoHS（2011/65/EU）指令和REACH法规要求，绿色环保；（3）运用机械熔融共混工艺制备了镧铈轻稀土/氟橡胶复合材料。研究表明，体系经老化后仍然具有较高的综合力学性能和耐油性能，热失重率降低了近14%。

技术经济指标（1）稀土功能助剂粒度100-1000 nm，符合欧盟RoHS指令和REACH法规要求；（2）复合材料技术指标：拉伸强度：17.1 MPa；断裂伸长率：178%；热老化处理：拉伸强度：8.7MPa；断裂伸长率：144%；耐油性：质量变化率0.13%；体积变化率0.31%。

促进行业科技进步作用：自主研发的稀土助剂和复合材料，各项指标符合欧盟RoHS指令和REACH法规要求。主要原料采用镧、铈轻稀土，既缓解我国大量镧、铈轻稀土过剩积压、应用不平衡的难题，又可促进我国助剂技术原创性发展，同时对白云鄂博矿萤石资源综合利用具有重要意义。

应用推广情况：开发的稀土助剂在包头市兴泰橡胶厂等国内多个生产企业应用；复合材料在上海东氟化工科技有限公司等下游客户得到了应用评价。

9	CRESTA201 9-01-010	二进料口分馏萃取理论	钟学明	南昌航空大学	基础研究类	15.60	78.00	二等奖
---	-----------------------	------------	-----	--------	-------	-------	-------	-----

#### 主要科技内容：

建立了二进料口分馏萃取理论，包括二进料口分馏萃取体系的基准物料分布、各段纯化倍数、出口流量、萃取量、洗涤量、各段混合萃取比、各段级数的计算方法、进料比的取值范围，揭示了二进料口分馏萃取体系中产品纯度、各段积累量和级样分布等基本特性和变化规律。

研究表明：二进料口分馏萃取体系的2个产品均能够较快地达到设计指标，更容易同时获得2个高纯产品。在二进料口分馏萃取体系中，组分在萃取段和洗涤段的积累只需较少的萃取排数即可直接进入稳态；但是，当萃取排数较低时组分在萃洗段的积累则先进入亚稳态，当萃取排数较高时才真正进入稳态。二进料口分馏萃取稳态的级样分布遵循递增规则和递减规则。

技术经济指标：以稀土元素的摩尔分数计，氟碳铈矿的轻稀土元素的摩尔分数为0.97、中重稀土的摩尔分数为0.03；中钇稀土矿的轻稀土元素的摩尔分数为0.55、中重稀土的摩尔分数为0.45。由于传统分馏萃取体系只设有一个进料口，因此只能处理一种稀土料液。面对稀土元素相同但是稀土含量有较大差异的两种原料，传统的技术方案是建立两条不同的分馏萃取工艺生产线，分别进行萃取分离。与传统分馏萃取技术方案相比较，二进料口的化工试剂消耗显著下降。以P507为萃取剂二进料口分馏萃取La~Nd/Sm~Lu组分分离氟碳铈矿和中钇富钷矿为例，当进料比为1时，洗酸消耗约下降50%，皂化碱消耗约下降21%；当进料比为2时，洗酸消耗约下降67%，皂化碱消耗约下降34%；当进料比为3时，洗酸消耗约下降75%，皂化碱消耗约下降42%。

促进行业科技进步作用及应用推广情况：二进料口分馏萃取理论的建立，将促进我国稀土萃取分离流程的高效化和多样化。例如，可以建立二进料口分馏萃取分离La~Nd/Sm~Lu组分分离氟碳铈矿和中钇富钷矿、二进料口分馏萃取分离La~Nd/Sm~Dy/Ho~Lu组分分离中钇富钷矿和高钇矿等新分离流程。二进料口分馏萃取理论的推广应用，将进一步降低萃取分离稀土离子的酸碱消耗。

10	CRESTA2019-02-012	高效贵金属-稀土氧化物复合催化材料的可控制备技术及成套装备	单斌	华中科技大学	技术发明类	15.59	77.95	二等奖
----	-------------------	-------------------------------	----	--------	-------	-------	-------	-----

本项目属于稀土催化材料与先进制造交叉的学科领域。

世界范围内近零排放标准的逐步实施对高活性和稳定性的机动车尾气催化剂提出了迫切需求。氧化物负载的铂族贵金属作为机动车尾气催化剂主要活性组分，其用量超过全球贵金属产量 60%，实现贵金属的减量化和高效化是长期困扰业界的重大难题。

本项目针对尾气催化剂氧化物载体本征活性差、贵金属纳米颗粒生长难控制、催化剂时序生产效率低等顽疾，从载体设计方法、贵金属高分散工艺和连续性制造装备等方面攻克了高效贵金属-稀土氧化物复合催化剂的可控制备技术，提升了国产催化剂的市场竞争力，支撑了我国汽车产业的发展。

主要发明创新如下：

1. 提出了共棱边双活性位点协同解离氧模型，利用构建内交联式氢键提升模板分解温度的方法，首次获得高比表面积、高活性的三维有序孔结构莫来石型稀土氧化物载体，低温氮氧化物转化率达 90%，碳颗粒燃烧温度降低近 30°C，是稀土氧化物载体的最好水平。

2. 发明了基于原子层沉积的贵金属纳米颗粒的均匀高分散技术，通过复合催化剂界面的亚纳米尺度可控构筑，实现了稀土氧化物对贵金属催化活性和稳定性的同时提升，贵金属减量 30%以上，一氧化碳、碳颗粒等关键污染物的低温催化性能优于商用 Pt 催化剂。

3. 提出了并行功能分区处理的设计策略，支撑研制出旋转式多腔体连续性原子层沉积装备，批次处理能力提升一个数量级，贵金属负载均匀一致性达到 98%，发明了快速烘干全定量自动化蜂窝载体催化剂涂覆设备，实现了高通量负载型催化剂生产，涂敷均匀性误差从±5%降低至±2%，单线年产能提高 20%。

与国际同类研究对比，主要突破体现在：1) 提出了单循环饱和吸附的原子层沉积方法，有效控制了贵金属纳米颗粒的形核和生长，制备了均匀高分散的贵金属纳米颗粒，为贵金属减量化和高效化提供了新的途径；2) 提出了稀土氧化物表面臭氧预氧化方法，改善了贵金属前驱体与氧化物基底的相互作用，构筑的双功能界面为同时调控贵金属催化剂的稳定性和电子结构提供了解决方案。

申请发明专利 48 项，授权 21 项，软件著作权 3 项，发表 SCI 论文 37 篇，专著 2 部，形成了具有自主知识产权的尾气催化剂设计、制备及应用创新体系。

成果受到包括美国斯坦福大学、荷兰埃因霍芬理工大学等机构专家学者的高度评价。中国工程院张联盟、中国稀土学会理事长李春龙等专家组鉴定意见为：“该成果整体达到国际先进水平，基于旋转式多腔体快速连续性原子层沉积技术高活性、低成本催化剂及其应用具有多项创新”。基于本项目创新技术，实现了单线年产能百万升的催化剂自动化生产，产品稳定性、一致性显著提高，应用于国内多家自主品牌车型，打破了国外催化剂巨头的技术垄断，缓解了贵金属资源的供需压力，实现节能减排 19 万吨。近三年，为应用单位累计新增销售额达 7.52 亿元，新增利润达 8040 万元，社会经济效益显著。