

陕西省科学技术进步奖提名书

(2021年度)

一、项目基本情况

项目名称	电化学技术在工业水处理中的应用基础研究
主要完成人	徐浩, 延卫, 冯江涛, 杨鸿辉, 邵丹, 李晓良, 徐星, 乔志华, 李乔
主要完成单位	西安交通大学 山东深信节能环保科技有限公司 宝鸡市昌立特种金属有限公司

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提名者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖及以上 <input type="checkbox"/> 三等奖及以上
提名意见： 《电化学技术在工业水处理中的应用基础研究》项目以提高电化学水处理过程的电流效率及降低能耗为目标，开展系统、深入的研究，取得很好的研究成果，并在产学研用结合方面业绩突出。提名该项目参加 2021 年陕西省科技进步奖的评审，提名等级为二等奖及以上。 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)

本项目属于环境科学技术领域。电化学水处理技术是典型的清洁处理技术，受到广泛关注与研究。本项目从钛基体金属氧化物电极制备改性与性能提升、新型电催化氧化体系构建与性能优化、电化学除垢理论研究与工业应用等三个方面开展研究工作，取得了系列研究成果，部分成果已实现工业化应用，获得了良好的经济、环境与社会效益。

1.在电化学阳极材料改性与性能提升方面，本项目以获得价廉效高的钛基金属氧化物阳极为研究目标，取得如下成果：(1)改进传统电极结构（在 PbO_2 电极中增加 Pb_3O_4 中间层、在 Sb-SnO_2 电极中增加 TiH_x 层、在钛基体表面引入 TiO_2 纳米管阵列等），使得新电极的稳定性大幅提升，其中新型结构的 PbO_2 电极强化测试寿命比传统结构电极提升 9 倍，达到 900 小时以上。(2)提出四种电极制备新方法：旋转涂布、微波热解、粉末固化及超声波搅拌法。采用新方法所制得电极的稳定性大幅提高，其中 Sb-SnO_2 电极强化测试寿命比传统方法提升 60 余倍。(3)采用非均相颗粒掺杂、均相离子掺杂及表面活性剂改性等表面涂层改性方式，对 PbO_2 表面层进行掺杂改性，使得所制得电极稳定性进一步提升的同时，羟基自由基产量提升 60%。(4) $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ 电极及 PbO_2 电极的制备技术已通过项目合作申报单位宝鸡市昌立特种金属有限公司实现工业化生产及销售，取得显著的经济和社会效益。

2.在电催化体系构建、运行参数优化及污染物降解理论研究方面，本项目以提高电催化体系电流效率及降低电解能耗为研究目标，取得如下成果：(1)创建新型电催化体系。针对电催化体系存在的传质传荷限制问题，本项目创造性地以包有磁性内核的 Sb-SnO_2 颗粒吸附于电极外层，构建新型 2.5 维电极体系，显著增加电极有效表面积；在同等条件下，2.5 维体系电流效率达到 68%，远高于传统 2 维体系的 43%。(2)改进传统供电模式。在电催化过程中选型衰减供电模式，有效缓解羟基自由基无法有效利用而自我复合的浪费问题，提高全过程的电子利用效率、降低单位电解能耗(3)吸附-电催化技术耦合。将吸附与电催化相结合，分别构建了异位/原位吸附-电催化耦合体系，将吸附过程直接引入电催化体系，利用吸附过程有效缓解传质对电催化过程的限制，以吸附过程强化有机物传质，使电极表面产生的羟基自由基被充分利用，提高了电流效率、降低了能耗。(4)污染物电催化降解机

理分析。详细分析多种典型有机物的电催化降解机理，阐明不同电催化氧化条件下有机物降解途径的机理及差异，筛选降解途径效率高、中间产物毒性低的反应条件，为技术实际应用奠定坚实基础。(5) 电催化技术实际应用。在改性 PbO_2 电极的基础上，通过电催化反应器优化设计，实现电催化技术在废水处理领域的推广应用。相关技术已通过项目合作申报单位宝鸡市昌立特种金属有限公司实现工业化应用，取得显著的经济和社会效益。

3.在电化学除垢理论与工业应用方面，本项目取得如下成果：(1) 完善电化学除垢阻垢技术原理：本项目研究发现了阳极高酸度区域可以起到去除水中碱度的作用，从而有效降低水体结垢趋势，达到“阻垢”效果。这一发现为新型电化学除垢装置的设计提供了理论依据。(2) 优化电化学除垢过程参数：发现最佳处理阴极电流密度值为 $1.5\text{mA}/\text{cm}^2$ ，目前该值已被多家企业在实际工程中应用。(3) 预测装置除垢能力：根据除垢反应过程进行除垢能力的理论计算，并结合实际情况对理论计算公式进行修正。在此基础上，提出电化学水垢设备的实际选型模型及方案，并开发出相应计算机软件系统。(4) 多技术耦合除垢：以电化学除垢技术为核心，构建电化学除垢+超声波阻垢+胶球清洗的联合处理系统，极大的保证了余热电站系统中的换热器的表面清洁。(5) 实现技术工程应用：结合研究成果，设计多款电化学水垢设备，并通过项目合作申报单位山东深信节能环保科技有限公司实现工业化应用，取得显著的经济和社会效益。

本项目所依托科技项目包括国家自然科学基金、中国博士后科学基金、陕西省自然科学基金基础研究计划、陕西省博士后科学基金、中央高校基本科研业务费及多项企业委托横向课题。截止 2020 年 12 月 31 日，项目累计发表各类论文 69 篇，其中 SCI 论文 41 篇 (ESI 论文 1 篇)，EI 论文 11 篇，中文核心期刊 17 篇；获授权发明专利 8 项，发明专利实质公开 5 项，获授权实用新型专利 10 项。SCI 论文累计他引 443 次，单篇 SCI 论文最高引用 71 次。项目累计培养研究生 17 人，其中获博士学位 6 人，硕士学位 5 人。截止 2020 年 12 月 31 日，项目所属技术成果累计实现销售额 1699.56 万元。

四、客观评价

(限 2 页。围绕创新性、应用效益和经济社会价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价意见要有客观依据, 主要包括与国内外相关技术的比较, 国家相关部门正式作出的技术检测报告、验收意见、鉴定结论, 国内外重要科技奖励, 国内外同行在重要学术刊物、学术专著和重要国际学术会议公开发表的学术性评价意见等, 可在附件中提供证明材料。非公开资料(如私人信函等)不能作为评价依据。)

创新点 1: 针对传统钛基体金属氧化物电极, 通过采用新的电极制备方法、改进电极结构、电化学共沉积掺杂表面氧化物层等方式进行改性, 极大地提高了电极的稳定性能。制得的新型 Sb-SnO_2 电极强化测试寿命由传统方法的不到 1 小时提升到 50 小时以上, 电极寿命提升 60 倍以上。采用新法所制备的 PbO_2 电极强化测试寿命由传统方法的 100 小时提升到 900 小时以上, 电极寿命提升了 9 倍。在相同的强化寿命测试条件下, 上述数据都处于国际领先水平。

上述关于钛基体金属氧化物电极的研究中, 在电极结构中加入 TiH_x 中间层的相关工作获得瑞士学者 M. Abbasi 等人 (*Green Chemistry*, 2016, 18: 1839) 的高度评价; Sb-SnO_2 电极制备方案更是被国内学者 Zhang Bo 等人 (*Chemical Engineering Journal*, 2018, 354: 93) 在工作中直接采用。而 PbO_2 电极的颗粒掺杂改性 (*Journal of The Electrochemical Society*, 2017, 164: E367) 和金属离子掺杂改性 (*Electrochimica Acta*, 2016, 188: 871) 的工作获得国内多位同领域学者的正面评价; 关于 PbO_2 电沉积过程的原理解释则被国内学者 Duan Xiaoyue 等人 (*Electrochimica Acta*, 2017, 240: 424) 在工作中加以正面引用。在该领域已发表 SCI 论文 32 篇, EI 论文 7 篇, 授权发明专利 3 项。

创新点 2: 在制备成功高性能阳极材料的基础上, 针对传统 2 维电极体系存在的传质与传荷限制等问题, 本项目首创以包有磁性内核的 Sb-SnO_2 颗粒吸附于钛基体金属氧化物电极外层, 构成新型 2.5 维电极体系, 显著增加了电极有效表面积, 提高了电催化过程电流效率。使得在同等条件下, 2.5 维体系对难降解木质素类有机物愈创木酚的电催化降解的电流效率达到 68%, 远高于传统 2 维体系的 43%。

该工作因创新性突出, 项目完成人已连续获得 2 项的国家自然科学基金资助支持(徐浩, 第 2 完成人, 项目编号 21507104, 传质过程强化对二氧化铅电催化性能的影响研究; 邵丹, 第 5 完成人, 项目编号 21706153, 水无常形——基于电磁场的涂层结构调控对阳极性能的影响机制研究), 发表 SCI 论文 5 篇, EI 论文 1 篇, 获发明专利授权 1 项。

相关研究工作得到了国内外同行的关注与认可, 在 2019、2020 年发表的多篇国

际高水平论文中正面引用了相关研究成果。如外国学者 Hanene Akrouit 等人 (*Chemosphere*, 2019, 217: 26) 与 Davood Nematollahi 等人 (*Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 261: 118226) 对磁组装电极的特点与性能表现十分认可, 加以正面引用。国内学者 Wang Guoxiang (*Chemosphere*, 2020, 251: 126442) 与 Zhou Yuanzhen 等人 (*Electrochimica Acta*, 2020, 333: 135535) 更是将磁组装电极相关研究工作成果作为其论文绪论中所提到的电化学氧化水处理技术的国内外重要研究进展之一。

创新点 3: 电化学水垢去除技术研究目前主要集中于国内, 国外相关报道很少。相比于国内其他研究机构, 对于传统电化学除垢系统, 本项目发现的 $1.5\text{mA}/\text{cm}^2$ 这一最佳处理阴极电流密度值, 已被多家企业在实际工程中广泛采用; 在新除垢系统的研发方面, 本项目率先提出在电化学过程中, 阳极的高酸度区域可以起到去除水中碱度的作用, 从而有效降低水体结垢趋势, 由此达到“阻垢”效果。上述发现已经有具体实验数据证明。在此基础上, 本项目在国内首次提出电化学阳极阻垢技术。该技术利用阳极的高酸度区域来减少 (甚至去除) 水体中的碱度, 使得被处理水体变为高硬度低碱度水体 (甚至高硬度无碱度水体), 进而达成阻垢的目的。由于只针对 HCO_3^- , 处理过程中阳极室没有水垢析出, 无需传统电化学除垢技术的水垢清理及外排部件, 可极大简化设备设计, 减少人工干预, 避免生成水垢后所产生的后续处理难题。

在电化学除垢领域, 本项目组累计发表 SCI 论文篇, EI 论文 2 篇, 中文核心论文 5 篇, 获发明专利授权 3 项, 申请发明专利 2 项。同时, 本项目组依托合作公司在本领域做了大量工程实践工作, 已完成多例实际工程案例, 涉及水泥制造、蒸发冷凝器及民用中央空调系统等领域, 有效推动了市场对于电化学除垢技术的认知度, 相关工程案例得到用户、业主的普遍好评。

综上所述, 本成果所涉及的电极制备、电催化氧化及电化学除垢等领域, 从工艺技术, 到相关基础理论分析与国内外同类研究相比较, 均具有显著的独到之处。本项目已发表了多篇高水平研究论文, 并被广泛引用, 相关技术受到包括海尔、美的、新特能源等国内诸多上市公司青睐并开展联合工程应用研发, 这些均体现了国内外学术界同行及产业界对这些技术创新性的认可。

五、应用情况

1. 应用情况（限 2 页）

本项目所涉及的电极制备技术、电催化氧化技术和电化学水垢去除技术均依靠项目第 2 完成单位山东深信节能环保科技有限公司（以下简称深信公司）和项目第 3 完成单位宝鸡市昌立特种金属有限公司（以下简称昌立公司）进行工业化，并产生实际销售额。

（1）依托本项目所开发的钛基体金属氧化物电极制备工艺及配方，在深信公司和昌立公司进行技术转化。钛基体金属氧化物电极销售情况如表 1 所示，相关证明材料（销售合同与用户意见反馈）见附件。

表 1 钛电极销售情况

采购方	电极种类	合同价格	合同日期
上海丁香环境科技有限公司	钨钛阳极	53.04 万元	2017-2-15
山东龙安泰环保科技有限公司	二氧化铅钛阳极	57.00 万元	2017-8-24
山东龙安泰环保科技有限公司	二氧化铅钛阳极	42.75 万元	2018-1-13
山东龙安泰环保科技有限公司	二氧化铅钛阳极	153.00 万元	2018-1-17
深圳百嘉达新能源材料有限公司	电化学阳极	144.40 万元	2019-4-22
山东龙安泰环保科技有限公司	电化学钛阳极	26.86 万元	2019-10-21
山东龙安泰环保科技有限公司	电化学钛阳极	61.05 万元	2019-10-31
太原山水水泥有限公司	电化学阳极	6.30 万元	2020-8-17
深圳百嘉达新能源材料有限公司	电化学阳极	133.36 万元	2020-9-25
山东崇正特种水泥有限公司	电化学阳极	15.80 万元	2020-12-15

（2）依托本项目所开发的电催化氧化水处理设备，均在昌立公司进行技术转化。电催化氧化水处理设备销售情况如表 2 所示，相关证明材料（销售合同与用户意见反馈）见附件。

表 2 电催化氧化水处理设备销售情况

采购方	电催化反应器	合同价格	合同日期
南京环保产业创新中心有限公司	CL-DCH 反应器 9 套	252.00 万元	2018-4-23
上海埃格环保科技有限公司	CL-DCH-019 反应器 4 套	90.00 万元	2017-5-5

相关技术产品增加了昌立的电极产品种类，提升了昌立电极产品的稳定性能及

催化性能，有效提高了产品的市场美誉度，促进了产品的市场销售情况。

(3) 依托本项目所开发的电化学反应器（或以电化学反应器为核心的联合处理系统），均在深信公司进行技术转化。电化学反应器销售情况如表 3 所示，相关证明材料（销售合同与用户验收报告）见附件。

表 3 电化学反应器销售情况

采购方	电化学反应器	合同价格	合同日期
河曲县中天隆水泥有限公司	电化学反应器	56.5 万元	2020-11-26
河南中联节能工程有限公司	电化学反应器+超声波 4 套	144.00 万元	2018-1-17
沂水山水水泥有限公司	电化学反应器+超声波	76.00 万元	2018-4-1
青州中联水泥有限公司	电化学反应器+超声波+胶球 清洗	85.00 万元	2018-3-23
华新红塔水泥（景洪）有限公司	电化学反应器+超声波+胶球 清洗	98.50 万元	2018-3-9
东平中联美景水泥有限公司	电化学反应器+超声波+胶球 清洗	98.00 万元	2017-6-15
西藏日喀则高新雪莲水泥有限公司	电化学反应器	52.00 万元	2016-12-20
太原山水水泥有限公司	电化学反应器 4 套	54.00 万元	2016-9-18

截止 2020 年 12 月 31 日，本项目所涉及的钛电极、电催化氧化水处理设备及电化学反应器累计销售达 1699.56 万元。上述项目的实施有效推动了市场对于电化学反应器技术的认知度，获得了良好的经济、环境与社会效益。

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	高硬高碱循环冷却水系统水质稳定化联合处理系统及方法	中国	ZL 201711071286.2	2020.08.28	3959060	西安交通大学；山东深信节能环保科技有限公司	徐浩；徐星；高宪
2	发明专利	一种电化学阻垢方法	中国	ZL 201610802332.0	2019.11.08	3586004	山东深信节能环保科技有限公司	徐浩；延卫
3	发明专利	循环冷却水系统的电化学除垢设备选型方法	中国	ZL 201611236675.1	2019.06.11	3410107	西安交通大学；山东深信节能环保科技有限公司	徐浩；徐星；高宪
4	发明专利	电催化氧化中的动态电流调控方法	中国	ZL 201610955285.3	2019.02.05	3245737	西安交通大学	徐浩；李晓良；延卫
5	发明专利	一种原位吸附-电催化耦合的有机废水处理系统及方法	中国	ZL 201610938735.8	2019.04.16	3335509	西安交通大学	徐浩；冯江涛；延卫；李晓良
6	发明专利	一种粉末固化法制备金属氧化物电极的方法	中国	ZL 201410328746.5	2017.01.11	2340377	西安交通大学	徐浩；冯江涛；延卫；汪明
7	发明专利	一种长寿命钛基电极的制备方法	中国	ZL 201210559705.8	2015.01.07	1559142	西安交通大学	延卫；邵丹；徐浩
8	论文	Fabrication of a stable Ti/TiO _x H _y /Sb-SnO ₂ anode for aniline degradation in different electrolytes	瑞士	Chemical Engineering Journal, 2016, 285: 1-10	2016.2		西安交通大学	Li Xiaoliang, Shao Dan, Xu Hao, Lv Wei, Yan Wei
9	论文	Fabrication and characterization of PbO ₂ electrode modified with	荷兰	Journal of Hazardous	2015.4		西安交通大学	Xu Hao, Yuan Quansheng, Shao Dan,

		[Fe(CN) ₆] ³⁻ and its application on electrochemical degradation of alkali lignin		Materials, 2015, 286: 509-516				Yang Honghui, Liang Jidong, Feng Jiangtao, Yan Wei
10	实用新型	离心电解装置	中国陕西	ZL 2016 2 041338 7.8	2016.9.14	5550014	宝鸡市昌立特种金属有限公司	乔志华, 李乔

七、主要完成人情况表

姓 名	徐浩	排 名	1
行政职务	教师		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>项目第 1 完成人，负责项目方案设计、整体进度把控，参与全部研究内容，负责电极制备新方法的提出、电催化体系构建及运行过程参数优化、电化学水垢去除技术等工作，对客观评价中所列创新点 1、2、3 均有贡献。发表 SCI 论文 41 篇，EI 论文 11 篇，中文核心论文 17 篇。获发明专利授权 8 项。</p>			

姓 名	延卫	排 名	2
行政职务	教师		
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		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>项目第 2 完成人，负责项目方案设计、整体进度把控，参与全部研究内容，对客观评价中所列创新点 1、2、3 均有贡献。发表 SCI 论文 41 篇，EI 论文 8 篇，中文核心论文 14 篇。获发明专利授权 5 项。</p>			

姓 名	冯江涛	排 名	3
行政职务	教师		
技术职称	副教授		
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：
项目第 3 完成人，参与 PbO_2 电极制备方法改进、电催化体系构建及运行过程参数优化的工作，对客观评价中所列创新点 1 有贡献。发表 SCI 论文 3 篇，EI 论文 3 篇，中文核心论文 1 篇，获发明专利授权 2 项。

姓 名	杨鸿辉	排 名	4
行政职务	教师		
技术职称	副教授		
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：
项目第 4 完成人，参与 Sb-SnO_2 电极与 PbO_2 电极掺杂改性工作和电化学水垢去除技术工作，对客观评价中所列创新点 1 有贡献。发表 SCI 论文 3 篇、EI 论文 3 篇，中文核心论文 3 篇。

姓 名	邵丹	排 名	5
行政职务	教师		
技术职称	副教授		
工作单位	陕西科技大学		
完成单位	西安交通大学		

对本项目主要学术贡献：
项目第 5 完成人，负责 Sb-SnO_2 电极结构改进、电催化氧化体系改进、污染物降解机理分析等工作，对客观评价中所列创新点 1、2 有贡献。发表 SCI 论文 5 篇。

姓 名	李晓良	排 名	6
行政职务	教师		
技术职称	讲师		

工作单位	西安理工大学
完成单位	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>项目第 6 完成人，负责 Sb-SnO₂ 电极结构改进、PbO₂ 电极掺杂改性、污染物降解机理分析等工作，对客观评价中所列创新点 1、2 有贡献。发表 SCI 论文 7 篇，EI 论文 2 篇，中文核心期刊论文 2 篇。</p>	

姓 名	徐 星	排 名	7
行政职务	总经理		
技术职称	工程师		
工作单位	山东深信节能环保科技有限公司		
完成单位	山东深信节能环保科技有限公司		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>项目第 7 完成人，负责电化学水垢去除技术的工业化应用，对客观评价中所列创新点 3 有贡献。发表 SCI 论文 2 篇，中文核心期刊论文 1 篇，获 2 项发明专利授权。</p>			

姓 名	乔志华	排 名	8
行政职务	总经理		
技术职称	无		
工作单位	宝鸡市昌立特种金属有限公司		
完成单位	宝鸡市昌立特种金属有限公司		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>项目第 8 完成人，负责 Sb-SnO₂ 电极、PbO₂ 电极的工业化生产以及电催化氧化技术的工业化应用，对客观评价中所列创新点 1、2 有贡献。获 8 项实用新型专利授权。</p>			

姓 名	李乔	排 名	9
行政职务	技术部部长		
技术职称	化学分析工中级		
工作单位	宝鸡市昌立特种金属有限公司		
完成单位	宝鸡市昌立特种金属有限公司		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>项目第9完成人，负责 Sb-SnO₂ 电极、PbO₂ 电极的工业化生产以及电催化氧化技术的工业化应用，对客观评价中所列创新点 1、2 有贡献。获 2 项实用新型专利授权。</p>			

八、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> 本单位为项目第 1 完成单位，负责项目方案设计与整体进度把控。具体研究内容上，负责电极制备新方法的提出、电催化体系构建及运行过程参数优化、电化水垢去除技术等工作。参与全部研究内容，对客观评价中所列创新点 1、 2、 3 均有贡献。</p> <p> 本单位累计发表各类论文 69 篇，其中 SCI 论文 41 篇（ESI 论文 1 篇），EI 论文 11 篇，中文核心期刊 17 篇；获授权发明专利 8 项。SCI 论文累计他引 443 次，单篇 SCI 论文最高引用 71 次。项目累计培养研究生 17 人，其中获博士学位 6 人，硕士学位 5 人。</p>	

单位名称	山东深信节能环保科技有限公司
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p> 本单位为项目第 2 完成单位，具体负责电化水垢去除技术的技术转化、工业化生产和应用，发表 SCI 论文 2 篇，中文核心论文 1 篇，获 2 项发明专利授权。</p>	

单位名称	宝鸡市昌立特种金属有限公司
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p> 本单位为项目第 3 完成单位，具体负责 SnO₂-Sb 电极及 PbO₂ 电极及电催化技术的技术转化、工业化生产和应用，获 8 项实用新型专利授权。</p>	

完成人合作关系说明

第2完成人延卫是第1完成人徐浩的博士研究生导师及所在团队责任教授，本项目主体内容是由第1完成人在第2完成人指导下开展。双方的合作包括：共同发表论文、申请专利、承担科研项目。

第3完成人冯江涛是第1完成人徐浩的团队同事。本项目部分内容是由第3完成人在第2完成人指导下，协助第1完成人开展。双方的合作包括：共同发表论文、申请专利、承担科研项目。

第4完成人杨鸿辉是第1完成人徐浩的团队同事。本项目部分内容是由第4完成人在第2完成人指导下，协助第1完成人开展。双方的合作包括：共同发表论文、承担科研项目。

第5完成人邵丹是第2完成人延卫的已毕业博士研究生。本项目部分内容是由第5完成人在第1完成人和第2完成人共同指导下开展。双方的合作包括：共同发表论文、申请专利。

第6完成人李晓良是第2完成人延卫的已毕业博士研究生。本项目部分内容是由第6完成人在第1完成人和第2完成人共同指导下开展。双方的合作包括：共同发表论文、申请专利。

第7完成人徐星是第2完成单位山东深信节能环保科技有限公司成员，与第1完成人徐浩所属的第1完成单位西安交通大学之间有合作关系（签署有横向合同并已结题），双方合作开展本项目所涉及的电化学水垢去除技术的应用工作。双方的合作包括：共同发表论文、申请专利、承担课题。

第8完成人乔志华是第3完成单位宝鸡市昌立特种金属有限公司成员，与第2完成人延卫所属的第1完成单位西安交通大学之间有合作关系（签署有横向合同并已结题，第1完成人为该项目直接执行人），双方合作开展本项目所涉及的钛基体金属氧化物电极的制备及电催化氧化技术的应用工作。双方的合作包括：共同承担课题。

第9完成人李乔是第3完成单位宝鸡市昌立特种金属有限公司成员，为第8完成人下属，负责具体执行第3完成单位与第1完成单位之间签署的横向合同，双方合作开展本项目所涉及的钛基体金属氧化物电极的制备及电催化氧化技术的应用工作。双方的合作包括：共同承担课题。

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	专利合著	徐浩 1/ 延卫 2	2007-9	2020-12	<ol style="list-style-type: none"> 1. 一种电化学阻垢方法 2. 电催化氧化中的动态电流调控方法 3. 一种原位吸附-电催化耦合的有机废水处理系统与方法 4. 一种粉末固化法制备金属氧化物电极的方法 5. 一种长寿命钛基电极的制备方法 	主要知识产权 2、4、5、6、7
2	论文合著	徐浩 1/ 延卫 2	2007-9	2020-12	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fabrication of a stable Ti/TiO_xH_y/Sb-SnO₂ anode for aniline degradation in different electrolytes 2. Fabrication and characterization of PbO₂ electrode modified with [Fe(CN)₆]³⁻ and its application on electrochemical degradation of alkali lignin 	主要知识产权 8、9
3	专利合著	徐浩 1/ 冯江涛 3	2007-9	2020-12	<ol style="list-style-type: none"> 1. 一种原位吸附-电催化耦合的有机废水处理系统与方法 2. 一种粉末固化法制备金属氧化物电极的方法 	主要知识产权 5、6
4	论文合著	徐浩 1/ 冯江涛 3	2007-9	2020-12	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fabrication and characterization of PbO₂ electrode modified with [Fe(CN)₆]³⁻ and its application on electrochemical degradation of alkali lignin 	主要知识产权 9
5	论文合著	徐浩 1/ 杨鸿辉 4	2007-9	2020-12	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fabrication and characterization of PbO₂ electrode modified with [Fe(CN)₆]³⁻ and its application on electrochemical degradation of alkali lignin 	主要知识产权 9
6	专利合著	徐浩 1/ 邵丹 5	2011-9	2016-12	<ol style="list-style-type: none"> 1. 一种长寿命钛基电极的制备方法 	主要知识产权 7
7	论文合著	徐浩 1/ 邵丹 5	2011-9	2016-12	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fabrication of a stable Ti/TiO_xH_y/Sb-SnO₂ anode for aniline degradation in different electrolytes 2. Fabrication and characterization of PbO₂ electrode modified with [Fe(CN)₆]³⁻ and its application on electrochemical degradation of alkali lignin 	主要知识产权 8、9

8	专利 合著	徐浩 1/ 李晓良 6	2012-9	2017-12	1. 电催化氧化中的动态电流调控方法 2. 一种原位吸附-电催化耦合的有机废水处理系统及方法	主要知识产权 4、5
9	论文 合著	徐浩 1/ 李晓良 6	2012-9	2017-12	1. Fabrication of a stable Ti/TiO _x H _y /Sb-SnO ₂ anode for aniline degradation in different electrolytes	主要知识产权 8
10	专利 合著	徐浩 1/ 徐星 7	2016-6	2020-12	1. 高硬高碱循环冷却水系统水质稳定化联合处理系统及方法 2. 循环冷却水系统的电化学除垢设备选型方法	主要知识产权 1、3
12	论文 合著	徐浩 1/ 徐星 7	2016-6	2020-12	1. Selection of anode materials and optimization of operating parameters for electrochemical water descaling 2. Research and application progress of electrochemical water quality stabilization technology for recirculating cooling water in China: A short review	附件论文目录
11	项目 合作	徐浩 1/ 徐星 7	2016-6	2020-12	1. 项目名称“电化学除垢设备处理能力衡算及设备改进” 2. 项目名称“工业污废水处理技术方案研发”	附件合同扫描件
12	项目 合作	延卫 2/ 乔志华 8	2017-12	2020-12	1. 项目名称“难降解有机废水的电催化技术工艺优化”	附件合同扫描件
13	项目 合作	延卫 2/ 李乔 9	2017-12	2020-12	2. 项目名称“难降解有机废水的电催化技术工艺优化”	附件合同扫描件
14	专利 合著	乔志华 8/李乔 9	2006-1	2020-12	1. 离心电解装置	主要知识产权 10