

# 我校广西科学技术奖项成果系列展(摘编)

## 一、木质纤维改性及其在重金属污染修复中的应用



木质纤维是地球上丰富的可再生资源，每年产生大量秸秆等农林废弃物，但目前的有效利用率不到40%。农林废弃物含有丰富木质纤维，从中提取或转化利用木质纤维已经成为农林废弃物的重要利用方向和关键领域，可以“变废为宝”，对我国“碳达峰、碳中和”战略具有重要意义。我国重金属污染治理形势严峻，绿色高效的修复材料与装备相对匮乏。广西大学朱红祥教授团队致力于纤维素高值化利用及环境保护的应用基础研究、关键技术与装备的开发及产业化应用，在木质纤维改性及其在重金属污染修复领域的工程理论与技术应用取得了突破性标志成果。广西大学作为第一完成单位的成果《木质纤维改性及其在重金属污染修复中的应用》获得广西科学技术进步一等奖。

该项目主持人为广西大学轻工与食品工程学院朱红祥教授，现为博士研究生导师，王双飞院士秘书，广西大学研究生院博科分院副院长，广西博科环保技术研发总监，中国生态学会生态工程专业委员会委员，广西科协常委，广西知识产权“十百千”领军人才。先后主持及主要参与国家和省部级项目30余项，发表学术论文100余篇（其中SCI检索60余篇）获授权专利及软件著作权20余项。

### 创新点一：突破木质纤维素高值化利用的技术瓶颈

以农林废弃物为原料，朱红祥教授团队构建了基于木质纤维的液-固体系一步快速转化技术，开发了具有高效吸附性能的木质纤维基多重金属离子吸附材料，攻克了废水中多重金属离子难以同步深度净化的难题；开发了木质纤维-天然矿物质插层耦合的多重金属长效钝化材料，解决了重金属污染土壤难以长效修复的难题；基于木质纤维基多重金属离子吸附材料，开发了重金属污染废水“修复+回收再生”一体式深度处理技术，实现了污染废水的高效处置、快速响应及超低排放；开发了木质纤维基多重金属吸附材料和海绵状膨润土装填的渗透袋模块式“深埋式高渗透反应墙”净化技术，实现了多重金属污染地下水的原位同步截留与持续深度净化，攻克了污染废水原/异位处置过程多重金属离子难以同步深度去除的净化技术瓶颈。木质纤维基改性材料的开发利用有效提升了木质纤维资源的高值化利用，践行了重金属污染的绿色治理与修复的理念。

### 创新点二：攻克木质纤维在重金属污染治理中应用的核心难题

基于多重金属离子长效钝化材料，开发了重金属污染土壤修复的“三段破碎-三段混合”异位一体化智能修复技术，实现了钝化材料的精准添加与污染土壤修复效果的长期稳定；开发了移动式原位“三重管注浆-螺旋搅拌”稳定化修复技术，攻克了高湿黏污染土壤原位处置的药剂添加难、注药半径小、增容比高的核心难题。提升了我国重金属污染废水及土壤的绿色修复的装备技术和产业化水平，经济、环境和社会效益显著。

技术成果广泛应用于重金属污染的矿山、农田、工业污染场地、流域等领域，目前已在广西、河北、湖南、福建、云南等省份60多个重金属污染治理修复工程项目中应用，近三年经济效益超9亿元，累计达到15亿元。

奖励成果采用农林废弃物为原料，开发了具有高效吸附性能的木质纤维基多重金属离子吸附材料，研发了配套技术装备，应用于重金属污染治理的全生命周期，精准治理污染，实现了废水中多重金属离子的同步快速高效去除，保障了污染土壤中重金属的长效钝化与稳定化。有效提升了木质纤维资源的高值化利用，实现了重金属污染的绿色治理与修复，解决了木质纤维在重金属污染治理中的产业技术瓶颈。

项目组牵头起草并发布相关标准5部，获授权专利30项，在《化学工程期刊》(Chemical Engineering Journal)、《美国化学学会可持续化学工程期刊》(ACS Sustainable Chemistry & Engineering)、《糖聚物期刊》(Carbohydrate Polymers)等国内外期刊发表学术论文100余篇（SCI收录50篇）。成果在重金属污染的矿山、农田、工业污染场地、流域等领域广泛应用，项目技术达到国际领先水平。

## 二、基于密度泛函理论的多金属资源清洁浮选技术



硫化矿资源及其伴生元素是有色、稀散和稀贵等关键金属的主要来源。90%以上的有色金属资源需要通过浮选技术分离富集得到单一金属的合格精矿才可利用。随着易处理单一金属资源消耗殆尽，复杂多金属资源已成为我国矿产资源的供应主体，但由于复杂多金属硫化矿表面性质高度相似且相互影响，导致浮选分离困难、资源利用率低，亟需理论与技术创新以提高资源利用水平。我校资源环境与材料学院陈建华教授团队在国际上首次采用密度泛函理论，系统构建了基于矿物表面金属离子半约束性质的浮选界面作用理论，突破了传统浮选经典化学理论的局限性，颠覆了浮选药剂选择性和低毒性难以兼顾、伴生金属与载体矿物难以协同回收的传统认识，通过系列清洁高

效靶向浮选药剂的发明和应用，实现了高相似硫化矿选择性分离富集和伴生稀散稀贵金属高效回收，开发出铅镉（伴生银）、铜铅锌（伴生金银）等典型复杂多金属资源清洁浮选技术并推广应用，实现了理论、技术和应用的整体创新。广西大学作为第一完成单位的成果《基于密度泛函理论的多金属资源清洁浮选技术》获得广西科学技术进步一等奖。

陈建华教授及其团队长期致力于矿物加工领域的基础理论及工程应用研究，在国际上开创性地将密度泛函理论方法引入到以工程实践为主的矿业领域，开辟了矿物浮选密度泛函理论研究方向，该方法已经成为矿业领域公认的国际最前沿方法之一；提出浮选药剂与矿物表面金属离子作用的二次配位理论，解决了矿物浮选过程中药剂分子靶向作用理论描述及模型构建的重大难题，创立了矿物浮选配位化学理论体系。近年来，该团队承担国家自然科学基金12项，获省部级科技进步一等奖4项，二等奖6项；获授权国家发明专利60多项，国际专利10多项；出版学术专著9部，多部专著被翻译为英文和俄文，发表学术论文400多篇；两人入选2020年美国斯坦福大学发布的全球Top2%科学家，团队多名成员担任国际国内重要学术期刊编委。

陈建华教授2011年入选教育部新世纪优秀人才支持计划，广西大学君武学

者，第十二届广西“五四青年”奖章获得者，中国有色金属学会矿冶过程计算与模拟仿真专业委员会副主任委员、矿冶过程界面化学学术委员会副主任委员以及中国矿业联合会选矿委员会委员等。

**创新点一：在国际上率先将密度泛函理论和方法引入矿物浮选领域，形成了以表面离子半约束、界面水化作用和晶格缺陷为核心的硫化矿浮选界面作用理论。**

采用密度泛函理论揭示了硫化矿物浮选体系“表面离子-界面性质-晶体结构”三个层次的微观机制，提出了表面金属离子半约束模型，建立了药剂分子与矿物表面轨道作用的对称性匹配理论；构建了硫化矿物表面水化层结构，提出了考虑水化势垒效应的浮选药剂分子设计公式；建立了硫化矿物浮选晶格缺陷理论，明晰了伴生稀散、稀贵金属强化回收调控原则。

**创新点二：基于浮选界面作用理论，发明了系列清洁高效靶向浮选药剂，实现了温和浮选环境下主金属与共生金属的高效协同回收。**

设计了对铜铅镉矿物具有靶向作用的官能团和疏水基团，发明了铅镉混选捕收剂羧基硫代磷酸酯和铜铅混选捕收剂乙酰硫脲酯，在近中性温和环境下实现铜铅、镉矿物及伴生金银的高效浮选。首次发现轨道对称性匹配与抑制剂选择性之间的关联机制，发明了锌硫分离广谱抑制剂羧基三硫代碳酸盐和铜铅分离有机抑制剂硫脲二硫基盐，完全取代了使用几十年的剧毒药剂氰化物和重铬酸钾。

**创新点三：形成了以清洁靶向浮选药剂应用为核心的复杂多金属资源清洁高效浮选技术，显著提高了多金属资源综合利用回收率。**

针对广西大冶大型富锡铅镉锌多金属硫化矿，采用新型铅镉捕收剂和锌硫分离抑制剂，形成“铅镉混浮-锌硫混浮-锌硫分离”清洁浮选工艺，铅、镉、锌、银、铟、锡回收率分别提高6.47、6.27、5.76、15.4、10.45、8.72个百分点。针对内蒙赤峰低品位铜铅镉矿，采用新型铜铅混浮捕收剂和铜铅分离抑制剂，形成“铜铅混浮-铜铅分离-锌浮选”清洁浮选工艺，铜、铅、金、银回收率提高了45.09、54.02、22.51、48.20个百分点。

从2015年开始，整体技术成功应用于广西、内蒙、江苏、云南等省区的矿山企业，近三年累计新增利润11.71亿元。项目成果对现有浮选理论体系与研究方法具有突破性创新，显著提高了我国战略性矿产资源综合利用水平。对我国选矿领域的理论与技术进步具有重要的推动作用。由孙传尧院士担任组长的科技成果评价意见认为：“整体技术处于国际领先水平”。

研究成果具有通用性和适应性，目前已经推广和正在推广到南非、印尼、柬埔寨、俄罗斯、蒙古、澳大利亚、智利、厄瓜多尔和秘鲁等“一带一路”国家的特色资源。同时研究成果还在国内大中型同类矿山推广应用。

## 三、新能源电力系统多元协同稳定控制与优化理论



在“碳达峰、碳中和”目标下，构建以新能源为主体的新型电力系统已上升到国家能源战略。新能源高比例接入大幅增加了发输配电系统的不确定性，使电力系统由荷端弱不确定性向源-荷双侧强不确定性转变，导致以传统同步机组调节为主的调控手段难以平衡由新能源引起的快速发电-负荷匹配问题，给电力系统安全稳定运行带来了前所未有的挑战。我校电气工程学院刘辉教授团队聚焦新能源电力系统实时平衡调控技术，在同步发电机稳定控制、电力系统集中-分散频率控制、电力系统不确定性优化与控制等方面取得了原创性研究成果，较为系统地建立了新能源电力系统多元协同稳定控制与优化理论，为解决新能源大规模消纳和支持“双碳”目标实现提供了关键理论和技术支撑。广西大学作为第一完成单位的成果《新能源电力系统多元协同稳定控制与优化理论》获广西科学技术自然科学一等奖。

项目成果第一完成人刘辉教授是广西大学电气工程学院副院长、博士生导师，我校自主培养的第一位电气工程学科博士；是首批国家一流专业建设点负责人、首批教育部虚拟教研室负责人；担任了教育部教指委委员，中国电工技术学会理事，中国电工技术学会人工智能与电气应用专委会副主任委员，中国电机工程学会电工数学等专委会委员，国际电力期刊IEEE Transactions on Smart Grid编委；主持国家重点研发计划项目1项、国家自然科学基金项目4项和广西杰出青年基金，发表学术论文100余篇，专利成果转化5项。

**创新点一：攻克了科学问题“同步发电机多目标协同稳定控制机理”，解决了“电力系统多目标控制与系统大范围渐近稳定性难以协同”的难题。**

同步发电机是电力系统的核心设备，其复杂相似组合支撑电力系统同步稳定运行。然而，同步发电机多目标控制与系统稳定性存在复杂非线性耦合，导致系统稳定性判定（尤其是系统大范围渐近稳定性判定）难以兼顾多目标控制，致使系统动态、静态性能难以协同。该项创新突破了多目标控制和系统动态静态性能协同控制的协同难题，原创性地提出了目标全息反馈非线性控制设计方法，在双曲奇点邻域内揭示了多目标控制与系统动态性能协同的机理；突破了电力系统大范围渐近稳定性和同步发电机组多目标控制的协同难题，原创性地提出了多目标协同系统大范围渐近稳定的非线性控制设计方法，揭示了同步发电机多目标控制和系统大范围渐近稳定性的作用机理。

**创新点二：攻克了科学问题“支撑系统频率稳定的分布式储能协同控制”，解决了分布式储能聚合-分散与系统频率的协调控制难题。**

新能源高渗透导致电力系统频率调节能力不足，大规模分布式储能聚合可为新能源电力系统频率调节提供重要支撑。然而，分布式储能元件容量小、分布广，其支撑系统频率稳定的协同控制难以兼顾自身特性差异，需要刻画分布式储能的不确定性聚合特征和差异化调控能力，实现分布式储能聚合-分散与系统频率的协调控制。构建了分布式储能随机行为刻画能量表征模型，实时映射分布式储能的功率随机特征，实现分布式储能功率随机性的储能需求有功度量，原创性地提出了分布式储能分散-自治的自适应频率下垂控制方法；构建了自动发电控制的调度表征模型以及集中调度和分散调控的分层控制框架，提出了分布式储能和同步发电机协同的电力系统二次调频控制方法，降低了风电对电网频率的冲击，削减了同步发电机的频繁调节；刻画了分布式储能有功调控能力优先级，提出了考虑优先级和调控能力聚合的系统频率紧急控制方法，削减了负荷刚性切除，有效降低了停电损失。

**创新点三：攻克了科学问题“新能源电力系统不确定性多目标协同优化”，突破了电力系统潮流计算鲁棒性建模以及系统不确定性优化和多元资源在线调控的难题。**

新能源电力系统的强不确定性和多元资源的多维度复杂耦合，导致不确定性

下系统运行风险与多主体协同控制困难，需要突破电力系统潮流收敛性和适应性建模难题，提升系统不确定性优化和多元资源在线调控能力，实现新能源电力系统的安全与经济运行。构建了节点功率松弛量表达范式，突破了经典潮流方程节点功率刻画的局限性，原创性地提出了基于节点功率松弛量调控网络潮流的非线性规划模型；构建了源-荷不确定性参数的概率表征，建立了含电压质量机会约束的电力系统在线随机滚动优化模型，原创性地提出了考虑多元分布式资源的电力系统多维多时域随机模型预测控制方法，攻克了多重不确定性因素下储能、分布式电源等多元资源协同的优化控制难题。

项目成果8篇代表作被欧美等51个国家或地区学者广泛引用和评价，包含50余位国内外院士和IEEE Fellow，被评价为“将所提出的先进非线性控制理论成功应用于励磁系统”是迄今为止，分布式储能荷电状态控制的两种典型方法之一、“提出了一种更加先进通用的模型预测控制器”等，并应用于国家重点科技项目示范工程。

## 四、变压器状态智能感知与自维护关键技术及应用

电力变压器是电力系统中电能传输的“核心”枢纽设备，一旦其发生绝缘故障易诱发电网大规模停电事故，严重威胁国家能源安全和社会稳定，因此亟需对其开展实时监测与管控。但当前变压器智能感知及维护水平与智能电网安全运行的迫切需求严重脱节，存在传感检测精度和一体化水平低、薄弱区域老化评估难、绝缘薄弱区域寿命预测难、变压器智能化维护水平不足等难题，严重威胁电网的安全稳定运行。我校电气工程学院高电压与绝缘技术团队长期致力于产学研结合解决电力生产中的实际问题，在变压器绝缘老化机理、绝缘状态评估、绝缘故障诊断、变压器智能维护技术等方面取得了标志性成果。我校与广西电网公司、重庆大学、广西柳州特种变压器公司、保定天威新域科技公司等单位产学研联合攻关，高电压与绝缘技术学科带头人张懿议老师牵头完成的研究成果《变压器状态智能感知与自维护关键技术及应用》获得广西技术发明一等奖。



成果的第一完成人张懿议老师是广西大学电气工程学院院长助理、博士生导师、博士后合作导师、特聘教授、广西电网特聘领军级技术专家、八桂学者（青年）创新团队带头人、高电压与绝缘技术学科带头人、自治区党委教育工委优秀共产党员。主要研究电力装备智能化与绝缘材料方向，长期致力于产学研结合解决电力生产中的实际问题。以第一完成人（有记录以来最为年轻者）分别获得广西技术发明一等奖、广西教学成果一等奖和全国设备管理与技术创新成果特等奖各1项。主持国家级基金/科研项目3项，国家级/教育部教学项目2项，省部级教学/科研项目3项，军队或电力行业重大专项或子课题5项，参与国家973项目、国家创新群体等项目20余项。发表权威期刊论文60余篇，申请/授权专利30余项，单项专利转化达101万元。曾就读于广西大学、重庆大学、广西电网-西安交通大学联合博士后工作站，曾先后在美国北卡罗来纳州立大学、伊利诺伊理工大学、南理工大学访学。现任Universal Journal of Electrical Engineering杂志主编，广西电力装备智能控制与运维重点实验室副主任，配电网故障诊断工程技术研究中心主任，全国高原电工产品环境技术标准化技术委员会委员，中国电工技术学会青年工作委员会委员，中国绝缘材料与绝缘技术专委会委员，广西能源智库特聘专家，广西大学发展规划委员会委员，广西大学科协委员，多个SCI杂志编委或特邀编辑。

**创新点一：提出了水分迁移模型，攻克了微水关键参量感知的难题，发明了多种变压器绝缘状态智能感知关键传感装置，研发了智能检测传感集群及状态感知一体化构架。**

研制了微水、铁芯接地电流等智能监测关键传感器，研发了智能检测传感集群及状态感知一体化构架，解决了多传感器一体化构架与融合技术难题，多特征综合监测能力大幅提升。

**创新点二：提出了油纸绝缘介电高阶等效电路模型，发明了绝缘薄弱区域状态的无损诊断技术。**

通过揭示油纸绝缘不均匀老化对油纸绝缘系统整体频域介电响应特性的宏观影响规律，基于所收集的时频域介电响应数据提取表征绝缘老化状态的多维介电响应特征参量，发明了一种变压器油浸纸绝缘状态三维量化模型。该技术实现了对变压器绕组薄弱区域绝缘聚合度的量化评估。

**创新点三：提出了表征绝缘薄弱区域老化速率的时-温-水模型，攻克了薄弱区域绝缘寿命预测的难题。**

揭示了变压器纸绝缘老化时间、热点温度、水分、频域介电谱与变压器薄弱区域纸绝缘老化速率之间的耦合关系。建立了基于“时-温-水”的改进二阶纤维素老化动力学模型，发明了变压器薄弱区域纸绝缘的寿命预测技术。

**创新点四：发明了基于薄弱区域运行风险的变压器自维护管控技术。**

自主研发了具有自感知、自评估、自诊断、自维护管控功能的高压智能变压器，实现了超特高压变压器冷却控制、辅助调整负荷智能化，显著提升了监护与自维护水平，降低了高压变压器的故障概率。

成果共获授权发明专利61项、实用新型专利19项；编写行业标准5部，国家标准3部，国际标准3部；发表论文79篇（SCI/EI收录67篇），软件著作权6项，出版著作5本，研发软件3套。依托973计划、国家自然科学基金创新群体基金等国家重大项目，攻克了4大技术难题，研制了自感知、自评估、自诊断、自维护于一体的智能化变压器，产学研联合攻关的成果实现了重大转化，新增利润10.95亿元，节支总额2.82亿元；实现了国内变压器（110kV及以上）的实时监测与自维护，解决了电网、冶金等企业现役变压器智能化改造的迫切要求；引领了变压器产业的智能化技术变革方向，推动了广西柳特变在特种变压器市场占有率的大幅攀升，相关技术和产品远销意大利、土耳其等国家。

成果被雷清泉院士评价为：“成果在变压器绝缘状态评估和寿命预测技术、自维护管控方面具有重大创新”，“项目整体技术达到国际领先水平”。多名院士和IEEE Life Fellow S.Gubanski教授认为：“项目组在油纸绝缘老化诊断方面的工作值得肯定”，“项目研究的智能化构架与辅助决策等变压器智能化关键技术创新突出”。此外，项目成果被国内外学者广泛引用和评价，其中包含10余位院士，30余位资深权威专家和20余位IEEE Fellow。

（陈立）