

推荐国家科技进步奖项目公示

| | |
|--|------------------------------|
| 项目名称 | 600MW 超临界循环流化床锅炉技术开发、研制与工程示范 |
| 推荐单位 | 教育部 |
| 推荐单位意见： <p>我单位认真审阅了该项目推荐书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目均符合国家科学技术奖励工作办公室的填写要求。</p> <p>该项目团队产学研结合，联合攻关超临界 CFB 技术研发十余年，揭示了超临界 CFB 锅炉原理，创新形成了超临界 CFB 锅炉设计理论和关键技术体系；发明了系列的关键部件创新结构，率先研制了世界上容量最大、参数最高的 600MW 超临界 CFB 锅炉；研发了成套辅机、仿真、控制和安装调试技术，完成了世界首台 600MW 超临界 CFB 示范工程的系统集成，创建了安全运行技术体系。项目获授权发明专利 33 项，发表论文 234 篇。</p> <p>基于项目创新成果，完成单位共同开发了系列超临界 CFB 锅炉，性能优于国外的产品，成为我国劣质燃料高效清洁利用的主流技术。鉴定意见认为，该项目取得了系列原创性成果，完全自主开发，关键技术创新性显著，达到国际领先水平。该项目成果突破了我国大型燃煤锅炉技术依赖引进的局面，提高了我国 CFB 的国际竞争力，产品出口国外。全球 CFB 市场占有率超过 95%。近三年新增产值 50 多亿、新增利润 5 亿多，经济效益和社会效益显著。</p> <p>该项目推动了 CFB 燃烧技术的国际进步，被国际能源组织认定是 CFB 燃烧技术发展的标志性事件，是中国对世界洁净煤燃烧技术的重大贡献。</p> <p>对照国家科学技术进步奖授奖条件，推荐该项目申报 2017 年度国家科学技术进步奖一等奖。</p> | |

项目简介:

循环流化床(CFB)燃烧发电具有燃料适应性强和污染控制成本低的优势,能够清洁燃用煤粉炉不能燃烧的煤矸石、煤泥等劣质燃料,是占煤炭总产量 30%的劣质燃料利用的最佳选择,得到迅速发展,在该项目进行前,国内外发展到 300MW 等级亚临界水平。为进一步提高效率,在国家 863、科技支撑计划支持下,项目组与国外同期开展了超临界 CFB 关键技术研发,在没有先例条件下,经过十余年的联合攻关,系统地解决了从 300MW 亚临界自然循环突破到 600MW 超临界强制流动带来的巨大的理论及工程挑战,完成了世界首台 600MW 超临界 CFB 锅炉的创新实践,性能指标优于国外同期开发的 460MW 超临界 CFB 锅炉,取得了系列原创性成果:

1、发现了超临界 CFB 物料浓度三维分布规律和水冷壁热流二维分布规律;揭示出大型 CFB 床面流化均匀性和稳定性机理;提出了超临界 CFB 的水动力设计导则和低质量流率水循环解决方案;发现了大型 CFB 中 NO_x 生成与控制的独特机制,并提出了深度低氮排放途径;将 CFB 的认识从一维发展到三维、从静态发展到动态,完整地揭示了超临界 CFB 锅炉原理,自主提出了超临界 CFB 锅炉整套设计理论和计算模型,建立了超临界 CFB 关键技术体系。

2、开发了超临界 CFB 锅炉整体布置技术、性能计算技术;创建了超临界 CFB 全逆流热力流程;发明了纵流式外置换热器、多循环回路非均匀布置、低质量流率一次上升垂直水冷壁、非连续双面受热水冷壁等关键部件的专利结构和专有工艺,第一次实现了垂直管水冷壁在超临界下的正响应特性;研制了世界上容量最大、参数最高的 600MW 超临界 CFB 锅炉。

3、研发了系列的辅机技术,形成了系统集成技术;提出了描述 CFB 动态特征量的“即燃碳”理论和软测量方法并用于控制系统,实现了汽温的精准控制和机组负荷自动快速调节;开发了基于机理模型的 600MW 超临界 CFB 机组仿真机;形成了超临界 CFB 安装、调试技术;建设了世界首台 600MW 超临界 CFB 示范工程,创建了 600MW 超临界 CFB 锅炉安全运行技术体系。

示范工程锅炉运行最大连续蒸发量 1903t/h,热效率 91.52%,锅炉原始排放浓度 NO_x 为 112mg/m³、 SO_2 为 192mg/m³(S=2.5%,脱硫效率 97.12%,Ca/S 为 2.07),THA 下综合厂用电率 5.57%,各项指标均优于亚临界 CFB 和国外的超临界 CFB,供电煤耗比相近燃料 300MW 亚临界 CFB 机组降低了 31.2g/(kW·h)。

项目获授权发明专利 33 项、实用新型 70 项、软件著作权 6 项;发表论文 234 篇(EI 148 篇、SCI 60 篇、ISTP 18 篇)。

项目同时实现了 CFB 锅炉从亚临界到超临界的参数突破、300MW 到 600MW 的容量跨越。专家鉴定意见认为:“该项目成果完全自主开发,关键技术创新性显著,研究成果达到国际领先水平”。

基于项目创新成果,开发了系列超临界 CFB 锅炉,在国内推广使用,解决了我国劣质燃料的高效清洁利用问题;突破了我国大型燃煤锅炉技术全部引进的被动局面。提高了我国 CFB 锅炉的国际竞争力,开始走向海外,CFB 锅炉全球市场占有率超过 95%,创造了巨大的经济效益和社会效益。

项目实现了国际燃烧界把 CFB 发展到 600MW 超临界的梦想,国际能源组织认为是国际 CFB 燃烧技术发展的标志性事件。

客观评价:

(1) 600MW 超临界循环流化床锅炉技术开发、研制与工程示范科研成果鉴定意见

该项目“取得了系列原创性成果……。该项目成果完全自主开发，关键技术创新性显著、……。研究成果达到国际领先水平。”

(2) 国家高技术研究发展计划(863)超临界循环流化床锅炉(2002AA529100)课题验收意见

“…。课题进行了不同容量的循环流化床锅炉研究测试，获得了传热模型以及物料浓度分布模型，建立了循环流化床锅炉燃烧侧热流密度分布模型和换热床模型；建立了低质量流率垂直管全水冷壁的水动力计算模型…。专家组一致同意通过验收。”

(3) 国家科技支撑计划超临界循环流化床(2006BAA03B00)项目验收意见

“…项目完成了 600MWe 超临界流化床锅炉的本体设计、关键技术、制造、辅机与辅助系统、仿真平台和运行调试等技术研究，建设完成了我国首台世界最大容量 600MWe 超临界循环流化床锅炉工程示范，并通过了 168 连续运行考核”；项目“……形成了一批具有自主知识产权的原创性成果…，专家组一致同意通过验收”。

(4) 白马 600MW 超临界 CFB 锅炉性能测试报告结论

锅炉效率 $\geq 91.52\%$ ，高于保证值 91.01%。

锅炉稳定投入石灰石脱硫情况下，二氧化硫排放浓度为 192.04 mg/m^3 ，氮氧化物排放浓度 111.94 mg/m^3 ，完全达到锅炉性能保证值要求。

(5) 白马 600MW 超临界 CFB 机组汽轮机 A 修后性能试验报告结论

THA 工况下综合厂用电率为 5.57%，修正后供电标准煤耗为 $301.6 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$ 。

(6) 国际评价

国际能源组织关于循环流化床燃烧发展动态的年度报告《Developments in circulating fluidised bed combustion》(ISBN 978-92-9029-539-6)中，将该项目完成的 600MW 作为国际 CFB 技术发展的标志性事件。

(7) 相关技术成果获奖情况

《600MW 超临界循环流化床锅炉关键技术研究与应用》2015 年获高等学校科技进步一等奖；《600MW 超临界循环流化床锅炉研制》2015 年获中国机械工业科技进步一等奖；《600MW 超临界循环流化床锅炉技术开发与工程示范》2015 年获中国电力科学技术一等奖。

(8) 与当前国内外同类技术的比较

世界首台 600MW 超临界 CFB 发电示范工程，与相近燃料条件下的亚临界 300MW 相比，相同工况下锅炉效率提高 0.3 个百分点，厂用电率降低了 2.57 个百分点，脱硫效率提高 3.7 个百分点，供电煤耗降低 $31.2 \text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$ 。

目前，国外已投运的超临界 CFB 只有美国 FW 开发一台 460MW，与该项目同期进行。与之比较，该项目的容量、参数、效率和排放等各项指标全面优于国外：尽管该项目煤质较差，但锅炉热效率比国外高 0.5 个百分点；相同 SO_2 排放时，脱硫石灰石当量消耗仅为国外的 80%，而 NO_x 原始排放更是仅为国外的 40%。机组厂用电率也显著低于国外，国外是 7.4%，而该项目仅为 5.57%。可见，该项目完成的世界首台 600MW 超临界 CFB 机组的性能指标优于国外同期开发的超临界 CFB 锅炉(460MW)。

推广应用情况:

该项目成功地实现了 CFB 锅炉从亚临界到超临界的参数突破和 300MW 到 600MW 的容量跨越,是目前世界上投运的最大容量和最高参数的 CFB 锅炉。

该项目的成功,为解决我国电力生产和绿色煤炭中低热值燃料的高效清洁利用问题提供了条件,改善了煤炭生产地区的劣质燃料堆弃污染和产业升级,推动了锅炉制造厂的产业结构调整和优化升级,提高企业和相关行业竞争能力,实现电力装备制造和电力生产行业的技术跨越,显著促进行业技术进步。

600MW 超临界 CFB 锅炉示范工程成功运行后,又签订了 2 台 660MW 超临界 CFB 锅炉合同,还有多个国内的 600MW 等级项目正在前期工作中。基于项目创新成果,开发了 350MW 超临界 CFB 锅炉,国内订单 71 台。国内新增总装机容量 27120MW,带动锅炉及其辅机产值百余亿。

该项目突破了我国大型燃煤锅炉技术全部引进的被动局面,提高了我国电力装备技术的创新能力和电力装备的国际竞争力,开始走向世界,出口到罗马尼亚、波黑等。超临界 CFB 全球市场占有率超过 95%,见附件 3.12。

主要应用单位情况表

| 应用单位名称 | 应用技术 | 应用的起止时间 | 应用单位联系人/电话 | 应用情况 |
|---------------------|--------|-----------|---------------------|-----------|
| 东方电气集团东方锅炉股份有限公司 | 全部应用 | 2013.4-至今 | 冯杰 13890008224 | 广泛推广,效果良好 |
| 四川白马循环流化床示范电站有限责任公司 | 全部应用 | 2013.4-至今 | 雷秀坚 13698308555 | 运行效果良好 |
| 中国电力工程顾问集团西南电力设计院 | 系统集成技术 | 2013.4-至今 | 韦延河 13980532141 | 应用良好 |
| 四川电力建设三公司 | 安装技术 | 2013.4-至今 | 李俊 13990586462 | 应用效果良好 |
| 四川电力工业调整试验所 | 调试技术 | 2013.4-至今 | 钟农兵 13980622366 | 推广应用效果良好 |
| 北京国电智深控制技术有限公司 | 控制技术 | 2013.4-至今 | 许志伟 010-52615192 | 应用效果良好 |
| 南通大通宝富风机有限公司 | 风机技术 | 2013.4-至今 | 赵成 051385544236 | 推广应用效果良好 |
| 长沙深湘通用有限公司 | 石灰石技术 | 2013.4-至今 | 尤小军 071388996766 | 应用效果良好 |
| 江苏宜刚耐火材料有限公司 | 耐火材料技术 | 2013.4-至今 | 毛佰新 13961567202 | 推广应用效果良好 |
| 青岛嘉能海诺电力设备有限公司 | 冷渣机技术 | 2013.4-至今 | 王振山 15864213177 | 应用效果良好 |
| 诸暨市泮泽动力机械有限公司 | 膨胀节技术 | 2013.4-至今 | 陈晓军 13857548552 | 应用效果良好 |

主要知识产权证明目录:

| 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 |
|--------|-------------------------|--------|------------------|------------|---------|---|--|--------|
| 发明专利 | 一种三旋风分离器的循环流化床锅炉炉膛结构 | 中国 | ZL201210123470.8 | 2014-07-16 | 1441518 | 清华大学 | 吕俊复,仇晓龙,杨海瑞,吴玉新,张海 | 有效 |
| 发明专利 | 循环流化床锅炉 | 中国/土耳其 | ZL201110031308.9 | 2011-01-28 | 1420831 | 东方电气集团东方锅炉股份有限公司 | 聂立,苏虎,巩李明,黄敏,霍锁善,杨虎,杨雪芬,周棋 | 有效 |
| 发明专利 | 循环流化床锅炉的脱硫系统 | 中国 | ZL201310213175.6 | 2016-02-03 | 1944738 | 神华集团有限责任公司、神华国能集团有限公司、四川白马循环流化床示范电站有限责任公司 | 肖创英、姚一平、王蜀湘、白继亮、杨海瑞、陶世健、谢泽良、邹利强、邱建能、杨杰 | 有效 |
| 发明专利 | 裤衩腿结构的流化床锅炉一次风调节方法 | 中国 | ZL200910088898.1 | 2009-07-21 | 751946 | 清华大学 | 杨海瑞,张攀,刘建民,张海,黄宣 | 有效 |
| 发明专利 | 一种循环流化床锅炉 | 中国 | ZL201310340922.2 | 2015-11-11 | 1834928 | 东方电气集团东方锅炉股份有限公司 | 宋刚,龚留升,郭强,冉燊铭,汪小继,吴朝刚 | 有效 |
| 发明专利 | 有效控制外置换热器物料倒流的布风装置 | 中国 | ZL201310349882.8 | 2015-09-23 | 1800084 | 东方电气集团东方锅炉股份有限公司 | 宋刚,郭强,周棋,孟庆松,林山虎,聂立,苏虎,郑兴胜,杨虎,黄敏,周旭 | 有效 |
| 发明专利 | 循环流化床锅炉炉膛圈状悬吊换热屏 | 中国 | ZL201310142880.1 | 2015-11-18 | 1841830 | 浙江大学 | 程乐鸣,王勤辉,方梦祥,余春江,施正伦,肖钢,王涛,周劲松,王树荣,高翔,骆仲泱,倪明江,岑可法 | 有效 |
| 发明专利 | 一种石灰石粉仓 | 中国 | ZL201110080688.5 | 2013-01-23 | 1127961 | 西南电力设计院 | 王仕能,陈卫国,许华,申克,易礼容,秦学,万屹,党楠 | 有效 |
| 发明专利 | 循环流化床锅炉炉墙耐火混凝土浇筑结构及浇筑方法 | 中国 | ZL201010557141.5 | 2013-06-10 | 1235466 | 四川电力建设三公司 | 李俊、杨清茂、黄德学 | 有效 |
| 软件著作权 | 60万超临界循环流化床电站仿真系统 | 中国 | 2013SR051674 | 2010-10-30 | 567435 | 四川白马循环流化床示范电站有限责任公司 | 四川白马循环流化床示范电站有限责任公司 | 有效 |

主要完成人情况：

吕俊复，排名 1，教授，工作单位：清华大学，完成单位：清华大学，项目技术总负责人，主持了 863、科技支撑计划中超临界 CFB 锅炉关键技术研究，对《主要科技创新》所列创新点 1、2、3 有创造性贡献：包括 CFB 锅炉超高炉膛流动特性、水冷壁热负荷分布规律、性能计算方法、水冷壁技术、滚筒冷渣机传热、安全运行技术等系列原始创新。

徐鹏，排名 2，董事长，高级工程师，工作单位：东方电气集团东方锅炉股份有限公司，完成单位：东方电气集团东方锅炉股份有限公司，白马 600MW 超临界循环流化床锅炉研制负责人，对《主要科技创新》所列创新点 1、2、3 有创造性贡献：确定了 600MW 超临界循环流化床锅炉的开发方向，主持了白马 600MW 超临界循环流化床锅炉的设计、制造，为超临界循环流化床锅炉的启动调试提供指导。

肖创英，排名 3，董事长，教授级高级工程师，工作单位：中国神华能源股份有限公司国华电力分公司，完成单位：神华国能集团有限公司，主持 600MW 超临界 CFB 锅炉运行技术研发和性能完善，对《主要科技创新》所列创新点 1、2、3 有创造性贡献：组织超临界 CFB 锅炉技术方案讨论决策，确定超临界 CFB 锅炉总体调试方案及运行优化技术方案，解决了运行过程中的重大问题。

胡昌华，排名 4，主任，教授级高级工程师，工作单位：四川白马循环流化床示范电站有限责任公司，完成单位：四川白马循环流化床示范电站有限责任公司，600MW 超临界 CFB 示范工程建设总负责人，对《主要科技创新》所列创新点 1、2、3 有创造性贡献：主持了 600MW 超临界 CFB 锅炉工程技术研究和示范工程建设，包括系统集成、辅机开发、调试运行等。

聂立，排名 5，主任，教授级高级工程师，工作单位：东方电气集团东方锅炉股份有限公司，完成单位：东方电气集团东方锅炉股份有限公司，白马 600MW 超临界循环流化床锅炉研制的技术负责人，对《主要科技创新》所列创新点 1、2、3 有创造性贡献：确定了锅炉研发总体方案，组织了施工设计，领导并参与了锅炉运行、调试。

苏虎，排名 6，副部长，教授级高级工程师，工作单位：东方电气集团东方锅炉股份有限公司，完成单位：东方电气集团东方锅炉股份有限公司，全程负责锅炉性能设计、总体布置、技术设计、施工设计、性能测试、性能完善及技术推广，对《主要科技创新》所列创新点 2、3 有突出贡献。

马怀新，排名 7，组长，教授级高级工程师，工作单位：四川白马循环流化床示范电站有限责任公司，完成单位：四川白马循环流化床示范电站有限责任公司，国家发展和改革委员会自主研发超临界 600MW 循环流化床锅炉专家组组长，负责组织项目可行性论证，主持总体方案的制定和论证，组织对项目科研、设计、制造、建设过程中的重大问题进行研讨，对《主要科技创新》所列创新点 2、3 有突出贡献。

陈英，排名 8，总工程师，教授级高级工程师，工作单位：神华国能集团有限公司，完成单位：神华国能集团有限公司，组织锅炉控制技术、关键辅机的攻关，主持关键技术方案的确定，协调解决项目科研、设计、制造、建设和运行过程中的重大问题，主持确定调试、运行优化的方案实施，对《主要科技创新》所列创新点 1、3 有突出贡献。

刘吉臻，排名 9，教授、院士，工作单位：华北电力大学，完成单位：华北电力大学，提出了即燃碳的概念和软测量方法，用于示范工程的控制系统，解决了 CFB 热惯性大的问题，实现了汽温的精准控制和负荷自动调节，对《主要科技创新》所列创新点 3 有重要贡献。

杨海瑞，排名 10，教授，工作单位：清华大学，完成单位：清华大学，超临界 CFB 锅炉关键技术的主要完成人之一，发现了超高炉膛物料浓度纵向分布规律，揭示了双布风板两侧床压的平衡机制，提出了 CFB 的物料平衡机制及控制措施，创新了滚筒冷渣机的传热计算方法和模块化结构，对《主要技术创新点》所列创新点 1、2、3 有突出贡献。

胡修奎，排名 11，总经理，高级工程师，工作单位：东方电气集团东方锅炉股份有限公司，完成单位：东方电气集团东方锅炉股份有限公司，主持白马 600MW 超临界循环流化床锅炉设

计,参与白马项目设计方案讨论,组织创新结构的生产工艺开发,对负荷统计、水冷壁内径、外置床的结构优化、钢构架布置等技术问题进行决策,对创新点 1、2 有重要贡献。

郑兴胜,排名 12,高级工程师,工作单位:东方电气集团东方锅炉股份有限公司,完成单位:东方电气集团东方锅炉股份有限公司,主持白马 600MW 超临界循环流化床锅炉启动和研究测试,并对锅炉结构完善优化提供建议,对创新点 2、3 有重要贡献。

李星华,排名 13,总经理,高级工程师,工作单位:四川白马循环流化床示范电站有限责任公司,完成单位:四川白马循环流化床示范电站有限责任公司,主持 600MW 超临界循环流化床发电机组运行技术的研究,负责 600MW 循环流化床锅炉运行、检修技术标准的编制,参与开发 600MW 超临界循环流化床机组关键部件和过程的实时动态数学模型,组织实施了超临界循环流化床锅炉仿真平台的研发,对创新点 1、3 有重要贡献。

杨冬,排名 14,教授,工作单位:西安交通大学,完成单位:西安交通大学,实验获得了低质量流速垂直光管与内螺纹管内水换热与流动特性、传热恶化的判断准则及安全运行界限,提出了低热流密度下的水冷壁设计技术,开发了基于流动网络系统的超临界循环流化床水动力计算及壁温安全分析软件,并对水冷壁水动力进行核算,对创新点 1、2 有重要贡献。

岳光溪,排名 15,教授、院士,工作单位:清华大学,完成单位:清华大学,国家发展和改革委员会“自主研发超临界 600MW 循环流化床锅炉”专家组副组长、科技部“600MW 超临界循环流化床”专家组组长,超临界 CFB 的最早倡导者,对 600MW 超临界循环流化床发电示范工程项目的一些关键技术进行研发,对创新点 1~3 均有重要贡献。

主要完成单位及创新推广贡献:

清华大学(排名 1):主持 600MW 超临界循环流化床锅炉关键技术和关键部件研究开发,是国家科技部 863 计划(2002-2005)“超临界循环流化床”和国家科技支撑计划(2006-2011)“超临界循环流化床”项目的牵头单位,是 600MW 超临界循环流化床锅炉关键技术的主要完成单位。完成了超临界循环流化床锅炉技术可行性研究、超高炉膛物料浓度纵向分布和超大床面物料浓度横向分布规律、双布风板两侧床压的平衡机制和多循环回路并联流动非均匀性机理及控制方法、CFB 锅炉局部换热系数半经验计算方法、水冷壁热流密度分布模型、低热流密度下超临界水在光管和内螺纹管内的临界质量流速、快速床条件下床质量对 NO_x 生成量的影响规律、循环灰对喷氨脱硝的催化作用、超临界 CFB 锅炉整体布置技术和性能计算方法、超高炉膛超大床面和锅-炉传热耦合关系、滚筒冷渣机的传热计算模型与结构实现、超临界 CFB 锅炉负荷控制的物理基础与控制核心因素、超临界 CFB 整体动态模型与仿真、安全运行等关键技术的系列原始创新,对该项目做出创造性贡献。

东方电气集团东方锅炉股份有限公司(排名 2):600MW 超临界循环流化床锅炉研制的主体单位,在研制中进行了大量的科研攻关,掌握了超高炉膛中物料浓度分布规律双布风板床压不稳定规律、多回路并联流动非均匀性机理及控制方法,重点解决了超大容量循环流化床锅炉的总体布置问题、各运行工况的水动力安全性和热力系统先进性问题、6 个非对称布置汽冷旋风分离器均匀性问题、关键部件的结构设计及制造等问题,以确保锅炉安全可靠、经济稳定地运行。首台项目的成功投运,奠定了东方锅炉在循环流化床技术领域的世界领先地位。项目的研究成果,不仅为 660MW-1000MW 超临界 CFB 锅炉研发提供技术基础,也应用于 350MW 等级的超临界 CFB 锅炉。目前,已获得 660MW 超临界 CFB 锅炉 2 台订单、350MW 等级的超临界 CFB 锅炉已取得批量订单,还有一些出口海外的项目正在进行中,对该项目的推广、走向国际做出了突出贡献。

神华集团有限责任公司(排名 3):联合清华大学、东方锅炉等单位开展了超临界 CFB 锅炉的技术可行性研究和方案设计研究等前期攻关,负责 600MW 超临界循环流化床锅炉关键技术研究开发的整体组织、工程技术研究开发和系统集成、示范工程项目建设、核心技术参数的验证、锅炉调试和运行技术等,在系统设计和系统集成、工程技术研究、主要辅机设备的开发组织、控制策略研究和优化、运行控制技术和优化等方面组织攻克技术难题,取得了系列科技成果,成功实现了 CFB 发电技术从 300MW 亚临界向 600MW 超临界发展的跨越,带动了行

业技术进步，为劣质煤有效利用提供了途径，使我国大型 CFB 设计、制造、运行技术处于世界领先水平，并积极推进推广应用，为促进我国超临界 CFB 技术发展做出重大贡献。

华北电力大学(排名 4)：承担了 600MW 超临界循环流化床 (CFB) 机组自动控制系统的锅炉动态模型分析及燃烧优化的工作。基于机理分析与运行数据的复合建模方法，进行 600MW 超临界 CFB 机组非线性控制模型建模；基于 600MW 超临界 CFB 机组控制策略优化研究，提出机组节能优化与减少污染物排放的控制理论与实现技术；基于循环流化床锅炉的燃烧特性分析，建立了即燃碳量计算模型、动态热量计算模型、床温模型、氧量预测模型，提出了基于即燃碳量的风煤优化配比模型，对模型进行仿真和验证；建立活性石灰石计算模型，SO₂ 预测模型，提出了基于活性石灰石的钙硫优化配比模型，对模型进行仿真和验证，应用于控制系统。对该项目示范工程的控制系统开发和运行做出了重要贡献。

中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司(排名 5)：科学论证并拟定 600MW 超临界循环流化床锅炉热力系统、烟风系统、全新超大出力石灰石制备系统及紧急补水系统，创造性建立了 600MW 超临界循环流化床锅炉发电系统集成技术，研究开发了 600MW 超临界 CFB 锅炉机组的辅机选型技术，参与拟定锅炉控制策略，创新了紧凑型主厂房，完成了 600MW 超临界循环流化床锅炉发电示范工程设计，主要技术指标和排放实际运行值符合设计期望值。

四川白马循环流化床示范电站有限责任公司(排名 6)：600MW 超临界 CFB 锅炉示范工程业主单位，负责 600MW 超临界循环流化床锅炉工程技术研究开发和系统集成、示范工程项目建设、调试运行等。组织对锅炉方案的论证，确定锅炉总体布置设计方案；通过实炉实验，经多方对比，确定锅炉核心技术参数；针对超临界循环流化床锅炉工程项目特点，组织开发锅炉系统设计和系统集成、工程技术研究、主要辅机设备的研发、控制策略研究和优化、调试运行技术和优化等；并将相关研究成果推广应用到神华神东电力河曲电厂超临界循环流化床锅炉等项目，对该项目科技创新和推广应用做出了重大贡献。

浙江大学(排名 7)：建立了大型超临界循环流化床锅炉二次风设计原则，解决了大型超临界循环流化床锅炉设计过程中二次风配置的相关问题，提供 600MW 超临界循环流化床锅炉二次风设计的工程方案。进行了超临界循环流化床锅炉炉膛热力计算方法和循环流化床锅炉过/再热器壁温计算方法研究，编制完成循环流化床锅炉过/再热器壁温计算软件和循环流化床锅炉炉膛计算程序，进行了 600MW 超临界循环流化床锅炉炉膛热力计算和 600MW 超临界循环流化床锅炉方案设计研究和循环流化床锅炉烟风阻力计算导则研究。

神华国能集团有限公司(排名 8)：神华国能集团作为四川白马 600MW 超临界循环流化床锅炉机组工程项目管理单位，在工程建设过程中，负责重要技术研究课题的组织及决策，在系统集成、关键技术研究、控制策略研究和优化、运行控制技术和优化等方面进行了大量工作。四川白马 600MW 超临界循环流化床锅炉机组项目的成功投运，不仅成功实现了我国 CFB 发电技术从 300MW CFB 向 600MW 等级以上的大型 CFB 锅炉发展的跨越，并将相关研究成果推广应用到神华神东电力河曲电厂超临界循环流化床锅炉等项目，对该项目科技创新和推广应用做出了重大贡献。

四川电力建设三公司(排名 9)：针对循环流化床锅炉的特点，创新了大量施工工艺、施工技术，成功解决了世界最大的双腿布置的等压风室安装找正、最大受热面式旋风分离器、外置床安装技术、中隔屏施工技术及耐火材料交叉施工等难题，形成了 600MW 超临界循环流化床锅炉安装技术。对示范工程的建设做出了贡献。

中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司，排名 10：针对 600MW 超临界 CFB 锅炉的研制需要，系统的研究了大型换热床技术，在冷、热态试验研究的基础上，研究提出了气动式换热床技术方案；在 210MW 及 330MW CFB 锅炉上，研究了 CFB 锅炉大型换热床的分流特性、调节特性、壁温特性，取得了大量的工程技术数据，为 600MW 超临界 CFB 锅炉换热床的设计提供了重要技术支撑；研究了 CFB 锅炉大型换热床的传热过程，提出了包括循环灰中碳燃烧过程的换热床热力计算方法；通过对换热床及控制系统的研究开发，形成了 600MW 超临界 CFB 锅炉换热床和控制系统的技术方案。

完成人合作关系说明：

项目完成人之间的合作关系是围绕项目建立的各个单位的合作关系而形成的。

《600MW超临界循环流化床锅炉技术开发、研制与工程示范》项目是由(1)清华大学、(2)东方电气集团东方锅炉股份有限公司、(3)神华集团有限责任公司、(4)华北电力大学、(5)中国电力工程顾问集团西南电力设计院、(6)四川白马循环流化床示范电站有限责任公司、(7)浙江大学、(8)神华国能集团有限公司、(9)四川电力建设三公司、(10)中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司等二十多家单位共同完成的，限于名额的限制，报奖材料中只列出了10个主要完成单位和15个主要完成人。

(1)清华大学是国家科技支撑计划项目中关键技术和关键部件课题的承担单位和主要完成单位；(2)东方电气集团东方锅炉股份有限公司是示范工程锅炉的研制单位，也是国家科技支撑计划的参加单位；(3)神华集团有限责任公司是项目的示范工程承担单位；(4)华北电力大学是示范工程控制系统的参加单位和控制策略的主要完成单位；(5)中国电力工程顾问集团西南电力设计院示范工程设计单位，也是国家科技支撑计划的参加单位中国电力工程顾问集团的下属单位；(6)四川白马循环流化床示范电站有限责任公司示范工程业主单位；(7)浙江大学、(10)中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司；(8)神华国能集团有限公司是示范工程项目管理单位和上级单位；(9)四川电力建设三公司是示范工程的建设单位。

通过完成单位之间的项目合作，项目完成人通力配合，合作攻关：聂立、苏虎共同申请并获得发明专利“循环流化床锅炉”；吕俊复、杨海瑞、吴玉新共同申请并获得发明专利“一种三旋风分离器的循环流化床锅炉炉膛结构”；聂立、苏虎、郑兴胜共同申请并获得发明专利“有效控制外置换热器物料倒流的布风装置循”；岳光溪、吕俊复、徐鹏、胡修奎、陈英合著论文“循环流化床燃烧发展现状及前景分析”；肖创英、杨海瑞共同申请并获得发明专利“循环流化床锅炉的脱硫系统”；吕俊复、徐鹏、胡昌华、肖创英、聂立、苏虎、马怀新、杨海瑞、刘吉臻、陈英、胡修奎、郑兴胜、李星华、杨冬、岳光溪等共同完成科技成果《600MW超临界循环流化床锅炉关键技术研究与应用》、《600MW超临界循环流化床锅炉研制》《600MW超临界循环流化床锅炉技术开发与工程示范》2015年分别获得教育部高等学校科技进步一等奖、中国电力科学技术一等奖、中国机械工业科技进步一等奖；岳光溪、杨海瑞、聂立合著论文“Hydrodynamics of 300MWe and 600MWe CFB boilers with asymmetric cyclone layout”；岳光溪、吕俊复、杨海瑞、聂立、苏虎合著论文“Development and demonstration of the 600 MW supercritical CFB boiler in Baima Power Plant”；吕俊复、杨海瑞、杨冬共同立项“600MW超临界循环流化床锅炉关键部件与关键技术研究”；吕俊复、肖创英、胡昌华、陈英、李星华共同立项“600MW超临界循环流化床机组安全、经济运行关键技术的基础研究”；吕俊复、徐鹏、聂立、苏虎、杨海瑞、吴玉新、岳光溪共同立项“宝利华电厂300MW CFB锅炉炉膛热流密度测试”。