

# “燃煤机组灵活性技术”专题

## 客座主编致读者

双碳背景下，风能、太阳能等缺乏调节能力的新能源大幅并网消纳，电网灵活性资源紧缺。煤电是我国当前最经济且具备大规模深度调峰能力的灵活性资源，是电网稳定的“调节剂”与“压舱石”。2022年国家能源局印发《“十四五”现代能源体系规划》明确“要大力推动煤电灵活性改造”，在新型电力系统大背景下，大幅提升煤电灵活性是推动碳达峰碳中和的关键举措，在相当长一段时间内，是燃煤机组科技创新的主要方向。

燃煤机组宽负荷快速灵活调峰在基础研究和技术开发上仍面临严峻挑战。“十三五”国家启动“三改联动”以来，燃煤机组灵活性改造取得显著进展，但满足“新一代燃煤机组技术指标”的机组快速灵活性能力仍不足，尚有不少机组达不到深度调峰的低负荷稳定运行要求，绝大部分机组升降负荷的变负荷速率仅为1.5%Pe/min，个别机组顶峰能力不佳，参与启停调峰机组的快速启停能力亟待提高。因此，国家科技部于“十四五”重点研发计划项目“煤炭专项”布局了4个燃煤机组灵活性理论与技术专题项目，重点对燃煤机组灵活性技术的原创前沿超前技术、超（超）临界燃煤机组灵活性关键技术、亚临界燃煤机组灵活性技术、燃煤流化床锅炉灵活性关键技术等开展科学研究和工程示范。基于项目前期研究提出提升燃煤机组灵活性发展趋势与解决方案：① 创新锅炉灵活供粉、稳定燃烧与水动力安全协同技术，提升机组的灵活性执行能力。② 探寻满足2.5%Pe/min及以上变负荷速率的AGC（自动发电控制）技术、全工况智能自动巡航、自适应、自调节的灵活控制技术。③ 研发机-炉-电-辅机时空动态安全匹配技术，提升机组全工况灵活运行的安全保障能力。④ 开发全工况经济性评估方法及高效/灵活协同提升技术，形成燃煤机组宽负荷快速灵活调峰技术体系，实现机组灵活、安全、高效、环保协同运行。

应《洁净煤技术》编辑部邀请，我们组织了“燃煤机组灵活性技术”专题，本专题是4个国家重点研发计划等的阶段性成果。专题收到论文30余篇，经同行专家评审，收录了来自华中科技大学、西安交通大学、东南大学、中国矿业大学、华北电力大学、山西大学等高校，东方电气集团东方锅炉股份有限公司、国能南京电力试验研究有限公司、烟台龙源电力技术股份有限公司等企业、科研机构的14篇研究论文。

1）煤粉锅炉深度调峰方向：西安交通大学杨冬等研究了350 MW超临界锅炉低负荷深度调峰水动力特性，建立了求解超临界锅炉水动力特性的非线性计算模型，为深度调峰锅炉水冷壁水动力安全特性评估提供基础；西安交通大学王学斌等发展了一种高浓度煤粉预燃式强稳燃低氮燃烧器，并开展了煤粉预气化强稳燃的快速调峰燃烧器5 MW中试试验，研究了燃烧器的极限稳燃负荷与快速变负荷能力，为深度调峰锅炉低负荷稳燃提供了一种新思路和新技术；烟台龙源电力技术股份有限公司李明等介绍了等离子体点火技术在高水分褐煤机组深度调峰低负荷稳燃的工业应用。

2) 流化床锅炉深度调峰方向：烟台龙源电力技术股份有限公司王家兴等研究了烟气再循环对350 MW CFB锅炉深度调峰运行特性影响，解决超临界CFB锅炉超低负荷时流化安全性及NO<sub>x</sub>超低排放问题；山西大学杨凤玲等以亚临界循环流化床锅炉（CFB）焖炉压火方式参与近零深度调峰为基础，建立一套近零深度调峰蓄释热量的计算方法，为流化床锅炉深度调峰提供指导；华北电力大学张鹏新等建立循环流化床锅炉深度调峰NO<sub>x</sub>排放浓度混合预测模型，为循环流化床锅炉灵活性设计与运行提供参考。

3) 快速变负荷与调频方向：国家能源集团科学技术研究院有限公司王圣等研究了计及电池寿命的储能系统参与二次调频功率分配策略，建立了储能锂电池的数学模型，重点分析了不同类型的储能功率分配策略对系统调频性能、电池寿命以及经济性的影响；华北电力大学王唯铎等针对一台350 MW热电联产循环流化床机组负荷响应特性开展研究，提出一种超临界CFB供热机组汽水侧和热网蓄热的定量计算方法，提升热电联产循环流化床机组快速变负荷能力；烟台龙源电力技术股份有限公司刘平等开展超小断面切圆锅炉宽煤种适应性研究，通过技术改造提升锅炉灵活性运行中对复杂煤种掺烧的适应性。

4) 灵活性控制方向：中国矿业大学周怀春等提出用电煤比-发电量与燃料量的比值来计算机组运行经济性，形成风煤比、水煤比、电煤比全部以单位燃料量为基准来计量的燃煤机组主要概念体系；国能南京电力试验研究有限公司陈刚等针对燃煤锅炉磨煤机出口风粉温度控制大延迟、多干扰问题，设计了抗扰动型Smith预估补偿控制器，提升磨煤机风粉温度控制性能；东方电气集团东方锅炉股份有限公司刘一等针对灵活性下高温受热面壁温安全性问题，开发了一套高温受热面壁温智能调节系统，应用效果良好。

5) 灵活性标准体系方向：构建完善的燃煤发电灵活性标准体系是推动燃煤火力发电灵活性发展的关键环节，华中科技大学韩亨达等分析了当下火力燃煤发电灵活性改造建设面临的4个主要挑战，初步构建了综合考虑目标、专业门类和功能序列的燃煤发电灵活性标准体系框架。

由于篇幅所限，本期“燃煤机组灵活性技术”专题在“灵活性下的安全保障技术”和“灵活性下的经济性提升技术”方向，还没有充分介绍相关研究进展，期待未来在这些方面有更多的理论和技术探讨。

值此专题刊出之际，我们谨代表编辑部由衷感谢各位学者对煤电灵活性的深入研究和科学实践，对同行专家的认真评审表示真诚谢意。

向孝 黄中 江一 王学斌

2024年9月



**向 军** 教授  
华中科技大学

向军，华中科技大学能源与动力工程学院教授，博士生导师，教育部新世纪优秀人才计划入选者，煤燃烧与低碳利用全国重点实验室副主任，卓越华中学者。主要从事燃烧理论与污染物控制、灵活智能发电、超临界CO<sub>2</sub>动力循环、新能源等研究。主持国家重点研发计划项目和课题2项，国家自然科学基金重点和面上项目7项，国防重大项目、国家“863”计划、教育部科学研究重大项目等项目或课题20余项，完成企业委托研究课题50余项。发表学术论文700余篇，其中SCI论文350篇，SCI核心库引用10000余次，个人H指数58；出版学术专著/教材7部；授权发明专利110项，其中美国等国际发明专利7项；邀请报告或大会报告20余次。获国家、省部、国际科技奖励12项，含国家科技进步二等奖2项（排名1和2）、省部级一等奖2项（均排名1）；第三届亚太燃烧 Young Investigators Award。



**黄 中** 研究员  
清华大学

黄中，工学博士，现任清华大学能源与动力工程系研究员，主要从事循环流化床燃烧及污染物控制研究工作。主持国家重点研发计划项目、北京市杰出青年科学基金项目等国家、地方及企业重点项目90余项，研究成果获得茅以升北京青年科技奖、北京市优秀青年人才、北京优秀青年工程师标兵、北京市科学技术奖、中国电力科学技术奖、中国技术市场金桥奖、杰出工程师青年奖等省部级科技奖10余项，出版学术专著5部、制（修）订行业标准20项，在国内外期刊及会议发表学术论文150余篇，授权专利80余项。



**汪 一** 教授  
华中科技大学

汪一，华中科技大学能源与动力工程学院，煤燃烧与低碳利用全国重点实验室，教授，博导。国家优青、国家重点研发计划青年首席科学家，湖北省“杰出青年”、“楚天学者”。主要从事碳基燃料热化学反应机理及锅炉灵活性提升理论与技术相关工作。近五年，主持国家自然科学基金项目3项，国家重点研发计划项目、课题/子课题3项。第一/通讯作者发表SCI论文80余篇，含ESI高引5篇，个人H因子60（Scopus）。以第一发明人授权发明专利20余项。出版译著1部，主编教材1部。2022、2023年连续入选全球前2%顶尖科学家榜单（美国斯坦福大学与Elsevier联合发布），作为主要完成人获得国家科技进步二等奖、湖北省科技进步一等奖、中国电力建设科技进步一等奖。



**王学斌** 教授  
西安交通大学

王学斌，西安交通大学能源与动力工程学院，教授/博士生导师，陕西省杰出青年基金获得者，西安交通大学青年拔尖人才(A类)，国家重点研发计划青年科学家项目负责人，美国加州大学伯克利分校联合培养博士、美国圣路易斯华盛顿大学博士后。研究方向为清洁低碳燃烧与有机固废资源化处置，以第一/通讯作者发表高水平期刊论文100余篇，ESI高被引论文5篇，2021—2023年连续入选2%全球顶尖年度科学家榜单，授权发明专利20余项，主持国家和省部级课题20余项，获得省部级科技奖励和荣誉5项。担任Frontiers in Energy Research期刊Associate Editor、《洁净煤技术》编委、《煤炭学报》青年编委、中国工程院院刊Engineering青年通讯专家。