

# “燃煤电厂深度调峰技术”专题

## 客座主编致读者

在我国“双碳”宏伟目标的指引下，近年来，以风电、光伏发电为代表的能源发展成果显著，装机规模高速增长。截至2023年第一季度末，我国风电和光伏发电装机容量分别达到3.76亿和4.25亿kW，发电容量占比也从十年前的5.5%和不足1%跃升至如今的14.4%和16.2%。与此同时，随着新能源机组在电力系统中的占比不断提高，其出力的间歇性、波动性和不可预测性，导致电网安全稳定运行和电能质量保障所面临的挑战更加严峻。

基于此，为实现源荷间的动态平衡，确保电网平稳运行，同时降低弃风弃光率、促进新能源消纳，国家发展改革委和国家能源局早在2016年印发的《电力发展“十三五”规划（2016—2020年）》中就强调应“增强调峰能力建设，全面推动煤电机组灵活性改造，‘十三五’期间新增调峰能力4 600万kW”，并在《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》中重申“存量煤电机组灵活性改造应改尽改，‘十四五’期间完成2亿kW，增加系统调节能力3 000万~4 000万kW”。可见，加大对火电机组深度调峰、启停调峰补偿力度，激励引导火电机组开展灵活性改造将对我国电力系统的转型起到重要的支撑作用。

煤电机组的灵活性改造旨在提高机组变负荷的深度性和快速性，即可实现超低负荷运行（深度调峰）以及电网负荷指令响应迅速（快速变负荷）。然而，达成上述目标仍需克服稳定流化/燃烧、水动力安全、污染物控制、机炉耦合和材料疲劳等一系列困难。为加快形成针对性的优化措施、有效增强机组的灵活运行能力，应《洁净煤技术》编辑部邀请，我们策划组织了“燃煤电厂深度调峰技术”专题，总结报道了该领域的研究成果和前瞻性思考，分析探讨了潜在的快速变负荷技术，以期为业内同行指明未来发展方向。本专题内容涵盖深度调峰/变负荷下锅炉的运行特性、炉侧和水侧快速变负荷技术等内容，汇集了清华大学、西安交通大学、重庆大学、华北电力大学和山西大学等多家单位的最新研究成果。

（1）锅炉运行特性方面：在着火稳定性上，山西大学闫高程团队通过一维炉内的煤粉气流点火试验，系统探究了氧气浓度、一次风速和煤粉浓度对气流着火距离的作用机制，发现氧气浓度和一次风速对着火距离的影响更显著，并最终拟合得到了预测煤粉着火距离的数学模型。在水动力安全上，西安交通大学杨冬团队对20°倾角的倾斜光管内出现的流动不稳定性现象开展分析，总结对比了3种脉动特性，并获得了低压力参数下质量流速、入口过冷度和上游可压缩容积等对沸腾起始点脉动和密度波型脉动的影响规律。结果表明，只有受热管的热流密度远低于临界热流密度，质量流速远高于临界质量流速时，才可保证受热管内工质流动的稳定性。而在水侧参数的动态响应上，重庆大学卢啸风团队和华北电力大学陈衡团队均基于工业尺寸的循环流化床锅炉，深入研究了锅炉深度调峰和变负荷运行时蒸汽参数的反馈特性，并据此提出了稳定出口蒸汽参数的结构改造和运行优化技术方案。对于污染物排放特性，华北电力大学高明明团队则借助所构建的即燃碳模型、NO<sub>x</sub>炉内自生成和还原模型及选择性非催化还原脱硝模型，较准确预测了深度调峰和变负荷运行过程中锅炉的NO<sub>x</sub>排放浓度，为后续开展超低排放研究提供借鉴。

（2）炉侧快速变负荷技术方面：清华大学杨海瑞团队全面分析了制约循环流化床锅炉变负荷速率的关键因素，即流动惯性、传热惯性、燃烧惯性和水动力安全性等。基于此对可行的炉侧

快速变负荷技术路线进行总结探讨，并尝试给出宽负荷灵活运行循环流化床锅炉机组整体设计思路，以期为实际工业应用打下坚实基础。

(3) 水侧快速变负荷技术方面：山西大学杨凤玲团队全面梳理了锅炉水侧快速变负荷技术的发展历程和研究进展，比较了凝结水节流、供热抽汽调节、回热抽汽调节、给水旁路调节和先行能量平衡策略等多种路线，发现凝结水节流和供热抽汽调节技术应用较广泛，且在变负荷初期对提高机组负荷响应能力有明显作用。

值此专题刊出之际，我们谨代表编辑部对众多专家学者的踊跃投稿表示真诚的谢意，同时感谢同行们对稿件耐心细致的审阅和提出的真知灼见。希望本专题能够强化读者对燃煤电厂深度调峰技术的关注和了解，引起业内思维的碰撞，助力煤电行业健康良性发展。

杨海瑞 杨冬 刘欢鹏

2023年6月

## 客座主编



杨海瑞 教授

清华大学 能源与动力工程系

杨海瑞，清华大学能源与动力工程系教授，IEA-FBC国际能源署流态化转化执委会中国代表，国际循环流化床（CFB）技术会议执委会委员，国际流化床转化（FBC）技术会议执委会委员。主要从事煤的清洁燃烧与污染物控制方面的研究，在循环流化床锅炉燃烧理论及应用领域获得国家科技进步奖2项，省部级科技进步一等奖4项，国际流态化最佳论文3项，2017年作为主要完成人，研究成果“600 MW超临界循环流化床锅炉技术开发、研制与工程示范”获国家科技进步一等奖。入选2011年教育部新世纪优秀人才支持计划。发表论文300余篇，其中SCI收录100余篇；授权发明专利40余项。



杨冬 教授

西安交通大学 能源与动力学院

杨冬，西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室教授，博士生导师。主持国家自然科学基金、“十三五”国家重点研发计划子课题、“十二五”国家科技支撑计划子课题、“十二五”中国科学院战略性先导科技项目专项研究课题、“十一五”国家科技支撑计划子课题、国家“十五”863二级子课题、国家“十五”科技攻关专题等纵向课题10余项。主持企业委托横向课题30余项。发表学术论文200余篇，其中SCI、Ei收录100余篇，作为第一作者发表论文50余篇。申请并获得国家专利、软件著作权20余项。



刘欢鹏 教授

哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院

刘欢鹏，哈尔滨工业大学能源科学与工程学院燃煤污染物减排国家工程实验室教授，博士生导师。主要从事燃烧、热解、气化过程的模拟与仿真、气-固两相流态化特性、吸附式储氢技术、生物质燃烧技术等方面研究工作。曾主持及参与国家自然科学基金、国家重点研发计划、科技支撑计划子课题等国家级科研项目以及企业合作科研项目40余项。在*Chemical Engineering Journal*、*Bioresource Technology*等国际著名期刊发表SCI论文40余篇，授权发明专利6项，出版教材1部，获省部级二等奖2项。