

高端动力 自主为先

——记东方汽轮机有限公司长寿命高温材料国家重点实验室

东方汽轮机有限公司于2008年正式立项开始F级50 MW燃机自主开发。2009年承担了国家能源局大型清洁能源技术研究中心“高温部件实验室”的建设，组建团队开展燃机高温合金叶片精铸工艺的研发。建设了高温材料国家重点实验室和四川省院士专家工作站，坚持“产学研用”协同创新模式，引进了多位院士（涂铭旌、柳百成、翁宇庆、周克崧）和专家（马

德新等），与国内相关高校、科研院所建立了广泛的联系。

实验室有三个研究方向：长寿命高温材料开发与应用、重型燃机叶片精确成形技术、大尺寸高温部件服役性能及可靠性评价。叶片精确成形技术团队共40人，其中技术人员17人，博士3人，教授级高工3名，高工5人，工程师12人，团队成员平均年龄35岁。



实验室第一届学术委员会委员

团队带头人

杨功显，教授级高工，博士，长期从事发电设备材料研究工作，四川省科学技术带头人后备人选，享受国务院政府特殊津贴，中国金属学会高温材料分会理事，中国机械工程学会热处理分会理事，四川省机械工程学会理化检验分会副理事长，第五届电力行业电站金属材料标准化技术委员会委员，科技部、基金委人才引进计划评审专家。现任长寿命高温材料国家重点实验室主任，东方汽轮机有限公司副总工程师、燃机发展中心副总设计师，是东方电气集团第二届有突出贡献的优秀专家。

主持和参与了多项国家、省部级项目：主持能源局《700℃超超临界机组汽轮机转子锻件研制》项目、工信部强基工程《重型燃气轮机耐高温叶片精密铸造及陶瓷涂层工艺》项目；主持完成了国家“863”计划

《超超临界汽轮机（600℃）关键技术开发》项目；参与主持国家科技支撑计划《核电焊接转子的开发》项目、《大型先进压水堆核电站重大专项-核电站凝汽器用钛材研制及应用研究》项目，参加国家“973”计划《先进重型燃气轮机制造基础研究》项目等。先后获部级科技进步奖2次、东方集团和德阳市科技进步一、二、三等奖8次和工厂科技进步奖多次，获国家发明专利授权17项，发表论文20余篇。

所获省、部级科技进步奖包括：汽轮机用钢系列化和性能补充试验，机械部科技进步二等奖；超超临界机组转子材料性能研究，四川省科技进步二等奖；12Cr转子轴颈耐磨层焊接及性能评定技术研究，东方电气集团科技进步二等奖；1000 MW核电汽轮机低压焊接转子的制造技术研究，东方电气集团科技进步一等奖。

主要研究方向及进展

(1) F级以上重型燃机动叶片用单晶高温合金研究。实验室于2013年开展了F级以上重型燃机动叶片用单晶高温合金研究,已开发出两种单晶材料DF1、DF2,获得了两种合金的室温及高温力学性能、高低周疲劳性能、冷热疲劳性能,完成了950℃下带涂层及未带涂层试样的抗热腐蚀性性能研究,目前正在进行2 000 h、5 000 h长时效组织观察及性能研究。两种合金的高温力学性能和已获得的持久蠕变性能均优于PWA1483合金。

(2) 燃机用大尺寸等轴晶叶片精铸工艺研发。通过多年的工艺研发,实验室已掌握了大尺寸等轴晶叶片精铸工艺关键技术,解决了缩松、夹杂、尺寸变形等缺陷。2018年完成了公司自主研发的首台套50 MW重型燃机4级动、静叶片共522只叶片的配套生产,形成了具有自主知识产权的透平叶片制备工艺规范和验收标准。

(3) 燃机用大尺寸定向柱晶叶片、单晶叶片精铸工艺研发。实验室在研制等轴晶叶片的同时,也开展了定向柱晶叶片和单晶叶片制造技术研发。研究了定向凝固用陶瓷型芯和陶瓷型壳制备工艺,试验对比分析了不同的合金、抽拉工艺、浇注温度、型壳温度等对定向凝固过程的影响,研究了雀斑、杂晶、偏晶等缺陷形成原因,掌握了大尺寸定向柱晶叶片和单晶叶片成形关键技术。

(4) 重型燃机空心叶片用复杂结构大尺寸陶瓷型芯。实验室在陶瓷型芯研发上取得了很大的进展,已掌握了大尺寸燃机透平叶片陶瓷型芯的制备工艺,尺寸精度、低温强度、高温强度、气孔率、抗蠕变性能均能满足工艺要求,自主研发的陶瓷型芯已应用于50MW燃机透平空心叶片的配套生产。

(5) 透平叶片热障涂层制备工艺研究。开发了燃



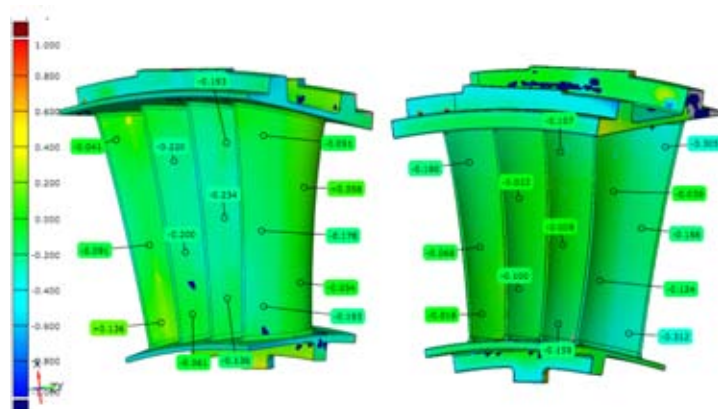
杨功显主任(右一)在介绍自主研发的50 MW燃机透平叶片



50 MW燃机第2级动叶



50 MW燃机第4级动叶毛坯



50 MW燃机第4级静叶(四连体)毛坯尺寸

气轮机连体叶片所需的隔热涂层性能和高效制备控制技术，掌握了高速等离子射流作用下气液固多相沉积涂层生长机理及涂层结构调控机制，研究了制备工艺对热障涂层厚度均匀性、微观组织稳定性、质量可靠性及失效性能的影响，实现了热障涂层技术在50 MW燃机透平叶片上的示范应用。

(6) 燃机验证平台建设。已完成燃烧器试验、透平叶片挂片试验。燃机整机试验台也已建设完成，可用于高温部件及材料的验证，能够促进高温材料的发展。

研究成果的应用价值和前景

实验室所开展的研究，均以能源透平产业发展为导向，针对先进能源透平装备制造关键技术的需求，与生产联系紧密，偏向于工程化应用。目前，自主生产的50 MW燃机8列透平叶片已完成制造，年内将随原型机进行厂内试车验证，可望真正打破F级重型燃机高温部件的技术壁垒。

团队下一步工作计划

(1) 等轴晶叶片：开展50 MW燃机原型机整机试验，验证等轴晶叶片设计、制造及其技术标准可行性。

(2) 定向柱晶叶片和单晶叶片：开展工程化批量制备技术研究和整机试验验证。



大尺寸定向柱晶叶片（50 MW燃机第3级动叶，高度 > 300 mm）



大尺寸单晶叶片（50 MW燃机第2级动叶）



50 MW燃机透平第2级静叶用陶瓷型芯



50 MW燃机第1级动叶片、静叶片热障涂层

(3) 开展全尺寸叶片性能表征分析及服役安全和寿命评价。

(4) 依托实验室平台，加强长寿命高温材料和产

品的技术规范及标准建设，形成自主知识产权高温材料及产品制造标准体系，完善材料数据库。