



TPRI

2019 超临界二氧化碳循环发电技术研讨会

Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium 2019

会议手册

Conference Handbook

主办单位：中国电机工程学会清洁低碳发电专业委员会

中国电机工程学会火力发电专业委员会

承办单位：西安热工研究院有限公司

电站锅炉煤清洁燃烧国家工程研究中心

协办单位：《热力发电》编辑部

中国 西安

2019 年 12 月 27 日-29 日

目 录

一、会议背景	I
二、会议主题	I
三、会议组委会	I
四、会议时间地点	III
五、会议日程	IV
六、会议支持单位	X
七、报告摘要集	XI

一、会议背景

我国能源结构将从化石能源主导的时代进入以可再生能源和化石能源长期共存的多元化时代。超临界 CO₂ 循环发电由于其独特的优势，是未来高效灵活火电、高温光热发电、新一代核电、余热发电和先进舰船动力系统的研究热点。但在基础物理规律、循环构建理论、关键设备优化设计、系统运行控制策略、材料选择等方面还面临很多挑战。为促进相关技术的交流与发展，特举办本次研讨会，推进超临界二氧化碳循环发电技术从原理论证向工程应用转化。

二、会议主题

超临界 CO₂ 基础科学问题
超临界 CO₂ 循环构建与优化设计
超临界 CO₂ 关键换热设备设计
超临界 CO₂ 旋转机械设计
超临界 CO₂ 循环发电运行控制

三、会议组委会

主 席：姚明宇

中国电机工程学会 清洁低碳发电专委会 秘书长

执行主席：李红智 西安热工研究院 煤基清洁能源所 所长

电话：029-82001207 手机：18691565600

秘 书 长：张一帆 西安热工研究院 煤基清洁能源所 所长助理

电话：029-82001206 手机：13572486328

秘 书 处：张纯（注册、住宿、交通、参展咨询）

电话：029-82002298 手机：15891785501

白文刚（会议日程、报告、资料咨询）

电话：029-82001206 手机：15829276098

专家委员会（排名不分先后）

- 何雅玲 西安交通大学 中国科学院院士
- 孙 锐 电力规划设计总院 专家委员会副主任委员
- 梁昌乾 中国华能集团有限公司 科技部 副主任
- 王月明 西安热工研究院有限公司 副总经理
- 王志峰 中国科学院电工研究所 研究员
- 姜培学 清华大学 能源与动力系 主任
- 徐进良 华北电力大学 能动与机械学院 院长
- 严俊杰 西安交通大学 能动学院 院长
- 杨其国 上海理工大学 能动学院 院长
- 魏进家 西安交通大学 化工学院 院长
- 方 宇 东方汽轮机有限公司 副总经理
- 朱 军 西北电力设计院 总工 全国工程勘察设计大师
- 山秀丽 华陆工程科技有限公司 原总工 全国工程勘察设计大师
- 黄彦平 中国核动力研究设计院 反应堆研究所 副所长
- 林继铭 中广核研究院 反应堆研究中心 副主任
- 淮秀兰 中国科学院工程热物理研究所 主任
- 姜玉雁 中国科学院工程热物理研究所 研究员
- 黄 莺 哈尔滨锅炉厂有限责任公司 所长
- 杨建道 上海汽轮机厂有限公司 所长
- 胡伟民 中国船舶集团第 725 研究所 主任
- 彭学创 中国船舶集团第 701 研究所 副主任
- 周 东 重庆江增船舶重工有限公司 副总工
- 李 涛 华陆工程科技有限责任公司 副主任

四、会议时间地点

西安交大南洋大酒店 地址：西安市碑林区兴庆南路 1 号

12 月 27 日 注册签到 一期一楼酒店大堂

12 月 28 日 注册签到及大会报告 二期三楼新报告厅

12 月 29 日 分论坛报告 一期二楼国际会议厅和多功能厅

就餐地点 一期一楼中餐厅

交通指南：

从西安咸阳国际机场出发：

乘坐出租车，距离 45 公里，车程约 1 小时，费用约 150 元

乘坐机场城际线至北客站（北广场）站，站内换乘地铁 4 号线至大雁塔站，换乘地铁 3 号线（开往保税区方向）至延兴门站（B1 出口），用时约 2 小时

从西安火车北站出发：

乘坐出租车，距离 24 公里，车程约 40 分钟，费用约 60 元

坐地铁 2 号线到小寨站，换乘地铁 3 号线（开往保税区方向）到延兴门站（B1 出口），用时约 1 小时



五、会议日程

12月28日上午, 08:30-12:00, 二期新报告厅	
全体大会: 开幕式和主旨报告论坛	
主持人: 姚明宇 中国电机工程学会 清洁低碳发电专委会 秘书长	
08:30-08:50	开幕式、领导嘉宾致辞
08:50-09:30	主旨报告: 超临界二氧化碳动力循环在太阳能、核能、燃煤发电系统中的应用探索 何雅玲 , 中国科学院院士, 西安交通大学教授
9:30-10:00	合影, 茶歇
主持人: 徐进良 华北电力大学 能源动力与机械工程学院 院长	
10:00-10:40	主旨报告: 超临界二氧化碳太阳能热发电关键技术探讨 王志峰 , 中国科学院电工研究所研究员, 国家光热产业技术创新战略联盟理事长, 国家重点研发计划项目“超临界 CO ₂ 太阳能热发电关键基础问题研究及系统集成”负责人
10:40-11:20	主旨报告: 超临界压力二氧化碳流动换热规律与应用 姜培学 , 清华大学教授, 能源与动力工程系主任, 长江学者, 国家重点研发计划项目“CO ₂ 低能耗捕集与地质封存利用的关键基础科学问题研究”负责人
11:20-12:00	主旨报告: 西安热工院超临界二氧化碳循环发电技术研究进展 李红智 , 西安热工研究院, 教授级高工, 国家重点研发计划课题“超临界 CO ₂ 透平压缩机高效动力转换特性研究”负责人, 华能西安热工院 5MW 试验平台建设项目负责人
12:00-13:30	午餐, 休息, 一期中餐厅

12月28日下午, 13:30-18:30, 二期新报告厅	
全体大会: 主旨报告及重点项目进展论坛	
主持人: 李红智 西安热工研究院 煤基清洁能源技术研究所 所长	
13:30-14:10	主旨报告: 超临界二氧化碳先进动力循环的研究 徐进良 , 华北电力大学教授, 能源动力与机械工程学院院长, 长江学者, 国家重点研发计划项目“超高参数高效二氧化碳燃煤发电基础理论与关键技术研究”负责人
14:10-14:50	主旨报告: 超临界二氧化碳循环的系统构型优化 严俊杰 , 西安交通大学教授, 能源与动力工程学院院长, 长江学者, XX 超临界 CO ₂ 循环发电系统预研负责人
14:50-15:15	特邀报告: 超临界流体湍流传热机理与模型 白博峰 , 西安交通大学教授, 动力工程多相流国家重点实验室副主任, XX 超临界 CO ₂ 循环发电系统预研负责人
15:15-15:40	特邀报告: 超临界 CO₂ 燃煤锅炉设计方法研究进展 向军 , 华中科技大学教授, 国家重点研发计划课题“超临界 CO ₂ 锅炉燃烧机理与设计方法”课题负责人
15:40-16:00	茶歇
主持人: 魏进家 西安交通大学 化学工程与技术学院 院长	
16:00-16:25	特邀报告: 新型高效紧凑式换热器研发 淮秀兰 , 中科院工程热物理研究所, 研究员, 传热传质中心主任, 全温全压超临界 CO ₂ 换热器综合试验测试平台负责人
16:25-16:50	特邀报告: 1000MW 级超临界 CO₂ 燃煤锅炉动力循环冷却壁设计的几点思考 唐桂华 , 西安交通大学教授, 杰青, 国家重点研发计划课题“超临界 CO ₂ 燃煤发电流动传热机理及关键换热技术”负责人
16:50-17:15	特邀报告: 超临界 CO₂ 布雷顿循环关键动力部件旋转机械和轴封技术研发 李军 , 西安交通大学教授, 国家重点研发计划课题“超临界 CO ₂ 透平热功转换和设计理论”负责人
17:15-17:40	特邀报告: 哈电锅炉超临界二氧化碳发电技术研发进展 黄莺 , 哈尔滨锅炉厂锅炉研究所, 所长, 西安热工院 5MW 试验平台锅炉研制负责人
17:40-18:05	特邀报告: 高效低碳燃气轮机试验装置—超临界二氧化碳循环试验台建设进展 王波 , 中科院工程热物理研究所副研究员, 国家重大科技基础设施项目-超临界二氧化碳循环试验台负责人
18:05-18:30	特邀报告: PCHE 发展现状及关键制造技术 王桂龙 , 陕西智拓固相增材制造技术有限公司
19:00-20:30	欢迎晚宴, 一期中餐厅

12月29日上午, 8:30-12:00, 一期国际会议厅	
科技创新分论坛 A	
主持人: 向军 华中科技大学 教授	
8:30-8:55	特邀报告: 基于超临界 CO₂ 布雷顿循环的塔式太阳能光热系统研究 周昊, 浙江大学教授, 杰青, 能源清洁利用国家重点实验室副主任
8:55-9:20	特邀报告: MW 级超临界 CO₂ 布雷顿循环压缩机实验研究 姜玉雁, 中国科学院工程热物理研究所, 研究员, 工热所 sCO ₂ 发电项目负责人
9:20-9:45	特邀报告: 内燃机余热回收 CO₂ 动力循环研究 田华, 天津大学, 教授, 内燃机余热回收 CO ₂ 动力循环项目负责人
9:45-10:10	特邀报告: 国家发改委示范工程项目首台印刷板式换热器 (PCHE) 国产化研制 胡伟民, 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 主任
10:10-10:30	茶歇
主持人: 郭江峰 中国科学院工程热物理所 研究员	
10:30-10:55	特邀报告: 近临界与超临界区内二氧化碳热质输运规律研究 雷贤良, 西安交通大学, 副教授
10:55-11:20	特邀报告: 金属材料在高温二氧化碳环境中的腐蚀 唐丽英, 西安热工研究院, 研究员
11:20-11:40	以熔盐为热源的超临界二氧化碳再压缩布雷顿循环的动态建模和瞬态模拟 周攀, EDF (中国) 投资有限公司, 研发工程师
11:40-12:00	使用 CO ₂ 工质的波箔型箔片止推轴承的建模方法比较 秦侃, 西北工业大学, 助理教授
12:00-13:30	午餐, 一期中餐厅

12月29日上午, 8:30-12:00, 一期多功能报告厅	
科技创新分论坛 B	
主持人: 淮秀兰 中国科学院工程热物理所 研究员	
8:30-8:55	特邀报告: 人工智能算法在超临界二氧化碳透平机械优化设计中的应用 谢永慧, 西安交通大学, 教授
8:55-9:20	特邀报告: 高效紧凑式换热器优化设计方法研究 郭江峰, 中国科学院工程热物理研究所, 研究员
9:20-9:45	特邀报告: 超临界二氧化碳传热特性分析及超临界工质传热特性模化研究 李会雄, 西安交通大学, 教授
9:45-10:10	特邀报告: 超临界 CO₂ 的换热特性与系统构建 肖刚, 浙江大学, 教授
10:10-10:35	茶歇
主持人: 田华 天津大学 教授	
10:35-11:00	特邀报告: 受热通道内超临界二氧化碳流动不稳定性研究 张一帆, 西安热工研究院有限公司, 所长助理
11:00-11:20	基于超临界 CO ₂ 径流式透平尺寸及运转参数的一维设计 齐建荟, 山东大学, 副研究员
11:20-11:40	超临界二氧化碳空冷换热器空气侧传热特性数值模拟 李逍霄, 重庆大学, 讲师
11:40-12:00	超临界 CO ₂ 管内对流传热特性及流量分配规律研究 颜建国, 西安理工大学, 讲师
12:00-13:30	午餐, 一期中餐厅

12月29日下午, 13:30-18:00, 一期国际会议厅	
工业创新分论坛 C	
主持人: 肖刚 浙江大学 教授	
13:30-13:50	超临界二氧化碳太阳能热发电关键技术研究 高炜, 西安热工研究院有限公司, 高级工程师
13:50-14:10	法国电力-首航 10 兆瓦超临界二氧化碳循环在光热发电项目中的应用 熊一力, EDF (中国) 投资有限公司, 研发工程师
14:10-14:30	超临界二氧化碳工质管屏流量分配特性分析 闫凯, 上海锅炉厂有限公司, 副主任/高工
14:30-14:50	塔式光热超临界 CO ₂ 循环发电系统设计优化 张春伟, 哈尔滨电气集团有限公司中央研究院, 高工
14:50-15:10	超临界二氧化碳循环发电系统冷却器技术研究 赵晓利, 中国电建集团公司河北省电力勘测设计研究院有限公司, 教授级高工
15:10-15:30	超临界 CO ₂ 再压缩布雷顿循环中两级小流量离心式压缩机优化设计 张晓丹, 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 工程师
15:30-16:00	茶歇
主持人: 雷贤良 西安交通大学 副教授	
16:00-16:20	工质纯度对超临界 CO ₂ 循环预冷器性能的影响 张磊, 西安热工研究院有限公司, 高工
16:20-16:40	超临界二氧化碳发电循环回热器及预冷器工程设计 张志鹏, 哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 高工
16:40-17:00	超临界二氧化碳循环发电汽轮机主汽阀的选型与设计 张永标, 哈尔滨滨大阀门制造有限公司, 总经理
17:00-17:20	一种改进的超临界二氧化碳燃煤发电系统及其焓分析 白文刚, 西安热工研究院有限公司, 工程师
17:20-17:40	超临界 CO ₂ 预压缩机布置研究 廖健鑫, 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 工程师
17:40-18:00	超临界二氧化碳光热-干热岩耦合发电系统分析 袁瑞山, 西北电力设计院有限公司, 工程师

12月29日下午, 13:30-18:00, 一期多功能报告厅	
青年创新分论坛 D	
主持人: 张一帆 西安热工研究院 煤基清洁能源技术研究所 所长助理	
13:30-13:55	特邀报告: 高温高压印刷电路板换热器流动传热特性和制造工艺研究 马挺, 西安交通大学, 教授
13:55-14:15	1000MW 超临界二氧化碳燃煤发电系统热力学性能分析 赵世飞, 华北水利水电大学, 讲师
14:15-14:35	超临界二氧化碳透平变工况性能分析与流动控制研究 应祺煜, 清华大学, 博士研究生
14:35-14:55	甲烷燃烧超临界二氧化碳半闭式循环灵敏性分析与系统热效率模拟 李博文, 哈尔滨工业大学, 博士研究生
14:55-15:15	超临界 CO ₂ 直接冷却反应堆系统负荷跟踪方法研究 高春天, 西安交通大学, 博士研究生
15:15-15:35	超临界二氧化碳再压缩燃煤发电系统焓分析 陈东旭, 华北电力大学, 博士研究生
15:35-16:00	茶歇
主持人: 高炜 西安热工研究院 高级工程师	
16:00-16:20	超临界 CO ₂ 压缩回路热力系统建模—压缩机模型 滕庚, 上海交通大学, 硕士研究生
16:20-16:40	基于 LCOE-遗传算法的超临界二氧化碳燃煤机组锅炉设计及经济性分析 朱萌, 华中科技大学, 硕士研究生
16:40-17:00	印刷电路板换热器翼片结构研究与优化 张天一, 华北电力大学, 硕士研究生
17:00-17:20	超临界二氧化碳燃煤发电系统低温热能利用技术研究 张旭伟, 西安热工研究院有限公司, 工程师
17:20-17:40	超临界压力下二氧化碳在竖直细微通道内的换热特性研究 彭锐锋, 西安交通大学, 硕士研究生
17:40-18:00	二氧化碳跨临界动态传热特性的实验研究 郭子嫚, 西安交通大学, 硕士研究生

六、会议支持单位

1. 陕西智拓固相增材制造技术有限公司

联系人：王桂龙 联系电话：15229099041

2. 杭州沈氏节能科技股份有限公司

联系人：刘 铁 联系电话：15990160111

3. 浙江菲尔特过滤科技股份有限公司

联系人：何赞果 联系电话：13905891919

七、报告摘要集

主旨报告：超临界 CO ₂ 动力循环在太阳能、核能、燃煤发电系统中的应用探索	1
主旨报告：超临界二氧化碳太阳能热发电关键技术探讨	2
主旨报告：超临界压力二氧化碳流动换热规律与应用	3
主旨报告：西安热工院超临界 CO ₂ 循环发电技术研究进展	4
主旨报告：超临界二氧化碳先进动力循环的研究	5
主旨报告：超临界二氧化碳循环的系统构型优化	6
特邀报告：超临界流体湍流传热机理与模型	7
特邀报告：超临界 CO ₂ 燃煤锅炉设计方法研究进展	8
特邀报告：新型高效紧凑式换热器研发	9
特邀报告：1000MW 级 S-CO ₂ 燃煤锅炉动力循环冷却壁设计的几点思考	10
特邀报告：超临界 CO ₂ 布雷顿循环关键动力部件旋转机械和轴封技术研发	11
特邀报告：哈电锅炉超临界二氧化碳发电技术研发进展	12
特邀报告：高效低碳燃气轮机试验装置—超临界二氧化碳循环试验台建设进展	13
特邀报告：PCHE 发展现状及关键制造技术	14
特邀报告：基于超临界 CO ₂ 布雷顿循环的塔式太阳能光热系统研究	15
特邀报告：MW 级 SCO ₂ 布雷顿循环压缩机实验研究	16
特邀报告：内燃机余热回收 CO ₂ 动力循环研究	17
特邀报告：国家发改委示范工程项目首台印刷板式换热器（PCHE）国产化研制	18
特邀报告：近临界与超临界区内二氧化碳热质输运规律研究	19
特邀报告：金属材料在高温二氧化碳环境中的腐蚀	20
特邀报告：人工智能算法在超临界二氧化碳透平机械优化设计中的应用	21
特邀报告：高效紧凑式换热器优化设计方法研究	22
特邀报告：超临界二氧化碳传热特性分析及超临界工质传热特性模化研究	23
特邀报告：超临界 CO ₂ 的换热特性与系统构建	24
特邀报告：受热通道内超临界二氧化碳流动不稳定性	25
特邀报告：高温高压印刷电路板换热器流动传热特性和制造工艺研究	26
以熔盐为热源的超临界二氧化碳再压缩布雷顿循环的动态建模和瞬态模拟	27
使用 CO ₂ 工质的波箔型箔片止推轴承的建模方法比较	28
基于超临界 CO ₂ 径流式透平尺寸及运转参数的一维设计	29
超临界二氧化碳空冷换热器空气侧传热特性数值模拟	30

超临界 CO ₂ 管内对流传热特性及流量分配规律研究	31
超临界二氧化碳太阳能热发电关键技术研究	32
法国电力-首航 10 兆瓦超临界二氧化碳循环在光热发电项目中的应用	33
超临界二氧化碳工质管屏流量分配特性分析	34
塔式光热超临界二氧化碳循环发电系统设计优化	35
超临界二氧化碳循环发电系统冷却器技术研究	36
超临界 CO ₂ 再压缩布雷顿循环中两级小流量离心式压缩机优化设计	37
工质纯度对 sCO ₂ 布雷顿循环系统预冷器性能的影响	38
超临界二氧化碳发电循环回热器及预冷器工程设计	39
超临界二氧化碳循环发电汽轮机主汽阀的选型与设计	40
一种改进的超临界二氧化碳燃煤发电系统及其焓分析	41
超临界 CO ₂ 预压缩机布置研究	42
超临界二氧化碳光热-干热岩耦合发电系统分析	43
1000 MW 超临界二氧化碳燃煤发电系统热力学性能分析	44
超临界二氧化碳透平变工况性能分析与流动控制研究	45
甲烷燃烧超临界二氧化碳半闭式循环灵敏性分析与系统热效率模拟	46
S-CO ₂ 直接冷却反应堆系统负荷跟踪方法研究	47
超临界二氧化碳再压缩燃煤发电系统焓分析	48
超临界 CO ₂ 压缩回路热力系统建模—压缩机模型	49
基于 LCOE-遗传算法的超临界二氧化碳燃煤机组锅炉设计及经济性分析	50
印刷电路板换热器翼片结构研究与优化	51
超临界二氧化碳燃煤发电系统低温热能利用技术研究	52
超临界压力下二氧化碳在竖直细微通道内的换热特性研究	53
二氧化碳跨临界动态传热特性的实验研究	54
600MW 超临界二氧化碳燃煤发电系统仿真研究	55
CO ₂ 热力性质及传输特性显式公式	56
超临界二氧化碳布雷顿循环喷射器设计及性能分析	57
熔盐/S-CO ₂ 在 zigzag 型 PCHE 内流动换热性能研究	58

主旨报告：超临界二氧化碳动力循环在太阳能、核能、燃煤发电系统中的应用探索

报告人：何雅玲

中国科学院院士，西安交通大学教授

个人简介：

中国科学院院士，1988年毕业于西安交通大学，博士，西安交通大学教授，博士生导师，中国共产党十九大代表，并当选为第十九届中央委员会候补委员。

何雅玲是国家 973 项目首席科学家，国家杰青，教育部长江学者，国家级教学名师，国家万人计划领军人才，新世纪百千万人才工程国家级人才，全国优秀博士学位论文指导教师，全国模范教师，国家自然科学基金创新群体学术带头人，教育部创新团队负责人，国家外专局/教育部热流科学创新引智基地计划负责人，国家首批优秀教学团队负责人。

何雅玲长期从事能源的高效利用及节能理论与新方法、强化换热新技术（含电子器件冷却）、太阳能利用、余热利用、储能新技术、制冷与空调技术、航天航空中的热流科学问题等方面的研究，研究成果在航天、能源和化工等领域得到广泛应用。获何梁何利科学与技术进步奖，国家自然科学基金二等奖 2 项，国家技术发明二等奖 1 项，国家科学技术进步奖一等奖-创新团队奖 1 项，省部级一等奖 4 项。入选全球高被引学者及中国百篇最具影响国际学术论文等。

在国际著名学术期刊上发表英文论文 460 余篇，中文核心期刊论文 250 余篇，SCI 收录 460 余篇，EI 收录 600 余篇。著作和教材 11 部（含合著），英文书 1 部、著作 4 章。应邀在国内外学术会议上做大会报告/特邀报告/邀请报告 100 余次。授权发明专利 55 项，软件著作权 30 项。论著和成果被引 16000 余次，SCI 引用 10700 余次。所在的学科为国家双一流学科，2017 年被评为国家 A+ 学科。

报告摘要：

本报告包括：S-CO₂ 循环概述；太阳能 S-CO₂ 循环系统的研究及进展；核能 S-CO₂ 循环系统的研究及进展；燃煤 S-CO₂ 循环系统的研究及进展。

主旨报告：超临界二氧化碳太阳能热发电关键技术探讨

报告人：王志峰

中国科学院电工研究所研究员

个人简介：

中国科学院电工研究所研究员，博士生导师。1985 年获得武汉理工大学材料学院无机非金属材料学学士学位，1990 年获武汉理工大学材料学院无机非金属材料学硕士学位，1993 年获清华大学工程热物理专业博士学位，国家首批“万人计划”，中国科学院首批特聘核心骨干研究员。国家 973 计划咨询能源领域专家，国家 863 计划可再生能源主题专家组召集人。国家重点研发计划“超临界二氧化碳太阳能热发电关键基础问题研究”项目首席科学家。

长期致力于太阳能热发电系统设计，太阳能高温集热系统中的流动与换热问题，聚光与吸热系统耦合设计，太阳集热器热性能评价理论等方面的研究。主持编写国家标准 2 项，发表论文 190 余篇，其中 SCI 文章 55 篇。申请发明专利 98 项。

主持了北京八达岭太阳能热发电实验电站的研究、设计、建设、调试和运行。提出了太阳能热发电非稳定光热电过程耦合的核心科学问题，并得到国家 973 项目支持，项目所属六个课题获得全优的成绩通过结题验收。研究提出了我国太阳能热发电技术发展路线图。提出了在河北省张家口地区崇礼县建设 2022 年零碳奥运专区的建议，以及通过跨时间尺度的太阳能集热/储热为主解决崇礼全域建筑采暖的整套技术路线，在 2015 年奥运申办报告中公布，并于 2015 年 7 月获得国务院批准，设立崇礼“低碳奥运专区”。

报告摘要：

温度达 700℃ 以上，具有高效低成本潜力的 $s\text{CO}_2$ 太阳能热发电系统是目前国际太阳能热发电研究热点。欧盟和美国 DOE 从 2018 年启动该项技术研究计划。以 $s\text{CO}_2$ 为代表的太阳能热发电系统由高焦比聚光器，高温吸热器， $s\text{CO}_2$ 换热器和 $s\text{CO}_2$ 透平等 4 部分组成。目前， $s\text{CO}_2$ 太阳能热发电系统中仍有不少亟待解决的关键技术问题，如高效颗粒吸热器设计理论与方法，储热放热模式对系统性能的影响机理， $s\text{CO}_2$ 与透平热功转换过程的相互作用机制等。

主旨报告：超临界压力二氧化碳流动换热规律与应用

报告人：姜培学

清华大学教授，能源与动力工程系主任

个人简介：

姜培学教授，1986年毕业于清华大学热能工程系（现能源与动力工程系），同年十月公派到前苏联莫斯科动力学院热能动力系攻读博士学位(Ph.D.)。1991年2月学成回国，在清华大学热能工程系做博士后，1993年起在清华大学热能工程系任教，1997年被提晋升为教授，1998年至2000年在英国曼彻斯特大学工学院访问研究。现任清华大学能源与动力工程系主任、能源与动力工程系工程热物理所所长、校务委员会委员、清华大学山西清洁能源研究院院长。曾任清华大学科研院常务副院长、清华大学学术委员会秘书长。国家自然科学基金委杰出青年科学基金获得者和创新群体学术带头人、教育部长江学者特聘教授和创新团队带头人、新世纪百千万人才工程国家级人选。获国家自然科学奖二等奖1项、教育部自然科学奖一等奖1项、教育部技术发明奖一等奖1项、何梁何利基金科学与技术进步奖。自2014年连续5年入选爱思唯尔中国高被引学者榜。

姜培学教授长期从事能源动力领域中极端条件能质传递理论、方法与关键技术的研究。针对新一代能源与空天动力系统呈现的微纳结构、超高热流、高温高压及高超声速等特点，发展了极端条件下多孔介质局部非热平衡传热理论，提出了微/纳结构与超临界压力流体的传热强化与热设计方法，研发出新型热防护关键技术，并成功应用于页岩气物性测量、干热岩开发、太阳能热发电、国家重大专项飞行器和大推力液体火箭发动机等，取得了系统性创新成果。

报告摘要：

报告分三部分：1.超临界压力流体特性、在能源/动力领域中的应用背景、超临界压力流体对流换热的研究发展历程。2.超临界CO₂动力循环的参数变化特性、加热条件下超临界压力流体对流换热规律、冷却条件下超临界压力流体对流换热特性。3.清洁能源领域中超临界压力CO₂的换热应用，包括跨临界CO₂空气源热泵系统、超临界CO₂高温太阳能热发电系统中的换热器等。

主旨报告：西安热工院超临界 CO₂ 循环发电技术研究进展

报告人：李红智

西安热工研究院教授级高工

个人简介：

李红智，教授级高工，现任西安热工研究院煤基清洁能源技术研究所所长。2009 年在德国阿海珐西门子技术中心访问研究，2010~2011 年在美国威斯康辛大学麦迪逊分校访问研究。近年来先后获得陕西省青年拔尖人才、陕西省青年科技新星、中央企业留学人员优秀创新人才、中国电力优秀青年工程师、中国能源优秀青年科技工作者等荣誉称号。长期从事超临界流体先进动力循环及化石燃料洁净燃烧领域的研究工作，获中国华能集团科技进步奖 3 项。作为团队负责人，主持国家重点研发计划课题、国家自然科学基金、华能集团重点科研项目等 20 余项。在超临界二氧化碳循环发电领域获得授权专利 76 项，初步形成超临界二氧化碳循环发电核心技术专利群。针对超临界工质先进动力循环前沿科学问题和关键技术问题，发表论文 45 篇，其中 SCI 收录 21 篇（第一/通讯作者 16 篇），受邀出版英文专著 1 章，担任超临界二氧化碳循环专题学术会议科学委员会或组委会委员，并做主旨报告或特邀报告 8 次。

报告摘要：

发展更加高效灵活的电力系统，是未来能源体系建设的重大需求。西安热工院超临界先进动力系统团队积极承担国家发改委、科技部、国家自然科学基金委和华能集团重点科技项目，围绕超临界二氧化碳循环在高效灵活火电、高温光热发电和新一代核电领域中的关键卡脖子技术进行深入研究。项目团队提出了基于广义卡诺循环的超临界 CO₂ 循环系统构建原理和方法，揭示了超临界 CO₂ 循环高效灵活的热力学本质，逐步解决了超临界 CO₂ 发电系统关键瓶颈技术及工程转化难题，包括大流量小温差锅炉受热面耦合传热算法、高能量密度透平气动-结构-冷却一体化设计方法、高效低阻紧凑式换热器优化设计方法。正在建设国际领先的 5MWe/20MPa/600℃ 等级超临界二氧化碳循环发电综合试验平台，目前主要核心设备样机已经研制完成，正在进行最后的安装调试工作，建成后将为推进超临界二氧化碳循环发电技术从原理论证向工程应用转化提供重要支撑。

主旨报告：超临界二氧化碳先进动力循环的研究

报告人：徐进良

华北电力大学教授，能源动力与机械工程学院院长

个人简介：

徐进良，教授/博导，华北电力大学能源动力与机械工程学院院长，首届黄大年式团队负责人，长江学者特聘教授，杰出青年基金获得者，科技部 973 项目首席科学家，政府特殊津贴及国家“百千万”人才工程专家，并被授予“有突出贡献中青年专家”荣誉称号。现任工程热物理学会多相流分会副主任，低品位能源多相流与传热北京市重点实验室主任等，多个国际杂志编辑及特邀编辑等。获得西安交通大学本、硕、博士学位（1985-1995），清华大学博士后（1995-1997）。主要研究方向为微纳尺度/多尺度传热；太阳能热利用；低品位能源利用及热功转换；S-CO₂ 先进动力循环。发表国际期刊论文 200 余篇，SCI 他引 4000 余次，连续 5 年（2014-2018）获能源领域中国高被引学者，合作英文专著 2 部，获得教育部自然科学一等奖一项。担任国际会议主席或共同主席 4 次，做国际会议特邀报告 30 余次。承担国家重点研发计划项目、科技部 973 项目、国家自然科学基金重点基金、国际合作等国家及企业项目近 20 余项。团队建设有高温太阳能模拟器、微纳尺度综合试验平台、有机朗肯循环发电试验平台、数值模拟平台、超高参数二氧化碳传热实验台。曾指导学生多次获得国家奖学金、吴仲华优秀学生奖、工程热物理学会多相流及传热传质分会优秀论文奖等。团队网址：<http://bjmfht.ncepu.edu.cn/>。

报告摘要：

面向国家需求及国际前沿，聚焦超高参数二氧化碳动力循环，探索超高参数新循环及新工质热功转换及实现方法，研究其与不同热源耦合机理，构建新的热力学循环，提出新的评价方法，建立尺度准则，提出新的关键部件概念设计，从全生命周期的角度论证新循环取代，或部分取代传统蒸气机组的可能性，以提高机组效率，提高灵活性，为实现多能源互补，为解决可再生能源利用中的弃风弃光提供新的原理和方法。

主旨报告：超临界二氧化碳循环的系统构型优化

报告人：严俊杰

西安交通大学教授，能源与动力工程学院院长

个人简介：

严俊杰，1967年生，西安交通大学教授，博士生导师，能源与动力工程学院院长。国家杰出青年科学基金获得者，享受政府特殊津贴专家，首届教育部新世纪优秀人才，霍英东优秀青年教师奖获得者，陕西省优秀博士论文获得者。

长期从事热力系统节能控制与仿真、汽液两相流方面的科研与教学工作，先后主持国家 973 课题 2 项、863 课题 1 项、国家自然科学基金 6 项（其中重点基金 1 项、杰出青年基金 1 项）、博士点基金 1 项、陕西省科技统筹创新工程计划重大科技成果转化项目 1 项。2017 年获得国家科技进步二等奖 1 项（排 2）、2016 年获得陕西省科技进步一等奖（排 2）、2010 年获得国家科技进步二等奖 1 项（排 1）、2008 年获陕西省科技进步一等奖（排 1）、2000 年获得陕西省科学技术一等奖（排 4）、1995 年获得国家发明奖四等奖（排 3）、1995 年获得陕西省科学技术二等奖（排 6）、1994 年获得国家教委科技进步奖二等奖（排 6），并获其他省部级科技成果 7 项。已授权发明专利 30 余项，发表学术论文 200 余篇，其中 SCI 论文 100 余篇；合作出版学术专著 2 部、教材 2 本。

报告摘要：

船舰发电系统的高效、安全运行一直是人们的关注重点。超临界二氧化碳循环由于其效率高、体积小、功率密度大、噪声小等特点使其成为船舰发电系统的理想循环。本文对应用于船舰发电系统上的超临界二氧化碳循环系统构型进行了研究，基于船舰热源和冷源特征，分别对超临界二氧化碳循环系统的热端和冷端进行构型优化设计，提出了多种循环系统热端和冷端构型；进而采用超结构全局优化方法对循环系统的系统构型以及运行参数进行了全面优化，获得了不同设计条件下使得循环效率最高的超临界二氧化碳循环系统构型和运行参数。最后对循环系统动态特性和控制策略进行了研究，获得了超临界二氧化碳循环系统各设备及关键节点参数的动态运行规律，掌握了影响超临界二氧化碳循环系统安全高效运行的主要因素和控制方法。

特邀报告：超临界流体湍流传热机理与模型

报告人：白博峰

西安交通大学教授，动力工程多相流国家重点实验室副主任

个人简介：

白博峰教授现任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。2014 年获国家杰出青年科学基金，2017 年入选国家“万人计划”科技创新领军人才。专业领域包括超临界流动传热、动力工程多相流、热交换器能效提升关键技术等。主持国防与民口 973 计划课题、863 计划课题、国家重点研发计划课题、国家自然科学基金等项目；参加制订国家标准多部，TSG 特种设备安全技术规范 1 部，参编行业手册《热交换器》、《化学工程手册》、《强化传热技术》，编写英文专著“Advanced Supercritical Fluids Technologies”章节。主要研究成果获国家技术发明二等奖 1 项、省部级科学技术一等奖 3 项。担任中国工程热物理学会理事及多相流专委会副主任委员、中国锅炉压力容器标准委员会换热设备分会副秘书长、英国机械工程师协会会刊 Proc. IMech E Part C 副主编。

报告摘要：

实现超临界 CO₂ 湍流传热的准确预测是进行超临界 CO₂ 循环发电系统设计、性能预测与优化的重要理论基础。超临界 CO₂ 的热物理性质在拟临界点附近发生剧烈变化，导致其湍流性质显著不同于常规流体，传统基于 RANS 的湍流模型无法准确预测低热负荷的传热强化和高热负荷的传热恶化等物理现象。本报告研究了超临界流体的湍流性质，并根据其“可压缩效应”和“浮升力效应”发展了超临界流体湍流的涡粘模型。

基于槽道湍流的直接数值模拟结果，研究了超临界流体湍流机理。发现由于强烈密度脉动，其统计特性与高流速可压缩湍流有很大不同，适用于高流速可压缩湍流的 Morkovin 假设在拟临界区失效，Van-Driest 标度律也不能正确反映平均速度、温度剖面的变化；高热负荷下浮升力效应导致湍动能沿流向降低，流场出现“层流化”，诱发传热恶化。

由于传统湍流模型忽略了密度脉动，不能对超临界流体可压缩效应进行准确模拟。基于 Helmholtz 矢量分解定理，将脉动速度场分解为剪切模态（无源场）和胀压模态（无旋场），在 RANS 控制方程框架下导出了胀压场各阶矩的谱方程，通过求解上述方程，获得了湍动能、耗散率、涡粘系数的表达式，建立了超临界流体湍流的双模态可压缩湍流模型（TM-EVM），改善了传统涡粘模型对拟临界区传热强化现象预测不佳的缺点，对湍流平均量、二阶矩、湍动能收支项的计算结果与直接数值模拟结果吻合良好。

基于直接数值模拟结果发现，当浮升力作用较强时，传统涡粘模型中的雷诺应力本构方程不满足线性形式；此外，传统涡粘模型中的局部平衡假设也失效，压力应变率项对雷诺应力输运起到很大作用。本报告提出了雷诺应力非线性本构方程，将压力应变率的影响加入雷诺应力本构方程中，获得了湍流 Pr 数的表达式。新模型对高热负荷传热恶化下的湍流平均量与统计量预测准确性显著提升。

特邀报告：超临界 CO₂ 燃煤锅炉设计方法研究进展

报告人：向军

华中科技大学教授

个人简介：

向军，华中科技大学教授，新世纪优秀人才，煤燃烧国家重点实验室副主任。长期从事煤燃烧及污染物控制理论与技术研究，承担国家自然科学基金重点和面上项目 7 项，国家 863 计划、973 计划、支撑计划课题等 7 项，国家重点研发计划课题、国防重大项目课题等，发表 SCI 收录论文 200 余篇，授权国际和国家发明专利 50 余项，获国家科技进步二等奖 2 项，省部级奖励 4 项。

报告摘要：

超临界二氧化碳(S-CO₂)燃煤发电技术近几年受到了国内外学者广泛关注。S-CO₂ 锅炉设计主要有三个关键问题:质量流量大、辐射传热性能低以及烟气余热利用困难。针对 S-CO₂ 燃煤锅炉热力系统大流量关键问题，设计了双分流 S-CO₂ 燃煤锅炉高效安全经济热力系统，创建了不同容量锅炉系统的设计准则。针对 S-CO₂ 燃煤锅炉辐射传热性能下降的问题，发明了 T 型锅炉+防高温腐蚀防结焦+均匀热负荷等 S-CO₂ 创新炉型，研究其着火特性、燃尽特性、结焦特性、高温腐蚀特性、污染物生成特性等，创新构型能够有效均匀锅炉炉膛热负荷，燃烧稳定，实现锅炉安全高效的目标。针对 S-CO₂ 锅炉烟气余热利用困难的问题，通过分析 S-CO₂ 高低压透平膨胀比、最小循环压力、省煤器分流比对系统的不可逆性影响，提出了双空气预热器的尾部烟气利用新思路，实现锅炉效率 94.70%。基于上述关键问题研究，提出 S-CO₂ 锅炉的热力计算方法，建成了首台 300KWth 超临界 CO₂ 动力循环及燃煤锅炉系统（450℃/30MPa）。完成了 1000MW S-CO₂ 机组经济性分析，S-CO₂ 机组的平准化度电成本相比 USC 同类机组降低 10%。

特邀报告：新型高效紧凑式换热器研发

报告人：淮秀兰

中科院工程热物理研究所研究员

个人简介：

淮秀兰，中科院工程热物理研究所研究员，博士生导师，学术委员会委员，学位委员会委员，党委委员，传热传质研究中心主任；兼任中国工程热物理学会理事，北京热物理与能源工程学会理事等。在国内外权威学术期刊上发表 SCI 论文 150 余篇，应邀合作出版国际学术专著 2 部，国内专著 1 部；授权发明专利 30 余项。曾获国务院政府特贴、省部级自然科学一等奖、北京市金桥工程项目一等奖、中科院巾帼建功先进个人等奖励。

主要从事微尺度传热传质与先进热管理，新型高效紧凑式换热器及其在超临界 CO₂ 布雷顿循环发电、各类燃气轮机及石油化工等领域的应用。

报告摘要：

介绍了新型高效紧凑式印刷电路板式换热器（PCHE）的特点及应用前景，不同通道结构形式换热器内压降与换热特性及各因素的影响规律，换热器优化设计方法及评价标准等。自主建成国内首套双回路全温全压超临界二氧化碳（SCO₂）换热器综合测试平台完，最高压力 32MPa、最高温度 600℃，可用于高效紧凑式换热器优化设计理论与方法、新型换热结构及换热器测试验证等。实验测试结果表明，自主研发的适用于 MW 级 SCO₂ 发电系统的高效紧凑式 PCHE 回热器及冷却器样机性能远优于 MW 级发电任务要求；在换热性能不变的情况下，自主研发的新翼型翅片结构换热器压降大幅降低，为 SCO₂ 发电系统研究奠定了重要基础。

特邀报告：1000MW 级 S-CO₂ 燃煤锅炉动力循环冷却壁设计的几点

思考

报告人：唐桂华

西安交通大学热流科学与工程系主任
热流科学与工程教育部重点实验室主任

个人简介：

唐桂华，西安交大本科、硕士、博士，2007-2009 英国 Daresbury 国家实验室 Higher Scientific Officer。目前任西安交大热流科学与工程系主任、教育部重点实验室主任。陕西省青年科技新星、教育部新世纪优秀人才、中国工程热物理学会吴仲华优秀青年学者、国家自然科学基金委杰青、优青、万人计划科技创新领军人才、军委科技委某总体技术专家组成员、中国空天动力联合会某专业委员会委员、中国工程热物理学会传热传质委员会委员。主要研究方向为能源利用与节能，热设计与管流，微纳米尺度传热等。主持 973 项目课题、国家重点研发项目课题、国防 973 项目专题、国家自然科学基金等项目。任 ASME Journal of Heat Transfer 期刊副主编。以参与人身份获国家技术发明二等奖、国家自然科学基金二等奖、国家科技进步创新团队奖等荣誉。

报告摘要：

目前，燃煤电厂超超临界水机组最高蒸汽温度即使为 700°C，也只能达到 50%-LHV 的理论效率。相比之下，S-CO₂ 二次再热布雷顿循环理论效率在较低的主蒸汽参数下便可以达到近 51% 循环效率，因此近年来已被视为代替现有超超临界水机组的最有前景的动力系统之一。而在燃煤发电系统设计中，关键问题之一便是燃煤锅炉炉膛内水冷壁的热安全问题。针对 1000MW 级 S-CO₂ 燃煤锅炉动力循环冷却壁设计，本文梳理思考了 3 个关键问题并提出了相应的思考解决方案。

关键问题 1：在 S-CO₂ 二次再热布雷顿循环构型下，S-CO₂ 锅炉冷却壁内工质运行压力区间分别约为 30MPa、19 MPa、12 MPa，运行温度区间约为 520~600°C，同时考虑燃煤机组启停状态及变负荷运行状态，均会导致冷却壁内工质运行参数跨度范围较大，进而导致冷却壁内物性变化较大。因此，从物性变化较大的近临界区出发，研究了 S-CO₂ 非均匀加热下传热恶化区、传热强化区附近湍流近壁区多尺度流动传热现象，明晰了流体速度场和温度场之间协同性的综合影响机制，通过对比分析文献中的传热关联式，揭示了早期传热关联式预测失准的内在机理，并提出了新的局部传热恶化处对流换热系数、周向平均对流换热系数的经验关联式，建立了 S-CO₂ 燃煤动力系统锅侧/炉侧耦合传热计算模型。

关键问题 2：为保证循环效率，S-CO₂ 布雷顿循环构型具有回热区间大的特性，这直接导致 S-CO₂ 锅炉冷却壁工质入口温度较高(约 500°C)，同时考虑到炉膛内较高的辐射热流，进而降低锅炉冷却壁整体热安全性能。因此，在华北电大徐进良团队为解决 S-CO₂ 燃煤锅炉大压降问题提出的分流减阻、模块化设计基础上，发展了“冷热匹配，层级降温”冷却壁布置方法。基于新构建的 S-CO₂ 燃煤动力系统锅侧/炉侧耦合传热计算模型，获得了 1D 与 3D 模型中冷却壁壁温分布特性并有效保证了冷却壁热安全性能。

关键问题 3：在 S-CO₂ 燃煤锅炉模块化设计原则下，一方面，冷却壁出口中间点参数变化直接影响锅炉对流受热面工质入口状态参数。另一方面，由于 S-CO₂ 布雷顿循环吸热区间较窄，对流受热面出口参数即为循环终参数。因此，针对 S-CO₂ 燃煤锅炉对流受热面的进出口参数强约束特性，发展了 1000MW 级 S-CO₂ 燃煤锅炉动力循环耦合锅侧/炉侧整体热力校核设计方法，结合不同优化结构下的冷却壁布置方案，初步获得了 1000MW 级 S-CO₂ 燃煤锅炉冷却壁/对流受热面布置方案。

特邀报告：超临界 CO₂ 布雷顿循环关键动力部件旋转机械和轴封技术 研发

报告人：李军

西安交通大学能源与动力工程学院热动力工程系主任

个人简介：

1971 年生，工学博士，西安交通大学能源与动力工程学院热动力工程系教授，博士生导师。1989 年 9 月至 1998 年 3 月在西安交通大学学习，1993 年获得工学学士和 1998 年获得工学博士学位。1998 年 4 月至 2002 年在日本京都工业大学、九州工业大学进行博士后研究。日本学术振兴学会(JSPS)博士后(2000.03-2002.03)，日本庆应大学工学部客座教授(2008.04-2009.03)。主要从事透平机械气动热力学与优化设计、动密封流热固多场耦合和增稳抑振技术、燃气涡轮气动传热特性与高效冷却布局等方面研究。先后承担国家重点研发计划课题 1 项、国家自然科学基金重点项目 1 项、国家自然科学基金面上项目 4 项、三菱重工和西门子国际合作项目 7 项、中船重工、中航工业、上海汽轮机厂有限公司、东方汽轮机有限公司等校企合作项目 50 余项等。出版中文专著《热力透平密封技术》1 部、授权国家发明专利 10 项、软件著作权 6 项、透平机械领域国际著名学术期刊 ASME 和 AIAA 系列杂志发表论文 30 余篇。

报告摘要：

针对 0.2MWth 等级 SCO₂ 简单布雷顿循环系统，介绍关键动力部件向心透平和离心压气机设计、轴系冷却技术和匹配方案、向心透平和离心压气机轴端密封设计。主要内容报告：离心压气机-高速电机-向心透平整体设计方案；关键动力部件离心压气机和向心透平的气动设计和性能分析；离心压气机-高速电机-向心透平系统冷却系统隔热方法；离心压气机和向心透平轴端接触阶梯型直齿迷宫-可浮动碳环密封技术设计及性能研究。

特邀报告：哈电锅炉超临界二氧化碳发电技术研发进展

报告人：黄莺

哈尔滨锅炉厂有限责任公司锅炉研究所 所长/高级工程师

个人简介：

黄莺，硕士学位，高级工程师，长期从事新型锅炉设计、产品优化及新产业研发工作，所主持、参加的“1000MW 等级超超临界二次再热锅炉研制及应用”等多个项目获黑龙江省人民政府、机械工业联合会奖励。

报告摘要：

哈尔滨锅炉厂有限责任公司(简称“哈锅”)是国内成立最早、生产能力最大、规模最大的电站锅炉生产和压力容器制造商之一。哈锅在锅炉行业最早开始超临界二氧化碳发电设备研发，并于 2017 年获得国内首台西安热工院 5MWe 超临界二氧化碳发电试验平台锅炉设备供货合同。经过近两年不断研发投入，首台 5MWe 超临界二氧化碳试验锅炉已经基本完成供货。2019 年哈锅又新签订上海朝临动力科技有限公司 300kWe 锅炉设备及 PCHE 回热器供货合同。哈锅在这些设备的供货过程中积累了大量宝贵的设计制造经验，为超临界二氧化碳锅炉的大型化、工程化提供了坚实后盾。

特邀报告：高效低碳燃气轮机试验装置—超临界二氧化碳循环试验台建设进展

报告人：王波

中科院工程热物理研究所副研究员

个人简介：

王波，博士，副研究员，主要从事燃气轮机新型动力循环研究，负责高效低碳燃气轮机试验装置中循环试验平台的研建、参与重型燃气轮机及联合循环全工况特性建模与分析研究、国家重点研发计划国际合作火电厂水资源节约相关研究课题。

报告摘要：

中国科学院工程热物理研究所承担了国家重大科技基础设施“高效低碳燃气轮机试验装置”项目，拟在上海临港建设热功率为 5MW_{th} 的 sCO₂ 循环试验台。该试验台建成后，将为国内外高校、研究所、企业等各类用户开展 sCO₂ 循环的部件和循环性能试验提供条件。试验台为 sCO₂ 压缩机试验提供最高 4MWe 电驱动功率，驱动转速最高 40000rpm，sCO₂ 流量最大 35kg/s，入口 sCO₂ 状态可调；为 sCO₂ 透平提供不低于 23MPa/600°C 的 sCO₂ 入口条件和 3.5MW 的耗功以及相应的 sCO₂ 背压控制和减温系统；用户自主研发的回热器可以通过旁路、设备替换等进行性能试验；循环可以简单回热或者再压缩回热型式运行，为用户开展循环特性试验及研究部件在循环中的特性提供研究手段。试验台计划 2023 年建成投入使用，目前完成了项目建议书、可行性研究以及初步设计，即将开展详细设计与施工。

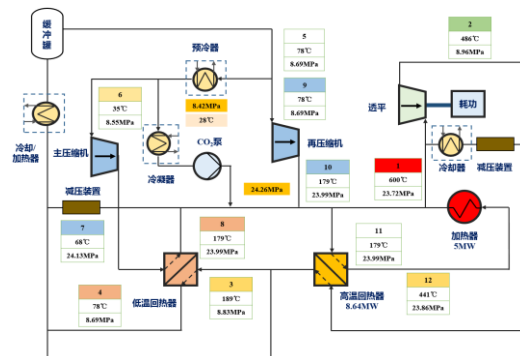


图 1 试验台原理流程图



图 2 临港试验基地

特邀报告：PCHE 发展现状及关键制造技术

报告人：王桂龙

陕西智拓固相增材制造技术有限公司

报告摘要：

1. PCHE 特点及应用领域

针对 PCHE 换热器与传统换热器相比的优势进行介绍，并阐述 PCHE 应用领域。

2. PCHE 关键制造工艺

对 PCHE 的关键制造工艺—扩散焊固相增材制造技术进行介绍，包括概念、特点及应用。

3. 陕西智拓公司 PCHE 制造领域发展策略及进展

阐述陕西智拓公司在 PCHE 制造方面的发展方向，即核心装备研制及基础工艺研发。并对目前取得的进展及 PCHE 制造业绩进行介绍。

4. 陕西智拓公司简介

特邀报告：基于超临界 CO₂ 布雷顿循环的塔式太阳能光热系统研究

报告人：周昊

浙江大学教授，能源清洁利用国家重点实验室副主任

个人简介：

周昊，浙江大学求是特聘教授、博士生导师，国家杰出青年科学基金获得者、“新世纪百千万人才工程”国家级人选、政府特殊津贴专家，现任能源清洁利用国家重点实验室副主任。在浙江大学完成本科、硕士和博士学习，为全国百篇优博获得者。1996 年起在浙江大学任教，2006 年晋升教授；曾在法国 Ecole Des Mines、英国肯特大学，澳大利亚必和必拓公司、沙特拉比格电站，南美委内瑞拉中央电站、非洲摩洛哥努尔光热电站、约旦侯赛因燃机电站等海外高校和企业进行学习和合作研究。

主要研究方向包括能源高效低污染利用、油气燃烧振动、塔式太阳能熔盐发电和储能、铁矿石烧结减排等。曾解决沙特拉比格电站 2×660MW 燃油炉严重燃烧振动国际难题。曾主持国家杰青、973 课题、国家自然科学基金、国际合作项目等数十项；曾获国家级科技奖 3 项，省部级科技奖 8 项。已发表 SCI 论文 120 余篇（其中通讯或一作论文 100 余篇），SCI 他引 1200 余次，已发表中英文著作 4 本，授权发明专利 20 余项。

报告摘要：

建立了超临界 CO₂ 再压缩布雷顿循环模型,对基于超临界 CO₂ 再压缩布雷顿循环的塔式太阳能光热系统的吸热器效率、吸热面积、镜场面积、供能比率等参数和指标进行了研究。结果表明:布雷顿循环效率随着涡轮机入口温度的升高而提高;随着涡轮机入口温度的升高,吸热器效率降低,镜场效率提高,全厂效率呈现先上升再下降的趋势,在 750℃左右达到最大;分析了涡轮机入口温度对吸热器的吸热面积和镜场面积的影响;研究了基于超临界 CO₂ 循环的塔式太阳能光热系统受季节变化和典型日的吸热器和全厂效率的变化规律。

特邀报告：MW 级 SCO_2 布雷顿循环压缩机实验研究

报告人：姜玉雁

中国科学院工程热物理研究所研究员

个人简介：

姜玉雁，中科院工程热物理所研究员，博士生导师，新工质发电团队负责人，主要从事传热、节能技术和新能源发电技术领域的科学研究和技术应用，超临界 CO_2 透平发电项目负责人，近几年带领团队从事超临界二氧化碳发电关键技术和 MW 级示范机组研究。先后主持国家自然科学基金面上项目，国家重点研发计划重大国际合作项目，科学院创新基金，作为课题负责人，承担了中国科学院战略先导科技专项(A类)，中科院重点部署项目，国家 973 重点研发计划项目。发表研究论文 90 余篇，其中 SCI 收录 30 余篇，他引 500 余次，申请/授权中日美发明专利 30 余项，其中国际专利 2 项，授权软件著作权 5 项。担任中国工程热物理学会热管专业委员会委员，全国电机工程学会透平专业委员会，科技部重点研发计划和国家自然科学基金评审专家等。2012 年入选第八批“国家千人计划”青年人才项目，2017 年获得“产学研合作创新奖”，入选“泰山产业领军人才”项目。

报告摘要：

压缩机和透平是超临界二氧化碳布雷顿循环系统的核心部件，其实验研究技术难度大、投入成本高，多年来国内外相关实验研究鲜有报道。本团队从 2016 年开始开展兆瓦级超临界二氧化碳发电关键技术实验研究，于 2018 年 9 月建成我国首座兆瓦级超临界二氧化碳压缩机测试平台，并投入运行。实验台建成后，先后完成了控制系统调试、系统联调联试，开展了二氧化碳充装和超临界二氧化碳状态调制、高速转子轻载测试等一系列实验，验证了实验系统工艺流程的可行性和可靠性，获得了一系列珍贵的实验数据，改变了超临界二氧化碳离心式压缩机数值分析缺少可靠实验数据的现状。近日，团队完成了国内首台兆瓦级超临界二氧化碳压缩机样机的测试。压缩机首次实现全载测试运行，进口总压 7.3~7.9MPa，进口总温 305.4K，实验进口状态为超临界态，且在临界点附近，压缩机运行稳定；压缩机出口总压最高达到 14.9MPa，总压比约 1.9，流量达到 12~17 kg/s，等熵绝热效率 70~80%。实验结果显示，压缩机等熵效率、工作边界、间隙泄漏量等与理论设计基本相符，从而实现了第一次对超临界二氧化碳压缩机气动设计理论和方法的验证。此外，近临界点附近压缩机运行的稳定性问题一直以来是困扰本领域研究人员的关键科学难题，本次实验测试结果对该问题进行了初步的解答。本报告将介绍大型 SCO_2 压缩机实验台的设计与运行情况，以及 MW 级发电机组用压缩机样机的实验研究进展，针对压缩机气动设计理论、结构设计和密封等问题，基于实验测试结果，分享经验与教训。

特邀报告：内燃机余热回收 CO₂ 动力循环研究

报告人：田华

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室教授

个人简介：

田华，2011 年博士毕业于天津大学并留校，2013 年、2017 年晋升副教授和特聘研究员。近年来，围绕内燃机节能减排，致力于内燃机余热回收热力循环及工质研究，先后主持参与内燃机余热回收相关的国家 973 项目、国家重点研发项目与国家自然科学基金在内的各类科研项目 20 余项。获得天津市自然科学一等奖，天津市青年拔尖人才等奖励；受邀撰写国际专著、连续担任国际 ORC 会议学术委员、并作国际国内会议邀请报告 9 次；发表 SCI 论文 90 篇，10 篇入选 ESI 高被引论文，获 SCI 他引 1591 次；授权发明专利 16 项。

报告摘要：

内燃机余热回收具有重要的节能与减排意义，但其余热的大温度梯度、工况多变特性和系统小型化要求，对传统循环余热转换理论带来挑战。报告围绕提出的 CO₂ 动力循环，从 CO₂ 工质对内燃机余热的匹配规律、CO₂ 动力循环的设计理论、CO₂ 动力循环系统的设计开发、以及 CO₂ 动力循环系统的动态仿真和控制策略进行阐述，试图回答为什么是 CO₂ 工质、如何设计 CO₂ 循环、如何开发和运行 CO₂ 系统几个关键问题。

特邀报告：国家发改委示范工程项目首台印刷板式换热器 (PCHE) 国产化研制

报告人：胡伟民

中国船舶重工集团公司第七二五研究所主任

个人简介：

胡伟民，硕士，研究员，主要从事特种换热装备及焊接工艺的研究，主持《LNG 用大型开架式气化器研制》、《4500 米载人潜水器 Ti80 球壳研制》及《全海深载人潜水器钛合金载人舱焊接与加工技术研究》等国家重大项目。

报告摘要：

印刷板式换热器 (PCHE) 是一种颠覆性的微通道换热器，具有耐高温高压、换热效率高、结构紧凑等特点，广泛应用于能源电力、石油化工、海洋工程、氢能源及军事装备等领域。本文针对国家发改委示范工程项目首台 PCHE，开展了材料与换热介质的兼容性研究和材料与制造工艺的适应性研究，制定了 PCHE 选材企业标准；开发了 PCHE 热力设计计算程序，提出了解析计算结合有限元计算的设计方法，解决了 PCHE 产品的设计难题；研究了不同材料的表面处理技术和蚀刻工艺，解决了工业级、大规格换热板片的表面缺陷问题、边缘效应问题和尺寸精度问题，完成了国内最大换热板片的批量化蚀刻加工；针对大规格换热芯体的扩散焊接，对 1:1 扩散焊接芯体进行了性能评定和解剖分析，形成了换热芯体扩散焊接质量合格判定的准则；国际首次采用真空电子束焊接技术完成换热芯体拼焊，解决了换热芯体间无变形连接难题，形成了具有完全自主知识产权的芯体拼焊技术；开发了大厚度复杂焊接结构、低应力焊接技术及窄脉冲纵波探法的超声检测工艺，解决了非标材料焊接和检测难题；探索了 PCHE 的氦质谱检验技术，制定了 PCHE 氦质谱检验规范和合格指标，突破了工业级 PCHE 的全部关键技术，完成了首台 PCHE 的集成建造，测试结果经第三方机构检验合格，出具了国产 PCHE 首个特种设备制造监督检验证书，顺利通过出厂验收。

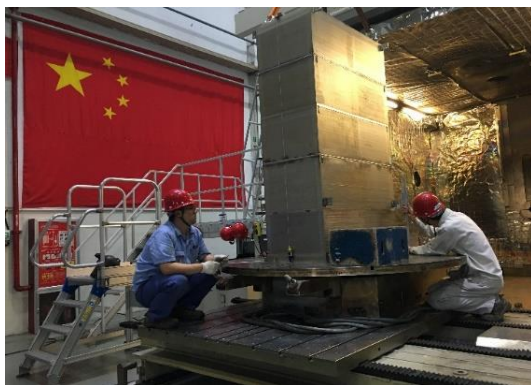


图 1 芯体电子束拼焊

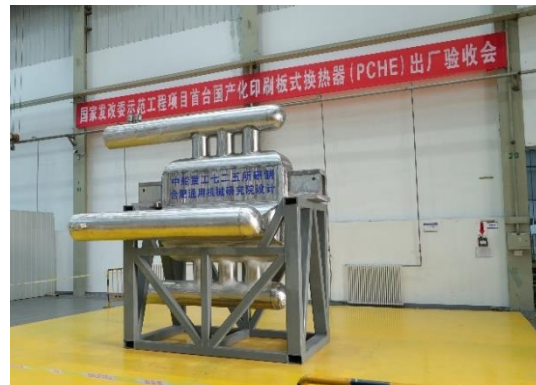


图 2 国产首台工业级 PCHE

特邀报告：近临界与超临界区内二氧化碳热质输运规律研究

报告人：雷贤良

西安交通大学副教授

个人简介：

雷贤良，工学博士，副教授，动力工程多相流国家重点实验室高温高压多相流研究所所长。2014/03，取得西安交通大学动力工程及工程热物理专业博士学位；2014/04，任西安交通大学能源与动力工程学院讲师；2015/12~2016/11，在美国北卡罗来纳州立大学核工程系访问学者；2018/03任西安交通大学能源与动力工程学院副教授，2019年6月起担任高温高压多相流研究所所长。主要从事高温高压多相流体热质输运规律研究。曾主持国家重点研发计划二级子课题，国家自然科学基金面上资助项目与青年科学基金项目，参与国家自然科学基金重点基金项目，发表超临界流体流动与传热研究相关的学术论文40多篇，被SCI、EI收录20余篇。

报告摘要：

二氧化碳由于其良好的传热性能、较低的临界参数、易于制取和物性稳定等优良特性在超临界二氧化碳布雷顿循环和跨临界二氧化碳制冷循环等动力循环中得到了广泛的应用。掌握二氧化碳在宽广运行参数下的热质输运规律，对确保超临界二氧化碳布雷顿循环等循环的安全运行具有重要意义。

二氧化碳物理性质在临界点附近呈现奇异性变化，特别是在近临界区与拟临界区内变化尤为显著。近临界区内，汽化潜热与表面张力快速降低，汽泡核化能大幅降低，导致更易发生传热恶化现象；同样在拟临界区内比热、密度等物性随温度和压力变化剧烈，工质换热特性受到显著影响。本研究专门针对近临界区与拟临界区内的二氧化碳的流动与换热特性进行了系统地实验研究，探讨了较宽广压力（6.2 MPa-10.5 MPa）参数范围内的二氧化碳热质输运规律。

同时针对二氧化碳在动态变压过程的热质传递现象进行了实验研究，分析了垂直上升管中二氧化碳在跨临界动态变压过程的动态传热特性。研究发现当受热面维持一定热负荷、压力从超临界向近临界区跨越时，壁面温度会出现显著的飞升现象，偏离泡核沸腾（DNB）发生；进一步增大压力的跨越范围，发现壁温会呈现先飞升后又逐步降低至稳定状态的变化过程。针对该现象，通过实验深入的对比分析了不同参数条件下二氧化碳在跨临界过程中的动态传热变化特性，总结了近临界区内气泡的形成规律，进而揭示了二氧化碳在跨临界过程中出现壁温飞升的形成机制。

特邀报告：金属材料在高温二氧化碳环境中的腐蚀

报告人：唐丽英

西安热工研究院研究员

个人简介：

唐丽英现任西安热工研究院有限公司电站材料技术部新技术研究所副所长，主要专业领域为高参数火电机组选材、材料蒸汽氧化性能研究等。作为子课题负责人完成了 973 计划课题、863 计划课题、国家能源应用示范课题等项目，参与制定多项电力行业标准，获省部级科学技术奖 8 项，被评为 2017 年度中国电力优秀青年工程师，2018 年度中国能源优秀科技工作者。

报告摘要：

煤基超临界二氧化碳布雷顿循环有望替代现有蒸汽朗肯循环燃煤发电机组而成为清洁煤发电技术研究的新路线，金属材料在高温 CO₂ 环境中的抗腐蚀性能是机组参数选取需要考虑的重要因素，本报告主要介绍现有超超临界燃煤发电机组常用材料在高温常压及超临界二氧化碳环境中的腐蚀行为。

基于超超临界机组蒸汽氧化经验，在材料腐蚀行为评价研究中主要关注材料化学成分、介质温度和试样表面状态等对其在高温 CO₂ 中氧化动力学和腐蚀产物结构的影响；试验材料包括马氏体耐热钢 T92 和 T91、奥氏体不锈钢 Super 304H、HR3C、TP347H 和 TP347HFG 以及镍基合金 617B 和 625 等，试验温度 550℃-650℃，压力包括常压和 25MPa，试验时间最长达 2000h。对暴露不同时间的试样称重获得氧化动力学信息，利用 SEM（扫描电子显微镜）对样品表面腐蚀产物形貌进行观察，利用 SEM 和 TEM（透射电子显微镜）对腐蚀产物结构和元素分布进行分析。

结果发现，各种材料在高温 CO₂ 中的氧化行为和氧化层结构与高温蒸汽中非常相似，氧化速率均随着试验温度的升高而明显增加，随材料 Cr 含量的降低而减缓，表面机械变形可明显降低奥氏体不锈钢的腐蚀速率。不同的是，马氏体耐热钢 T92 和 T91 在高温 CO₂ 环境中的抗腐蚀性能明显低于高温蒸汽，氧化层在高温 CO₂ 试验过程中即发生开裂，不具有保护性，导致氧化动力学在稳定状态趋于直线规律，在邻近氧化层的基体中出现厚度为几百微米量级的增碳区；奥氏体不锈钢增碳区明显小于奥氏体不锈钢，镍基合金抗腐蚀性能优于奥氏体不锈钢。

特邀报告：人工智能算法在超临界二氧化碳透平机械优化设计中的应用

报告人：谢永慧

西安交通大学教授

个人简介：

谢永慧，西安交通大学能源与动力工程学院教授，博士生导师。主要研究方向为透平机械强度振动及安全性、透平机械气动热力学、燃气轮机透平高温部件冷却、大规模高速计算方法及人工智能应用。以第一完成人获得国家科技进步二等奖 1 项、中国机械工业科学技术奖一等奖 1 项、“中国好设计”银奖 1 项；共主持包括 863 计划专题、国家自然科学基金、国防预研项目在内的 100 余项课题；发表学术论文 300 多篇（SCI 收录 93 篇、EI 收录 167 篇）；出版专著 1 本（第 1 作者），译著 3 本；获得授权发明专利 71 项，软件著作权 43 件。

报告摘要：

透平和压缩机是超临界二氧化碳布雷顿循环系统的核心部件，具有结构紧凑、能量密度大、气动和温度载荷高、工质物性变化剧烈等特点，特别是压缩机入口参数在临界点附近，因此气动设计非常困难。此外，透平和压缩机转速高，要获得良好的转子动力学特性，需要对众多几何参数进行优化，优化的可行域空间大，计算工作量大。传统透平机械优化设计方法严重依赖人工经验，精准度差，设计和优化周期长，适应能力差。

本团队开发了超临界二氧化碳透平、压缩机气动设计和转子设计的智能优化方法，可以高效、自适应地搜索设计空间，实现稳定快速的寻优。具体设计效果如下：(1) 将机器学习中的 Gauss 过程回归与模拟退火方法相结合，开发了透平和压缩机气动设计快速自适应优化方法，在相同优化效果下，优化速度提升至传统优化方法的 5 倍，且无需人为干预；(2) 采用 Kriging 方法建立了超临界二氧化碳透平机械转子动力学特性优化代理模型，结合全局优化算法对转子进行了优化设计，获得了最优转子结构，提高了转子的振动安全性。

通过上述工作可以看出，人工智能算法的引入有助于获得优化的超临界二氧化碳透平机械设计方案。

特邀报告：高效紧凑式换热器优化设计方法研究

报告人：郭江峰

中国科学院工程热物理研究所研究员

个人简介：

1983 年生，山东郓城人，中国科学院大学岗位教授。长期从事传热强化理论与节能技术、换热系统不可逆优化理论研究以及高效紧凑式换热器研发等工作。已主持 2 项国家自然科学基金项目、1 项国家重点研发计划课题、1 项国家“两机”重大专项基础研究课题等，并参与国家 973 计划、中科院先导专项等众多国家级及企业委托项目。以第 1 作者（或通讯作者）发表学术论文 80 余篇，其中近 50 篇被 SCI 收录，总引用频次超过 1100 次，H-index 为 21。换热器热力学分析及优化方法、超临界 CO₂ 换热器协同优化等工作作为章节发表在 Springer 等出版的两部英文著作中。1 篇 1 作论文入选“中国 100 篇最具影响优秀国内学术论文”，1 篇 1 作论文荣获“北京青年优秀科技论文奖”，还曾获“全国百篇优秀博士学位论文”提名，中科院卢嘉锡青年人才奖等。

报告摘要：

换热器是能源动力、石油化工等领域的关键设备，对我国节能减排战略的实施具有重要意义，而且对于超临界 CO₂ 发电系统稳定运行、热效率提升具有重要作用。本报告从经典热力学角度出发论述换热器多参数多目标的优化理论，以及现有经典理论存在的问题和解决办法。并进一步结合超临界 CO₂ 物性剧烈变化的特点，论述强变物性条件下换热器的协同优化思想，并探讨在不增加或少量增加泵功、面积等成本前提条件下实现换热性能提升的途径和方法，为超临界 CO₂ 发电系统的规模化应用提供理论和技术支持。

特邀报告：超临界二氧化碳传热特性分析及超临界工质传热特性模 化研究

报告人：李会雄
西安交通大学教授

个人简介：

西安交通大学教授，博士生导师；兼任《Journal of Chongqing University》(English edition)编委，《Thermophysics and Aeromechanics》国际顾问委员会委员，西安交通大学能源与动力工程学院学术委员会委员，西安交通大学化学工程与技术学院-学位评定分委员会委员，中国空间学会微重力科学与应用研究专业委员会委员，陕西省流量与容量计量技术委员会副主任委员。

主要研究方向包括多相流与传热、锅炉水动力、反应堆热工水力、多相流数值模拟。曾先后主持国家重点研发计划项目课题 1 项，国家 973 项目二级子课题 2 项，国家自然科学基金资助项目 4 项，教育部博士点基金项目、国防预研基金项目和国家教委留学回国人员基金等项目各 1 项，参与完成国家级、省部级及企业合作项目等 30 余项，发表学术论文 150 余篇，合作出版教材 1 部。

长期从事超临界水和超临界 CO₂ 的流动与传热特性研究，在超临界 CO₂ 流动与传热研究方面积累了比较丰富的经验。

报告摘要：

以超临界 CO₂ 为工质的动力循环系统因其具有的较高循环效率而受到越来越多学者的关注。由于在该系统中存在大量超临界流体换热部件，因此在全工况、宽参数范围内系统地研究超临界 CO₂ 的流动与换热特性对该系统的设计、安全运行及系统内关键设备优化均具有重要意义。本课题组搭建了超临界 CO₂ 流动与换热实验台(High-TaP-SCO₂)，在宽广的参数范围内对超临界 CO₂ 流动与换热特性开展了研究。发现在不同的质量流速条件下存在三种不同形式的传热恶化：无壁温峰值的传热恶化($G \leq 300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)；具有平缓壁温峰值的传热恶化($300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \leq G \leq 800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)；具有壁温剧烈尖峰的传热恶化($G > 800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。针对三种不同形式的传热恶化现象开展了数值模拟工作，揭示了不同质量流速下不同形式的传热恶化现象发生的机理。

不同超临界流体之间的传热特性存在有一定的相似性。本课题组对现有关于超临界流体传热的模化方法进行总结，并通过实验数据对现有模化方法预测的准确性进行了评价分析；发现在非传热恶化工况条件下，可利用现有的模化准则通过超临界 CO₂ 的传热数据来预测超临界水的传热，其中 Zahlan 模化准则对非传热恶化工况的预测效果最好；对于传热恶化工况，现有的模化准则的预测结果与实验偏差较大。在对比、分析不同流体物性参数模化关系的基础上，本课题组提出了适用于超临界流体非传热恶化和传热恶化工况的新的模化准则，并通过实验数据验证该模化准则具有良好的预测精度；进一步深入的研究工作正在进行当中。

特邀报告：超临界 CO₂ 的换热特性与系统构建

报告人：肖刚

浙江大学教授

个人简介：

肖刚，1979 年生，中共党员，教授、博导，浙江大学求是青年学者、浙江省杰出青年基金获得者，现任热能工程研究所副所长。一直从事太阳能热发电、先进热功转换与能量高效利用等方面的教学和科研工作。近五年来，主持纵向项目 8 项、横向项目 12 项；以第一发明人获批国际发明专利 8 件、中国发明 23 件、软著 8 件；发表 SCI 论文 36 篇，其中 30 篇为第一/通讯作者，SCI 论文被引用 1423 次。出版国内外第一本《太阳能》教材、出版国内第一部专注工质传热传质特性和循环特性的学术专著《斯特林循环分析与发动机设计》；主持编制 1 部太阳能联盟标准《塔式太阳能液体介质吸热器单元热性能测试方法》（报批稿）。

报告摘要：

超临界 CO₂ 布雷顿循环具有效率高、结构紧凑等优势，能够应用于太阳能、核能、化石燃料以及余热利用等领域。浙江大学研究团队较为系统地开展了超临界 CO₂ 的流动换热特性研究，建立了 50kW_{th} 级的超临界 CO₂ 循环特性（流量 60kg/h）测试平台。研究了 CO₂ 在 30~500℃、7~15MPa 范围内的换热特性，发现 CO₂ 在超临界点附近区域的特性变化剧烈，实验结果与经典换热公式的差距较大；在换热温度高于 100℃后，其特性的变化呈线性关系。回热器采用梯形通道结构 PCHE，已完成 PCHE 样片设计与制造，其回热度可达到 80%。基于超临界二氧化碳循环试验台的测试结果以及 Dymola 动态模拟软件，利用 Modelica 语言建立了超临界 CO₂ 的动态模型，开展基于试验台的模拟验证。实验与模拟结果显示，系统内的储热模块能够有效减缓工况变化带来的脉动冲击，也会增加系统的热平衡时间。拟基于杭州青山湖 MW_{th} 级太阳能塔式试验平台，建立百千瓦级基于太阳能高温热化学储热的超临界 CO₂ 系统。

特邀报告：受热通道内超临界二氧化碳流动不稳定性研究

报告人：张一帆

西安热工研究院所长助理

个人简介：

长期从事高效清洁发电领域的前沿科学问题和关键技术问题的研究工作。目前为西安热工研究院有限公司超临界二氧化碳发电项目研究团队的技术骨干，负责系统优化设计、动态仿真等工作。

负责国家重点研发计划项目子课题 2 项，国家自然科学基金项目 1 项，西安热工研究院研发基金项目 1 项；此外，作为技术负责人负责中国华能集团科技项目 1 项，作为技术骨干参与国家和省部级（含中央企业）科研项目 10 余项。

发表论文 41 篇，其中 ESI 高被引论文 1 篇（一作，截止 2019 年 10 月单篇被引 140 次），SCI 论文 16 篇，EI 论文 12 篇，合作出版英文专著 1 部；获得中国电机工程学会优秀论文一等奖 2 次（2016 年，2017 年）；授权专利 60 余项，其中发明专利 22 项；登记软件著作权 2 项。

报告摘要：

超临界二氧化碳布雷顿循环发电系统以其优秀的循环热效率和广泛的能源适应性，备受世界各国学者的关注。但是，作为新型动力系统，超临界二氧化碳布雷顿循环发电系统中仍有一些机理性科学问题尚未明晰，超临界二氧化碳流动不稳定性便是其中之一。超临界二氧化碳流动不稳定性是一种类似于亚临界两相流不稳定性的超临界流体流动不稳定性，该不稳定性主要体现为换热管道内工质的整体脉动和管间脉动。出现此类现象时会造成管道震动、传热恶化等问题，严重时会造成机组停机和关键设备损毁等重大生产事故。

针对上述问题，作者建立了受热通道内超临界二氧化碳流动不稳定性的计算模型。该模型充分考虑了超临界二氧化碳在拟临界点附近物性变化剧烈的特点，并引入了管壁金属蓄热和管壁金属轴向导热的影响。经验证，模型可以准确地预测和分析受热通道内超临界二氧化碳流动不稳定性的特点，可以精确的获取发生流动不稳定性的界限热负荷。

特邀报告：高温高压印刷电路板换热器流动传热特性和制造工艺研究

报告人：马挺

西安交通大学能动学院，教授

个人简介：

马挺，博士，教授，博士生导师，2012年毕业于西安交通大学能动学院获博士学位并留校任教，先后在美国 University of Nevada Las Vegas 和 Virginia Tech 访学，2019年入选西安交通大学青年拔尖人才支持计划 A 类。研究兴趣为高温/高压/高热流强化传热、高效热电转换及新型紧凑式高温高压换热器，主持国防科技创新特区项目、国家自然科学基金面上/青年项目、装备预研教育部联合基金、教育部博士点基金、中国博士后科学基金特别资助项目以及来自于中国核动力院、航天五院、航天六院、中国工程物理研究院等研究所和企业课题。撰写英文专著 2 章，发表国际期刊论文 50 余篇，担任国际会议分会主席 6 次，作邀请报告（Keynote /Invited）10 余次，担任 ASME Journal of Solar Energy Engineering 和 Journal of Enhanced Heat Transfer 副主编、Fluid Dynamics & Materials Processing 和《工业加热》编委、Renewable and Sustainable Energy Reviews 特邀编辑，作为主要完成人获 2012 年教育部技术发明一等奖。

报告摘要：

印刷电路板换热器作为一种新型的高效紧凑式高温高压微细通道换热器，在超高温气冷堆和超临界二氧化碳布雷顿系统具有重要的应用前景，相对于传统的管壳式换热器，印刷电路板换热器具有更好的紧凑度和换热效率，因此在相同换热量下能够大幅度减小换热器的体积和重量。然而，印刷电路板式换热器在应用于超高温气冷堆和超临界二氧化碳布雷顿系统过程中还面临着来自于流动、传热、化学蚀刻和扩散焊接等方面的挑战。近十年来，本团队围绕上述问题开展了相关研究，本报告将主要从以下几个方面来汇报本团队的研究工作：（1）高温氦气在印刷电路板微细通道内部的流动传热特性；（2）超临界二氧化碳在印刷电路板微细通道内部的流动传热特性；（3）适用于印刷电路板换热器的流动不均匀性数学预测模型及性能分析；（4）印刷电路板换热器的化学蚀刻和扩散焊接机理研究。

以熔盐为热源的超临界二氧化碳再压缩布雷顿循环的动态建模和瞬态模拟

周攀

EDF（中国）投资有限公司，pan.zhou@edf.fr

摘要：超临界二氧化碳发电循环是一种具有高热效率和紧凑型涡轮机械的发电循环。它有降低太阳能光热发电技术的平均电价并且提高竞争力的潜力。本文选取了一个应用于太阳能光热发电、以熔盐为吸热热源的再压缩-间冷-预热超临界二氧化碳布雷顿循环作为研究目标进行动态建模和瞬态模拟，循环详细图见图一。该循环 100%利用了熔融盐在 290 – 565 摄氏度的温度区间的储热能力。在冷端方面，本循环采用间接空冷，即二氧化碳由水冷却，水在闭环中由空气冷却。此外，库存控制系统的应用可帮助调节系统负荷并在启停过程中起到储存作用。调节系统中的预压缩机（PC）的转速也是调节负荷的另一种措施。

在以 100%熔盐利用率为设计前提下，我们进行了循环的运行参数和整体效率的优化计算。所有设备均通过内部代码进行设计和优化，从而为设备提供了初步的几何结构并能够用于动态建模和仿真。系统的动态物理模型是基于已开发的设备动态模块，用 Modelica 语言在 Dymola 平台中编译的。在这个动态模型的基础上，我们设置了快速负载的四种模拟方案和关键的技术限制，例如换热器的最大温度梯度。关键方案成型之后，我们进行了敏感性分析以助于了解系统的动态特性，并且在 MATLAB & SIMULINK 中提出并设计了用于系统保护、调节和性能优化的全局操作和控制策略，以满足预先定义的性能标准。基于在 MATLAB & SIMULINK 中设计优化的控制器参数和搭建好的动态模型，我们进行了用不同策略控制的系统升降负荷的仿真。

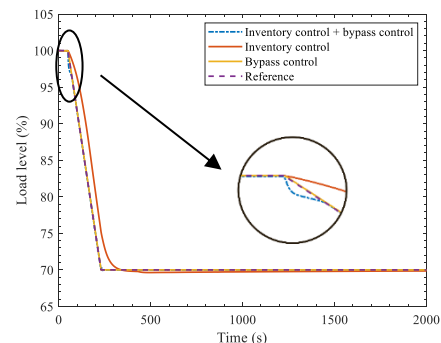
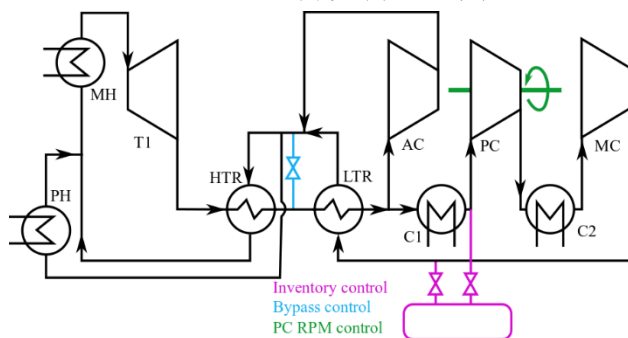


图 1 十兆瓦再压缩-间冷-预热超临界二氧化碳布雷顿循环系统 图 2 不同控制逻辑下的系统降负荷曲线

关键词：再压缩-间冷-预热超临界二氧化碳布雷顿循环；动态建模；部分负荷控制逻辑

作者简介：周攀，硕士，主要从事发电系统的静态和动态仿真，参与首航节能-EDF 10MWe 超临界二氧化碳循环项目

使用 CO₂ 工质的波箔型箔片止推轴承的建模方法比较

秦侃

西北工业大学 kan.qin@nwpu.edu.cn

摘要: 不同形式的雷诺方程被广泛应用于空气循环机械的箔式推力轴承的性能预测。当分析在高密度 CO₂ 下工作的轴承时, 计算流体力学可以获得更精确的结果, 特别是在高转速下。同时, 平箔片和波箔的结构变形也需要考虑。对于某些工况下, 由粘性加热效应引起的温度增长也需要被考虑。箔片轴承中的多物理效应, 包括流体流动、结构变形和粘性加热, 都会增加建模的复杂程度和轴承性能预测。本文的目的是回顾和比较在不同载荷和转速工作下, 使用 CO₂ 作为工质的箔片推力轴承的不同建模方法。对于稳态性能, 湍流雷诺方程和计算流体力学的结果在低负荷的箔片推力轴承中非常一致。然而, 在高负荷工况下, 湍流雷诺方程和计算流体动力学方法之间存在着很大的差异。这里必须采用计算流体力学方法, 因为离心惯性效应变得显著。同时, 与转子和平箔片的初始分离相比, 相应的变形显著, 因此需要考虑平箔片的变形。当转速大于 30000 转/分时, 温度升高引起的附加变形在很大程度上改变了转子和平箔片之间的分离。本文为超临界 CO₂ 条件下波箔型箔片推力轴承的建模方法的选择提供了建议。

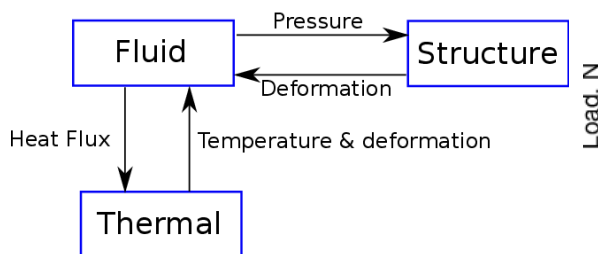


图 1 流固热耦合示意图

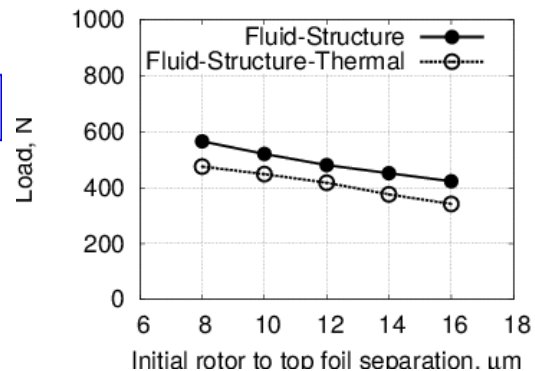


图 2 止推力对比图

关键词: 箔片轴承; 止推轴承; 二氧化碳

作者简介: 秦侃, 博士, 助理教授, 主要从事水下动力推进与水动力学方面的研究, 目前主持国防基础科研、国家自然科学基金、陕西省自然科学基金和装备预研船舶联合基金等项目。

基金资助: 国家自然科学基金(51805435)和陕西省自然科学基金(2019JQ-159)。

基于超临界 CO₂ 径流式透平尺寸及运转参数的一维设计

齐建荟

山东大学, j.qi@sdu.edu.cn

摘要: 超临界 CO₂ (sCO₂) 动力循环因其能量密度大, 热效率高, 适用范围广等优势得到了学界的广泛关注。本研究针对 sCO₂ 径流式透平的设计, 使用自研的一维仿真软件 TOPGEN 对 100kW 的径流式透平进行了批量运算。同时根据设定的限定条件, 探究了给定功率下设计可行区域随着功率的迁移特性。本研究将对中小型 sCO₂ 径流式透平的设计提供新的思路。

超临界二氧化碳空冷换热器空气侧传热特性数值模拟

李逍霄

重庆大学能源与动力工程学院, Xiao.l@cqu.edu.cn

摘要: 超临界二氧化碳 (CO₂) 动力循环是一种新型高效的动力循环, 在近年来受到了国内外学者的广泛关注。研究表明, 超临界 CO₂ 在临界区附近受到显著的浮升力作用, 使其在水平管道或者倾斜管道流动传热时管内温度分布极为不均, 呈现出如图 1 所示的“上热下冷”的温度分布。这一特性使得基于超临界 CO₂ 动力循环设计的空冷换热器空气侧的传热特性与传统空冷换热器的传热特性有较大不同。浮升力造成的 CO₂ 水平圆管或倾斜圆管管壁的温度分布不均将造成管外翅片的温度分布不均, 从而影响空气侧的传热特性。因此, 直接使用传统空冷换热器在空气侧的对流传热关联式会存在较大误差。本研究以超临界 CO₂ 空冷换热器空气侧传热特性与强化方法为研究对象, 基于文献中超临界二氧化碳水平管内管壁的温度分布, 模拟了环形翅片管空冷换热器的传热性能并与传统的温度均匀分布的翅片管进行对比。针对其存在的问题, 本文提出了改变进风方向、移动环形翅片中心位置的强化传热方法。结果表明, 与管内温度均匀分布的空冷换热器相比, 当管壁平均温度相同时, 温度分布为“上热下冷”的空冷换热器在相同条件下换热量更低。当风速分别为 3-6 m/s 时, 换热器的散热量对应下降 1.52-2.67%。通过改变进风方向和移动翅片位置可以有效改善换热情况, 换热量通过改变进风方向可以提高约 4-5%; 移动环形翅片中心位置可以提高约 5-9%。

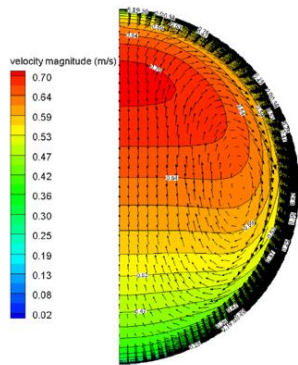


图 1 超临界二氧化碳的浮升力效应

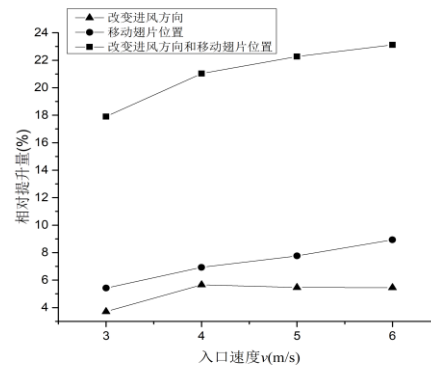


图 2 强化换热优化效果

关键词: 空冷换热器; 超临界二氧化碳; 浮升力效应

作者简介: 李逍霄, 博士, 讲师, 主要从事超临界二氧化碳空冷系统研究, 主持国家自然科学基金青年项目。

基金资助: 国家自然科学基金青年基金 (51906022)

超临界 CO₂ 管内对流传热特性及流量分配规律研究

颜建国, 郭鹏程, 张巧玲

西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048

摘要: 掌握并联换热通道内超临界 CO₂ 传热特性及流量分配规律对超临界 CO₂ 动力循环的设计和优化具有重要意义。本文开展了超临界 CO₂ 在内径 2 mm 水平并联圆管内的传热及流量分配试验研究, 分析了热流密度、系统压力、质量流量等工况参数对超临界 CO₂ 传热及流量分配的影响规律, 探讨了变物性、浮升力等效应对超临界 CO₂ 传热的影响。试验参数范围: 系统压力 7.5~8.5 MPa, 质量流速 300~800 kg/m² s, 热流密度 50~200 kW/m², 流体温度 20~100 °C。结果表明, 当并联管支路受热不均匀时, 流量分配将发生偏差。受热强的支路, 工质流量将降低, 为此易发生传热恶化现象, 讨论了该类工况(高热流、低流速)下的传热特征及传热关联式。流量偏差现象随着热流偏差的增大而加剧, 随着压力和流量的增加而受到抑制。研究成果为超临界 CO₂ 动力循环换热装置的设计和 optimization 提供一定的理论基础与技术支持。

关键词: 超临界 CO₂, 传热, 流量分配, 传热恶化, 超临界流体

超临界二氧化碳太阳能热发电关键技术研究

高炜, 李红智, 张磊, 张一帆, 杨玉, 吴帅帅

西安热工研究院有限公司, gaowei@tpri.com.cn

摘要: 采用清洁能源代替传统化石能源发电已经成为不可逆转的趋势, 在各种新能源当中太阳能是一种无污染、分布广、体量巨大、取之不尽用之不竭的能源。光热发电近年来发展迅速, 与光伏发电相比, 最大的优势是可以采用相对廉价的储热方式来储存能源, 从而解决太阳能发电间歇性对于电网冲击的问题。同时, 太阳能光热发电理论上可以将太阳能聚焦到接近太阳温度的极高温, 因此可以达到非常高的热效率。目前阻碍太阳能热发电推广的根本性原因有两个: 第一, 发电成本相对较高, 太阳能热发电技术属于发展初期, 尚未形成产业规模, 但是该技术的初投资又比较大, 许多相关产品在初次制造时需要投入研制费、模具费等, 因此成本很高; 第二, 效率优势尚未体现, 目前塔式太阳能光热发电的规模最大, 一般在 50MW-100MW, 有的实验机组更小, 对于普通蒸汽发电, 这样规模机组效率并不高。而超临界二氧化碳发电技术的出现正好解决了太阳能热发电的困难。超临界二氧化碳发电的优势是: 1、热效率高, 在温度越高时优势更加明显; 2、响应快, 适合于太阳能发电功率频繁变化的场合; 3、其运行温度区间可以与储能更好的结合。本文总结了超临界二氧化碳发电中各项关键性技术, 包括: 集热、热力循环设计、系统设计、储热等。论述了超临界二氧化碳太阳能发电的优势、潜力、瓶颈问题、发展趋势。

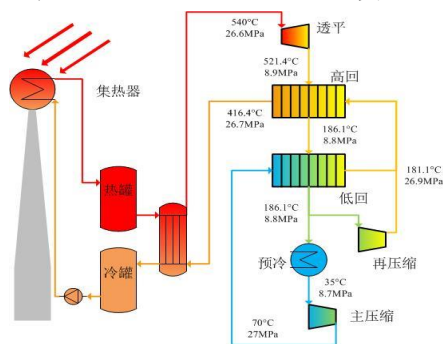


图 1 塔式超临界二氧化碳发电系统

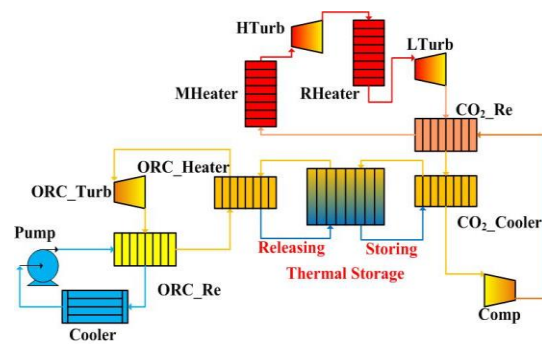


图 2 超临界二氧化碳-ORC 联合发电系统

关键词: 太阳能、超临界二氧化碳循环、储热

作者简介: 高炜, 博士, 主要从事超临界二氧化碳循环系统设计, 参与华能集团“超临界二氧化碳发电系统集成及试验平台建设”项目, 参与“光热超临界 CO2 循环发电系统构建及系统集成”。

法国电力-首航 10 兆瓦超临界二氧化碳循环在光热发电项目中的应 用

熊一力

法国电力集团 研发部门 yili.xiong@edf.fr

摘要：超临界二氧化碳发电技术，由于其高效率、紧凑度高等优点，被认为是能有效降低光热电站度电成本（LCOE）的一种创新性技术。法国电力集团（Electricite De France）与首航节能集团于 2018 年五月签署合作协议，合作改造首航敦煌 10 兆瓦塔式光热发电项目，以应用 10 兆瓦超临界二氧化碳发电循环。此项目以成为首个运行的工业级超临界二氧化碳发电循环在熔融盐光热电站中的应用范例为目标，旨在验证系统设计、关键设备的设计和运行、系统的运行和控制策略等关键技术问题，为其商业应用提供宝贵的经验反馈。本项目预计 2020 年底开始试运行。

首航节能集团的 10 兆瓦塔式光热电站于 2016 年开始运行，该项目配备 15 小时二元熔融盐储热系统。本项目将对蒸汽发电循环进行改建，保留现存集热及储热系统的主要设计。如下图所示，本项目中的超临界二氧化碳发电循环采用了再压缩-间冷-预热设计，在保证系统高效率的同时，充分利用熔融盐/二氧化碳加热器的高温差。间冷技术是利用在主压缩机和预压缩机之间设置的冷却器，降低低温回热器（LTR）的进口温度并减少压缩机消耗。此外，预热器的设计可利用主加热器出口的低温熔融盐的低品位热能，预热低温回热器出口的冷流体，再进入到主加热器中，最大化提高熔融盐的热利用率。

本报告将展示项目的概念系统设计以及项目进展。本文对系统设计、技术路线选择以及将超临界二氧化碳循环整合应用于光热发电系统中的问题展开了讨论。同时也对于主要设备设计、子系统设计和运行策略的技术痛点展开了详细分析，包括压缩机在近临界点的设计与运行策略、高温透平的设计与运行策略、系统的启停方案、换热器预热方案（以规避熔融盐冷却结晶）以及负荷调节方案等。初步解决方案的构想也在本文中进行了研讨。

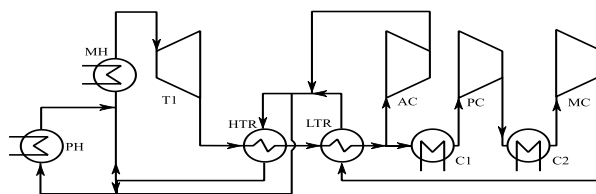


图 1 再压缩-间冷-预热超临界二氧化碳循环

图 2 首航 10 兆瓦光热电站

关键词：系统设计与优化；光热发电；超临界二氧化碳循环；再压缩循环

作者简介：熊一力，硕士，项目负责人，主要从事超临界二氧化碳/光热发电/电储热技术的研究，主持并参与法国电力-首航节能 10 兆瓦光热电站的超临界二氧化碳循环改造项目

基金资助：内部资金

超临界二氧化碳工质管屏流量分配特性分析

闫凯, 杨涛, 张建文, 乌晓江

上海锅炉厂有限公司 上海 200245 yankai@shanghai-electric.com

摘要: 超临界二氧化碳循环发电技术近年来在民用及军用领域受到极大关注。本文以 CO₂ 工质物性为基础对比分析了多种影响因素对超临界 CO₂ 工质管屏流量分配特性的影响。在相同入口参数、几何条件和加热条件下, 水工质条件下的管屏阻力高于 CO₂ 工质条件。CO₂ 工质条件下重位压降占整个管屏阻力的比例要高于水工质。同时因加热引起的密度差变化导致的重位压降的变化在 CO₂ 工质条件下要明显高于水工质条件。CO₂ 工质条件下的摩擦压降高于水工质条件, 而摩擦压降的变化在 CO₂ 工质条件也高于水工质条件, 但变化程度低于重位压降的变化, 如图 1 所示。总体而言, CO₂ 工质和水工质条件下的流量分配均体现出了明显的负流量特性, 但由于 CO₂ 工质条件下的重位压降变化较大, CO₂ 工质条件下的流量分配特性要缓于水工质条件。随着热偏差系数和加热功率的增加, 摩擦压降增加的幅度大于重位压降减小的幅度, 管屏内工质流量分配的负流量特性增强。随着流量系数的增加, 管屏内管子的流量几乎等比例增加, 但将管屏管子流量规整化后, 可以发现, 当流量系数较小时, 管屏内工质流量分配呈正流量特性 (如图 2 所示), 而当流量系数增加到一定程度后, 管屏内工质流量分配呈负流量特性。随着流量系数的增加, 摩擦压降的增加幅度小于重位压降减小的幅度, 管屏流量分配趋于一定程度的平缓, 正流量特性的影响有所增加。

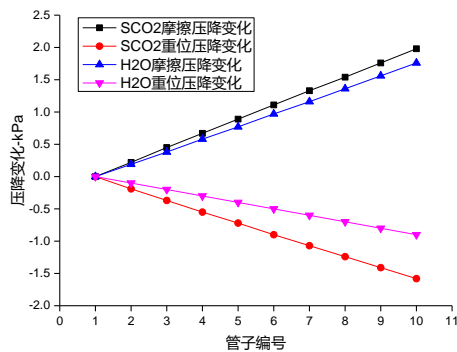


图 1 不同工质压降成分变化

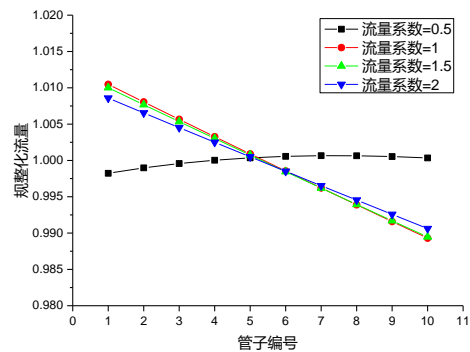


图 2 流量系数对分配特性的影响

关键词: CO₂; 流量分配; 流量特性; 重位压降; 摩擦压降

作者简介: 闫凯, 博士, 高级工程师, 主要从事富氧燃烧、太阳能光热和超临界二氧化碳循环等方面的研究, 主持/参与国家重点研发计划资助 (2018YFB060410 2、2018YFB0605305)、上海市青年科技启明星计划资助 (17QB1400900) 项目。

塔式光热超临界二氧化碳循环发电系统设计优化

张春伟, 于彬

哈尔滨电气集团有限公司中央研究院 zhangcw @harbin-electric.com

摘要: 随着技术进步和产业升级加快, 太阳能光热发电作为全球能源转型的重要领域, 将成为我国“十三五”期间着力发展的重要产业。超临界 CO₂(S-CO₂) 由于其诸多优秀的热力学特性作为传热流体和工作流体直接用于布雷顿循环发电, 既能消除减小主设备尺寸, 降低系统的安装、维护成本和电站初投资, 又能提高电站效率, 备受国内外研究者的青睐。为了研究适用于塔式光热的 10MW 等级超临界二氧化碳发电系统, 对目前文献中涵盖的十余种循环方案进行对比分析, 筛选出三种较为合适的循环布置方案。针对这三种方案分别建立热力学模型, 在限定熔盐出口温度变化范围 290°C~380°C 情况下, 分析了系统最低压力和系统最高压力对系统效率的影响。分析发现, 存在最优系统最低压力和最优熔盐出口温度使得系统效率最优, 而系统效率与系统最高压力正相关, 效率最高的方案都是再压缩分流方案。

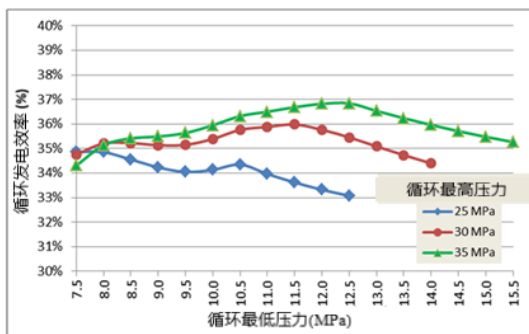


图 1 回热循环最低压力和循环最高压力对系统效率的影响

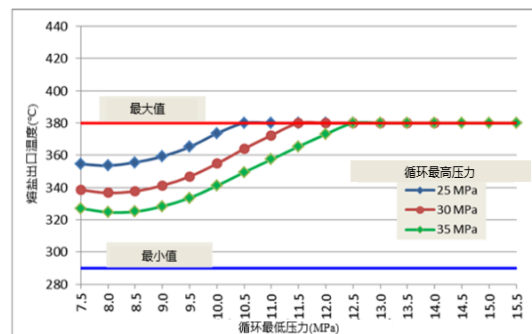


图 2 循环最低压力和循环最高压力对热源出口温度的影响

关键词: 塔式光热; 超临界二氧化碳; 循环方案设计; 参数优化

作者简介: 张春伟, 男, 在读博士, 高级工程师, 主要从事新能源系统及高低压换热设备研发

超临界二氧化碳循环发电系统冷却器技术研究

赵晓利, 谢学旺, 梁一钊

中国电建集团公司河北省电力勘测设计研究院有限公司

hbed2189@163.com

摘要: 超临界二氧化碳 (SCO₂) 发电技术是清洁低碳发电的主流趋势之一。冷却器的效率及压损直接影响到主压缩机进口参数, 进而影响整个系统的循环效率。西安热工院的吴闯等人在对超临界二氧化碳燃煤系统仿真研究中表明随着主压缩机入口温度的变化循环效率有着 3% 以上的浮动, 换热器压损的大小也会带来 1% 以上的浮动。本文以印刷电路板式换热器 (PCHE) 作为预冷器, 分别将空气、水、跨临界二氧化碳作为预冷器冷侧工质进行了计算、对比与分析。研究结果表明, 采用跨临界二氧化碳作为预冷器的冷侧工质可以在保证高换热效率的同时使压损降到最低。

关键词: 超临界二氧化碳、发电系统、预冷器、印刷电路板式换热器、换热效率、压损、冷侧工质

作者简介: 赵晓利, 学士, 教授级高级工程师, 主要从事火力发电厂设计研究。谢学旺, 博士后, 高级工程师, 主要从事火力发电厂设计研究。参与课题“超高参数高效二氧化碳燃煤发电基础理论与关键技术研究”。

超临界 CO₂ 再压缩布雷顿循环中两级小流量离心式压缩机优化设计

张晓丹 周帅 张小波 靳亚峰 杨佐卫 邓国梁

东方汽轮机有限公司 496511460@qq.com

摘要：本文对某超临界 CO₂ 再压缩布雷顿循环中的再压缩机进行气动设计，该再压缩机流量系数小，叶轮出口叶高小。文章首先从一维角度对压缩机级次选取进行了论证，对各部件进行一维设计，得出各部件初步的一维几何参数。然后从三维角度对该压缩机进行了全面优化，包括对两级叶轮的优化，以及两级之间弯道与回流器的优化。对叶轮的优化工作集中在叶片厚度、叶片载荷分布以及叶片出口几何角等方面，优化目标是提高叶轮的效率及做功能力。经优化，叶轮内部流动情况良好，第一级叶轮内部 B2B 面流线图见图 1。对回流器的优化工作集中于回流器叶片载荷分布、叶片出口几何角分布、L 型弯道形状等方面，优化目标主要是回流器部分出口气流角的均匀性，最大限度缩减气流不均匀性对下游叶轮的影响。优化前后第二级叶轮入口的气流角分布对比见图 2，第二级叶轮入口绝对气流角仅在 $\pm 8^\circ$ 以内变化。经优化，该小流量系数离心压缩机内部流动情况良好，达到效率及压比要求。

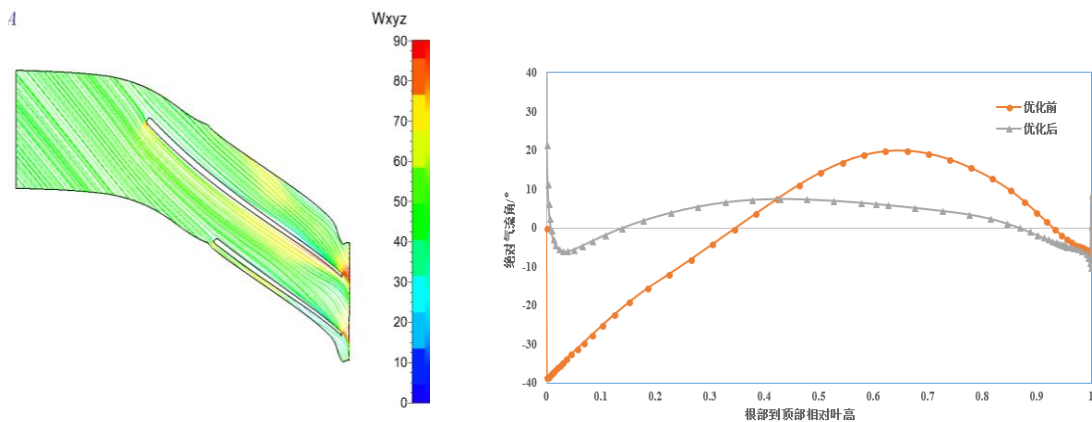


图 1 优化后第一级叶轮 B2B 面流线图 图 2 优化前后第二级叶轮入口绝对气流角对比

关键词：超临界 CO₂；离心式压缩机；优化设计

作者简介：张晓丹，硕士，主要从事透平、压缩机气动研究，参与多个新能源项目。

工质纯度对 sCO₂ 布雷顿循环系统预冷器性能的影响

张磊

西安热工研究院有限公司, zhangleix@tpri.com.cn

摘要: 大功率超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统复杂、容积庞大、部件繁复、流动死区较多, 采用抽-充置换工艺仍无法保证二氧化碳工质的纯度。在该系统中, 预冷器担负着调控二氧化碳冷却温度的重要作用, 其服役工况十分接近二氧化碳的临界参数。在临界参数附近, 工质纯度对工质物性进而对预冷器性能会产生巨大影响。为了揭示工质纯度对预冷器特性参数的影响规律, 本文采用数值模拟方法预测了不同纯度二氧化碳工质在预冷器中的流动传热过程。考察了工质纯度、雷诺数 (Re) 对预冷器流动传热特性的影响。研究表明在 $Re=5000\sim 50000$ 范围内, 当工质纯度由 100%降低至 95%时, 预冷器传热系数 Nu 降低 28~49 个百分点, 预冷器阻力系数 f 未出现明显变化。 Re 越小, 工质纯度对 Nu 的影响越显著。根据本文的研究结果, 在大容量预冷器工艺设计时, 为了确保其换热负荷, 建议适当提高换热面积裕量以抵消工质纯度对传热的不利影响。

超临界二氧化碳发电循环回热器及预冷器工程设计

张志鹏 唐卉 王志坚 国金莲

哈尔滨锅炉厂有限责任公司，黑龙江 哈尔滨 150046 fjsj@hbc.com.cn

摘要：回热器及预冷器是超临界二氧化碳发电循环中核心换热部件，它们的高效性和经济性对于循环的应用意义重大，为了切实比较回热器及预冷器采用印刷电路板式换热器及管壳式换热器的差异，本文以某工程参数为基础，分别设计了两种换热器的工程方案，并对两种方案的传热性能及经济性进行比较分析。

关键词：超临界二氧化碳发电循环；回热器；预冷器；印刷电路板换热器；工程方案设计；

作者简介：张志鹏，本科学历，高级工程师，主要从事火电及核电高压加热器设计工作。

超临界二氧化碳循环发电汽轮机主汽阀的选型与设计

张永标，哈尔滨滨大阀门制造有限公司，总经理

摘要：按照传统的观点看，汽轮机主汽阀属于三大主机系统，都是汽轮机厂家供货的。二氧化碳主汽阀因其工况的特殊性，汽轮机厂家无法供货。本文分析其特殊性及其选型和设计思路。

滨大主汽阀的结构特点：

- 1、球形阀体——耐压壁薄，升温快，内应力小；
- 2、压力自密封阀盖——安全；
- 3、预启式阀芯——关断严密；
- 4、可拆卸阀座——检修方便。

驱动方式：液动 开阀-液压油； 关阀-弹簧

动作时间要求：主汽门快关时间不大于 0.5 秒。

西安热工研究院超临界二氧化碳发电试验平台项目中，滨大共计生产主汽阀及主汽调阀共 6 台（高压 3 台； 低压 3 台） 如下图：



一种改进的超临界二氧化碳燃煤发电系统及其焓分析

白文刚

西安热工研究院有限公司 baiwengang@tpri.com.cn

摘要: 超临界二氧化碳(S-CO₂)循环是一种先进的动力循环,具有发电效率高、系统布置紧凑等优点,近年来受到国内外学者的普遍关注。目前,国内外在超临界二氧化碳动力循环应用于燃煤发电领域已经开展了大量的研究,取得了一定的研究成果。研究表明,现有的超临界二氧化碳再压缩燃煤发电系统虽然能解决超临界二氧化碳动力循环与燃煤锅炉之间的有效耦合问题,但仍然存在锅炉热效率和焓效率低、锅炉气温调节困难等问题。针对现有的超临界二氧化碳再压缩燃煤发电系统存在的这些问题,本文提出了一种改进的超临界二氧化碳燃煤发电系统,如图1所示,并对原系统和新系统进行了详细的焓分析。结果表明,新系统中锅炉热效率和焓效率分别为94.68%和53.41%,相较于原系统分别提高了1.04%和2.76%。新系统的发电效率和焓效率分别为48.06%和48.24%,分别比原系统提高了0.17%和2.32%。另外,研究结果证实了新系统中提出的锅炉喷气减温措施能够快速有效地调节锅炉一次气温和二次气温。

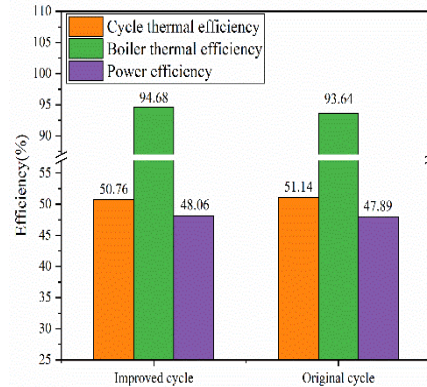
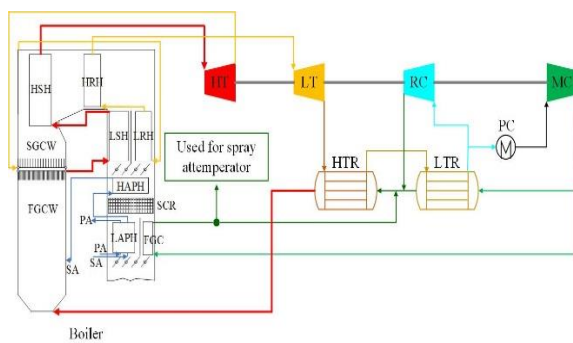


图1 一种改进的超临界二氧化碳燃煤发电系统

图2 两种系统能效对比

关键词: 超临界二氧化碳; 燃煤发电; 焓分析; 气温调节

作者简介: 白文刚, 工学博士, 主要从事超临界二氧化碳发电系统研究。

超临界 CO₂ 预压缩机布置研究

廖健鑫 田瑞青 王文武

东方汽轮机有限公司，四川省德阳市旌阳区金沙江西路 666 号，618000

摘要：本文对现有的跨临界 CO₂ 循环的预压缩机布置形式展开论述，对现有的主要布置形式进行分析，并提出两种配合再压缩循环的新型布置形式。在 S-CO₂ 布雷顿循环中，对于某些特性热源，通常由于热源温度较低，为保证系统较高的效率以及热源温度的有效利用，在系统设计时使透平的膨胀压力低于临界点，机组整体循环为跨临界循环（工质由亚临界气相进入超临界相）。为保证循环效率，目前主要采用在主压缩机前设置一台预压缩机的布置形式。本文主要对预压缩机布置在预冷器前后以及再压缩机布置在预压缩机前后三种不同布置形式进行探讨，并分析其特点。对现有的主要布置形式进行分析，并提出两种配合再压缩循环的新型布置形式。经分析，对于大功率纯发电机组，具有较高的发电效率。对于小功率机组而言，可兼顾发电效率和供热，同时可减少一台间冷器设备。

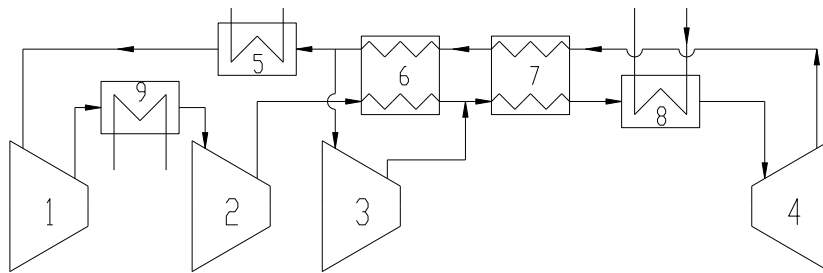


图 1 间冷再压缩布置形式

关键词：超临界 CO₂；系统布置；跨临界；

作者简介：廖健鑫，本科，工程师，主要从事径流式、轴流式透平和压缩机结构研究。

超临界二氧化碳光热-干热岩耦合发电系统分析

袁瑞山 徐斌

西北电力设计院有限公司 yuanruishan@nwepdi.com

摘要：随着环境问题的日益凸显，发展环境友好的发电技术成为重要趋势，光热发电、地热发电由于其资源丰富、环境友好、分布广泛等优点，成为一种必然的选择。文章基于国内外干热岩研究进展及槽式集热器技术，以上述两种清洁能源为热源，结合超临界二氧化碳发电技术，构造了一种以超临界二氧化碳为循环工质的槽式光热-干热岩耦合发电系统。通过对系统分析，获得了压力、温度等关键参数对系统效率的影响。研究结果表明：随着透平入口参数的提高，系统循环效率将提高；超临界二氧化碳布雷顿循环系统存在最佳排汽压力，且最佳排汽压力接近二氧化碳临界参数。为基于超临界二氧化碳光热-干热岩耦合发电研究提供参考。

关键词：超临界二氧化碳、槽式集热器、光热、干热岩、耦合

作者简介：袁瑞山，博士，设计师，主要从事火力发电厂、分布式能源、新能源系统及核心设备研究。主持/参与项目二十三项。

1000 MW 超临界二氧化碳燃煤发电系统热力学性能分析

赵世飞, 王为术, 王秋红, 张振, 刘军, 黄志豪

华北水利水电大学 电力学院, zhaoshifei@newu.edu.cn

摘要: 超临界二氧化碳循环在燃煤发电领域具有广阔的应用前景。本文用 EBSILON Professional 软件对 1000MW 超临界二氧化碳燃煤发电系统进行建模, 并在此基础上分析了系统能流和焓损分布等热力学特性, 之后又讨论了关键参数 (透平入口温度, 压缩机分流比等) 对系统热力学性能的影响。结果表明: (1) 与传统以水为工质的朗肯循环类似, 系统的损失主要来源于冷却器和锅炉, 分别占比 44.88%和 7%。系统压缩机的耗电大幅增加, 占总发电量的 28.54%。在给定的参数下, 系统的发电效率和焓效率分别可达到 47.32%和 46.11%, 对应发电标准煤耗率为 259.49g/kWh; (2) 系统的焓损总量为 1168.84MW, 其中锅炉部分焓损最高(871.24MW), 占比 74.55%。其次为冷却器 (11.32%)。其他设备焓损较低, 依次为高温回热器, 透平, 低温回热器, 主压缩机, 发电机, 再压缩机, 分别占比 4.96%, 3.35%, 2.13%, 1.37%, 1.21%, 1.12%; (3) 当透平入口温度由 500°C提高到 660°C时, 系统的发电效率由 40.58%提高到 48.56%, 提高 7.98%, 发电标准煤耗率也随之降低 43.03g/kWh。即提高透平入口温度 10°C提升约 0.5%的发电效率, 且随着温度的升高, 温度提升对发电效率的提高趋势有所降低; (4) 压缩机分流比的增大会使系统总发电量和压缩机整体耗功增加, 因此其存在最佳分流比。净发电量在分流比为 28%时达到最大为 1006.94 MW, 此时发电效率和发电标准煤耗率也为最优, 分别为 47.65% 和 257.71 g/kWh; 比原系统的发电效率高 0.33% , 发电标准煤耗率降低 1.8 g/kWh。

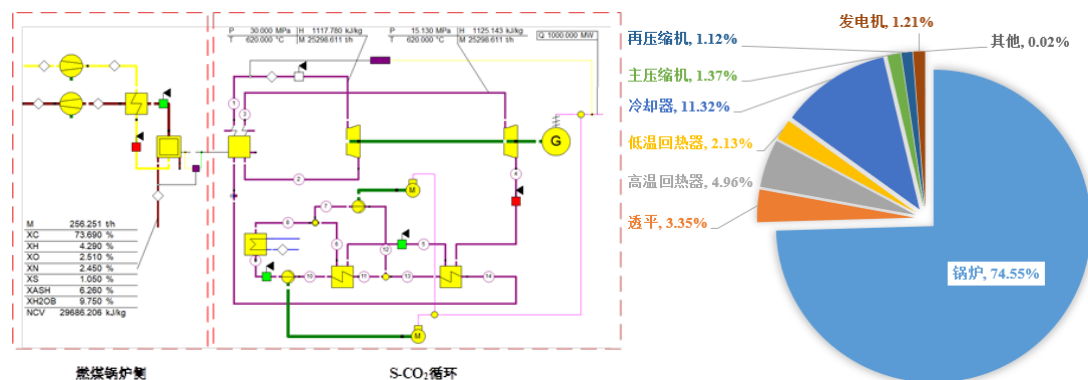
图 1 燃煤 S-CO₂ 发电系统 (In EBSILON)

图 2 系统焓损分布饼图

关键词: 燃煤; 超临界二氧化碳; EBSILON 建模; 热力学分析; 关键参数;

作者简介: 赵世飞, 工学博士, 讲师, 主要从事燃煤发电系统优化设计。

基金资助: 河南省高校科技创新团队 (16IRTSTHN7)

超临界二氧化碳透平变工况性能分析与流动控制研究

应祺煜, 诸葛伟林*, 张扬军, 宗必寰

汽车安全与节能国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084

第一作者: yingqy17@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: zhugewl@mail.tsinghua.edu.cn

摘要: 超临界二氧化碳循环系统由于具有循环效率高、系统结构紧凑和工作温度范围广等特点而在近些年备受关注, 该循环的潜在应用场景包括太阳能发电、地热发电、交通工具的动力单元等。但上述应用场景均可能面临外界条件变化而引起系统工作工况的变化, 因此对超临界二氧化碳涡轮在变工况下的性能研究就显得至关重要。

超临界二氧化碳涡轮设计主要面临的问题是涡轮尺寸小、功率密度大以及超临界态工质物性所带来的影响。针对上述问题以及变工况的情况, 本文提出非对称的涡轮叶片分布方法, 既能保证小尺寸涡轮的效率, 又能提升涡轮在非设计工况点的效率。并根据此方法设计了一台轴流涡轮, 叶片分布如图 1 所示。分析结果显示, 在多条转速线和不同入口条件的整体性能仿真中, 非对称叶片分布的涡轮在部分工况点的效率相比原涡轮均有显著提高, 新设计涡轮在全工况下较原涡轮有更优的表现。

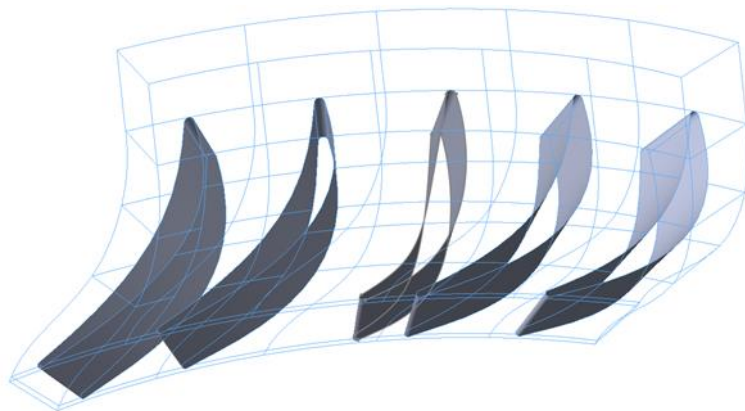


图 1 涡轮静叶非对称分布 (叶片分别为出口角 70 度和出口角 60 度的叶片)

关键词: 超临界二氧化碳; 透平; 变工况; 流动控制

作者简介: 应祺煜, 研究生学历, 硕士学位, 清华大学车辆与工程学院在读博士研究生, 主要从事闭式循环系统中涡轮气动性能的研究。

基金资助: 国家重点研发计划 (2018YFB1501004)

甲烷燃烧超临界二氧化碳半闭式循环灵敏性分析与系统热效率模拟

李博文, 孙绍增, 赵义军, 冯冬冬

哈尔滨工业大学 1399039253@qq.com

摘要: 超临界二氧化碳 (sCO₂) 半闭式循环是一种先进、高效、经济的发电系统, 可以满足煤炭低成本高效利用和低碳排放的需要。本文采用 Aspen Plus 软件构建并模拟了典型的甲烷富氧燃烧 sCO₂ 半闭式循环—Allam 循环, 对系统进行了灵敏度分析和发电效率计算。通过不同的简化模型研究了系统各部件边界条件设置以及系统改造方案对于热效率的影响。在系统改造方面考虑的因素有: 多级膨胀与再热、CO₂ 多级压缩与级间冷却, 以及是否耦合 ASU。在参数设定方面考虑的因素有: 燃烧室温度、透平进出口压力, 以及 CO₂ 分离比。结果表明, 当燃烧室温度约为 1300°C, 透平进口压力约为 300 bar, 出口压力约为 30 bar, 二氧化碳储存与排放的分离比为 5:95 时, Allam 循环达到最高的热效率。当燃烧室压力从 200 bar 上升到 500 bar 时, 每 10 bar 系统效率增加 0.5%。当燃烧温度从 800°C 上升到 1500°C 时, 每 10°C 系统效率增加 0.35%。CO₂ 多级压缩和级间冷却可以提高系统效率约 5%。再热和分级膨胀可以提高系统效率约 3%。将 ITM 耦合到系统中可以提高 2% 的效率。基于多级换热的再压缩循环、预压缩循环和部分冷却循环比单一回热循环热效率可提高 10% 以上, 这些系统多采用压缩前分流、加热前分流, 以及膨胀前分流等方式达到热量的梯级利用。甲烷燃烧超临界二氧化碳半闭式循环效率最高可达 55%-60%。

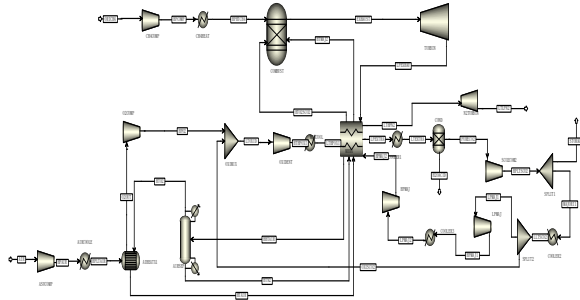


图 1 耦合 ASU 的 Allam 循环

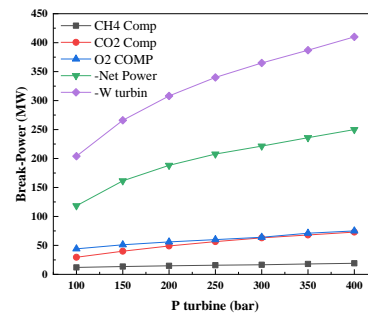


图 2 透平进口压力对系统做功的影响

关键词: 超临界二氧化碳; 半闭式循环; ITM; 灵敏度分析

作者简介: 李博文, 博士研究生, 主要从事超临界二氧化碳半闭式循环系统优化与燃烧室模拟研究。

S-CO₂ 直接冷却反应堆系统负荷跟踪方法研究高春天, 吴攀¹, 马云铎, 刘伟华, 单建强²

西安交通大学核科学与核技术学院

摘要: 超临界二氧化碳(S-CO₂)直接冷却反应堆系统是新提出的动力转换系统, 该系统在中等气轮机入口温度下具有高效率的优势, 还具有系统设备结构紧凑和负载变化响应能力快的优点。因此, 对于空间站和民用发电等应用场景具有巨大潜力。由于负载需求的变化, 部分负荷运行是电站系统的重要运行工况, 旁通控制方案可以实现布雷顿循环快速、精确的变负荷需求。目前在变负荷方面的工作主要集中在对间接冷却系统的研究, 没有考虑堆芯反应性反馈对系统特性的影响。本文采用 SCTRAN/CO₂ 程序对超临界二氧化碳直接冷却反应堆系统的变负荷策略和负荷跟踪能力进行研究。在变负荷过程中依靠反应堆反应性反馈自动调节功率, 对三种不同的旁通阀门布置方案进行了研究, 获得了适用于超临界二氧化碳直接冷却反应堆的变负荷方法。分析了负荷降低工况中系统的参数响应, 并评估了超临界二氧化碳直接冷却反应堆的负荷自动跟踪能力。

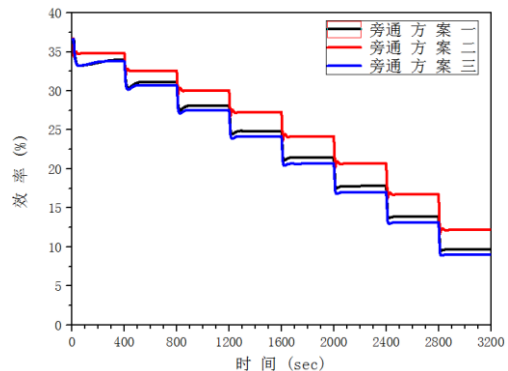
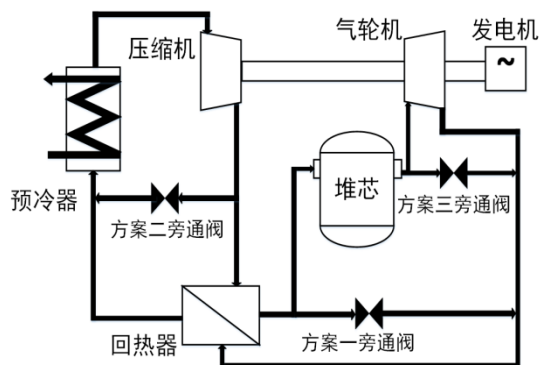


图 1 S-CO₂ 直接冷却反应堆系统 图 2 不同旁通方案部分负荷工况效率

关键词: S-CO₂ 直接冷却, 变负荷, 负荷跟踪

作者简介: 高春天, 博士研究生, 主要从事 S-CO₂ 热工水力特性研究。

资金资助: 国家自然科学基金 (11605132), 联合基金 (U1867218)

¹吴攀, wupan2015@mail.xjtu.edu.cn

²单建强, jqshan@mail.xjtu.edu.cn

超临界二氧化碳再压缩燃煤发电系统焓分析

陈东旭, 韩中合, 赵林飞

华北电力大学能源动力与机械工程学院, 河北保定 071003

Email: ncepu_chendongxu@163.com

摘要: 超临界二氧化碳作为一种新型工质被广泛应用于各种发电系统。燃煤发电长期占据我国电力结构的主体地位。近年来, 环境污染问题以及各种新能源发电形式的兴起使得燃煤发电的占比逐渐降低。但洁净煤燃烧与碳捕集技术使得燃煤电厂能够实现超低污染物排放, 且相对于其他新能源发电系统, 燃煤发电系统的发电成本仍然较低。因此, 燃煤发电系统仍具有很大的发展空间。超临界二氧化碳燃煤发电系统近年来逐渐成为研究热点, 对于超临界二氧化碳燃煤发电系统进行焓分析的研究鲜有报道。因此, 本文通过 Ebsilon 软件首先建立了超临界二氧化碳再压缩燃煤系统仿真模型, 得到该系统的焓损分布情况, 并分析了分流系数、透平入口温度等系统关键参数对各设备及系统焓效率的影响。结果表明: 锅炉部位的焓损最大, 其次是回热器部位; 当不同参数变化时, 有不同的设备焓效率对系统焓效率产生主要的影响; 分流系数、主压缩机出口压力对系统焓效率的影响存在最优值。最后, 针对锅炉和回热器焓效率低的问题对系统实施一次再热、二次再热、二次分流再压缩的布置改进方案, 并进行了对比分析。结果表明: 二次再压缩主要提高了高温回热器焓效率, 最终使系统焓效率提高了 3.347%; 一次、二次再热主要提高了锅炉焓效率, 最终使系统焓效率分别提高了 0.752%、0.991%。

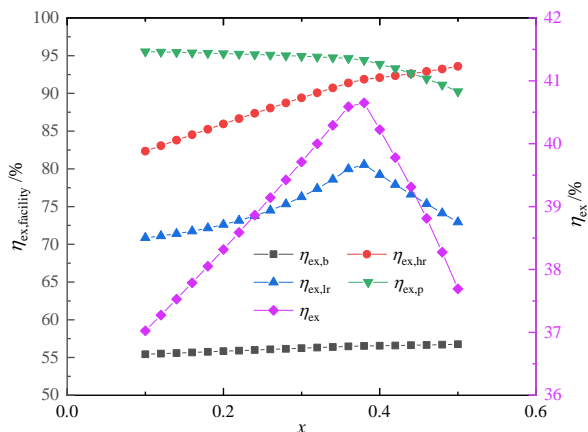
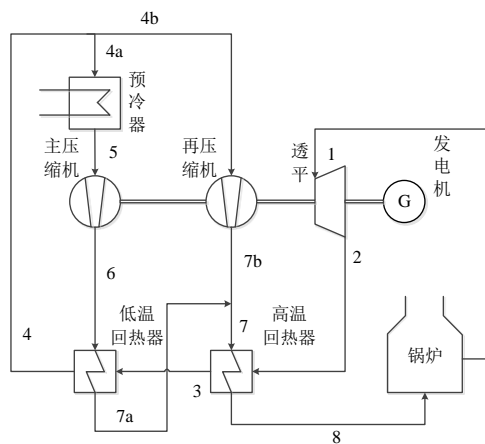


图 1 超临界二氧化碳再压缩燃煤发电系统

图 2 分流系数对各设备及系统焓效率的影响

关键词: 超临界二氧化碳; 燃煤发电系统; 焓损; 焓效率; 布置改进

作者简介: 陈东旭(1996—), 硕博连读研究生, 主要从事以超临界二氧化碳为工质的燃煤发电及耦合系统方面的研究工作。

基金资助: 国家科技支撑计划项目(2014BAA06B01)

超临界 CO₂ 压缩回路热力系统建模—压缩机模型滕庚¹ 沈昕^{1,2} 欧阳华^{1,2} 朱郁波³ 范伟³ 刘志刚³

1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 2. 燃气轮机与民用航空发动机教育部工程研究中心 3. 上海汽轮机厂 tgzz2016@sjtu.edu.cn

摘要: 与常规发电技术相比, 超临界 CO₂ (SCO₂) 循环发电技术由于循环效率高、适用热源广、设备尺寸紧凑等特点, 被认为是未来最具有发展前景的方向之一。压缩机作为 SCO₂ 动力循环的核心部件, 对其开展部件级实验研究, 测试压缩机及其附属设备的工作特性是发展 SCO₂ 发电技术的一项关键步骤。测试回路主要包括压缩机、换热器、节流阀等部件, 主要部件在运行时的流动换热特性对压缩机性能测试有着重要影响, 且由于 CO₂ 在临界点附近工作区域物性变化剧烈, 实验回路中主要部件的热力学模型在 CO₂ 工作环境下适用性及有效性仍有待验证, 因此建立精准的闭式 SCO₂ 压缩回路热力学模型, 分析实验装置在实验过程中的热力学特性是选取回路关键参数, 建立系统控制策略的必要准备工作, 也是保证压缩机可在精准测试参数下稳定运行的前提。本文基于传统压缩机一维设计理论, 对比分析各类损失模型, 通过对比传统损失模型预测的压缩机效率与实验数据可知(图 1), 传统损失模型能够大致模拟压缩机运行时的变化趋势, 但在偏离设计工况条件下具有较大的误差, 因此需要对传统损失模型进行修正。通过引入流量系数修正模型, 以运行工况流量系数和设计工况流量系数比值作为修正因子, 对传统损失模型进行修正。对比修正后的模型与实验数据可以发现(图 2), 引入修正因子后预测结果与实验值的变化趋势和数值大小基本一致, 能够较好预测 SCO₂ 压缩机运行时的变工况特性, 从而建立更加精确的 SCO₂ 压缩回路热力学模型。

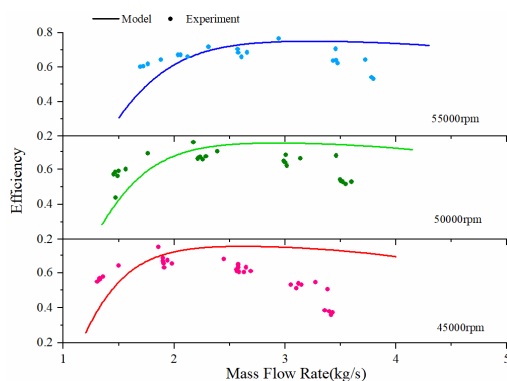


图 1 传统损失模型预测结果

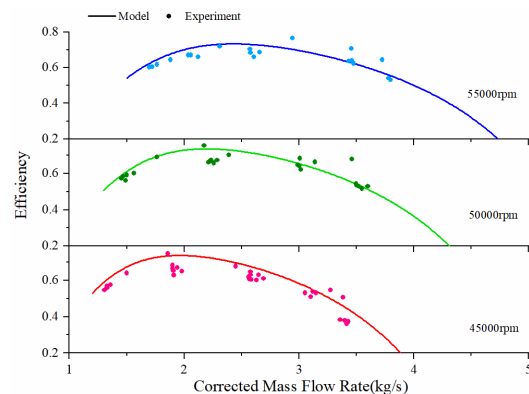


图 2 修正模型预测结果

关键词: SCO₂ 压缩机; 一维设计; 损失模型; 流量系数; 修正因子

作者简介: 滕庚, 硕士研究生, 主要从事 SCO₂ 压缩测试回路系统仿真研究。

基金资助: 国家科技重大专项 (2017-II-0007-0021)

基于 LCOE-遗传算法的超临界二氧化碳燃煤机组锅炉设计及经济性分析

朱萌, 周敬, 陈磊, 苏胜, 汪一, 胡松, 向军

华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074, c_mengzhu@foxmail.com

摘要: 超临界二氧化碳 (S-CO₂) 火力发电技术是一项非常有潜力的下一代发电技术。本文建立了基于平准化度电成本 (LCOE) -遗传算法的超临界二氧化碳燃煤机组锅炉优化模型, 对 1000MW 一次再热 π 型的超临界二氧化碳燃煤 (SCC) 锅炉进行了概念设计, 重点研究了 SCC 锅炉的设计性能以及机组经济性分析。优化结果表明: SCC 锅炉的吸热量分布从炉膛向尾部烟道转移; 优化的 SCC (SCC-O) 锅炉换热面积是 USC 锅炉的 1.48 倍, 质量则下降为 0.81 倍。相比经验设计的 SCC (SCC-E) 锅炉, SCC-O 锅炉净效率提高了 0.49%, 锅炉成本则下降了 15.4%。LCOE-遗传算法实现了在大求解域、离散以及非线性条件下的锅炉优化问题求解, 具有较强的鲁棒性, 可对未来的 SCC 锅炉优化设计提供一定的建议。通过计算资本成本、运行与维护成本、燃料成本和二氧化碳排放成本, 得到了 SCC-O 机组的 LCOE 为 0.538CNY/kWh, 相比 USC 机组, LCOE 降低 10.39%, SCC 机组具有很强的经济性优势。最后, 对 SCC 机组的煤价和利用率两个关键经济参数进行了敏感性分析。随着煤价的上升, SCC 机组的 LCOE 相比于 USC 机组增加的更少; 同时考虑到中国低资本成本 (LCC) 和高燃料成本 (LFP) 的实际情况, 提出中国相较于美国和法国等高 LCC 低 LFP 国家更适合发展 S-CO₂ 火力发电技术的结论; 通过对利用率的研究, 认为 SCC-O 机组在低负荷运行工况下依旧具有优秀的经济可行性。

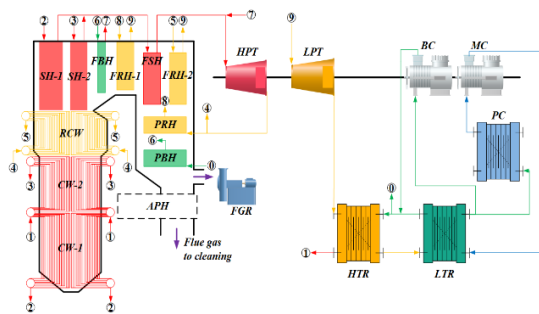


图 1 SCC 锅炉及其动力循环的概念设计图

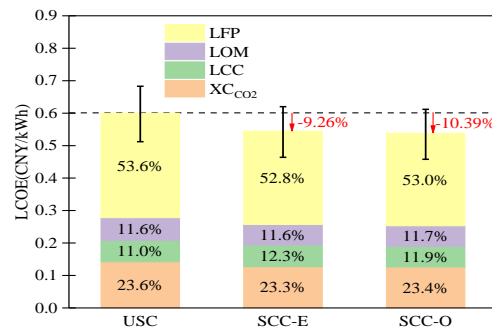


图 2 SCC 机组的 LCOE 结果

关键词: 超临界二氧化碳, 锅炉, LCOE, 遗传算法

作者简介: 朱萌, 硕士, 无, 主要从事超临界二氧化碳锅炉研究, 参与 S-CO₂ 锅炉燃烧机理与设计方法项目。

基金资助: 国家重点研发计划 2017YFB0601802

印刷电路板换热器翼片结构研究与优化

张天一

华北电力大学, zhangtianyi@ncepu.edu.cn

摘要: 超临界二氧化碳 (S-CO₂) 布雷顿循环系统是第四代反应堆采用的新型高效热能转化系统, 系统采用印刷电路板换热器 (PCHE) 作为高低温回热器, 其流动换热特性对整体系统热能转化效率有着显著影响。维持较高的换热效率并显著降低流动阻力是 PCHE 的重点研究方向。本文采用数值模拟的方法, 以超临界二氧化碳为流动工质, 创建翼片结构如图 1 所示的换热器模型, 其中上半部分为机翼型翼片结构, 下半部分为优化后翼片结构。本文首先研究了翼片的不同间距对流动换热性能的影响, 研究结果表明: 翼片交错排列的换热器模型流动换热性能优于翼片并排布置的换热器模型; 过于密集的翼片分布在低雷诺数时会增强换热, 但高雷诺数下优势不再明显; 翼片交错间距为左右间距一半且与机翼自身长度相同时, 换热器综合流动换热性能最优。另外, 本文对机翼型翼片结构进行了优化, 并将两个换热器模型进行了对比分析, 得到结果对比如图 2 所示, 在压降变化不明显的前提下, 换热器的平均努塞尔数提高了 20%, 显著提升了换热器的换热性能。

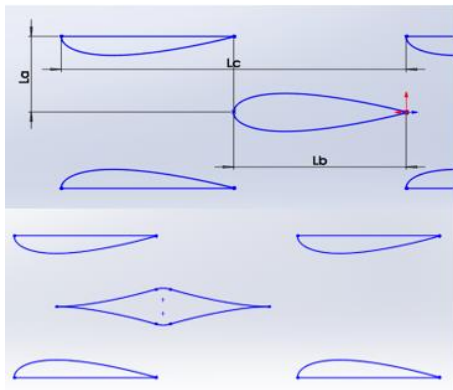


图 1 不同翼片结构

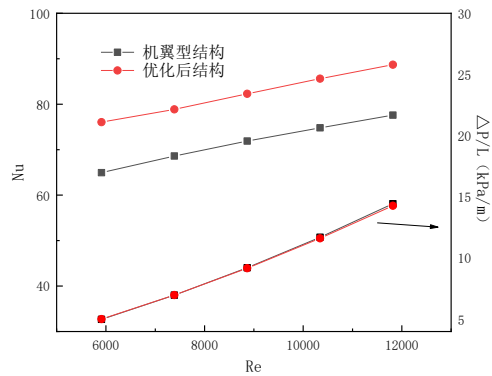


图 2 模型结果对比

关键词: 超临界二氧化碳; 布雷顿循环; 印刷电路板换热器; 热效率

作者简介: 张天一, 硕士研究生, 主要从事印刷电路板换热器研究, 参与超临界二氧化碳作为先进核能系统工质的热工流体力学关键基础问题研究项目。

基金资助: 国家自然科学基金资助项目 (U1867218,11705058,11635005)。

超临界二氧化碳燃煤发电系统低温热能利用技术研究

张旭伟

西安热工研究院有限公司 zhangxuwei@tpri.com.cn

摘要：超临界二氧化碳动力循环发电系统具有发电效率高、体积功率密度大等优点，是火电厂节能减排的重要研究方向之一。而锅炉排烟及冷端余热等低温热能被排放到环境造成大量的能量损失。为此，本文针对常规超临界二氧化碳燃煤发电系统，提出了一种余热回收方法，并对其节能效果进行了热力学分析。

常规超临界二氧化碳燃煤发电系统采用高效的再压缩布雷顿循环，并在锅炉尾部烟道布置省煤器用于回收烟气热量。研究发现，空预器中空气和烟气热容量相差较大，导致吸放热特征曲线匹配性较差；而锅炉排烟中蕴含大量热能，传统火电机组可以将锅炉可利用排烟温度降低到 90℃；另外，预冷器工质放热温度较高，携带大量可利用热能。所以，本文提出在冷端布置辅助预冷器来预热冷空气，从而回收冷端余热，并提高空预器入口风温；同时，分流部分烟气继续加热冷空气，由于烟气热容量减小，排烟温度可以降到 90℃左右，而空预器入口风温提高，可以避免空预器腐蚀；另一部分烟气加热主压缩机出口的部分低温工质，从而回收这部分烟气热量，系统如图 1 所示。通过上述方法可以有效利用排烟及冷端余热等低温热能，从而提高系统发电效率。

本文研究的超临界二氧化碳燃煤发电系统最高参数选取 600℃、30MPa，计算结果如图 2 所示。结果表明，常规超临界二氧化碳燃煤发电系统的发电效率为 48.10%，发电标准煤耗率为 255.74g·kWh⁻¹；采用余热回收方法后，发电效率绝对提高了 1.23%，发电标准煤耗率降低了 6.38 g·kWh⁻¹，节能效果显著。

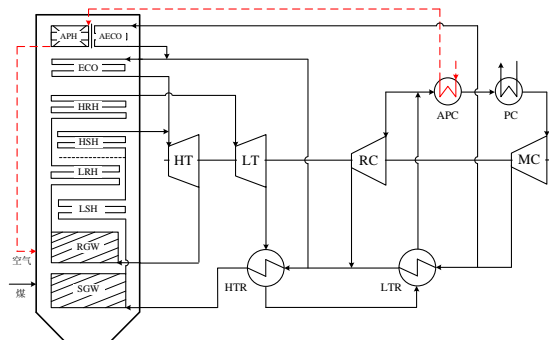


图 1 带余热回收的发电系统

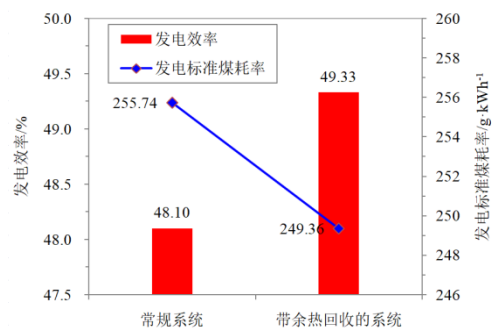


图 2 不同系统能效比较

关键词：超临界二氧化碳；动力循环；燃煤发电；余热回收；节能

作者简介：张旭伟，硕士，主要从事超临界二氧化碳发电系统研究。

超临界压力下二氧化碳在竖直细微通道内的换热特性研究

彭锐锋, 雷贤良*, 郭子嫚, 杨楠, 李会雄

西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安

xianlianglei@xjtu.edu.cn

摘要: 微细通道液冷是一种广泛使用的高效冷却方式。紧凑式换热器（如印刷电路板换热器）具有传热系数高、紧凑、高效等特点已成为高温布雷顿循环中循环工质冷却的必需设备。超临界压力下二氧化碳物性呈奇异性变化，特别是在拟临界区，比热、密度等物性随温度和压力变化剧烈，其显著影响了超临界工质的换热特性。本研究对超临界压力下二氧化碳在细微通道（ $d=2\text{ mm}$ ）内垂直向上流动时的换热特性进行了系统地的实验研究，主要考察了压力（ $7.5\text{ MPa}\sim 9\text{ MPa}$ ）、热流密度（ $10\sim 500\text{ kW/m}^2$ ）和质量流速（ $100\sim 1200\text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）等参数范围内的流动与换热规律。实验结果表明：超临界压力下流体流动参数的改变对换热影响显著。相同流量和热流密度下，压力升高时，壁温升高显著，传热系数下降；通常随着流体流量的升高，换热系数显著升高，壁温得到改善；而当热流密度增加时，其换热系数在不同流体流量条件下呈现出较大差异。

关键词: 超临界二氧化碳；细微通道；对流换热；实验研究

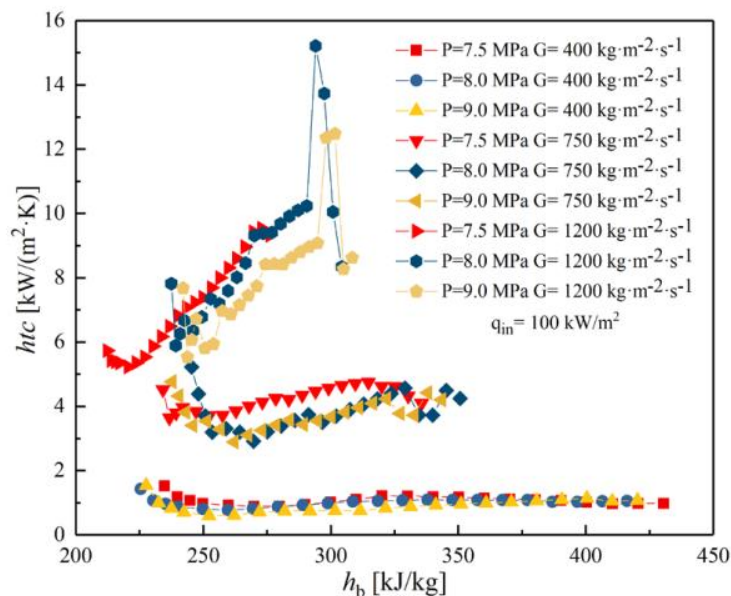


图 1 热流密度为 100 kW/m^2 时不同工况下传热系数的变化

作者简介: 彭锐锋, 硕士研究生, 主要从事超临界工质流动与传热特性研究。

基金资助: 本研究得到国家自然科学基金重点基金项目 (No.U1867218) 资助。

二氧化碳跨临界动态传热特性的实验研究

郭子嫚, 雷贤良*, 彭锐锋, 苟灵通, 李会雄

西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安

xianlianglei@xjtu.edu.cn

摘要: 二氧化碳具有良好的传热性能、较低的临界参数、易于制取和物性稳定等优良特性, 被广泛应用于超临界二氧化碳(Supercritical-CO₂)布雷顿循环系统和跨临界二氧化碳(Transcritical-CO₂)制冷、空调、热泵等领域。相较于现役超临界发电机组频繁处于变压运行状态, 超临界二氧化碳布雷顿循环发电机组在运行中也存在多种变压运行的情况, 尤其是在机组启停过程中。然而, 目前对二氧化碳工质在动力循环系统中的动态变压过程的实验研究尚未见相关报道。本研究专门搭建了二氧化碳动态传热实验系统, 可实现压力、流量、热负荷等热工参数的单参数阶跃扰动, 并对垂直上升管中二氧化碳的跨临界动态变压过程的动态传热特性展开了系统地实验研究。实验研究发现, 当受热面维持一定热负荷、压力从超临界向近临界区跨越时, 壁面温度会出现显著的飞升现象, 偏离泡核沸腾(DNB)发生; 进一步增大压力的跨越范围, 发现壁温会呈现先飞升后又逐步降低至稳定状态的变化过程。针对该现象, 通过实验深入的对比分析了不同参数条件下二氧化碳在跨临界过程中的动态传热变化特性, 并分析了亚临界与近临界区内气泡的形成规律, 进而揭示了二氧化碳在跨临界过程中出现壁温飞升的形成机制。

关键词: 二氧化碳; 跨临界; 变工况; 动态特性

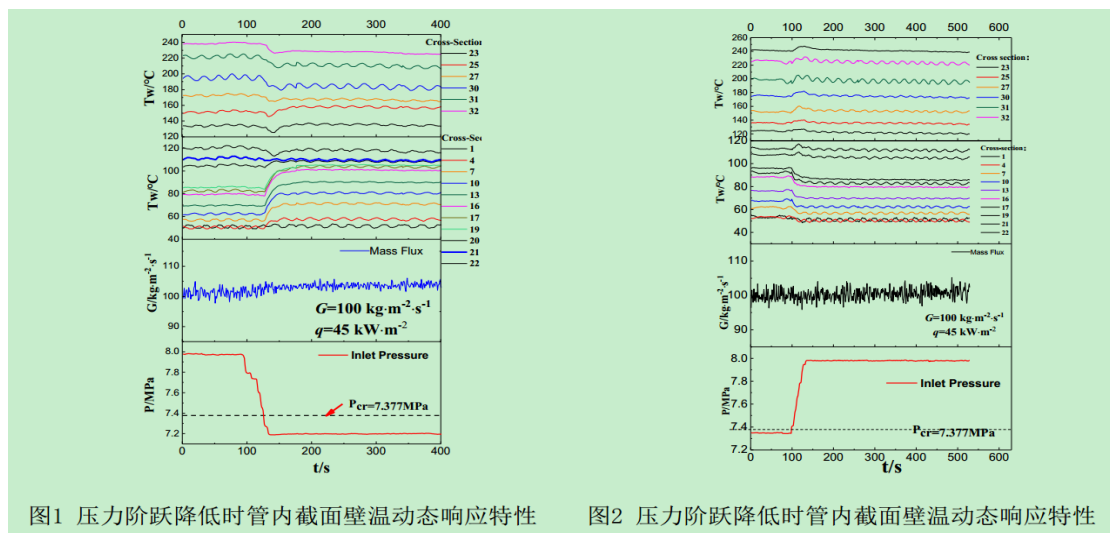


图1 压力阶跃降低时管内截面壁温动态响应特性 图2 压力阶跃降低时管内截面壁温动态响应特性

作者简介: 郭子嫚, 硕士研究生, 主要从事超临界流体研究。

基金资助: 本研究得到国家自然科学基金重点基金项目(No.U1867218)资助。

600MW 超临界二氧化碳燃煤发电系统仿真研究

王为术, 黄志豪, 赵世飞

华北水利水电大学电力学院, wangweishu@ncwu.edu.cn

摘要: 超临界二氧化碳布雷顿循环作为一种具有前景的热力循环受到了学者广泛的关注, 其具有系统循环效率高、全流量回热以及冷端放热温度高等特点, 因此, 研究各关键参数对于超临界二氧化碳燃煤发电系统热力学性能的影响, 并对其进行优化, 得到最佳循环参数, 对于超临界二氧化碳燃煤发电机组的建设及优化具有重要的参考价值。本文针对 600MW 超临界二氧化碳布雷顿循环燃煤发电系统, 基于 EBSILON Professional 软件, 研究主压缩机入口压力、主压缩机出口压力、再热透平入口压力、压缩分流系数以及主/再热汽温对系统热力学性能的影响。仿真结果表明, 提高主/再热汽温有利于系统循环效率的提升; 系统循环效率会随压缩分流系数、主压缩机入口压力、主压缩机出口压力和再热透平入口压力的提高呈现先上升后降低的趋势, 存在最优参数。其中压缩分流系数对系统循环效率的影响较大, 并且压缩分流系数的提高会增加主压缩机和再压缩机的总耗功量, 导致系统发电功率随压缩分流系数的提高而降低; 再热透平入口压力对系统循环效率的影响最小, 再热透平入口压力从 15MPa 上升到 25MPa, 系统循环效率仅会降低约 0.2%。同时, 研究多种参数变化对系统循环效率的影响, 得到系统循环效率最高时的最佳参数。通过对系统的优化, 当压缩分流系数、主压缩机入口压力、主压缩机出口压力和再热透平入口压力分别为 0.3、7.94MPa、30.94MPa、17.88MPa 时, 系统最高循环效率为 48.89%。

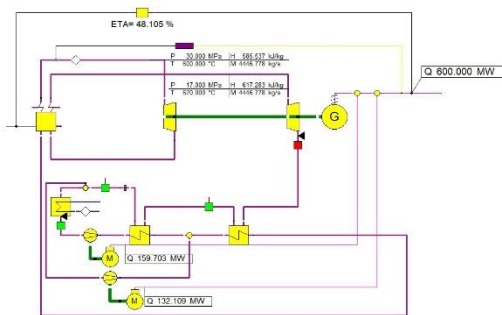


图 1 系统布置图

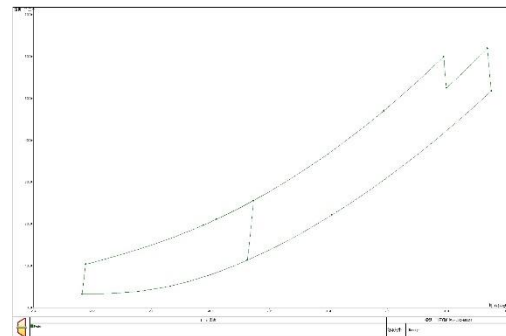


图 2 系统温熵图

关键词: 超临界二氧化碳; 布雷顿循环; 热力学性能; 仿真

作者简介: 王为术, 博士/博士后, 教授, 主要从事多相流流动与传热, 流体动力高效输送, 锅炉水动力, 反应堆传热安全, 低热质发电等领域研究。

基金资助: 河南省高校科技创新团队 (16IRTSTHN7); 河南省科技创新杰出青年 (154100510011)

CO₂ 热力性质及传输特性显式公式

邓小妹, 赵红霞*, 于梅红, AL-hasan Ali Abdulwahid

山东大学能源与动力工程学院, 济南, 250061, hongxia.zhao@sdu.edu.cn

摘要: 近年来, 布雷顿循环发电技术逐渐得到人们的重视, 已有研究表明主压缩机入口温度是影响系统循环效率的因素之一; 在 500-600°C 的典型热力系统的运行温度范围内, 再压缩循环在效率上最具优势。在 14~30MPa 和 304~700K 范围内, 鲜有 CO₂ 热力性质和传输特性具有统一的形式。本文以压力和温度为自变量构造快速计算模型提出了压力 14.18~31MPa, 温度 304~700K 范围内的 CO₂ 导热、动力粘度、焓、密度、声速的统一的显式公式, 对于熵、比定容热容的显式计算公式则通过 1stopt 的快速公式拟合功能找出。与 Refprop9.0 的数据比较, 压力在 14.18~30MPa, 温度 304~700K 范围内的所有物性显式公式的总平均最大相对误差小于 0.88%, 平均最大误差小于 4.59%。

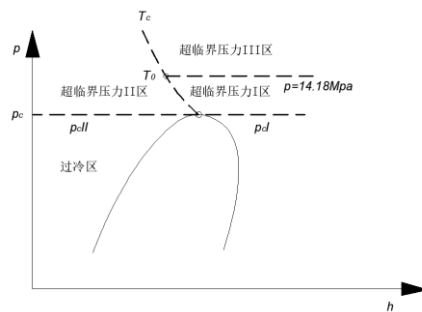


图 1 CO₂ 区域划分

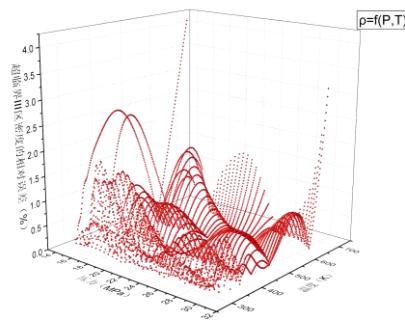


图 2 超临界压力 III 区(压力 14.18~31MPa, 温度 304~700K)密度的相对误差

关键词: CO₂ 物性; 显式计算模型

作者简介: 邓小妹, 硕士生, 主要从事超临界二氧化碳布雷顿循环喷射器设计研究; 赵红霞, 博士, 副教授, 主要从事热力循环研究。

超临界二氧化碳布雷顿循环喷射器设计及性能分析

邓小妹, 赵红霞*, 于梅红, AL-hasan Ali Abdulwahid

山东大学能源与动力工程学院, 济南, 250061, hongxia.zhao@sdu.edu.cn

摘要: 在集中式太阳能热力系统 (CST) 中, 超临界 CO₂ (S-CO₂) 布雷顿循环作为一种可选择动力模块而引起各国学者关注。与传统蒸汽朗肯循环相比, 超临界 CO₂ 布雷顿循环结构紧密, 热效率更高, 因此, 在温度超过 400°C 时, S-CO₂ 布雷顿循环成为一个更具吸引力的选择。为了优化 CST 系统, 需要实现系统热效率和太阳能接收器运行条件对其热力性能以及其运行寿命产生的有害影响之间的平衡。因此, 在 S-CO₂ 布雷顿循环里加入一个喷射器, 其主要优点是, 可以提高涡轮机出口流体的压力而不消耗任何机械功, 同时还可以允许太阳能接收器工作在较低的 S-CO₂ 布雷顿循环压力下, 从而在平衡系统的热效率与低耗能之间起到积极影响。采用索科洛夫的喷射器设计方法, 对超临界二氧化碳布雷顿循环的喷射器进行结构设计以及 CFD 仿真分析, 研究了喷射器的使用特性。研究表明, 当工作流体压力不变时, 引射比随着升压比增加而减小; 当工作流体压力和背压不变时, 引射比随着引射流体压力增加而增加; 工作流体压力对引射器性能的影响随引射器出口所处工况的变化而变化。

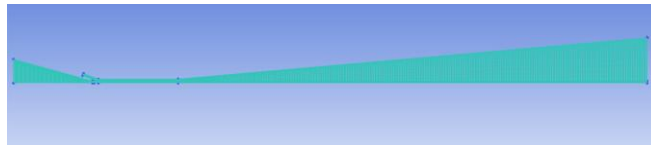


图 1 喷射器网格图

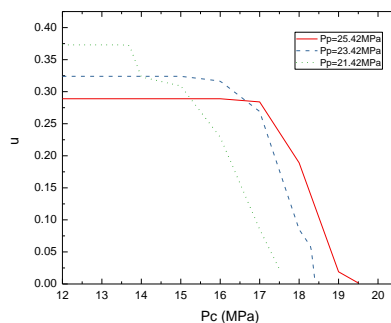


图 2 不同入口压力下, 出口压力与引射比 u 的关系曲线

关键词: 超临界二氧化碳; 喷射器; 索科洛夫

作者简介: 邓小妹, 硕士生, 主要从事超临界二氧化碳布雷顿循环喷射器设计研究; 赵红霞, 博士, 副教授, 主要从事热力循环研究。

熔盐/S-CO₂ 在 zigzag 型 PCHE 内流动换热性能研究

付倩涓, 丁静, 王维龙, 陆建峰*

中山大学材料科学与工程学院/lujfeng@mail.sysu.edu.cn

摘要: 塔式太阳能热发电技术以其高效率、低运行成本等优点而备受关注。为了克服其间歇性从而提高系统效率, 应与以熔盐为传热储热介质的储能系统耦合。经研究发现, 超临界二氧化碳 (S-CO₂) 布雷顿循环作为热功转换系统, 比传统蒸汽朗肯循环效率更高。中间换热器连接着熔盐储热系统与 S-CO₂ 布雷顿热功转换系统, 它需要在高温高压的环境下工作。近年来, 印刷电路板换热器 (PCHE) 以其耐高温高压、高换热效率、占地面积小等优点, 成为中间热交换器的候选产品。几十年来, 人们对直通道、zigzag 型、S-shaped 型和翼型四种 PCHE 性能进行了大量的研究。经过研究发现, 虽然 S-shaped 型和翼型具有良好的流动换热性能, 但因两者的肋片在高压下易受损而影响换热效率。此外, 两者对加工工艺要求高、较难保证精度。而 zigzag 型 PCHE, 较传统直通道相比, 具有更好的换热性能; 较 S-shaped 型和翼型相比, 具有更高的经济性、能承受更高的压力。因此, 本文选择 zigzag 型 PCHE 作为中间换热器, 研究熔盐与 S-CO₂ 在 zigzag 型 PCHE 内的流动和传热性能。结果表明, 与传统直通道相比, 熔盐与 S-CO₂ 在 zigzag 型通道内换热效果更好。此外, 由于换热热阻主要在 S-CO₂ 侧, 研究其入口条件对换热性能的影响。结果表明, 随着 S-CO₂ 入口质量流量增大, 总换热系数随之增大, 但是压降也随之增大。最后, 探讨了在 zigzag 型通道的基础上, 优化通道结构以提高换热器性能。

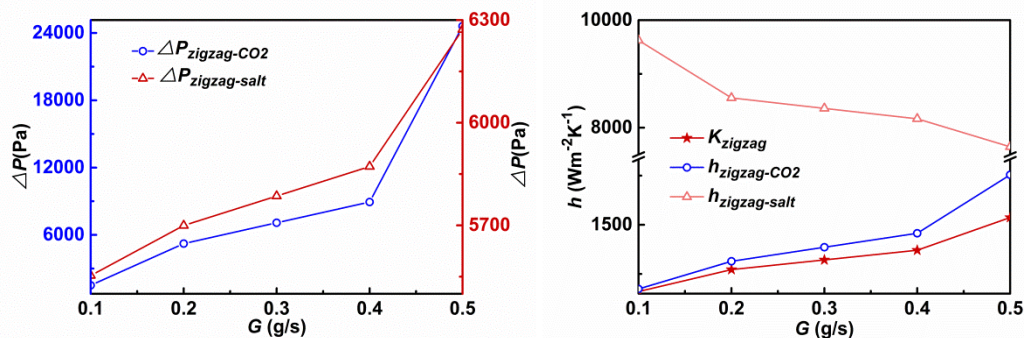


图 1 S-CO₂ 入口流量对压降的影响 图 2 S-CO₂ 入口流量对换热的影响

关键词: 熔盐, 超临界二氧化碳, zigzag 型 PCHE

作者简介: 付倩涓, 硕士研究生, 主要从事超临界二氧化碳与熔盐换热器研究, 参与国家重点研发计划 (2018YFB1501003) 项目。

基金资助: 国家重点研发计划 (2018YFB1501003) 资助

