

Proceedings of Compressor Technology Conference 2011

2011

压缩机技术 学术会议论文集

主办单位：



承办单位：压缩机技术国家重点实验室

合肥通用机械研究院◎编



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

Proceedings of Compressor Technology Conference 2011

2011

压缩机技术学术会议 论文集

合肥通用机械研究院 编

合肥工业大学出版社

前 言

2011 压缩机技术学术会议于 2011 年 12 月在安徽合肥举行。会议由中国机械工程学会、合肥通用机械研究院主办,压缩机技术国家重点实验室承办,北京化工大学、清华大学、浙江大学、上海交通大学、西安交通大学、华中科技大学、沈阳鼓风机集团股份有限公司、陕西鼓风机(集团)有限公司等单位协办。

压缩机是装备制造领域的重要组成部分,在国民经济发展、人们日常生活和国防建设中发挥着举足轻重的作用。从大型成套装备到微型机械,从通用机械到专用工程装备,从传统产业到现代工业,压缩机都是必不可少的核心装备或关键设备。

本次会议围绕现代压缩机设计、制造与智能化运行控制技术,为国内外压缩机及相关领域的学者、专家、工程师、制造商及用户等搭建交流与合作平台。会议交流内容包括:压缩机基础理论;压缩机设计制造技术;压缩机的寿命与可靠性技术;压缩机节能、减排技术;压缩机健康监控与先进维修技术;压缩机产品新技术、新工艺、新材料;压缩机智能化技术;压缩机配套辅机与系统集成技术;压缩机测试技术;国内外高端压缩机技术新进展等。

会议论文经审稿专家筛选,最终录用了 63 篇。按往复压缩机及压缩机相关技术、透平压缩机、制冷压缩机及制冷技术、螺杆压缩机、涡旋及其他回转压缩机等五个章节编录。会议征文过程中得到了相关高校、科研院所和企业的大力支持,在此对大家积极投稿、热情参与表示诚挚的谢意。同时,对所有审稿专家的辛苦工作表示衷心的感谢。

由于文稿数量多,编辑工作量大、时间紧,加之编者水平有限,本论文集有不当之处,敬请作者和读者批评指正。

编 者

2011 年 11 月于合肥

目 录

一、往复压缩机及压缩机相关技术

- 1 锅炉烟气余热深度利用的重大需求及科技问题 徐进良 (3)
- 2 压缩空气储能技术发展现状及其应用展望 李连生 杨启超 肖 军 等 (12)
- 3 气体压缩机技术发展动态 高其烈 王 盛 (17)
- 4 制冷往复压缩机工作过程仿真及设计软件开发 ... 王 乐 唐 斌 杨启超 等 (24)
- 5 节能型压缩空气干燥设备试验系统研究及经济性评价 肖 矛 (31)
- 6 往复式压缩机节能气量调节执行机构分析 李木林 洪伟荣 (38)
- 7 超高压活塞压缩机的液体密封机构研究 张志恒 薛卫东 谭跃进 等 (44)
- 8 空压机标准中能耗指标比功率的探讨 陈 放 肖 矛 喻志强 (52)
- 9 基于有限元法的柱塞泵曲轴应力分析 陈丽娜 程广庆 (57)
- 10 核电厂常规岛屋顶风机的应用现状及改进措施 周 满 宗富荣 (65)
- 11 基于 AMESim 的往复压缩机气量无级调节系统动态仿真
..... 唐 斌 王 乐 杨启超 等 (70)
- 12 大型往复压缩机曲轴受力及其管网振动分析 赵远扬 李连生 何洪波 等 (76)
- 13 空压机变频运行的节能分析及相关问题探讨 高相家 何 明 (82)
- 14 两种控制连杆螺栓预紧力方法研讨与分析 谢伟伟 (87)

二、透平压缩机

- 1 长叶片气动弹性效应对气动特性影响的数值研究 张家忠 王 乐 陈嘉辉 (95)
- 2 多级离心压缩通流匹配与整机试验研究 于跃平 董 帆 王鹏亮 等 (103)
- 3 离心压缩机级扩压器内流动的实验研究 王 斗 张利民 闻苏平等 (111)
- 4 压缩机模型级试验不确定度分析 孙 洋 赵 强 刘 军 (124)

5	静叶调节对轴流压缩机基本级内部流场影响	任 栋 许 靖 王仪田 等	(130)
6	离心压缩机电机国产化验证测试	孙金龙 赵 明	(134)
7	深冷处理工艺在乙烯压缩机零部件加工中的应用 ...	陈 炜 张会国 王冬颖	(139)
8	高效二元离心叶轮型线优化设计	张泽国 赵燕杰 咎世超	(142)
9	离心压缩机热力过程熵变分析	张富春	(149)
10	叶片/无叶扩压器对叶轮进出口参数的影响	李新宏 黄淑娟	(154)
11	压缩机静吹风试验台性能仿真分析	陈 升 于跃平 陈启明 等	(159)
12	离心压气机抽吸式机匣处理的实验研究	肖 军 李连生	(164)
13	离心压缩机机匣处理的研究现状综述与展望	肖 颖 秦国良	(173)
14	高性能复合材料在多级离心压缩级间密封中的应用	杨家义 王鹏亮 李 香 等	(181)
15	径向间距对离心压气机影响的研究	饶 杰 于跃平 胡四兵 等	(186)
16	离心压缩机级性能曲线预测方法的综述及研究	贺 唯 王 阳 秦国良	(191)
17	离心压缩机失谐叶轮振动特性研究	黄文俊 于跃平 朱晓农 等	(198)
18	汽轮机低压级湿蒸汽凝结流动分相模型的三维数值研究	董 帆 王鹏亮 朱晓农 等	(205)

三、制冷压缩机及制冷技术

1	从制冷剂发展看对压缩机的需求	史 琳 安青松	(213)
2	降低 QR-58A 全封闭压缩机噪声的试验研究	任金禄 姚 勇	(223)
3	涡旋式制冷压缩机在 HFO-1234yf 热泵热水器系统中的性能模拟	王 柯 刘 颖 姜 昆	(239)
4	润滑油循环量对压缩机性能影响的研究	王 枫 郭 强 张荣久	(249)
5	直线压缩机中动磁式直线电机的数值模拟	王建中 陈 曦 朱立伟	(253)
6	冷冻机油与低 GWP 替代制冷剂的相溶性	王汝金·张秀平 贾 磊 等	(258)
7	直线压缩机研究进展及发展趋势	闫 辉 祁影霞	(265)
8	低温用半封闭单机双级变频螺杆制冷压缩机的研究	刘 杰 张为民 王志强	(271)
9	螺杆式制冷压缩机内容积比调节技术应用分析	李建风 姜韶明	(276)
10	引射器在大型制冷压缩机性能试验装置中的应用	咎世超 宋有强 周 到 等	(282)
11	《容积式 CO ₂ 制冷压缩机名义工况及性能试验方法》的关键问题研究	钟 瑜 张秀平 贾 磊 等	(288)

- 12 热泵专用压缩机及其在空气源热泵热水器上的应用 饶荣水 陈文强 任林行 等 (294)
- 13 R32 制冷系统降低排气温度的方法研究 秦 妍 张剑飞 (300)

四、螺杆压缩机

- 1 氦气螺杆压缩机油过滤技术发展概况与展望 王天太 陈焕新 孙 超 (307)
- 2 双螺杆有机工质朗肯循环系统设计浅谈 朱为宇 胡建军 (312)
- 3 螺杆压缩机转子啮合间隙控制方式 张天翼 金永飞 周艳辉 等 (316)
- 4 一种新型的螺杆转子加工工艺方法 张凤芝 孔 涛 (321)
- 5 喷水螺杆空气压缩机工作过程研究 张 丹 于 洋 钱则刚 等 (326)
- 6 CAE 技术在螺杆压缩机开发中的应用 杨胜梅 丁汉新 王 利 (332)
- 7 螺杆膨胀机在工业余热及减压动力回收装置中的应用
..... 肖 芳 徐明照 李 敏 (342)
- 8 变频螺杆压缩机的关键技术研究 吴文莉 周 耘 (348)
- 9 螺杆转子铣削的加工误差分析 孙建民 刘 杰 (352)
- 10 滑动轴承在螺杆压缩机中的应用探讨 李建凤 姜韶明 (356)
- 11 工艺螺杆压缩机节能减排技术研究 蔡 宏 杨 毅 刁安娜 (364)

五、涡旋及其他回转式压缩机

- 1 涡旋压缩机非定常流动模拟与涡旋齿变形分析 王 君 刘 凯 章大海 (373)
- 2 新型喷液涡旋压缩机工作过程研究与数值模拟 王 君 查海滨 章大海 (381)
- 3 Scroll Compressor Vibration Optimizations Jiang Wei CHEN Yongjun (390)
- 4 涡旋空压机进气噪声的控制研究 杨启超 李连生 (397)
- 5 7V16 变排量斜盘式压缩机研发 郭来红 王伟俊 王铁军 等 (402)
- 6 一种冰箱用回转式压缩机的研究 郭 震 欧阳新萍 李 杰 (407)
- 7 Intermediate Discharge Valve for Scroll Compressor
..... YAN Chao CHEN Yongjun (413)

一、往复压缩机及压缩机相关技术

锅炉烟气余热深度利用的重大需求及科技问题

徐进良

(华北电力大学 能源的清洁利用与安全北京市重点实验室, 北京 102206)

摘 要:我国电站锅炉是第一大耗能设备,低温烟气余热资源总量达 0.7 亿吨标煤,工业锅炉烟气余热资源总量达 1.1 亿吨标煤。实现锅炉低温烟气余热中的显热和潜热回收利用是我国节能减排的重要组成部分,具有重要意义。本文详细分析了锅炉烟气余热深度利用的重大理论及技术需求,提出了从余热利用系统层面上要考虑的能量利用效率—利用成本—运行经济性,及与低温差传热传质过程有关的部件层面的多相流动与部件性能之间的协同关系与调控原理两个科学问题,建议了相关研究方向,对我国动力行业及其他高耗能行业中的余热利用具有指导意义。^①

关键词:锅炉;余热深度利用;理论;技术

Fundamental Research on Deep Utilization of Low Temperature Flue Gas Waste Heat of Boilers

XU Jin-liang

(The Beijing Key Laboratory of New and Renewable Energy, North China Electric Power University)

Abstract: The power plant boiler is the largest energy-consuming equipment in China, and the total low temperature flue gas waste heat is 0.7 billion tons of standard coal. The total waste heat boiler flue gas in industry boiler is 1.1 billion tons of standard coal. Recovery and utilization the sensible heat and latent heat in low-temperature waste heat boiler are the important part of energy saving and have great significance. In this paper, the major theoretical and technical requirements of deep utilization of low temperature flue gas waste heat of boilers are analyzed. The thermal economy theory for energy utilization efficiency-investment cost-operation economy and the synergy principle and control scheme for the multiphase flow structure, energy transfer and conversion are proposed. This paper also suggests the related research and is the guide for the waste heat recovery in power industry and other high energy-consuming industries.

Keywords: boiler; deep utilization of flue gas waste; theory; technology

引 言

能源安全是我国经济社会健康发展和国防安全的基本保障。随着我国经济快速发展,能源需求量急剧增加,能源储量日渐匮乏,能源供需矛盾日益突出,供需缺口逐年增加。解决能源供需矛盾的可行办法

^① 基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2011CB710703)。The National Basic Research Program (973 Program) (2011CB710703)。

一是“节流”,提高化石能源利用效率;二是“开源”,开发新能源及可再生能源等。据美国能源署 2009 年世界能源展望报道,到 2030 年能源消费结构中化石能源所占比例达 80%左右,仍占据主导地位,因此“节流”成为解决能源供需矛盾的关键所在。2007 年《中国的能源状况与政策》白皮书中明确提出中国能源发展战略坚持“节能优先”,重点措施是“加强工业节能,实施节能工程”。

据统计,美国每年排向环境的余热超过美国每年交通能耗,与日本的全部能耗相当。2004 年我国国家发改委颁布的《节能中长期发展专项规划》中将余热余压利用工程作为“十大重点节能工程”之一。按照《中国能源统计年鉴 2009》提供的各行业能源消费量及各工业部门余热占燃料消耗的比例计算,我国工业余热资源总量高达 8 亿吨标煤,占我国总能耗约 30%,实现余热有效利用对我国工业节能具有重要意义。

锅炉是能量传递与转化系统中最基本的设备。按照国家质量技术监督局发布的《烟气余热资源量计算方法与利用导则》计算,我国电站锅炉和工业锅炉排放的烟气余热资源量高达 1.8 亿吨标煤,占工业余热资源总量的 20%。

电站锅炉是第一大耗能设备,按照设计排烟温度 $120^{\circ}\text{C} \sim 140^{\circ}\text{C}$ 计算,低温烟气余热资源量达 0.7 亿吨标煤。工业锅炉是除电站锅炉以外的第二大耗能设备,设计排烟温度高于电站锅炉,为 $160^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$,低温烟气余热资源量约 1.1 亿吨标煤。

低温烟气余热包含显热和潜热两部分。在燃煤锅炉烟气中水蒸气体积份额约为 8%,携带热量占 30%左右,燃气和燃油锅炉烟气中水蒸气体积份额高达 18%,携带热量占 65%左右。现有各种锅炉要么没有回收烟气余热,要么为避免低温烟气露点腐蚀,仅回收烟气显热,这些是锅炉排烟温度偏高的主要原因。因此,开展烟气余热深度利用研究,充分回收烟气中的显热和潜热,对提高我国化石能源综合利用效率,促进工业节能具有重要意义^[1]。

采用锅炉烟气余热深度利用技术,如回收 50%左右的烟气余热,年节约标煤 0.9 亿吨,相当于 100 台 600MW 火力发电机组的耗煤量,或 5 座三峡电站的年发电量,按标煤价格 800 元/吨计算,年节约 720 亿元人民币,具有巨大的经济和社会效益。

如实现上述烟气余热深度利用,则每年将减少 CO_2 排放量约 2.2 亿吨,可有效缓解温室气体效应。余热排放的减少,大大降低环境热污染,减轻热岛效应。烟气中水蒸气的冷凝回收,将节约大量宝贵水资源。另外,水蒸气凝结过程中可吸收烟气中的 SO_x 和 NO_x 等有害气体,减轻对环境的污染。总之,烟气余热深度利用具有节能、节水、减少 CO_2 及其他有害气体排放等多重功效,是化石能源绿色利用的前沿领域^[2]。

1 我国低温烟气余热利用存在重大理论和技术需求

世界各国余热资源量大面广,涉及多个工业领域。烟气余热作为低品位(温度)能源的一种,在能源和环境问题日益突出的今天,得到世界各国的高度重视,但其有效利用存在一系列重大理论和技术难题,描述如下:

急需研究低温余热利用的最佳模式:锅炉烟气余热资源品位、数量及载体(烟气)成分各不相同,加上余热利用要考虑到与原工艺系统的良好匹配,决定了余热资源的多利用模式,包括直接和间接利用模式。直接利用模式是在原锅炉基础上,改进部件设计或增添少量设备,使锅炉效率提高。间接利用模式是在原锅炉基础上派生出新的系统,包括余热驱动的发电、制冷、制热、冷电联供、海水淡化等。急需研究低温烟气余热利用的最佳模式,结合能量梯级利用原理,发展协同余热利用效率、投资成本及运行经济性等的多目标约束条件下的最优评价模型,建立低温余热资源品质、数量及载体成分等与最佳利用模式的对应关系。

优化烟气余热利用效率是关键:现有低温余热资源利用效率低,需要构建新型热力学循环和筛选循环工质来提高利用效率。热力学卡诺效率取决于高温热源(余热)和低温热源(环境)温度。卡诺效率规定了热机的理想效率界限,提高余热利用效率的关键在于减小热机实际效率与卡诺效率的差别(如图 1

中的 $\Delta\eta$), 减小不可逆损失。对于传热过程, 减小不可逆损失, 对应着减小传热温差、增加传热面积及投资成本。低温余热利用系统是典型的低温差传热系统, 图 2 表示换热器面积与一、二次测温差的关系, 在低温差传热下, 减小传热温差, 导致传热面积及投资成本的急剧上升。对于低品位能源利用来说, “高效” 和 “低成本” 这一矛盾尤为突出。另外, 由于低温余热利用系统总温差小, 热机效率对不可逆性在各部件间的耦合匹配非常敏感, 极有必要研究不可逆性在系统各部件间的分布规律并合理调控, 使利用效率和投资成本间取得平衡。

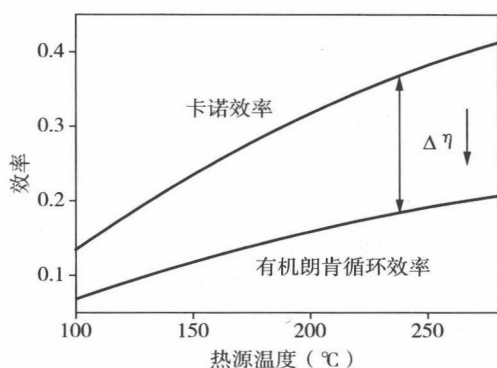


图1 热源温度与效率的关系

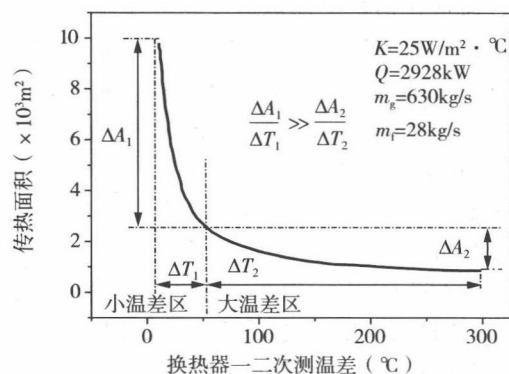


图2 换热面积与传热温差的关系^[3]

工质筛选应考虑综合性能: 当热源温度低于 370°C 时, 水—水蒸气热力系统循环效率低^[4], 采用低沸点有机工质朗肯循环(ORC)热功转换是低温余热利用的大趋势。全世界已有 2000 多套 ORC 系统在运行, 已生产出单机容量为 14000kW 的 ORC 机组, 但工质多为氢氟氯烃(HCFC)类物质, 对臭氧层有破坏作用而将被禁用。对于 150°C 热源, 氢氟烃(HFC)类工质具有较高效率, 仍然被使用, 但由于其较高的温室效应潜值(GWP), 最终将被淘汰。对于 300°C 热源, 通常采用烷烃类及苯类工质, 由于其可燃性, 限制了它们的使用。新工质筛选应综合考虑循环效率、流动传热性能、环保性及安全性等。

低温余热利用为多相流学科提出了挑战性课题: 低温余热利用系统中广泛存在着多相流动、能量传递及转换, 许多机理和规律未被揭示。例如, 为充分利用低温烟气中的水蒸气潜热, 酸露点腐蚀难以避免, 严重影响余热锅炉或冷凝换热器的寿命, 水蒸气在大量不凝性气体及固体颗粒条件下的冷凝传热规律, 全世界都缺少研究。相变传热是实现低温差传热的有效手段, 蒸发器和冷凝器中的多相流动结构(流型)与传热的协同关系未被很好揭示, 强化传热和流动阻力的增大不能很好匹配, 增加了相变传热的不可逆损失和预测难度。对于多组分混合工质相变流动与传热, 存在 Marangoni 效应的影响。相变系统还可能出现流动不稳定性, 严重影响了低温余热利用系统的稳定运行。另外, 人们还未对膨胀机复杂流道内的多相流进行系统、详细的研究。以上这些构成了多相流学科富有挑战性的命题。

酸露点腐蚀成为低温烟气余热深度利用的技术瓶颈: 长期以来, 为避免水蒸气在受热面冷凝造成低温腐蚀, 排烟温度一般设计在酸露点温度以上, 烟气中水蒸气所含的汽化潜热随烟气一同排入大气, 造成了大量能源浪费。如能对低温烟气余热进行深度利用, 将大幅度提高能量利用效率^[5]。低温烟气余热深度利用, 将使烟气温度处于酸露点温度以下, 露点腐蚀难以避免, 造成受热面腐蚀, 成为制约低温烟气余热利用的重大技术瓶颈。

低温余热利用存在着诸多重大技术需求: 在低温余热利用系统中, 存在着蒸发器、冷凝器、膨胀机等重大技术需求。由于人们对膨胀机复杂流道内的多相流动、传热及能量转换规律知之甚少, 特别是对全流膨胀、启动、停机等变工况运行规律没有掌握, 存在着设计理论和制造技术的重大需求。另外, 为利用间歇性或不确定性余热资源, 需发展新一代余热品位提升及储存技术, 化学热泵是良好选择, 需筛选化学反应物系、构建热化学循环、发展新型化学反应器设计理论和方法等。

需探索低温余热利用系统集成、控制及运行规律: 为经济、安全、可靠利用余热资源, 需研究先进的系

系统集成策略;发展优化的运行方式;探索启动、停机及变工况下的控制优化策略等。

2 国内外研究现状和发展趋势

2.1 锅炉烟气余热利用现状及趋势

大型火力发电机组通常采用提高汽水参数的方式来提高机组效率,如发展超临界、超超临界机组,但提高汽水参数也受到材料高温高压腐蚀等制约。火力发电机组节能的另一有效途径是对烟气余热的深度利用。通常在锅炉尾部烟道安装省煤器和空气预热器,降低排烟温度,提高锅炉效率。目前,我国大型电站锅炉设计效率约 93%。实际运行中锅炉排烟温度高于设计值 $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$,使锅炉效率降低 $0.3\%\sim 0.5\%$ 。在实际运行方面,主要通过燃烧调整优化和受热面智能吹灰优化技术降低排烟温度^[6]。在技术方面,主要研究省煤器和空气预热器的强化传热技术^[7,8]及回转式空气预热器密封改造技术。在系统集成方面,西安交通大学^[9]、山东大学^[10]等单位开展了低压省煤器研究,在开封电厂、长春第二热电厂、山东十里泉电厂等 200MW 级以下机组锅炉成功应用,普遍降低排烟温度 $25^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$,但由于低温腐蚀导致机组安全可靠降低,制约了该技术的大规模推广。2009 年,上海外高桥电厂百万千瓦超临界机组的供电煤耗为 282g/kWh,创造了供电煤耗世界最低纪录,其中采用“广义回热系统”,即在脱硫塔前加装烟气冷却器,使机组供电煤耗下降 2.71g/kWh。尽管该技术被列入 2009 年国家重点节能推广项目,但低温腐蚀问题依然没有解决,进一步制约了排烟余热的深度利用。

在工业锅炉方面,近年来,国内一些单位经过努力,已经在很多工业锅炉尾部安装了余热回收系统,为用户带来了良好的经济效益,但由于各种原因,工业锅炉的排烟温度仍然居高不下。我国现役工业锅炉实际排烟温度普遍维持在 $190^{\circ}\text{C}\sim 280^{\circ}\text{C}$ 水平,排烟温度偏高是普遍现象,存在大量的排烟余热可以利用。工业锅炉排烟温度一直偏高的主要原因是烟气中硫酸腐蚀和湿堵灰问题一直没有得到彻底解决,表现为排烟温度低于酸露点温度时,烟气中含有硫酸液体,腐蚀严重;烟气中的飞灰与硫酸液体混合在一起,以比干灰高得多的黏附力黏附在受热面上,使得目前常规清灰装置(蒸气或压缩空气吹灰器、钢珠清灰装置、机械振打或声振荡清灰器)不能将其有效清除,受热面被积灰堵塞,锅炉就必须停运。

根据美国能源部 2008 年颁布的余热回收技术和机会报告^[3],美国大约有 43000 台工业锅炉,每年消耗 2.33 亿吨标煤,其中烟气余热带走了 4296 万吨标煤。目前美国锅炉大部分是燃气锅炉,其平均效率为 $80\%\sim 85\%$ 。在美国已有少量燃气锅炉采用了烟气冷凝式省煤器,可将烟气温度降低到 $38^{\circ}\text{C}\sim 66^{\circ}\text{C}$ 。

锅炉低温烟气余热回收利用方式一般有两种:一种是增加空气预热器和省煤器受热面,将烟气余热加热空气和锅炉循环水;另一种是增加低温有机朗肯循环系统,将低温烟气余热转换为高品位电能或机械功。如转换成电能,则可发展低温烟气余热驱动的分布式供能系统,电能使用不受任何终端用户约束,在发展我国社会主义新农村建设中也具有重要意义。如转换成机械功,可直接用于驱动锅炉的引风机、鼓风机及水泵,减少工业锅炉对高品位电能的消耗。当然,还存在着余热制冷、制热、功冷联供等间接利用模式。随着能源价格上涨,低温烟气余热热功转换在国外引起高度重视。如美国 Transpacific Energy 公司在夏威夷安装了一套 500kW 生物质锅炉烟气余热有机朗肯循环发电装置,年发电量达 438 万度。欧美国家已建成了许多低温烟气余热有机朗肯循环发电系统,热源包括内燃机废气、燃气轮机烟气、水泥窑炉烟气、垃圾焚烧炉烟气等。除烟气余热发电之外,低温热源有机朗肯循环发电系统近十年来已经在地热发电、生物质热电联供、太阳能热发电、工业和机械设备余热发电等方面得到应用。到 2009 年为止,有机朗肯循环发电系统的总装机容量已达 160 万千瓦^[11]。目前世界上从事有机朗肯循环系统设计安装的公司有十多个。从国外应用现状看,大多系统都是 MW 级,缺乏十千瓦级的有机朗肯循环系统关键技术。对于大量使用的工业锅炉来说,发展烟气余热驱动的十千瓦级有机朗肯循环发电系统对于提高化石能源综合利用效率及发展分布式供能系统来说,意义重大,是国际上的发展趋势。

我国余热发电技术与发达国家存在较大差距,目前主要应用于水泥等建材行业和地热领域。水泥行业已建成余热电站 186 座,主要采用水—水蒸气常规系统,难以用于低温烟气(小于 300°C)余热热功转

换,传统汽轮机技术也限制了机组功率向下延伸。地热发电领域主要采用扩容闪蒸技术,由于效率低,建成的地热电站相继关闭^[12]。

2.2 低温烟气余热利用基础理论和关键技术研究现状及趋势

一般认为大型燃煤机组采用改进锅炉尾部烟气空气预热器和省煤器,提高机组效率的余热直接利用模式较好。工业锅炉烟气余热存在多种利用模式,但由于种类繁多,服务对象各异,发展工业锅炉烟气余热有机朗肯循环热功转换系统,与锅炉本身具有很好的衔接匹配,对终端用户具有很好的适应性,是较好的一种间接利用模式。以下主要综述大型燃煤机组烟气余热直接利用,及工业锅炉烟气余热朗肯循环间接利用相关理论和技术研究进展。

低品位能源利用热力学基础及评价:围绕提高低温余热有机朗肯循环效率,近年来的研究工作主要有:(1)构建先进热力学循环,如超临界循环、带回热的有机朗肯循环、Kalina 循环等。Angelino 等人研究了应用 LNG 冷能的 CO₂ 超临界循环,获得了较高的循环效率^[13]。Saleh 等人研究了回热型有机朗肯循环,证实采用回热和过热措施,其效率可得到显著提高^[14]。氨-水 Kalina 循环是混合工质发电技术的典范,由于能够解决蒸发器中一、二次侧传热温差沿流动方向的均匀性,理论循环效率比普通循环提高 20%~50%^[15]。(2)筛选有机工质,筛选工质需综合考虑热物性、环保性、安全性等因素。一些工质具有较好的热物性,但存在循环性能欠佳或环保性能差的弊端。目前工质筛选主要是基于现有工质的热物性参数,采用热力学基本定律分析有机工质对朗肯循环效率的影响^[16]。新的发展趋势是采用逆向筛选法^[17],如计算机辅助分子设计方法,配合多目标最优控制理论,基于储存在数据库中的有机基团参数,定量表征新工质应具有的热物性、循环特性、环保性及安全性,为合成新的分子结构提供理论指导。目前,采用热经济学理论对低品位能源利用进行分析和评价的报道很少。

烟气介质复杂热质传递与露点腐蚀机理及防治:烟气酸露点温度是表征低温腐蚀是否发生的指标,在一定程度上表征腐蚀的严重程度。若能建立烟气露点温度与燃料含硫量等因素之间的定量关系,对于低温腐蚀防治非常重要。然而,国内外目前主要依靠经验方法估算酸露点温度。急需建立考虑飞灰颗粒吸附水蒸气及硫酸蒸气等因素的数学物理模型,采用数值模拟精确预测酸露点值。

为了减轻低温腐蚀,国外学者采用 CFD 对烟气中硫酸形成机理、金属和硫酸溶液相互作用机制及腐蚀速率进行了研究^[18],但是低温腐蚀是一个复杂的物理化学过程,需综合应用化学、材料、传热传质学等多学科知识,进行多学科交叉研究。目前,国内外均未彻底解决低温腐蚀问题。减轻低温腐蚀的常规途径主要是提高燃料质量、优化燃烧过程、提高受热面壁温、使用抗腐蚀性材料及材料表面处理等。这些措施成本高,设备制造难度大,防腐材料导热能力差而不利于设备紧凑化,不能从根本上解决低温露点腐蚀问题,无法满足余热深度利用的要求,需发展创新性原理和技术。另外,国内外多数研究把受热面积灰、磨损、腐蚀等各效应分离开来,没有形成一个有机整体进行系统研究,所得成果可靠性低,难以满足实际应用要求。急需将积灰、磨损、露点腐蚀与防护措施、强化换热和流动阻力有机协同,进行整体集成优化。

多组分有机工质相变传热机理及设计优化:源于压水反应堆原子能技术的需求,多相流学科在上世纪 50、60 年代获得了飞跃发展。目前已基本建立多相流动理论框架,建立了经典气泡动力学核化理论。针对压水堆热工水力学、大型燃煤机组锅炉管沸腾传热及石油化工多相流等,建立了可供工程实用的流型转化准则、沸腾和冷凝传热及流动阻力计算式,在两相流不稳定性机理及防治措施、临界热流密度等方面也取得了丰富的成果。西安交通大学多相流国家重点实验室在上述方向作出了重要贡献。

然而,多相流学科由于固有的复杂性,是一个以实验为主的学科。有别于单相流动与传热,多相流动和传热往往很难找到普适意义的计算式,给相变换热器的热力学评价带来困难。另一方面,各国学者投入很大精力研究流动结构(流型)和传热。已经发现,在泡状流区域,传热系数主要受热流密度制约,流速的影响很小;在环状流区域,传热系数主要受流速制约,热流密度的影响很小。但流型和传热两者间的深层次关系未被揭示。实际上,可以通过改变多相系统的结构和尺寸设计,改善和控制流型,筛选出有利于能量传递及转换的流型,使其时空发生概率增大,抑制不利于能量传递及转换所对应的流型,达到改善部件性能的目的。

在单相流动与传热方面,我国科学家过增元院士提出“场协同”理论,过增元和陶文铨院士共同发展了“场协同”理论。本文作者在最近几年试图揭示流型和传热的协同关系,并采用两者的协同关系,发明了适合于微尺度传热的种子气泡传热原理与技术,成功解决了微纳系统过高的沸腾起始点温度这一难题,研究了微纳沸腾传热系统特性,结果表明:(1)新的传热系统可有效触发沸腾起始点,为沸腾系统避免启动烧毁提供了一种广义原理与技术,可推广应用到航空航天领域。(2)新的传热系统可有效消除流动不稳定性,改善了传热系统的温度均匀性,减小了传热系统的热应力。(3)具有显著的强化传热效果,其传热系数是常规传热系统的数倍。(4)为微纳传热系统提供了一种智能化主动控制模式。以上成果发表于国际权威杂志^[19,20],引起较大学术反响,本文作者多次被邀在国际学术会议上对此作特邀报告。

低温余热利用系统存在诸多复杂多相流动与传热传质现象:混合工质沸腾和冷凝、流动不稳定性、由温度和浓度梯度引起的 Marangoni 效应、膨胀机内全流膨胀条件下气液两相流型与热功转换、化学热泵系统中化学反应器内的流型与热质传递等。所有这些都蕴含着深层次流动结构与热质传递的协同关系,探索两者的协同规律,并加以利用,提出创新性结构设计,达到强化传热传质并将流动阻力控制在所接受的范围内,是多相流研究的新思路及理论创新。一旦取得突破,不仅可推动多相流学科的发展,而且在指导低温余热利用系统关键部件的设计方面,具有重要意义。

膨胀机中多组分多相流动与全流膨胀机理:有机朗肯循环采用的膨胀动力装置有两类:一类是速度型膨胀机,即透平膨胀机,这类膨胀机已实现了商业化应用,技术比较成熟;另一类是容积式膨胀机,如双螺杆膨胀机、单螺杆膨胀机、涡旋膨胀机等。由于容积式膨胀机具有转速低、压比高、流量低等特点,因此更适合小型朗肯循环发电系统。容积式膨胀机目前都还处于样机研制阶段,有待完善和发展。在容积式膨胀机中,双螺杆膨胀机研究最为深入,美国水热电公司首先研制成功了双螺杆膨胀机,在加利福尼亚、新西兰、意大利和墨西哥进行了现场实验。最近,英国城市大学、我国江西华电公司均实现了双螺杆膨胀机的小批量生产和示范。英国城市大学 Smith 等人^[21]、日本 Tatuhi 等人^[22]及我国天津大学^[23]均对有机工质双螺杆膨胀机的全流膨胀过程进行了实验和理论研究。单螺杆膨胀机具有转速低(可直接与发电机电耦合)、膨胀比大、变工况性能好、效率高、寿命长、运行稳定等优点,是容积式膨胀机的高端技术,特别适合于烟气余热回收系统。北京工业大学“传热强化与过程节能”教育部重点实验室在国际上首次研制成功了 10kW 和 40kW 单螺杆膨胀机样机,并进行了以压缩空气为工质的性能实验^[24]。

膨胀机涉及热力学、传热学、流体力学、机械设计、材料学及控制等多学科,理论研究难度很大。从国内外研究现状看,主要侧重于膨胀机的加工和性能研究,缺乏对膨胀机内油气两相流在复杂三维流道内的流动、传热和能量转换机理的研究,需建立并进一步完善膨胀机设计理论,提出变工况运行控制策略及润滑设计方法,揭示膨胀机效率的影响因素,提出提高性能的措施。

低温余热品位提升及能量储存:锅炉低温烟气余热资源具有品位低、随机性及不稳定性等特点,要实现有效利用,需进行品位提升和能量储存。化学热泵是集热泵和储能功能于一体的高效节能技术,通过吸放热化学反应实现能量品位提升与储存,具有储能密度大、储存时间长、热损失小等优点,特别适合于低温余热资源的深度利用^[25]。

根据反应物系不同,化学热泵可分为无机系和有机系化学热泵。无机系化学热泵涉及气固化学反应,周期性运行,反应速率慢,热损失大,但投资成本较低;有机系化学热泵是以异丙醇/氢气/丙酮等催化反应体系为代表的气液化学热泵系统,传热性能好,易于实现连续运行。目前,美国、法国、日本等发达国家都在积极研究化学热泵^[26],取得了一定进展,而我国在化学热泵方面的研究还处于初级阶段,相关研究基础非常薄弱,对适应于低温余热特点的反应物系尚缺乏针对性研究,对多相多组分体系化学反应机理、化学反应与能质传递协同机制的认识很不深入,对高效化学热泵循环系统构建及性能评估缺少理论指导等。因此,开展化学热泵能量品位提升及储存基础研究,发展相关新理论、新方法及新技术,具有重要科学意义与实用价值。

余热利用系统集成、控制及运行:余热资源具有随机性和不稳定性特点,余热利用系统受环境气象条

件影响大,存在多变量耦合及严重非线性,给余热利用系统建模、控制及运行带来了挑战^[27]。目前分析对象动态特性的方法主要有移动边界法或离散化法^[28]。由于机理复杂,一些参数无法检测,获得的机理模型复杂,没有自适应能力,不利于全工况控制、状态监测及运行优化。分布式控制系统已用于个别低温余热利用系统中,但未对膨胀机和蒸发器进行协调控制,大多是基于额定工况设计控制器,无法实现全工况优化控制。目前余热利用系统集成研究非常薄弱,未从物质流、能量流及信息流的集成角度进行设计和分析。此外,余热利用系统未能以最佳运行方式工作,缺乏基于数据驱动的运行方式优化及状态监测新理论和新方法。

3 科学问题及相关研究方向

近期,本文作者联合国内有关高校和科研机构获得了国家科技部重大基础项目研究支持,承担了有关锅炉低温烟气余热深度利用的基础研究。该项目凝练两个科学问题,简述如下:

科学问题 1: 能量利用效率—投资成本—运行经济性—热经济学理论。

以获得低温余热最佳利用效率为目标,采用热力学基本定律构建新型热力学循环。发展全面考虑能量利用效率、流动传热特性、环保特性的有机工质筛选方法,发展逆向计算机辅助分子设计方法,结合多目标最优控制理论,定量表征新工质应具有的热物性、循环性、环保性及安全性,为合成新的分子结构提供理论指导。寻求热力学不可逆性在部件间的优化匹配原则,获得利用效率和制造成本间的最佳平衡。拓展热经济学理论,建立全面考虑烟气余热利用效率、投资成本、运行经济性、环境影响等多准则的节能设计评价理论,揭示低温余热资源数量、品位、载体成分等与最佳利用模式间的对应关系,使我国低温余热资源在利用效率、投资成本及运行经济性方面获得最佳优化。余热利用系统具有多变量、强耦合、随机性等特点,建立余热利用过程对象数学模型,提出全工况优化控制策略,发展动态过程状态监测新方法。值得指出的是,本科学问题中的“投资成本”主要指运行前的投资成本,运行后的维护成本、人员成本等都归到“运行经济性”中考虑。

科学问题 2: 多相流动结构与能量传递及转换的协同机理与调控原理。

多相流动与传热传质是低温余热利用系统的共性过程传递现象。以揭示多组分多相流动结构与能量传递及转换的协同规律为学术脉搏,深入揭示流型与能量传递及转换的内在关联性,建立流型与能量传递与转换协同性的数学描述,推广和延伸我国科学家提出的关于单相流动与传热的“场协同”理论,突破传统多相流研究中流型和传热传质等分离研究的局面,丰富和发展多相流理论体系。面向低温余热利用系统关键部件优化设计,利用流型与能量传递与转换的协同规律,创新非能动结构(非能动结构指不依靠外力和信号控制等,按事物本身规律自然工作的结构)设计,改善和控制流型,提高有利于能量传递与转换所对应流型发生的时空概率,弱化不利于能量传递与转换所对应流型的发生概率,达到强化能量传递及转换效率,减小部件不可逆损失的目的。在该思想指导下,发明新一代冷凝式换热器,达到回收利用烟气中水蒸气潜热,彻底突破露点腐蚀这一重大技术瓶颈。发展新一代液体分离式冷凝器,大幅度降低金属钢材消耗。同样,“协同”规律也指导膨胀机及化学热泵中的多相流研究及设计优化。

结合以上两个科学问题,相应的研究方向为:低品位能源利用热力学基础及评价;烟气介质复杂热质传递与露点腐蚀机理及防治;多组分有机工质相变传热机理及设计优化;膨胀机中多组分多相流动与全流膨胀机理;低温余热品位提升及能量储存;余热利用系统集成、控制及运行。预期实现电站锅炉能够回收烟气中水蒸气潜热并抗腐蚀的低压省煤器技术,及发展以单螺杆膨胀机为技术特征的有机工质朗肯循环发电技术等。

致谢

本文受国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目资助(项目号:2011CB710703)。感谢项目组各课题负责人(刘朝、唐桂华、夏国栋、淮秀兰、张建华等教授)及其他学术骨干提供的资料。

参考文献

- [1] 李建锋,吕俊复. 热力塔系统用于湿冷火电厂余热利用及水回收研究[J],中国电机工程学报, 2010,23(30):24—33.
- [2] 周俊虎,赵琛杰,许建华,等. 电站锅炉空气分级低 NO_x 燃烧技术的应用[J],中国电机工程学报, 2010,23(30):19—23.
- [3] Waste heat recovery-technology and opportunities in U. S. industry[R], U. S. Department of Energy, 2008. 3.
- [4] Liu BT, Chien KH, Wang CC, Effect of working fluids on Organic Rankine Cycle for waste heat recovery[J], Energy, 2004, 29(8): 1207—1217.
- [5] 笪耀东,车得福,庄正宁,等. 高水分烟气对流冷凝换热模拟实验研究[J]. 工业锅炉, 2003,1:12—15.
- [6] 国家重点节能技术推广目录(第二批). 国家发展和改革委员会[R], 2009. 1.
- [7] 刘聿拯,袁益超,曹建光,等. 螺旋鳍片管束在锅炉省煤器中的应用分析[J],热力发电, 2003, 10:44—46.
- [8] 张斌,孙志坚,赵辉. 内螺纹管空预器的设计和优化[J]. 能源工程, 2003,2:44—46.
- [9] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1994.
- [10] 黄新元. 龙口电厂#1号炉低压省煤器优化设计锅炉技术[R], 1998,3:22—25.
- [11] Sylvain Q, Vincent L, Technological and economical survey of Organic Rankine Cycle systems[C], 5th European Conference on Economics and Management of Energy in Industry, Algarve, Portugal, 2009, 4: 14—17.
- [12] 顾伟,翁一武,曹广益,等. 低温热能发电的研究现状与发展趋势[J]. 热能动力工程, 2007,22: 115—119.
- [13] Angelino G, Invernizzi CM, Carbon dioxide power cycles using liquid natural gas as heat sink, Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 2935—2941.
- [14] Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, et al., Working fluids for low-temperature Organic Rankine Cycles[J], Energy, 2007, 32: 1210—1221.
- [15] Kalina AI, Combined-cycle system with novel bottoming cycle[J], J. of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106(4): 737—742.
- [16] Mago PJ, Charma LM, Srinivasan K, et al., An examination of regenerative Organic Ranking Cycles using dry fluids[J], Applied Thermal Engineering, 2008, 28: 998—1007.
- [17] Papadopoulos AI, Stijepovic M, Linke P, On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles[J], Applied Thermal Engineering, 2010, In Press.
- [18] Vorgelegt V, Condensation of water vapor and acid mixtures from exhaust gases[D], PhD Thesis, Berlin University, 2004.
- [19] Xu JL, Liu GH, Zhang W, et al., Seed bubbles stabilize flow and heat transfer in parallel microchannels, Int. J. of Multiphase Flow[J], 2009, 35: 773—790.
- [20] Liu GH, Xu JL, Yang YP, Seed bubbles trigger boiling heat transfer in silicon microchannels [J], Microfluid Nanofluid, 2010, 8: 341—359.
- [21] Smith IK, Stosic N, Kovacevic A, Screw expanders increase output and decrease the cost of geothermal binary power plant systems[J], GRC Trans, 2005, 29: 787—794.
- [22] Taniguchi H, Kudo K, Park I, et al., Analytical and experimental investigation of two-phase flow screw expanders for power generation[J], J. Eng. Gas Turbines Power, 1988, 110(10): 628—635.

- [23] 胡亮光, 庞风彪, 王之安, 等. 中低温能源全流发电螺杆膨胀机的性能及试验研究[J]. 工程热物理学报, 1989, 10(4): 354—356.
- [24] 王伟, 吴玉庭, 马重芳, 等. 单螺杆膨胀机的初步试验研究[J]. 太阳能, 2009, 3: 30—32.
- [25] 袁银梅. 一种新型节能装置—化学热泵[J]. 节能技术, 2008, 26: 26—28.
- [26] Wongsuwan W, A review of chemical heat pump technology and applications[J], Applied Thermal Engineering, 2001, 21: 1489—1519.
- [27] 赵钦新, 王宇峰, 王学斌, 等. 我国余热利用现状与技术进展[J]. 工业锅炉, 2009, 5: 8—15.
- [28] Wei DH, Lu XS, Lu Z, et al., Dynamic modeling and simulation of an Organic Rankine Cycle (ORC) system for waste heat recovery[J], Applied Thermal Engineering, 2008, 28: 1216—1224.