

关于热能动力工程技术创新与可持续发展路径的几点探索

李羨

441781*****3215

摘要: 热能动力工程作为能源转化与利用的核心领域,是支撑现代工业体系与民生保障的关键技术支柱。在全球能源转型与“双碳”目标驱动下,传统热能动力技术面临化石能源依赖、碳排放高企、新能源适配性不足等多重挑战。本文从热能动力工程的技术特征与现状出发,系统梳理高效化转换、清洁化燃烧、新能源耦合等创新方向,探索能源梯级利用、循环经济融入、绿色供应链构建及政策市场协同的可持续发展路径,并提出研发投入、标准完善、产业协同及国际合作的保障机制。

关键词: 热能动力工程; 技术创新; 可持续发展; 路径探索; 能源转型

DOI: 10.69979/3060-8767.25.12.071

引言

当前,全球能源结构正从“化石能源主导”向“可再生能源与化石能源协同”转型,新能源(太阳能、风能、地热能等)的大规模接入对热能动力系统的灵活性、兼容性提出更高要求。与此同时,“双碳”目标的提出倒逼热能动力工程必须突破传统路径依赖,通过技术创新实现高效化、清洁化、低碳化转型。在此背景下,探索热能动力工程的技术创新方向与可持续发展路径,成为行业亟待解决的重要课题。

1 热能动力工程的技术特征与发展现状

1.1 技术内涵与核心领域

热能动力工程是一门以热力学、流体力学、传热学为基础,研究热能与其他形式能量转换规律及设备实现的交叉学科。其核心领域涵盖四大板块:一是热力循环系统,包括朗肯循环、布雷顿循环等经典循环及其改进型,是火力发电、工业供热的基础;二是热能转换设备,如锅炉、汽轮机、燃气轮机、余热锅炉等,承担热能向机械能/电能的转化功能;三是燃烧技术,涉及化石燃料、生物质燃料的燃烧过程优化,直接影响能源利用效率与污染物排放;四是系统集成与控制,聚焦多设备协同运行、参数优化及故障诊断,保障系统安全稳定高效运行。从本质上讲,热能动力工程的核心是“能量梯级利用”——将高品位热能用于发电,中低品位热能用于供热、制冷或工业流程,最大化能源利用效率。

1.2 当前面临的多重瓶颈

随着能源转型的推进,热能动力工程的传统模式遭遇三大瓶颈:其一,化石能源枯竭压力。全球煤炭可采

年限约150年,石油约50年,天然气约60年,依赖化石能源的传统热能动力技术难以为继;其二,环保约束强化。“双碳”目标要求2030年前碳达峰、2060年前碳中和,传统技术的碳排放强度已无法满足要求;其三,新能源适配性不足。风电、光伏等新能源的间歇性、波动性导致电网频率不稳定,热能动力系统需具备快速调峰能力,但传统机组(如亚临界火电机组)的调峰速率慢、灵活性差,难以匹配新能源的波动特性。此外,新能源(如太阳能热、地热能)与热能动力系统的耦合技术尚不成熟,导致新能源利用率偏低。

2 热能动力工程技术创新的核心方向

2.1 高效化转换:从“参数提升”到“循环革新”

高效化是热能动力技术创新的首要方向,核心是通过提高能量转换效率减少能源消耗与碳排放。传统技术主要通过提升热力循环参数(如主蒸汽压力、温度)实现效率提升——超超临界机组的参数已从早期的25MPa/600°C提升至35MPa/700°C,热效率突破50%;燃气轮机联合循环的效率已达62%,接近理论极限。但参数提升的空间已逐渐收窄,未来需转向循环革新:一是改进朗肯循环,通过加入回热器、再热器减少冷源损失,或采用新型工质(如CO₂跨临界循环)替代水蒸汽,CO₂的临界温度(31.1°C)与临界压力(7.38MPa)更接近环境条件,循环效率可提升5%~8%;二是开发新型热力循环,如卡琳娜循环(Kalina Cycle),利用氨水混合物作为工质,可回收低品位余热,效率比朗肯循环高10%~15%,适用于钢铁、化工等行业的余热发电。

2.2 清洁化燃烧:从“末端治理”到“源头减碳”

清洁化燃烧技术的核心是减少化石燃料燃烧的碳排放与污染物排放，路径包括“源头控制”与“末端捕集”：其一，低氮燃烧技术，通过分级燃烧、再燃、富氧燃烧等方式降低氮氧化物（NO_x）排放——分级燃烧将空气分为一次风与二次风，降低燃烧区的氧浓度，NO_x排放可减少30%–50%；再燃技术向燃烧区注入少量燃料，形成还原性气氛，分解已生成的NO_x，排放可再减少40%–60%。其二，碳捕集利用与封存（CCUS），这是实现“负碳排放”的关键技术：燃烧前捕集（如煤气化联合循环中分离CO₂）、燃烧后捕集（如用胺液吸收烟气中的CO₂）、富氧燃烧捕集（用纯氧代替空气燃烧，生成高浓度CO₂）。捕集的CO₂可用于油气田驱油（EOR）、化工生产（如合成甲醇）或地质封存，实现“变废为宝”。其三，生物质混燃技术，将生物质（如秸秆、林业废弃物）与煤炭混合燃烧，生物质的碳来自大气，燃烧后释放的CO₂可被植物吸收，实现“碳中性”，混燃比例可达20%–30%，显著降低化石燃料消耗。

2.3 新能源耦合：从“单一供能”到“多能互补”

新能源耦合技术是将热能动力系统与太阳能、地热能、余热等新能源结合，实现“多能互补、梯级利用”。其一，太阳能热耦合，通过太阳能热发电系统（塔式、槽式）将太阳能转化为热能，加热工质（如导热油、熔盐）推动汽轮机发电，与热能动力系统耦合可提高太阳能利用率至60%以上（传统光伏发电仅20%），同时解决太阳能的间歇性问题——夜间或阴雨天可通过热能动力系统补充电力。其二，地热能耦合，干热岩发电通过注入冷水提取地下3–10公里的地热能，转化为蒸汽推动汽轮机发电，与区域供热系统结合可实现“发电+供热”一体化，能源利用效率达70%以上。其三，余热回收耦合，工业余热温度通常在300–600°C，通过换热器回收热量产生蒸汽，推动背压式汽轮机发电或用于区域供暖，可将工业余热利用率从当前的20%提升至50%以上，减少化石能源消耗^[1]。

3 热能动力工程可持续发展的路径探索

3.1 构建能源梯级利用体系，最大化能源效率

能源梯级利用是热能动力工程可持续发展的核心路径，其本质是“按质用能”——高品位热能（如100°C以上的烟气）用于发电，中品位热能（如300–600°C的蒸汽）用于工业流程或区域供热，低品位热能（如低

于100°C的热水）用于制冷或农业灌溉。典型应用是区域综合能源系统：以热能动力站为核心，向周边区域供应电力、热力、冷气——高温蒸汽进入汽轮机发电，排出的中压蒸汽用于区域供热，低压蒸汽进入吸收式制冷机产生冷水用于供冷，剩余的低品位热水用于供暖或农业大棚。这种模式可将能源利用效率从传统的40%提升至70%以上，减少能源浪费与碳排放。此外，工业企业的“热-电-冷”联产系统，通过一台设备实现三种能源的输出，比单独发电、供热、制冷的总效率高15%–20%。

3.2 融入循环经济模式，减少资源消耗

循环经济是可持续发展的核心理念，热能动力工程可通过“资源-产品-废弃物-再生资源”的闭环模式，减少资源消耗与废弃物排放。其一，粉煤灰综合利用，燃煤电厂产生的粉煤灰占煤炭消耗量的15%–20%，可用于制作水泥、砖块、混凝土掺合料，或作为填充材料用于建筑工程，利用率可从当前的60%提升至90%以上。其二，脱硫石膏回收，燃煤电厂的脱硫石膏占烟气处理量的10%–15%，可用于制作石膏板、水泥缓凝剂，替代天然石膏，减少对地质资源的开采。其三，废水循环利用，热力系统的冷却废水、脱硫废水经处理后可回用于冷却系统或冲渣，减少新鲜水的消耗——例如，某电厂通过废水处理系统，将废水回用率从50%提升至80%，每年减少新鲜水消耗100万吨^[2]。

3.3 打造绿色供应链，降低全生命周期碳排放

绿色供应链是从设备制造到报废的全流程低碳化管理，核心是减少供应链各环节的碳排放。其一，设备制造环节，采用环保材料（如高强度、耐腐蚀的合金材料）替代传统钢材，减少冶炼过程中的碳排放；推广数字化制造技术，如3D打印，减少材料浪费——例如，3D打印的汽轮机叶片可减少50%的材料消耗。其二，物流环节，采用电动车辆或氢燃料电池车辆运输设备，减少燃油消耗；优化运输路线，降低空驶率，减少碳排放。其三，报废设备回收，建立设备回收体系，将报废的锅炉、汽轮机拆解，回收金属材料（如钢、铜）与稀有金属（如镍、钛），重新用于设备制造，延长资源生命周期。例如，某企业回收报废燃气轮机的涡轮叶片，提取其中的镍合金，用于制造新的叶片，减少了对原生镍矿的依赖。

3.4 协同政策与市场机制，激发创新动力

政策与市场机制是推动可持续发展的外部动力，需形成“政策引导、市场驱动”的协同模式。其一，碳交易市场，通过给企业分配碳排放配额，允许企业买卖配额，激励企业减少碳排放——例如，采用高效清洁技术的热能动力企业，碳排放低于配额，可将剩余配额出售获利，而高碳企业需购买配额，增加其减排压力。其二，绿色金融支持，通过绿色信贷、绿色债券、绿色基金等方式，为热能动力企业的技术创新提供资金支持——例如，银行向研发超超临界机组的企业提供低息贷款，基金投资于CCUS技术研发项目。其三，补贴与税收优惠，对采用高效清洁技术的项目给予补贴（如超超临界机组建设补贴、余热回收项目补贴），对高碳技术征收碳税或环境税，引导企业转向低碳技术^[3]。

4 适应性提升的保障机制

4.1 强化研发投入与人才培养

技术创新的核心是人才与投入。其一，加大研发投入，企业需设立研发中心，每年将营业收入的3%-5%用于热能动力技术创新；高校与科研机构需建立联合实验室，开展前沿技术研究（如新型工质、AI控制算法）。其二，培养复合型人才，高校需开设“热能与可持续发展”“智能热力系统”等专业方向，课程涵盖热力学、新能源、数据分析等内容；企业需加强在职培训，通过模拟施工、智能装备操作等方式提升员工的实践能力；建立认证制度，对具备热能技术创新与可持续发展能力的人员颁发资格证书，推动行业整体技能水平提升。

4.2 完善技术标准与规范体系

标准是技术创新的“指挥棒”，需建立覆盖全生命周期的标准体系。其一，设备技术标准，制定高效清洁热力设备（如超超临界锅炉、低氮燃烧器）的性能指标、测试方法与验收规范，确保设备的可靠性与环保性。其二，系统集成标准，制定新能源耦合热力系统（如太阳能热发电与燃气轮机联合循环）的设计、施工、运行标准，解决多能互补的兼容性问题。其三，碳排放核算标准，制定热能动力系统的碳排放核算方法，明确边界条件与计算规则，为企业参与碳交易市场提供依据^[4]。

4.3 构建产业协同与创新生态

产业协同是技术创新与成果转化的关键。其一，建立产业联盟，由热能动力企业、设备制造商、软件开发商、科研机构、政府组成，整合上下游资源，共享技术与数据——例如，联盟可共同开发新型热力循环系统，企业负责产业化，科研机构负责技术研发，软件开发商负责智能化控制。其二，推动产学研合作，企业与高校、科研机构联合开展技术攻关，例如，企业提出“提高余热回收效率”的需求，高校研发新型换热器，科研机构优化系统集成，共同推动技术成果转化。其三，培育龙头企业，支持具有技术优势的企业做大做强，发挥其引领示范作用。

5 结论

热能动力工程的创新与可持续发展，是实现“双碳”目标与能源转型的关键。本文从技术创新的四大方向（高效化、清洁化、耦合化、智能化）与可持续发展的四大路径（梯级利用、循环经济、绿色供应链、政策市场协同）出发，构建了热能动力工程的转型框架。研究表明，通过技术创新突破传统瓶颈，通过路径优化实现低碳循环，通过保障机制激发创新动力，热能动力工程可从“高碳依赖”转向“低碳引领”，为新型能源系统与可持续发展提供核心支撑。未来，随着技术的进一步突破与政策的持续支持，热能动力工程将在能源转型中发挥更重要的作用——更高效率的能量转换、更清洁的燃烧方式、更广泛的新能耦合，以及更智能的系统控制，将成为行业发展的主旋律。本研究为热能动力工程的技术创新与可持续发展提供了理论参考，后续需结合具体实践进一步验证路径的有效性，推动技术成果落地应用。

参考文献

- [1] 张恒超,徐晓妮.热能与动力工程中的节能技术研究[J].中国设备工程,2025(5):227-229.
- [2] 杨晨琛,朱洁雯.节能降耗中热能与动力工程的实际运用研究[J].产业创新研究,2024(10):85-87.
- [3] 武鑫.火力发电厂热能动力系统优化与节能改造研究[J].自动化应用,2024(7):233-235.
- [4] 胡祥兴.火电厂热能动力工程中的节能技术分析[J].中国设备工程,2023(19):242-244.