

# 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

李美

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。从本质上看，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℃ 提升至 35MPa/700℃，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 CO<sub>2</sub> 跨临界循环）替代水蒸汽，CO<sub>2</sub> 的临界温度（31.1℃）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（ $\text{NO}_x$ ）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， $\text{NO}_x$ 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  $\text{NO}_x$ ，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  $\text{CO}_2$ ）、燃烧后捕集（如用胺液吸收烟气中的  $\text{CO}_2$ ）、富氧燃烧捕集（用纯氧代替空气燃烧，生成高浓度  $\text{CO}_2$ ）。捕集的  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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，能源利用率达 70% 以上。其三，余热回收耦合，工业余热温度通常在 300–600℃，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<sup>[1]</sup>。

## 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℃ 以上的烟气）用于发电，中品位热能（如 300–600℃ 的蒸汽）用于工业流程或区域供热，低品位热能（如低

于 100℃ 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<sup>[2]</sup>。

### 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<sup>[3]</sup>。

## 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<sup>[4]</sup>。

### 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.