

引用格式: 林燕, 杨道宏, 李斌. 核能供热技术的发展现状、特点与展望 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(4): 100-108. LIN Yan, YANG Daohong, LI Bin. Development status, characteristics, and prospects of nuclear energy heating technology [J]. Southern energy construction, 2025, 12(4): 100-108. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-178.

核能供热技术的发展现状、特点与展望

林燕[✉], 杨道宏, 李斌

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 在当今“双碳”目标能源结构和减少化石能源依赖的能源安全背景下, 核能作为清洁能源, 在电力和非电业务中的占比将越来越高, 核能供热是继发电后最具前景的应用方向。文章旨在对核能供热技术进行综述性分析, 以期后续相关工程项目或技术研究提供参考。[方法] 介绍了国外核能供热特别是供热小堆和高温气冷堆的发展, 重点阐述了我国核能供热的发展现状, 对核能供热具有的选择多样性、负荷不匹配性、远距离输送和高安全性的特点进行了详细的描述, 并对我国核能供热技术的发展进行展望。[结果] 我国核能供热技术尚处于起步阶段, 但借助于核电新高速发展阶段的开启、国内各类政策的支持加强, 在昌江“玲龙一号”小堆示范工程、徐圩核能供热工程等项目陆续建成投产后, 我国核能供热技术将跨入国际领先水平。[结论] 核能供热为核能利用提供了新的发展路径, 文章介绍的核能供热技术可作为相关工程应用的技术参考。

关键词: 核电厂; 供热; 小堆; 高温气冷堆; 发展现状

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-178

文章编号: 2095-8676(2025)04-0100-09

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-178

中图分类号: TL99; TM621



论文二维码

Development Status, Characteristics, and Prospects of Nuclear Energy Heating Technology

LIN Yan[✉], YANG Daohong, LI Bin

(Guangdong Electric Power Design Institute of China Energy Engineering Group, Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Against the backdrop of the "carbon peaking and carbon neutrality" goals driving energy restructuring and the need to enhance energy security by reducing fossil fuel dependence, nuclear energy, as a clean energy source, is expected to play an increasingly significant role in both power generation and non-electric applications. Among these, nuclear-based heating stands out as the most promising application beyond electricity production. This paper provides a comprehensive review of nuclear heating technologies, aiming to serve as a reference for future engineering projects and technical research in this field. [Method] The development of nuclear energy heating abroad was introduced in this paper, particularly small modular reactors for heating and high-temperature gas-cooled reactors, and the current development status of nuclear energy heating in China was focused on and expounded. The characteristics of nuclear energy heating were described in detail, including diversity of options, heat load mismatch, long-distance transportation, and high safety, and the development of nuclear energy heating technology in China was prospected. [Result] Nuclear energy heating technology in China is still in its infancy, but with the launch of a new high-speed development phase of nuclear power and strengthened support from various domestic policies, after the successive completion and commissioning of demonstration projects such as the Changjiang "Linglong One" SMR and the Xuwei Nuclear Energy Heating Project, China's nuclear energy heating technology will step into the international leading level. [Conclusion] Nuclear energy heating provides a new development path for nuclear energy utilization. The nuclear energy heating technology introduced in this paper can serve as a technical reference for related engineering applications.

收稿日期: 2025-06-23 修回日期: 2025-07-14

基金项目: 中国能建广东院科技项目“高温气冷堆热电联产机组关键技术研究项目”(EV11961W)

Key words: nuclear power plant; heating; small modular reactor; high temperature gas-cooled reactor; development status

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

截至2024年底,核电机组装机容量为60.83 GW,占全国发电装机容量的1.7%^[1];2024年运行核电机组累计发电量445.175 TWh,占全国累计发电量的4.73%^[2]。截至2025年5月,“十四五”期间已有46台核电机组通过国务院核准,26台核电机组正式开工建设,我国核电进入了新阶段的高速发展期。

截至2024年底,风光装机容量全国占比44%,但2024年的风光发电量仅占全国累计发电量的14.4%;随着减少化学能源依赖的进程发展,核能作为电力能量利用占比将越来越高。2020年9月,习近平总书记在联合国大会上提出碳达峰、碳中和的目标后,国务院进行了战略部署,明确核能综合利用是实现双碳目标的重要组成部分^[3-5]。此外,在当前国际动荡形势下,能源安全愈发重要,核能是构建多元化的能源供给的选择之一^[6]。

核能供热是核能综合利用的主要组成部分,是继发电后核能最具前景的应用方向;潜在热用户主要包括海水淡化、住宅与商业建筑区域供热、工业工艺供热、制氢与燃料合成等。

1 核能供热发展现状

1.1 国际核能供热发展现状

全球核反应堆产生的热量用于非电应用的比例仍不到1%^[7],主要用于区域供热、海水淡化和纸浆或造纸等低温工业生产流程。目前全球共有437座核电站^[8],其中有70多座核反应堆用于核能热电联产。

20世纪60年代核能区域供热就已经在瑞典阿格斯塔和英国卡尔德豪尔核热电联产电站中得到应用,成为一项成熟技术;如今在保加利亚、捷克、罗马尼亚、俄罗斯和瑞士等国也已得到广泛应用^[9]。

2011年日本福岛第一核电站事故发生后,出于公众对核安全的担忧,全球的核电站新增投资增长乏力;近年来,能源脱碳的需求日益迫切,加之政治不确定性导致各国对能源安全的担忧,核能进入了

新一轮的高速发展期。美国、日本等国陆续重启了之前关闭的核电站。

2023年第28届联合国气候变化大会(COP28)上,20多个国家签署宣言,设定在2050年将全球核电装机容量增加2倍的目标^[10];2024年,COP29又有6个国家加入。国际能源署IEA于2019年发布《核能热电联产指南》,经济合作与发展组织核能机构(Nuclear Energy Agency of the Organization for Economic Co-operation and Development, OECD/NEA)于2022年发布《超越电力:核能热电联产的经济性》,旨在指导和推动各成员及联系国在核能供热方向的发展。

近年来核能供热研究集中在低温供热堆和高温气冷堆的研究上。

1.2 低温供热堆和高温气冷堆

早期低温核供热小堆仅供热,提供150℃以下蒸汽,可为区域供热、海水淡化和低温工艺蒸汽等低温应用提供热源。1982年、1983年苏联分别开始建设2台AST-500低温供热堆,切尔诺贝利事故发生后,项目暂停至今。“罗蒙诺索夫院士”号漂浮式核电机组,是世界首个漂浮式核能热电站,于2019年12月开始汽轮机运行试验后投入使用^[11]。凯洛斯电力公司(Kairos Power)是美国第一家获得第四代小型模块化反应堆建设许可的公司;实验堆在2023年12月获得许可后,于2024年7月开工建设,计划2027年投入运营;这座试验反应堆将仅用于供热。全球超过30个国家一直在开展小型模块化反应堆(Small Modular Reactors, SMRs)研究,超过80种堆型设计正在开发中^[9]。

高温气冷堆由于反应堆出口的蒸汽温度高的特性,使得核能高温甚至超高温供热成为可能;因此在其反应堆研究早期,供热应用的研究就随着发电应用研究同步开展。OECD/NEA于2022年6月发布《高温气冷堆与工艺热应用》,介绍了高温气冷堆作为低碳热源的技术特点和发展现状,并讨论了该技术如何满足不同工业过程的工艺热需求,同时论述了高温气冷堆在工业热应用中的潜力和挑战^[12]。

1998 年日本建成 30 MW 高温工程实验堆(High Temperature Thorium Reactor, HTTR), 反应堆出口温度达 950 °C; 基于 HTTR 日本提出 300 MW 燃气轮机高温反应堆热电联产机组(GTHTR300C)。

1.3 中国核能供热发展现状

中国在 2016—2018 这 3 年“零核准”后、重启核电核准建设之路。近 10 年的核准机组如图 1 所示。2022—2025 年我国已连续核准建设台数在 10 台及以上。其中, 2024 年核准建设的江苏徐圩核能供热项目是中国首个以供热为主的新建核能热电联产机组。标志着中国核能供热已经从现存商业机组的供热改造、二回路抽汽供热阶段, 迈向真正意义上的热电联产机组, 核能供热进入了新的发展阶段。近年来, 国家出台了《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》等多项政策^[3-5,13-15], 推动现役核电机组向周边供热、发展低温供热堆示范等, 为核能供热的发展提供政策保障。

早在 20 世纪 60 年代, 国内就开始对核能供热研究, 但集中于供热小堆的研究; 由于政策及经济性等原因, 中途一度中断; 于 2000 年后开始重启供热堆研究。目前国内研究的主要供热小堆如表 1 所示^[16-17]。

除 HAPPY200 外, 国电投集团还由上海核工院自主研发 CAP200 一体化多功能供热堆。CAP200 是基于其成熟的第三代核电技术体系(CAP 系列)进行优化设计。示范项目佳木斯综合智慧核能供热工程正在前期设计阶段。国内唯一在建的小堆项目为海南昌江多用途模块式小型堆科技示范工程, 采用“玲龙一号”技术, 由中核集团自主研发的第三代

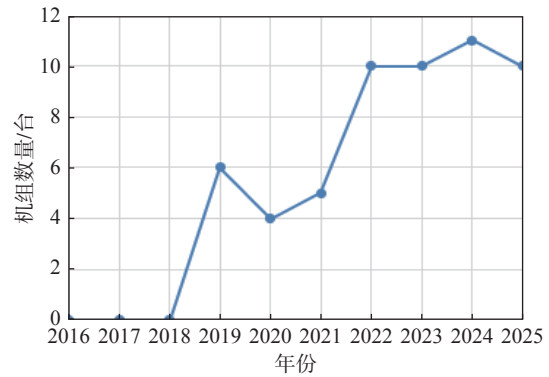


图 1 中国近 10 年核准建设核电机组数

Fig. 1 The Number of nuclear power units approved for construction in China in the past decade

小型压水堆, 具有完全自主知识产权。项目计划 2025 年底并网发电、2026 年投产, 单机发电功率为 125 MW; 有望成为全球首个发电的陆地小堆机组。上述国内供热小堆目前均处于前期设计研究阶段, 示范工程的推进进展缓慢。

我国对大型商用核能热电联产的应用开始研究的时间则较晚。山东海阳核能供热一期工程, 是全国首个核能供热示范工程, 于 2019 年 9 月投运, 供暖面积达 70 万 m²。田湾核电“和气一号”工业核能供汽项目, 是全国首个开工建设的工业用途核能供汽项目, 于 2024 年 6 月投运, 最大供热能力为 600 t/h。截至 2024 年底, 国内已投产或建设中的核能供热项目有山东海阳核能供热工程、山东荣成核能供热项目和江苏徐圩核能供热项目等共 8 个项目, 详见表 2。基于徐圩核能供热项目的成功经验, 广东、海南等多地规划有高温气冷堆相关的供热项目。

核电站内可用于对外供热的蒸汽热源主要包括:

表 1 核能供热小堆

Tab. 1 Small modular reactor for heating

项目	燕龙泳池堆	华鹏一号	HAPPY200
反应堆堆型	DHR-400	NHR200-II	HAPPY200
堆型研究单位	原子能院设计所	清华大学核研院	国电投中央研究院
功率/MW	400	200	200
设计寿命/年	60	60	60
环路	4路	2路	2路
堆芯出入口温度/°C	98/68	278/230	120/80
一回路设计压力/MPa	0.6	8	0.6
示范工程	中核辽源“燕龙”多用途清洁供暖示范工程	广东惠州小型一体化自然循环堆示范项目	白山核能供热项目
主要投资方	中核集团	中广核集团	国电投集团

表2 国内在建或投运的核电热电联产机组

Tab. 2 Nuclear cogeneration units under construction or operation in China

核电厂	供热	投运时间	供热系统	抽汽汽源	
山东海阳核能供热	一期	供暖	2019年9月	全国首个核能供热示范工程; 31.5 MW, 供暖面积70万 m ²	高压缸排汽
	二期	供暖	2021年11月	202.5 MW, 供暖面积500万 m ²	高压缸排汽
	三期	供暖	2023年11月	900 MW, 供暖面积1250万 m ²	高压缸排汽
浙江海盐核能供热示范工程	一期	供暖	2021年12月	我国南方首个核能供热示范工程; 供暖面积46万 m ²	辅助蒸汽
	二期	工业供热	2022年12月	最大供热能力37.5 MW	辅助蒸汽
	三期	供暖	计划2025年	150 MW, 供暖面积400万 m ²	辅助蒸汽
	四期	供暖	—	探索跨区域供热	—
田湾核电“和气一号”工业核能供汽项目	一期	工业供热	2024年6月	首个工业用途核能供汽项目(石化产业), 工业蒸汽: 1.8 MPa、240 °C、最大600 t/h, 输送管道全长23 km	主蒸汽
辽宁红沿河核能供暖示范项目	—	供暖	2022年11月	东北地区首个核能供暖项目; 12.77 MW, 供暖面积24.24万 m ²	汽轮机抽汽
山东荣成核能供热项目(石岛湾高温气冷堆)	—	供暖	2024年3月	首次实现四代核能技术向城镇居民供暖; 供暖面积19万 m ² ; 8.1 km核能供热管道	主蒸汽
浙江三门核电工业供汽项目	一期	工业供热	计划2026年	工业蒸汽1800 t/h, 输送长度约45 km	—
华能石岛湾核电扩建一期工程	—	供暖	#1-2029年 #2-2030年	380 MW, 供暖面积2000万 m ²	—
江苏徐圩核能供热一期工程	—	工业供热	#1-2031年 #2-2032年	设计热负荷4082 t/h, 分中压、次中压和低压三级蒸汽; 1台高温堆和2台“华龙一号”耦合供热	主蒸汽

注: 不包括海水淡化机组。

辅助蒸汽、汽轮机抽汽(缸体或高、中压缸排汽)和主蒸汽。采取何种热源, 需根据热负荷的参数及运行特性要求, 反应堆启停、运行及瞬态特性, 汽轮发电机的特性, 结合电厂运行维护和投资等, 经过技术经济分析比较确定。

2 核能供热特点

2.1 选择多样性

核能可为各类工业提供热源, 包括化工、造纸、炼油和制氢等工业。核能供热具备显著的多样性特点, 可以根据用户侧的不同需求, 采用不同类型的反应堆匹配不同的需求。核能所提供的热源温度范围广, 可以涵盖 150 ~ 1000 °C; 如目前已大规模商业化运行的压水堆可提供的最高蒸汽温度约 250 °C, 第四代金属冷却反应堆可提供的最高蒸汽温度约 500 °C, 第四代高温气冷堆可输出最高蒸汽温度在 700 ~ 1000 °C。因此, 核能可满足从低温(<150 °C)、中温、高温(>500 °C)和超高温(>540 °C)各类型的供热需求, 详见表3。

表3 核能供热反应堆选择

Tab. 3 Selection of nuclear heating reactors

堆芯出口温度/°C	反应堆	应用场景
<280	供热小堆、压水堆、沸水堆	中低温蒸汽: 区域供暖、海水淡化、造纸、食品等工艺供热(蒸汽或热水)
480 ~ 570	铅冷快堆(LFR)	中、高温蒸汽: 制氢、炼油、石化、造纸等工艺蒸汽
500 ~ 550	钠冷快堆(SFR)	
510 ~ 625	超临界水堆(SCWR)	
700 ~ 800	熔盐堆(MSR)	高温、超高温蒸汽: 高制氢、石化、煤气化、陶瓷或玻璃制造等工艺蒸汽
700 ~ 1000	高温气冷堆(MHTGR)	
~ 850	气冷快堆(GFR)	
900 ~ 1000	超高温堆(VHTR)	

除采用单一堆型外, 还可以像江苏徐圩核能供热项目一样, 采取不同堆型搭配耦合, 或者与煤电、气电、光热等电站耦合供汽, 提供更加多样的蒸汽参数, 更好地匹配热用户的需求, 提高整体经济性。

此外, 还可在供汽管路上增设蒸汽压缩机, 从而

提供更高的蒸汽压力。蒸汽压缩机造价较高、耗电大,在常规火电供热系统中一般被视为不经济而不采用;借助于低成本的燃料费用,结合调峰的灵活性需求,蒸汽压缩机在核能供热系统的经济性变得可行。

2.2 负荷不匹配性

热负荷不匹配性体现在 2 个方面:核电厂建设周期长,与热负荷调研周期存在不匹配,导致设计热负荷的评估不确定性加大;核电厂的设计寿命长,因此核电厂作为热源时,与热用户存在生命周期的不匹配性。

1) 近期热负荷不匹配

热电联产机组以近期热负荷作为设计热负荷,并以此热负荷特性作为选择汽轮发电机组等主要设备的依据。近期热负荷是指热电厂建成投产后能正常供热时各热用户的热负荷,即现有热负荷加上近期增加的热负荷。企业拟扩建或新建,但仅在项目建议书阶段或设想阶段,只能作为规划热负荷,不能作为本期工程热负荷增加的依据^[18];因此,调研的近期热负荷一般为 3~5 年内的热负荷。

由于规模大、技术复杂和监管更严格等原因,对其他能源核电厂的建设周期较长。我国大陆地区 1000 MW 级及以上机组共 48 台,其建设周期如图 2 所示,可知建设周期通常为 5~7 年,建设周期指从核岛第一罐混凝土浇筑(First Concrete Date, FCD)到机组投入商运。“十三五”期间,国内共投产 20 台核电机组,剔除部分堆型首台套的影响外,建设周期在 57~84 个月,平均建设周期为 69 个月。“十四五”

期间,国内已投产 10 台核电机组,不考虑石岛湾高温气冷堆的影响后,建设周期在 57~89 个月,平均建设周期为 74 个月(因疫情等影响建设周期较“十三五”期间略有增加)。按照热电联产机组的设计原则,设计热负荷的确定一般在方案设计阶段,若热负荷影响到机组选型时,热负荷在汽轮发电机组招标前就需要确定,该阶段通常在核岛 FCD 前 2~5 年。因此至少在核电厂投产的 7~10 年前,就需要确定热负荷的需求,并拟定相应的供热系统方案。这与 3~5 年内的近期热负荷存在时间上的错位。

由此可知,对核热电联产机组而言,设计热负荷的确定需要突破现有标准规定,纳入中长期的规划热负荷作为近期热负荷。这将造成设计热负荷评估的不确定性增加,对热负荷的调研提出更高的要求;除调研热用户区域现状热负荷、近期新增的热负荷外,同时还应该重点关注热用户的远期规划、各级政府在当地的中长期规划。

2) 设计寿命不匹配

对热电联产的核电机组进行设计时,需考虑设计寿命期内,反应堆启停、反应堆故障、汽轮机故障检修、最大供热量、热用户缺失等各种工况。核电厂作为热源,其设计一般要求与热用户的需求周期相匹配。

以“华龙一号”为代表的第三代压水堆核电厂和以高温气冷堆为代表的第四代核电厂,设计寿命均为 60 年;而一般工业流程的生命周期则比较短,大概为 15~25 年;导致作为热源的核电厂与热用户之间存在生命周期的不匹配。

因此,当核电厂有对外供热需求时,发电机组应具备足够的灵活性,以应对设计寿命期内用户热负荷的变化。特别地,当供热量在整个能量输出占比较高时,分别以供热工况和纯凝工况进行主机选型时,配套的汽轮机组已经差异较大,此时应对全生命周期内可能的各种运行工况进行技术经济分析比较,选择最优的配置方案。例如在江苏徐圩核能供热项目中,采用“大马拉小车”方式(配置大容量汽轮机),应对生命周期后半段可能的热用户缺位。

2.3 远距离输送

考虑安全性,核电厂一般尽量建在人口密度相对较低、离大城市较远的地点;由于核电厂该选址特点,导致其与热用户距离较远。如《核电厂辐射防

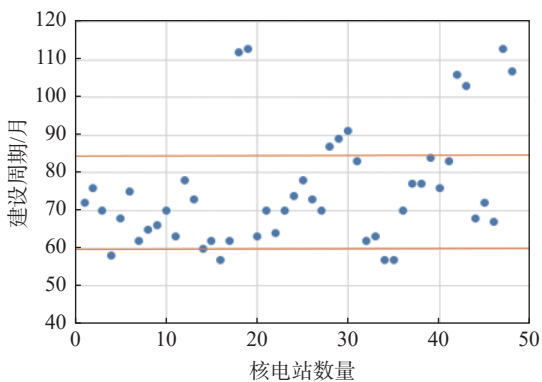


图 2 1000 MW 级及以上核电厂建设周期

Fig. 2 The construction period of 1000 MW and above nuclear power plants

护规定》(GB14317—1993)规定:核热电厂用于城市居民供热时,距10万人口以上的城镇发展边界应不小于10 km,距100万人口以上的大城市发展边界应不小于25 km^[19];《核动力厂环境辐射防护规定》(GB 6249—2025)规划限制区外边界与反应堆的距离不得小于5 km^[20]。国内首个工业用途核能供汽项目田湾核电“和气一号”,其供热输送管道全长为23 km;浙江三门核电工业供汽项目供热管道输送长度约45 km。

蒸汽传输的单位能源成本随输送距离的增加而上升。例如瑞士贝兹瑙核电厂抽汽供热,约16%的热量在供热管网的热传递中损失,该供热管网包含31 km主管道和103条不同用户管道,管道总长度达290 km^[21]。因此,基于供热管网的投资经济性和管道保温技术特点,热电联产机组进行规划设计时,当以热水为供热介质时,供热半径超过10 km热水管网一般需要设置中继泵站,管网循环泵能耗高且对安全运行不利,因此供热半径一般按20 km考虑;当以蒸汽为供热介质时,考虑管网散热损失和凝结水损失较大、不适合长距离输送,因此供热半径一般按10 km考虑^[22]。

远距离输送是核能供热管网区别于常规火电供热管网的显著特点。核能供热项目对供热管网及配套设施的选型设计、长输管道的保温设计及整体投资等都提出了更高要求。

有别于电站内蒸汽管道的单层或复合保温结构,长输蒸汽管道的保温结构通常不低于3层,分别为高温层、中温层和低温外护层。各层根据设计温度选择不同的保温材料,高、中温层还可以根据实际温降要求再细分为多层。此外采用隔热管托、滚动管托、工厂预制等措施,进一步降低管网的热损失。在田湾“和气一号”供热项目中,蒸汽管道的实际运行平均温降 $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

2.4 高安全性

核能安全是核能被利用的前提条件,因此核能应用时都设有纵深防御体系以保持反应性控制、余热排出和放射性包容的基本安全功能,使放射性物质不会危及公众和环境^[23]。

以压水堆核电厂为例。压水堆核电厂设有3道安全屏障^[24]:燃料包壳、反应堆压力容器和一回路管道共同组成高压冷却剂的压力边界、安全壳。核电

厂增加供热相关系统后,并不影响原有的3道屏障。对外供热的汽源来自二回路系统。二回路系统在正常运行时不接触一回路放射性物质,但需考虑蒸汽发生器传热管破裂等极端情况下的潜在污染风险。依据核电厂的纵深防御要求,应在设计中采用设置实体屏障等措施,有效地将放射性物质包容在特性区域,避免场外放射性污染或将其减至最小^[25]。

在实际设计中,一般通过管壳式换热器,即设置蒸汽转换系统,将二回路汽源系统与三回路对外供热系统进行物理隔离。这也是核电厂供热系统与常规火电厂供热系统的最大区别。

蒸汽转换系统设备管侧走从二回路抽取的汽水回路(汽源二回路),壳侧走对外供热的工业蒸汽(热网三回路)。当蒸汽转换系统设备发生破管事故,将隔离二回路的蒸汽汽源,使汽源二回路与热网三回路隔离,防止二回路蒸汽中的放射性向热网三回路中泄漏。

除采取上述的物理隔离措施外,核能供热还设有供热系统专用的必要的放射性监测。通常在二回路热源蒸汽接出口和三回路热网蒸汽送出口,都各设置一个放射性监测点,实时监测放射性泄漏情况。

核能供热的典型系统流程图如图3所示。从核反应堆送出的一回路高温蒸汽通过蒸汽发生器产生二回路的中间高温蒸汽;中间高温蒸汽去往供热岛通过蒸汽转换系统产生三回路的工业供热蒸汽,当核能同时供热和发电时,则部分中间高温蒸汽还去往汽轮发电机组膨胀做功发电;三回路中的工业蒸汽经过长距离的供热管网,输送到用户侧的供热首站,再送往各个用户。

3 核能供热技术展望

核能热电联产能将核电站的能源利用效率从30%~40%提高到60%~80%,甚至超过80%,效率显著提升;核能为清洁能源,是工业领域化石燃料供热的最佳替代方案,有助于降低碳排放;基于低成本的燃料,核能供热在经济上也十分具有竞争力;相较于水、风、光等再生能源,核能供热稳定。在“双碳”目标的全球能源结构背景下,核能供热在非电业务应用将越来越多。

我国核能供热技术虽整体起步较晚,当前处于起步阶段,但借助于核电新高速发展阶段的开启、国

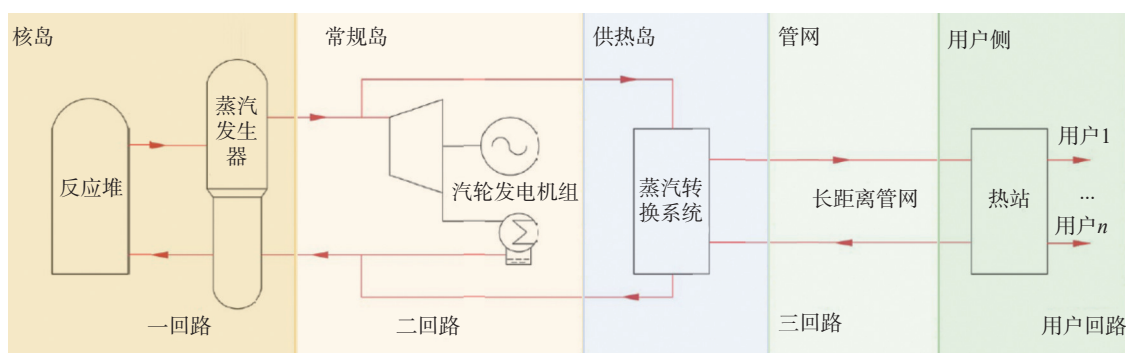


图 3 核能供热的典型系统流程图

Fig. 3 Typical system flowchart of nuclear heating

内各类政策的支持加强,在徐圩核能供热工程、昌江“玲龙一号”小堆示范工程等项目陆续建成投产后,我国核能供热技术有望跨入国际领先水平,引领全球核能供热技术的发展。我国核能供热预计未来发展将呈现如下特点:

1)随着核能供热高安全性技术在运行项目中被验证并进一步发展,同时加大科普宣传、提高公众的接受度,核能供热技术将随着核电厂进入高速发展期。

2)在碳减排压力下,核能与化工、交通等行业的耦合将进一步加强,助力非电行业实现双碳目标。特别在荣成高温气冷堆示范工程于 2023 年底投产后,可提供的高温蒸汽能满足化工行业大部分的工艺蒸汽需求,使得跨行业的合作变得具备可行性和经济性。

3)基于核反应堆型众多的特性,国内核能供热技术也将呈现百花齐放的态势。第三代、第四代核能技术并存,大堆、小堆齐头并进。另外在徐圩核能供热工程的示范效益下,不同堆型的联合供热,压水堆与气电、煤电、光热电站等耦合供热,都将成为可能的技术发展路线。

4)供热小堆的示范工程推进缓慢,经济性尚需进一步验证,但基于“小堆”特性,可降低项目整体投资、减少建设周期,从而降低风险;若未来在选址规范要求上与大堆不同对待有实质性进展,供热小堆将在工业园区集中供热、偏远区域集中供热等发挥更大作用。

5)基于固有安全性、高温特性的高温气冷堆,有别于第三代核技术集中于发电业务上,将充分发挥高温的特性,在制氢、工业供热等非电业务上持续发力,聚焦于核供热而非发电。

4 结论

核能供热是未来核能利用的新方向、新机遇。核能供热能提高能量综合利用的效率,减少供热成本,降低碳排放,为核能综合利用提供了新的发展路径。

文章介绍了国内外核能供热特别是供热小堆和高温气冷堆的发展,对核能供热具有的选择多样性、负荷不匹配性、远距离输送和高安全性的特点进行了详细描述,并对我国核能供热技术的发展进行了展望,可为相关工程应用和研究提供技术参考。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2024 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2025-01-21) [2025-06-01]. <https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>. National Energy Administration. The National Energy Administration released the 2024 national electric power industry statistical data [EB/OL]. (2025-01-21) [2025-06-01]. <https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
- [2] 中国核能行业协会. 全国核电运行情况 (2025 年 1-3 月) [EB/OL]. (2025-05-06) [2025-06-01]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyzz/202505/t20250507_1118988.html. China Nuclear Energy Association. Operation status of national nuclear power (January-March 2025) [EB/OL]. (2025-05-06) [2025-06-01]. <https://www.china-nea.cn/site/content/49180.html>.
- [3] 国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-26) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm. The State Council. Notice of the State Council on issuing the action plan for carbon peaking before 2030 [EB/OL]. (2021-10-26) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关

- 于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知 [EB/OL]. (2022-03-22) [2025-06-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220322_1320017.html.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice of the National Development and Reform Commission and the National Energy Administration on issuing the "14th Five Year Plan for Modern Energy System" [EB/OL]. (2022-03-22) [2025-06-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220322_1320017.html.
- [5] 国务院. 国务院关于印发《2024—2025年节能降碳行动方案》的通知 [EB/OL]. (2024-05-29) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202405/content_6954322.htm.
- The State Council. Notice of the State Council on issuing the action plan for energy conservation and carbon emission reduction in 2024-2025 [EB/OL]. (2024-05-29) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202405/content_6954322.htm.
- [6] 中国核能行业协会. 中国核能发展与展望 (2023) [EB/OL]. (2023-07-19) [2025-06-01]. <https://www.cnnpn.cn/article/37833.html>.
- China Nuclear Energy Association. China nuclear energy development and outlook (2023) [EB/OL]. (2023-07-19) [2025-06-01]. <https://www.cnnpn.cn/article/37833.html>.
- [7] International Atomic Energy Agency. Guidance on nuclear energy cogeneration: IAEA nuclear energy series No. NP-T-1.17 [M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2019: 13.
- [8] World Nuclear Association. World nuclear performance report 2024 [R]. London: World Nuclear Association, 2024: 5.
- [9] International Energy Agency. The path to a new era for nuclear energy [R]. Vienna: International Energy Agency, 2025: 17-18, 31.
- [10] Net Zero Nuclear. Landmark Ministerial Declaration puts nuclear energy at the heart of action on climate change [EB/OL]. (2023-12-02) [2025-06-01]. <https://netzeronuclear.org/news/landmark-ministerial-declaration-puts-nuclear-energy-at-the-heart-of-action-on-climate-change>.
- [11] ALEKSANDR S, 赵金玲. 俄罗斯核能供热技术发展现状分析 [J]. *区域供热*, 2019(5): 126-132. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2019.05.020.
- ALEKSANDR S, ZHAO J L. Analysis on the development and current situation of nuclear energy heating technology in Russia [J]. *District heating*, 2019(5): 126-132. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2019.05.020.
- [12] OECD/NEA. High-temperature gas-cooled reactors and industrial heat applications [R]. Vienna: OECD/NEA, 2022.
- [13] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《能源技术革命创新行动计划 (2016—2030年)》的通知 [EB/OL]. (2016-06-01) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-06/01/content_5078628.htm.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice of the National Development and Reform Commission and the National Energy Administration on issuing the energy technology revolution innovation action plan (2016-2030) [EB/OL]. (2016-06-01) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-06/01/content_5078628.htm.
- [14] 国家发展改革委, 国家能源局, 财政部, 等. 关于印发北方地区冬季清洁取暖规划 (2017—2021年) 的通知 [EB/OL]. (2017-12-20) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Finance of the People's Republic of China. Notice on issuing the northern region winter clean heating plan (2017-2021) [EB/OL]. (2017-12-20) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm.
- [15] 国家能源局. 国家能源局关于印发 2018 年能源工作指导意见的通知 [EB/OL]. (2018-03-09) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2018-03/09/content_5272569.htm.
- National Energy Administration. Notice of National Energy Administration on issuing the guidance on energy work in 2018 [EB/OL]. (2018-03-09) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/xinwen/2018-03/09/content_5272569.htm.
- [16] 李庆, 曾未, 宋丹戎, 等. 多用途模块式小型堆技术概览 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2023: 44-76.
- LI Q, ZENG W, SONG D R, et al. Overview of multi-purpose modular small reactor technology [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2023: 44-76.
- [17] 白宁, 陈耀东, 沈峰, 等. 微压供热堆 HAPPY200 总体技术方案 [J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(6): 1044-1050. DOI: 10.7538/yzk.2017.youxian.0566.
- BAI N, CHEN Y D, SHEN F, et al. General technology proposal of low-pressurized heating reactor HAPPY200 [J]. *Atomic energy science and technology*, 2019, 53(6): 1044-1050. DOI: 10.7538/yzk.2017.youxian.0566.
- [18] 国家发展计划委员会, 国家经济贸易委员会, 建设部. 热电联产项目可行性研究技术规定 [R]. 北京: 国家发展计划委员会, 2001.
- State Planning Commission, State Economic and Trade Commission, Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical regulations for feasibility study of cogeneration projects [R]. Beijing: State Planning Commission, 2001.
- [19] 国家技术监督局. 核电厂辐射防护规定: GB14317—1993 [S]. 北京: 国家技术监督局, 1993.
- The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Regulations for radiation protection of nuclear heat power plant: GB14317-1993 [S]. Beijing: The State Bureau of Quality and Technical Supervision, 1993.
- [20] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 核动力厂环境辐射防护规定: GB 6249—2025 [S]. 北京: 中国标准出

版社, 2025.

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Regulations for environmental radiation protection of nuclear power plant: GB 6249-2025 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.

- [21] OECD/NEA, NEA. Beyond electricity: the economics of nuclear cogeneration [M]. Vienna: OECD/NEA, 2022: 111-112.
- [22] 国家发展改革委, 国家能源局, 财政部, 等. 关于印发《热电联产管理办法》的通知 [EB/OL]. (2016-03-22) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-05/22/content_5075607.htm. National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Finance of the People's Republic of China. Notice on issuing the administrative measures for cogeneration [EB/OL]. (2016-03-22) [2025-06-01]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-05/22/content_5075607.htm.
- [23] 吴宗鑫, 张作义. 先进核能系统与高温气冷堆 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 245-246.
WU Z X, ZHANG Z Y. Advanced nuclear energy systems and high temperature gas-cooled reactors [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2004: 245-246.
- [24] 广东核电培训中心. 900 MW 压水堆核电站系统与设备 [M]. 北京: 中国原子能出版社, 2005: 52-176.
Guangdong Nuclear Power Training Center. Devices & systems of 900 MW PWR [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005: 52-176.
- [25] 国家核安全局. 核动力厂设计安全规定: HAF 102—2016 [S].

北京: 国家核安全局, 2016.

National Nuclear Safety Administration. Safety regulations for nuclear power plant design: HAF 102-2016 [S]. Beijing: National Nuclear Safety Administration, 2016.

作者简介:



林燕

林燕 (第一作者, 通信作者)

1983-, 女, 正高级工程师, 硕士, 主要从事发电厂热机设计研究和技术管理工作 (e-mail) linyan@gedi.com.cn。



杨道宏

杨道宏

1982-, 男, 高级工程师, 学士, 主要从事发电厂热机设计研究工作 (e-mail) yangdaohong@gedi.com.cn。

李斌

1993-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事发电厂热机设计研究工作 (e-mail) libin@gedi.com.cn

(编辑 叶筠英)