

高参数再热技术助力生物质能与垃圾发电

孙慧丽

上海市机电设计研究院有限公司，上海 200040

DOI:10.61369/ERA.2025110010

摘 要： 在生物质能与垃圾焚烧发电行业电价补贴退坡的背景下，提升汽轮机发电效率成为企业降本增效的核心路径。本文聚焦小型汽轮机高参数再热技术（涵盖蒸汽再热、烟气再热等技术类型），通过对工程热力学原理进行分析与技术研究，揭示其通过优化蒸汽循环或引入中间再热过程，可使朗肯循环效率较常规高温高压技术提升4–5个百分点，热耗率降低7%–8%。研究表明，该技术在发电效率提升、燃料成本降低及碳减排方面具有显著优势，但其规模化应用面临初始投资高、运维技术壁垒及行业标准体系缺失等挑战。

关 键 词： 小型汽轮机；再热技术；垃圾焚烧；能效提升；实证分析

High-parameter Reheating Technology Aids Biomass Energy and Waste Power Generation

Sun Huili

Shanghai Electro-Mechanical Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200040

Abstract： Against the backdrop of a gradual reduction in electricity price subsidies for the biomass energy and waste-to-energy incineration power generation industries, enhancing the power generation efficiency of steam turbines has become a core approach for enterprises to reduce costs and increase efficiency. This paper focuses on high-parameter reheat technologies for small steam turbines (including steam reheat, flue gas reheat, and other technical types). Through analysis and technical research based on engineering thermodynamics principles, it reveals that by optimizing the steam cycle or introducing intermediate reheat processes, the efficiency of the Rankine cycle can be increased by 4–5 percentage points compared to conventional high-temperature and high-pressure technologies, with a corresponding reduction in heat consumption rate by 7%–8%. The study indicates that this technology offers significant advantages in terms of enhancing power generation efficiency, reducing fuel costs, and achieving carbon emission reductions. However, its large-scale application faces challenges such as high initial investment, technical barriers in operation and maintenance, and a lack of industry standard systems.

Keywords： small steam turbine; reheat technology; waste incineration; energy efficiency improvement; empirical analysis

一、概述

随着生物质能发电和垃圾焚烧发电产业竞争加剧及产业升级，电价补贴退坡或取消，企业对投资收益比愈发重视，经济性成为企业生存的关键。高参数再热技术作为一种新兴技术路线，可以使小型汽轮发电机组的发电效率得到显著提高，降低厂用电率，增加售电收入。尽管工程投资增加，但回报明显高于投资，较常规高温高压技术更具经济性。因此，提高汽轮发电机组的发电效率、研发高参数再热发电系统成为生物质发电和垃圾焚烧发电产业技术发展的必然趋势。

二、高参数再热汽轮机设备发展现状

（一）小汽轮机发展状况简述

能源日益紧缺及能源利用效率要求提高背景下，煤电系统自上世纪末开始逐步关停50MW以下小机组。小机组转型进入余热利用、可再生能源、工业自备电站等领域。新世纪前十年，余热利用成为小机组应用的重点领域，产品和参数不再标准化，强调设备稳定性和对工艺的适应性。近五年，随着经济发展放缓、节能减排要求提高及国家对可再生能源的支持，小型汽轮机应用领域发生了变化，对发电效率要求也更高^[1]。

作者简介：孙慧丽（1982.4.26—），女，汉族，山东聊城人，大学本科，传统动力系统与设备优化 & 新能源与可再生能源技术。

（二）再热汽轮机发展现状

汽轮机技术的不断进步及对经济效益的追求，促使小型机组也开始采用再热技术。2013年，国内首台65MW 高温超高压再热机组在唐山建龙钢铁投运，开启了小型再热汽轮机在国内的应用先河。随后，2017年，国内首台50MW 超高温超高压再热机组在津西钢铁投运，进一步推动了该技术在小型机组中的发展。目前，小型再热汽轮机已广泛应用于垃圾发电、生物质发电、钢铁行业煤气回收发电以及太阳能光热发电等多个领域（见表2-1），展现出良好的应用前景和经济价值^[2]。

表 2-1 部分采用小型再热发电汽轮机工程示例

项目名称	领域	汽轮机功率 /MW	汽轮机蒸汽参数 (MPa/°C /°C)	汽轮机转速 (r/min)
光大江阴三期垃圾发电	垃圾发电	25	6.3/445/425	5000
光大苏州垃圾焚烧发电	垃圾发电	40	12.6/425/405	5000
安徽国祯明光生物质发电	生物质发电	33	13.2/538/538	5025
深能源泗县生物质发电	生物质发电	40	13.2/538/538	5025
河北津西钢铁	钢厂余气利用	40	13.2/566/566	5025
吉林建龙钢铁	钢厂余气利用	65	13.2/538/538	3000
中广核太阳能德令哈项目	太阳能光热	50	10/381/381	6000+3000
西北院哈密光热发电项目	太阳能光热	50	14/550/550	6000+3000

小型再热发电汽轮机结构紧凑，多采用单缸单轴或双缸双轴设计。在转速设计方面，50MW 以下高温超高压机组一般采用高转速方案，而50MW 及以上机组则多采用常规转速。对于垃圾发电汽轮机，由于锅炉出口蒸汽温度的限制，参数多为中温中压或中温次高压，因此再热技术成为提升其发电效率的关键措施。

三、高参数再热技术分类

（一）烟气再热技术

烟气再热法是常见的再热技术，其原理是利用锅炉烟道中的再热器，把汽轮机已做过部分功的蒸汽加热，再送入汽轮机中、低压缸继续做功。该技术可使蒸汽温度加热到550℃~600℃，总热经济性提高约7%，但管道压损会使经济效益降低1.0%~1.5%，且汽轮机甩负荷时可能导致超速。因此，需配置高灵敏度和可靠性的调节系统及旁路系统，烟气中间再热流程图见图3-1。

烟气中间再热按传热方式分为对流、辐射及半辐射三种形式。对流式再热器一般设置在水平烟道或尾部竖井内，通过获取烟气对流释放的热量来实现蒸汽的再热，烟速需适中。辐射式再热器主要吸收炉膛热辐射，有屏式和墙式两种结构。壁式再热器位于炉膛水冷壁的上部，承担低温段功能，需限制炉膛出口烟温^[3]。

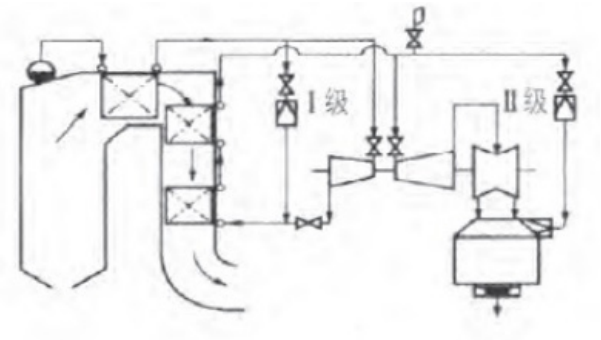


图 3-1 烟气中间再热流程图

（二）蒸汽再热技术

炉外蒸汽再热技术规避了烟气腐蚀风险，利用其他热源对汽轮机高压缸乏汽进行再热。其原理是锅炉出口的主蒸汽进入汽轮机高压缸做功，随后进入炉外再热器，通过其他热源加热后的蒸汽再次进入汽轮机，实现二次做功见图3-2。该技术依据加热汽源不同，分为多种类型，如汽水分离再热技术、汽包再热技术等。

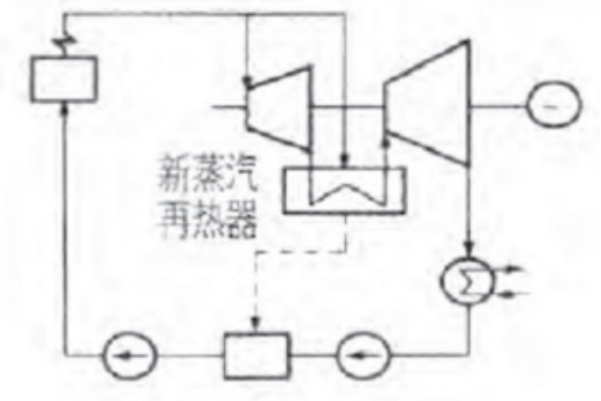


图 3-2 蒸汽中间再热流程图

汽水分离再热器（MSR）技术在核电机组中广泛应用，其原理在于通过汽水分离装置去除高压缸排汽中的水分，并利用再热管束对去湿后的蒸汽进行加热，从而提升蒸汽的品质和温度。汽包中间再热系统利用汽包中的饱和蒸汽对高压缸排汽加热后再进入低压缸，提高循环热效率。主汽中间再热/抽汽中间再热系统则利用主蒸汽或汽轮机中间抽汽作为加热汽源^[4]。

（三）两种再热技术对比

炉内再热凭借成熟的技术和简洁的系统架构，具有显著优势，一旦攻克烟气腐蚀这一关键难题，极有可能跃升为主流技术。与之形成对比的炉外再热技术虽然成功规避了烟气腐蚀风险，但其系统构造复杂，且在国内尚未积累足够的技术实践经验，实际应用中面临诸多不确定性。不同项目的再热循环方式见表3-1。

表3-1 不同项目的再热循环方式

项目名称	主蒸汽压力 /MPa	主蒸汽温度 /°C	再热方式	再热蒸汽温度 /°C	备注
荷兰 AEB 电厂	13.0	420	炉外再热	320	2007 年投运
光大江阴三期	6.3	445	炉内再热	425	2018 年投运
光大苏州项目	12.6	425	炉内再热	405	2019 年投运
广环投从化项目	12.5	480	炉内再热	415	2022 年投运
康恒三河项目	13.3	445	炉外再热	190	2021 年投运
宝山再热能源项目	13.0	450	炉外再热	205	2023 年投运
光大环保博罗三期	12.6	425	炉内再热	405	2022 年投运

四、再热汽轮机设备

再热蒸汽参数与机组效率紧密相关。理论上，再热蒸汽温度的提升能有效提高机组的经济性，实现更高效的能源转化。但实际应用中，再热温度的设定受到金属材料耐高温性能的制约。考虑到材料的承受极限，为确保机组安全稳定运行，通常将再热蒸汽温度设为与初蒸汽温度一致。再热蒸汽压力与循环初终参数、再热温度等因素有关，还需考虑回热抽汽压力、材料消耗、投资费用等问题，存在最佳值，不同设备厂家选取的再热蒸汽参数略有不同。

小型再热汽轮机与传统小型汽轮机配置基本相似，冷却方式可采用湿冷或空冷，排汽方向多样，功率范围 25 ~ 100MW，主汽参数范围 6 ~ 14MPa(a)/380~540°C。各设备厂家在转速选择、进汽方式、通流设计、本体结构等方面有自身特点。

五、再热技术应用国内外案例

（一）江阴三期垃圾发电

江阴三期垃圾焚烧发电项目设计总规模为日处理生活垃圾 1000 吨，配置 2 台 500t/d 的焚烧炉和一台 25MW 的汽轮机。该项目汽轮机采用东方汽轮机有限公司设计制造的 N25-6.3/445/425 型垃圾发电汽轮机，机组型式为单缸单轴，采用冲反结合、高转速设计，其原则性热力系统图见图 4-1。

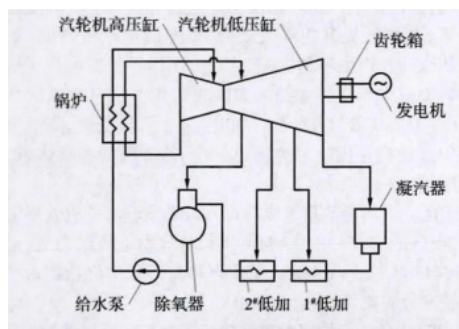


图 4-1 江阴三期项目原则性热力系统

该项目采用炉内再热工艺，将汽轮机高压缸排汽导入锅炉尾部再热器实现烟气再热。针对再热器高温腐蚀风险，通过喷涂防护层加以防范。采用再热技术后，全厂发电效率可达 27%，其炉内再热技术原理与小型再热机组相似，使得厂房规划与汽机设计更易实现^[5]。

（二）苏州市垃圾焚烧发电厂提标改造项目

苏州市垃圾焚烧发电厂提标改造项目一期装设 3 台中温超高压再热蒸汽锅炉和 2 台 40MW 汽轮机组。该项目汽轮机组采用东方汽轮机有限公司设计制造的型垃圾发电汽轮机，机组型式为双缸双轴，采用冲反结合、高转速设计，项目原则性热力系统图见图 4-2。

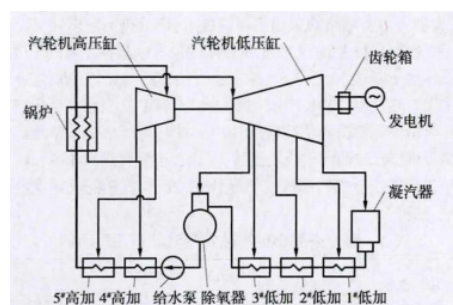


图 4-2 苏州项目原则性热力系统

本项目借助再热技术，主蒸汽参数能够在 425°C 温度保持条件下，将压力提升至超高压水平。这不仅提高了汽轮机效率，还避免了末几级出现蒸汽湿度偏大的问题。此外，该项目优化回热配置，采用“2 高加 + 1 除氧 + 3 低加”的多级回热系统，显著提升了蒸汽循环效率。与江阴三期项目相比，汽轮机热耗降低约 10%。需要指出的是，该技术由于采用炉内再热方式，为应对高温腐蚀，需在再热器表面喷涂防护层，或选用特殊耐高温材料制造。

（三）荷兰阿姆斯特丹 AEB 焚烧厂项目

荷兰阿姆斯特丹 AEB 焚烧厂始建于 1969 年，原有 4 条垃圾焚烧线。2007 年新增 2 条焚烧线，并采用炉外饱和蒸汽加热的再热循环系统工艺，将发电效率提高到 30% 以上，项目再热循环系统图见图 4-3。

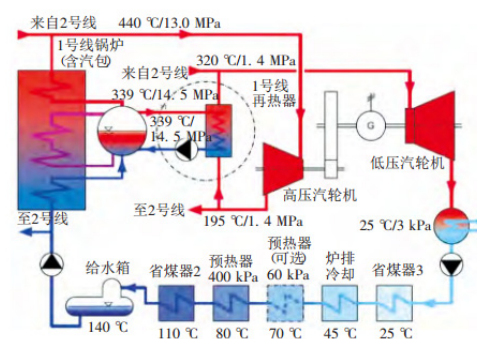


图 4-3 荷兰 AEB 焚烧厂项目再热循环系统图

新建的 2 条焚烧线采用以下工艺：

1. 在锅炉受热表面的关键部位采用耐高温耐腐蚀的 Inconel 625 保护层。这种镍镉合金材料是提高发电效率的各种设计之基础，能使锅炉和水 - 蒸汽循环达到一个较高水平。

2. 新建焚烧线主蒸汽参数为13MPa/440℃，再热蒸汽参数为1.4MPa/320℃，锅炉在高温腐蚀防护和磨损控制方面进行优化设计，腐蚀和磨损较小。

3. 将主蒸汽压力提高到13MPa（超高压等级），综合考虑设备材料、系统设计及安全运行等多方面因素，保证机组的安全稳定运行。

4. 采用烟气再循环，降低燃烧过程的氧含量水平，从通常的8%～11%降低至6%。不仅烟气体积降低了40%，而且烟卤损失的热量也降低了。

5. 汽轮机采用分缸方式，高压缸部分采用高速汽轮机，高压缸排汽进入蒸汽式再热器再热后进入低压缸继续做功，从而进一步提高汽轮机的效率。

气腐蚀问题一直是再热技术推广的一大障碍。一种有效的解决方案是改变热源路线，避免烟气直接接触再热器。如采用汽包再热和外置再热系统，可以有效规避这一问题，不仅提高了系统的稳定性和安全性，还为再热技术在焚烧发电领域的广泛应用提供了新的可能性。

在生物质与垃圾焚烧发电产业中，再热技术的应用是提高电厂经济效益的有效手段。如能有效解决烟气腐蚀问题，则炉内再热技有望成为主流技术。相比之前，汽包再热与外置再热虽然避开了烟气腐蚀，但系统复杂，国内运行经验不足，工程实践中存在风险。在不同系统中，应根据不同的边界条件选择合适的汽轮机配置方案，以提升全厂经济效率。

六、存在问题及前景展望

再热技术在焚烧发电厂中的使用取得了显著的经济效益，因此受到越来越多业主方的关注。然后，传统炉内再热的再热器烟

参考文献

- [1] 中国城市生活垃圾焚烧发电年度报告2023.
- [2] 国家发改委《生物质能发展“十四五”规划》.
- [3] 国家发展改革委《生物质发电项目建设管理办法》[Z].2021.
- [4] 王松岭等《汽轮机原理及节能技术》[M].2020.
- [5] ASME Standard.Power test code-Part 6: Steam turbines[S].2019.