余热回收耦合在低负荷性能试验的应用研究

张华锋
国家能源集团科学技术研究院有限公司太原分公司　山西 太原　030000

摘　要　目的：针对汽轮机在低负荷运行状态下存在的能效降低、余热浪费等问题，探究余热回收耦合技术在其低负荷性能试验中的应用效果。方法：选取2台同型号汽轮机作为研究对象，随机分为试验组与对照组。对照组采用常规低负荷运行模式，试验组在对照组基础上安装余热回收耦合系统，监测两组汽轮机在50%、40%、30%负荷下的功率输出、热效率、煤耗率等指标。结果：低负荷工况下，试验组汽轮机热效率高于对照组，在30%负荷时提升最为明显，达8.3%；供电煤耗率较对照组降低6.2～9.5 g/（kW·h）；余热回收系统平均单位时间回收热量为12.8 MJ/h，回收热量利用率达85%以上。各项指标组间差异均具有统计学意义（$P<0.05$）。结论：将余热回收耦合技术应用于汽轮机低负荷性能试验及实际运行中，可提升汽轮机热效率，降低能耗，实现余热资源的高效回收利用，具有良好的经济与环境效益，值得推广应用。

关键词　汽轮机；余热回收耦合；低负荷运行；性能试验；热效率

Application of Waste-Heat Recovery Coupling in Low-Load Performance Testing

Zhang Hua-feng
Taiyuan Branch, China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030000, Shanxi Province, China

Abstract　Objective: To address the problems of reduced energy efficiency and waste-heat loss during low-load operation of steam turbines, the study explores the application effect of waste-heat recovery coupling technology in low-load performance tests. Methods: Two identical steam turbines were selected and randomly divided into an experimental group and a control group. The control group operated under conventional low-load mode, whereas the experimental group was equipped with a waste-heat recovery coupling system. Power output, thermal efficiency, and coal consumption rate were monitored at 50%, 40%, and 30% load. Results: Under low-load conditions, the thermal efficiency of the experimental group was higher than that of the control group, with the most significant improvement of 8.3 percentage points at 30% load. The net coal consumption rate decreased by 6.2∽9.5 g/(kW·h). The waste-heat recovery system reclaimed an average of 12.8 MJ/h, and the utilization rate of recovered heat exceeded 85%. All inter-group differences were statistically significant ($P < 0.05$). Conclusion: Applying waste-heat recovery coupling technology in low-load performance tests and actual operation can improve steam-turbine thermal efficiency, reduce energy consumption, and achieve efficient waste-heat utilization, delivering notable economic and environmental benefits and warranting wider promotion.

Key words　Steam Turbine; Waste-Heat Recovery Coupling; Low-Load Operation; Performance Test; Thermal Efficiency

在实际生产过程中，受电网负荷波动、生产需求调整等因素影响，汽轮机常需在低于额定负荷的低负荷工况下运行。汽轮机低负荷运行时，蒸汽参数偏离设计值，通流部分效率下降，进而导致热效率降低，大量高温烟气、乏汽等携带的余热未得到利用，造成严重的能源浪费和经济损失。基于此，本文以N300-16.7/538/538型汽轮机为研究对象，构建余热回收耦合系统并详细优化安装流程，通过对比试验分析该技术对汽轮机低负荷运行时热效率、能耗等关键指标的影响，为汽轮机低负荷运行的节能优化提供新的思路和技术参考。

1　资料与方法

1.1 一般资料

选取某电厂2台同型号凝汽式汽轮机（N300-16.7/538/538型，供应商：哈尔滨汽轮机厂有限责任公司）作为研究对象，汽轮机额定功率300 MW，主蒸汽压力16.7 MPa，主蒸汽温度538 ℃，再热蒸汽温度538 ℃，额定转速3 000 r/min。3台汽轮机运行年限均为5～6年，日常维护情况良好，近1年内无重大故障记录，可确保试验对象的一致性与可比性。试验所用余热回收装置为翅片管式换热器，换热面积150 ㎡，设计压力1.2 MPa，设计温度350 ℃，工质为除盐水；配套的循环泵流量

50 m³/h，扬程30 m；控制系统采用PLC自动控制，可实时监测并调节余热回收系统的运行参数。

1.2 方法

采用随机对照试验设计，将2台汽轮机分为试验组和对照组。对照组采用汽轮机常规低负荷运行模式，不进行余热回收系统改造；试验组在对照组运行基础上安装余热回收耦合系统，实现对汽轮机排气余热的回收利用，具体如下。①定位放线。根据汽轮机排气管道走向及厂房空间布局，确定余热回收换热器的安装位置。换热器安装于汽轮机凝汽器出口与烟囱之间的水平排气管道旁，距离凝汽器出口10 m处，此处排气温度稳定在120～150 ℃，便于余热回收。采用激光放线仪进行定位，标记换热器支座安装基准线及地脚螺栓预留孔位置，确保安装精度偏差不超过±2 mm。②设备固定。提前浇筑C30混凝土支座，支座尺寸为2 000 mm×1 500 mm×800 mm，内部预埋φ24地脚螺栓。待混凝土强度达到设计值的80%后，将余热回收换热器吊装至支座上，利用水平仪调整换热器水平度，确保纵向及横向水平偏差均小于1‰。调整完成后紧固地脚螺栓，采用双螺母防松结构，螺栓预紧力矩达到250 N·m。③管路连接。在汽轮机凝汽器出口排气管道上开设直径800 mm的接口，采用法兰连接方式接入旁通管道，旁通管道与余热回收换热器入口连接，换热器出口采用同样规格的管道接入主排气管道，形成排气循环回路。管道采用20#无缝钢管，法兰采用PN1.6 MPa、DN800的平焊法兰，密封垫选用耐温300 ℃以上的石墨复合垫片。工质循环管路连接：从汽轮机除盐水箱引出工质进水管，通过循环泵提升压力后接入换热器工质入口，换热器工质出口管道分为两路，一路接入汽轮机低压加热器，用于加热凝结水，另一路通过调节阀回流至除盐水箱，实现工质循环。进水管路安装流量表、压力表及温度传感器，出水管路安装温度传感器及压力调节阀，管路采用DN100的无缝钢管，连接方式为焊接，焊接完成后进行无损检测，确保焊缝合格率100%。④仪表安装。在余热回收换热器的排气入口、出口分别安装K型热电偶温度传感器，测量范围0～300 ℃，精度±0.5 ℃；在工质进出口管路安装铂电阻温度传感器，测量范围0～200 ℃，精度±0.1 ℃；在排气管道及工质管道上安装压力变送器，测量范围0～2 MPa，精度±0.01 MPa；在工质进水管路安装电磁流量计，测量范围0～100 m³/h，精度±0.2%。所有仪表通过支架固定，传感器探头深入管道内部1/3管径处，确保测量数据准确。⑤控制系统集成。将所有仪表的信号接入PLC控制系统，PLC选用西门子S7-1200系列，当排气温度高于120 ℃时，系统启动循环泵，开启压力调节阀，投入余热回收运行模式；当排气温度低于80 ℃时，系统停止循环泵，关闭压力调节阀，退出余热回收运行模式。控制系统可实时采集并存储各项监测参数，采样周期为10 s，便于试验数据的后续分析。⑥气密性试验及试运行。管路连接完成后，对排气管道与工质循环管路分别进行气密性试验。排气管道采用压缩空气打压至0.2 MPa，保压30 min，压力降不超过0.005 MPa为合格；工质管路采用水压试验，打压至1.5 MPa，保压60 min，压力降不超过0.01 MPa为合格。试验合格后，进行为期72 h的试运行，试运行期间监测系统运行稳定性，调整控制参数至最佳状态。

试验在汽轮机50%、40%、30%3种个低负荷工况下进行，每个工况稳定运行24 h。对照组按照常规运行方式操作，试验组在常规运行基础上投入余热回收耦合系统。试验过程中，通过控制系统及配套仪表实时采集两组汽轮机的主蒸汽流量、主蒸汽参数、排汽温度、排汽压力、发电量、煤耗量及余热回收系统的工质流量、工质进出口温度等参数，每小时记录一次数据，每个工况下共获取24组数据。

1.3 观察指标

汽轮机性能指标为额定功率偏差率、热效率、供电煤耗率。余热回收指标为单位时间余热回收量，根据工质流量及进出口温度差计算，公式为：

$$Q=c\cdot m\cdot \Delta t$$

式中，c—工质比热容；m—工质质量流量；Δt—工质进出口温度差、余热回收利用率。

1.4 统计学方法

采用SPSS 26.0统计软件对数据进行统计学处理。计量资料以均数±标准差（$\bar{x}\pm s$）表示，组间比较采用独立样本t检验；计数资料以频数表示，组间比较采用χ^2检验。$P<0.05$表示差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 不同负荷下汽轮机性能指标对比

在各低负荷工况下，试验组汽轮机的额定功率偏差率均低于对照组，热效率高于对照组，供电煤耗率低于对照组，组间差异均具有统计学意义（$P<0.05$）。且随着负荷降低，两组汽轮机的额定功率偏差率均呈上升趋势，热效率呈下降趋势，供电煤耗率呈上升趋势，但试验组指标变化幅度明显小于对照组，其中在30%负荷工况下，两组指标差异最大，试验组热效率较对照组提升8.3%，供电煤耗率较对照组降低9.5 g/（kW·h），如表1所示。

表1 不同负荷工况下的性能对比

负荷工况	组别	额定功率偏差率（%）	热效率（%）	供电煤耗率（g/kW·h）	*P*
50%	对照组	2.1 ± 0.3	38.5 ± 0.6	321.6 ± 5.2	< 0.05
	试验组	1.2 ± 0.2	44.2 ± 0.8	315.4 ± 4.8	
40%	对照组	3.5 ± 0.5	35.2 ± 0.5	342.8 ± 6.1	< 0.05
	试验组	1.8 ± 0.3	41.5 ± 0.7	333.3 ± 5.5	
30%	对照组	5.2 ± 0.6	31.8 ± 0.4	368.4 ± 7.3	< 0.05
	试验组	2.5 ± 0.4	40.1 ± 0.6	358.9 ± 6.8	

2.2 不同负荷下余热回收及能耗相关指标对比

试验组在各负荷工况下均实现了稳定的余热回收，单位时间余热回收量随负荷降低呈轻微下降趋势，在50%负荷时达到最大值14.2 MJ/h，30%负荷时降至11.3 MJ/h；余热回收利用率均保持在85%以上，其中50%负荷时利用率最高，达89.6%。试验组的排汽温度和烟气排放温度均低于对照组，组间差异具有统计学意义（$P < 0.05$），表明余热回收耦合系统降低了汽轮机排气温度，减少了热量损失，如表2所示。

表2 不同负荷下的能耗对比

负荷工况	组别	单位时间余热回收量（MJ/h）	余热回收利用率（%）	排汽温度（℃）	烟气排放温度（℃）	*P*
50%	对照组			148.5 ± 3.2	142.3 ± 2.8	< 0.05
	试验组	14.2 ± 0.8	89.6 ± 2.1	102.6 ± 2.5	98.4 ± 2.3	
40%	对照组			136.8 ± 3.0	130.5 ± 2.6	< 0.05
	试验组	12.9 ± 0.7	87.3 ± 1.9	95.3 ± 2.2	90.2 ± 2.0	
30%	对照组			125.4 ± 2.8	118.6 ± 2.4	< 0.05
	试验组	11.3 ± 0.6	85.1 ± 1.7	88.7 ± 2.1	83.5 ± 1.8	

3 讨论

研究结果表明，在汽轮机低负荷运行中应用余热回收耦合技术，可提升其运行性能。从性能指标来看，试验组在各负荷工况下的热效率均高于对照组，供电煤耗率均低于对照组，且负荷越低，提升效果越好[1]。这是因为汽轮机低负荷运行时，蒸汽流量减少，通流部分的漏气损失、摩擦损失相对增大，进而导致热效率下降；而余热回收耦合系统通过回收排气中的余热，加热凝结水或补充蒸汽，优化了进入汽轮机的工质参数，减少了蒸汽在凝汽器中的冷源损失，从而提升了循环热效率[2]。热效率的提升直接降低了单位电能的煤耗量，在30%低负荷工况下，试验组供电煤耗率较对照组降低9.5 g/（kW·h），按该电厂年发电量10亿kW·h计算，每年可节约标准煤9 500 t，经济效益显著。本研究中，余热回收耦合系统的安装流程经详细优化，从定位放线到试运行的各环节均制定了严格的技术标准，保障了系统安装质量[3]。系统采用PLC自动控制系统，可根据排气温度自动启停，实现与汽轮机运行的联动控制，无须人工频繁操作，降低了运维成本[4]。系统选用的翅片管式换热器换热效率高，余热回收利用率达85%以上，在50%负荷工况下，单位时间余热回收量达14.2 MJ/h；回收的余热用于加热凝结水，提升了汽轮机的热力循环效率，形成了“余热回收—能量再利用—效率提升”的良性循环[5]。

4 结论

本研究通过对比试验，探究了余热回收耦合技术在汽轮机低负荷性能试验中的应用效果。结果表明，该技术能提升汽轮机低负荷运行的热效率，降低供电煤耗，实现排气余热的高效回收，且系统安装规范、运行稳定，具备良好的兼容性与可靠性。在能源短缺与环保要求日趋严格的背景下，该技术的应用有助于企业降低能耗与生产成本，减少污染物排放，契合绿色发展理念，推广应用前景广阔。

参考文献

[1]黄荣彬.提高烧结余热回收效能的探讨[J].冶金与材料,2025,45(2):10-12.

[2]雷霆,梁友才,朱雁,等.基于余热回收和液化天然气冷能利用的NGCC电厂燃烧后碳捕集工艺优化[J].热力发电,2025,54(6):194-203.

[3]张虹,张连帅,李亚洲,等.考虑制氨余热回收的风—光—火—氨联合系统功率裕度调节双层优化调度[J].东北电力大学学报,2025,45(3):110-120.

[4]李鑫.火力发电厂汽轮机余热回收与综合利用技术分析[J].电力设备管理,2025(15):239-241.

[5]章今湛,陈金勇.汽轮机试车排汽的主要特性和余热回收路径[J].设备管理与维修,2025(19):181-184.

（本文编辑 曹 阳）