

调峰机制下供热汽轮机中压调门调节特性试验研究

王志云¹, 赵玉柱², 王学栋^{2*}, 张元舒²

- (1. 包头东华热电有限公司, 内蒙古自治区 包头市 014000;
2. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江省 杭州市 310030)

Experimental Study on Regulation Characteristics of Intermediate Pressure Cylinder Regulating Valves of Heat Supply Steam Turbine Under Peak Regulating Mechanism

WANG Zhiyun¹, ZHAO Yuzhu², WANG Xuedong^{2*}, ZHANG Yuanshu²

- (1. Baotou Donghua Thermal Power Co., Ltd., Baotou 014000, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, Zhejiang Province, China)

摘要: 为适应调峰要求, 汽轮机组发电负荷变化幅度较大, 从再热蒸汽管道抽汽供热的参数也大幅波动, 汽轮机中压调门参与调节以稳定供热参数。对于一台采用此方式供热的300 MW等级汽轮机组, 在电负荷250 MW、供热抽汽量52.20~53.94 t/h条件下, 通过试验研究了中压调门的调节特性。结果表明: 随着中压调门开度的减小, 中压缸进汽流量逐渐降低, 再热蒸汽压力逐渐升高, 当中压调门最小开度为24.97%时, 中压缸进汽压力为3.44 MPa, 供热抽汽母管压力为3.13 MPa; 高压缸压比随中压调门开度的减小而减小, 其最大值为3.13, 最小值为2.65; 高压缸排汽温度随中压调门开度的减小而升高, 其最高值为331.76 °C, 最低值为312.97 °C; 随着中压调门开度的减小, 中压缸效率逐渐降低, 从93.37%降至84.78%; 随着中压调门开度的减小, 高压缸和中压缸蒸汽焓降变化不大, 但一段抽汽压力和高压缸排汽压力增加, 高、中压缸通流量降低, 高、中压缸做功量减小, 导致机组电负荷降低9.79 MW; 机组轴系安全运行指标保持稳定。

关键词: 热电联产机组; 供热改造; 汽轮机; 中压调门; 调节特性

ABSTRACT: In order to meet the requirements of peak regulation, the power load of the steam turbine unit changes greatly. The heating parameters of the steam extraction from the reheated steam pipe also fluctuate greatly. The intermediate pressure (IP) cylinder regulating valves of the steam turbine participate in the regulation to stabilize the heating parameters. For a 300 MW steam turbine adopting such heating mode, the regulation characteristics of the IP cylinder regulating valves was studied experimentally under power load of 250 MW and extraction steam flow of 52.20-

53.94 t/h. The results show that, as the opening of regulating valves decreases, the inlet steam flow of the IP cylinder decreases gradually, and reheated steam pressure increases gradually. When the minimum opening of the IP cylinder regulating valves is 24.97%, the inlet steam pressure of the IP cylinder is 3.44 MPa, and pressure of the main extraction steam pipe is 3.13 MPa. The maximum pressure ratio of the high pressure (HP) cylinder is 3.13 and the minimum value is 2.65, decreasing gradually. The exhausting steam temperature of the HP cylinder increases gradually, the highest is 331.76 °C, the lowest is 312.97 °C. The efficiency of the IP cylinder is gradually reduced, from 93.37% to 84.78%. The steam enthalpy drops of the HP cylinder and the IP cylinder do not change a lot. However, the first stage extraction steam pressure and the HP cylinder exhausting steam pressure increase. The flow rate of the HP and IP cylinders is reduced, and the work capacity of the HP and IP cylinders is reduced, resulting in the decrease of power load of 9.79 MW. The safety operation index of the unit shaft system remains stable.

KEY WORDS: combined heat and power units; heating retrofit; steam turbine; intermediate pressure cylinder regulating valve; regulation characteristics

0 引言

在“2030碳达峰、2060碳中和”的“双碳”目标提出后, 国家对燃煤污染物排放的要求越来越严格, 能源行业和地方政府也严格控制燃煤消耗总量和燃煤污染物排放量。面对百年未有之大变局, 碳中和作为统筹国内经济社会可持续发展

与全球应对气候变化协同共赢的发展战略，引导经济发展动力由资源依赖转向技术创新，实现能源安全、经济高质量发展和生态环境质量持续改善，是我国未来能源、电力行业绿色低碳发展的重大目标。在此形势下，新能源发电技术快速提升的同时，新能源发电装机容量得到大幅度提高。

随着经济社会的发展和居民生活水平的提高，燃煤机组供热量逐年增加，小容量供热机组和分散供热源被大容量热电联产机组逐步替代，也有大容量纯凝机组改造为热电联产机组以满足用户各种参数的供热需求，在供热质量和数量双提升的同时，降低了燃料消耗总量和污染物排放量，达到节能减排的目的。

目前，供热机组的类型、容量、供热方式、供热参数差别很大。采暖供热方式包括抽汽供热^[1-2]、低压缸光轴供热^[3]、低压缸切缸供热^[4-7]、低压缸高背压循环水供热^[8-11]、空冷机组低压缸排汽供热等。对于工业抽汽的热电联产机组，特别是技改型热电联产机组，由于用户参数较高且差别较大，为了满足用户需要，抽汽汽源千差万别，包括高压缸排汽管道抽汽、中压缸进汽管道抽汽、中低压缸连通管打孔抽汽等多种形式^[12-17]，机组在供热工况下呈现不同的运行状态，而且为了消纳新能源发电量，供热机组也需要参与调峰，导致供热抽汽参数变化较大，达不到用户要求时，需要切换汽源，或者利用压力适配器来调整供汽参数。

机组对外供采暖抽汽和工业抽汽，在节能减排的同时提高了机组的经济性，但是给机组运行带来不稳定因素。本文通过试验研究了 300 MW 等级机组利用再热蒸汽管道实现抽汽扩容改造，在抽汽量较大、供汽参数需求较高时中压调门参与调节的调节特性，对机组高、中压缸运行性能的影响，以及中压调门调节工业抽汽流量的运行方式对机组经济性、安全性的影响，为同类型机组的供热改造提供重要参考。

1 汽轮机技术规范与供热系统

1.1 汽轮机技术规范

某 300 MW 等级汽轮机型号为 C312/305-

16.67/0.5/538/538，型式为亚临界、一次中间再热、高中压合缸、双缸、双排汽、单轴、抽凝式汽轮机，采用一级调整供热抽汽，汽轮机技术参数如表 1 所示。

表 1 汽轮机技术参数

Tab. 1 Technical parameters of steam turbine

参数	取值	参数	取值
主蒸汽压力/MPa	16.67	主蒸汽温度/℃	538
主蒸汽流量/(t/h)	1 021	再热蒸汽压力/MPa	3.34
再热蒸汽温度/℃	538	再热蒸汽流量/(t/h)	836/839(供热)
额定给水温度/℃	274.30	回热抽汽级数	3 高+4 低+1 除氧
额定背压/kPa	4.90	冷却水温度/℃	20
低压末级叶片高度/mm	905	保证热耗率/[kJ/(kW·h)]	7 983.20
采暖抽汽温度/℃	267.50	采暖抽汽压力/MPa	0.50
额定功率/MW	312/305(供热)	额定采暖抽汽量/(t/h)	160

1.2 再热蒸汽管道抽汽供热系统

机组原设计只带采暖抽汽，为了满足较高参数工业抽汽需要，2 台 300 MW 等级机组在再热蒸汽管道上打孔抽汽，供热抽汽经减温减压后对外供汽，减温水取自给水泵中间抽头，电厂出口供热抽汽参数为 1.4 MPa、320 ℃，满足厂外工业用户用汽参数 1.1~1.4 MPa、310~320 ℃的要求，单机设计最大抽汽流量为 200 t/h，2 台机组的总抽汽量满足当前最大瞬时流量的要求。2 台机组再热管道抽汽汇成一根母管进入减温减压器，参数降低后对外供汽，系统简图如图 1 所示。

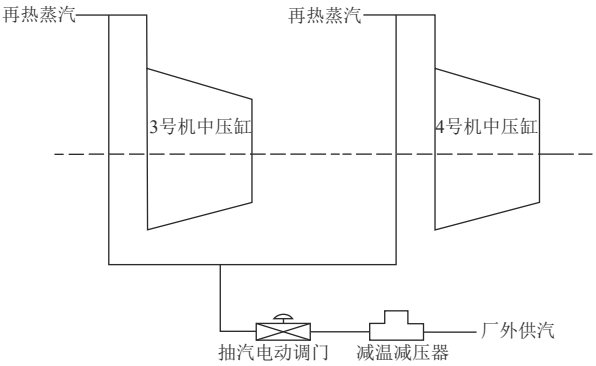


图 1 再热蒸汽管道抽汽供热系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of extraction steam heating system of reheated steam pipe

2 机组供热特性试验

机组从再热蒸汽管道上打孔抽汽，抽汽参数

与机组负荷关系密切,在机组负荷低、抽汽量较大时,为了保证供汽参数满足用户要求,需要中压调门参与调节,对高、中压缸的做功能力和机组运行特性、机组轴系安全指标都有影响,因此在4号机组上进行中压调门调节特性试验。

2.1 试验方法与试验工况

基于机组当前电负荷和供热抽汽量,依据机组负荷和供汽参数变化调整中压调门开度。机组试验电负荷为250 MW,供热抽汽量约为50 t/h。试验时,切除自动发电控制(automatic generation control, AGC)及一次调频,稳定机组电负荷,主蒸汽流量、高压调门开度等机炉主要运行参数,稳定机组抽汽流量与补水流量,并调整补水流量与抽汽流量相同或相近,保持流量平衡以维持试验期间机组单元制运行,除了对外供汽和补水外,4号机组与其他机组之间的汽水联络全部进行有效隔离。

2.2 中压调门调整方法

调整机组协调运行方式为阀门模式,蒸汽参数由锅炉控制并保持稳定。手动控制关闭汽轮机中压调门开度,100%至50%开度内每次关闭5%,50%开度以下每次关闭3%,每次关闭中压调门后,保持机组稳定30 min以上,观察相关参数的变化,根据变化幅度,在中压调门开度分别为100%、50%、35%、30%和25%下进行试验。

2.3 试验参数测量

试验时,主蒸汽压力和温度、高压缸排汽压力和温度、再热蒸汽压力和温度、中压缸排汽压力和温度、抽汽母管压力和温度都换装试验表计测量,给水流量、过热器和再热器减温水流量、工业抽汽流量和电厂对外供汽流量都采用机组运行表计测量,每个工况采集30 min以上稳定运行的数据。

2.4 试验参数控制

中压调门调节特性试验为机组非常规运行方式试验,在参数调整和试验期间应严密监控机组各安全指标在制造厂给定的极限值以内,保证机组安全运行。

2.4.1 各监视段压力、温度

调节级压力不大于13.23 MPa,调节级温度

不高于510℃;高压缸压比大于1.7,高压缸排汽压力不大于4.82 MPa;再热蒸汽压力小于3.702 MPa;高压缸排汽温度高于384℃时,应监视再热器管壁温度不超限,高压缸排汽温度超过报警值404℃时,应立即停止试验。

2.4.2 机组轴系安全指标

1) 轴向位移。当轴向位移增至 ± 0.20 mm时,应立即停止试验;当轴向位移增至 ± 0.6 mm时,应立即减负荷;维持轴向位移不超过 ± 0.9 mm,当轴向位移增至 ± 1.0 mm时,应立即破坏真空紧急停机。

2) 推力瓦温。当推力瓦温升高至85℃或其上升速率大于2℃/min时,应立即停止试验;当推力瓦温升高至89℃时,应适当降负荷运行。

3) 轴瓦温度。当轴瓦温度达到98℃或其上升速率大于2℃/min时,应立即停止试验。

4) 轴瓦、推力瓦回油温度。当回油温度升高至65℃或其上升速率大于2℃/min时,应立即停止试验;当回油温度升高至70℃时,应降负荷运行。

5) 轴承振动。监视并保持轴振动在报警值0.125 mm以内。

6) 胀差。当胀差增加超过1 mm时,应立即停止试验。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

3.1.1 热力性能试验结果

机组250 MW工况下中压调门调节特性试验结果见表2。

3.1.2 机组轴系安全指标

试验过程中,随着中压调门开度减小,机组轴系轴瓦温度、轴瓦回油温度、轴向位移、胀差等安全指标都在安全运行范围内。250 MW工况下,测量各轴瓦振动数据见表3。

由表3中试验结果得知,高中压转子1X和2X轴振偏大,振动分量以一倍频为主,表明高中压转子存在一定的机械不平衡,同时高调门开启顺序对高中压转子的振动有一定影响;中压调门流量特性试验期间,轴位移、缸胀、胀差、轴瓦温

表2 机组250MW工况下热力性能试验结果

Tab. 2 Thermal performance test results under 250 MW condition

参数	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	参数	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5
中压调门开度/%	99.01	48.95	35.33	30.54	24.97	中压缸排汽焓/(kJ/kg)	3 023.47	3 023.51	3 026.12	3 027.83	3 034.82
发电机有功功率/MW	249.43	249.59	247.31	245.69	239.64	中压缸蒸汽焓降/(kJ/kg)	496.56	495.6	499.08	498.44	503.28
主汽流量/(t/h)	782.21	779.33	779.01	779.35	779.04	中压缸效率/%	93.37	92.65	91.36	89.34	84.78
主蒸汽压力/MPa	16.78	16.69	16.74	16.79	16.75	再热抽汽母管压力/MPa	2.27	2.40	2.49	2.64	3.13
主蒸汽温度/℃	533.48	533.10	535.81	532.85	531.76	再热抽汽母管温度/℃	522.52	523.13	525.82	527.37	534.16
主蒸汽焓/(kJ/kg)	3 382.62	3 382.60	3 389.72	3 380.71	3 378.08	再热抽汽母管流量/(t/h)	53.94	52.25	53.14	53.53	52.20
高压缸排汽压力/MPa	3.02	3.07	3.15	3.27	3.65	减温减压器出口供汽压力/MPa	1.11	1.10	1.10	1.10	1.10
高压缸排汽温度/℃	312.97	314.32	317.60	320.29	331.76	减温减压器出口供汽温度/℃	281.22	279.40	279.64	282.80	282.61
高压缸排汽焓/(kJ/kg)	3 024.34	3 026.22	3 032.09	3 035.46	3 054.10	减温减压器出口供汽流量/(t/h)	57.67	56.07	57.17	58.08	56.65
高压缸蒸汽焓降/(kJ/kg)	358.28	356.38	357.63	345.25	323.98	小汽机低压调门开度/%	50.61	49.98	50.47	50.97	50.95
高压缸效率/%	76.02	76.31	77.00	76.06	75.80	四抽至小汽机进汽压力/MPa	0.74	0.74	0.736 0	0.73	0.73
高排缸压比	3.13	3.10	3.01	2.93	2.65	四抽至小汽机进汽温度/℃	350.77	350.98	352.05	353.28	356.54
再热器压损/%	8.99	8.68	8.12	7.37	5.59	四抽至小汽机进汽流量/(t/h)	35.61	35.24	35.35	35.62	35.30
中压缸进汽流量/(t/h)	615.20	613.72	611.61	608.70	602.76	调节级压力/MPa	9.470	9.511	9.487	9.565	9.671
中压缸进汽压力/MPa	2.75	2.80	2.89	3.03	3.44	一抽压力/MPa	5.23	5.26	5.30	5.39	5.63
中压缸进汽温度/℃	528.00	527.81	530.94	532.04	539.10	三抽压力/MPa	1.47	1.48	1.47	1.47	1.45
中压缸进汽焓/(kJ/kg)	3 520.03	3 519.11	3 525.20	3 526.27	3 538.10	四抽压力/MPa	0.75	0.75	0.75	0.74	0.74
中压缸排汽压力/MPa	0.47	0.47	0.47	0.47	0.46	凝汽器压力/kPa	5.90	5.93	5.90	5.87	5.86
中压缸排汽温度/℃	280.20	280.22	281.48	282.31	285.56						

表3 250 MW 工况下各轴瓦振动数据

Tab. 3 Vibration data of each bearing under 250 MW condition

测点	测试数据			DCS 显示 振幅/ μm
	通频振幅/ μm	一倍频振幅/ μm	一倍频相位/(°)	
1X	95	75	39	96
1Y	49	33	92	51
2X	121	118	236	122
2Y	79	73	326	80
3X	37	32	215	37
3Y	45	40	304	44
4X	26	12	20	24
4Y	38	21	200	36
5X	79	68	218	77
5Y	43	32	321	41
6X	70	56	283	71
6Y	70	50	14	69
7X	26	11	138	27
7Y	9	5	181	10

度等参数保持稳定，变化不大。

3.2 试验结果分析

根据表2 试验结果，分析机组供热改造后中压调门参与调节时，中压调门开度与高压缸、中压缸参数及供热参数之间的关系。

3.2.1 中压缸进汽流量

随着中压调门开度的减小，中压缸进汽流量

逐步降低，再热蒸汽压力逐渐升高，其特性曲线如图2 所示。可以看出，在250 MW 工况下，当中压调门开度由99.01% 降至24.97% 时，中压缸进汽流量由615.20 t/h 降至602.76 t/h，再热蒸汽压力由2.75 MPa 升至3.44 MPa。

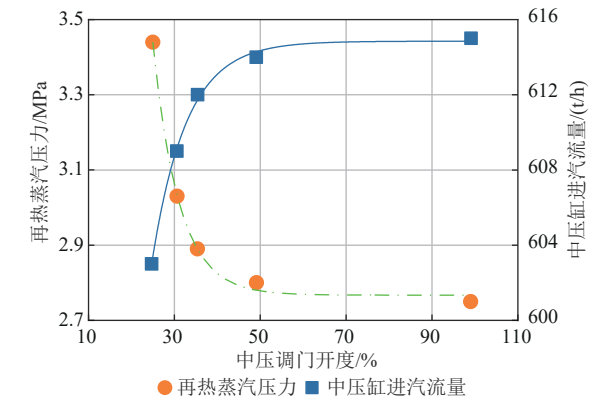


图2 再热蒸汽压力、中压缸进汽流量与中压调门开度特性曲线

Fig. 2 Characteristic curves of reheated steam pressure, intermediate pressure cylinder inlet flow and intermediate pressure regulating valve opening

3.2.2 高压缸压比与高压缸排汽温度

随着中压调门开度的减小，高压缸效率稍有降低，变化范围为75.80%~77.00%，变化不大，但当中压调门开度低于30%时，高压缸蒸汽焓降

和高压缸效率明显降低。随着中压调门开度的减小, 高压缸排汽压力逐步增加, 高压缸压比逐渐减小, 其最大值为3.13, 最小值为2.65; 高压缸排汽温度随中压调门开度的减小而升高, 其最高温度为331.76℃, 最低温度为312.97℃。图3为高压缸压比随中压调门开度变化的特性曲线。

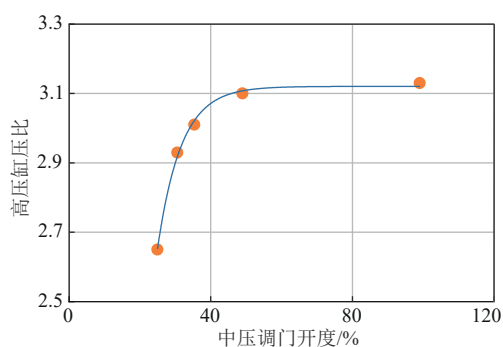


图3 高压缸压比与中压调门开度特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of high pressure cylinder pressure ratio and intermediate pressure regulating valve opening

3.2.3 中压缸效率

随着中压调门开度的减小, 中压缸蒸汽焓降变化不大, 但中压缸效率逐渐降低。在250 MW工况下, 当中压调门开度从99.01%降至24.97%时, 中压缸效率从93.37%降至84.78%。中压缸效率与中压调门开度的特性曲线如图4所示。

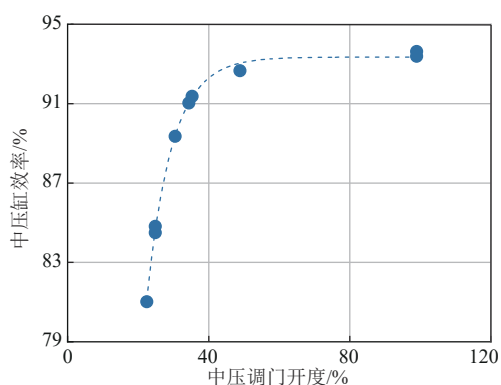


图4 中压缸效率与中压调门开度特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of intermediate pressure cylinder efficiency and intermediate pressure regulating valve opening

3.2.4 机组负荷与监视段压力

由表2试验结果得知, 在主蒸汽流量保持不变的前提下, 随着中压调门开度逐渐减小, 再热

汽管道供热抽汽量基本不变, 高压缸蒸汽焓降和中压缸蒸汽焓降变化不大, 但一段抽汽压力、高压缸排汽压力增加, 1号、2号高加回热抽汽量增加, 中压缸进汽流量逐步降低, 导致机组高、中压缸做功量减小, 机组电负荷降低9.79 MW。机组负荷和中压调门开度的特性曲线如图5所示。由于控制机组主蒸汽流量和主汽调门开度不变, 中压调门开度减小过程中, 调节级后压力稍有增加, 一段抽汽压力和高压缸排汽压力增加明显, 三段、四段抽汽压力基本保持不变。

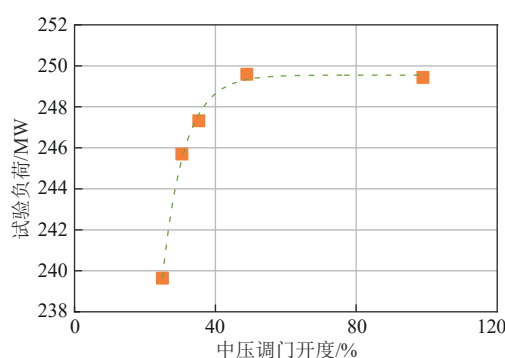


图5 机组负荷与中压调门开度特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of unit power load and intermediate pressure regulating valve opening

3.2.5 给水泵汽轮机

由表2试验结果可知, 在250 MW工况下, 随着中压调门开度逐渐减小, 四段抽汽压力变化不大, 给水泵汽轮机低压调门开度变化不大, 表明给水泵汽轮机的运行工况比较稳定, 中压调门的调整对给水泵汽轮机的安全运行没有影响。

3.3 再热蒸汽管道供热抽汽能力

试验时由于用户用汽量限制, 在250 MW工况下, 再热汽管道供热抽汽量为52.20~53.94 t/h。当中压调门最小开度为24.97%时, 中压缸进汽压力为3.44 MPa, 中压缸进汽流量为602.76 t/h, 再热抽汽母管压力为3.13 MPa。利用中压调门参与调节, 制造厂商限定的最大抽汽流量为200 t/h, 中压调门在调节时只能同时开关, 且最低开度不能小于15%。在试验和操作程序控制上, 中压调门同步动作的最低开度不小于20%, 如要继续增大抽汽量, 则需对中压调门进行改造, 减小中压调门的通流面积, 但这需要考虑常年平均供热抽汽量和机组常年平均运行负荷, 或利用座缸阀调

节机组高参数的供热抽汽量。中压座缸供热调节阀设计无预启阀结构, 调节性能好, 节流损失小, 目前广泛用于供热压力 2.0~5.0 MPa 可调节抽汽方案。

4 结论

研究了从再热蒸汽管道抽汽供热时汽轮机中压进汽调门参与调节的运行特性, 得到如下结论:

1) 随着中压调门开度的减小, 中压缸进汽流量逐步降低, 进汽压力逐渐升高, 在 250 MW 工况下, 当中压调门最小开度为 24.97% 时, 中压缸进汽压力为 3.44 MPa, 中压缸进汽流量达到 602.76 t/h, 机组高、中压缸通流量和做功量减小, 机组电负荷降低 9.79 MW。

2) 随着中压调门开度的减小, 高压缸排汽压力逐渐增加, 高压缸压比逐渐减小。

3) 在中压调门参与调节的初期, 高压缸效率稍有降低, 变化不大, 但中压调门开度低于 30% 后, 高压缸效率明显降低; 随着中压调门开度的减小, 中压缸效率逐渐降低, 当中压调门开度从 99.01% 降至 24.97% 时, 中压缸效率从 93.37% 降至 84.78%。

参考文献

- [1] 石永晖, 马庆中, 曹蓉秀, 等. 大容量火电机组高效供热技术及适应性研究[J]. 热电技术, 2019, 3: 8-13.
SHI Y H, MA Q Z, CAO R X, et al. Study on high efficiency heating technology and adaptability of large capacity thermal power unit[J]. Thermoelectric Technology, 2019, 3: 8-13.
- [2] 韩中合, 肖炜刚, 安国银. 大型汽轮机供热改造方案研究[J]. 汽轮机技术, 2016, 58(3): 198-200.
HAN Z H, XIAO W G, AN G Y. Research of heating retrofitting schemes for large steam turbine[J]. Turbine Technology, 2016, 58(3): 198-200.
- [3] 郭容赫, 王丽萍, 潘云亮, 等. 200 MW 纯凝机组低压转子光轴改造供热研究应用[J]. 资源节约与环保, 2019, 4: 3-5.
GUO Y H, WANG L P, PAN Y L, et al. Research and application of heat supply reform of low-pressure rotor optical shaft of 200 MW pure condensing unit[J]. Resource Conservation and Environment Protection, 2019, 4: 3-5.
- [4] 张猛, 刘鑫屏. 350 MW 供热机组低压缸切除改造灵活性提升分析[J]. 华北电力大学学报, 2019, 46(3): 73-79.
ZHANG M, LIU X P. Flexibility improvement in heating units through low-pressure cylinder excision of 350 MW heating unit[J]. Journal of North China Electric Power University, 2019, 46(3): 73-79.
- [5] 刘勇, 刘涛, 李鹏. 330 MW 东方汽轮机低压缸零出力改造案例研究[J]. 机电工程技术, 2019, 48(9): 237-242.
LIU Y, LIU T, LI P. Case analysis of low pressure cylinder zero output retrofit of 300 MW oriental steam turbine[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(9): 237-242.
- [6] 王力, 包伟伟, 张敏, 等. 350MW 超临界机组切缸技术供热特性分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(4): 51-55.
WANG L, BAO W W, ZHANG M, et al. Analysis on heating characteristics of cylinder transfer of 350 MW supercritical unit[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(4): 51-55.
- [7] 鄂志君, 张利, 杨帮宇, 等. 低压缸零出力实现热电联产机组热电解耦与节能的理论研究[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(5): 383-386.
E Z J, ZHANG L, YANG B Y, et al. Theoretical study on heat-electricity decoupling and energy saving of LP cylinder zero output renovation of heat and power cogeneration units[J]. Turbine Technology, 2019, 61(5): 383-386.
- [8] 王学栋, 王德华, 郑威, 等. 150 MW 机组高背压供热改造的试验研究与分析[J]. 汽轮机技术, 2012, 54(5): 397-400.
WANG X D, WANG D H, ZHENG W, et al. Experimental investigation and analysis on reconstruction of high back pressure circulating water heat supply of 150 MW unit[J]. Turbine Technology, 2012, 54(5): 397-400.
- [9] 李奕. 2×300 MW 汽轮机双机循环水余热供热系统[J]. 发电技术, 2018, 39(3): 244-248.
LI Y. Heat supply system of 2×300 MW units' circulating water waste heat[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(3): 244-248.
- [10] 唐江, 王学栋, 赵玉柱, 等. 凝汽机组高背压供热改造后的性能指标与调峰能力分析[J]. 发电技术, 2018, 39(5): 455-461.
TANG J, WANG X D, ZHAO Y Z, et al. Analysis of performance indicators and peak regulation capacity of condensing unit after high back pressure

- retrofit for heating[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(5): 455-461.
- [11] 刘光耀, 王学栋, 宋昂, 等. 135 MW 等级汽轮机不同高背压供热改造技术分析[J]. 发电与空调, 2017, 38(5): 45-50.
- LIU G Y, WANG X D, SONG A, et al. Analysis of different reconstruction technology for heating supply with high back pressure of 135 MW grade steam turbine [J]. Power Generation & Air Condition, 2017, 38(5): 45-50.
- [12] 徐则林, 姜燕妮, 徐磊, 等. 热电联产机组热能深度梯级利用的研究[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(5): 107-112.
- XU Z L, JIANG Y N, XU L, et al. Research on thermal energy step utilization in cogeneration units[J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(5): 107-112.
- [13] 孙嘉权, 许涛, 商永强. 汽轮机组供热改造方案研究[J]. 华电技术, 2018, 40(1): 68-70.
- SUN J Q, XU T, SHANG Y Q. Study on heating reform of steam turbine unit[J]. Huadian Technology, 2018, 40(1): 68-70.
- [14] 薛朝因, 杨荣祖, 王汀, 等. 汽轮机高低旁路联合供热在超临界 350 MW 机组上的应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 101-105.
- XUE Z N, YANG R Z, WANG T, et al. Application of turbine HP-LP bypass system combining with heating in supercritical 350 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 101-105.
- [15] 李海龙, 王晋权, 马晓峰. 超临界 600 MW 汽轮机组调门流量特性调整及运行优化[J]. 黑龙江电力, 2011, 33(4): 280-283.
- LI H L, WANG J Q, MA X F. Adjustment of control valve's flow characteristics and operation optimization for supercritical 600 MW turbine units[J]. Heilongjiang Electric Power, 2011, 33(4): 280-283.
- [16] 陈文, 蔡文, 万忠海. 国产引进型 340 MW 汽轮机组流量特性试验研究[J]. 江西电力, 2019, 43(2): 49-51.
- CHEN W, CAI W, WAN Z H. Experimental study on flow characteristics of domestic imported 340 MW steam turbine unit[J]. Jiangxi Electric Power, 2019, 43(2): 49-51.
- [17] 张军辉, 杜献伟, 张文涛. 300 MW 纯凝机组供热改造经济性分析[J]. 发电技术, 2019, 40(1): 71-73.
- ZHANG J H, DU X W, ZHANG W T. Economic analysis of heating reform of 300 MW condensing power plant[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(1): 71-73.
-
- 收稿日期: 2022-04-20.
- 作者简介:
-
- 王志云
- 王志云(1970), 男, 高级工程师, 主要从事电站设计工作, hdnmg2005@126.com;
-
- 赵玉柱
- 赵玉柱(1981), 男, 正高级工程师, 主要从事汽轮机、燃气轮机运维服务及监测诊断技术研究工作;
-
- 王学栋
- 王学栋(1966), 男, 正高级工程师, 主要从事汽轮机节能诊断、节能改造及节能技术研究工作, 本文通信作者, xuedong-wang@chder.com;
-
- 张元舒
- 张元舒(1987), 男, 高级工程师, 主要从事火电厂汽轮机本体和辅机性能测试、经济指标分析、运行策略优化和节能技改方案研究等工作。
- (责任编辑 杨阳)