

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.06.010

燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉热效率 计算模型对比分析

Comparative analysis of calculation models for thermal efficiencies of waste
heat boilers in gas-steam combined cycle units

王志永¹, 许贺², 朱慧敏³, 葛俊沛¹, 许静¹

WANG Zhiyong¹, XU He², ZHU Huimin³, GE Junpei², XU Jing²

(1. 河南能信热电有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 中国大唐集团科学技术研究院有限公司华中电力试验
研究院, 郑州 450000; 3. 国家电投集团郑州燃气发电有限公司, 郑州 450001)

(1. Henan Nengxin Thermal Power Company Limited, Xuchang 461000, China; 2. China Datang Corporation Science
and Technology Research Institute Company Limited, Zhengzhou 450000, China; 3. State Power Investment
Group Henan Gas Power Generation Company Limited, Zhengzhou 450001, China)

摘 要:为分析电厂运行的经济性,对某电厂燃气-蒸汽联合循环机组进行了余热锅炉性能试验,利用现场试验数据采取正、反平衡2种数学模型分别计算余热锅炉热效率。在假设系统存在不明泄漏的极端情况下,研究了采用2种模型计算的余热锅炉热效率变化趋势。计算结果表明:额定工况下反平衡余热锅炉热效率为85.69%~85.92%,正平衡余热锅炉热效率为84.50%~85.31%;考虑系统不明泄漏修正的余热锅炉热效率为85.30%~85.94%。反平衡计算模型直接反映出锅炉的换热性能,正平衡计算模型则反映出机组整体热力循环系统的真实情况,2种方法均可为同类机组余热锅炉设备在不同工况下的考核提供参考借鉴。

关键词:余热锅炉;正平衡;反平衡;热效率;系统不明泄漏

中图分类号:TK 11⁺5

文献标志码:B

文章编号:1674-1951(2020)06-0047-05

Abstract:To analyze the economy of power plants, performance test for a waste heat boiler in a gas-steam combined cycle unit was made, and the field test data were taken to calculate the thermal efficiency of the waste heat boiler within positive and counter balance mathematical models. In the extreme situations with unknown leakage in the system, variation trends of the efficiency calculated in two models were studied. The study results showed that the counter-balance waste heat boiler thermal efficiency ranged from 85.69% to 85.92% under the rated conditions, and the efficiency calculated by positive balance ranged from 84.50% to 85.31%. Considering unknown leakage correction, the thermal efficiency of the waste heat boiler ranged from 85.30% to 85.94%. The counter-balance calculation model directly reflects the heat transfer performance of the boiler. The positive balance calculation model reflects the actual situation of the overall thermal cycle system. These two methods can provide reference for waste heat boilers of the same type under different assessment conditions.

Keywords:waste heat boiler; positive balance; counter balance; thermal efficiency; system unknown leakage

0 引言

燃气-蒸汽联合循环是一种将燃气轮机(以下简称燃机)循环与蒸汽轮机循环结合起来的高效循环方式^[1]。余热锅炉是联合循环机组的关键设备之一,其效率是联合循环机组运行经济性的重要指标^[2-4]。

影响余热锅炉热效率的因素有很多,包括燃机环

境参数、燃料流量、燃料温度、燃机排气温度、给水压力、给水流量、蒸汽压力、蒸汽温度、余热锅炉排烟温度等^[5-10]。分析这些参数对余热锅炉热效率的影响为机组运行优化、检修和技术改造提供了重要参考。

1 设备简介

某电厂燃气-蒸汽联合循环机组采用了三压(高压蒸汽作为主蒸汽、中压蒸汽和汽轮机高压缸排汽作为再热蒸汽、低压蒸汽作为除氧器加热蒸汽和汽轮机低压缸进汽)、再热、无补燃、自然循环、卧式

收稿日期:2019-05-22;修回日期:2019-09-15

余热锅炉。余热锅炉性能保证参数见表 1。

表 1 余热锅炉设计工况参数

Tab. 1 Waste heat boiler parameters under design condition

项目	参数
高压蒸汽	出口压力/MPa
	12.75
	出口温度/℃
	566.50
	流量/(t·h ⁻¹)
	260.00
再热热段蒸汽	出口压力/MPa
	3.10
	出口温度/℃
	553.50
	流量/(t·h ⁻¹)
	310.19
再热冷段蒸汽	进口压力/MPa
	3.35
	进口温度/℃
	375.50
	流量/(t·h ⁻¹)
	258.43
中压蒸汽	压力/MPa
	3.13
	温度/℃
	335.60
	流量/(t·h ⁻¹)
	52.41
低压蒸汽	压力/MPa
	0.44
	温度/℃
	242.70
	流量/(t·h ⁻¹)
	47.32
凝结水加热器进口温度/℃	60.00
凝结水加热器出口温度/℃	150.20
进口烟气温度/℃	591.50
排烟温度/℃	90.50
炉内烟气总阻力/kPa	4.30

2 余热锅炉热效率计算模型

余热锅炉热效率的计算方法一般分为正平衡计算与反平衡计算。正平衡计算简单来说就是计算余热锅炉热出力在输入热量中的占比;反平衡计算则以烟气侧直接损失项及辐射散热损失项为主要损失计算项^[11-12],求取余热锅炉热效率。

与燃煤电厂锅炉不同,电厂余热锅炉本身无燃烧设备,仅进行烟气及汽水侧换热,故可将此类锅炉归为烟气换热器。其烟气从燃气轮机排出,经燃机扩散管、过渡烟道进入锅炉本体,然后依次横向冲刷模块 I、模块 II、模块 III 和模块 IV,最后经出口烟道、烟气挡板及烟囱排空。

2.1 反平衡法计算余热锅炉热效率

余热锅炉反平衡效率计算采用的是热损失法,将余热锅炉热损失分为 3 项:排烟热损失、对流损失、辐射热损失。其中余热锅炉的排烟热损失又区别于燃煤电站锅炉的排烟热损失,其排气中基本无可燃物,故研究余热锅炉进、出口烟气侧输入及输出热量时,可测量余热锅炉进、出口烟气组分等参数计算烟气焓值。反平衡法计算的余热锅炉热效率

$$\eta_{sg} = \frac{(h_{gi} - h_{go}) \times (1 - f_{loss})}{h_{gi} - h_{gr}}, \quad (1)$$

式中: h_{gi} 为锅炉进口烟气比焓,kJ/kg; h_{go} 为锅炉出口烟气比焓,kJ/kg; h_{gr} 为参考温度下的烟气比焓,kJ/kg; f_{loss} 为锅炉的对流、辐射热损失率,%。

f_{loss} 可取设备厂家、业主、试验单位的设计值或经验值,或者根据有保温层物体的导热、对流、辐射传热模型进行计算得出,其中前者在工程中更常用。

$$f_{loss} = \frac{\Phi_{loss}}{\Phi_{in}} \times 100\%, \quad (2)$$

$$\Phi_{loss} = qA, \quad (3)$$

式中: Φ_{loss} 为余热锅炉散热热量,kW; Φ_{in} 为余热锅炉输入热量,kW; q 为散热热流密度,kW/m²;A 为保温层外表面积,m²。

2.2 正平衡法计算余热锅炉热效率

三压再热蒸汽系统相对于单压、双压蒸汽系统较为复杂,各系统参数相对独立,局部又相互关联。该电厂机组汽水系统主要分为 5 个部分:高压给水主蒸汽系统、中压给水再热系统、低压给水主蒸汽系统、凝结水余热系统(带旁路)以及燃料余热系统(即性能加热器)。

燃气电站与燃煤电站锅炉使用正平衡法计算热效率的方法一致,以正平衡法计算的锅炉效率

$$\eta_h = [q_{mhp}(h_{hp} - h_{hw}) + (q_{mhp} - q_{mll}) \times (h_{rh} - h_{ch}) + q_{mip}(h_{rh} - h_{iw}) + q_{mlp}(h_{lp} - h_{lw}) + (q_{m1} + q_{m2}) \times (h_{rh} - h_{iw})] / Q_{cl}, \quad (4)$$

式中: q_{mhp} 、 q_{mip} 、 q_{mlp} 为高压、中压、低压给水流量,t/h; h_{hp} 、 h_{hw} 分别为高压蒸汽比焓和高压给水比焓,kJ/kg; q_{mll} 为高压门杆漏气量,t/h,查设计值可知; h_{rh} 、 h_{ch} 分别为热再热蒸汽焓和高压缸排汽比焓,kJ/kg; h_{lw} 为中压给水比焓,kJ/kg; h_{lp} 为低压给水比焓,kJ/kg; q_{m1} 、 q_{m2} 分别为一级和二级再减水流量,t/h; Q_{cl} 为燃气轮机排入余热锅炉的烟气所携带的热量,kJ。

3 边界条件设定

依据 ASME PTC4.4—2008 *Gas Turbine Heat Recovery Steam Generators Performance Test Codes* 及 DL/T 1427—2015《联合循环余热锅炉性能试验规程》等相关规范规程,结合现场实际运行要求,计算了 2 种额定负荷纯凝联合循环工况下(联合循环工况 1 和联合循环工况 2)的余热锅炉热效率和燃机单循环工况下的燃机发电功率。

对燃气-蒸汽联合循环机组进行了余热锅炉性能试验,试验期间的燃料气质特性数据来自中石化天然气站的化验报告,2种工况下的燃料气质特性见表2。

表2 试验用燃料气质特性

Tab.2 Characteristics of gas for the test

项目	联合循环	
	工况1	工况2
$\varphi(\text{CH}_4)/\%$	95.8585	93.6534
$\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)/\%$	3.2913	3.1314
$\varphi(\text{C}_3\text{H}_8)/\%$	0.0648	0.1219
$\varphi(\text{i}-\text{C}_4\text{H}_{10})/\%$	0.0056	0.0047
$\varphi(\text{n}-\text{C}_4\text{H}_{10})/\%$	0.0083	0.0098
$\varphi(\text{i}-\text{C}_5\text{H}_{12})/\%$	0.0092	0.0078
$\varphi(\text{n}-\text{C}_5\text{H}_{12})/\%$	0.0057	0.0070
$\varphi(\text{C}_6^+)/\%$	0.0353	0.0429
$\varphi(\text{N}_2)/\%$	1.1543	1.1356
$\varphi(\text{CO}_2)/\%$	0.5421	0.4653
高位发热量/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	36.8998	35.7684

4 余热锅炉热效率对比

4.1 余热锅炉热效率的试验结果

采用正、反平衡算法对试验工况余热锅炉热效率进行计算,试验结果见表3—4。

表3 正平衡法计算的余热锅炉热效率和试验条件

Tab.3 Thermal efficiency calculated within positive balance mathematical model and test conditions

项目	联合循环	
	工况1	工况2
试验条件	大气压力/kPa	101.70
	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	15.92
	相对湿度/%	52.79
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	38.16
	天然气流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	520.33
	燃气轮发电机输出	524.35
	功率/kW	237464.35
	燃气轮发电机组	235149.86
	损失/kW	2374.64
	2351.50	
正平衡计算结果	平衡空气量(用于平衡热量的过量空气量)/($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	1593.01
	1573.43	
	燃机排气质量流量/($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	2436.43
	2407.46	
	烟气流/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	676.79
	668.74	
	汽水吸热量/($\text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}$)	1269.55
	1251.88	
	余热锅炉输入热量/($\text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}$)	1488.21
	1481.57	
正平衡计算结果	实测余热锅炉热效率/%	85.31
	84.50	
余热锅炉平均热效率/%		84.90

表4 反平衡法计算的余热锅炉热效率和试验条件

Tab.4 Thermal efficiency calculated within counter balance mathematical model and test conditions

项目	联合循环	
	工况1	工况2
进口烟气	进口烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	572.17
	576.51	
	$h_{\text{N}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	598.01
	602.93	
	$h_{\text{O}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	551.62
	556.25	
	$h_{\text{CO}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	579.54
	584.69	
	$h_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	1115.05
	1124.52	
出口烟气	$h_{\text{Ar}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	289.62
	291.88	
	$h_{\text{SO}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	412.54
	416.12	
	进口烟气比焓($h_{\text{g-in}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$)	610.37
	614.98	
	出口烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	97.11
	100.98	
	$h_{\text{N}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	84.86
	88.89	
参考烟气比焓	$h_{\text{O}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	75.37
	78.98	
	$h_{\text{CO}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	71.35
	74.88	
	$h_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	152.84
	160.15	
	$h_{\text{Ar}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	42.44
	44.45	
	$h_{\text{SO}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	52.15
	54.72	
反平衡计算结果	出口烟气比焓($h_{\text{g-out}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$)	85.37
	89.37	
	参考温度/ $^{\circ}\text{C}$	15.92
	18.16	
	$h_{\text{N}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.37
	2.70	
	$h_{\text{O}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.33
	2.38	
	$h_{\text{CO}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.30
	2.17	
反平衡计算结果	$h_{\text{H}_2\text{O}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.67
	4.83	
	$h_{\text{Ar}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.19
	1.35	
	$h_{\text{SO}_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.22
	1.60	
	参考温度烟气比焓($h_{\text{g-gr}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$)	0.38
	2.70	
	烟气的热损失/($\text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}$)	217.67
	218.66	
反平衡计算结果	辐射对流等热损失/($\text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}$)	2.34
	2.32	
	燃机排气所含物理显热/($\text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}$)	1562.24
	1544.76	
	反平衡热效率/%	85.92
	85.69	
	余热锅炉平均热效率/%	85.81

从能量平衡角度来说,正、反平衡锅炉效率应相互收敛。而从实际结果来看,余热锅炉正反平衡效率存在差异,反平衡效率为85.81%,正平衡效率为84.90%。

由数学模型可知正、反平衡2种余热锅炉热效率的输入热量都为燃机排气热量,故从反映能量流动的角度来说,精确的燃机排气量在余热锅炉的效率考核中至关重要。余热锅炉的焓降效率计算模型

可直接反映传热效果。反平衡法对燃机排气流量考核要求相对较低,可直接由余热锅炉进/出口烟气的焓值及辐射对流损失率计算;但该方法无法反映传热过程的能量关系。在正平衡模型中,烟气量的计算误差所产生的效率误差不能消除,从能量平衡及质量平衡的角度看,正平衡试验结果不确定度高于反平衡试验结果的不确定度。

4.2 不明泄漏对余热锅炉热效率影响

试验期间,由除氧器的水位变化当量可知,汽水系统不明泄漏率在联合循环工况 1 及联合循环工况 2 时分别为 1.32%,1.12% (即不明泄漏量为 4.80, 4.02 t/h)。汽水系统泄漏可分为 3 种极端情况:高压系统泄漏、中压系统泄漏及低压系统泄漏。假使试验前后除氧器水位变化当量为 0,极端情况对余热锅炉热效率的影响见表 5—7。

表 5 高压系统泄漏对余热锅炉热效率影响

Tab.5 Effect of leakage in high-pressure system on thermal efficiency of the waste heat boiler

项目	联合循环	
	工况 1	工况 2
余热锅炉汽水吸热增量/(GJ·h ⁻¹)	16.80	14.10
极端情况余热锅炉热效率/%	85.93	85.45
正平衡余热锅炉热效率/%	85.31	84.50
相对偏差/%	0.62	0.95
反平衡余热锅炉热效率/%	85.92	85.69
同反平衡效率相对偏差/%	0.01	0.24
主给水流量/(t·h ⁻¹)	363.85	359.05

表 6 中压系统泄漏对余热锅炉热效率影响

Tab.6 Effect of leakage in medium-pressure system on thermal efficiency of the waste heat boiler

项目	联合循环	
	工况 1	工况 2
余热锅炉汽水吸热增量/(GJ·h ⁻¹)	17.01	14.11
极端情况余热锅炉热效率/%	85.94	85.45
正平衡余热锅炉热效率/%	85.31	84.50
相对偏差/%	0.63	0.95
反平衡余热锅炉热效率/%	85.92	85.69
同反平衡效率相对偏差/%	0.01	0.24
主给水流量/(t·h ⁻¹)	363.85	359.05

由表 5—7 可知,考虑汽水系统不明泄漏情况,联合循环工况 1 下正平衡余热锅炉热效率波动范围为 85.75%~85.94%,反平衡余热锅炉效率平均为 85.92%。联合循环工况 2 下正平衡余热锅炉热效率波动范围 85.30%~85.45%,反平衡余热锅炉效率平均为 85.69%。

高压主蒸汽及再热蒸汽侧的不明泄漏对余热锅

表 7 低压系统泄漏对余热锅炉热效率影响

Tab.7 Effect of leakage in high-pressure system on thermal efficiency of the waste heat boiler

项目	联合循环	
	工况 1	工况 2
余热锅炉汽水吸热增量/(GJ·h ⁻¹)	14.14	11.83
极端情况余热锅炉热效率/%	85.75	85.30
正平衡余热锅炉热效率/%	85.31	84.50
相对偏差/%	0.44	0.80
反平衡余热锅炉热效率/%	85.92	85.69
极端情况相对偏差/%	0.17	0.39
主给水流量/(t·h ⁻¹)	363.85	359.05

炉热效率计算影响最为严重。高压系统与中压系统泄漏导致的正平衡锅炉热效率相对误差持平,2 个平行工况下,上述泄漏系统对余热锅炉热效率影响范围分别为 0.63%,0.95%。低压系统泄漏对余热锅炉热效率影响最小,为 0.44%,0.80%。2 个平行工况下余热锅炉热效率的变化发展趋势一致并基本趋近于反平衡余热锅炉热效率结果。联合循环工况 2 的不明泄漏率及系统泄漏修正热量较联合循环工况 1 低,是由于联合循环工况 2 的燃机排气流量(668.74 kg/s)较联合循环工况 1 的燃机排气流量(676.79 kg/s)低,2 个平行工况燃机排气比焓分别为 610.37,614.98 kJ/kg,故联合循环工况 2 余热锅炉输入热量比联合循环工况 1 低。从正平衡余热锅炉热效率计算的数学模型来说,当输入-输出热量同时变化,不明泄漏率低的联合循环工况 2 的余热锅炉热效率相对误差较联合循环 1 高(如图 1 所示)。

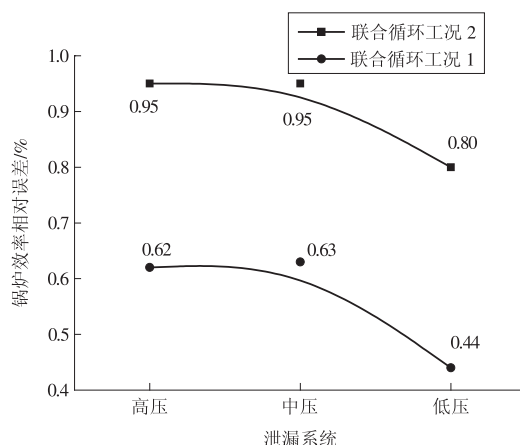


图 1 不同系统不明泄漏对余热锅炉热效率的影响

Fig.1 Influence of unknown leakage of different systems on thermal efficiency of waste heat boiler

综上所述,2 种计算模型得到的余热锅炉热效率变化趋势一致,但反平衡计算模型较正平衡的结果高,考虑系统不明泄漏后的正平衡余热锅炉热效

率变化向反平衡效率的变化趋近,且高、中压系统泄漏修正后趋近基本一致,整体高于低压系统泄漏修正。即从正平衡余热锅炉热效率计算的数学模型来说,系统不明泄漏一定的情况下,低阶压力系统泄漏导致的锅炉热出力降低在整个热平衡过程占比较少。

无论是正平衡锅炉效率还是反平衡锅炉效率计算模型,根本目的都是为了得到余热锅炉整体性能状况,由试验结果都可以看出,反平衡计算模型更接近设备性能真实值,而正平衡更接近热力循环系统真实值。因此在余热锅炉设备考核过程中,可根据不同的考核需求,采取不同的方法对余热锅炉性能进行考核评价。

5 结论

本文根据某燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉性能考核试验结果,结合正、反平衡余热锅炉计算模型分析可知,燃机排气流量对余热锅炉热效率影响最为重要。

正平衡余热锅炉热效率计算模型不能排除系统不明泄漏对锅炉效率的影响,故其不确定度较高;高压、中压系统泄漏对余热锅炉热效率影响效果基本一致,且均高于低压系统泄漏对余热锅炉热效率的影响。

反平衡余热锅炉热效率计算模型更能准确得到设备真实状况,而正平衡余热锅炉热效率计算模型,对于反映机组整体热力循环系统性能具有优势。针对不同的考核需求,以上结果可为同类型机组的考核评价提供参考借鉴。

参考文献:

- [1] 范启康. 联合循环极限热效率的分析[J]. 燃气轮机技术, 1996, 6(2): 5-8.
SU Qikang. Analysis of ultimate thermal efficiency of combined cycle[J]. Gas Turbine Technology, 1996, 6(2): 5-8.
- [2] 何语平. 大型天然气联合循环电厂对燃气轮机的选择[J]. 中国电力, 2003, 36(12): 22-23.
HE Yuping. Model selection of gas turbine for large scale gas-fired combined cycle power plant[J]. Electricity, 2003, 36(12): 22-23.
- [3] 何青, 罗宁. 燃气蒸汽联合循环热电联产机组热经济性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 49-56.
HE Qing, LUO Ning. Thermal-economic analysis of combined heat and power generation unit of gas-steam combined cycle[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 49-56.
- [4] 水冰杉. 燃气蒸汽联合循环余热锅炉的发展和研究[J]. 世界有色金属, 2018(3): 282-283.
SHUI Bingshan. Development and research of gas steam combined cycle waste heat boiler[J]. World Nonferrous Metals, 2018(3): 282-283.
- [5] 韦晓峰, 王树成, 李哲伦, 等. 燃气-蒸汽联合循环蒸汽系统参数影响分析[J]. 锅炉技术, 2018, 49(6): 13-17.
WEI Xiaofeng, WANG Shucheng, LI Zhelun, et al. Analysis of steam system parameters of a combined cycle power plant[J]. Boiler Technology, 2018, 49(6): 13-17.
- [6] 赵启成, 岳岱巍, 李鹏. 高炉煤气余热发电技术方案比选[J]. 华电技术, 2018, 40(8): 66-68.
ZHAO Qicheng, YUE Daiwei, LI Peng. Technical comparison and selection for generation scheme with waste heat of blast furnace gas[J]. Huadian Technology, 2018, 40(8): 66-68.
- [7] 杨倩玉, 姜阳, 王雷. 影响燃气-蒸汽联合循环余热锅炉效率因素分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2018, 14(3): 209-215.
YANG Qianyu, JIANG Yang, WANG Lei. Factors influencing efficiency of heat recovery boiler in gas-steam combined cycle generator[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering(Natural Science), 2018, 14(3): 209-215.
- [8] 胡秀涛. 燃气-蒸汽联合循环余热锅炉尾部烟气余热利用方式及经济性分析[J]. 发电与空调, 2017, 38(3): 43-46.
HU Xiutao. Methods and economic analysis of waste heat recovery from gas steam combined cycle waste heat boiler flue gas[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2017, 38(3): 43-46.
- [9] 姜雪, 李业强. 燃气-蒸汽联合循环余热锅炉方案简介[J]. 锅炉制造, 2016(1): 17-18, 33.
JIANG Xue, LI Yeqiang. Introduction of gas-steam combined cycle heat recovery steam generator[J]. Boiler Manufacturing, 2016(1): 17-18, 33.
- [10] 闫顺林, 张泽森, 蔚群超, 等. 燃气蒸汽联合循环余热锅炉能效分析的矩阵模型[J]. 锅炉制造, 2015(1): 12-14, 31.
YAN Shunlin, ZHANG Zemiao, YU Qunchao, et al. Gas-steam combined cycle heat recovery boiler energy efficiency matrix model analysis[J]. Boiler Manufacturing, 2015(1): 12-14, 31.
- [11] 何语平. 大型天然气联合循环机组系统优化[J]. 中国电力, 2003, 36(11): 37-40.
HE Yuping. System optimization of large-scale natural gas-fired combined cycle power plant[J]. Electric Power, 2003, 36(11): 37-40.
- [12] 厉剑梁. 燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

(本文责编: 陆华)

作者简介:

王志永(1973—), 男, 河南许昌人, 工程师, 注册安全工程师, 从事大中型火电机组施工、调试及运行生产管理工作(E-mail: 13569933939@163.com)。

许贺(1990—), 男, 河南周口人, 工程师, 硕士, 从事火力发电机组调试、性能试验及技术监督工作(E-mail: 444856806@qq.com)。