

锅炉机组热力计算标准方法

石书雨,付春磊,隋海涛,梁世传
(烟台龙源电力技术股份有限公司,山东 烟台 264006)

摘要:“十四五”期间,能源结构持续优化,火电机组改造升级对推动碳达峰、碳中和具有重要意义,其中锅炉性能计算是必备手段,而锅炉热力计算是重中之重。在实际工程中采用锅炉热力校核方法对锅炉进行建模,根据锅炉实际指标和各受热面结构尺寸,计算锅炉各部件运行时的各项指标,作为排查故障及改造的依据。我国尚未有电站锅炉行业的热力计算标准,目前公开的锅炉热力计算标准有苏联 1957 版、1973 版和俄罗斯 1998 版。基于苏联 1973 版和俄罗斯 1998 版锅炉热力计算标准研究,针对炉膛有效辐射层厚度、炉内系数 M 、炉膛出口烟温、对流受热面的传热系数等 9 个主要参数进行对比分析。结合 3 个不同电厂锅炉机组工程项目数据:1 000 MW 超超临界塔式锅炉、660 MW 超临界 II 型双烟道锅炉、300 MW 亚临界 II 型锅炉,通过计算锅炉效率、排烟温度、燃料消耗量、减温水量、炉膛出口烟温、热负荷等参数与电厂运行参数进行对比,验证俄罗斯 1998 版热力计算标准用于大型煤粉锅炉机组的可靠性,从而为机组灵活性改造提供参考。

关键词:灵活性;低负荷稳燃;锅炉;热力计算

中图分类号:TK222

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2023)S2-0370-07

Standard methods of boiler thermodynamic calculation

SHI Shuyu, FU Chunlei, SUI Haitao, LIANG Shichuan

(Yantai Longyuan Power Technology Co., Ltd., Yantai 264006, China)

Abstract: During the 14th Five-Year Plan period, the energy structure will be optimized persistently, the transformation and upgrading of thermal power units is of great significance to promote carbon peak and carbon neutralization. Boiler performance calculation is a necessary means and boiler thermal calculation is the top priority. In the actual project, the boiler thermal check method is used to model the boiler. According to the actual indicators of the boiler and the structural dimensions of each heating surface, the indicators of each component of the boiler during operation are calculated as the basis for troubleshooting and reconstruction. China does not have its own thermal calculation standards for power plant boiler industry. At present, the published thermal calculation standards for boilers include the former Soviet Union's 1957 version, 1973 version and Russia's 1998 version. Based on a large number of studies on the former Soviet Union Thermal Power Computation Standard (1973) and Russia Thermal Power Computation Standard (1998), nine main parameters were analyzed and compared, including the thickness of furnace effective radiation layer, furnace coefficient M , furnace outlet flue gas temperature, and heat transfer coefficient of convection heating surface. Combined with the data of three different power plant boiler unit: 1 000 MW ultra supercritical tower boiler, 660 MW ultra supercritical II boiler, 300 MW subcritical II boiler, the boiler efficiency, flue gas temperature, fuel consumption, desuperheating water volume, furnace outlet flue gas temperature, heat load and other parameters were calculated and compared with the operating parameters of the power plant. The reliability of the Russia Thermal Power Computation Standard (1998) for large pulverized coal boiler units were verified so as to provide a reliable reference for the analysis tools required for the flexibility transformation of the units.

Key words: flexibility; low load stable combustion; boiler; thermal calculation

0 引 言

随着“3060”碳达峰、碳中和目标的确立,为促进能源消费革命,推进能源结构转型升级,国家能源

局对开展火电灵活性改造提出明确要求^[1]。目前,各发电企业逐步实施低负荷稳燃调峰改造,在机组摸底试验基础上,采用锅炉性能计算进行技术方案可行性分析是必备手段。锅炉性能计算包括热力计

收稿日期:2022-10-31;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.22103102

作者简介:石书雨(1982—),女,吉林吉林人,高级工程师,硕士。E-mail:shi616@126.com

引用格式:石书雨,付春磊,隋海涛,等.锅炉机组热力计算标准方法[J].洁净煤技术,2023,29(S2):370-376.

SHI Shuyu, FU Chunlei, SUI Haitao, et al. Standard methods of boiler thermodynamic calculation[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 370-376.

算、水动力计算、壁温计算、强度计算、烟风阻力计算等,其中锅炉热力计算是其他计算的基础,是锅炉性能计算中最关键的计算^[2]。

热力计算有 2 种形式:设计计算与校核计算。设计热力计算的任务是在给定的经济指标和燃料特性下,锅炉能在额定参数下长期运行,并达到额定蒸发量所必需的炉膛尺寸和锅炉各受热面尺寸^[3]。在实际工程中均采用锅炉热力校核方法对锅炉设计进行建模^[4],根据锅炉实际指标和各受热面结构尺寸,计算锅炉各部件运行时的各项指标,作为排查故障及改造的依据。计算方法为:先确定各受热面的结构尺寸,然后根据受热面的换热类型计算各部件吸热量。

锅炉系统换热有辐射换热和对流换热 2 种,根据设备位置环境不同,每个设备 2 种换热比例不同,计算时可划分为辐射换热(对应设备:水冷壁,壁式、墙式过热器或再热器,顶棚与包覆壁过热器)、半辐射半对流(对应设备:屏式过热器或再热器)、对流换热(对应设备:立式、卧式高温对流过热器,水平段、垂直段低温过热器,高温再热器,低温再热器,省煤器,空气预热器)。在炉膛内换热,辐射换热达总换热量的 95% 以上,对流换热忽略不计;炉膛出口附近辐射换热与对流换热并存;炉膛出口后主要是烟道中烟气与对流换热设备中工质进行换热。

我国尚未有电站锅炉行业的热力计算标准^[5],各锅炉厂已引进美国、日本等西方国家的亚临界、超

临界和超超临界的火力发电技术和计算方法,但无法得到源程序和算法制定的依据。而苏联和俄罗斯 3 个锅炉热力计算标准方法较齐全,其中 1957 年和 1973 年的 2 个计算标准为中国工程界所熟悉,1998 年标准根据过去 40 余年苏、俄锅炉制造和电力行业进行修改,笔者主要对苏联 1973 版和俄罗斯 1998 版锅炉热力计算标准进行比较分析。

1 俄罗斯 1998 版与苏联 1973 版计算标准对比

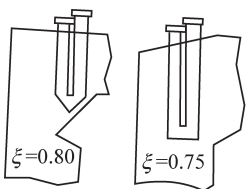
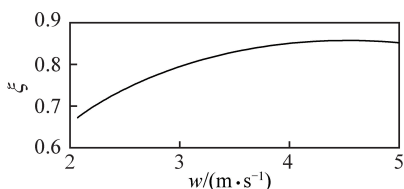
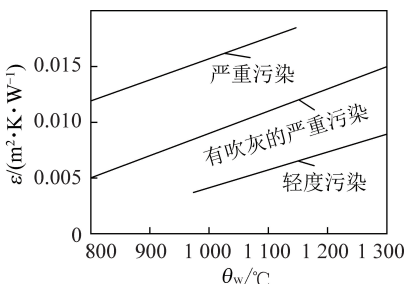
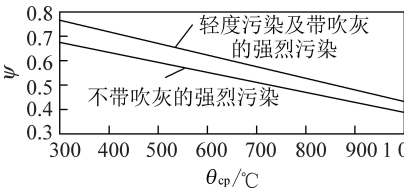
相较苏联 1973 版热力计算标准,俄罗斯 1998 年标准不再采用古尔维奇炉膛传热模型中火焰黑度和炉膛黑度的概念,纠正了过去标准中对炉膛传热估计过高,从而计算所得大型电站锅炉炉膛出口烟温偏低等问题,较符合大型电站锅炉运行实际^[6]。在热力计算部分,给出约 255 个公式、36 个图表、42 个线算图,涵盖了绝大多数锅炉的燃料类型、布置形式、流程逻辑、部件结构等。

本文主要针对炉膛有效辐射层厚度、炉内系数 M 、炉膛出口烟温、炉膛出口烟窗受热面/屏后的受热面从炉膛获得的辐射热量、对流受热面的传热系数、屏过利用系数和污染系数、受热面热有效系数等 9 个主要参数在 2 个标准中进行比较(表 1、2,参考俄罗斯 1998 版和苏联 1973 版热力计算标准)。由于俄罗斯 1998 版标准并未由出版社公开出版^[7],本文将引用俄版原文献。

表 1 俄罗斯 1998 版与苏联 1973 版计算标准主要参数计算区别

项目	俄罗斯 1998 标准	苏联 1973 标准
炉膛有效辐射层厚度(包含屏)	$s = 3.6 \times \frac{V_{lt}}{F_{lq}}$	$s = \frac{3.6 V_{lt}}{F_{zylq} + F_{pqql} + F_p} \left(1 + \frac{F_p}{F_{zylq} + F_{pqql}} \frac{V_{zylt}}{V_{lt}} \right)$
系数 M	$M = M_0 (1 - 0.4 x_r) \sqrt[3]{r_v}$ $r_v = \frac{V_r^H (1 + r)}{V_{0.N_2}^H + V_{RO_2}^H}$	燃烧器切向和对冲布置: $M_0=0.46$ 燃烧器单面前墙布置: $M_0=0.42$ 高反应燃料 低反应燃料(无烟煤屑及贫煤)以及高灰分烟煤
炉膛出口烟温	$\vartheta_{lt}'' = \frac{T_a}{1 + M \widetilde{Bu}^{0.3} \left[\frac{5.67 \times 10^{-11} \psi_{pj} F_{lq} T_a^3}{\varphi B_j (Vc)_{pj}} \right]^{0.6}} - 273$	$\vartheta_{lt}'' = \frac{T_a}{M \left[\frac{4.9 \times 10^{-8} \psi_{pj} F_{lq} a_{lt} T_a^3}{\varphi B_j (Vc)_{pj}} \right]^{0.6} + 1} - 273$
炉膛出口烟窗受热面从炉膛获得辐射热量	$Q_{lckfs} = \frac{q_{lck} F_{lck} \sum x_p (1 - a)}{B_j}$	$Q_{lckfs} = Q_{rkfs} - Q_{ckfs} =$ $Q_{rkfs} - \left[\frac{Q_{rkfs} (1 - a) \varphi_m}{\beta} + \frac{4.9 \times 10^{-8} a H_{phfs} T_{pj}^4 \cdot \xi_{II}}{B_j} \right]$
在毗邻炉膛出口烟窗屏后布置的受热面从炉膛获得的辐射热量	$Q_{phfs} = \frac{q_{lck} F_{lck} \left[1 - \sum x_p (1 - a) \right]}{B_j}$	$Q_{phfs} = Q_{ckfs} - Q_{phckfs} =$ $Q_{ckfs} - \left[Q_{ckfs} (1 - a) \varphi_m + \frac{4.9 \times 10^{-8} a H_{phfs} T_{pj}^4 \xi}{B_j} \right]$

续表

项目	俄罗斯 1998 标准	苏联 1973 标准
屏式过热器利用系数选取	<p>按过热器所处位置确定</p> 	<p>按屏过烟气速度查图</p> 
屏式过热器污染系数选取	<p>与燃料污染特性、锅炉额定负荷时屏前烟温、是否吹灰有关</p> 	<p>低负荷下, 各受热面的污染系数和热有效系数与额定负荷下相同</p> <p>与燃料性质、烟道中烟气的平均温度、是否吹灰有关, 查文献[3]图 7-9 得到</p>
受热面热有效系数选取	<p>与燃料污染特性、锅炉额定负荷下管束平均烟温、是否吹灰有关</p> 	<p>低负荷下, 各受热面的污染系数和热有效系数与额定负荷下相同</p> <p>与燃料性质、是否吹灰有关, 查文献[3]表 7-1 得到</p>

注: s 为炉膛有效辐射层厚度, m ; V_{lt} 为炉膛容积, m^3 ; F_{lq} 为炉墙面积, m^2 ; F_{zylq} 为自由容积的炉墙面积, m^2 ; F_{pqlq} 为从属于屏的炉墙面积, m^2 ; F_p 为屏的面积, m^2 ; V_{zylt} 为与屏无关的那部分炉膛容积, m^3 ; M 为考虑燃烧器布置相对标高、炉内烟气中惰性成分含量及其他因素对换热强度影响的参数; M_0 为系数; x_r 为炉膛内燃烧器布置的相对标高; r_v 为炉内烟气惰性成分参数; V_r^H 为不计再循环时, 炉膛出口烟气体积, m^3/m^3 ; r 为再循环系数; V_{0,N_2}^H 为氮的理论容积, m^3/m^3 ; $V_{RO_2}^H$ 为三原子气体容积, m^3/m^3 ; θ_w' 为炉膛出口烟气温, $^{\circ}C$; T_a 为燃料绝热燃烧温度, K ; \widetilde{Bu} 为布格耳准则的有效值; ψ_{pj} 为水冷壁热有效系数的平均值; φ 为保热系数; B_j 为计算燃料消耗量, kg/s ; $(Vc)_{pj}$ 为 $1\text{ kg}(1\text{ m}^3)$ 燃料的燃烧产物在 $(T_a - T_w')$ 温度区间内总的平均比热容, $kJ/(kg \cdot K)$; a_{lt} 为炉膛黑度; Q_{licks} 为毗邻炉膛出口烟窗的受热面从炉膛获得的辐射热量, kJ/kg ; q_{lick} 为炉膛出口烟窗处受热面的热负荷, kW/m^2 ; F_{lick} 为炉膛出口烟窗面积, m^2 ; $\sum x_p$ 为受热面角系数的总和; a 为屏容积的黑度; Q_{ckfs} 为屏入口断面所吸收的辐射热量, kJ/kg ; Q_{ckfs} 为从炉膛和屏辐射到布置于屏后的受热面上的热量, kJ/kg ; φ_m 为屏入口断面对出口断面的角系数; β 为系数; H_{phfs} 为布置在屏后管簇的辐射受热面积, m^2 ; T_{pj} 为屏间烟气平均温度, K ; ξ_{II} 为燃料种类修正系数; Q_{phfs} 为在毗邻炉膛出口烟窗的屏后布置的受热面从炉膛获得的辐射热量, kJ/kg ; Q_{phckfs} 为辐射到布置于后面受热面上的热量, kJ/kg ; ξ 为利用系数; θ_w' 为锅炉额定负荷时屏前的烟温, $^{\circ}C$; θ_{cp} 为锅炉额定负荷下管束平均烟温, $^{\circ}C$; w 为烟气速度, m/s ; ε 为屏式过热器污染系数, $m^2 \cdot K/W$; Q_w 为锅炉额定负荷时屏前烟温, $^{\circ}C$; ψ 为受热面有效系数; θ_{cp} 为锅炉额定负荷下管束平均烟温, $^{\circ}C$ 。

2 两版热力计算标准的算例对比

2.1 对流受热面传热性能计算

锅炉机组热力计算流程包含信息采集、燃料分析、燃料计算、几何尺寸计算、热平衡计算、炉内换热计算、受热面吸热计算、出具报告书等任务, 各任务环节可划分为相对独立的业务模块, 组成热力计算

顶层数据流程如图 1 所示。

2.2 950 t/h 超临界压力直流炉算例对比

苏联 1973 版热力计算标准中提供蒸发量为 950 t/h 的超临界压力直流锅炉例题^[3], 本文在此基础上采用俄罗斯 1998 版算法进行计算对比, 主要对炉膛出口、一级屏出口、二级屏出口、转向室出口、高温再热器出口烟温关键参数进行计算, 对比见表 3。

表 2 俄罗斯 1998 版与苏联 1973 版计算标准中对流受热面传热系数 k 计算区别 (固体燃料)

受热面	俄罗斯 1998 标准	苏联 1973 标准	
屏式过热器	膜式屏: $\frac{\alpha_{1\pi p}}{1 + \left(1 + \frac{Q_f}{Q}\right) \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \frac{H}{H_{BH}}\right) \alpha_{1\pi p}}$ 光管屏: 同右 (苏联 1973 标准)	$\frac{\alpha_1}{1 + \left(1 + \frac{Q_f}{Q}\right) \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \alpha_1}$	
过热器	错列	由炉膛获得直接辐射: $\frac{\psi \alpha_1}{1 + \left(1 + \frac{Q_f}{Q}\right) \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$	$\frac{\alpha_1}{1 + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \alpha_1}$
	顺列	未从炉膛获得直接辐射: $\frac{\psi \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$	$\frac{\psi \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$
省煤器和蒸发受热面	错列	$\psi \alpha_1$	$\frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon \alpha_1}$
	顺列	$\psi \alpha_1$	$\psi \alpha_1$
锅炉管束和凝渣管	由炉膛获得直接辐射: $\frac{\psi \alpha_1}{1 + \left(1 + \frac{Q_f}{Q}\right) \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$	$\psi \alpha_1$	
	未从炉膛获得直接辐射: $\frac{\psi \alpha_1}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$	$\psi \alpha_1$	

注: $\alpha_{1\pi p}$ 为膜式屏的折算放热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; Q_f 为从炉膛获得的辐射热量, kJ/kg ; Q 为由烟气对流和管间辐射传热的热量, kJ/kg ; α_2 为管壁对受热介质的放热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; $\frac{H}{H_{BH}}$ 为肋化侧的总面积与管子内侧总面积的比值; α_1 为烟气对屏的计算受热面的放热系数, $kJ/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$ 。

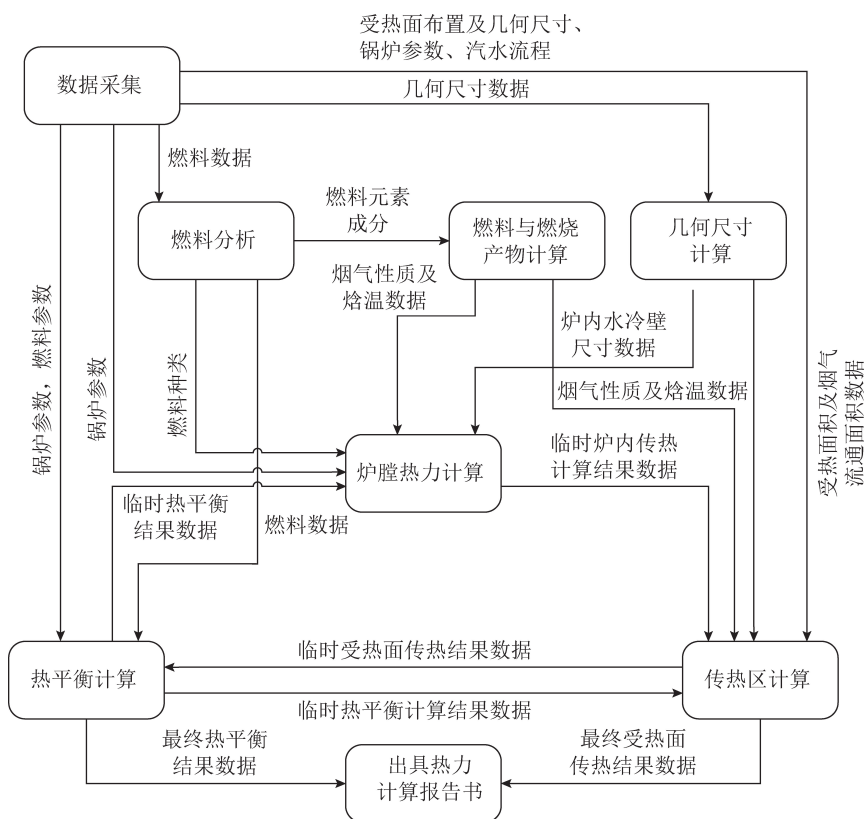


图 1 锅炉机组热力计算顶层数据流图

表 3 950 t/h 超临界直流炉各受热面出口烟温计算

℃

项目	炉膛	一级屏	后墙引出管	二级屏	转向室	高温再热器
苏联 1973 标准	1 220	1 012	—	922	853	757
俄罗斯 1998 标准	1 250	1 096	1 086.8	1 003	921	825.9
1998 版-1973 版差值	+30	+84	—	+81	+68	+68.9

由表 3 可知,针对 950 t/h 机组俄罗斯 1998 版标准计算得到的炉膛出口烟温高于苏联 1973 版标准近 30 ℃,过去标准对炉膛传热估计过高,若持续用于目前 600、1 000 MW 大型锅炉,偏差更大,不符合机组运行实际。

3 俄罗斯 1998 版计算方法实例分析

目前各发电企业或科技公司进行机组灵活性改造前,选用一种可靠的热力计算方法对改造方案实施效果预判。为验证俄罗斯 1998 版热力计算标准用于大型煤粉锅炉机组的可靠性,本文结合工程测试案例,先采用俄罗斯 1998 版热力计算标准算法进行计算分析,然后将计算结果与电厂性能试验数据或锅炉设计数据作对比,通过分析计算误差以验证

算法的准确可靠性。

本文采用基于俄罗斯 1998 版热力计算标准、自主研发的“锅炉机组热力性能分析计算软件 Burview ©”进行系统建模计算,系统相关详情参见文献[6]。

本文结合 3 个不同电厂工程项目数据,涵盖国内典型锅炉机组结构,具体包括:300、660、1 000 MW 不同机组容量;亚临界、超临界、超超临界不同蒸汽压力类型;Π 型炉、塔式炉不同炉型,以供参考。

3.1 某电厂 1 000 MW 超超临界塔式锅炉机组

该机组为 2 955 t/h 超超临界直流塔式炉,四角切圆燃烧、三分仓空气预热器。本文针对机组 BMCR 负荷、设计煤质下进行热力计算测试。其中,煤质数据和主要热力性能参数见表 4、5,计算对比数据见表 6。

表 4 1 000 MW 超超临界塔式锅炉煤质分析

工业分析/%				元素分析/%			$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
M_{ar}	A_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
14.00	12.00	61.45	3.61	7.80	0.71	0.43	23.42

表 5 1 000 MW 超超临界塔式锅炉主要参数

项目	数值
主蒸汽流量/($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	2 955
主蒸汽出口压力/MPa	27.9
主蒸汽出口温度/℃	605
给水温度/℃	297
给水压力/MPa	32.2
再热蒸汽流量/($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	2 443
再热蒸汽进口温度/℃	367
再热蒸汽出口温度/℃	603
再热蒸汽进口压力/MPa	6.2
再热蒸汽出口压力/MPa	6.03

表 6 1 000 MW 超超临界塔式锅炉热力计算对比

项目	计算结果	现场数据	相对误差
锅炉效率/%	93.87	93.72	0.16
排烟温度/℃	128.10	127.00	0.86
计算燃料消耗量/($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	353.8	355.00	0.34
过热器减温水量/($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	176.0	177.2	0.68
蒸汽出口温度/℃	607.80	605.00	0.46
炉膛出口烟温/℃	1 274.1	—	—
容积热负荷/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$)	86.70	86.5	0.23
断面热负荷/($\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}$)	4.99	4.98	0.20

3.2 某电厂 660 MW 超临界 Π 型双烟道锅炉机组

该机组 DG2150/25.4-Π 6 直流 Π 型锅炉,对冲燃烧方式、一次再热、双烟道,中速磨直吹式制粉系统。针对机组 BMCR 负荷、设计煤质下进行热力计算测试。其中,煤质数据和主要热力性能参数见表 7、8,计算对比数据见表 9。

3.3 某电厂 300 MW 亚临界 Π 型锅炉机组

该机组 HG-1025/18.2-YM6 亚临界控制循环汽包炉,四角切圆燃烧,一次再热,三分仓空气预热器,正压直吹式制粉系统。针对机组实际蒸发量

904.4 t/h 负荷及运行煤种下进行热力计算测试。其中,煤质数据和主要热力性能参数见表 10、11,计算对比数据见表 12。

3.4 测试

通过上述 3 个不同电厂锅炉热力计算结果与电厂设计数据或试验报告数据对比,可知锅炉效率最大相对误差为 0.16%;蒸汽出口温度最大相对误差为 0.46%;排烟温度最大相对误差为 0.86%;过热器减温水量最大相对误差为 2.93%。由俄罗斯 1998 版

表7 660 MW 超临界 II 型锅炉煤质分析

工业分析/%		元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/(MJ \cdot kg^{-1})$
M_{ar}	A_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
7.70	19.66	58.86	3.76	8.43	0.56	1.03	22.83

表8 660 MW 超临界 II 型锅炉主要参数

项目	数值
主蒸汽流量/($t \cdot h^{-1}$)	2 150
主蒸汽出口压力/MPa	25.4
主蒸汽出口温度/°C	571
给水温度/°C	280
给水压力/MPa	29.8
再热蒸汽流量/($t \cdot h^{-1}$)	1 804.7
再热蒸汽进口温度/°C	316
再热蒸汽出口温度/°C	569
再热蒸汽进口压力/MPa	4.43
再热蒸汽出口压力/MPa	4.2

表9 660 MW 超临界 II 型锅炉热力计算对比

项目	计算结果	现场数据	相对误差
锅炉效率/%	93.60	93.55	0.05
排烟温度/°C	118.90	119.00	0.08
计算燃料消耗量/($t \cdot h^{-1}$)	264.4	266.07	0.48
过热器减温水量/($t \cdot h^{-1}$)	192	192	0
蒸汽出口温度/°C	571.60	571.00	0.10
炉膛出口烟温/°C	1 173.00	1 172.00	0.08
容积热负荷/($kW \cdot m^{-3}$)	89.9	90.3	0.44
断面热负荷/($MW \cdot m^{-2}$)	4.91	4.93	0.41

表10 300 MW 亚临界 II 型锅炉煤质分析

工业分析/%		元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/(MJ \cdot kg^{-1})$
M_{ar}	A_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
13.70	12.29	61.37	3.62	7.82	0.71	0.49	22.95

表11 300 MW 亚临界 II 型锅炉主要参数

项目	数值
主蒸汽流量/($t \cdot h^{-1}$)	904.4
主蒸汽出口压力/MPa	16.5
主蒸汽出口温度/°C	540.8
给水温度/°C	274.7
给水压力/MPa	18.45
再热蒸汽流量/($t \cdot h^{-1}$)	737.75
再热蒸汽进口温度/°C	337.5
再热蒸汽出口温度/°C	538.8
再热蒸汽进口压力/MPa	3.42
再热蒸汽出口压力/MPa	3.07

表12 300 MW 亚临界 II 型锅炉计算对比

项目	计算结果	对比数据	相对误差
锅炉效率/%	93.68	93.66	0.02
排烟温度/°C	139.80	139.70	0.07
计算燃料消耗量/($t \cdot h^{-1}$)	112.3	—	—
过热器减温水量/($t \cdot h^{-1}$)	23.90	24.60	2.93
蒸汽出口温度/°C	540.8	540.8	0

注:该电厂运行数据没有炉膛出口烟温、容积热负荷、断面热负荷参数。

锅炉热力计算标准得到的数据较贴近现场实际情况,满足工程需要。

利用此标准进行实际机组计算过程中,存在许多源于实践总结的半经验性方法和公式,一些重要设计参数也需由设计人员依据工程经验选取,在工程项目计算中,需针对实际情况确定参数取值,其准确性依赖计算经验,易出现误差。

4 结 论

1)俄罗斯 1998 年锅炉热力计算标准相较苏联 1973 年标准,炉膛计算修改较大,炉膛出口烟温完全不同,对大型电站锅炉提高了炉膛出口烟温;而对流受热面方面主要增加了膜式管、H 型鳍片管等增强传热受热面的热力计算。

2)通过 3 个不同电厂锅炉热力计算对比分析案例,采用俄罗斯 1998 版标准计算得到的性能数据较贴合现场实际运行数据。其中,热有效系数、污染系数等经验参数热力计算标准中虽有推荐,但无法完全照搬到工程实际中,需依靠经验积累、不断修正。

3)我国没有电站锅炉热力计算标准,引进的西方国家火力发电计算方法不能得到源程序,目前国内大学锅炉教材和部分论文中有西方算法介绍,尚

不能作为开发软件的借鉴和参考,俄罗斯 1998 版锅炉热力计算标准算法较齐全,可为火电机组灵活性改造前技术方案可行性分析提供依据。

参考文献:

- [1] 张斐.平凉电厂 300 MW 机组灵活性改造研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
- [2] 朱文兵.高炉煤气锅炉炉膛热力计算两种标准对比研究[J].工业锅炉,2018,34(2):60-62.
- [3] 全苏热工研究所.锅炉机组热力计算标准方法[M].北京锅炉厂译.北京:机械工业出版社,1976:203.
- [4] 蒋欢春,黄新,卞韶帅,等.浅谈锅炉热力校核计算在火电机组经济性定量分析中的应用[J].中国设备工程,2019,35(10):168-169.
- [5] 李伟,王雅琴.关于电站锅炉几种热力计算标准的研究[J].现代电力,2001,18(1):8-14.
- [6] 石书雨,李志,赵超,等.超超临界二次再热锅炉热力计算系统的研发及工程应用[J].中国电力,2017,50(2):84-90.
- [7] 贾鸿祥.原苏联“锅炉机组热力计算标准方法”中炉内换热计算方法的变革与应用分析[C]//低挥发分煤的燃烧与 W 型火焰锅炉专题研讨会论文集.北京:中国电机工程学会,2001:255-274.