

垃圾焚烧锅炉最佳适用主蒸汽参数的探讨

段盼巧 白良成

(中国城市环境卫生协会, 北京 100044)

[摘要] 提高生活垃圾焚烧锅炉的主蒸汽参数可提高热力系统循环效率。本文基于朗肯循环、理论循环热效率讨论循环热效率与主蒸汽参数的关系,并探讨我国锅炉主蒸汽参数系列的确定,分析提高蒸汽压等级对锅炉运行管理的影响。循环热效率随蒸汽初压增大而提高,实际运行过程中,应充分考虑提高蒸汽压等级对汽水循环倍率、循环系统类型、汽包蓄热能力、锅炉压力部件材质、汽水质量等运行管理过程造成的影响。

[关键词] 主蒸汽参数; 循环热效率; 蒸汽压力; 蒸汽温度; 影响因素

[中图分类号] X799.3

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2024)02-0077-08

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.014

0 前言

生活垃圾焚烧锅炉一般指单汽包自然循环锅炉,与一般锅炉组成结构类同,主要包括汽包、下降管、联箱、上升管及对流受热面等,对流受热面主要布置蒸发器、过热器、省煤器。省煤器布置在对流受热面低烟温区,利用烟气余热加热锅炉给水,降低排烟温度,提高锅炉效率。过热器一般由三级组成,两级之间通过减温器调节前一级过热蒸汽的温度至所需参数。汽包接受省煤器的来水,组成水循环回路。下降管是水冷壁的供水管道,水冷壁下联箱把下降管与水冷壁连接在一起,起到汇集、混合、再分配工质的作用^[1]。针对垃圾焚烧锅炉的焚烧垃圾热值远低于电力常用动力煤的状况,为保证汽水循环系统安全运行,炉膛出口区域以外的内壁采用敷设耐火涂料的复合水冷壁。由于水的循环流动,在锅炉的运行中,受热面吸收的热量全部被带走,不仅使水温度升高、汽化成蒸汽,而且受热面得到良好的冷却,从而保证了

锅炉受热面在高温条件下安全工作。

自20世纪60年代成功利用生活垃圾焚烧热能至今,行业内一直在探索蒸汽参数的提高对循环热效率的影响。随着垃圾焚烧锅炉技术进步与单位规模增大,主蒸汽参数一直在不断提高。主流蒸汽参数经历了从低压等级提高到2.45 MPa次中压等级,再提高到4.0 MPa中压等级的过程,目前总焚烧规模1500 t/d及以下的项目广泛采用4.0 MPa/400℃中压等级参数。随着我国750~1000 t级垃圾焚烧锅炉的应用以及锅炉用合金材料的发展,诸多项目规模达到2000 t/d及以上,这些规模较大的项目在进行6.4 MPa次高压或更高压力等级的尝试。随着政府对垃圾焚烧发电补贴的减少、国内技术的进步及经营管理经验的逐渐成熟,垃圾焚烧发电厂更加注重通过提高主蒸汽参数,继而提高发电量来提高垃圾焚烧过程的经济效益。

本文从朗肯循环、理论循环热效率、我国锅炉主蒸汽参数系列以及提高蒸汽压等级对运行管理的影响因素几方面进行探讨分析,研究压力等级提高对循环热效率的影响规律以及规模效应的作用,同时考虑了最小经济容量评价原则。

1 蒸汽初压对理论循环热效率的作用

1.1 基于理想朗肯循环状态参数的循环热效率与蒸汽初压的关系

理想朗肯循环是垃圾焚烧发电厂蒸汽动力循环的工程理论基础。在图1所示的理想朗肯循环温熵图中,1-2表示蒸汽在汽轮机内的等熵膨胀过程,

[收稿日期] 2023-12-09

[作者简介] 段盼巧(1986—),女,硕士,高级工程师,主要从事生活垃圾焚烧工程技术研究、技术咨询、工程项目设计、工程评价等工作。

[引用格式] 段盼巧,白良成.垃圾焚烧锅炉最佳适用主蒸汽参数的探讨[J].绿色矿冶,2024,40(2):77-84.

DUAN Panqiao, BAI Liangcheng. Discussion on the best suitable main steam parameters of domestic waste incineration boilers[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(2): 77-84.

2-3 表示蒸汽在冷凝器内的等压冷却过程,3-4 表示锅炉给水在给水泵中的增压过程,4-5-6-1 表示省煤器、锅炉水冷壁与蒸发器、过热器中的等压给水加热、蒸发和蒸汽过热过程。众所周知,根据理想朗肯循环热效率公式,影响热效率的主要因素是初压初温(理想状态下的锅炉主蒸汽参数与汽轮机进汽参数等同)与终压终温状态参数。

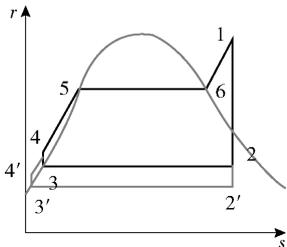


图1 朗肯循环的温熵图

热力循环过程是具有势差与耗散效应的不可逆过程。应用工程基础的基本状态函数焓 h , 通过线性关系的物质平衡与能量平衡, 取工质从热源吸收的热量 $Q_{吸}$ 与向冷源放出的热量 $Q_{放}$ 的差(对外做功 W)与 $Q_{吸}$ 之比作为重要的评价指标, 称为循环热效率, 记为 η_i 。其一般表达式见式(1)。

$$\eta_i = (Q_{吸} - Q_{放}) / Q_{吸} = W / Q_{吸} \quad (1)$$

工程上取定压比热 c_p 及热源、冷源温度 T_1 、 T_2 计算焓差, 公式为 $\Delta h = c_p (T_1 - T_2)$ 。以热力学第一、第二定律为基础, 经过理论推导, 形成适用于任何工质的卡诺循环热效率即理论循环热效率: $\eta_{ic} = 1 - T_2 / T_1$ 。

由 η_{ic} 及其推理过程可知, 在影响循环热效率的 Q 、 T 、 $c_p(p)$ 等诸参数中, 在初压一定的条件下, 循环热效率 η_i 随着初温(T_1) 提高而增大, 但提高初温要受金属材料的力学性能约束。因此, 每当提到锅炉的主蒸汽参数, 一般是指初压。在初温一定的条件下, 并在允许初压范围内, η_i 随初压提高而增大(压力影响 c_p)。本文仅就初压对循环热效率及其他运行管理过程的影响进行论述。

1.2 蒸汽初压对理想朗肯循环热效率的影响

应用循环热效率计算模型, 经过焓熵计算, 不同初压状态(4.0、5.4、6.4 及 13.4 MPa) 下的锅炉循环热效率见表 1。

表1 不同初压参数的锅炉工质吸热量、蒸发升温平均吸热温度和热效率增益

过热蒸汽				$T_2 = 40^\circ\text{C}$ 凝水		焓差与熵差		饱和水/蒸汽焓		工质吸热量占比/%			蒸发升温平均吸热温度 ΔT_8 与热效率增益 $\Delta \eta_i$				
$p_1/$ MPa	$T_1/$ $^\circ\text{C}$	$h_1/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$s_1/$ ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$)	$h_2/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$s_2/$ ($\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	$h_1 - h_2/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\Delta s/$ ($\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	$h_4/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$h_5/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	加热	蒸发	过热	$r/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$E/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$T_8/$ $^\circ\text{C}$	ΔT_8	$\Delta \eta_i/$ %
4.0	400	3 215.71	6.773 3	167.44	0.572 0	3 048.27	6.201 3	1 087.36	2 800.34	30.19	56.19	13.62	1 712.98	2 800.2	491.55	0.562 0	0.114 3
4.0	450	3 331.22	6.938 8	167.44	0.572 0	3 163.78	6.366 8	1 089.36	2 802.34	29.14	54.14	16.72	1 712.98	2 909.1	496.92	0.541 4	0.109 0
5.4	450	3 311.92	6.780 4	167.44	0.572 0	3 144.48	6.208 4	1 178.9	2 790.83	32.13	51.29	16.58	1 611.93	2 896.1	506.49	0.512 6	0.101 2
6.4	450	3 297.74	6.687 2	167.44	0.572 0	3 130.30	6.115 2	1 235.7	2 780.65	34.07	49.40	16.53	1 544.95	2 885.7	511.89	0.493 5	0.096 4
13.4	450	3 187.76	6.229 3	167.44	0.572 0	3 020.32	5.657 3	1 547.86	2 667.83	45.64	37.13	17.24	1 119.97	2 794.0	533.88	0.370 8	0.069 5

注:1) T_8 是我国动力工程先驱陈大燮教授提出的等效初温概念;2) h 代表焓值; s 代表熵值; r 代表汽化潜热; E 为中间状态参数, $E = h_1 - h_3 - T_2(s_1 - s_3)$ 。

由表 1 可知, 一方面理想循环热效率随着初压 p_1 的提高而增大, 另一方面随着平均吸热温度 T_8 增加, 循环热效率增益 $\Delta \eta_i$ 递减, 且是不成比例变化的。

表 1 显示了理想状态下不同压力等级对理想循环热效率的影响。实际应用中受到循环热量系统各种损失的影响, 如汽轮机内会产生喷嘴损失、动叶损失、余速损失、端部损失、扇形损失、叶轮摩擦损失、部分进汽损失、漏汽损失及湿汽损失, 故而理想焓降不能全部转换为有用功, 所能获得的效益低于理想状态的效益。

一般地, 当初压高、机组进口蒸汽容积流量减小时, 进汽流动损失、泄漏损失会对 η_i 产生明显的影

响。另从级间损失、热损失两项考虑, 蒸汽压力越高, 这两项损失的比例会越来越大。由此可知, 蒸汽压力上升, 循环热效率上升但不会是线性关系。特别是对于小功率机组, 蒸汽容积流量偏小时, 热效率下降愈明显, 甚至可能超过采用高蒸汽参数带来的循环热效率提高的效益, 所以较高蒸汽参数总是与较大的机组功率联系在一起的。

实际应用中, 初压提高, 不但对材料的力学性能有更高要求, 而且因汽轮机做功过程后的出口蒸汽干度降低(一般要求大于 0.88), 对汽轮机的安全运行产生影响。对此, 可通过提高初温来提高汽轮机的出口蒸汽干度, 但温度的提高受到金属耐受温度制约。

综上所述,增大蒸汽初压是提高循环热效率从而提高经济性的一般途径,随着蒸汽初压增大,理想热效率提高,但不是按比例增加,过程中伴随各种损失,表现为理想循环热效率增长幅度递减。

2 垃圾焚烧锅炉主蒸汽参数的确定

垃圾焚烧锅炉主蒸汽参数的确定遵循锅炉燃烧机理和传热、热效率与汽水循环等工程理论,需要符合我国锅炉主蒸汽压力等级划分,以及锅炉安全技

术监察规程的一般规定。

2.1 我国锅炉主蒸汽参数系列

综合多项技术经济因素确定优先采用的蒸汽初始压力等级,是火电厂设备标准化、系列化的重要内容。我国电站锅炉蒸汽参数系列^[2]见表2,汽轮机新蒸汽参数系列^[3]见表3,包括适用于非再热式机组的低压、次中压、中压、次高压、高压的压力等级和适用于再热式机组的超高压、亚临界、超临界、超超临界的压力等级。

表2 电站锅炉蒸汽参数系列

类别	机组压力类别			锅炉蒸汽额定参数基本系列					给水温度参考值*		
	类别	压力范围/ MPa	温度范围/ ℃	过热蒸汽		再热汽 温度/ ℃	额定蒸汽允许偏差		机组功率/ MW	给水温度/ ℃	
				压力/ MPa	温度/ ℃		过热蒸汽 温度/℃	再热汽温 度/℃			
非再热式	低压	1.27 ~ 1.57	350				+20/ -20				
	次中压	1.96 ~ 2.45	400				+10/ -20				
	中压	2.45 ~ 5.88	450	3.8	440				6.12/25	150/170	
	次高压	5.29 ~ 6.29	450 ~ 485	5.3	440/475		+10/ -5		6/12/25	140/150/170	
	高压	6.29 ~ 13.72	510, 540	9.8	540		+5/ -10		50/100	220	
再热式	超高压	13.72 ~ 15.68	555	13.7	540	540			+5/ -10	200	240
	亚临界	16 ~ 18	535 ~ 565	17.5	543	543				300/600	278
	超临界	22.064 ~ 26	560	25.4	571	569				900	275
	超超临界	≥31 (26)	580 (600)	26.15/27.46	605	603				1 000	300

注: * 给水温度额定值偏差推荐为 ±10%。

表3 汽轮机新蒸汽参数系列

类别	新蒸汽压力/MPa	新蒸汽温度/℃	推荐新蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	凝汽机组额定功率/阀门全开新蒸汽		机组额定功率/MW	
				大致流量/(MW/(t·h ⁻¹))		基本系列	补充系列
非再热式机组	低压	1.28	340	5 ~ 10	0.75/5、1/10		
	次中压	2.35	390	10 ~ 20	1.5/10、3/20		
	中压	3.43	435/450/475	20 ~ 120	3/20、6/40、12/70、20/100、25/120		6、12、25、
	次高压	4.90	435/450/475	30 ~ 150	6/30、12/65、20/90、25/110、35/150		50、100
	高压	8.8	535	100 ~ 410	25/100、35/140、50/210、100/410		
再热式机组	超高压		535/535				
		12.7	537/537	400 ~ 670	125/400、150/480、200/670		
		13.2	538/538				
	亚临界		540/540				
			535/535				200、300、
		16.7	537/537	800 ~ 2500	250/800、300/1025、330/1018(电动给水泵)		600、900、
超临界	17.8	538/538		600/2020、700/2350		1 000	
		540/540					
	24.2	538/566 566/566	1 500 ~ 4 000	600/2 000、700/2 300、800/2 600、1 000/3 300			

2.2 垃圾焚烧锅炉主蒸汽参数的确定

垃圾焚烧锅炉被纳入《电站锅炉蒸汽参数系列》(GB/T 753—2012),可理解为垃圾焚烧锅炉与垃圾焚烧热力系统同样遵循工程热力过程的朗肯循环和循环热效率准则,但主蒸汽参数“与配套汽轮机的容量和参数相匹配”的要求不适用于作为一类特种锅炉的垃圾焚烧锅炉。这是因为垃圾焚烧锅炉与一般锅炉最大区别在于应用目的不同,一般锅炉是消耗资源燃料获取所需热能,而垃圾焚烧锅炉是以焚烧处理垃圾为基本目的,相应需要根据垃圾理化特性和垃圾热值确定垃圾焚烧锅炉的设计最大负荷及其允许变化范围,并由此确定汽轮机的容量和

主蒸汽参数。故在充分考虑上述特定原则下,电站锅炉蒸汽参数系列可作为垃圾焚烧锅炉确定蒸汽参数的参考。

我国部分实行规范化运行管理的主蒸汽全部用于冷凝机发电项目的垃圾焚烧发电厂运行数据见表4。我国当前城市焚烧项目规模集中在1 000~2 500 t/d,800 t/d及以下被视为小规模项目,3 000 t/d及以上视为超大规模项目。从表4中可看出,主蒸汽参数与锅炉给水温度以4.0 MPa/400℃/130℃为主;近些年具有一定规模的新建厂的主蒸汽参数多采用6.4 MPa次高压等级。

表4 我国部分垃圾焚烧发电厂运行状态

序号	垃圾焚烧处理规模/(t·d ⁻¹)	机组配置/MW	主蒸汽与给水参数/(MPa/℃/℃)	计算焚烧垃圾热值/(kJ·kg ⁻¹)	统计期焚烧垃圾量/(t·a ⁻¹)	年利用时间/h	负荷率/%	利用小时总产汽量/(t·h ⁻¹)	蒸汽损耗/%	单位焚烧垃圾发电量/(kW·h·t ⁻¹)
1	3×400	2×15	4.0/400/130	7 200	434 193	8 683.9	1.026	118.19	4.07	466.64
2	3×450	1×25	4.0/400/130	8 400	493 698	8 776.9	1.081	132.82	4.40	498.54
3	3×500	2×18	4.0/400/130	8 750	523 281	8 372.5	1.017	161.15	6.27	516.38
4	2×500	1×22	6.4/450/130	7 100	344 485	8 267.6	0.974	86.17	2.92	414.75
5	2×600	1×18	4.0/450/130	7 500	385 545	7 556.6	0.952	120.16	4.60	472.64
6	4×600	2×18+1×12	4.0/400/130	7 790	804 181	8 041.8	0.977	230.36	1.00	459.88
7	2×750	2×18	4.0/405/130	7 700	515 463	8 247.4	0.971	145.85	0.56	500.18
8	3×750	2×25	4.0/400/130	7 300	748 217	7 981.0	0.962	199.89	0.92	468.26
9	4×750	2×30	3.8/400/130	8 009	895 569	7 164.6	0.884	289.05	5.26	491.56
10	3×750	2×CN30	6.4/450/130	7 780	753 734	8 039.8	0.981	209.29	0.81	553.12
11	3×750	2×C26	6.4/485/130	7 300	715 968	7 967.3	0.959	176.64	4.24	550.89
12	4×750	2×30	4.0/400/130	8 570	795 228	8 127.7	0.902	245.14	2.48	516.95

表4的数据表明,垃圾焚烧发电厂年利用时间为7 100~9 100 h,焚烧锅炉负荷率在0.80~1.08,据此推算焚烧垃圾热值为6 800~8 750 kJ/kg。这些采用中压与次高压等级并处于正常运行状态的焚烧厂,目前运行工况尚未达到预期效果,并且差别不明显。为了对比分析垃圾焚烧发电厂的热能利用工况,本文取热值12 500 kJ/kg的垃圾作为标准垃圾,相应当量发电量记为 N_{deg} 。另取单位焚烧垃圾发电量 N_1 ,则实际运行单台处理规模 D_1 与产汽量 Q_1 的分档分析见表5。

从目前垃圾焚烧规模考虑,根据锅炉主蒸汽参数系列,单元制系统适合采用中压等级参数,母管制系统则适合采用中压、次高压及高压等级参数。另外,对采用高压及以下参数的项目,适宜采用非再热

表5 当前的能量利用分档分析

序号	单台处理规模 D_1 /(t·d ⁻¹)	产汽量 Q_1 /(t·h ⁻¹)	单位垃圾焚烧发电量 N_1 /(kW·h·t ⁻¹)	当量发电量 N_{deg} /(kW·h·t ⁻¹)
1	350~400	31~39	404~500	221~314
2	450~500	42~46	400~516	198~314
3	600~650	53~67	410~509	243~333
4	750~800	72~74	468~535	273~349

式机组。

对比上述各焚烧厂的运行工况可知,影响单位焚烧垃圾发电量的循环热效率应是循环热力系统诸多因素共同作用的结果,不能单纯归结为主蒸汽参数的作用。

另从实际运行工况看,进入循环热力系统的蒸

汽参数、流量和冷凝器真空的变化,将引起各级压力、温度、焓降、效率等参数变化,特别是机组反动度、轴向推力等参数发生变化,会影响焚烧锅炉的安全、经济运行。所以在日常运行中,应认真监督汽轮机初、终参数的变化。

2.3 最小经济容量原则

提高蒸汽初压获得最大化经济效益应是通过最小经济容量体现出来,这也是选择压力等级的基本原则。所谓最小经济容量是指综合焚烧垃圾特性、处理规模、适宜技术、生态环境、设备质量、系统安全可靠、热能利用效率、运行维护与工程实践经验等因素,取得最佳适宜经济指标的评价原则。

3 提高蒸汽压力等级对锅炉运行管理的影响

3.1 蒸汽压力等级对汽水循环倍率的影响

层燃型锅炉的自然循环回路是以下联箱中截面为界,下降管是水冷壁的供水管道,上升管(水冷壁)吸收炉膛内辐射热产生的汽水混合物,其密度(ρ''_h)小于下降管内炉水密度(ρ'),两者的密度差随初压 p_1 增大而减小,如4.0 MPa、6.4 MPa、13.4 MPa的 ρ''_h/ρ' 分别是20.10/798.72、33.08/750.75、79.66/631.31。因此,上升管内工质汽水混合物的静压力小于下降管工质水静压力。重力差($\Delta\rho g = \rho'g - \rho''_hg$)是克服系统阻力、推动工质在自然循环回

路中流动的驱动力。在自然循环中,炉水需要经过几次循环流动才能完全转变为干饱和蒸汽。工程上用汽水循环倍率 K 作为衡量锅炉水循环可靠性的指标。汽水循环倍率 K 是指进入水冷壁的循环水量与蒸汽量两相介质的总质量 G (注:这里是指循环水带汽工况,需尽可能减少蒸汽量,当不带汽时 G 等于循环水量)与其中的蒸汽量 D'' 之比,即 $K = G/D''$ 。

在下降管与上升管截面比、结构一定的条件下,随着热负荷增大,开始时循环流速随之增高,汽水循环倍率 K 增大,表现出自补偿能力;但当热负荷增加到一定程度时,则循环流速增加缓慢,甚至不再增加,汽水循环倍率 K 不再增大,锅炉也就失去自补偿能力;如热负荷继续增大, K 反而减小。

对于自然循环锅炉,通常压力等级越低,采用的汽水循环倍率越高(表6),这是因为中、高压等级锅炉受水冷壁积盐限制,要求汽水循环倍率必须足够大,并保证在50%~100%额定蒸汽负荷下的水循环安全可靠。采用高汽水循环倍率,具有上升管出口含汽率不高、可避免沸腾换热恶化、水冷壁冷却条件较好以及循环水量大的特点。超高压、亚临界压力条件下,从避免膜态沸腾方面考虑限制的最小循环倍率见表6。在运行管理中需要注意不同压力等级下的汽水系统运行特点。

表6 自然循环锅炉的推荐循环倍率

项目	自然循环锅炉参数			强制循环锅炉
汽包压力/MPa	4~6	10~12	14~16	—
锅炉蒸发量/(t·h ⁻¹)	35~240	160~420	185~670	—
上升管内径(推荐)/mm	36~54	35~50	34~48	
上升管外径(推荐)/mm	42~60	42~60	42~60	
下降管入口流速(推荐)/(m·s ⁻¹)	≤3	≤3.5	≤3.5	
界限循环倍率	10	5	3	
推荐循环倍率	15~25	8~15	5~8	3~5

3.2 蒸汽压力等级对循环系统类型的影响

从电站锅炉蒸汽参数系列来看,推荐高压及以下压力等级采用非再热循环系统,对于13.7 MPa超高压及以上等级的热力循环系统,建议采用中间再热式循环系统。所谓中间再热是指将汽轮机高压缸中做过功的一部分蒸汽返回锅炉再热器,经对流换热再加热升温后再送入汽轮机中压缸继续膨胀做功。我国火电厂应用中间再热循环系统的经验显示,再热器的应用可提高综合循环热效率4%~

5%,低于理论值6%~8%。

热力循环系统提高蒸汽初压和降低排汽压力,会使汽轮机的排汽湿度加大,这不仅降低汽轮机的相对内效率,而且低压缸内湿蒸汽中的水滴冲蚀汽轮机叶片,危及叶片的安全。采用蒸汽再热是提高蒸汽干度、控制汽轮机排汽湿度的一项有效措施。只要中间再热参数选择合适,会进一步提高初压和热经济性。

为避开锅炉高温腐蚀活跃区,防止过热器超温

影响安全运行,以及欠温影响循环效率,要求维持蒸汽温度稳定且进入对流受热面时不高于 650 ℃,相应主蒸汽温度采用 400 ~ 450 ℃,这就意味着垃圾焚烧锅炉处在相对较低温度换热状态,受热面要大于同容量、同等参数的普通锅炉。另外,增加中间再热循环系统还会存在一些负面影响,一般推荐 200 MW 及以上超高压等级机组采用中间再热循环系统。基于以上因素,现代垃圾焚烧锅炉通常只设置对流式过热器,采用压力 4.0 ~ 6.29 MPa、压降不超过 10% 的中压、次高压非再热式锅炉。在缺乏可接受的安全可靠性能条件下,不推荐采用超高压再热式锅炉。

3.3 主蒸汽压力等级对汽包蓄热能力的影响

随着压力等级提高,锅炉汽包水侧的蓄热能力降低,汽侧和有效金属蓄热能力增加^[4](表 7);自然循环锅炉的蓄热能力减低,压力最大变动速度增加(表 8)。

表 7 不同压力等级锅炉的汽包蓄热能力所占比例

参数	水蓄热能力/ %	汽蓄热能力/ %	有效金属蓄热 能力/%
高压和超高压	60	10	30
中压	80	5	15
低压	85	3	12

3.4 压力等级提高对锅炉压力部件的影响

金属材料在特定温度下有其特定的金属材料屈服强度,超压力运行会导致金属材料的热疲劳,一旦

超出疲劳极限,将导致屈服强度下降;当突破屈服极限,金属材料会发生快速蠕变直至爆裂。主蒸汽压力等级提高时,金属材料的强度在特定条件下可以通过增加金属的壁厚得到补偿,但壁厚的增加会使内外壁温差增大,传热速度降低,导致金属材料热应力增大聚集。

表 8 自然循环锅炉的蓄热能力和压力最大变动速度的近似值

汽包 压力/MPa	蓄热能力/ [kg·h·(MPa·t) ⁻¹]	压力变动最大 速度/(MPa·s ⁻¹)	压力变动最大 相对速度/s ⁻¹
1.4	70	0.003	0.002
4.4	11	0.025	0.005 5
11	4.5 ~ 5	0.05	0.004 5

3.4.1 不同压力等级对锅炉材质的要求

垃圾焚烧锅炉不同承压部件的材质应根据其对压力、腐蚀、温度等综合因素的适应性来确定,并形成标准。表 9 是某锅炉制造厂单台规模 750 t/d、垃圾热值 7 120 kJ/kg 条件下的锅炉采用的材质。汽包、水冷壁、省煤器与 I 级过热器的材质按我国锅炉设计制造标准选用;中压等级锅炉的 II、III 级过热器采用如 15Mo3 等低合金钢或 SUS301、TP310S 等奥氏体不锈钢;次高压锅炉的 II、III 级过热器在材质相同的情况下,需要增加表面金属涂层,以改善基体材料表面耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化特性。

表 9 不同蒸汽参数锅炉材质比较

序号	项目	4 MPa/400 ℃		6.4 MPa/450 ℃	
		材质类型	单台质量/t	材质类型	单台质量/t
1	汽包	16Mng	40	19Mn6	60
2	水冷壁、省煤器等	20 g	380	20 g	410
3	I 级过热器	20 g	80	20 g 和 15CrMog	120
4	II、III 级过热器	15Mo3、TP310S、SUS301 等	40	15Mo3、TP310S、SUS301 等,并采用金属涂层	40
5	非受压件(钢架/平台扶梯/护板/吊挂/灰斗等)	碳素结构钢	950	碳素结构钢	970
	合计		1 490		1 600

从金属材料视角,蒸汽温度 450 ℃ 是锅炉的重要温度节点^[5]。

3.4.2 不同压力等级对锅炉省煤器的影响

任何负荷下,垃圾焚烧锅炉省煤器出口的给水都是按汽包压力下的饱和温度进入汽包。省煤器蛇

形管中水的流速受到传热与管内壁金属腐蚀性能的影响,设计质量流速为 600 ~ 800 kg/m²·s,非沸腾部分工质流速不小于 0.3 m/s,沸腾部分大于 1 m/s。省煤器入口给水温度采用 130 ℃ 或 140 ℃。中压锅炉省煤器水阻力要不大于汽包压力的 8%,高压锅

炉不大于5%。

3.5 压力等级对锅炉汽水品质的要求

垃圾焚烧锅炉的蒸汽参数和蒸汽品质是保证锅炉安全和经济运行的重要指标。垃圾焚烧锅炉运行中要求蒸汽压力和温度、蒸汽中杂质含量等必须稳定在许可偏离范围内。由相关标准可知,垃圾焚烧锅炉的蒸汽品质必须要符合相应压力等级的要求。

蒸汽杂质主要包括 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 NH_3 等气态杂质,同时包括钠盐、 SiO_2 等多种盐类以及铁、铜等在内的非气态杂质,非气态杂质也统称蒸汽含盐。除 CO_2 外的气态杂质不直接参与沉淀过程,但对金属有腐蚀作用;来自汽包的饱和蒸汽含盐可能有一部分沉积到蒸发器与过热器的管内壁上,且当硅酸在过热器等部位沉积下来后会形成很难清除的 SiO_2 ,不但影响蒸汽的流动和传热,而且会提高管壁温度。

蒸汽含盐量随着压力升高而加大,这些盐分会使水冷壁管、烟管、锅筒等受热面结垢、过热、起泡、堵塞以致爆管的可能性加大,严重影响设备的安全运行。蒸汽含盐进入汽轮机机会使汽轮机叶片型线改变,通流面积减小,内效率降低,严重影响传热。

为保证垃圾焚烧锅炉安全、可靠运行,蒸汽的品质需要参照相应压力等级的蒸汽指标控制^[5]。蒸汽压力等级越高,对蒸汽品质的要求就越高。这是因为蒸汽压力越高,其相对体积越小,通流截面积越小,从而盐类杂质沉积造成的危害性以至破坏性也就越大。影响蒸汽品质的盐类主要是钠盐,可通过监测蒸汽中钠含量来监督蒸汽含盐量。

经过化学处理后的锅炉给水总会含有一些盐分,进入锅炉汽包后的汽水在自然循环过程中不断被蒸发浓缩,含盐量逐渐增加,甚至远超过锅炉给水的含盐量。其中大部分盐分溶解在炉水中,另一部分以结晶形式存在。当炉水含盐量过高时,不仅会使蒸汽品质恶化,而且会使汽包和蒸发受热面结垢,或形成水渣沉积到水汽循环系统的低点处,从而影响传热和水汽循环,甚至会造成受热面金属腐蚀,威胁到循环热力系统设备的安全运行。因此,需对炉水品质进行严格的化学监督与处理^[6]。

当蒸汽既携带炉水(称机械携带,取系数 ω)又携带溶解盐(称选择性携带,取系数 a)时,取总携带系数 $k(k = \omega + a)$,则蒸汽中的总含盐量($S_{\text{蒸汽}}$)与炉水含盐量 $S_{\text{炉水}}$ 的关系为: $S_{\text{蒸汽}} = k \cdot S_{\text{炉水}}$ 。

从汽水分离原理知,随着蒸汽压力提高,蒸汽与水的密度差减小并分离困难,饱和温度提高,水分子间的引力以及表面张力系数降低,从而在同样蒸汽流速下,蒸汽更容易携带水。高压等级以下的蒸汽中溶解盐含量很少,可不考虑溶盐携带问题,主要是解决汽水分离问题;高压及以上等级的锅炉中同时存在炉水含盐与蒸汽溶解硅酸盐等问题;而在超高压等级锅炉中,蒸汽除含有溶解硅酸盐外还会溶解氯化钠等盐分,要同时解决汽水分离、蒸汽机械携带与选择性携带问题。减少蒸汽溶盐含量的方法,一是提高处理工艺以降低锅炉给水的含盐量并增大排污量,二是在汽包内采用分段蒸发与蒸汽清洗等有效方法。

4 结论

循环热效率随蒸汽初压提高而增大,提高蒸汽压力是提高热经济性的重要因素,但在实际运行过程中,单位焚烧垃圾发电量应是多个因素共同作用的结果,不依赖于单一状态参数,这是由蒸汽动力循环的性质决定的。热经济性不仅与热力系统循环热效率有关,还与生产设备产生的各种损失相关。

同时在实际运行中,应充分考虑提高蒸汽压等级对汽水循环倍率、循环系统类型、汽包蓄热能力、锅炉压力部件材质、汽水质量等运行管理过程造成的影响。

[参考文献]

- [1] 白良成,徐文龙. 锅炉生活垃圾焚烧锅炉工程基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电站锅炉蒸汽参数系列:GB753—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 发电用汽轮机参数系列:GB754—2007[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [4] 陈学俊,陈听宽. 锅炉原理(第二版)[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- [5] 火力发电厂金属技术监督规程.[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量标准:GB/T12145—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.

Discussion on the Best Suitable Main Steam Parameters of Domestic Waste Incineration Boilers

DUAN Panqiao, BAI Liangcheng

(China Association of Urban Environmental Sanitation, Beijing 100044, China)

Abstract: Increasing the main steam parameters of the domestic waste incineration boiler can improve the cycle efficiency of the thermal system. Based on Rankine cycle and theoretical cycle thermal efficiency, this paper discussed the relationship between cycle thermal efficiency and main steam parameters, and discussed the determination of main steam parameters series of boilers in China, and analyzed the influence of improving steam pressure level on boiler operation management. The thermal efficiency of the steam cycle increases with the increase of the initial pressure of the steam. In the actual operation process, the influence of increasing the steam pressure level on the operation and management process such as steam-water circulation ratio, circulation system type, drum heat storage capacity, boiler pressure component material and steam-water quality should be fully considered.

Key words: main steam parameters; cycle thermal efficiency; steam pressure; steam temperature; influencing factors

(上接第 76 页)

Research on Pollution Prevention and Control of Industrial Solid Waste in Resource Exhausted Cities Under “Dual Carbon” Targets: A Case Study of Baiyin City

DONG Ziping, HAO Yanzheng

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the analysis of the current situation of solid waste pollution in Baiyin City, through data investigation and related data, this paper analyzed the current situation of the generation and disposal of general industrial solid waste and dangerous solid waste in Baiyin City, predicted the future solid waste production and utilization and disposal capacity gap, clarified the problems existing in the process of pollution prevention and control, and explored the development path and countermeasures of Baiyin City as a resource-exhausted city to achieve the goal of industrial solid waste pollution prevention and control planning under the background of carbon neutrality and carbon peak, in order to provide reference for the construction of zero-waste cities.

Key words: resource exhausted cities; industrial solid waste; hazardous solid waste; pollution control; circular economy