

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.16.014

污水处理厂污泥独立焚烧的热力计算方法解析

段妮娜, 谭学军, 张 辰

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘 要: 污泥焚烧作为城镇污水厂污泥处理的主流技术之一,在我国得到越来越多的工程化应用,现阶段我国污泥焚烧在进行工艺设计和运行情况模拟时,计算污泥(燃料)发热量、烟气组成和焓值等关键环节,多借鉴燃煤锅炉的热力计算方法。热力计算是工艺设计和工艺运行时模拟预测的基本依据,作为工艺设计过程的重要内容,其方法的修正和完善有利于提升工艺设计和运行调控的准确性和合理性。污泥焚烧与燃煤锅炉燃烧过程和控制要点均有差异,燃煤锅炉计算方法忽略了烟气中水蒸气的潜热,故采用燃煤锅炉热力计算方法的准确度有待验证。分别采用传统燃煤锅炉的热力计算方法和优化后的方法进行了计算示例比较,当采用燃煤锅炉的热力计算方法进行污泥焚烧的工艺计算时,由于未考虑烟气中水蒸气的实际状态和潜热,影响焚烧炉燃烧温度、烟气余热利用和烟气净化各环节的温度预测的精确度。我国污泥焚烧入炉含水率的常见区间为 50% ~ 60%,采用传统方法计算时,从燃烧温度到后续烟气设施对应的入口和出口温度均偏高 40 ~ 50 ℃。当采用传统方法进行设计和运行时,应结合入炉含水率的选择,充分考虑到由此引起的偏差。

关键词: 污泥焚烧; 独立焚烧; 热力计算

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)16-0083-06

Analysis of Sewage Sludge Mono-incineration Thermodynamic Calculation Method in a Sewage Treatment Plant

DUAN Ni-na, TAN Xue-jun, ZHANG Chen

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Sludge incineration, as one of the main sludge treatment technologies in urban sewage treatment plants, has been widely applied in engineering in China. At present, coal-fired boiler thermodynamic calculation method is often referred to calculate the key parameters (such as calorific value of sludge or fuel, composition of flue gas and enthalpy value) in the process of design and simulation. Thermal calculation is the basis of process design and simulation. As an important part of process design, modification and improvement of the method is beneficial to improve the accuracy and rationality of process design and management. There are differences in the incineration process and management between sewage sludge and coal incineration in coal-fired boilers. The calculation method of coal-fired boilers ignores the latent heat of water vapor in flue gas, so the accuracy of coal-fired boiler thermal calculation method needs to be verified. A comparison between the traditional thermal calculation method and the optimized thermal calculation method was exemplified. The actual state and latent heat of water vapor in flue gas were not considered when the coal-fired boiler thermal calculation method was

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1908701)

used for sludge incineration process calculation, which affected the temperature prediction accuracy of incinerator combustion, flue gas waste heat utilization and flue gas purification. Common range of sludge water content to be combusted in the furnace in China is 50% - 60%. The combustion temperature and the corresponding inlet and outlet temperature of flue gas facilities were 40 - 50 °C higher when the traditional method was employed. When the traditional method is used for design and operation, the deviation caused by calculation should be fully considered in combination with the selection of sludge water content to be combusted in the furnace.

Key words: sludge incineration; mono-incineration; thermodynamic calculation

污泥焚烧作为城镇污水处理厂污泥处理的主流技术之一,近年来在我国工程化应用越来越多,呈现出快速发展的势头。然而,现阶段我国污泥焚烧在进行工艺设计和运行情况模拟时,计算污泥(燃料)发热量、烟气组成和焓值等关键环节,多借鉴燃煤锅炉的热力计算方法,该方法实则借鉴前苏联的锅炉设计方法^[1]。在燃煤锅炉热力计算过程中,由于煤的含水率很低,烟气中水蒸气的比例较低,分压很小,且水蒸气汽化潜热得不到回收利用,故燃煤锅炉在设计和考核时通常采用低位发热量作为煤带进锅炉热量的技术依据,计算烟气焓值时将水蒸气与 N_2 、 O_2 、 CO_2 等气体一同作为理想气体考虑,没有计入水蒸气的潜热。

污泥焚烧工艺与燃煤锅炉燃烧过程具有较大差异。主要体现在以下两点:①污泥焚烧以达到特定燃烧温度为核心设计原则。污泥焚烧的首要任务是解决污泥的无害化,要求焚烧温度达到850 °C,而燃烧温度的确定过程与燃烧放热量和不同温度下烟气焓值的确定直接相关,简化的设计过程可能影响燃烧温度判断的精确性。②污泥焚烧具有复杂的烟气相关设施,包括余热利用和净化。我国污泥焚烧工程多采用“半干化+流化床焚烧”工艺,为了提高运行经济性,多采用临界含水率设计,即入炉污泥含水率为可自持燃烧达到850 °C的最高含水率,按我国污泥泥质,多为50%~65%。在这种情况下,烟气中水蒸气的体积占烟气总量的24%~36%。而焚烧烟气的余热利用和净化的各环节均需确定相应的烟气温度,该过程与烟气焓值直接相关,而烟气中含有大量水蒸气,不计入水蒸气的潜热可能影响相关环节温度确定的精度。

本研究通过假设案例计算结果的对比,探讨现阶段普遍套用燃煤锅炉热力计算方法对污泥焚烧工艺设计的影响。

1 借鉴燃煤锅炉热力计算方法(传统方法)

1.1 工艺假设条件

假设入炉污泥含水率为60%,入炉污泥分析结果如表1所示。焚烧炉过量空气系数 α 为1.4,一次风比例100%,入炉温度为400 °C,空气含水量为10.00 g/kgDA(0.016 1 m³/m³),灰渣热灼减率为0,燃烧固体产物100%为飞灰,焚烧炉散热系数为10%,入炉污泥显热忽略不计。计算理论排烟温度。

表1 污泥收到基分析结果

Tab. 1 Analysis results of sludge as received basis

项目	$C_{ar}/\%$	$H_{ar}/\%$	$O_{ar}/\%$	$N_{ar}/\%$	$S_{ar}/\%$	$A_{ar}/\%$	$M_{ar}/\%$	$G_{ar,gr}/(kJ \cdot kg^{-1})$
数值	13.20	1.64	4.76	2.00	0.40	18.00	60.00	5 370

注: C_{ar} 、 H_{ar} 、 O_{ar} 、 N_{ar} 、 S_{ar} 、 A_{ar} 、 M_{ar} 分别为污泥收到基中C、H、O、N、S、灰分、水分的质量分数; $G_{ar,gr}$ 为热值。

需要说明的是,上述关于一次风比例、灰渣热灼减率、飞灰比例以及忽略入炉污泥显热的假设,仅为简化计算过程,不影响两种方法计算结果的平行比较,实际工程进行计算时应根据实际情况取值。

1.2 计算过程

计算完全燃烧1 kg入炉污泥需要的理论干空气体积:

$$V_k^0 = \frac{1}{0.21} \left(1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 5.55 \frac{H_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} - 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \right) = 1.461 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1)$$

计算完全燃烧1 kg入炉污泥需要的实际空气体积:

$$V_k = \alpha V_k^0 (1 + 0.016 1) = 2.078 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (2)$$

计算1 kg入炉污泥燃烧气态产物的理论体积:

$$V_{CO_2} = 1.866 \frac{C_{ar}}{100} = 0.246 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (3)$$

$$V_{SO_2} = 0.7 \frac{S_{ar}}{100} = 0.003 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (4)$$

三原子气体:

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} = 0.249 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (5)$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = \frac{22.4}{28} \cdot \frac{N_{\text{ar}}}{100} + 0.79 V_{\text{k}}^0 = 1.170 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (6)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = \frac{22.4}{18} \cdot \frac{W_{\text{ar}}}{100} + \frac{2 \times 22.4}{2 \times 2.016} \cdot \frac{H_{\text{ar}}}{100} + 0.016 1 V_{\text{k}}^0 = 0.950 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (7)$$

1 kg 入炉污泥燃烧气态产物的实际体积计算如下:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0.016 1 (\alpha - 1) V_{\text{k}}^0 = 0.959 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (8)$$

烟气体积:

$$V_{\text{y}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha - 1) V_{\text{k}}^0 = 2.963 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (9)$$

1 kg 入炉污泥完全燃烧的低位发热量计算如下: 表3。

表2 气体和灰分的理论比焓

Tab.2 Theoretical specific enthalpy of gas and ash

$t/^\circ\text{C}$	$h_{\text{RO}_2}^0/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$h_{\text{N}_2}^0/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$h_{\text{H}_2\text{O}}^0/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$h_{\text{k}}^0/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$h_{\text{A}}^0/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
100	170	130	151	132	81
200	357	260	304	266	169
300	559	392	463	403	264
400	772	527	626	542	360
500	996	664	794	684	458
600	1 222	804	967	830	560
700	1 461	946	1 147	979	662
800	1 704	1 093	1 335	1 130	767
900	1 951	1 243	1 524	1 281	875
1 000	2 202	1 394	1 725	1 436	984

表3 1 kg 入炉污泥完全燃烧产生的烟气在温度 t 时所拥有的焓(传统方法)

Tab.3 Enthalpy at temperature t of flue gas produced by complete combustion of 1 kg sludge (traditional method)

$t/^\circ\text{C}$	$h_{\text{y}}^0/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
100	415
200	838
300	1 320
400	1 784
500	2 262
600	2 749
700	3 252
800	3 769
900	4 294
1 000	4 833

$$Q_{\text{net,ar}} = Q_{\text{gr,ar}} - 212 H_{\text{ar}} - 0.8 (O_{\text{ar}} + N_{\text{ar}}) - 24.4 \times M_{\text{ar}} = 3 553 \text{ kJ/kg} \quad (10)$$

计算 1 kg 入炉污泥对应的空气量在入炉温度 $t = 400^\circ\text{C}$ 所拥有的焓:

$$h_{\text{k}} = V_{\text{k}} h_{\text{k}}^0 = 1 127 \text{ kJ/kg} \quad (11)$$

式中: h_{k}^0 为 1 m^3 湿空气在温度 $t(^\circ\text{C})$ 时的理论比焓,见表2。

1 kg 入炉污泥完全燃烧产生的烟气在温度 $t(^\circ\text{C})$ 时所拥有的焓的计算公式为:

$$h_{\text{y}}^0 = V_{\text{RO}_2} h_{\text{RO}_2}^0 + V_{\text{N}_2} h_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}} h_{\text{H}_2\text{O}}^0 + (\alpha - 1) V_{\text{k}}^0 h_{\text{k}}^0 + \frac{A_{\text{ar}}}{100} h_{\text{A}}^0 \quad (12)$$

式中: $h_{\text{RO}_2}^0$ 、 $h_{\text{N}_2}^0$ 、 $h_{\text{H}_2\text{O}}^0$ 、 h_{A}^0 分别为 1 m^3 气体及 1 kg 灰分在温度为 $t(^\circ\text{C})$ 时的比焓值,见表2。

根据式(12)绘制 h_{y}^0 与温度 $t(^\circ\text{C})$ 的焓温表,见

表3。

根据热量平衡计算 1 kg 入炉污泥完全燃烧的排烟热量:

$$h_{\text{y}} = (Q_{\text{net,ar}} + h_{\text{k}}) \times (1 - 10\%) = 4 212 \text{ kJ/kg} \quad (13)$$

查表3,内差法得焚烧炉排烟温度 $t = 884^\circ\text{C}$ 。

该排烟温度符合污泥焚烧的理想排烟温度范围 $850 \sim 900^\circ\text{C}$ 。

2 考虑水蒸气潜热的计算方法(优化方法)

2.1 水蒸气的状态和比焓

首先,该热力系处于平衡状态,这是采用任何方法进行模拟计算的前提。在这一基本假设下,热力系的宏观状态不随时间变化,该宏观状态包括温度、压力、焓、比体积等状态参数^[2],由此可以确定,烟气中水蒸气的温度与烟气中其他组分温度是相同

的,在污泥焚烧系统中,这一温度即排烟温度。在焚烧炉运行过程中,炉内压力通常为微负压,且变化不大,可按0.1 MPa计,并认为该压力为定值。该压力对应的水的饱和蒸汽温度为100℃,实际烟气中水蒸气的温度远高于该温度,则烟气中水蒸气处于过热状态,为过热水蒸气,计算时可按0.1 MPa的过热水蒸气考虑。

0.1 MPa过热水蒸气的比焓、比体积可直接查“过热水蒸气的热力性质表”获得,该表中水蒸气的温度通常仅给到600℃及以下,更高温度下的热力学参数可以查“水蒸气焓熵图”,或者查“过热水蒸气的比热容 c_p ”,按下式计算温度 t (℃)时的比焓^[2]:

$$h_{\text{H}_2\text{O}} = h'' + \int_{t_s}^t c_p dt \quad (14)$$

式中: h'' 为该压力下对应的饱和水蒸气的比焓。

得到不同温度下过热水蒸气的比焓、比体积后,根据理想气体状态方程换算为标方体积的水蒸气比焓,如表4所示。

表4 过热水蒸气的比焓($p=0.1$ MPa)

Tab.4 Specific enthalpy of superheated water vapor ($p=0.1$ MPa)

$t/^\circ\text{C}$	$h_{\text{H}_2\text{O}}^0/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$h_{\text{H}_2\text{O}}^0/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$
100	2 676	2 177
200	2 875	2 315
300	3 075	2 470
400	3 279	2 629
500	3 489	2 796
600	3 706	2 972
700	3 929	3 148
800	4 160	3 336
900	4 398	3 524
1 000	4 643	3 721

2.2 计算结果

当计算过程考虑水蒸气的潜热时,相应地,入炉污泥的热值应按高位发热量计,则1 kg入炉污泥完全燃烧的高位发热量为5 370 kJ/kg。

相应地,1 kg入炉污泥完全燃烧的排烟热量如下:

$$h_y = (Q_{\text{net,ar}} + h_k) \times (1 - 10\%) = 5 847 \text{ kJ/kg} \quad (15)$$

绘制考虑了水蒸气潜热的烟气焓温表(见表5),内差法得焚烧炉排烟温度 $t=832$ ℃。该排烟温度达不到我国污泥焚烧要求的燃烧温度。

表5 1 kg入炉污泥完全燃烧产生的烟气在温度 t 时所拥有的焓(优化方法)

Tab.5 Enthalpy at temperature t of flue gas produced by complete combustion of 1 kg sludge (optimization method)

$t/^\circ\text{C}$	$h_y^0/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
100	2 327
200	2 773
300	3 226
400	3 691
500	4 169
600	4 657
700	5 160
800	5 675
900	6 202
1 000	6 737

3 两种方法的差异性分析

3.1 传统计算方法对燃烧温度准确性的影响

根据上述结果,当采用燃煤锅炉的热力计算方法(以下简称“传统方法”)对污泥焚烧进行热力计算时,由于没有考虑实际烟气中过热水蒸气的潜热,计算得到的燃烧温度比实际情况偏高。在计算案例中,入炉含水率为60%时,按传统方法的计算结果,该入炉条件下污泥焚烧温度可达到884℃,表明所选取的入炉含水率合理,能够保证850℃以上的自持稳定燃烧。实际上,按该工况运行时,可能会出现运行温度达不到设计温度的情况,考虑过热水蒸气的焓值后,燃烧温度模拟计算结果为832℃,比传统方法的计算值低52℃,这一差异是需要注意的。

出现这种差异的主要原因在于:按照实际情况进行计算时,以污泥实测的高位放热量计算入炉热量,并根据水蒸气实际状态计算烟气的焓。而传统方法由于忽略了烟气中水蒸气的潜热,入炉污泥热量则相应地采用污泥的低位发热量,根据热值的测定和计算方法^[3],低位发热量是根据所测得的高位发热量计算得到的:

$$Q_{\text{net,ar}} = Q_{\text{gr,ar}} - 212H_{\text{ar}} - 0.8(O_{\text{ar}} + N_{\text{ar}}) - 24.4 \times M_{\text{ar}} \quad (16)$$

式中: $Q_{\text{net,ar}}$ 为污泥收到基的低位发热量, kJ/kg; $Q_{\text{gr,ar}}$ 为污泥收到基的高位发热量, kJ/kg;212为对应于污泥中每1%氢的汽化热校正值, kJ/kg;0.8为对应于污泥中每1%氧和氮的汽化热校正值, kJ/kg;24.4为对应于收到基污泥中每1%水分汽化热校正值, kJ/kg。

若测得高位发热量为污泥干基的数值,则入炉污泥收到基的高位发热量按下式计算:

$$Q_{gr,ar} = Q_{gr,d} \times \frac{100 - M_{ar}}{100} \quad (17)$$

式中: $Q_{gr,d}$ 为污泥干基的高位发热量, kJ/kg 。

实际上,由高位发热量计算低位发热量的这一换算过程是一个简化修正,当实际烟气中水蒸气含量较多,烟气焓值需考虑水蒸气的焓值时,该修正过程无疑增加了计算的不确定性。具体来讲,该修正过程将水的蒸发潜热简化为水蒸气在常温时的汽化潜热,而实际焚烧过程中,常温液态水升温、汽化为水蒸气并继续升温至烟气温度,该过程的热量与修正时所采用的值(0°C 时的汽化潜热)相差较大。

因此,若采用传统方法进行污泥焚烧的设计或运行指导将产生一定的偏差,入炉污泥含水率越高,这一偏差越大。在本案例的假设条件下,当入炉污泥含水率在 $20\% \sim 80\%$ 之间变化时,传统方法计算的燃烧温度偏差与入炉污泥含水率的关系见图1。该差值主要源自两种方法的烟气焓值差异,随着入炉污泥含水率的升高,传统方法烟气焓偏小的值呈直线上升。可见,污泥焚烧热力计算过程应充分考虑实际情况,尤其在入炉污泥含水率高于 50% 时,不适合按燃煤锅炉的热力计算方法进行简化处理。

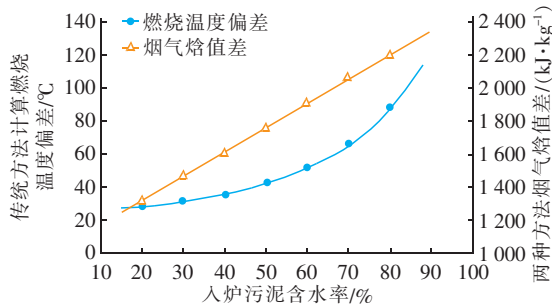


图1 两种方法计算的燃烧温度偏差与烟气焓值差随入炉污泥含水率的变化

Fig. 1 Variation of combustion temperature difference and flue gas enthalpy difference calculated by two methods with water content

3.2 对烟气余热利用与净化设施设计的影响

由于传统方法没有考虑水蒸气的焓值,而水蒸气主要存在于焚烧烟气中,则凡是涉及烟气焓值的计算环节,其精确度均会受到影响。除燃烧温度外,涉及烟气焓值的计算环节还有余热利用和烟气净化各环节的温度确定。

在烟气余热利用中,烟气热量通过高温空预器

或余热锅炉换热给燃烧空气、热介质,在烟气净化过程中,烟气热量受到损耗或在洗涤过程中换热给洗涤介质,由于烟气焓值与温度呈一一对应关系,烟气在每个环节入口和出口的焓值变化决定了其温度的变化。两种方法计算的烟气焓值、水蒸气焓值占比随温度的变化(入炉污泥含水率为 60%) 见图2。

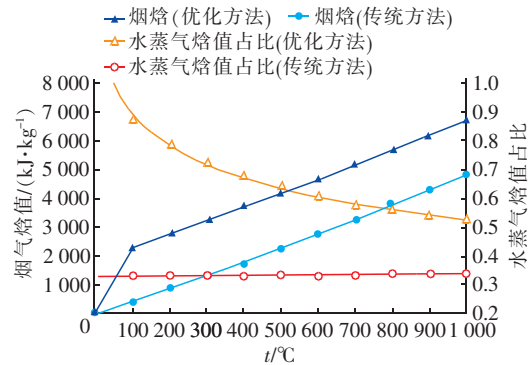


图2 烟气焓值、水蒸气焓值占比随温度的变化(入炉污泥含水率为 60%)

Fig. 2 Variation of flue gas enthalpy and steam enthalpy ratio with temperature (with water content of sludge entering the furnace being 60%)

虽然水蒸气焓值在烟气焓值中的占比随温度的变化趋势不同,但从烟气焓值整体变化趋势来看,在大于 100°C 时,传统方法计算的烟气焓值与优化方法随温度变化的趋势是平行的,即两条焓温线的斜率是相同的,其物理意义为,分别采用两种方法计算,烟气焓值变化量(Δh)相同时,烟气温度的变化量(Δt)也是相同的。烟气焓值变化量代表烟气通过某一环节(如通过高温空预器)过程减少的热量,该值在两种方法计算过程中是相同的(以高温空预器为例,均等于空气温度由常温加热至设计温度所对应的换热量),故两种方法计算烟气通过同一设施的进出口温度差值是相同的。以高温空预器为例,采用传统方法和优化方法计算,进入高温空预器的烟气温度等于焚烧炉出口的烟气温度,分别为 884°C 和 832°C ,若经传统方法计算出口温度为 530°C ,则采用优化方法计算的烟气出口温度为 478°C 。因此,在进行烟气余热利用和烟气净化设施设计时应考虑到计算方法产生的温度偏差,尤其是对温度区间有要求的烟气相关设施。

3.3 热力计算方法对设计和运行的影响

我国污泥焚烧入炉含水率的常见区间为 $50\% \sim 60\%$,采用传统方法,从燃烧温度到后续烟气

设施对应的入口和出口温度均偏高 40 ~ 50 ℃。

在设计时,由于设施配置和选型需要考虑污泥泥量、泥质波动,这一温度偏差是可以包含在设计余量范围内的。但原则上,要提高整个焚烧工程设计的准确性,需要同时提高设计基础数据(如泥量、泥质)的可靠性、设计计算过程的精确度以及设备设施配置与选型的合理性,各方面均力求精益求精,整个设计结果的误差才能降低。而热力计算作为工艺设计过程的重要内容,其方法的修正和完善是提升设计准确性的必要条件。

当采用传统方法模拟焚烧过程以指导运行时,根据运行调控的方式,通常有两种做法:第一种,泥质波动不大,入炉含水率在临界含水率附近,根据实测的泥量和泥质参数计算得到燃烧温度,当温度不足以达到 850 ℃ 时,进一步计算辅助燃料用量,以达到并维持规定的燃烧温度。此时,模拟计算的作用在于预测辅助燃料用量,避免监控发现温度达不到要求时再进行黑箱式尝试性的滞后调节导致燃烧环境和后续处理环节介质理化特性的波动,精确的预测还能节省辅助燃料用量。第二种,泥质波动较大,拟控制入炉含水率为临界含水率,根据实测的泥量、泥质参数和燃烧温度要求,计算需要控制的临界入炉含水率,以此为依据,调节干化的出泥含水率或干化污泥与湿污泥的混合比例,避免因泥量泥质波动较大引起炉内温度偏低或过高,导致燃烧环境波动、后续处理环节介质理化特性的波动以及热量的浪费(检测温度过高时通过炉内喷水降温)。总之,模拟计算的目的是为了提高运行水平,具体体现在提高运行的经济性,维持焚烧过程和后续流程运行环境的稳定、保障设备材质性能和寿命。因此,模拟计算的准确性不可避免地会影响运行调控的准确性。对于第一种调控方式,由于传统方法预测的温度偏高,对辅助燃料量的预测则相应地偏低,实际运行时按计算预测的辅助燃料量运行可能仍无法达到运行温度。对于第二种调控方式,以传统方法得到的临界入炉含水率运行时则可能出现实际燃烧温度达不到 850 ℃ 的情况。

4 结论

热力计算是工艺设计过程的重要内容,其方法的修正和完善有利于提升工艺设计和运行调控的准

确性和合理性。污泥焚烧工艺设计采用传统燃煤锅炉热力计算方法和根据实际情况考虑烟气中水蒸气潜热时的计算结果有差异,导致偏差的原因在于,污泥焚烧与燃煤锅炉燃烧过程有一定差异性。当采用燃煤锅炉热力计算方法进行污泥焚烧的工艺计算时,由于未考虑烟气中水蒸气的实际状态和潜热,关键环节的计算结果会产生一定偏差,该偏差随污泥入炉含水率的升高而增大,影响焚烧炉燃烧温度、烟气余热利用和烟气净化各环节温度预测的精确度。我国污泥焚烧入炉含水率的常见区间为 50% ~ 60%,采用传统方法计算,从燃烧温度到后续烟气设施对应的入口和出口温度均偏高 40 ~ 50 ℃,增加了设计结果的不确定性,不利于精确指导工艺运行。

参考文献:

- [1] 古尔维奇,库兹涅佐夫. 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.
GURVITCH, KUZNETSOV. Standard Method for Thermal Calculation of Boiler Units [M]. Beijing Boiler Works Translated. Beijing: China Machine Press, 1976 (in Chinese).
- [2] 严家驛,王永青. 工程热力学[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2016.
YAN Jialu, WANG Yongqing. Engineering Thermodynamics [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2016 (in Chinese).
- [3] 全国煤炭标准化技术委员会. 煤的发热量测定方法: GB/T 213—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
China National Coal Standardization Technology Committee. Determination of Calorific Value of Coal: GB/T 213—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese).

作者简介:段妮娜(1984—),女,山东青岛人,博士,高级工程师,研究方向为污泥处理处置与资源利用。参与国家水专项等重大研发计划课题 5 项、标准研编 5 项、专著编撰 3 部;发表论文 15 篇;获得授权发明专利 7 项;曾获中国专利优秀奖、上海市技术发明一等奖、上海土木工程科技进步奖。

E-mail: duannina@smedi.com

收稿日期: 2020-07-02

修回日期: 2020-07-20

(编辑:孔红春)