

干式除渣系统对锅炉效率影响分析

赵 鹏 王 勇 姜国琼 李蜀生 于永强
青岛达能环保设备股份有限公司 山东青岛 266300

摘要: 煤粉炉干式除渣系统自20世纪80年代研发开始至今已超过30年,总装机数量已超过千台套。相比于传统湿式底渣输送系统,干式除渣系统在节能环保方面优势突出,特别是节水、节电、现场环境方面优势非常突出^[1-2]。但其对锅炉效率的影响却多有争议。通过对2018年3月完成的菲律宾Mariveles电厂一期Unit2机组除渣系统改造前后实测数据统计,运用正平衡法和反平衡法,对干式除渣系统对锅炉效率影响进行分析研究,得出干式除渣系统有效提示锅炉效率的结论。同时也对改造前后电厂运行成本、节能减排等经济性方面进行分析。

关键词: 干式除渣系统; 锅炉效率; 燃煤; 鳞斗; 节能减排

Influence analysis of dry slag removal system on boiler efficiency

Peng Zhao, Yong Wang, Guoqiong Jiang, Shusheng Li, Yongqiang Yu
Qingdao Daneng Environmental Protection Equipment Co., Ltd. Qingdao Shandong 266300

Abstract: It has been more than 30 years since the research and development of Dry Ash Handling System(DAHS) for pulverized coal boiler in 1980s, and the total installed capacity has exceeded 1000 sets. Compared with the traditional Wet Ash Handling System(WAHS), the DAHS has outstanding advantages in energy saving and environmental protection, especially in water saving, power saving and on-site environment^[1-2]. However, its impact on boiler efficiency is controversial. This study will analyse the boiler efficiency of Unit 2 of Phase 1 of GN Power Mariveles, which is located Battan, Philippines, according to measured data before and after the conversion of the bottom ash system from wet to dry which was implemented in March 2018. At the same time, it also analyzes the economic aspects of power plant operation cost, energy conservation and emission reduction before and after the transformation.

Keywords: DAHS; Boiler Efficiency; Coal Fired

一、背景介绍

Mariveles电厂一期两台340MW机组采用哈尔滨锅炉厂的亚临界一次中间再热锅炉,采用“Π”型布置。原有除渣输送系统采用湿式捞渣机系统,包括渣井、水封插板、捞渣机、渣仓及卸料设备。电厂在2018年3月对Unit 2机组进行了除渣系统改造工程,将原有湿式刮板捞渣机除渣系统改造为干式鳞斗干渣系统,并于2019年1月对Unit 1进行了相同的除渣系统改造工程。改造方案如下:

保留原有渣井,将内溢流水封改为零溢流结构,增加液位计确保密封水量满足要求;

拆除渣井下捞渣机、接管、液压站等;拆除原有湿式渣仓仓体及卸料设备;

新增渣井下液压破碎关断门、鳞斗干渣机、碎渣机,

干渣仓仓体及干式卸料设备;

两台机组分别于2018年3月和2019年2月验收并投入运行,至今运行良好。

二、锅炉效率判定标准

根据《ASME PTC-4.1 锅炉机组性能试验规程》,锅炉效率可以有两种获取方式,正平衡法与反平衡法。

正平衡法是将锅炉有效利用热与锅炉送入量的比值直接获得。公式如下:

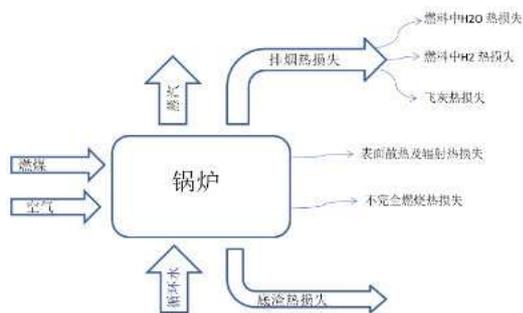
$$\eta_g = \frac{\text{Steam flowrate} \times (\text{steam enthalpy} - \text{feed water enthalpy})}{\text{Fuel firing rate} \times \text{Gross calorific value}} \times 100$$

$$= \frac{w_s \times (h_2 - h_1) + w_{2s} \times (h_{22} - h_{21})}{w_f \times GCV_f} \times 100 \quad (1)$$

其中GCV_f是燃煤的收到基低位发热量(kcal/kg); w_f是燃煤量(kg/hr); w_s是锅炉蒸汽产生量(t/h); h₁,

h_2 , 是过热蒸汽热焓 (kcal/kg), 给水热焓; w_{zs} 是再热蒸汽流量 (t/h); h_{z1} 和 h_{z2} 是再热器进口和出口蒸汽热焓 (kcal/kg);

反平衡法是通过考虑各种热损失来衡量的。锅炉主要损失有干烟气热损失、燃料中H2的影响、燃料及空气中水分、锅炉散热损失、飞灰及底渣热损失等, 如下图所示。公式如下:



锅炉效率,

$$\eta_g = 100 - Total\ Heat\ Loss(\%) = 100 - \sum_{i=1}^8 L_i$$

$$= 100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \quad (2)$$

式中, L1. 锅炉干排烟热损失

L2. 燃料中 H₂ 的引起的损失

L3. 燃料中水分引起的损失

L4. 空气中水分引起的损失

L5. 可燃气体不完全燃烧损失

L6. 锅炉散热损失

L7. 飞灰热损失

L8. 底渣热损失

1. 锅炉效率分析

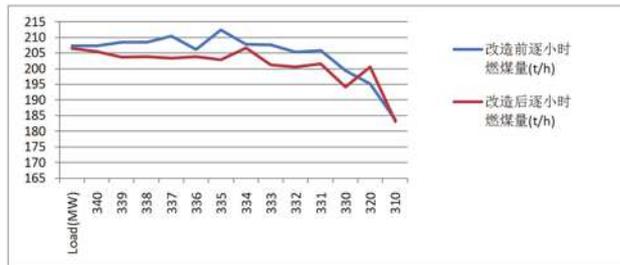
1.1 正平衡法

根据公式 (1) 所示, 锅炉送入热量取决于燃煤量。我们对 Unit2 机组改造前、后各三个月的逐小时燃煤量进行统计后, 我们得到了以下对比数据。

表1 改造前后燃煤量对比表

机组负荷 (MW)	改造前每小时燃煤量 (t/h)	改造后每小时燃煤量 (t/h)	燃煤节省量 (t/h)	占原耗煤量比例
340	207.36	206.54	0.82	0.40%
339	207.38	205.48	1.9	0.92%
338	208.46	203.62	4.84	2.32%
337	208.45	203.8	4.65	2.23%
336	210.36	203.42	6.94	3.30%
335	206.19	203.86	2.33	1.13%
334	212.48	202.89	9.59	4.51%
333	207.87	206.72	1.15	0.55%
332	207.71	201.29	6.42	3.09%
331	205.29	200.53	4.76	2.32%

机组负荷 (MW)	改造前每小时燃煤量 (t/h)	改造后每小时燃煤量 (t/h)	燃煤节省量 (t/h)	占原耗煤量比例
330	205.83	201.56	4.27	2.07%
320	199.44	194.18	5.26	2.64%
310	195.2	200.53	-5.41	-2.77%
300	183.74	183.12	0.62	0.34%



从数据统计的结果来看, 锅炉在长时间平稳运行的工况下 (335MW 及以上) 耗煤量明显降低, 即锅炉效率显著提升。

我们取 339~340WM 工况为例计算锅炉效率, 锅炉相关参数如下:

表2 锅炉参数 (339~340MW)

项目	数值	项目	数值
对应锅炉蒸发量	1097t/h	再热器蒸汽流量	913.1t/h
过热蒸汽压力	16.3Mpa	再热器进口蒸汽压力	3.779Mpa
过热蒸汽温度	541℃	再热器进口蒸汽温度	333.1℃
过热蒸汽热焓值	814.4 kcal/kg	再热器出口蒸汽压力	3.579Mpa
给水热焓值	294.4 kcal/kg 19.21MPa @ 280.2℃	再热器出口蒸汽温度	541℃
燃煤的热值	3929 kcal/kg	再热器进口热焓	730.34 kcal/kg
		再热器出口热焓	846.05 kcal/kg

表3 燃煤分析

工业分析		元素分析	
收到基水分 (% , arb)	35.4	干燥基碳 (% , DB)	68.3
空气干燥基挥发分 (% , adb)	40.8	干燥基氢 (% , DB)	4.3
收到基灰分 (% , arb)	2.50	干燥基氮 (% , DB)	1.03
空气干燥基硫 (% , adb)	0.1	干燥基硫 (% , DB)	0.13
空气干燥基固定碳 (% , adb)	35.7	干燥基氧 (% , DB)	22.34
低位发热量, Kcal/kg (arb)	3929	哈德格罗夫可磨度指数	64

根据表1, 339~340MW工况下改造前平均燃煤量是207.37t/h, 改造后为206.01t/h。由公式(1)计算可得:

改造后锅炉效率 $\eta_{gr}=83.53\%$

改造前锅炉效率 $\eta_{gr}=82.98\%$

从上述计算可知, 改造后锅炉效率提升了0.55%。由于本次改造工程仅涉及锅炉底渣输送系统, 其它部件、系统并未改造, 所以可以认为效率的提升是由于干式除渣系统改造带来的。

然而, 由于正平衡法仅仅简单地通过燃煤的收到基低位发热量和蒸汽产量等估算出锅炉效率, 所以结果并不准确。为了更准确的分析改造前后锅炉效率的变化, 我们还需要用反平衡法来校对。

1.2反平衡法

根据公式(2)的描述, 我们逐项分析改造前后锅炉热损失的变化。

1.2.1干烟气带走热量

干烟气带走的热量是锅炉热损失最主要的因素, 热量的多少主要是根据烟温及烟气量来判断。根据《ASME PTC-4.1 锅炉机组性能试验规程》, 因干烟气而造成的锅炉效率损失公式如下:

$$L_1 = \frac{m \times C_p \times (T_f - T_a)}{GCV_f} \times 100 \quad (3)$$

式中, m是燃烧1kg燃料产生的干烟气量, 单位kg。
C_p是烟气平均比热, 单位Kcal/kg°C, C_p=0.32 kcal/kg°C

T_f是空预器后烟气温度, 单位°C

T_a是环境空气温度, 取30°C

干烟气量m可以根据燃烧公式计算,

$$m = m_{RO_2} + m_{N_2} + m_a \quad (4)^{[1]}$$

式中: m_{RO₂}为一千克燃煤燃烧后产生的CO₂和SO₂的量, 单位kg

m_{N₂}为理论氮气量, 单位kg

m_a为过量空气, 单位kg

$$m_{RO_2} = \frac{44}{12} \times \frac{C}{100} + \frac{64}{32} \times \frac{S}{100} \text{ kg/kg} \quad (5)$$

式中C, S是燃煤中碳和硫含量。

$$m_{RO_2} = 1.62 \text{ kg/kg}$$

$$m_{N_2} = 0.77 \times V_0 + N \text{ kg/kg} \quad (6)$$

式中: V₀是标准状态下理论耗气量, N是燃煤中氮含量。

$$V_0 = \frac{\left[(11.6 \times C) + \left\{ 34.8 \times \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) \right\} + (4.35 \times S) \right]}{100} \text{ kg/kg} \quad (7)$$

式中, C、H₂、O₂和S是燃煤中碳、氢气、氧气和硫

的含量。

$$V_0 = \frac{\left[(11.6 \times 68.3) + \left\{ 34.8 \times \left(4.3 - \frac{22.34}{8} \right) \right\} + (4.35 \times 0.13) \right]}{100}$$

=5.461 kg/kg of fuel

根据公式(6),

$$m_{N_2} = 4.212 \text{ kg/kg}$$

$$m_a = EA \times V_0 \quad (8)$$

式中, EA是过量空气百分比。

$$EA = \frac{O_2\%}{21 - O_2\%} \quad (9)^{[4]}$$

Here O₂% is the flue gas oxygen content.

关于烟气含氧量, 我们对改造前后数月逐小时烟气含氧百分比做了统计, 结果如下。

表4 改造前后烟气含氧量

机组负荷 (MW)	改造前烟气含氧量			改造后含氧量
	2017.9-10	2017.11	2017.12	2018.12
336	5.2	5.4	5.2	4.7
337	5.32	5.7	5.6	4.7
338	5.2	5.8	5.8	4.7
339	5.3	5.7	5.7	4.8
340	5.4	5.6	5.82	4.8

关于烟温, 我们对改造前后各一个月逐小时烟气温度记录统计出如下数据。

表5 改造前后空预器进口烟温表

负荷 (MW)	改造前烟气温度				改造后			
	空预器		空预器		空预器		空预器	
	A侧 入口	A侧 出口	B侧 入口	B侧 出口	A侧 入口	A侧 出口	B侧 入口	B侧 出口
336	365.6	158.2	362.9	154.8	369.5	159.3	365.1	143.7
337	366.9	161.2	365.8	156.1	366.7	155.5	362.7	142.2
338	365.8	160.5	364.3	153.1	365	152.9	361.5	141.2
339	366.2	160.1	364.6	152.9	364.6	155.2	361	142.3
340	367.2	159.3	365.7	153.1	365.2	153.4	360.6	140.7
平均值	366.34	159.86	364.66	154	366.2	155.26	362.18	142.02

为了剔除空预器的影响, 后续计算中将T_f值统一取改造前空预器出口平均值156.93°C。

根据公式(9),

$$\text{改造前过量空气 } EA_b = 0.364$$

$$\text{改造后过量空气 } EA_a = 0.296$$

根据公式(8),

$$\text{改造前过量空气量 } m_{ab} = 1.986 \text{ kg/kg;}$$

$$\text{改造后过量空气量 } m_{aa} = 1.616 \text{ kg/kg}$$

根据公式(4),

改造前干烟气量 $m_a=7.818 \text{ kg/kg}$

改造后干烟气量 $m_a=7.448 \text{ kg/kg}$

根据公式(3),且设空气预热器出口温度为 156.93°C (改造前的平均值),则烟气热损失为:

改造前因干烟气而造成的锅炉效率损失 $L_{1a}=8.082\%$

改造后因干烟气而造成的锅炉效率损失 $L_{1a}=7.700\%$

故改造后因烟气量降低锅炉效率提升了 0.382% 。

同时,从上述数据我们可以看到改造前后空预器前烟温无明显变化,且烟气中含氧量甚至有些下降。这充分说明之前多为人诟病的干式除渣系统漏风或者有过量风进入锅炉的情况并未发生。而这个状况得益于鳞斗干式除渣系统优秀的量化控风技术,使得进入锅炉的空气得到了很好的量化控制^[5]。与传统的干式除渣系统有着多处不可控的进风口不同,鳞斗干式除渣系统仅留一个头部主进风口并安装控风装置。此控风装置与干式除渣机出口渣温实现连锁控制,在保证冷却效果的前提下尽力降低进风量。此外,鳞斗干式除渣系统穿透式换热技术极大的提高了换热效率,使得同等工况下所需冷却风量比其他干式除渣系统更少,并且有助于底渣中未燃烧碳再次燃烧并回收其释放热量。通过上述数据,很好的证明了这个一点。

2. 燃料中 H_2 的引起的损失

计算公式如下:

$$L_2 = \frac{9H_2}{GCV_f} (584 + C_{ps}(T_f - T_d)) \times 100 \quad (6)^{[2]}$$

式中, H_2 是 1Kg 燃料中的氢含量 kg ; C_{ps} 是过热蒸汽的比热 $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$; 584 是使水变蒸气所对应的潜热 KJ/Kg ;

因煤种及烟气温度在改造前后均无变化,所以 L_2 在改造前后并无变化。

3. 燃料中水分引起的损失

因燃料中水分而损失热量计算公式为:

$$L_3 = \frac{M * (584 + C_{ps}(T_f - T_a))}{GCV_f} \times 100 \quad (7)^{[3]}$$

其中 M 是燃料中的水含量 kg 。

因煤种、蒸汽及烟气温度在改造前后均无变化,所以 L_3 在改造前后并无变化。

4. 空气中水分引起的损失

因空气中水分而损失热量计算公式为:

$$L_4 = \frac{AAS \times \text{Humidity Factor} \times C_{ps}(T_f - T_a)}{GCV_f} \times 100 \quad (8)^{[3]}$$

其中 AAS 是每公斤燃煤实际耗气量; Humidity Factor 是环境空气含水量。

因煤种、环境及烟气温度在改造前后均无变化,所以 L_4 在改造前后并无变化。

5. 可燃气体不完全燃烧的影响

不完全燃烧热损失主要是由于 CO , H_2 , CH_4 等可燃气体随烟气排放而损失的热量。在正常燃烧时候 L_5 值很小,在煤粉炉设计中通常为 0 。^[4]

本项目为大型现代化煤粉炉,我们将 L_5 取 0 。

6. 锅炉散热损失

因为本次改造只涉及底渣输送系统改造,锅炉其他构件并无变化,所以锅炉表面散热、对流热损失并无变化。但是因为从湿式除渣系统改为干式除渣系统,锅炉喉口处的辐射热被干式除渣系统冷却风回收带回锅炉。

因干式排渣系统回收的辐射热而提高的锅炉效率计算如下:

$$R1 = \frac{Q_r \times 3600}{W_f \times 1000 \times GCV_f \times 4187} \times 100 \quad (9)$$

式中, Q_r 为锅炉喉口处冷却风吸收的辐射热量,单位 W ;

$$Q_r = F_1 \times C_0 \times \varepsilon_1 \times \left[\left(\frac{273+t_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+t_2}{100} \right)^4 \right] \quad (10)^{[6]}$$

F_1 为锅炉喉口面积, $F_1=14 \times 1.1=15.4 \text{ m}^2$;

C_0 为黑体辐射系数, $C_0=5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k}^4)$;

ε_1 为锅炉喉口黑度, $\varepsilon_1=1$;

t_1 为锅炉喉口处温度, $t_1=800^\circ\text{C}$

t_2 为进入炉膛风温, $t_2=350^\circ\text{C}$

$Q_r=1025911.4\text{W}$

根据公式(9),因干式排渣系统回收的辐射热而提高的锅炉效率 $R1=0.11\%$ 。

L7. 飞灰热损失

根据燃料元素分析表,燃料中总灰分含量为 2.5% 。底渣与飞灰比值按 $10:90$ 。

$$\begin{aligned} L7 &= \frac{\text{Total ash collected} \times G.C.V}{w_f \times GCV_f} \times 100 \\ &= \frac{W_f \times 0.025 \times 0.9 \times G.C.V}{W_f \times GCV_f} \times 100 \\ &= \frac{0.025 \times 0.6 \times G.C.V}{GCV_f} \times 100 \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $G.C.V$ 是飞灰热值。

由此可以看出,在煤质、锅炉燃烧情况未改变的前提下,飞灰中未燃烧碳损失不变。

L8. 底渣热损失

与湿式除渣系统底渣直接排放入水中热量全部损失不同,干式除渣系统利用冷却风将底渣冷却并吸收底渣显热带回锅炉。同时,底渣中含有的部分碳会在输送过程中部分燃烧并释放热量。这些热量也被冷却风吸收并带回锅炉提升了锅炉效率。

因干式排渣系统回收的辐射热而提高的锅炉效率计算如下:

$$R2 = \frac{Q_z + Q_i}{W_f \times GCV_f \times 4.187} \times 100 \quad (12)$$

式中, Q_z 为底渣显热, 单位 KJ;

Q_i 为底渣中碳燃烧而释放的热量, 单位 KJ。

根据热力学公式:

$$Q_z = W_f \times 1000 \times 0.025 \times 0.1 \times C_z (t_3 - t_4) \quad (13)$$

式中: C_z 是底渣平均比热容, $C_z = 0.97 \text{ KJ/Kg} \cdot \text{k}$

t_3 是进入干式除渣系统底渣温度, $t_3 = 800^\circ\text{C}$

t_4 是经干式除渣系统冷却后的底渣温度, $t_4 = 100^\circ\text{C}$

故 $Q_z = 203.6 \times 1000 \times 0.025 \times 0.1 \times 0.97 \times (800 - 100) = 345611 \text{ KJ}$ 。

底渣中碳燃烧释放的热量计算公式如下:

$$Q_i = W_f \times 1000 \times 0.025 \times 0.1 \times W_d \times GCV_z \quad (14)$$

式中, GCV_z 为 1kg 碳完全燃烧释放的热量,

$GCV_z = 31520 \text{ KJ/Kg}$ 。

W_d 为底渣中燃烧碳的百分比。

关于底渣在输送冷却过程中燃烧情况, 我们分别采集了湿式除渣系统和干式除渣系统底渣样品并做了含碳量的检测, 结果见下表:

湿渣含碳量	干渣含碳量
4.59%	3.5%

由此可以看出, 与湿式除渣系统底渣浸水后无发进一步燃烧释放热量相比, 干式底渣系统中约 1.09% 的碳重新燃烧并释放热量。这部分热量也被干式除渣系统的冷却风带回了锅炉。同时鳞斗干式除渣系统独有的穿透式冷却加大了底渣与冷却风的接触面积, 增大了底渣中碳的燃烧概率, 锅炉效率因此得到提升^[5]。

根据公式 (14), 底渣中碳燃烧释放的热量 $Q_i = 174876 \text{ KJ}$

根据公式 (12), 干式排渣系统回收的辐射热而提高的锅炉效率 $R2 = 0.016\%$ 。

综上所述, 我们根据改造前后数据利用反平衡法核算锅炉在改造后效率提升了 0.51%。

7. 经济性分析

(1) 根据表 1, 我们看出在锅炉正常平稳运行期间 (335~340MW), 煤耗降低了 3.55t/h。每年运行时间按 8000h 计算, 年度节省燃煤约 28, 400t。提升锅炉效率同时为电厂节省成本。

(2) 相比与湿式除渣系统, 干式除渣系统无需冷却水系统, 节省大量水资源^[7]。且系统更简单, 操作简易, 可实现完全自动化控制。同时干式除渣系统耗电量也低。无冷却水也让现场环境一改往日脏乱差的状况, 整个锅

炉房零米干净整洁。^[8]

另外, 干式底渣的综合利用价值高, 潜在经济效益好。^[9-10]

(3) 改造后干式除渣系统系统日常维护量近乎为零。相对与湿式系统, 为电厂节省了大量的人工成本^[8]。

(4) 研究表明锅炉每提高 1% 的效率, 可以减少 2% 的二氧化碳排放量^[11], 干渣系统的改造也为降低碳排放做出了贡献。

三、结束语

通过以上分析, Mariveles 电厂一期 Unit 2 机组经过湿式除渣系统改造干式除渣系统后, 锅炉效率提升了约 0.51%。在提升锅炉效率的因素中, 烟气量的降低是最主要的一项。而实现此项的主要原因是鳞斗干式除渣系统量化控风的设计保证了进入锅炉的冷却风量得到精确限制。另外, 炉底喉口辐射热以及底渣在干式除渣系统中重新燃烧的显热得以回收也在提升锅炉效率。

因为锅炉效率的提升, 每年给电厂节省约 28, 400 t 燃煤, 同时间接的降低了碳排放量。同时相比于湿式除渣系统, 干式除渣系统更为精简, 安全, 稳定, 也为电厂节省了大量的运营成本, 经济效益更好。

参考文献:

- [1] 于长友. 燃煤电厂钢带式排渣机干式除渣技术[J]. 中国电力, 2007, 40 (1): 56-59.
- [2] 吴潮之. 干式除渣技术在 1000MW 发电机组中的应用[J]. 广东电力, 2010, 23 (8): 4.
- [3] Gudimella, Tirumala, Srinivas, 等. Efficiency of a Coal Fired Boiler in a Typical Thermal Power Plant[J]. American Journal of Mechanical & Industrial Engineering, 2017.
- [4] 车得福, 庄正宁, 李军, 王栋. 锅炉[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.10
- [5] 张光荣, 李蜀生, 王勇, 等. 干渣机换热与出力研究[J]. 新型工业化, 2020, 10 (4): 4.
- [6] 范仁东. 风冷干排渣系统对锅炉效率影响分析计算[J]. 电站辅机.
- [7] 姚昌奇. 600MW 机组燃煤锅炉干式排渣系统研究[D]. 南京师范大学, 2011.
- [8] 洪永新, 曹荣, 王锦涛. 火电厂锅炉干除渣系统改造前后的效果分析[J]. 发电与空调, 2011.
- [9] 张学禅. 燃煤电厂干式除渣与湿式除渣系统设计特点及分析[J]. 广西电力, 2008, 31 (5): 2.
- [10] 周丽, 唐畅, 王智. 湿式除渣系统和干式除渣系统对比研究[J]. 2022 (9).
- [11] 林宗虎, 徐通模. 实用锅炉手册. 北京: 化学工业出版社