



工程酸露点——锅炉低温余热利用极限的新判据

史月涛*, 张翔宇, 李飞, 马磊

山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061

* 联系人, E-mail: shieddie@sdu.edu.cn

2014-06-03 收稿, 2014-07-04 接受, 2014-09-01 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2011CB710702)和山东省科技发展计划(2012GGE27012)资助

摘要 在某电厂建立积灰试验台, 研究积灰对换热器的传热特性的影响. 试验系统安装在某电厂 300 MW 机组空气预热器和电除尘器之间的烟道旁, 双层试验套管插入烟道之中, 冷却水先后流经内管和外套管. 数据表明: 当煤质一定时, 试验段 Nu 随着外壁温的变化而变化, 在某一特定外壁温区间内骤降, 此时换热元件积灰和腐蚀情况加剧, 这个骤降温度区间被定义为工程酸露点. 工程酸露点可以用来指导锅炉低温余热系统的设计, 保持余热系统入口水温高于工程酸露点, 换热器不但可以保持较高传热性能, 同时避免了严重的低温腐蚀. 就经济性和设备可靠性来说, 工程酸露点是余热利用系统设计的新判据. 试验表明: 工程酸露点比传统热力学酸露点至少低 30℃, 具有更高的实用价值.

关键词

余热利用
工程酸露点
积灰
酸凝结
腐蚀

根据 2013 年 BP 世界能源年鉴^[1]统计, 中国的煤消耗量占世界总消耗量的一半以上, 且国内 67.9% 的发电量来自火力发电. 要减少中国的碳排放量, 必须提高燃煤机组的效率, 很多燃煤电厂安装了余热利用系统来提高锅炉效率^[2]. 但为了防止酸结露, 发生低温腐蚀, 其设计排烟温度应高于烟气酸露点^[3].

对烟气酸露点的研究目前主要集中于两个方向: 一个是利用热力学方法来确定酸露点, 另一个是利用测量方法来确定酸露点. 热力学方法是现在广泛应用的方法, 它包括经验公式法、数值分析法、神经网络法等. 一些研究认为酸露点受烟气成分如 SO_3 浓度、水蒸气浓度的影响^[4]. Müller^[5]提出一个基于 SO_3 浓度的经验公式, 它是之后所有经验公式的基础, 但该方法忽略了水蒸气的影响. 之后有学者提出了一个基于大量试验数据并总结了基于硫酸蒸发焓、硫酸蒸气熵等热力学数据的经验公式^[6], 但 Kiyoura^[7]发现它烟气温度高时并不准确. Verhoff 等人^[8]提出的关系式在所有温度区间都比较准确, 但在低 SO_3 浓度时存在较大偏差, Okkes^[9]提出的关系式可以克服早期

公式的一些缺点, 但是在低水蒸气浓度时仍不能准确预测酸露点. 中国电力行业大都采用前苏联 1973 年《锅炉机组热力计标准方法》经验关联式^[10]及其修正公式, 但其计算结果偏高, 设计偏保守.

Bahadori^[11]提出了一种基于范德蒙行列式的酸露点预测工具, 该工具综合考虑了燃料类型, SO_3 浓度和过量空气系数等影响因素, ZareNezhad 等人^[12]基于大量的实际运行数据提出一种仿真神经网络模型来预测酸露点, 但这些方法机制非常复杂, 难以实现, 且他们需要的一些运行数据, 比如 SO_3 浓度、水蒸气浓度等并不能够准确地获得.

由于试验测量的机制比较复杂, 酸露点测量的研究结果并不多. 英国煤炭利用协会提出了一种导电式酸露点仪设计, 之后的大部分酸露仪都是基于其设计的. 有学者利用探头直接测量酸露点, 发现数据的离散程度约有 10℃ 左右^[13]. 同时有人指出用来测量露点的传感器非常容易被烟气中的飞灰污染, 所以很难准确地测量酸露点^[14].

由以上介绍可知传统的方法并不能准确预测酸

引用格式: 史月涛, 张翔宇, 李飞, 等. 工程酸露点——锅炉低温余热利用极限的新判据. 科学通报, 2014, 59: 2810–2816

英文版见: Shi Y T, Zhang X Y, Li F, et al. Engineering acid dew temperature: the limitation for flue gas heat recovery. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-014-0577-y

露点,且大量实际运行经验发现即使排烟温度低于热力学酸露点时,设备热效率仍然保持在很高的水平^[15],也没有发生腐蚀,这是因为积灰和硫酸凝结共同影响换热器的热效率和安全运行^[16]。为了研究积灰条件下对传热效果的影响,本文建立了一个试验系统来研究积灰和酸凝结对换热器的综合影响,从而得出锅炉低温余热利用的极限。

1 试验系统和参数

1.1 试验系统

试验系统示意图如图 1 所示,它安装在某电厂 300 MW 机组空气预热器和电除尘器之间的烟道旁。试验系统由 3 个子系统组成:恒温水系统、试验段和测量系统。机组的主要运行参数和煤质分析如表 1 所示。

水箱是恒温水系统中的主要设备,它分别与补给水、恒温给水、回水和溢流口连接。水箱中挡板其分成两个区域:混水区和温控区。回水和补给水在混水区混合后流向温控区,出水水温由温控区的恒温控制设备保持恒定。

试验段插入烟道约 1 m 深,其结构如图 2 所示。试验段为环形套管结构,同时具有内管和外管,尾部烟气从试验段外壁面自上而下流过。循环水泵驱动

给水依次流过控制阀,流量计,流进试验段的内管,在内管的尾部流进外管。给水吸热后流出外管,流回控制水箱。试验段的结构和尺寸如表 2 所示。给水流量由控制阀调节,排污阀和回水阀共同调节流回水箱的回水流量。

1.2 测量设备

如上所述,许多广泛应用的酸露点经验公式基于烟气成分如 SO_2 浓度、 O_2 浓度、水蒸气浓度等。因此用烟气分析仪来测量 SO_2 和 O_2 浓度等烟气成分,烟气流速通过煤质和烟气含氧量来估算。

试验数据处理中需要计算试验段传热量。本试验中烟道流量太大,烟气侧温度降很低,烟气侧放热量很难计算。相比于烟气侧,水侧的参数可以精确测得,水侧吸热量也可以准确地计算。因此采用热电阻测量供水和回水水温,用转子流量计测量供水流量。

试验段的外壁温就像一个指示器,通过将它与酸露点对比可以判断试验段外部烟气是否开始凝结。套管外壁面的温度测点用来测量外壁温。数据采集仪用来记录所有的测量数据。测量仪器及精度列于表 3 中。

1.3 试验过程

试验过程中,锅炉负荷稳定在 300 MW,试验段

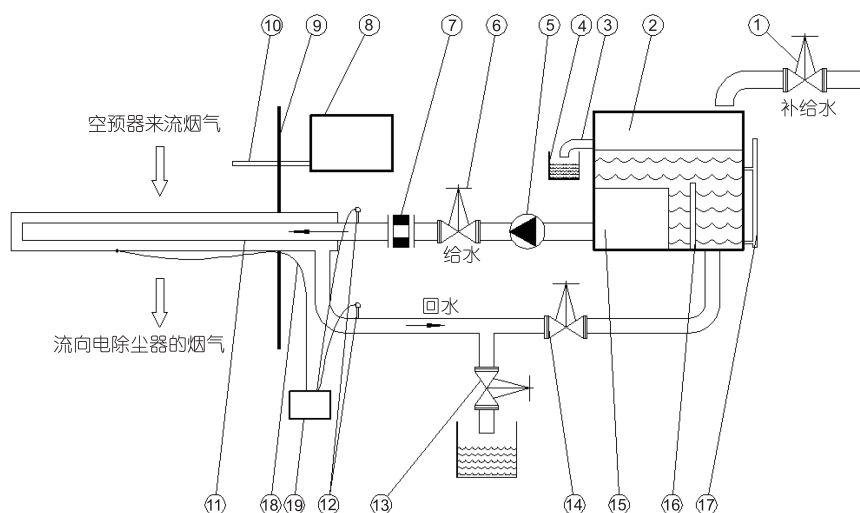


图 1 试验系统示意图

- ① 补给水阀; ② 水箱; ③ 溢流口; ④ 排水渠; ⑤ 循环水泵; ⑥ 给水阀; ⑦ 流量计; ⑧ 烟气分析仪; ⑨ 烟道; ⑩ 烟气分析仪探头;
⑪ 套管; ⑫ 热电阻; ⑬ 排污阀; ⑭ 回水阀; ⑮ 温控箱; ⑯ 挡板; ⑰ 水位指示仪; ⑱ 外壁温测点; ⑲ 数据采集仪

表 1 锅炉主要技术参数和煤质分析

项目	数值
额定负荷	300 MW
额定蒸气压力	24.8 MPa
蒸气温度	560℃
排烟温度	139.6℃
空预器出口氧量	5.8%
全硫分	0.795%
全水分	10.74%
空干基水分	4.46%
空干基挥发分	27.39%
低位发热量	22170 kJ/kg
高位发热量	24340 kJ/kg

表 2 试验段尺寸

编号	项目	符号	数值(mm)
1	外管总长	L	1200
2	插入烟道的外管长度	L_0	1000
3	烟道外外管长度	L_b	200
4	内管总长	L_i	1170
5	外管外径	d_0	38
6	外管内径	d_i	20
7	外管壁厚	δ_0	4
8	内管壁厚	δ_i	1

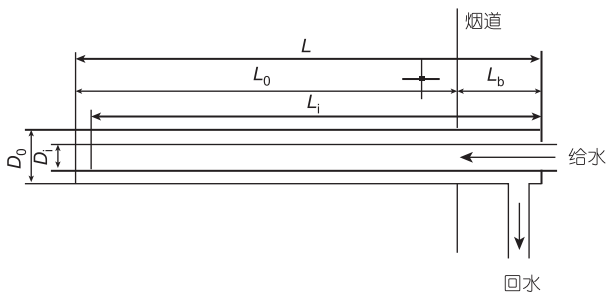


图 2 试验段结构示意图

表 3 测量参数及仪表

仪表	单位	型号	精度
电子压差计	Pa	Testo512	0.1
热电阻	℃	PT100	0.1
皮托管	Pa		1
转子流量计	m ³ /s	LZJ-6F	2.5
数据采集仪		HP-Agilent34970A	
烟气分析仪		NOVA2000	

外烟气温度稳定在 120℃，试验一开始，先将试验段插入烟道的测点孔并固定，并将缝隙严格密封，以防外部的空气流进烟道，影响测量的准确性和烟气成分。

接通电源，打开恒温水控制系统，调节温控仪至设定温度，待水箱的温度稳定后，打开循环水泵，一段时间后系统内的流场会趋于稳定。待给水和回水水温稳定后，采集各测点数据，调节阀门改变循环水流量，重复测量步骤，待该工况下数据采集完毕，取出试验段观察外表面积灰和腐蚀情况，计算该温度下换热段 Nu 。将试验段重新放回烟道并严格密封，调节恒温水箱至下一个设定温度，待恒温冷却水系统稳定运行 24 h 以后，重复上述测量步骤直到试验结束。试验结束后绘制 Nu 随外壁温变化的曲线，随着外壁温降低， Nu 数会有一个骤降，工程酸露点大约等于 Nu 骤降时的外壁温。

2 数据处理

烟道中的高温烟气通过试验段加热给水，试验段的传热特性用 Nu 来表示，如下式：

$$Nu = \frac{k \times d_0}{\lambda_g}, \tag{1}$$

其中 d_0 为套管的外管外径， k 是套管的换热系数， λ_g 是烟气导热系数。

套管的换热系数由下式所示：

$$k = \frac{Q}{F(t_g - t_w)}, \tag{2}$$

其中 Q 是水侧吸热量， F 是套管外管面积， t_g 是烟气温度， t_w 是套管外壁面温度。

整个传热过程是稳态的，所以烟气放热量和水侧吸热量相等，但是烟气流量太大，烟气放热量无法计算，而水侧参数可以准确地获得，所以传热量用水侧吸热量 Q 来表示：

$$Q = c_p m(t_{out} - t_{in}), \tag{3}$$

其中 c_p 是水比热， m 是单位时间内流过试验段的循环水质量， t_{in} 为给水温度， t_{out} 为回水温度。

试验段外管表面积 F 如下式：

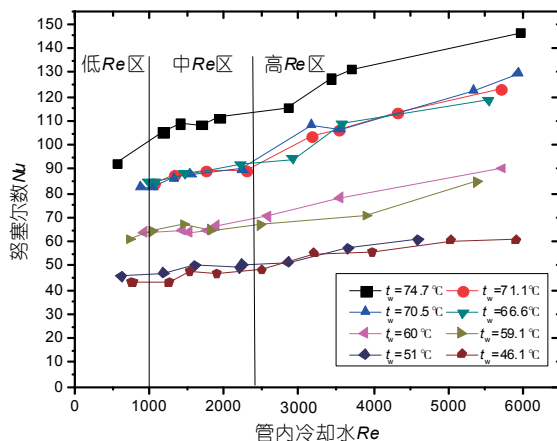
$$F = \pi \times d_0 \times l, \tag{4}$$

其中 l 是插入烟道的套管的长度。

3 试验结果和讨论

3.1 给水 Re 和 Nu 的关系

套管内冷却水的流动状态会影响换热段的传热特性，因此需要讨论给水 Re 和 Nu 的关系。 Nu 随冷却水 Re 的变化如图 3 所示，雷诺数 Re 如下式所示：


 图3 (网络版彩色)管内 Re 对传热特性的影响

$$Re = \frac{w_w \times d_e}{\nu_w}, \quad (5)$$

其中 w_w 是套管内冷却水流量, ν_w 是冷却水的运动黏度, d_e 是套管的当量直径:

$$d_e = d_1 - d_i, \quad (6)$$

其中 d_1 是外管内径, d_i 是内管外径。

如图3所示,根据 Nu 的变化趋势,将其分为3个不同的区域:低 Re 区($Re < 1000$),中 Re 区($1000 < Re < 2300$),高 Re 区($Re > 2300$),每个区域试验段传热特性相差很大。当 Re 小于1000时,套管内冷却水流量很小,由于换热量巨大,局部冷却水很容易汽化并阻碍冷却水流动,严重影响换热。当 Re 处于1000~2300时,套管内冷却水处于层流状态, Nu 不随 Re 升高而变化,试验段传热性能趋于定值,水侧流量的变化对整体传热性能影响很小。当 Re 大于2300时,套管内冷却水处于紊流状态,随冷却水 Re 增加,换热管 Nu 显著增加,试验段传热性能得到强化。本文主要研究套管外部积灰,腐蚀对传热性能影响规律,推测工程酸露点,所以选取中 Re 区的试验数据来避免管内冷却水对 Nu 的影响。

3.2 外壁温 t_w 对 Nu 的影响

Nu 随套管外壁温 t_w 的变化趋势如图4所示,其中 Nu 是各外壁温下中 Re 区 Nu 的平均值,随外壁温下降,试验段整体传热性能下降,63~67℃和52~55℃两个温度骤降区间将 Nu 分成3个工况:工况1($t_w > 67^\circ\text{C}$),工况2($55 \sim 63^\circ\text{C}$),工况3($t_w < 52^\circ\text{C}$)。 Nu 在两个转折区间均发生大幅降低,但在每个工况内变化很小。

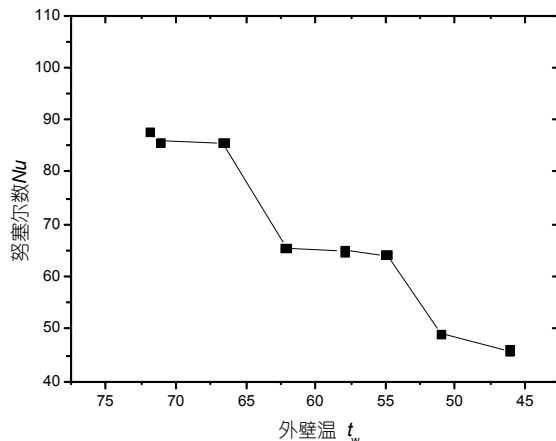


图4 换热管外壁温对传热特性的影响

上述 Nu 的变化主要与套管外壁面上的积灰有关,燃煤机组燃烧过程中,换热面的积灰不可避免。积灰是造成传热恶化的主要原因,但当烟气流速和灰粒浓度一定时,灰层厚度在运行稳定时会保持稳定,分析认为随着外壁温的降低,烟气中的酸和水蒸气会相继凝结在外壁面并与灰发生耦合作用,造成灰层厚度急剧增加,影响传热性能。

当外壁温高于热力学酸露点时,套管外部烟气的湿度为零,外表面的积灰非常干燥,易除去。当外壁温稍微低于热力学酸露点时,试验段传热性能稍微下降,这是由于烟气中少量凝结的酸被灰粒吸收,对传热几乎不造成影响,工况1正是处在这个状态。

试验段在工况1($t_w > 67^\circ\text{C}$)积灰情况如图5所示,由图5可知,套管迎风侧非常干净,并无积灰产生,这是由于此时积灰非常干燥松散,很容易被高流速的烟气吹走。背风侧出现连续的不规则干灰且灰层非常薄,积灰刮开后无任何腐蚀现象,该工况下积灰对传热性能的影响很小。

随着外壁温逐渐降低,烟气中更多硫酸蒸气凝结在换热表面,积灰开始变得潮湿,积灰性质也发生改变。相比工况1,飞灰更容易聚集在换热表面,积灰更加难以除去,传热阻力也逐渐增加,换热性能逐渐降低。当外壁温继续下降,换热段传热性能会达到一个临界点,低于这个温度,传热性能会发生骤降。

实际上, Nu 第一个转折点是一个温度区间(63~67℃),转折区间内试验段的积灰情况如图6所示,由图6可知,由于灰粒变得更潮湿,迎风侧出现少量积灰,但积灰仍干燥、易除去,背风侧存在连续的不规则干灰,积灰同样干燥、易除去,积灰在中心位置最厚,

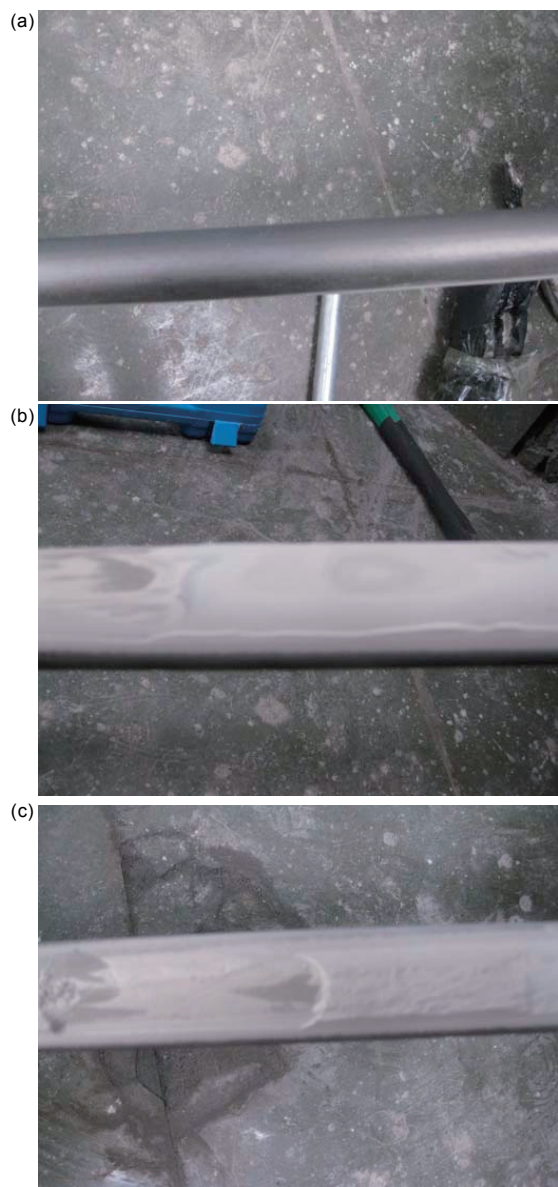


图 5 (网络版彩色)工况 1 试验段积灰情况

(a) 迎风侧积灰情况; (b) 背风侧积灰情况; (c) 背风侧刮开后积灰情况

往两边递减, 灰层下光管表面出现轻微腐蚀迹象.

当外壁温降至第一个骤降区间以下, 试验段进入工况 2 (55~63℃), 该工况下试验段的积灰情况如图 7 所示, 由积灰照片可以看出, 迎风侧表面产生较为严重的板结型积灰; 背风侧表面为较厚的松散型积灰, 积灰潮湿, 很难除去, 且整个灰层下光管表面有较重腐蚀迹象, 证明在此工况下酸结露大量产生.

随着外壁温持续下降, Nu 穿过第二个骤降区间 (52~55℃), 进入工况 3 ($t_w < 52^\circ\text{C}$), 此时试验段积灰情

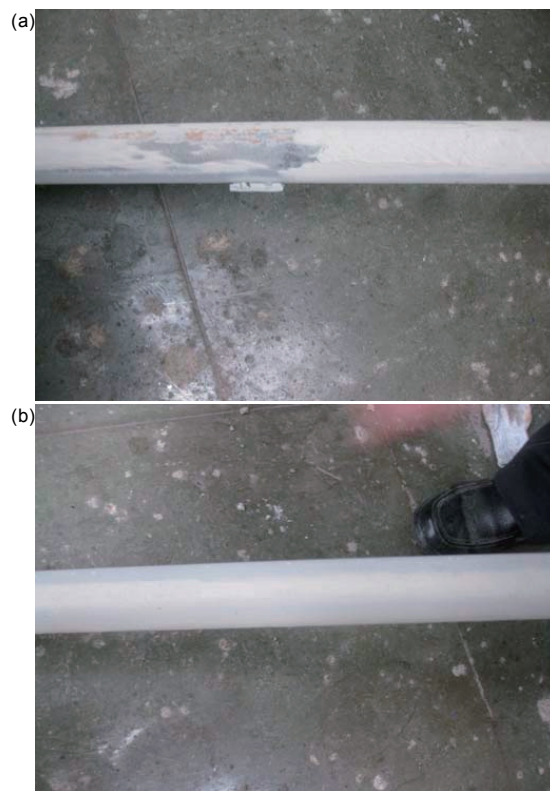


图 6 (网络版彩色)第一个温度转折区间试验段积灰情况

(a) 迎风侧积灰情况(刮开后); (b) 背风侧积灰情况

况如图 8 所示, 由积灰照片可以看出, 整个套管外表面都包围着很厚的积灰, 且其表面布满大量沟壑状痕迹, 积灰潮湿, 很难采取机械吹灰等手段去除, 且灰层刮开后光管表面有严重腐蚀迹象. 这是因为该工况下温度已经低于水露点, 烟气中大量酸和水蒸气凝结在套管表面并与灰结合, 使传热特性迅速恶化.

4 工程酸露点

4.1 定义

由以上分析可知, 当外壁温降至第一个骤降区间时, 酸会大量凝结并与灰发生耦合作用, 使灰层厚度增加, 试验段换热性能急剧下降, 定义此温度区间为工程应用酸露点, 且低于传统热力学酸露点. 本试验随后又在其他几个负荷不同、煤质不同的电厂进行, 得到相同的 Nu 变化趋势和规律.

除了和传统热力学酸露点一样受煤质、 SO_2 浓度和过量空气系数等因素影响外, 工程酸露点还受到烟气中含灰量的影响, 因为如果含灰量较高, 飞灰会更快地与酸耦合, 影响换热效率. 保持排烟温度高于

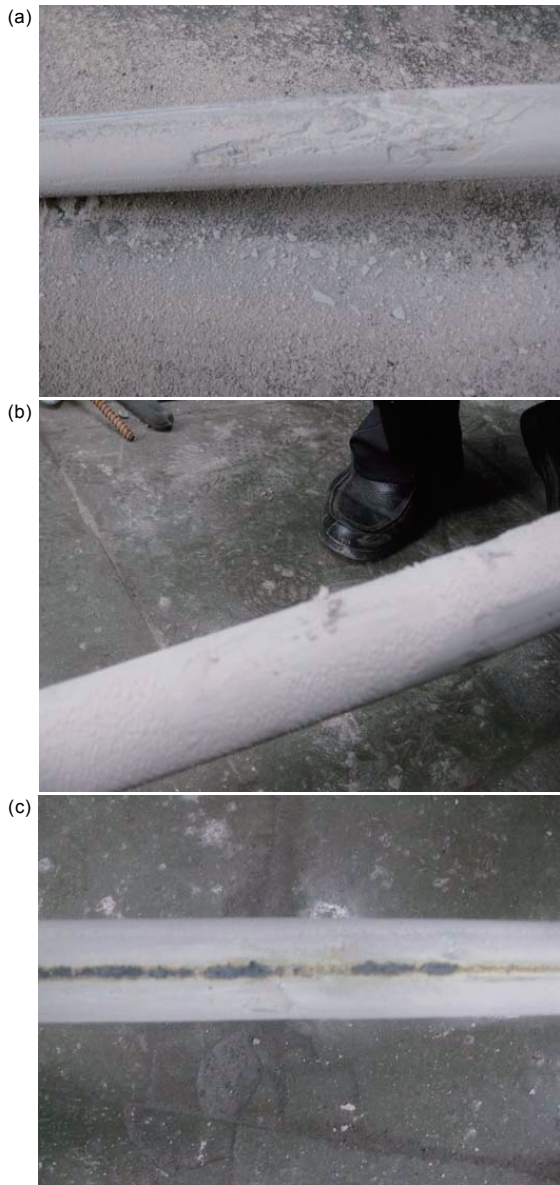


图 7 (网络版彩色)工况 2 试验段积灰情况

(a) 迎风侧积灰情况; (b) 背风侧积灰情况; (c) 背风侧刮开后积灰情况

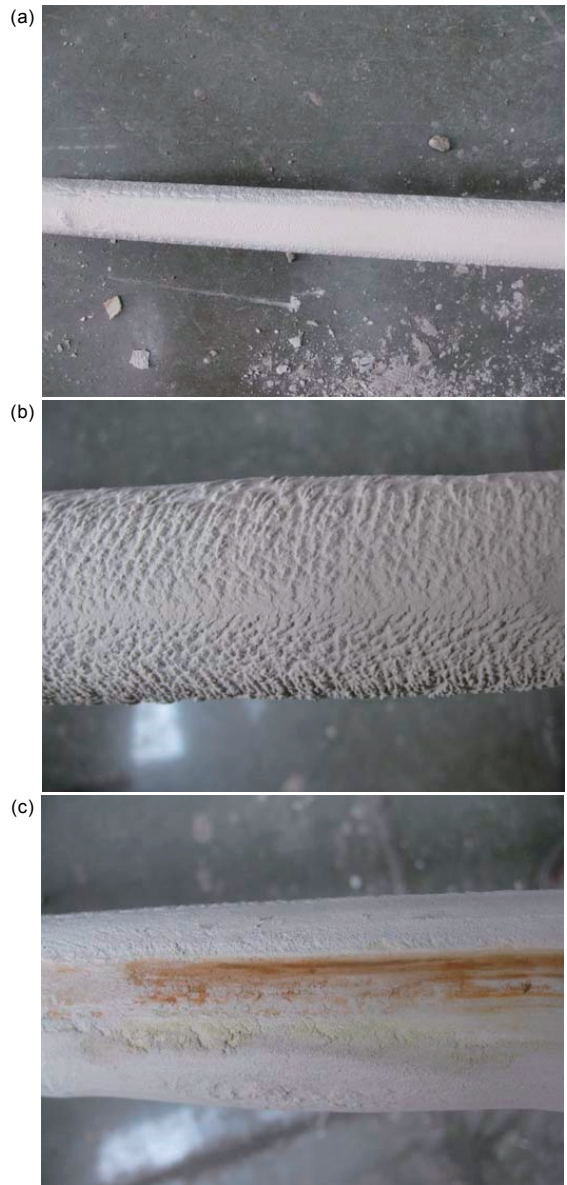


图 8 (网络版彩色)工况 3 试验段积灰情况

(a) 迎风侧积灰情况; (b) 背风侧积灰情况; (c) 背风侧刮开后积灰情况

工程酸露点有两个好处: 第一, 换热器表面的积灰干燥, 松散, 易除去, 对换热影响很小, 换热器的换热效率可以保持在一个较高的水平; 第二, 换热器表面没有腐蚀, 换热器的安全运行得到保证。

4.2 工程酸露点——余热利用系统设计的标准

由上述分析可知, 当换热器处在工程酸露点以上时, 其安全性和换热效率都可以得到保证, 但随着外壁温降低, 换热器进入低于工程酸露点的工况, 换

热性能便会大幅降低, 换热表面腐蚀情况也会加重, 所以应设计余热利用系统的外壁温高于工程烟气酸露点, 对那些采用耐腐蚀材料的换热器来说, 设计外壁温高于工程酸露点同样可以保证很高的换热效率。

一旦机组的工程酸露点被确定, 余热利用系统的设计进水温度应大致与工程酸露点相同, 这样换热器的外壁温就会高于工程酸露点, 从而避免发生腐蚀, 保证换热效率, 如果把进口水温设计到工程酸露点以下, 余热系统的效率和安全性都得不到保证,

一定程度上说,工程酸露点是设计余热利用系统的标准.

4.3 与传统热力学酸露点对比

如图 9 所示,将试验得出的工程酸露点与经验公式计算值进行比较,发现工程酸露点比这些计算值至少低 30°C ,其他不同负荷机组的工程酸露点虽各不相同,但都大大低于本机组的热力学计算酸露点.工程酸露点之所以低于热力学酸露点,是因为工作在工程酸露点以上的试验段,虽然已处于热力学酸露点以下,但由于飞灰的影响,凝结的硫酸被灰粒吸收,并未对试验段的换热和安全性产生影响.相比之下,传统热力学酸露点并没有考虑积灰对换热的影响,如果使用传统酸露点来设计余热利用系统,则会使传热温差较小,换热效率低,因此应用工程酸露点来代替热力学酸露点进行换热器设计.

5 讨论和结论

本文建立了烟气酸露点试验系统,用热力学的方法,讨论了水侧流动情况对换热的影响规律,研究了在不同套管外壁温下,积灰和硫酸凝结对换热器传热性能的综合影响.试验表明:随外壁温下降,试

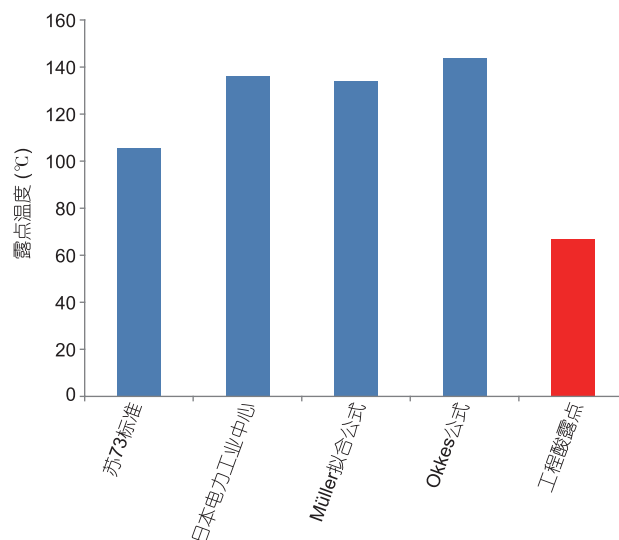


图 9 (网络版彩色)与其他热力学酸露点对比

验段 Nu 整体呈下降趋势,在两个温度区间发生骤降.

第一个温度骤降区间被定义为工程酸露点,设计锅炉低温烟气余热利用系统时应使冷端进水温度不小于工程酸露点,从而使换热器外壁温高于工程酸露点,保证换热效率和设备安全.工程酸露点是余热利用系统设计的新判据,具有非常重要的工程意义.试验表明,工程酸露点比热力学酸露点低 30°C 左右.

参考文献

- 1 Britain Petroleum Company. BP Statistical Review of World Energy, London, 2013
- 2 张方炜. 锅炉烟气余热利用研究. 电力勘探设计, 2010, 4: 48–52
- 3 Hwang K, Song C H, Saito K, et al. Experimental study on titanium heat exchanger used in a gas fired water heater for latent heat recovery. Appl Therm Eng, 2010, 30: 2730–2737
- 4 李彦, 武斌, 徐旭常. SO_2 , SO_3 和 H_2O 对烟气露点温度影响的研究. 环境科学报, 1997, 17: 126–130
- 5 Müller P A. Contribution to the problem of the action of sulfuric acid on the dew point temperature of flue gases. Chem Eng Technol, 1959, 31: 345–350
- 6 贾明生, 凌长明. 烟气酸露点温度的影响因素及其计算方法. 工业锅炉, 2003, 6: 31–35
- 7 Kiyoura R. Measurement of dew point of gases containing low concentrations of H_2SO_4 . Bull Tokyo Inst Technol, 1972, 108: 165
- 8 Verhoff F H, Banchemo J T. Predicting dew points of flue gases. Chem Eng Prog, 1974, 70: 71–72
- 9 Okkes A G. Get acid dew point of flue gas. Hydro Process, 1987, 66: 53–55
- 10 Cen K F, Fan J R. Principle and cacluation to prevent plugging, slagging. Eros Corros Boil Heat Exch, 1994, 21: 34–36
- 11 Bahadori A. Estimation of combustion flue gas acid dew point during heat recovery and efficiency gain. Appl Therm Eng, 2011, 31: 1457–1462
- 12 ZareNezhad B, Aminian A. A multi-layer feed forward neural network model for accurate prediction of flue gas sulfuric acid dew points in process industries. Appl Therm Eng, 2010, 30: 692–696
- 13 温敬平. 烟气酸露点测量仪国内外技术水平分析. 江苏理工大学学报, 1994, 15: 18–21
- 14 陈金玉. 热管式酸露点仪的试验研究. 江苏理工大学学报, 1994, 13: 11–15
- 15 赵之军, 陆逢蔚, 张树奇. 锅炉新型暖风器及其自动控制装置应用实践. 中国电力, 2007, 40: 54–56
- 16 Wang Y G, Zhao Q Y. Mechanism research on coupling effect between dew point corrosion and ash deposition. Appl Therm Eng, 2013, 33: 102–110