

DOI: 10.7652/xjtuxb201703010

H型翅片管换热器烟气低温腐蚀 影响因素实验研究

裴勇, 何雅玲

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为研究换热器的低温腐蚀, 搭建了换热器烟气低温腐蚀实验台。实验台可模拟烟气环境并实现多种因素的定量控制。以工业余热回收中常用的H型翅片管为对象, 进行了H型翅片管换热器烟气低温腐蚀影响因素的实验研究。观察并分析了H型翅片管在不同壁面温度下的表面形貌变化以及腐蚀产物, 得到了不同烟气流量、烟气温度、烟气酸体积分数以及壁面温度对应的酸沉积速率。结果表明: 壁面温度低于水蒸气露点时腐蚀较为严重, 腐蚀机理为吸氧腐蚀; 烟气流量、烟气温度、烟气酸体积分数以及壁面温度对酸沉积速率均有不同程度的影响; 随着烟气酸体积分数从 10×10^{-6} 增加到 50×10^{-6} , 酸沉积速率从 $2.50 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 近似线性增加到 $7.03 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 随着壁面温度从 80°C 降低到 50°C , 酸沉积速率从 $3.06 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $1.75 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 当壁面温度继续降低时, 沉积的酸一部分被冷凝水带走, 导致测得的酸沉积速率减小; 酸雾的生成和黏附对酸沉积速率有较大的影响。研究结果对开发抗低温腐蚀技术、改善烟气余热利用系统提供了实验基础。

关键词: 低温腐蚀; H型翅片管; 烟气; 余热利用

中图分类号: TK172.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)03-0054-08

Experimental Study on the Influencing Factors of Low Temperature Corrosion of H-Type Finned Tube Heat Exchangers

PEI Yong, HE Yaling

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experimental rig was constructed for the study of low temperature corrosion of heat exchangers. The experimental rig can simulate flue gas environment and control multiple factors quantitatively. H-type finned tube heat exchangers widely used in waste heat utilization was used for the experimental study on the influencing factors of low temperature corrosion of H-type finned tube heat exchangers. The changes of surface morphology and corrosion products of H-type finned tube heat exchangers under different tube wall temperatures were observed and analyzed, and the condensation rates of sulphuric acid under different flue gas flux rates, flue gas temperatures, sulphuric acid volume fractions and tube wall temperatures were obtained. The results showed that H-type finned tube heat exchangers are corroded relatively badly when the tube wall temperature is lower than water vapor dewpoint and the corresponding corrosion mechanism is oxygen absorption corrosion. Flue gas flux rate, flue gas temperature, flue gas

收稿日期: 2016-07-14。 作者简介: 裴勇(1992—), 男, 硕士生; 何雅玲(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB228304)。

网络出版时间: 2016-12-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161216.0926.006.html>

sulphuric acid volume fraction and tube wall temperature can influence the condensation rate of sulphuric acid but in different degrees. As flue gas sulphuric acid volume fraction increased from 10×10^{-6} to 50×10^{-6} , the condensation rate of sulphuric acid increased almost linearly from $2.50 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ to $7.03 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; as tube wall temperature decreased from 80°C to 50°C , the condensation rate of sulphuric acid increased from $3.06 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ to $1.75 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. When tube wall temperature decreased further, the measured condensation rate of sulphuric acid decreased because of the heat dissipation of condensed water. The formation of sulphuric acid fog and its adhesion to the tube wall have a great impact on the condensation rate of sulphuric acid. The research results have some guiding significance for developing novel techniques to alleviate low temperature corrosion and improving flue gas waste-heat utilization systems.

Keywords: low temperature corrosion; H-type finned tube heat exchanger; flue gas; waste-heat utilization

能源是人类生存和发展的重要基础,随着我国经济的持续发展,对能源的需求越来越大。根据《BP 世界能源统计 2015》^[1],2014 年我国能源消费量占全球能源消费总量的 23%,而煤炭消费比重达 66%,这其中火力发电又占了煤炭消费的很大部分。为进一步提高火力发电厂的能源利用效率,实现节能减排的目标,余热回收技术已被广泛采用。然而,燃煤中含有的硫元素经燃烧后部分转化为三氧化硫,当烟气温度较低时,三氧化硫与水结合生成硫酸蒸气;若换热器表面温度低于对应的酸露点,硫酸便会冷凝并附着在换热器管壁,进而产生低温腐蚀,导致换热器管壁减薄甚至破裂^[2]。目前,火力发电厂通常采取深度降低排烟温度的方法来提高烟气余热回收量,但这进一步加重了低温腐蚀问题。因此,为解决防低温腐蚀烟气换热器的设计难题,推动中低温烟气余热高效利用相关技术发展,有必要研究各种因素对低温腐蚀的影响规律。

目前,低温腐蚀的实验研究方法主要有取样法^[3]、现场实验法^[4]、浸泡法^[5]、电化学法^[6]以及模拟烟气实验法^[7-8]等。取样法成本较低、操作方便。Roosbeh 等取样研究了从电厂取出的省煤器管,通过 X 射线衍射(XRD)分析发现管子外表面存在 FeSO_4 和 $\text{FeOH}(\text{SO}_4)$,通过能谱仪(EDS)分析发现管子外表面存在大量硫元素,由此推断管子失效的主要原因是低温腐蚀^[3]。现场实验法比较灵活,可信度较高,如李飞等通过将套管换热器置于烟道,研究了烟气环境下换热器的传热和腐蚀特性,提出了具有更高应用价值的“工程应用酸露点”,比传统酸露点低 35°C 以上^[4]。但是,取样法和现场实验法都存在现场工况波动较大、难以单独研究某一个因素

的影响的缺点。浸泡法和电化学法成本较低且实验时间较短。Cheng 等用浸泡法研究了 3 种新型钢材在温度为对应酸露点温度的硫酸中的腐蚀质量损失情况^[5];Díaz 和 Serna 采用电化学方法研究了一种新型衬套材料在 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硫酸溶液中的极化曲线、线性极化阻抗和电化学噪声,发现该衬套材料能很好地抵抗低温腐蚀^[6]。但是,浸泡法和电化学法的实验环境与实际烟气低温腐蚀环境差别很大,实验结果难以用于烟气换热器低温腐蚀过程的分析与腐蚀机理的揭示。为了更好地控制变量和模拟烟气腐蚀环境,研究人员提出了模拟实际烟气环境下低温腐蚀过程的实验方法。Taylor 设计了一个模拟含酸烟气冷凝的实验装置,研究了壁面温度对冷凝酸浓度、酸沉积速率的影响,发现冷凝液浓度只和壁面温度和水蒸气含量有关^[7]。赵钦新等对 6 种钢材在一定温度范围内进行了 72 h 的模拟烟气低温腐蚀实验,发现 ND 钢的抗腐蚀性能最好。然而,已有的模拟烟气实验大多只研究了一到两种因素对低温腐蚀的影响,没有对多种因素的影响进行全面的研究^[8]。

本文设计并搭建了换热器烟气低温腐蚀实验台,可以模拟烟气环境并对多种因素进行定量控制。以余热回收中常用的 H 型翅片管为研究对象,对其在不同工况下进行了腐蚀实验;通过表面观察、XRD 分析以及电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析等方法评估了 H 型翅片管的腐蚀程度,探究了腐蚀机理;在此基础上,通过对比不同工况下计算得到的酸沉积速率,研究了烟气流量、烟气温度、烟气酸体积分数以及壁面温度等因素对低温腐蚀的影响规律。

1 实验系统原理和过程

1.1 实验系统

图 1 为低温腐蚀实验的实验系统图,整个系统由实验段、配气和加热系统、循环水系统以及数据采集系统 4 个部分构成。实验段包括实验段腔体、玻璃视窗和换热器。实验段腔体的通道截面是 120 mm×120 mm 的矩形;为防止尾气污染空气,实验段后端装有尾气处理装置。配气加热系统包括高压气瓶、一次减压阀、球阀、二次减压阀、质量流量控制器、单向阀、混气罐、一次加热器、二次加热器、调功器、硫酸容器、转子流量计和双流体雾化喷嘴。循环水系统由恒温循环水箱构成。数据采集系统包括 T 型铠装热电偶和数据采集器。

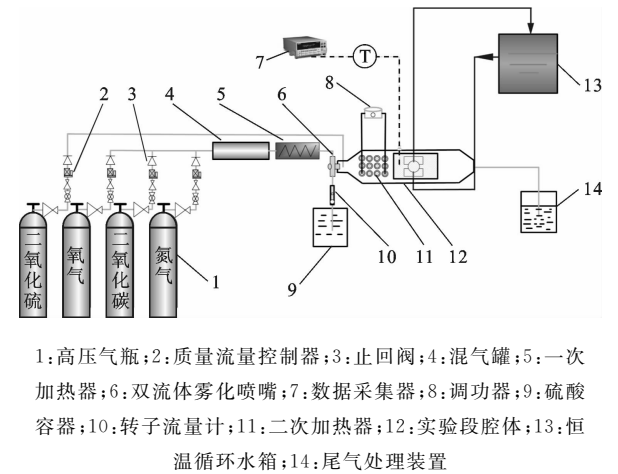


图 1 低温腐蚀实验系统图

1.2 实验原理

实际烟气主要含有氮气、氧气、二氧化碳、二氧化硫、水蒸气和三氧化硫等,其中三氧化硫在烟气温度较低的时候以酸(硫酸)蒸气的形式存在。本实验根据实际烟气组分范围配制了混合气体。通过质量流量控制器控制氮气、氧气、二氧化碳和二氧化硫的流量;通过双流体雾化喷嘴将稀硫酸雾化并使用转子流量计测量和调节稀硫酸流量,从而控制水蒸气和酸蒸气的流量,其中稀硫酸的浓度根据烟气中水蒸气和三氧化硫的比例得到。

另外,利用一次加热器和二次加热器将气体加热,使其达到电厂尾部烟道的烟气温度,而换热器的壁面温度通过循环水系统控制。因为水侧换热系数远远大于烟气侧换热系数,可认为循环水温度和换热器管外壁面温度相等。

本实验主要通过表面观察、XRD 分析以及 ICP-MS 分析等方法来评估腐蚀程度,探究腐蚀机理。

通过表面观察直观地获得换热器表面发生的变化;通过 XRD 分析得到腐蚀产物的晶体组成,进而研究腐蚀反应机理。已有的研究表明,低温腐蚀速率和酸的沉积速率存在一定的比例关系^[9]。因此,本文通过 ICP-MS 测量换热器表面沉积的酸含量,利用据此计算得到的酸沉积速率来表征腐蚀速率。

为了测量换热器表面沉积的酸含量,首先将其进行洗涤,得到洗涤液;然后,通过 ICP-MS 检测洗涤液中 S 元素的含量。酸沉积速率的计算方法如下

$$N_a = \frac{VC}{AtM_a} \tag{1}$$

式中: N_a 为酸沉积速率; V 为洗涤液体积; C 为洗涤液中 S 元素的质量浓度; A 为换热器暴露于烟气中的面积; t 为实验时间; M_a 为硫酸的摩尔质量。

1.3 实验过程

以烟气余热回收中常用的 H 型翅片管为例进行了实验研究,所用 H 型翅片管材料为广泛使用的 20 号碳素钢。图 2 是 H 型翅片管的几何示意图,具体几何参数见表 1。考虑到实验段通道尺寸的限制,每根翅片管只在中间部分焊了 6 排翅片。实验中烟气的成分和工况范围参考了文献[8,10]中的数据,具体如表 2 所示。基准烟气成分和工况为:烟气体积流量 Q_v 为 $105\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,烟气入口温度 T_g 为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,烟气酸体积分数 x_a 为 20×10^{-6} ,翅片管壁面温度 T_w 为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当研究某一个因素的影响时,每次只改变该因素,其他因素和基准工况一致。

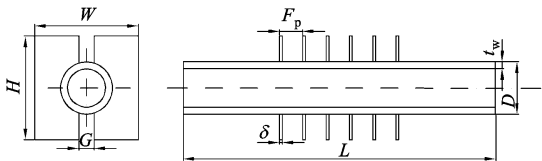


图 2 H 型翅片管的几何示意图

表 1 H 型翅片管几何参数

参数	数值
管外径 D/mm	38
翅片厚度 δ/mm	2
翅片长度 H/mm	75
翅片宽度 W/mm	75
翅片间隙 G/mm	11
翅片间距 F_p/mm	16.9
管壁厚度 t_w/mm	5
翅片管长度 L/mm	226

表 2 烟气成分和实验工况范围

参数	数值
H ₂ SO ₄ 体积分数 $x_a/10^{-6}$	10,20,30,40,50
H ₂ O 体积分数/%	10
SO ₂ 体积分数/ 10^{-6}	700
O ₂ 体积分数/%	6
CO ₂ 体积分数/%	13
N ₂ 体积分数/%	余量
烟气流量 $Q_v/L \cdot \min^{-1}$	35,70,105,140,175
烟气温度 $T_g/^\circ\text{C}$	80,100,120,140,160
壁面温度 $T_w/^\circ\text{C}$	30,40,50,60,70,80

具体实验步骤如下：

(1)开启恒温循环水箱并设定温度；

(2)用砂纸打磨 H 型翅片管,除去表面浮锈,用酒精除油后装入实验段内,根据烟气酸体积分数和
水体积分数配置一定浓度的稀硫酸,并装入稀硫酸
容器；

(3)待恒温水箱水温达到设定值时,打开气瓶开
始通入气体,通过质量流量控制器调节流量,并打开
一次和二次加热器,调节二次加热器加热功率,使得
气体温度达到设定值,然后通过转子流量计调节稀
硫酸流量为设定值；

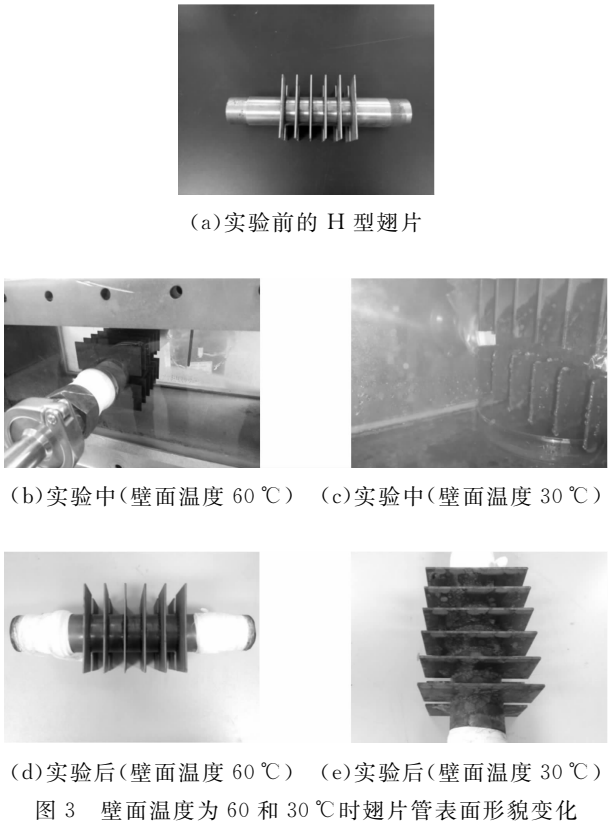
(4)实验 3 h 后关闭加热器、循环水以及气瓶,
取出换热器,进行实验结果分析。

2 实验结果与分析

2.1 宏观形貌和 X 射线衍射分析结果

壁面温度为 60 和 30 ℃时翅片管表面形貌变化
参见图 3。由图 3a 可见,实验前 H 型翅片管表面光
洁。由图 3b、3c 可见,壁面温度为 60 ℃时 H 型翅
片管表面无明显冷凝液产生,30 ℃时翅片管表面有
大量冷凝液产生。其原因为:在水蒸气体积分数为
10%时,对应的水蒸气露点为 46 ℃,而壁面温度为
60 ℃时,比水蒸气露点温度高,没有水冷凝,虽然此
温度低于酸露点,有酸沉积,但是酸沉积速率非常
小,所以短时间内无法观察到冷凝液;壁面温度为
30 ℃时,低于烟气对应的水蒸气露点,有大量水冷
凝。由图 3d、3e 可见:实验后壁面温度为 60 ℃时翅
片管表面失去金属光泽,分析认为由烟气中氧气氧
化以及酸沉积导致;壁面温度为 30 ℃时翅片管表面
有明显的腐蚀现象,呈黄褐色,主要原因是铁和氧气
以及水发生了反应。

壁面温度为 60 和 30 ℃时翅片管表面 X 射线衍



射分析结果参见图 4。由图 4a 可见,只出现了 Fe
的衍射峰,原因是其他晶体成分含量太少,超过了仪
器检测范围。由图 4b 可见,出现了 Fe、Fe₃O₄ 和

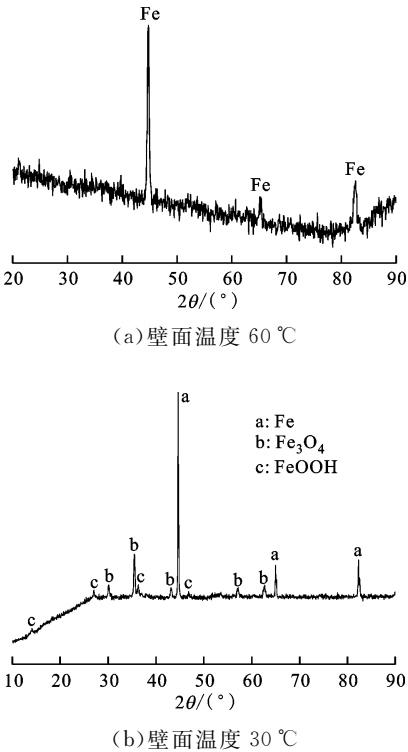


图 4 壁面温度为 60 和 30 ℃时翅片管表面 X 射线衍射结果

FeOOH 的衍射峰,说明 Fe 和 O₂ 以及 H₂O 发生了吸氧腐蚀,其典型的吸氧腐蚀机理如下^[11]。

阳极反应

$$\text{Fe}=\text{Fe}^{2+}+2\text{e} \tag{2}$$

阴极反应

$$8\text{FeOOH}+\text{Fe}^{2+}+2\text{e}=3\text{Fe}_3\text{O}_4+4\text{H}_2\text{O} \tag{3}$$

$$3\text{Fe}_3\text{O}_4+0.75\text{O}_2+4.5\text{H}_2\text{O}=9\text{FeOOH} \tag{4}$$

由以上分析可知,烟气余热利用系统换热器的制造材料的选择除了要考虑抗酸腐蚀性能,还需要考虑抗吸氧腐蚀性能。实际上,在锅炉停炉或者启动时,换热器壁面温度往往会低于烟气对应的水蒸气露点温度,并且这种状态会持续一段时间,因此换热器壁面可能会产生严重的吸氧腐蚀。由实验结果可知,20 号碳素钢的耐吸氧腐蚀性能较差,并不是烟气余热利用系统换热器的理想材料。

2.2 不同因素对酸沉积速率的影响

酸沉积是一个对流传质过程,而影响对流传质速率的主要因素是传质系数和浓度差。烟气流量、烟气温度、烟气酸体积分数以及换热器壁面温度等因素都可能对传质系数和浓度差产生影响,从而影响酸沉积速率,因此需要分别对这些因素进行实验研究。

表 3 将本文测得的酸沉积速率范围和文献中的酸沉积速率范围进行了对比。由表 3 可见,酸沉积速率的数量级均在 10⁻⁷~10⁻⁶ mol·m⁻²·s⁻¹ 之间。由于实验工况以及实验件均不相同,加上酸沉积速率的数量级本身非常小,实验结果基本只能保持数量级一致。本实验测量结果在数量级上和其他实验保持一致,验证了其可信度。

表 3 不同文献的酸沉积速率范围对比

数据来源	酸沉积速率/mol·m ⁻² ·s ⁻¹
本文	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶
文献[8]	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶ (换算得到)
文献[12]	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶
文献[13]	10 ⁻⁷ ~10 ⁻⁶

根据式(1)可以得到 N_a 的相对不确定度的计算公式

$$\frac{\delta N_a}{N_a}=\left(\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2+\left(\frac{\delta t}{t}\right)^2+\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2\right)^{1/2} \tag{5}$$

式中:δN_a、δV、δt、δC 分别为 N_a、V、t 和 C 的不确定度。

经过计算得 N_a 的最大相对不确定度为 1.2%。烟气流量对酸沉积速率的影响参见图 5。由图 5 可

见,随着烟气流量的增大,酸沉积速率总体上有增大的趋势,仅在流量为 35 L·min⁻¹时,酸沉积速率比流量为 70 L·min⁻¹时略大。实验结果和文献[10]的研究结果比较吻合。一方面,当流量增大时,流速增加,对流换热系数增大,而根据热质比拟理论,传质系数也会增大,从而酸沉积被促进;另一方面,由于换热增强,翅片表面温度会增大,酸分压也有所增大^[10],酸蒸气浓度差有所减小,从而酸沉积被抑制。在图 5 中随着流量增大,酸沉积速率总体上增大,这是由于流量增大促进酸沉积的效果更加显著。

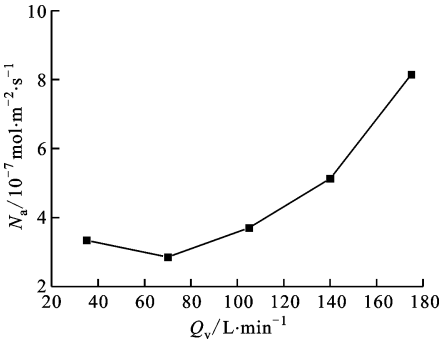


图 5 烟气流量对酸沉积速率的影响

烟气温度对酸沉积速率的影响参见图 6。由图 6 可见,随着烟气温度的降低,酸沉积速率逐渐减小,但在 100℃ 以后开始增大。实验结果和文献[10]的研究结果不一致,但是和文献[14]的报道比较吻合,原因可能是文献[10]没有考虑烟气温度对烟气组分的影响。一方面,随着烟气温度降低,翅片温度减小,酸分压有所减小^[10],酸浓度差会相应增大,酸沉积受到一定的促进。另一方面,由于烟气温度降低,烟气中酸蒸气含量会受到影响,从而酸蒸气浓度差也受到影响,酸沉积可能受到抑制。根据 Verhoff 和 Banchero 提出的酸露点计算公式^[15],计算得到在烟气酸体积分数为 20×10⁻⁶、水蒸气体积分数为 10%时,对应的烟气酸露点为 144℃。实验

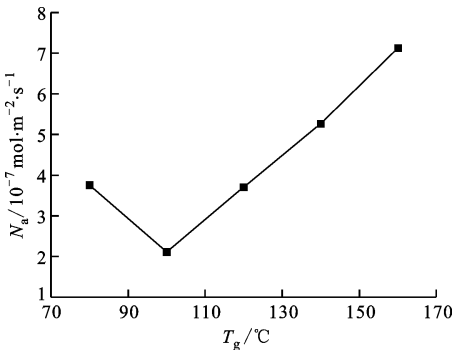


图 6 烟气温度对酸沉积速率的影响

工况对应的烟气温度为 80、100、120、140 和 160 ℃,只有 160 ℃时烟气温度高于酸露点,其余工况烟气温度均低于酸露点。当烟气温度低于对应的酸露点时,酸蒸气处于不稳定的过饱和状态,会发生均相成核,生成硫酸酸雾。烟气温度越低,这种现象会更加明显。由于酸蒸气生成酸雾,导致气相中酸蒸气浓度下降,壁面和烟气之间酸蒸气浓度差减小,传质动力减小,酸沉积受到抑制。另外,酸雾具有黏附能力,会导致测得的酸沉积速率增加。100~160 ℃时对应的酸沉积速率随烟气温度降低而下降,是因为烟气温度降低产生的抑制作用比烟气温度产生的促进作用以及酸雾的黏附作用强。但是,当烟气温度更低时,这种抑制作用比促进作用以及酸雾的黏附作用弱,所以烟气温度为 80 ℃时测得的酸沉积速率有所增加。

烟气酸体积分数对酸沉积速率的影响参见图 7。由图 7 可见,随着烟气酸体积分数增加,酸沉积速率近似线性增加。实验结果和文献[10]的结果吻合。由于酸蒸气含量非常小,其变化对翅片温度、酸分压以及传质系数没有影响。酸沉积速率随烟气酸体积分数增大是因为随着烟气酸体积分数增大,烟气和翅片管壁面之间的酸蒸气浓度差增大,传质动力增大。

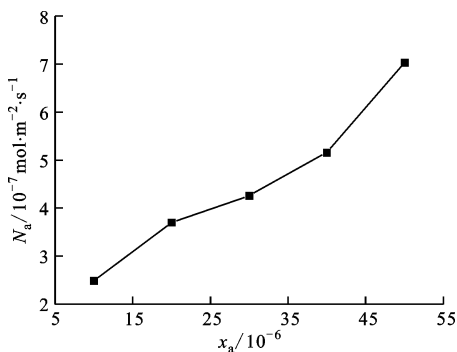


图 7 烟气酸体积分数对酸沉积速率的影响

壁面温度对酸沉积速率的影响参见图 8。由图 8 可见,随着壁面温度从 80 ℃下降到 50 ℃,酸沉积速率总体上逐渐增大,但随着壁面温度降低到水蒸气露点以下,酸沉积速率又开始下降。实验结果和文献[8]的结果吻合,区别主要在于本实验研究了壁面温度在水蒸气露点以下时的酸沉积情况,而文献[8]没有研究到这个范围。图 8 中酸沉积速率随壁面温度的变化可能是由于壁面温度变化引起沉积的酸液浓度改变,从而影响壁面酸分压^[10],而壁面酸分压对酸蒸气传质有重要影响。

为了进一步定量分析壁面酸分压的变化,根据

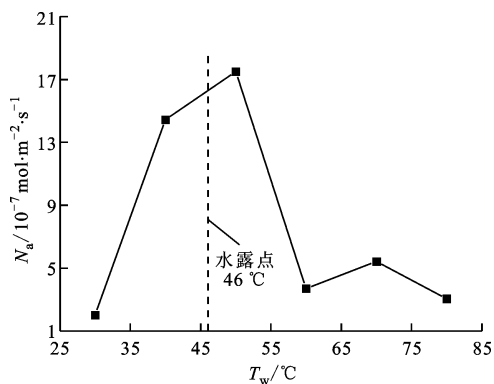


图 8 壁面温度对酸沉积速率的影响

广泛应用的 Gmitro 和 Vermeulen 的气液平衡模型^[16]以及酸分压修正方法^[12]计算了不同温度下 H 型翅片管表面的酸分压,结果如图 9 所示。由图 9 可见,随着表面温度减小,酸分压迅速减小。实验工况范围内,翅片管壁面温度范围为 30~80 ℃,其对应的酸分压远比烟气酸分压小,而翅片表面的平均温度会比管壁温度高,但是会比烟气温度(120 ℃)低。如果按照翅片表面平均温度为 100 ℃来算,此时其对应的酸分压数量级为 10^{-2} Pa,远小于烟气酸分压。即使翅片表面平均温度为 120 ℃,其对应的酸分压仍然比烟气酸分压小一个数量级。另外,当壁面温度为 30、40 ℃时,由于部分表面温度低于烟气水蒸气露点,水大量冷凝,可以认为这部分表面酸分压为 0,所以在实验工况范围内,翅片管表面酸分压的变化对酸浓度差的影响不大,从而对酸沉积速率的影响并不大。

为了理解壁面温度对酸沉积速率的影响,需要考虑其他因素。有研究认为,当壁面温度低于烟气酸露点一定程度时,温度边界层内会产生酸雾^[17]。由前面分析可知,烟气酸体积分数为 20×10^{-6} 、水蒸气体积分数为 10% 时,对应烟气酸露点为 144 ℃,因此即使壁面温度为 80 ℃,也远远低于酸露点温度,壁面附近会产生酸雾,从而降低烟气中酸蒸气含量,减小酸沉积速率,所以 80 ℃时对应的酸沉积速率较小。但是,由于酸雾容易黏附在壁面上,当壁面温度进一步降低,产生更多的酸雾,黏附在壁面的酸雾也会大大增加,导致测得的酸沉积速率增大,所以温度进一步下降时,酸沉积速率逐渐增大。当壁面温度进一步降低至 50 ℃以下,低于水蒸气露点(46 ℃)时,会生成凝结水,由于凝结水的流动,会带走一部分壁面上沉积和黏附的酸,所以测得的沉积速率下降。

由以上分析可知,各种因素对酸沉积速率的影

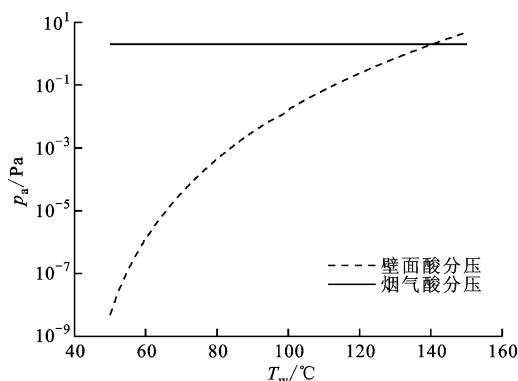


图9 壁面温度对H型翅片管壁面处酸分压的影响

响规律各不相同,而且有些因素的影响规律比较复杂,因此多种因素的综合影响难以简单地预测和表述,这主要是因为酸雾的生成和黏附使得酸沉积由一般的传质问题转变为包含传质、相变和气液两相流动等现象的复杂问题。因此,酸雾的生成和黏附现象值得研究。

3 结 论

本文设计并搭建了换热器烟气低温腐蚀实验系统,在此基础上研究了H型翅片管在模拟烟气中的腐蚀特性,探讨了H型翅片管壁面的腐蚀机理,并分析了烟气流量、烟气温度、烟气酸体积分数以及壁面温度对腐蚀速率的影响规律,得到的主要结论如下。

(1)壁面温度低于水蒸气露点时,腐蚀速率较快,主要腐蚀机理为Fe、H₂O和O₂发生吸氧腐蚀。

(2)在实验工况范围内,随着烟气流量增大,酸沉积速率也增大;随着烟气温度降低,酸沉积速率先减小后增大;随着烟气酸体积分数增加,酸沉积速率近似线性增大;随着壁面温度降低,酸沉积速率增大,当壁面温度低于水蒸气露点时,沉积的酸一部分被冷凝液带走,导致测得的酸沉积速率减小。

(3)酸雾的生成以及黏附对于腐蚀速率有较大影响,其详细机理有待进一步研究。

参考文献:

- [1] BP公司. BP世界能源统计 2015 [R]. 北京: BP公司, 2015.
- [2] 何雅玲, 汤松臻, 王飞龙, 等. 中低温烟气换热器气侧积灰、磨损及腐蚀的研究 [J]. 科学通报, 2016, 61(17): 1858-1876.
HE Yaling, TANG Shongzhen, WANG Feilong, et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchanger for middle and low temperature flue gas waste heat recovery [J]. Chin Sci Bull, 2016, 61(17): 1858-

- 1876.
- [3] MOAKHAR R S, MEHDIPOUR M, GHORBANI M, et al. Investigations of the failure in boilers economizer tubes used in power plants [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2013, 22(9): 2691-2697.
- [4] 李飞, 孙奉仲, 史月涛. 积灰与酸耦合作用下套管换热器传热特性热态实验 [J]. 化工学报, 2014(8): 2876-2881.
LI Fei, SUN Fengzhong, SHI Yuetao. Hot-state experiment on double-pipe heat exchanger under coupled effect of fouling and acid [J]. CIESC Journal, 2014, 65(8): 2876-2881.
- [5] CHENG X Q, SUN F L, LV S J, et al. A new steel with good low-temperature sulfuric acid dew point corrosion resistance [J]. Materials & Corrosion, 2012, 63(7): 598-606.
- [6] DÍAZ E F, SERNA S, PORCAYO-CALDERON J, et al. Corrosion performance of a novel NiAl-Cu intermetallic HVOF protective coating: part I Low temperature corrosion in 0.5 M H₂SO₄ [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2013, 8(5): 7156-7174.
- [7] TAYLOR H D. The condensation of sulphuric acid on cooled surfaces exposed to hot gases containing sulphur trioxide [J]. Transactions of the Faraday Society, 1951, 47(47): 1114-1120.
- [8] 赵钦新, 张知翔, 杜文智, 等. 模拟气氛下硫酸露点的腐蚀试验研究 [J]. 动力工程学报, 2012, 32(5): 420-424.
ZHAO Qinxin, ZHANG Zhixiang, DU Wenzhi, et al. Experimental study on sulfuric acid dewpoint corrosion in simulated atmospheric conditions [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(5): 420-424.
- [9] MOSKOVITS P. Low-temperature boiler corrosion and deposits: a literature review [J]. Industrial & Engineering Chemistry, 2002, 51(10): 1305-1312.
- [10] 韩辉, 何雅玲, 唐桂华. 硫酸蒸气在换热器表面沉积特性的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(11): 7-13.
HAN Hui, HE Yaling, TANG Guihua. Numerical study on deposition characteristics of sulphuric acid vapor on heat exchanger surfaces [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(11): 7-13.
- [11] 龚敏. 金属腐蚀理论及腐蚀控制 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 222-223.
- [12] WILSON R W. Condensation of sulfuric acid and wa-

- ter mixtures in laminar flow [D]. Bethlehem, USA: Lehigh University, 1989.
- [13] ZHANG Z T. Mass transfer processes in flow passages of rotating regenerative air preheaters [D]. Bethlehem, USA: Lehigh University, 1991.
- [14] HOLMES D R. Dewpoint corrosion [M]. Birmingham, Britain: Institution of Corrosion Science and Technology, 1985: 145-146.
- [15] VERHOFF F H, BANCHERO J T. Predicting dew points of flue gases [J]. Chemical Engineering Progress, 1974, 70(8): 71-72.
- [16] GMTRO J I, VERMEULEN T. Vapor-liquid equilibria for aqueous sulfuric acid [J]. AIChE Journal, 1964, 10(5): 740-746.
- [17] ROSNER D E, ARIAS-ZUGASTI M. Estimating transport-shifted acid dew-point surface temperatures and conditions for the avoidance of acid mists in energy recovery operations [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 75: 243-249.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 47 页)

- [8] ŽUKAUSKAS A. Heat transfer from tubes in cross-flow [J]. Advances in Heat Transfer, 1972, 8: 93-160.
- [9] MORGAN V. Heat transfer from cylinders [J]. Advances in Heat Transfer, 1987, 11: 199-264.
- [10] EZZAT A W, ZGHAER H W. Forced convection heat transfer around heated inclined cylinder [J]. International Journal of Computer Applications, 2013, 73(8): 5-11.
- [11] BANERJEE A, ANDREWS M J. A convection heat transfer correlation for a binary air-helium mixture at low Reynolds number [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2007, 129(11): 1494-1505.
- [12] WHITAKER S. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles [J]. AIChE Journal, 1972, 18(2): 361-371.
- [13] MCADAMS W H. Heat transmission [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1954: 30-100.
- [14] COLLIS D C, WILLIAMS M J. Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1959, 6(3): 357-384.
- [15] van der HEGGE ZIJNEN B G. Modified correlation formulae for the heat transfers by natural and by forced convection from horizontal cylinders [J]. Applied Scientific Research, 1956, 6(2/3): 129-140.
- [16] CHURCHILL S W, BERNSTEIN M. A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1977, 99(2): 300-306.
- [17] PERKINS H C, LEPPERT G. Local heat-transfer coefficients on a uniformly heated cylinder [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1964, 7(2): 143-158.
- [18] PARNAS A L. Experimental study of the unsteady air-flow effect on heat transfer of a cylinder in a transverse flow [J]. J Eng Phys, 1964, 7: 37-44.
- [19] DAVIES P, FISHER M J. Heat transfer from electrically heated cylinders [J]. Proceedings of the Royal Society of London: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1964, 280(1383): 486-527.
- [20] ANDREWS G E, BRADLEY D, HUNDY G F. Hot wire anemometer calibration for measurements of small gas velocities [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(10): 1765-1786.
- [21] 王晶, 丁立, 鄢殿福. 不同压力环境下竖直平板表面自然对流散热实验 [J]. 航空学报, 2016, 37(5): 1506-10511.
- WANG Jing, DING Li, QIE Dianfu. Experiment on surface natural convection heat transfer of vertical plate under different pressures [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2016, 37(5): 1506-10511.
- [22] LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDEN M O. NIST standard reference database 23, version 9.0 [DB]. Gaithersburg, MD, USA: US Department of Commerce. Technology Administration. National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [23] 全国法制计量管理计量技术委员会. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2012.
- [24] TSIEN H S. Superaerodynamics, mechanics of rarefied gases [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1946, 13(1): 653-664.

(编辑 荆树蓉)