

DOI: 10.7652/xjtuxb201311002

硫酸蒸气在换热器表面沉积特性的数值研究

韩辉, 何雅玲, 唐桂华

(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: 为了预测换热器表面酸蒸气的凝结行为,发展了一种新的数值计算模型。该模型通过结合 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 溶液的气液平衡实验数据和多元组分传输理论,能够实现壁面附近硫酸溶液(硫酸和水蒸气分压力)和烟气侧组分含量耦合,以及流体和固体界面耦合条件下凝结换热过程的数值求解。通过与已有实验结果的对比,验证了模型的可靠性。模型被用于一种在余热利用场合广泛采用的 H 型翅片管换热器,并给出了换热器表面的酸沉积率和酸液质量分数的分布。分析结果表明:在换热器翅片上,酸液质量分数的三维分布和翅片表面温度分布规律相一致;水蒸气体积分数升高会导致酸液质量分数急剧下降和沉积率上升,增加换热器低温腐蚀的风险;与此相反,增大烟气温度会导致酸液质量分数升高和沉积率下降,降低腐蚀的可能性。

关键词: 余热利用;硫酸蒸气凝结;多元组分传输

中图分类号: TK021.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)11-0007-07

Numerical Study on Deposition Characteristics of Sulfuric Acid Vapor on Heat Exchanger Surfaces

HAN Hui, HE Yaling, TANG Guihua

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

Abstract: A new numerical model was developed to predict the sulfuric acid condensation behavior on the surfaces of heat exchangers. By correlating the vapor-liquid equilibrium (VLE) data of the $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ solution from experiments with the multi-component diffusion theory, the proposed model can obtain the numerical solution of condensation heat transfer under the conditions of the coupled wall and fluid boundary condition and realize the coupling of the multi-components of flue gas and the sulfuric acid solution (saturated partial pressures of sulfuric acid and water vapor) near the wall. The numerical model was validated by the comparison of simulation results and available experimental data, and it was applied to a kind of H-type finned tube heat exchanger widely used in the field of waste heat recovery. The distributions of condensation rate and condensate mass fraction on the fin surface were achieved. The results show that the three-dimensional distribution of the acid solution mass fraction is consistent with that of the fin temperature. The increase in water vapor could result in a sharp reduction of the acid solution mass fraction and an increase in deposition, leading to a serious risk of low temperature corrosion. In contrast, increasing the flue gas temperature will reduce the corrosion risk by reducing the condensation rate and increasing the acid mass fraction.

Keywords: waste heat recovery; sulfuric acid vapor deposition; multi-component transfer

收稿日期: 2013-03-11。 作者简介: 韩辉(1984—),男,博士生;何雅玲(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB228304);NSFC-广东联合基金重点资助项目(U0934005)。

网络出版时间: 2013-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130723.1156.004.html>

工业上广泛应用的空气预热器、省煤器、凝结式换热器等是回收低品位热能的关键热交换设备。当换热设备表面温度低于烟气的露点温度时,烟气中硫酸和水蒸气将在设备表面凝结,含硫烟气凝结形成的酸液会造成金属设备的低温腐蚀和运行失效。酸的沉积率和金属腐蚀速率间存在一定的比例对应关系,计算酸的沉积率和冷凝酸液的浓度是预测换热器表面低温腐蚀的有效手段^[1]。

伴随着不凝结气体的存在,烟气中硫酸和水蒸气的沉积是一个复杂的热质传递过程,即是酸蒸气、水蒸气和空气的三元混合物的热质传递过程。要研究酸沉积率及凝结的酸液浓度,需解决两个复杂问题:一是由边界上凝结的酸液所对应的饱和分压力与烟气中酸和水蒸气之间浓度差所引起的传质过程;二是烟气中多元组分向冷凝壁面的扩散问题。

含不凝结气体的凝结换热过程,文献中已有相关的报道。Webb 通过求解 Colburn-Hougen 方程研究了水蒸气凝结对翅片管换热器性能的影响^[2]。Osakabe 等实验研究了不锈钢光管以及翅片管换热器在实际烟气中的凝结换热性能^[3-4]。Wang 等对翅片管换热器在干湿条件下的性能进行了实验研究,并可视化地研究了换热器表面的除湿现象^[5-7]。Jeong 等开发了一种分析模型用于预测电站尾部烟道中换热器设备的热质传递特性,并进行了中试实验^[8]。Shi 等实验给出了紧凑型换热器回收烟气潜热和显热时的性能数据^[9]。Comini 等提出了一种模拟含湿空气在换热器表面冷凝过程的数值方法,并分析了湿工况下翅片表面局部凝结换热特性^[10]。

先前的研究大都只关注水蒸气在冷却表面的凝结换热,很少关注其他组分。当研究涉及余热回收时,酸蒸气同样需要考虑。在同时考虑硫酸和水蒸气的凝结时,建立气液界面处的数学描述是一项复杂的工作。Abel 最先推导了硫酸水溶液的逸度方程并假定气相为理想气体^[11]。Gmitro 等采用新的热力学参数修正了 Abel 提出的逸度方程^[12]。Wilson 等重新评估了液相逸度表达式的系数并考虑了酸组分和水的溶解作用,改善了硫酸分压力的预测精度^[13]。Pessoa 等采用 Prigogine 和 Defay 的化学理论推导了一种新模型用来计算 $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液的气液平衡,模型同时考虑了液相的解离反应和气相复杂的生成反应^[14]。最近,随着计算流体力学的发展,采用数值方法研究实际设备的局部腐蚀特性成为可能。Vorgelegt 采用 FLUENT 软件模拟了含硝酸、硫酸和水蒸气的烟气在垂直水冷壁上的

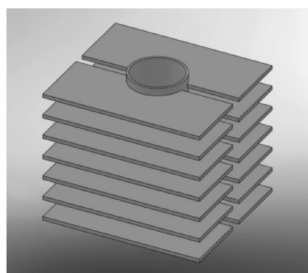
凝结过程,但计算中露点温度被假定为常数^[15]。

本文发展了一种数值模型,用于预测存在不凝结气体时硫酸和水蒸气的凝结过程。模型通过求解气液平衡条件得到酸和水蒸气在壁面处的复杂边界条件,通过计算多元组分扩散得到组分的分布和输运特性。模型在 FLUENT 上实现并结合了用户自定义程序,通过给出换热器表面冷凝酸液的分布云图,对局部酸凝结行为提供了可视化解理解。该数值模型具有较好的普适性,能够适用于较大的温差区间以及复杂的几何模型。通过与实验对比,模型的可靠性得到了验证。一种典型的用于余热回收的 H 型翅片被选作模型的应用对象,分析了烟气流速、烟气温度以及组分体积分数等因素对换热器表面酸凝结特性的影响。

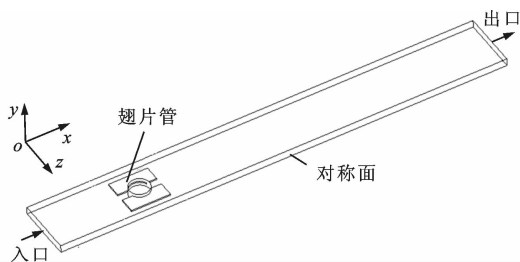
1 模型描述

1.1 物理模型

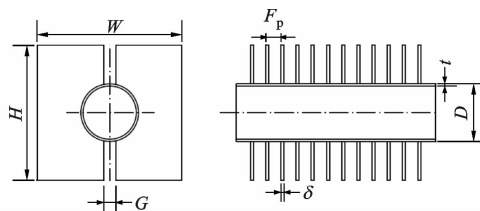
图 1a 是本文研究的 H 型翅片管换热器核心区的示意图。图 1b 是所取的计算区域,图中气流方向



(a)翅片核心区



(b)计算区域



(c)H型翅片几何示意

图1 H型翅片管换热器示意图

沿 x 方向,翅片间距沿 y 方向,翅片宽度沿 z 方向。沿流动方向取 1 排管,入口和出口段分别向上下游延长 1 倍和 5 倍的管间距长度。图 1c 是 H 型翅片的几何示意图,具体的几何尺寸和计算条件见表 1。计算中做如下假设:

- (1)假定烟气的成分为硫酸蒸气、水蒸气和空气的三元混合物;
- (2)忽略壁面液膜的热阻(液膜对总传热热阻的影响小于 3%);
- (3)只考虑壁面上的凝结,忽略气相中的凝结;
- (4)假定液膜温度为壁面温度;
- (5)忽略管壁导热热阻,管壁温度恒定。

1.2 控制方程

假定流动过程为三维稳态不可压缩,计算时考虑翅片通道内的传质以及翅片和流体间的耦合传热,同时考虑翅片的厚度以及翅片内部的导热。在计算区域内求解连续性、动量、组分和能量方程如下

$$\nabla \cdot U = 0 \tag{1}$$

$$\rho U \cdot \nabla U = -\nabla p + \mu \nabla^2 U \tag{2}$$

$$\rho U \cdot \nabla y_i = \nabla \cdot \left[\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla y_i \right] \tag{3}$$

$$\rho U \cdot \nabla T = \frac{k}{c_p} \nabla^2 T \tag{4}$$

式中: y_i 为组分 i 的质量分数; $D_{i,m}$ 为组分 i 的质量扩散系数; Sc_t 是湍流有效 Schmidt 数。

当前研究的 Reynolds 数范围为 9 700~19 000,考虑湍流脉动对流动的影响,采用湍流 RNG $k-\epsilon$ 模型

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t S^2 - \rho \epsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \tag{6}$$

当前计算的边界条件为:入口采用速度边界,流速均匀,给定入口温度和组分质量分数;计算区域的前后面施加对称边界;上下面采用周期性边界;出口为自由出流;管壁为常温;管壁和翅片表面为无滑移流动条件。湍流强度通过 FLUENT 的关联式 $I = 0.16Re^{-1/8}$ 计算。

硫酸和水蒸气沉积率的计算表达式为

$$m_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla y_i \tag{7}$$

对于酸蒸气和水蒸气在壁面处的边界条件及组分扩散,计算过程比较复杂,下面做专门讨论。

表 1 换热器的几何尺寸和计算条件

参数	数值
管外径 D/mm	38
翅片厚度 δ/mm	3
翅片长度 H/mm	89
翅片宽度 W/mm	95
翅片间隙 G/mm	8
翅片间距 F_p/mm	14.5
纵向管间距 P_l/mm	120
横向管间距 P_t/mm	120
翅片材料	钢
	$k=50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
烟气流速 $u_{in}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	5~10
烟气温度 T_{in}/K	370~420
管壁温 T_w/K	350
酸蒸气体积分数 $x_a/10^{-6}$	5~30
水蒸气体积分数 $x_w/\%$	2~18

1.3 气液平衡和界面边界条件

当换热器壁面局部温度低于酸露点温度时,硫酸蒸气结合水蒸气凝结。界面处酸蒸气和水蒸气的饱和分压采用 Gmitro 和 Vermeulen 气液平衡模型进行计算^[12]

$$\ln p_i = a_i A + b_i B + c_i C + \Delta H_i^v D + \Delta S_i^v E + \bar{C}_{p_i}^l F + \bar{L}_i^l G + \alpha_i H + \ln \bar{a}_i \tag{8}$$

式中: p_i 为溶液的相界面处对应的酸分压或者水分压。方程(8)右侧前 5 项为纯组分热力学参数,其余为组分依赖参数^[16]。为改善酸分压的计算精度,引入逸度修正系数

$$p_{i,o} = \frac{p_i}{\phi_{i,o}} \tag{9}$$

$$\phi_{i,o} = \frac{\bar{f}_w^l}{\bar{f}_w^l + K_0 + K_1 (\bar{f}_w^l)^2} \tag{10}$$

式中: p_i 为硫酸单分子分压; $p_{i,o}$ 为表观酸分压; $\phi_{i,o}$ 为表观逸度系数; K_1 、 K_2 为反应平衡常数。

虽然式(8)提供了相界面处各组分分压的计算方法,但由于凝结位置、冷凝酸液质量分数均未知,并且水蒸气和酸蒸气的边界条件相互依赖,因此采用迭代方法确定边界条件,详细步骤如下。

- (1)假定壁面附近烟气中水蒸气质量分数为 y_w ,迭代求解方程(8)得到酸液摩尔分数 c_a 。
- (2)计算并修正酸液对应的饱和分压 $p_{s,a}$ 。

(3) 如果 $p_{s,a} < p_a$ (近壁面烟气中的酸分压), 则由步骤(2)得到的硫酸质量分数 y_a 为酸组分边界条件; 如果相反, 则没有凝结, 壁面边界为

$$\frac{\partial y_a}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

(4) 通过方程(7), 计算硫酸的质量沉积率 m_a 。

(5) 由酸液质量分数, 计算水蒸气沉积率 m_w 。

(6) 根据方程(7)计算界面处水蒸气的质量分数 y'_w , 并修正步骤(1)中的水蒸气边界条件 y_w 。

(7) 重复步骤(2)~(6), 直到迭代计算收敛。

1.4 组分扩散和源项

为计算水蒸气和硫酸蒸气的沉积率, 需要烟气中各种组分的扩散系数。多元组分扩散系数受组分体积分数的影响, 因此计算采用有效扩散系数

$$D_{i,\text{eff}} = \left[(1 - x_i) / \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{x_j}{D_{ij}} \right] \quad (12)$$

式中: $D_{i,\text{eff}}$ 是混合物中组分 i 的质量扩散系数; D_{ij} 是组分的二元扩散系数。

当凝结发生时, 烟气中相应的组分凝结减少并释放潜热。对于靠近壁面的烟气侧网格, 当发生凝结时, 连续性、组分和能量方程的源项为

$$S_m = -m_i A_{\text{face}} / V_{\text{cell}}; \quad S_e = -m_i r_i A_{\text{face}} / V_{\text{cell}} \quad (13)$$

式中: A_{face} 是发生凝结的界面处网格的面积; V_{cell} 是毗邻凝结表面的网格体积; r_i 为蒸气的潜热, J/kg。

为了便于计算结果的统计, 定义整个翅片表面的平均沉积率为

$$N_a = \frac{\sum m_i dA_i}{\sum dA_i} \quad (14)$$

1.5 数值求解格式和方法

采用 FLUENT 软件求解 1.2 小节描述的控制方程; 通过用户自定义的函数访问求解器变量, 求解 1.3 和 1.4 小节所示硫酸和水蒸气的边界条件、沉积率、源项等。控制方程对流项的离散采用二阶迎风, 速度压力耦合采用 SIMPLE 算法。动量方程的收敛判据为残差小于 1.0×10^{-4} , 其他方程的收敛判据为残差小于 1.0×10^{-7} 。

对湍流流动, 近壁面网格的质量是保证数值求解精度的关键。前处理器 GAMBIT 用来生成所需要的计算网格, 网格拓扑如图 2 所示。为确保网格独立性, 分别采用不同的网格数目。当进一步增加网格数量、换热系数和沉积率的变化小于 5% 时, 认为网格数已独立, 计算采用的网格数为 94 万。

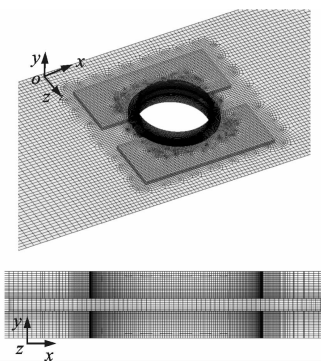


图 2 计算网格

2 数值验证

为验证方法的可靠性, 对文献报道的 1 种圆管通道模型进行了数值验证^[17], 管长为 0.315 m, 直径为 0.01 m。计算条件包括: $u_{\text{in}} = 5$ m/s, $x_{\text{in},w} = 6\%$, $x_{\text{in},a} = 5 \times 10^{-6}$, $T_{\text{in}} = 414$ K, $T_w = 350$ K。图 3 是沉积率沿着流动方向的变化曲线。数值模拟结果的变化趋势与实验结果相一致, 数值结果和实验的一致性表明当前的数值模型可靠。

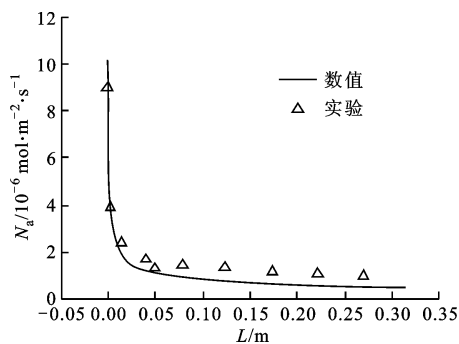


图 3 实验和模拟结果的比较

3 结果讨论

本节在烟气流速为 5~10 m/s 的范围内, 研究了翅片表面沉积率和酸液质量分数的分布特性, 表 1 给出了相关参数的变化范围。

3.1 翅片表面的沉积特性

图 4 是不同流速下翅片表面的温度、酸液质量分数和沉积率的分布。由图可见, 酸液质量分数 y_a 的分布和翅片表面温度的分布规律相一致。翅片上温度较高的区域酸液质量分数较大, 随着流速增加, 翅片表面温度和硫酸溶液质量分数均有所增加。类似地, 沉积率随流速增加而逐渐增大。对于 3 种不同的流动口速度, 沉积率的分布趋势一致, 沉积率从入口到出口逐渐减小, 而从翅片外缘到靠近管壁区

域逐渐增大。这是由于在翅片前缘烟气中酸组分体积分数较大,而管子前缘处对应的酸蒸气分压力较低,较大的传质动力使得局部的沉积率较大。尤其在管子前缘,较低的酸液质量分数和较高的沉积率可能导致局部严重的低温腐蚀。

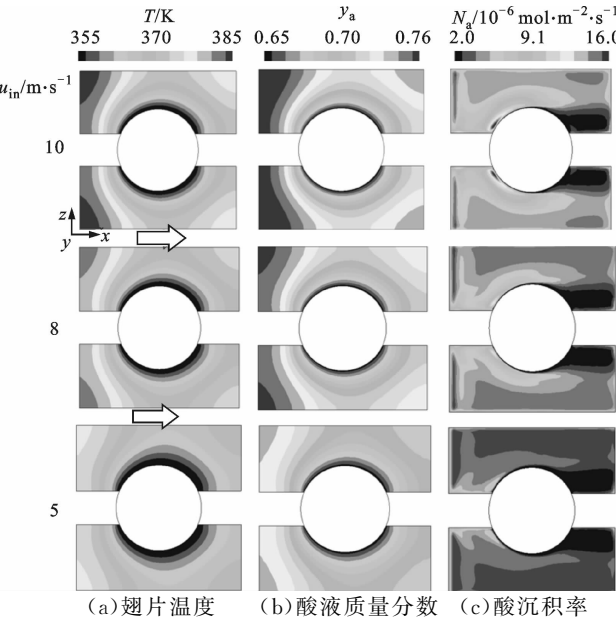


图 4 不同温度下翅片表面参数分布

3.2 影响因素分析

下面分别分析烟气流速、烟气温度、酸蒸气和水蒸气体积分数对酸液质量分数和沉积率的影响。

图 5 是入口烟气流速对沉积率和冷凝酸液质量分数的影响,可以看出整个翅片表面的平均沉积率和酸液质量分数均随烟气流速增加而增大,而增加趋势略有不同。这是因为随着流速的增加翅片温度相应地升高,进而导致酸液质量分数增大,而影响沉积率的因素体现在两个方面,一方面增加流速降低了传质的阻力引起沉积率升高,另一方面酸液质量分数的升高导致酸饱和分压力增大,在一定程度上降低了传质的驱动力。显然,流速增加对酸凝结的促进作用更为显著,10 m/s 时的沉积率约为 5 m/s 时的 2 倍。与此同时,酸液质量分数随着壁面温度升高而略有增加,在当前研究的速度范围内仅增大了 2.7%。

图 6 是烟气中酸组分的体积分数对沉积率和酸液质量分数的影响。从图 6a 可以看出,随着烟气中酸组分体积分数的升高,酸沉积率线性增加。这是由于随着酸蒸气体积分数的增加,翅片表面和流体间的酸蒸气浓度差增大,传质动力增加,导致了沉积率的升高。在 3 种不同流速条件下,沉积率随酸体积分数的升高均增加了约 5 倍,这与烟气中酸组分的

增加量相一致。另外,从图 6b 可以看出,酸液质量分数不随烟气中酸组分体积分数的改变而变化。

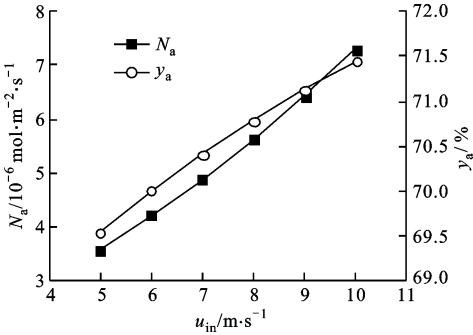
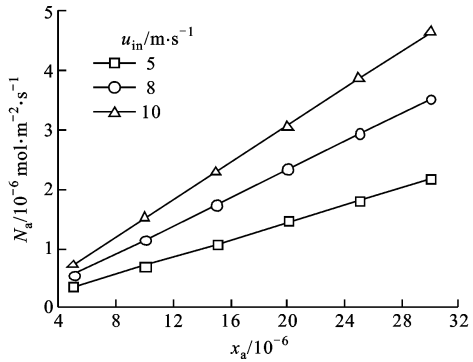
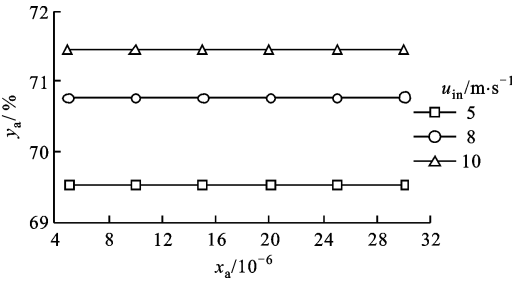


图 5 烟气流速对沉积率和冷凝酸液质量分数的影响



(a)酸沉积率随酸蒸气体积分数的变化

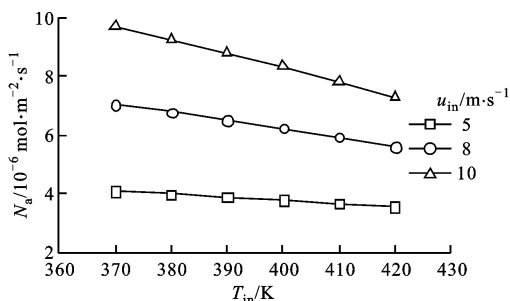


(b)酸液质量分数随酸蒸气体积分数的变化

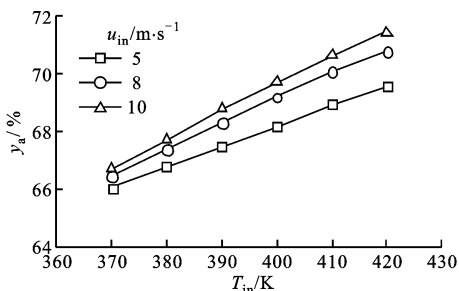
图 6 酸蒸气体积分数对沉积率和酸液质量分数的影响

图 7 是入口烟气温度对沉积率和冷凝酸液质量分数的影响。从图 7a 可以看出,较高的烟气温度不利于硫酸的沉积,沉积率随温度升高而降低。烟气温度越高,翅片表面饱和酸分压越高,传质的驱动力相应越小。随着来流速度的降低,烟气温度对沉积率的影响逐渐减小。对当前计算的温度范围,在流速为 10 m/s 时,沉积率降低了 25%;流速为 8 m/s 时,沉积率降低了 20.4%;流速为 5 m/s 时,沉积率降低了 12.9%。与此同时,酸液质量分数随烟气温度升高而增大,对应 5、8、10 m/s 时,酸液质量分数分别增大了 5.3%、6.5%和 7.1%。

图 8 是烟气中水蒸气体积分数对沉积率和酸液

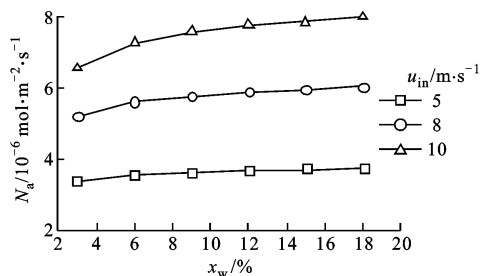


(a) 酸沉积率随烟气温度的变化

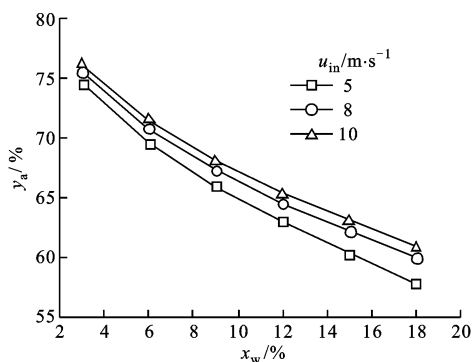


(b) 酸液质量分数随烟气温度的变化

图7 烟气温度对沉积率和酸液质量分数的影响



(a) 酸沉积率随水蒸气体积分数的变化



(b) 酸液质量分数随水蒸气体积分数的变化

图8 水蒸气体积分数对沉积率和酸液质量分数的影响

质量分数的影响。从图8a可以看出,沉积率随水蒸气体积分数升高而略微增大。此外,随着烟气中水蒸气体积分数增加,水的传质动力增加,水的沉积率增大,使得酸液质量分数下降。较低的酸液质量分数导致翅片表面酸分压力降低,这在一定程度上增加了酸的沉积率。但是,水蒸气体积分数对酸沉积

率的影响并不是特别重要,这是因为翅片表面的酸分压已远低于烟气中酸蒸气体积分数,进一步降低酸分压并不会导致沉积率的明显变化。当水蒸气的体积分数从3%变化到18%时,对应5、8、10 m/s 3种流速条件,沉积率分别增加了9.6%、16.1%和21.8%,而酸液质量分数则降低了22.4%、20.7%和20.1%。

4 结 论

本文建立了预测酸蒸气在换热器表面沉积特性的数值模型,利用该模型对广泛用于余热回收场合的H型翅片进行了数值分析,给出冷凝的酸液质量分数和酸沉积率在翅片表面的分布,计算结果可进一步为换热器防腐设计提供参考。同时,本文分析了烟气流速、入口条件等因素对酸沉积率的影响,主要结论如下。

(1)翅片表面酸液质量分数分布和翅片温度分布规律相一致。翅片温度越高相应的酸液质量分数越大;酸沉积主要位于翅片前缘及靠近管壁的横向管间。

(2)增加流速,换热器表面的酸沉积率增加,翅片表面温度和冷凝的酸液质量分数增大。

(3)酸沉积率随烟气中酸组分体积分数的增加而线性增大,而冷凝酸液的质量分数几乎不受该因素的影响。

(4)随着烟气温度升高,翅片表面温度和酸液质量分数增大,酸饱和分压力升高,酸沉积率下降。

(5)增加烟气中水蒸气体积分数,水的沉积率增大,冷凝酸液的质量分数降低,酸饱和分压力降低,对应酸沉积率增大。

参考文献:

- [1] MOSKOVITS P D. Low-temperature boiler corrosion and deposits; a literature review [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1959, 51(10): 1305-1311.
- [2] WEBB R L, WANNIARACHCHI A S. The effect of non-condensable gases in water chiller condensers: literature survey and theoretical predictions [J]. ASHRAE Transaction, 1980, 86(1): 142-159.
- [3] OSAKABE M. Latent heat recovery from oxygen-combustion flue gas [C]//Proceedings of the 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit. Las Vegas, USA: AIAA, 2000: 8004-8012.
- [4] OSAKABE M, YAGI K, ITOH T, et al. Condensation heat transfer on tubes in actual flue gas; paramet-

- ric study for condensation behavior [J]. Heat Transfer: Asia Research, 2003, 32(2): 153-166.
- [5] WANG C C, HSIEH Y C, LIN Y T. Performance of plate finned tube heat exchangers under dehumidifying conditions [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1997, 119(1): 119-117.
- [6] WANG C C, LIN Y T, LEE C J. Heat and momentum transfer for compact louvered fin-and-tube heat exchangers in wet conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(18): 3443-3452.
- [7] WANG C C, LEE W S, SHEU W J, et al. Parametric study of the air-side performance of slit fin-and-tube heat exchangers in wet conditions [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2001, 215(9): 1111-1121.
- [8] JEONG K, KESSEN M J, BILIRGEN H, et al. Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(11/12): 2361-2368.
- [9] SHI X J, CHE D F, AGNEW B, et al. An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(1/2/3): 606-615.
- [10] COMINI G, NONINO C, SAVINO S. Numerical evaluation of fin performance under dehumidifying conditions [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2007, 129(10): 1395-1402.
- [11] ABEL E. The vapor phase above the system sulfuric acid-water [J]. Journal of Physical Chemistry, 1946, 50(3): 260-282.
- [12] GMTRO J I, VERMEULEN T. Vapor-liquid equilibria for aqueous sulfuric acid [J]. AIChE Journal, 1964, 10(5): 740-746.
- [13] WILSON R W, STEIN F P. Correlation of sulfuric acid-water partial pressures [J]. Fluid Phase Equilibria, 1989, 53: 279-288.
- [14] PESSOA F L P, SIQUEIRA CAMPOS C E P, ULLER A M C. Calculation of vapor-liquid equilibria in aqueous sulfuric acid solutions using the UNIQUAC equation in the whole concentration range [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(15): 5170-5175.
- [15] VORGELEGT V. Condensation of water vapor and acid mixtures from exhaust gases [D]. Berlin, Germany: Technical University of Berlin, 2004.
- [16] GIAUQUE W F, HORNUNG E W, KUNZLER J E, et al. The thermodynamic properties of aqueous sulfuric acid solutions and hydrates from 15 to 300 K [J]. Journal of the American Chemical Society, 1960, 82(1): 62-67.
- [17] WILSON R W. Condensation of sulfuric acid and water mixtures in laminar flow [D]. Bethlehem, USA: Lehigh University, 1989.
- [本刊相关文献链接]**
- 席奂,李明佳,何雅玲,等. CE 图——一种余热利用循环及工质选择的定量评价方法. 2013, 47(9): 8-15. [doi: 10. 7652/xjtuxb201309002]
- 张薇,彭学院,尤利超,等. 余热直接利用型燃气机热泵变速特性实验研究. 2013, 47(8): 141-144. [doi: 10. 7652/xjtuxb201308024]
- 蔡君伟,孙皖,李斌,等. -150℃逆布雷顿空气制冷机动态温降特性研究. 2013, 47(3): 60-63. [doi: 10. 7652/xjtuxb201303011]
- 王斯民,文键. 无短路区新型螺旋折流板换热器换热性能的实验研究. 2012, 46(9): 12-15. [doi: 10. 7652/xjtuxb201209003]
- 张侨禹,赵红利,侯予. 间壁式筛网网格换热器的性能分析. 2012, 46(1): 24-29. [doi: 10. 7652/xjtuxb201201005]
- 闫柯,葛梦然,高军,等. 空间锥螺旋管束流体诱导振动换热器及性能分析. 2011, 45(11): 22-26. [doi: 10. 7652/xjtuxb201111005]
- 何伟峰,戴义平. 环境风速对空冷凝汽器运行性能的影响. 2011, 45(5): 31-35. [doi: 10. 7652/xjtuxb201105006]
- 郭宪民,王善云,汪伟华,等. 环境参数对空气源热泵蒸发器表面霜层影响研究. 2011, 45(3): 30-34. [doi: 10. 7652/xjtuxb201103005]
- 常勇强,杨震,赵振兴,等. 蛇形管平行通道中高压气体的对流换热特性研究. 2011, 45(3): 53-57. [doi: 10. 7652/xjtuxb201103010]
- 赵振兴,杨震,刘宏,等. 煤粉加压气化炉膜式螺旋管和蛇形管对流传热特性研究. 2011, 45(1): 10-14. [doi: 10. 7652/xjtuxb201101003]
- 何伟峰,戴义平,马庆中,等. 环境风影响下直接空冷单元背压预测研究. 2011, 45(1): 15-20. [doi: 10. 7652/xjtuxb201101004]
- 李程,巫江虹,崔晓龙,等. CO₂ 微通道气体冷却器压降与传热特性研究. 2010, 44(9): 48-53. [doi: 10. 7652/xjtuxb201009010]
- 黄东,贾杰楠. 室外换热器流路布置对热泵空调器的性能影响分析. 2010, 44(7): 33-37. [doi: 10. 7652/xjtuxb201007008]
- 赵敏,厉彦忠. 丙烷预冷混合制冷剂液化流程中原料气与制冷剂匹配研究. 2010, 44(2): 108-112. [doi: 10. 7652/xjtuxb201002022]

(编辑 荆树蓉)