



引用格式:王世佳,何世权.应用于脱硫废水处理的蒸发器模拟仿真[J].轻工学报,2019,34(5):103-108.

中图分类号:TK05 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2019.05.014

文章编号:2096-1553(2019)05-00103-06

应用于脱硫废水处理的蒸发器模拟仿真

Simulation of evaporator applied to desulfurization wastewater treatment

王世佳,何世权

WANG Shijia, HE Shiquan

南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211816

College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

关键词:

脱硫废水处理;蒸发器;模拟仿真

Key words:

desulfurization
wastewater treatment;
evaporator; simulation

摘要:应用 Fluent 软件,对多效蒸发器中的一效蒸发器进行仿真模拟,依据设计出的蒸发器的基本结构和工程实际情况,合理简化其物理模型,建立蒸发器全流道双流模型,通过流固耦合分析,掌握蒸发器流场的流速情况和压力特性。仿真结果表明,换热器内部流动压力损失大,流动均匀性不合理,液体阻力表现明显;内部液体流动均匀性和一致性相对较差,外部气流的均匀性和一致性较好。实验验证与仿真模拟结果的误差在允许范围内,说明仿真模拟结果是可靠的。要改善蒸发器内部压力损失过大与流动不均匀问题,需对其内部结构进行合理优化。

收稿日期:2019-04-01

作者简介:王世佳(1994—),女,江苏省扬州市人,南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为蒸发器的机构优化。

通信作者:何世权(1966—),男,安徽省肥东县人,南京工业大学教授,博士,主要研究方向为化工过程机械、阀门与流体密封和流体机械。

Abstract: The one effect evaporator in the multi effect evaporator was simulated using the FLUENT. According to the basic structure of the designed evaporator and the actual situation of the project, the physical model was simplified reasonably and the full flow channel double flow model of the evaporator was established. Through the fluid structure coupling analysis, the flow rate and pressure characteristics of the flow field of the evaporator were mastered. The simulation results showed that the internal flow pressure loss of heat exchanger was large, the flow uniformity was unreasonable, and the liquid resistance performance was obvious; the internal liquid flow uniformity and consistency were relatively poor, and the external air flow uniformity and consistency were good. The error between experimental verification and simulation results was within the allowable range, which showed that the simulation results were reliable. In order to improve the problem of excessive pressure loss and uneven flow in the evaporator, it is necessary to optimize its internal structure reasonably.

0 引言

目前,我国大多数燃煤电厂采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术,该技术在运行过程中,会产生大量腐蚀设备和影响脱硫效果的有害物质,为了降低有害物质的浓度,保证脱硫系统的正常运行,需要排出一部分脱硫废水^[1]. 由于脱硫废水具有含盐量高、高悬浮物和重金属物均超标等特点,并且在经过常规处理后,依然具有高硬度与强腐蚀性,所以难以实现再利用. 脱硫废水的处理制约着电厂废水的再利用,成为电厂废水处理中的一大问题,亟待研究与解决. 目前,大多数发电厂采用化学沉淀法处理脱硫废水,主要通过氧化、中和、沉淀、絮凝和其他相关工艺去除脱硫废水中的重金属和悬浮固体^[2-3],但研究人员通过分析部分燃煤电厂脱硫废水处理系统的运行结果,发现出水中的悬浮污泥(SS)和化学需氧量(COD)排放无法达到标准^[4]. 另外,在污泥脱水处理中,还存在诸如板式和框式压滤机的高故障率及操作、维护困难的问题.

因此,近年来国内外业内许多人已开始研究脱硫零排放处理技术,业内公认,零排放是理想的封闭用水系统^[5]. 蒸发法是废水零排放处理中常用的方法之一,该方法也适用于脱硫废水的处理. 随着水处理技术的不断进步,蒸发法中的多效蒸发过程得到了迅速发展. 由于其传

热系数高、操作灵活性大、进水预处理简单、能耗相对较低,被广泛用于化学、制药、海水淡化和废水处理等领域^[6-7]. 因此,研究用于处理脱硫废水的蒸发器,对于实现脱硫废水零排放有着极其重要的意义.

宋小曼等^[8]采用 Fluent 软件,将换热管采用旋转三角形排布方式,设计了换热管分别为椭圆管和圆管的水平管降膜蒸发器,就管间距和管间压力大小对换热效果的影响进行研究,发现,该蒸发器管间压力过大,蒸发器的换热效果不佳. 因此,在进行蒸发器内部仿真模拟时,控制换热管间压力的大小,使其合理、适用,可改善换热效果. 闫鸿志等^[9]针对液位控制和干斑效应等实际操作问题,对降膜蒸发器的设计进行优化,构建了水-水降膜蒸发器的仿真模型,并采用有限元方法,获得了沿管程的温度、热流变化情况,得出流体均匀性对换热效果有一定影响的结论. 因此,在对蒸发器进行优化时,应注意管间流体的流动性. 目前,已有研究多针对脱硫废水的各式降膜蒸发器,且多是工艺方面的研究,对其内部结构进行深入研究报道尚不多见. 鉴于此,本文拟应用 Fluent 软件,对多效蒸发器中的一效蒸发器进行模拟仿真,依据蒸发器的基本结构和工程实际,合理简化其物理模型,建立蒸发器全流道双流模型,通过流固耦合分析研究蒸发器的结构传热性能,以期为其结构优化,进而解决蒸发器加热室内

存在的流体流场分布不均所引起的换热不均等问题提供依据.

1 一效蒸发器加热室模型的建立

1.1 几何模型

根据 300 MW 机组提供的脱硫废水量及基本工艺参数,设计了一种处理脱硫废水的多效蒸发器,选择其中的一效蒸发器作为建立几何模型的研究对象.一效蒸发器加热室的内径为 1200 mm,壁厚 12 mm,其中热交换管的尺寸为:换热管外径 38 mm,换热管长度 3 m;溶液进出口接管外径 40 mm,壁厚 2 mm;蒸汽接管外径 95 mm,壁厚 2.5 mm.实际设计计算出的加热室内换热管约为 1000 根,为提高后续模拟仿真过程的效率,将模型简化为包含 25 根换热管的加热室进行研究.由此建立的几何模型如图 1 所示.

1.2 数值模拟

1.2.1 网格划分 为了模拟蒸汽内外的流动,对一效蒸发器内部的加热室建立双流道模型.将预处理软件 ICEM 用于生成非结构化网格,整个流场中总共约有 516 万个流体单元.网格划分结果如图 2 所示.

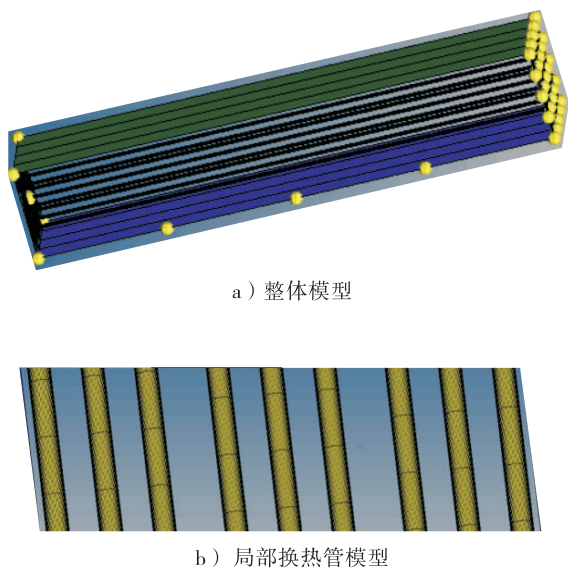


图 1 一效蒸发器加热室几何模型

Fig.1 Geometric model of heating chamber of one-effect evaporator

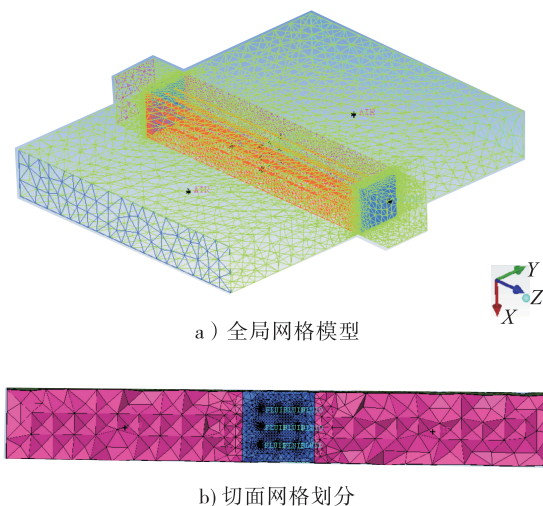


图 2 网格划分结果

Fig.2 Meshing results

由图 2a)可以看出,空气侧的网格换热是主流区,几何空间较大,故网格尺寸也大;靠近蒸发器换热面,网格逐渐加密,蒸发器网格相对细化.这是因为,蒸发器是换热段,既有气体又有液体通过,对网格要求极高.

由图 2b)可知,从切面网格能够看到内部体网格结构和生成形式,承接全局网格;可以更好地看到蒸发器周围网格明显细化,区域性明显,可提高计算精度.

1.2.2 物理模型 物理模型的建立基于 N-S 方程,即 Navier-Stokes 方程,该方程描述了黏性不可压缩流体动量守恒,它的矢量形式为

$$\rho \frac{dv}{dt} = \nabla p + \rho F + \mu \Delta v$$

在直角坐标系中写作

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho X + \mu \Delta u \\ \rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y + \mu \Delta v \\ \rho \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z + \mu \Delta w \end{cases}$$

热交换器物理模型中的风阻性能和蒸发性能参数推导如下.

当外部流场通过蒸发器时,存在压力损失和传热现象,可分别由压力损失系数和传热系数表

示. 蒸发器被认为是无限薄的, 并且假设通过蒸发器的压力损失与流体的动态压力成比例, 表示为压力损失系数. 此时, 压力损失可以表示为通过蒸发器的正常风速的函数

$$K_l = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho v^2}$$

其中, ρ 为流体密度; K_l 为压力损失系数, 可以是常数或分段多项式函数 $K_l = A_1 + A_2v + A_3v^2 + \dots + A_8v^7$.

从蒸发器到周围环境的热量流动为

$$q = h(T_{air,d} - T_{ext})$$

其中, q 为热流量/(W · m⁻²); $T_{air,d}$ 为蒸发器下流空气温度; T_{ext} 为蒸发器中液体参考温度/K; h 为对流传热系数, 其多项式函数为

$$h = h_1 + h_2v + h_3v^2 + \dots + h_8v^7$$

其中, h_i 为多项式系数, v 为流过蒸发器的流体速度/(m · s⁻¹).

为了模拟蒸发器的热性能, 必须提供对流传热系数 h 关于通过蒸发器的风速 v 的函数表达式. 因此, 设热平衡方程为

$$q = \frac{mC_p\Delta T}{A}$$

进而有

$$q = \frac{mC_p\Delta T}{A} = h(T_{air,u} - T_{ext})$$

其中, m 为流体流量/(kg · s⁻¹), C_p 为流体的比热容, ΔT 为流体的温升, A 为蒸发器前端面积/m², $T_{air,u}$ 为蒸发器上流空气温度.

因此, 对流传热系数 h 可以写成

$$h = \frac{mC_p(T_{air,u} - T_{air,d})}{A(T_{air,d} - T_{ext})}$$

1.2.3 边界条件与数值计算方法 仿真计算中, 边界条件合理设定是最重要的一环, 合理且有效的边界条件, 可以使计算速度加快, 收敛效果好, 节省计算周期. 所谓边界, 就是计算控制域的边界, 包括进口边界、出口边界、壁面边界、轴

对称边界、周期边界等. 常见的边界设定条件有流量条件、速度条件、压力条件等. 本文定义空气侧速度入口边界, 速度值为10 m/s, 常温常压; 定义空气侧压力出口边界, 常温常压; 定义液体侧速度入口边界, 速度值为4 m/s, 常压; 定义液体侧压力出口边界, 常温常压; 定义气体-液体交界面, 进出口设定 interior; 双流液体进出口选 interior.

本文采用 VOF 方法模拟 Fluent 软件中的两相流以跟踪气液两相界面, 并采用非稳态溶液法模拟管内外流体的形成过程. 计算方法为 Simple 算法, 并将动量方程离散化为二阶迎风格式.

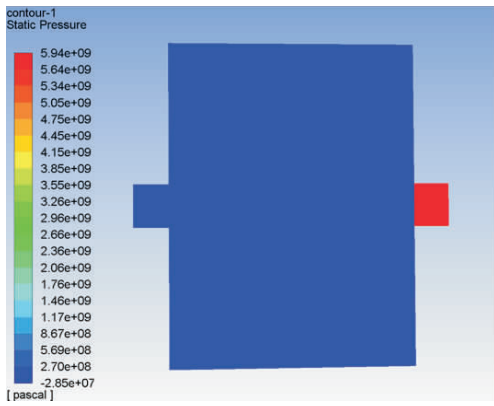
2 仿真结果与分析

2.1 数值模拟仿真

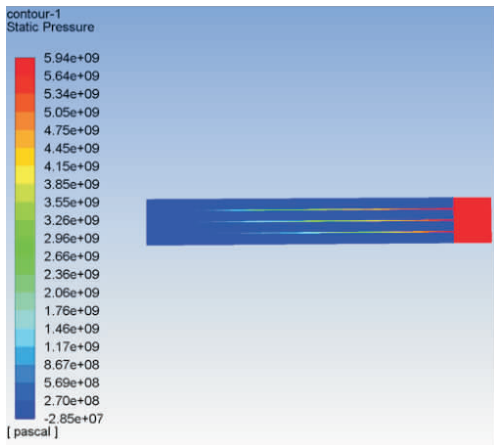
对多效蒸发器中的一效蒸发器进行仿真模拟, 得出蒸发器流场的压力和速度特性, 结果如图3—图6所示. 图3为蒸发器加热室内部的压力云图. 由图3可知, 流体在流过整体流体空间时, 在 $X=0$ 截面处无明显压力损失, 即无明显阻力变化. 因此, 选取 $Y=0$ 截面作为研究对象, 将换热管等分, 通过不同管段的压力描述加热室内部压力变化(见图4).

由图4可知, 液体一侧流体在流过 $Y=0$ 截面时, 换热器内部流动压力损失大, 流动均匀性稍显不合理, 液体阻力表现明显, 因此通过优化蒸发器内部结构而不必增加液体一侧换热流量, 即可提高流动整体均匀性. 可通过在换热管间增加导流板的方式进行结构优化, 也可以更改进口处管路走向. 但优化进口管路对外接口结构要求较高, 成本也可能会增加. 因此, 初期优化不建议改变连接处或者液体一侧的边界.

图5为加热室内部的速度云图. 由图5可知, 在 $X=0$ 截面处, 流体速度无明显变化, 流体均匀性较好; 在 $Z=0$ 的速度截面处, 空气一



a) X=0截面



b) Y=0截面

图3 加热室内压力云图

Fig.3 Pressure nephogram inside heating chamber

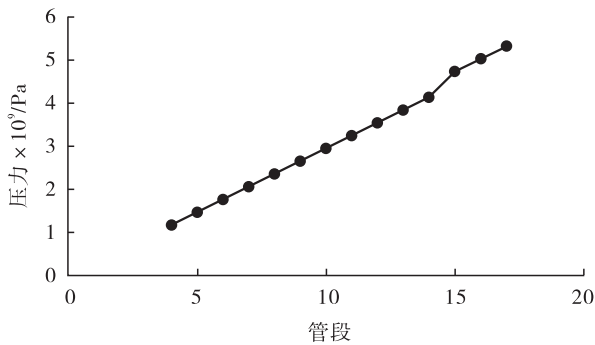
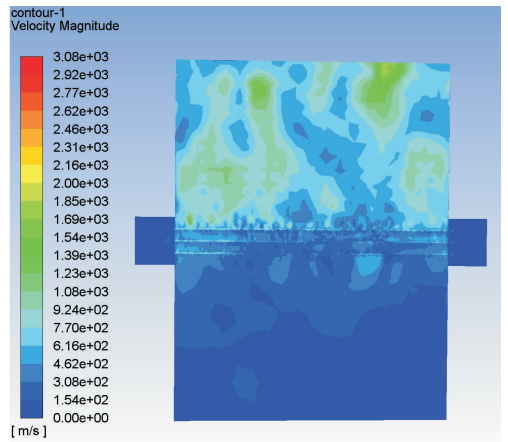


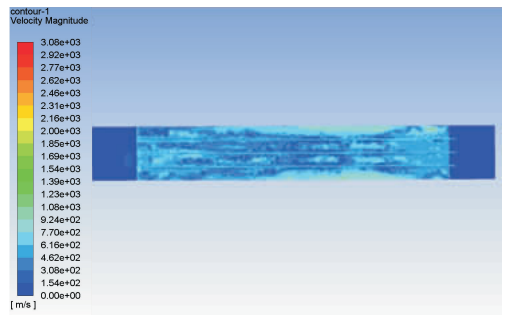
图4 加热室内压力变化图

Fig.4 Change digram of internal pressure in heat exchanger tube

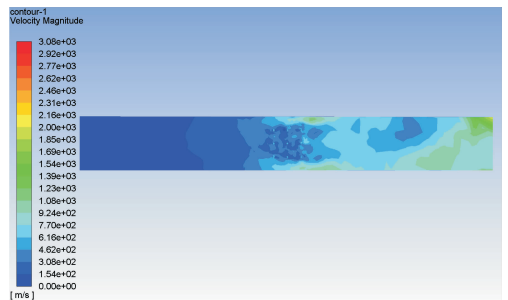
侧通过性较好,均匀性和一致性可以得到保证,与 Y=0 截面处的流动效果大同小异,然而 Z=0 截面处的速度均匀性直接影响换热效果.因



a) X=0截面



b) Y=0截面



c) Z=0截面

图5 速度云图

Fig.5 Velocity nephogram

此选取 Z = 0 截面作为研究对象,其内部速度变化如图6所示.

根据图5和图6的分析可知:空气一侧通过性较好,均匀性和一致性可以得到保证;液体一侧通过性较好,均匀性和一致性相对较差.从中可以明显看出:管内液体流速均匀,管外蒸汽流速较差,影响整体流动均匀性.

2.2 实验验证

根据某300 MW机组的基本工艺参数及脱硫废水量,计算并设计出合适的蒸发器进行废水

的蒸发处理. 蒸发器加热室的基本结构参数为: 换热管数目 1620, 换热管外径 38 mm, 加热室内径 1.2 m, 加热室高度 1.5 m, 溶液进出口外径 40 mm, 壁厚 2 mm, 蒸汽接管外径 95 mm, 壁厚 2.5 mm, 冷凝水出口外径 12 mm, 壁厚 1 mm.

根据结构参数, 建立蒸发器的简单模型, 选取常温下的水作为换热管外流体、85 °C 低温蒸汽作为换热管内流体(即热源), 对设计的蒸发器模型进行实验验证, 流体速度数值对比见图 7. 由图 7 可知, 关于蒸发器加热室内的流体速度变化趋势, 数值模拟与实验所得结果基本相同, 数值间的误差在允许范围内. 因此, 数值模拟所得结果是可靠的.

3 结语

本文以废水处理系统中的重要装置蒸发器作为研究对象, 利用 Fluent 软件对其内部流场进行仿真模拟, 并辅以实验进行验证, 分析蒸发器流场的流动和压力特性. 仿真结果表明, 换热

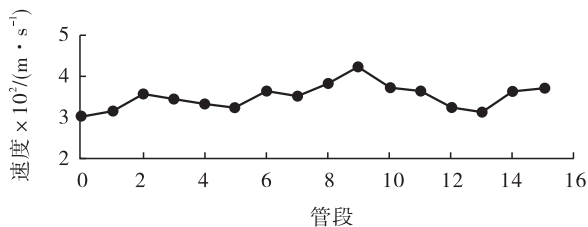


图 6 加热室内速度变化

Fig. 6 Variation of internal velocity in heating chamber

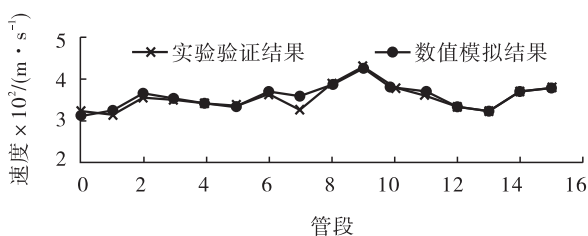


图 7 流体速度数值对比

Fig. 7 Numerical comparison of fluid velocity

器内部流动压力损失大, 流动均匀性不合理, 液体阻力表现明显; 内部液体流动均匀性和一致性较为一般, 外部气流的均匀性和一致性较好. 实验验证了仿真模拟结果是可靠的. 由仿真结果可知, 应对该类蒸发器内部结构进行合理优化, 以改善流体均匀性——在换热管间添加导流板能增加局部风速, 从而减小局部压力, 可作为优化思路进行下一步研究.

参考文献:

- [1] 杨发祥. 浅谈电厂脱硫废水及其处理工艺[J]. 中国高新技术企业, 2010(4): 105.
- [2] 孙晶. 火电厂湿式烟气脱硫废水处理技术的试验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.
- [3] 裴俊峰, 吴伟, 王凤茹. 沁北电厂脱硫废水系统技术改造实例介绍[J]. 华中电力, 2011, 24(1): 49.
- [4] 祝业青, 傅高健, 顾兴俊. 脱硫废水处理装置运行现状及优化建议[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 72.
- [5] BARRINGTON D J, HO G. Towards zero liquid discharge: The use of water auditing to identify water conservation measures [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 66: 571.
- [6] 祝斯. 多效蒸发脱盐处理实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [7] LIANG L, HAN D, MA R, et al. Treatment of high-concentration wastewater using double-effect mechanical vapor recompression [J]. Desalination, 2013, 314(4): 139.
- [8] 宋小曼, 杨丽, 王伟洁. 水平管降膜蒸发器管外液体流动数值模拟[J]. 煤气与热力, 2018, 38(2): 10.
- [9] 闫鸿志, 胡斌, 王如竹. 水-水降膜蒸发器的模拟仿真和优化[J]. 化工学报, 2018, 69(S2): 68.