

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2022.04.007

## 独居石酸浸尾气两级串联吸收塔气液两相流的数值模拟研究

辛馨,李艳斌,王 库

(中核第四研究设计工程有限公司,河北 石家庄 050000)

**摘要:**利用 Fluent 软件对独居石酸浸氯化氢尾气两级串联吸收塔的气液两相流进行了模拟计算。在总风量为  $2\ 169\ \text{m}^3/\text{h}$ ,其中氯化氢气体量  $109\ \text{m}^3/\text{h}$  的工况下考察了吸收塔内气液两相流的速度、压力及氯化氢气体浓度分布。模拟结果表明,两级填料塔串联吸收后氯化氢尾气的浓度为  $37\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,满足排放要求,验证了设计的两级串联吸收塔吸收氯化氢尾气方案的可行性。

**关键词:**氯化氢吸收;数值模拟;Fluent

**中图分类号:**X781 **文献标志码:**A

**文章编号:**1673-0062(2022)04-0047-05 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Numerical Simulation of Gas-liquid Two-phase Flows in Two Stage Series Absorption Tower of Tail Gas Produced from the Process of Acid Leaching Monazite

XIN Xin, LI Yanbin, WANG Ku

(The Fourth Research and Design Engineering Corporation of CNNC, Shijiazhuang, Hebei 050000, China)

**Abstract:** The gas-liquid two-phase flows in two hydrogen chloride absorption columns which are connected in series are simulated by using Fluent software. Under the condition of the ventilation quantity of the tail gas being  $2\ 169\ \text{m}^3/\text{h}$  and  $109\ \text{m}^3/\text{h}$  of which is hydrogen chloride, the gas-liquid flow rate, pressure and hydrogen chloride distribution in the adsorption columns are investigated. The simulation results show that after the hydrogen chloride is adsorbed by two stage series adsorption columns, the concentration of it is  $37\ \text{mg}/\text{m}^3$ , which meets the pollutant release standard and indicates that the scheme of that the hydrogen chloride is adsorbed by the two stage series adsorption columns is feasible.

**key words:** hydrogen chloride absorption tower; numeral simulation; Fluent

收稿日期:2022-07-10

作者简介:辛馨(1989—),女,工程师,硕士,主要从事铀水冶设计方面的研究。E-mail:386349171@qq.com

## 0 引言

与我国传统的提铀工艺相比,碱饼酸浸的氯化氢尾气吸收工序是独居石提铀流程中所特有的。碱饼酸浸工序<sup>[1]</sup>反应温度高、盐酸用量大,会产生大量氯化氢尾气,直接排入大气会对环境造成污染,因此在独居石提铀新工艺研究过程中,有必要对氯化氢尾气吸收开展研究。

氯碱企业处理尾气时发现喷射泵吸收工艺<sup>[2]</sup>和填料塔单级吸收<sup>[3]</sup>工艺都存在吸收效果不彻底的情况,特别是喷射泵吸收工艺无法满足排放要求。而填料塔两级串联吸收工艺<sup>[4]</sup>,尾气在经过两级填料塔串联吸收后再经过碱液槽后排放可以保证尾气中氯化氢零排放。因此拟参照该流程,填料塔是酸雾净化工艺的核心设备,其内部两相流动状态直接影响压降、气体传质、温度场分布和吸收效率。随着计算机技术发展,计算流体力学(computational fluid dynamic, CFD)已成为了研究二维、三维流动的重要手段<sup>[5-9]</sup>,应用 CFD 进行填料塔内部流动特性模拟计算的研究在指导工业应用方面越来越具有重要意义。衣淑立<sup>[10]</sup>采用目前比较流行的商用 CFD 软件 Fluent 对氯气吸收塔内气液两相流的流动特性进行数值模拟研

究,数据表明吸收液喷射量的变化对吸收塔出口氯气浓度影响显著。盛锴<sup>[11]</sup>通过数值模拟的方法研究了烟气急冷塔内的浆滴干燥、脱硫脱氯过程,模拟结果表明,计算得到的脱酸效率与实际情况吻合,可以为急冷塔的设计和运行提供参考。对吸收塔内气液两相流进行数值模拟研究对改进吸收塔具有指导意义。

依据独居石提铀工艺中酸浸工序产生尾气的相关参数设定边界条件,通过填料塔的设计结构创建几何建模,使用 Fluent 模拟软件对两级填料塔串联吸收流场进行模拟,得出酸性废气在填料塔中的压降、流动规律、温度分布规律及吸收浓度分布规律,验证尾气吸收装置的吸收效果。

## 1 独居石提铀过程氯化氢尾气吸收技术方案

### 1.1 工艺流程设计

碱饼酸浸工序产生的氯化氢尾气经引风机 A 引入,自下而上通过填料塔 1,再由引风机 B 引入填料塔 2 进行二次吸收,吸收液则自上而下吸收氯化氢气体,氯化氢气体经吸收剂洗净至达到排放浓度后排放,吸收氯化氢气体后的溶液为稀盐酸溶液,返回酸洗工序回用。

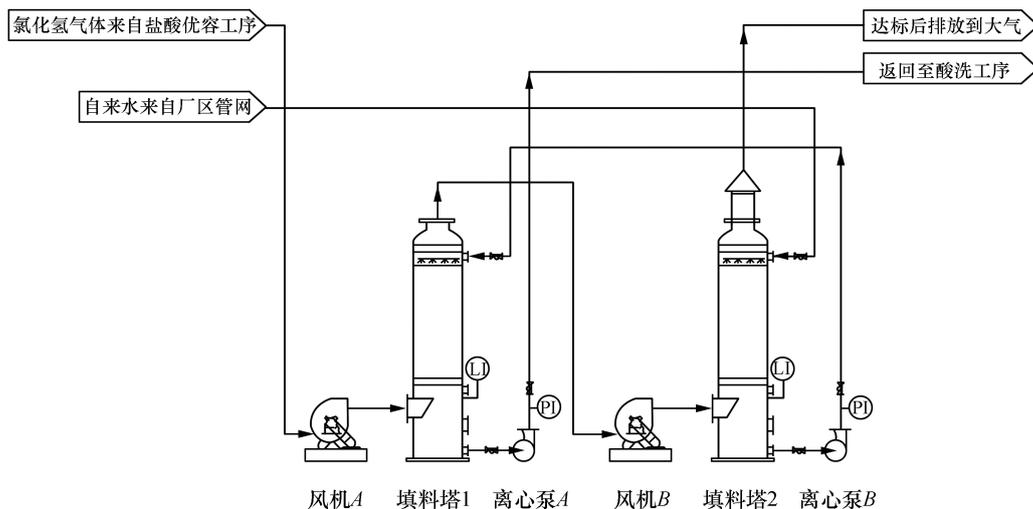


图 1 工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram

### 1.2 填料塔设计

以某独居石提铀项目为例,碱饼酸浸过程中总排风量为  $2\ 169\ \text{m}^3/\text{h}$ ,其中氯化氢气体为  $109\ \text{m}^3/\text{h}$ ,占总排风量的 5.03%。

根据贝恩-霍根泛点关联式可计算得到泛点

速度  $u_f$  为  $2.276\ 5\ \text{m/s}$ 。取泛点率为 0.85,即:

$$u = 0.85u_f = 0.85 \times 2.276\ 5 = 1.935\ \text{m/s}, D = [4V / (3.14 \times u)]^{1/2} = 0.629\ 8\ \text{m}, \text{圆整后取塔径 } D = 0.7\ \text{m}.$$

其中,  $V$  为操作条件下混合气体的体积流量,

$\text{m}^2/\text{s}$ ;  $u$  为空塔气速,即按空塔截面积计算的混合气体线速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

对泛点率进行校核后满足经验值,因此填料塔直径选用  $D=0.7\text{ m}$  合理。

根据氯化氢气体的扩散系数得到气相总传质单元数,从而得到气相总传质单元高度  $H=0.3606\text{ m}$ , 填料层高度  $Z=4.746\text{ m}$ 。设计填料层高度取  $5\text{ m}$ , 双塔串联,每塔填料层高度为  $2.5\text{ m}$ 。

采用 Eckert 通用关联图计算得到单塔填料层压降为  $735.8\text{ Pa}$ 。液体分布装置选用槽式液体分布器,经计算开孔数目为  $64$ 。

## 2 数值模拟方案

填料塔是酸雾净化工艺的核心设备,其内部两相流动状态直接影响压降、气体传质、温度场分布和吸收效率。对填料塔的设计结构创建几何建模,使用 Fluent 模拟软件对填料塔内气液两相流动进行模拟<sup>[12]</sup>,得出酸性废气在填料塔中的压降、流动规律、温度分布规律及吸收浓度分布规律,验证尾气吸收装置的吸收效果。

### 2.1 几何模型

通过参考设计值,酸性废气排风量  $2169\text{ m}^3/\text{h}$ ,其中氯化氢气体量  $109\text{ m}^3/\text{h}$ 、填料层高度  $5\text{ m}$ 、塔体直径  $0.7\text{ m}$ 、喷水流量  $2.95\text{ kg}/\text{s}$ 。选择填料层高度  $2.5\text{ m}$ 、塔高  $4.3\text{ m}$  的填料塔 1、塔 2 串联处理的方式,如图 2。

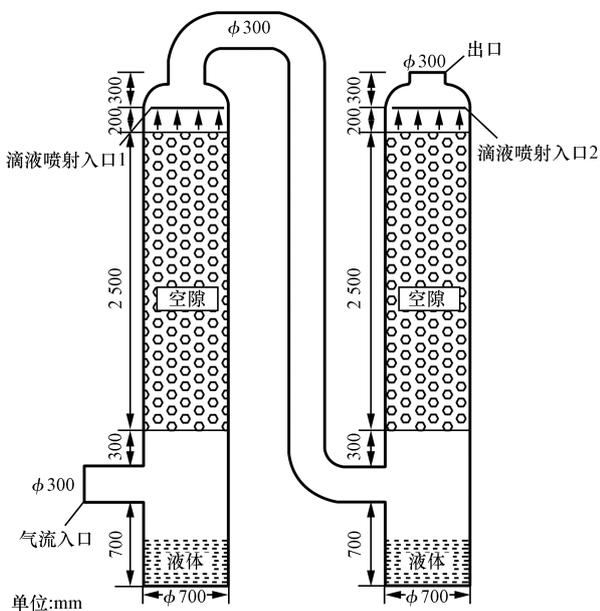


图 2 填料塔几何尺寸

Fig. 2 Geometry dimension of packed tower

酸性废气通过进口(气流入口)流过直径为  $300\text{ mm}$  的风管,进入塔 1 底部空腔,随之穿过填料层(空隙),由塔顶部(出口)流出。再经中间连接管道,酸性废气进入塔 2 进行二次吸收。填料塔内,水滴由塔 1、塔 2 的高度  $h=4.0\text{ m}$  处(滴液喷射入口)经喷嘴喷出,对尾气进行喷淋,气液两相在吸收段内进行逆流接触,完成传质过程,流过填料层到达塔体底部集液池。

### 2.2 模型及边界条件设置

#### 2.2.1 网格划分

对计算出的酸雾净化塔建模采用 ANSYS 软件,根据不同区域划分进行网格划分。计算域采用六面体网格,网格总数  $140$  万个,如图 3。

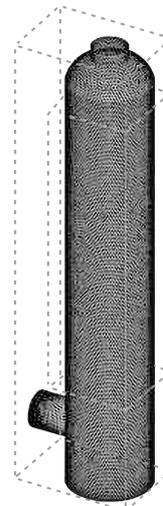


图 3 网格划分

Fig. 3 Meshing

模型坐标的建立是以塔底圆心为坐标原点  $(0,0,0)$ ,气体入口沿  $X$  轴正方向,垂直于  $Y$  轴进入,高度方向为  $Z$  轴。模型的建立忽略了浆液池部分,喷淋在  $(0,0,3600)$  处。

#### 2.2.2 边界条件设置

借助 Fluent 软件,采用 Euler-Lagrange 方法模拟填料塔内气液两相流动<sup>[13]</sup>。压力速度耦合方式为 SIMPLE,动量离散采用二阶迎风差分格式。气相采用 Realizable k- $\epsilon$  湍流模型描述,液滴则采用离散模型跟踪其运动轨迹。氯化氢的吸收模拟则是根据双膜理论,氯化氢吸收理论编写用户自定义程序(user-defined functions, UDF),作为相间作用的源项加载到 Fluent 软件中来实现的。模拟中气液两相流畅的参数及边界条件如表 2。

表2 气液两相流场参数及边界条件

Table 2 The parameters and boundary conditions of gas-liquid two-phase flows

流场	参数	数值(条件)
气相	气体流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	2 169
	气体温度/ $^{\circ}\text{C}$	40
	入口条件	速度入口
	出口条件	压力出口
	壁面条件	标准壁面
	气体入口速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	8.5
	入口气体中氯化氢质量分数	0.067 4
	入口气体中氯化氢质量浓度/( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	82
	液滴密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 050
	液气比/( $\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$ )	5
液滴温度/ $^{\circ}\text{C}$	25	
液滴平均粒径/mm	1	
流量/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	2.95	
液相	喷淋浆液出口速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	6
	喷嘴型式	空心锥
	喷嘴个数	64
	喷嘴角/( $^{\circ}$ )	90
	喷射方向	向下
	入口、出口壁面及浆液池液面	Trap

2.3 结果与分析

2.3.1 气液相流场分析

填料塔内气液相流场分布状况关系到填料塔的吸收性能。通过欧拉拉格朗日方法,得到了连续相流场。图4中(a)为未加喷淋前填料塔内流场的截面( $y=0$ )分布图,气流通过入口进入填料塔下部空腔,由于填料的阻挡,在主流区上下部分形成回流区。这两个回流区有利于气体的均流,提高吸收效率。随着混合气体上行,克服填料塔阻力通过塔体,由顶部出口均匀流出,完成吸收过程。图4(b)为加喷淋后填料塔里截面( $y=0$ )速度矢量分布图。可以看出,在加喷淋后塔下部空腔气流受喷淋影响下部区域涡流减弱,气流更加均匀的通过填料塔填料层,经过喷淋吸收后从出口流出。

2.3.2 压力场

图5(a)为未加喷淋总压降图,可以看出气流在进入填料塔入口,总压没有发生大的变化(模拟过程忽略风管压损)。当经过填料层总压降发

生明显的降低过程,压损约700 Pa。而当加喷淋吸收后,由图5(b)可以看出,由于液滴与气流的双相耦合作用,总压损发生明显变化,呈现出了不同的降低规律。

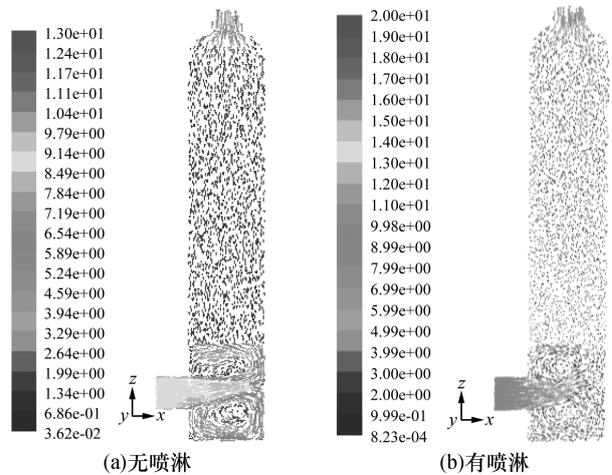


图4 速度矢量场

Fig. 4 Velocity vector field

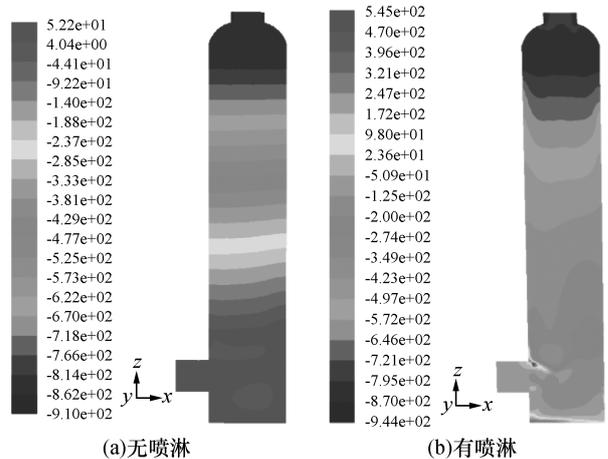


图5 压损图

Fig. 5 The diagram of pressure-loss

2.3.3 温度场

在模拟过程中,忽略塔壁传热对温度场影响,因此在无喷淋情况下填料塔内部温度场为恒定值 $40^{\circ}\text{C}$ ,如图6(a)。当喷淋 $20^{\circ}\text{C}$ 的液滴后,塔内发生热交换。喷淋附近温度低,当跟气体接触吸收热量,达到气流温度后温度场区域恒定。

2.3.4 氯化氢浓度场

图7(a)为填料塔1截面( $y=0$ )氯化氢浓度分布图,图7(b)为填料塔2截面( $y=0$ )氯化氢浓度分布图。可以看出氯化氢进入塔内,被喷淋纯

水液滴吸收,自下向上,浓度递减,呈一定的规律性。

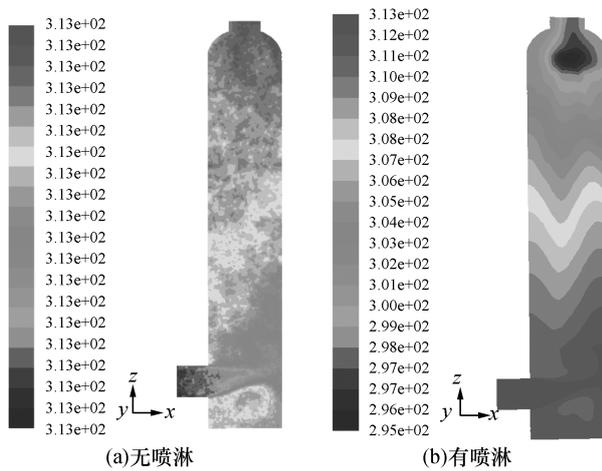


图6 温度分布图

Fig. 6 Diagram of temperature distribution

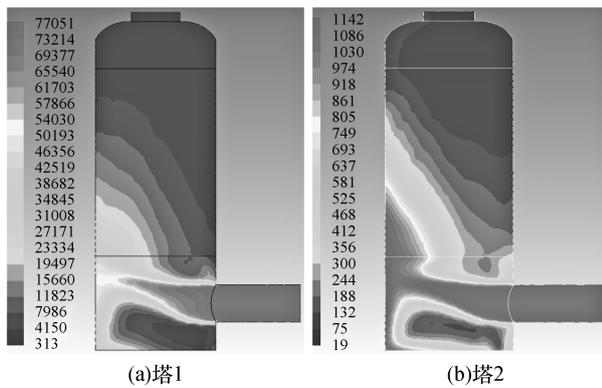


图7 氯化氢浓度分布图

Fig. 7 Distribution diagram of hydrogen chloride concentration

由图7可以看出在气流主流区氯化氢浓度较高,随着卷吸周围空气形成涡流,以及经过填料层,不断与水滴进行吸收过程后,氯化氢浓度逐渐降低。通过数据提取,发现模拟过程中通过塔1的入口气流氯化氢含量为 $82 \text{ g/m}^3$ ,经过喷水吸收后出口浓度为 $1.2 \text{ g/m}^3$ ,得出塔1的吸收效率为98.54%。塔1气体流出后进入塔2进行二次吸收,塔2入口氯化氢含量为 $1.2 \text{ g/m}^3$ ,通过喷水吸收后,出口氯化氢浓度为 $37 \text{ mg/m}^3$ ,得出塔2的吸收效率为96.92%。

结果表明,在选择填料2.5 m的填料塔二次吸收后,氯化氢的浓度为 $37 \text{ mg/m}^3$ ,小于要求值 $40 \text{ mg/m}^3$ ,满足大气排放要求。

### 3 总结

针对尾气总风量 $2169 \text{ m}^3/\text{h}$ ,其中氯化氢气体量 $109 \text{ m}^3/\text{h}$ 的工况,使用ANSYS Fluent模拟软件对填料塔内气液两相流动进行模拟,可以发现加喷淋后塔下部空腔气流受喷淋影响涡流减弱,气流更加均匀的通过填料塔填料层。氯化氢进入塔内,被喷淋液滴吸收,自下向上,浓度递减,呈一定的规律性。结果表明,经过两个填料层为2.5 m的填料塔串联吸收后,氯化氢的浓度为 $37 \text{ mg/m}^3$ ,满足大气排放要求。

#### 参考文献:

- [1] 马升峰,许延辉,王荣,等.白云鄂博稀土矿的超声波强化浸出工艺研究[J].中国稀土学报,2019,37(1):49-56.
- [2] 钟永铭.盐酸尾气回收技术改造[J].中国氯碱,2016(10):35-36.
- [3] 曾子平,刘应隆.酸性气体硫回收尾气的氨法脱硫工艺[J].当代化工研究,2017(6):188-190.
- [4] 袁相春,马会娟.废氯气处理系统运行小结[J].氯碱工业,2012,48(12):23-25.
- [5] 郭涛,王德喜,宫泽.两相流的供气式射流曝气喷嘴的分析模拟[J].辽宁化工,2021,50(12):1894-1899.
- [6] 张元吉,李治国,张涛.卡丽娜(Kalina)循环系统蒸发器入口结构流场数值模拟分析[J].机械研究与应用,2021,34(6):48-51.
- [7] 丁智,谭宏博,温娜,等.空冷塔的气体分布器进气段流场分析及结构优化[J].化工机械,2021,48(6):861-867.
- [8] 祁江涛,李迎华,吴浩伦.计算流体力学在烟气脱硫中的应用[J].计算机辅助工程,2011,20(3):88-91.
- [9] 李兴华,何育东.湿法烟气脱硫装置喷淋塔内烟气流场模拟[J].热力发电,2010,39(5):42-46.
- [10] 衣淑立,周胜名.氯气吸收塔气液两相流的数值模拟研究[J].有色冶金设计与研究,2014,35(5):30-35.
- [11] 盛锴,刘武林,寻新.烟气急冷塔塔内脱硫脱氯过程的数值模拟[J].环境工程学报,2010,4(9):2078-2082.
- [12] FUKAGATA K, KASAGI N, UA-ARAYAPORN P, et al. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow and convective heat transfer in a micro tube[J]. Heat and fluid flow,2007,28(1):72-82.
- [13] LIU P, WU X, WANG Z Y, et al. Numerical simulation study on gas-solid flow characteristics and  $\text{SO}_2$  removal characteristics in circulating fluidized bed desulfurization tower[J]. Chemical engineering and processing-process intensification,2022,176:108-217.