

# Flow Field Simulation of an Associated Gas Biotrickling Filter Based on Fluent

Ming Ma Taiwei Li Zhiming Wang Fan Yang Guiying Jiang

Research Institute of Petroleum Engineering Technology, Sinopec Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu, 225100, China

## Abstract

Based on the biological desulfurization process for associated gas in Sinopec Jiangsu Oilfield, this study conducted numerical simulations and dimensional optimizations of a biotrickling filter using computational fluid dynamics (CFD) software Fluent. A coupled mass-transfer-reaction model was developed for hydrogen sulfide ( $H_2S$ ) absorption in the biotrickling filter, incorporating steady-state plug flow assumptions and two-film theory. The results indicate that after implementing a dual-tangential-flow gas distributor and packing materials, the biotrickling filter demonstrates improved uniformity in gas flow velocity and  $H_2S$  concentration distribution, leading to significantly enhanced desulfurization efficiency. Furthermore, while maintaining constant desulfurization efficiency, increasing the tower diameter results in substantial growth in both required packing volume and tower capacity, with the growth rate exhibiting a positive correlation with the diameter increase.

## Keywords

numerical simulation; biological desulfurization; hydrogen sulfide

## 基于 Fluent 的油田伴生气生物脱硫塔的流场模拟

马明 李太伟 王志明 杨帆 姜桂英

中国石化江苏油田分公司石油工程技术研究院, 中国·江苏 扬州 225100

## 摘要

以中国石化江苏油田伴生气生物除硫工艺为基础, 利用计算流体力学软件 Fluent 对生物脱硫塔流场进行数值模拟, 尺寸优化计算。针对生物脱硫塔中硫化氢的收过程, 建立了基于稳态活塞流假设和双膜理论的传质-反应耦合模型。结果表明, 生物脱硫塔增加双切流气流分布器整流结构和填料后, 混合气体流速和硫化氢浓度分布更加均匀, 能够明显提高脱硫塔脱除硫化氢效率; 在确保脱硫塔脱硫效率时, 随着塔径的增加, 脱硫塔需求填料体积、塔容积明显增加, 塔径越大, 填料体积、塔容积增加率越大。

## 关键词

数值模拟; 生物脱硫; 硫化氢

## 1 引言

随着油田进入注水开发后期, 东部老油田伴生气硫化氢 ( $H_2S$ ) 超标问题日益突出, 容易造成油井、管线和设备腐蚀, 影响油井正常作业和生产, 同时存在  $H_2S$  泄露安全风险以及气体燃烧排放环保风险。然而东部油田伴生气具有潜流量小、分布广难以规模化处理等特点, 以及化学脱硫法投资高、占地大和干法脱硫技术处理成本高、脱硫剂处理难等问题<sup>[1-4]</sup>, 因此江苏油田开发形成了脱硫效果好、处理成本低、绿色环保的伴生气生物除硫技术<sup>[5-9]</sup>。

生物脱硫工艺如图 1 所示, 伴生气生物除硫工艺是一种通过生物脱硫塔吸收伴生气中  $H_2S$ , 通过微生物处理为单

质硫的生物脱硫技术, 具有安全无污染脱除硫化氢的目的。除硫工艺技术主要包括: 在生物脱硫塔中, 含  $H_2S$  伴生气通入脱硫塔, 通过碱性微生物溶液 (pH7.5~10.5) 喷淋把伴生气中的  $H_2S$  转移到液相中, 再通过生物反应池中硫氧化细菌将液相中的负价硫氧化成单质硫、同时实现碱液再生和循环, 生物系统由在线监测仪表、曝气风机、温度自动控制、自动加药等控制单元确保微生物适宜生长环境。

生物脱硫工艺处理效果、处理成本主要由生物脱硫塔吸收效率有关, 然而不同油田区块伴生气量、 $H_2S$  含量、压力不同, 生物脱硫塔的结构尺寸需依据现场的处理条件进行设计。本文利用计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 软件 Fluent 对生物脱硫塔流场进行数值模拟, 优化计算, 对解决油气田  $H_2S$  吸收、降低处理成本具有重要意义<sup>[10-12]</sup>。

【作者简介】马明 (1997-), 男, 中国江苏徐州人, 硕士, 助理工程师, 从事腐蚀与防护研究。

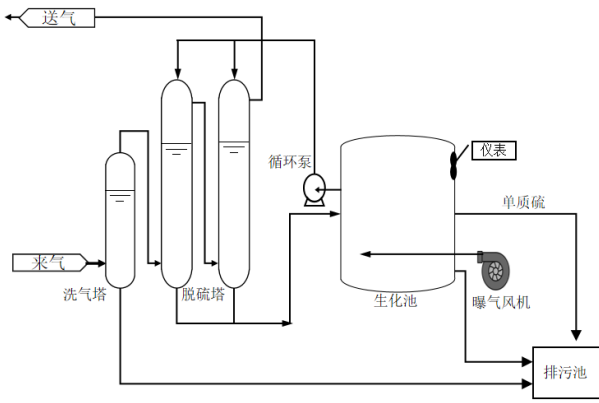


图 1 伴生气生物脱硫工艺流程图

## 2 模型建立

### 2.1 生物脱硫反应

在生物脱硫工艺中,伴生气主要由H<sub>2</sub>S、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)以及甲烷(CH<sub>4</sub>)、其它烃类组成,经脱硫塔弱碱性生物溶液喷淋吸收脱除硫化氢,反应过程包含气液两相传质过程和化学反应过程,且由于物理性质不同,脱硫过程中H<sub>2</sub>S吸收速率高于CO<sub>2</sub>吸收速率,因此在生物脱硫塔模型建立中主要采用弱碱性生物溶液吸收伴生气中酸性H<sub>2</sub>S气体过程的控制方程,根据生物除硫工艺生物溶液特定的碱性生存环境(pH7.5~10.5),考虑用特定浓度碱性溶液吸收体系的快速计算。

### 2.2 模拟计算

采用特定浓度碱性溶液吸收H<sub>2</sub>S气体的控制方程主要包括脱硫塔内物料衡算方程、气液间传质方程等方程组成。本研究针对生物脱硫塔中H<sub>2</sub>S的化学吸收过程,建立了基于稳态活塞流假设和双膜理论的传质-反应耦合模型,该模型综合考虑气液两相的质量传递、化学反应动力学以及系统约束条件<sup>[13]</sup>。

基于稳态活塞流假设,建立了气液相物料衡算方程。在微元塔高dz内,气相中H<sub>2</sub>S的质量传递遵循衡算方程,液相侧的质量衡算则考虑溶质扩散与化学反应的综合作用,气液相H<sub>2</sub>S的质量传递衡算方程如下:

气相中H<sub>2</sub>S的质量传递衡算方程:

$$Gdz = N_i^g a S dz$$

液相侧H<sub>2</sub>S的质量传递衡算方程:

$$Ldz = N_i^l a S dz + S dz$$

式中:G和L分别为气相、液相摩尔流率,m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>;dz为微元塔高;N<sub>i</sub><sup>g</sup>和N<sub>i</sub><sup>l</sup>为传质通量,kmol/m<sup>2</sup>·s;i为气体组分H<sub>2</sub>S,S为脱硫塔截面面积,m<sup>2</sup>;a为单位容积内有效传质面积,m<sup>2</sup>·m<sup>-3</sup>。

其次,采用双膜理论描述气液界面的传质过程<sup>[14]</sup>。H<sub>2</sub>S传质通量N<sub>i</sub>由气膜和液膜阻力共同决定,针对H<sub>2</sub>S在氢氧化化物溶液中的快速反应,模型包括H<sub>2</sub>S在碱性溶液中两步

反应动力学方程,并通过扩散-反应方程建立了液相中各组分的稳态平衡关系。

H<sub>2</sub>S反应动力学方程:



H<sub>2</sub>S传质通量为:

$$N_i = (p - p_i) \left( \frac{1}{k_g} + \frac{H}{\beta k_l} \right)$$

式中:P为气体中组分分压,Pa;P<sub>i</sub>为气液相间组分分压,Pa;k<sub>g</sub>为气膜吸收系数,mol/(m<sup>2</sup>·s·Pa);H为组分H<sub>2</sub>S的亨利系数,(Pa·m<sup>3</sup>)/mol;β为化学反应增强因子;k<sub>l</sub>、k<sub>g</sub>为液膜和气膜吸收系数,m/s。

扩散反应方程:

$$\frac{d}{dx} \left( D_i \frac{C_i}{dx} \right) + r_i = 0$$

式中:C<sub>i</sub>为浓度,kmol/m<sup>3</sup>;D<sub>i</sub>为扩散度,m<sup>2</sup>/s;r<sub>i</sub>为生成速率,kmol/(m<sup>3</sup>·s);

此外,模型还包含了系统约束条件。通过建立逆流脱硫塔的操作线方程并结合总硫浓度守恒与液相电荷平衡方程,形成了完整的封闭求解体系。最后,采用数值方法联立求解上述方程组,并通过实验数据拟合优化关键参数(如β、k<sub>l</sub>、k<sub>2</sub>等),从而实现对塔内浓度分布和传质效率的准确预测,采用Fluent软件建立网格和计算模型,用CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>S混合气模拟实际气体,在出口断面上均匀喷淋特定浓度碱液的方式,获得生物脱硫塔不同工况条件下塔内流场和浓度分布,确定高效脱硫塔结构。

### 2.3 模拟条件

生物除硫工艺,采用生物脱硫塔吸收伴生气中的H<sub>2</sub>S,根据实际生产情况,模拟计算每天处理气量5000m<sup>3</sup>气量条件下脱除体积分数为0.1%的H<sub>2</sub>S,处理温度32℃,脱硫塔直径0.5m,高度8m,设定脱硫塔原始模型、气相整流结构、鲍尔环填料等条件进行模拟计算,模拟气相物料成分如表1所示,生物脱硫塔气相和液相的边界条件如表2所示。

表 1 模拟气相物料成分

项目	体积分数 %	项目	体积分数 %
甲烷	96.3	硫化氢	0.1
二氧化碳	3.2	水蒸气	0.4

表 2 气液两相流边界条件

流场	项目	内容
气相	流速 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	208.3
	温度 /℃	32
	压力 /MPa	0.25
液相	流速 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	10
	pH	10
	温度 /℃	32

### 3 脱硫塔流场分布

图 3-1 (a) 为直径 0.5m, 高度 5.5m 的脱硫塔模型, 混合气体下进口进入, 顶部出口排出。对脱硫塔原始模型空塔条件、增加整流结构和填料后流场进行数值模拟, 得到各个工况下脱硫塔内流场分布。如图 3-2 (a)、(b) 所示, 脱硫塔空塔条件下进口 H<sub>2</sub>S 体积分数为 0.1% 的混合气体在塔内速度分布和浓度分布, 可以看出脱硫塔底部靠近进口局部气流速度较大, 在周向产生旋流, 在向上流动过程中速度逐渐降低且分布逐渐变得均匀, 有利于 H<sub>2</sub>S 的吸收, 但是由于空塔结构脱硫塔内气液接触面小, 吸收 H<sub>2</sub>S 量较小, 出

口 H<sub>2</sub>S 浓度较高难以满足国家标准要求小于 20mg/m<sup>3</sup> (对应 14ppm) 的要求。脱硫塔内压力分布较均匀且轴向压降较小, 这是由于空塔模拟中未考虑填料的影响。因此, 在脱硫塔内布置进口气体整流结构和填料。

如图 3-2 (a) 所示, 脱硫塔底部增加双切流气流分布器整流结构, 对混合气体进行分流, 经数值模拟计算, 如图 3-2 (b)、(c) 所示进口 0.1% H<sub>2</sub>S 混合气体空塔内速度分布、浓度分布, 可以看出脱硫塔内气流分布明显均匀, 增强了碱性溶液对 H<sub>2</sub>S 的吸收, 出口 H<sub>2</sub>S 浓度较高, 在此基础上, 增加 4m 高度填料后, 脱硫塔内流场分布如图 3-3 所示, 可以看出脱硫塔底部由于整流结构和填料的存在气流分布明显均匀, 显著改善了脱硫塔内 H<sub>2</sub>S 的吸收, 出口 H<sub>2</sub>S 浓度很低, 可以满足国家标准要求小于 10mg/m<sup>3</sup> 的要求。

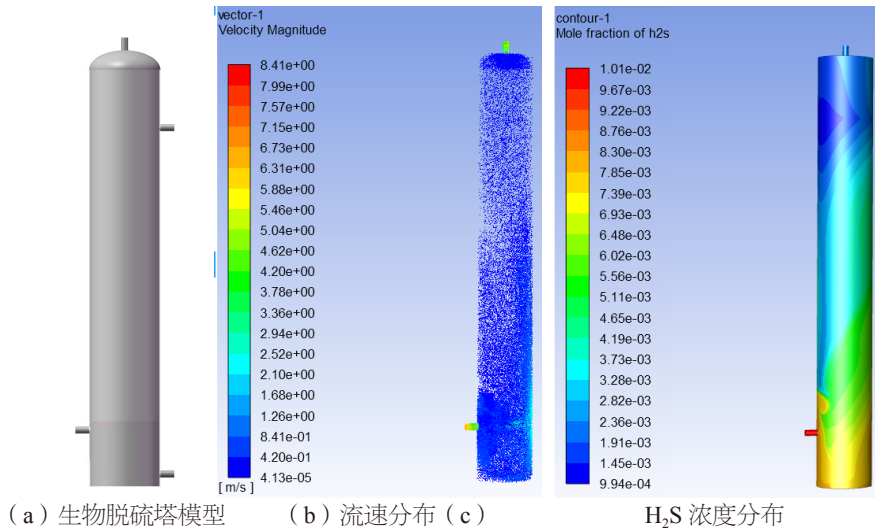


图 3-1 脱除 H<sub>2</sub>S 含量 1% 的混合气体过程空塔内气体流速、H<sub>2</sub>S 浓度分布

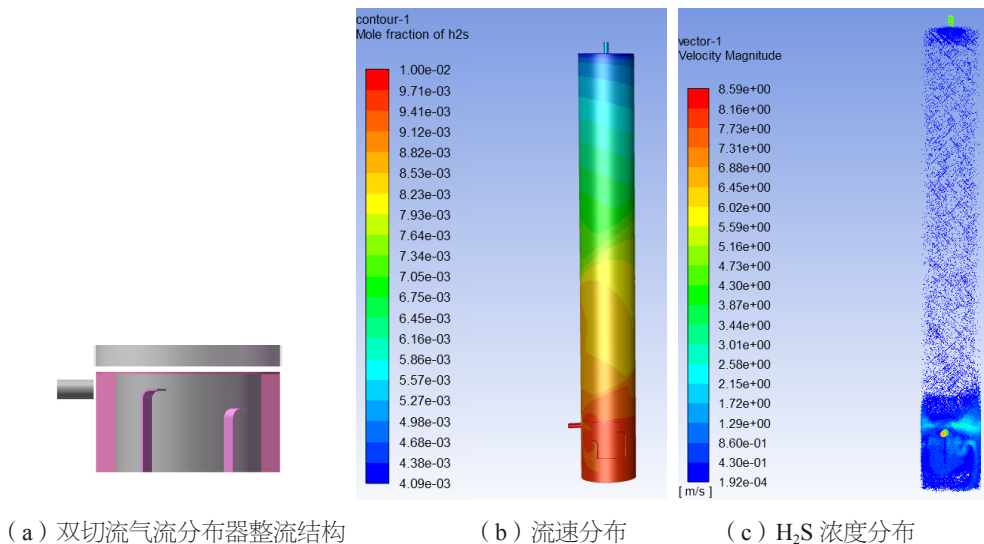
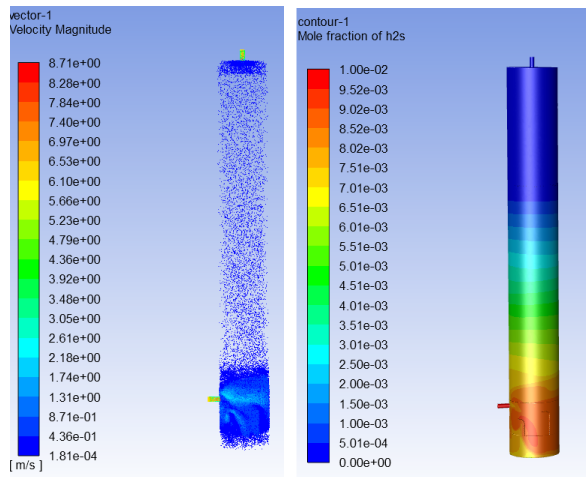


图 3-2 增加气体整流结构后塔内气体流速、H<sub>2</sub>S 浓度分布



(a) 气体流速分布 (b) H<sub>2</sub>S 浓度分布

图 3-3 同时增加气体整流结构和填料后塔内气体流速、H<sub>2</sub>S 浓度分布

### 4 脱硫塔尺寸优化

基于吸收 0.1% H<sub>2</sub>S 混合气体脱硫塔数值模拟，可以看

出在伴生气生物除硫工艺中，选用气体整流结构、填料的脱硫塔能够高效脱除硫化氢。以此为模型，确保脱硫效果的前提下，模拟分析处理气量 8000m<sup>3</sup>/d，H<sub>2</sub>S 浓度 0.1% 伴生气的脱硫塔直径、填料高度、塔高尺寸之间的影响<sup>[15]</sup>。计算得到处理气量为 8000m<sup>3</sup>/d、处理 0.1% H<sub>2</sub>S 的两座脱硫塔串联条件下第一和第二脱硫塔直径 0.5m，填料高度 5.3m，碱性生物脱硫剂贫液 pH 值为 9.5，富液 pH 值为 7，液量 10m<sup>3</sup>/h。由于直径 0.5m 脱硫塔高度较高，为此增大脱硫塔直径，通过数值模拟计算生物脱硫剂贫液 pH 值为 9.5、液量 10m<sup>3</sup>/h 时脱硫塔的填料高度与塔高度的关系。

如表 4-1 所示，可以看出随着脱硫塔塔径的增加，所需填料体积增加，脱硫塔的体积增加，即此时采用等效体积原理换算脱硫塔高度存在较大的误差。模拟结果显示填料高度与塔径比值越大，脱硫塔吸收效率越好，此时脱硫塔更高。当脱硫塔直径由 0.5m 增加到 0.8m 时，计算得到所需填料体积需要增加 30.5%，脱硫塔体积增加 75.8%；当脱硫塔直径由 0.5m 增加到 1m 时，计算得到所需填料体积需要增加 51.0%，脱硫塔体积增加 130.0%，可以看出，随着塔径的增加，脱硫塔的容积也随之增大。

表 4-1 不同脱硫塔直径对脱硫塔的尺寸的影响

塔径 /m	填料 /m	填料体积 /m <sup>3</sup>	填料增加率 /%	塔高 /m	塔体积 /m <sup>3</sup>	体积增加率 /%	碱液量 /m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	脱硫剂 pH
0.5	5.3	1.04		8	1.57		10	9.5
0.8	2.7	1.35	30.5	5.5	2.76	75.8	10	9.5
1	2.0	1.57	51.0	4.6	3.61	130.0	10	9.5

### 5 结论

(1) 利用 Fluent 软件建立的基于稳态活塞流假设和双膜理论的传质 - 反应耦合模型模拟结果表明，对比脱硫塔原始空塔模型，脱硫塔增加双切流气流分布器整流结构和填料后，混合气体流速分布更加均匀，能够明显提高脱硫塔脱除 H<sub>2</sub>S 效率，出口硫化氢浓度小于 10mg/m<sup>3</sup>；(2) 模拟分析处理气量 8000m<sup>3</sup>/d，H<sub>2</sub>S 浓度 0.1% 伴生气的脱硫塔直径、填料高度、塔高尺寸优化，计算得到两座脱硫塔串联条件下第一和第二脱硫塔直径 0.5m，填料高度 5.3m，碱性生物脱硫剂贫液 pH 值为 9.5，液量 10m<sup>3</sup>/h，出口 H<sub>2</sub>S 小于 10mg/m<sup>3</sup> 时，随着塔径的增加，脱硫塔需求填料体积、塔容积也随之增加，塔径越大，填料体积容积增加率越大。

#### 参考文献

[1] 王鑫. 高含硫天然气净化工艺分析[J]. 石化技术, 2025, 32(01): 191-193.  
 [2] 杜昌雄, 侯雅雯, 祝小虎, 孙雷, 张丹瑶, 王伟奇, 高月. 高酸性天然气脱硫脱碳装置化学处理过程能耗对比分析[J]. 当代化工, 2024, 53(11): 2731-2735. DOI: 10. 13840. 20241203. 001.  
 [3] 王翔, 宋民航. 紧凑型天然气脱硫技术进展与展望[J]. 炼油技术与工程, 2023, 53(08): 1-5.  
 [4] 韩盟, 王金弟, 牛天荧, 范慧敏, 段升利等. 天然气脱硫技术应用现状及发展趋势[J]. 广州化工, 2023, 51(01): 41-43.  
 [5] 杨帆, 吴伟林, 官峻, 陈剑锋, 张鑫, 王志明. 生物脱硫污泥系统

快速启动与调控方法[P]. 北京市: cn113797742b, 2022-06-10.  
 [6] 孟章进, 王杰, 姜桂英, 杨帆. 一种上流式内双循环生物脱硫反应器[P]. 北京市: cn215916932u, 2022-03-01.  
 [7] 虞建业, 王彪, 王进涛, 黄一汉, 王志明. 一种油田酸化硫化氢脱除剂及其使用方法[P]. 北京市: cn113289481b, 2022-11-11.  
 [8] 吴伟林, 孟章进, 姜桂英, 王彪, 杨帆. 一株中低温除硫防腐菌的开发与分子鉴定[J]. 复杂油气藏, 2021, 14(02): 104-107.  
 [9] 黎昕旺, 黄子晏, 李彬等. 天然气生物脱硫研究进展[J]. 硫酸工业, 2025, (01): 23-26+39.  
 [10] 崔吉宏, 张建东, 曹文全, 李长春, 杨洋, 文豪, 邱奎, 陈历波. 天然气脱硫装置吸收塔模拟及增产措施[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(05): 1-9.  
 [11] 陆怡静. 吸收塔内氨气吸收的CFD模拟及工艺优化研究[D]. 天津理工大学, 2023. DOI: 10. 27360. 2023. 001058.  
 [12] 汪若凡, 潘家伟, 陈海军, 朱跃钊. VOC吸收塔内传质性能CFD的初步模拟[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(09): 120-124+134.  
 [13] 辛馨, 李艳斌, 王库. 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[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2022, 36(04): 47-51.  
 [14] 王虎, 李少华, 刘大任, 马文娥, 张庆喆. CFB-FGD传质模型的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(26): 8-13+1. 2013. 26. 002.  
 [15] 张倩, 张井鲁. 基于MEA/烟气CO<sub>2</sub>捕集系统的工艺模拟和吸收塔高度对模拟的影响分析[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(02): 28-34.