

空气雾化硫磺喷枪的数值模拟

杨 红,肖 臻,周 彦,杨 帆,刘 洋

(1. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 湖北宜化化工股份有限公司, 湖北 宜昌 443000)

摘 要:将空气雾化和机械雾化相结合,对硫磺喷枪进行改进.在 Fluent 软件环境下,基于气、液两相流模型进行了计算流体力学数值模拟.进口处以液硫、空气的实际速度为基准,出口处采用压力出口,焚硫炉内壁面选用标准无滑移壁面并假设其绝热,以简化焚硫炉内气液边界条件.以 k-epsilon 湍流模型为计算模型,采用压力-速度耦合方程求解,并选用压力修正算法.结果表明,在喷枪四周输入一定速度的空气后,喷枪附近形成一个涡流负压区,加速液硫向四周扩散,可增大雾化角及雾化行程,均匀雾滴分布.以某焚硫炉的工程实际参数,液硫速度 5 m/s 时,对比不同空气流速下的液硫雾化流场,在空气进口速度为 4~6 m/s,雾化效果最佳.

关键词:硫磺喷枪;空气雾化;两相流模型;数值模拟

中图分类号:TQ027.3⁺2

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2013.12.013

0 引 言

当代硫酸工业主要以硫铁矿和硫磺为原料制取硫酸.硫磺制酸比硫铁矿制酸更具有优势,主要体现在:减少工艺,消除污染源、能耗消耗下降、生产场地缩小、为企业提供了发展空间,所以硫磺制酸工艺应用较为广泛^[1].在硫磺制酸工艺中,对原料的利用及节能降耗有着重大影响的一个关键设备就是硫磺喷枪,对液硫的雾化有着直接影响.硫酸工业大多数采用的是直流单相喷枪雾化,其雾化效果不是很理想,对液硫的利用率不高.喷枪是一种特殊的喷嘴,相关学者对喷嘴的雾化机理探索多以实验以及经验理论为主,从直观的角度获取喷枪雾化特性参数,具有较大的局限性^[2].随着计算机技术和计算流体力学技术的发展,可以利用 Fluent 软件对喷嘴外部环境进行数值模拟,得出更宽阔更准确雾化特性参数.

喷枪按照硫磺的雾化方式,通常分为机械雾化喷枪和空气雾化喷枪.机械雾化是利用高液体压力经小孔高速射出而雾化,空气雾化是利用空气产生的直流、旋流或者交叉射流冲击液流束而雾化.本文以机械喷枪外加辅助空气为研究对象,以工艺参数为参考对象,利用计算流体力学软件

Fluent 对焚硫炉内喷枪的外部流场及雾化过程进行数值模拟分析,为生产实践提供参考.

1 模拟对象的几何结构

焚硫炉及喷枪结构如图 1 所示(各部分结构未按比例绘制).以某焚硫炉及配套机械喷枪(SG-I)为例,对喷枪结构进行局部改进,在喷嘴四周通入压缩空气,结构参数如表 1 所示.

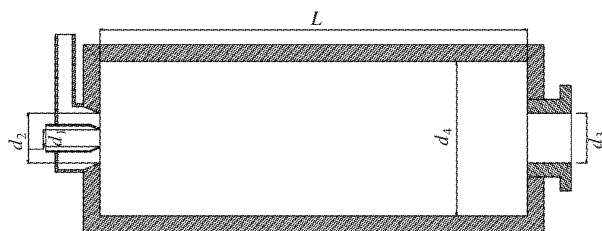


图 1 焚硫炉

Fig. 1 Burning sulfur furnace

表 1 模拟对象基本尺寸表

Table 1 The mock object basic size mm

硫磺喷枪喷嘴直径 d_1	辅助空气进口直径 d_2	排气口直径 d_3	焚硫炉直径 d_4	焚硫炉有效长度 L
10	200	300	2 000	6 000

给定的工艺参数:该配套装置硫酸产量为 800 t/d,计算出喷枪液硫流速为 5 m/s.其物性的物性参数如表 2 所示.

收稿日期:2013-11-13

基金项目:武汉工程大学研究生创新基金资助项目(CX201225)

作者简介:杨 红(1971-),男,湖北宜都人,教授,博士.研究方向:新型高效过程装备技术、机械设备智能监控、虚拟现实技术及应用等.

表 2 物性参数表

Table 2 Physical property parameter

	温度 $t/^{\circ}\text{C}$	密度 ρ $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	粘度 μ $/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
喷枪出口处 液态硫磺	130	1 797	8.66×10^{-3}
空气进口处	130	0.873	23.15×10^{-6}

2 仿真过程

(1)模型建立. 利用 Gambit 创建模拟对象的几何模型, 模型的具体尺寸以实际尺寸为准(见图 1). 该焚硫炉有两个进口, 一个出口. 工作过程如下: 液态硫磺经过喷枪高速射入焚硫炉内, 形成机械雾化, 喷嘴四周设有空气进口, 辅助液硫雾化. 该模型为对称结构, 故采用 $2d$ 模型求解即可, 模型比较单一采用结构性网格(即四边形网格), 由于进出口附近流体的流动非常复杂, 流体流动的梯度较大, 而且是数值模拟的最重要区域^[3], 所以在这些区域采用了加密网格的方法, 从而细化网格提高计算精度, 模型最后的网格总数目为 133 000 个.

(2)选择计算模型. 该模拟对象只涉及到液体和气体的两相流动, 故选用 VOF 模型, 由喷嘴处液硫速度及空气流速计算出雷诺数, 以及相关学者得出的这类射流流动的经验, 选择 k -epsilon 湍

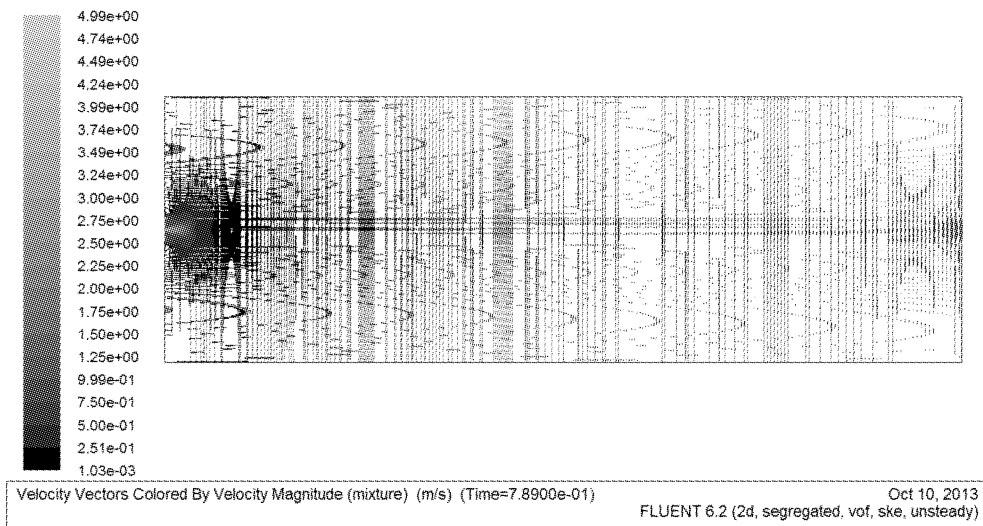
流模型^[4].

(3)边界条件设置. 焚硫炉内气液边界条件较为简单, 进口处以液硫、空气的实际速度为基准, 出口处采用压力出口, 且空气、液流的进口温度与出口温度相同, 焚硫炉的壁面选用标准无滑移壁面并假设其绝热.

(4)求解器控制参数的设置. 由相关定义计算后可确定该模拟对象为非定常流动, 宜采用压力-速度耦合方程求解, 并选用 PISO 算法, 其计算收敛性较好, 结果较为准确^[5].

3 计算结果及对比分析

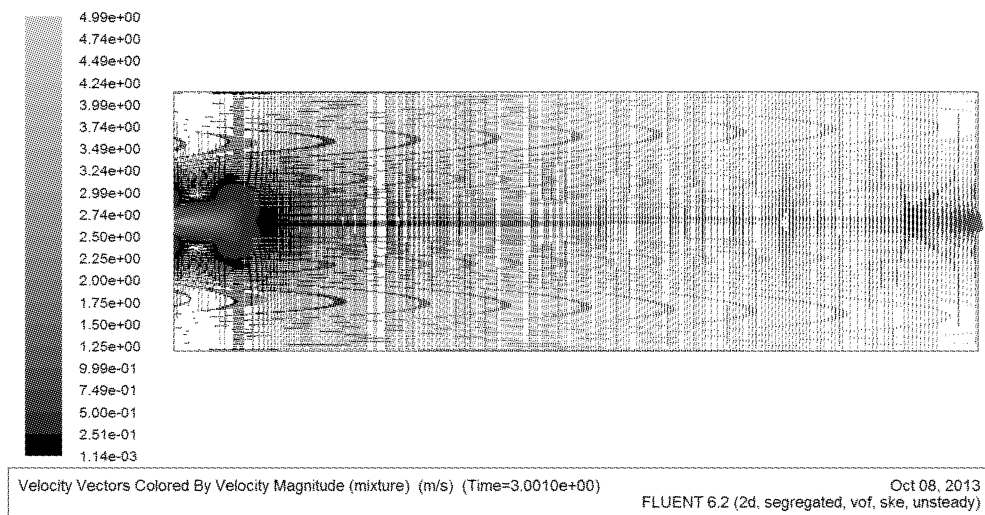
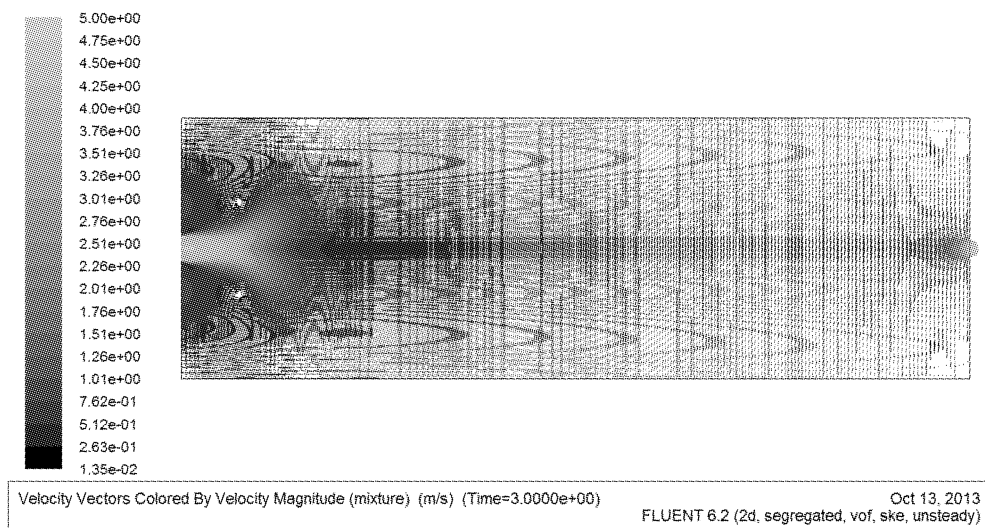
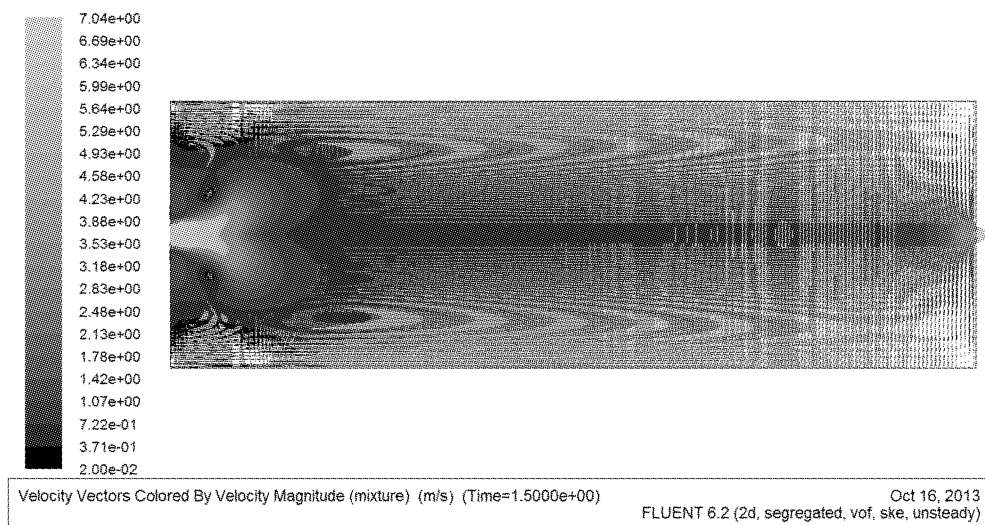
以喷嘴处液硫作为离散相取速度 5 m/s 为定值的参考对象, 液硫喷入焚硫炉内, 其目的是液硫能充分燃烧, 故需要一定量的空气. 由相关化学反应方程式可计算出当空气的速度大于 0.07 m/s 时, 即可满足燃烧要求, 其中过量空气可循环利用. 本文只进行喷枪的雾化数值模拟, 对空气流速是一个试探性的取值, 通过分析对比雾化的速度矢量图, 判断空气流速取值的范围. 所以空气进口的速度分别取 0 m/s 、 2 m/s 、 4 m/s 、 6 m/s 、 8 m/s 、 10 m/s 进行数值模拟求解. 图 2~7 所示为采用 k -epsilon 模型, 在液硫速度为 5 m/s 的条件下, 不同空气速度下计算出的喷枪外部流场的速度矢量图.

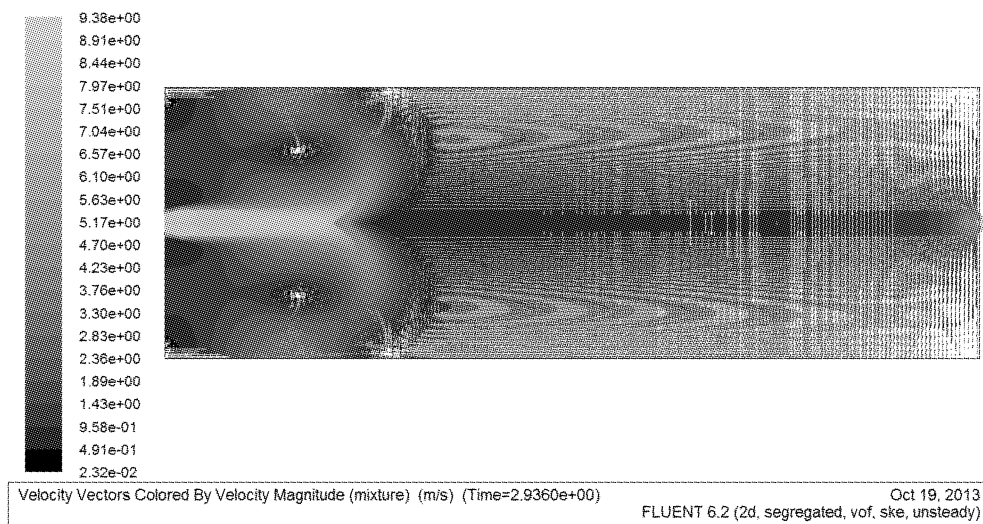
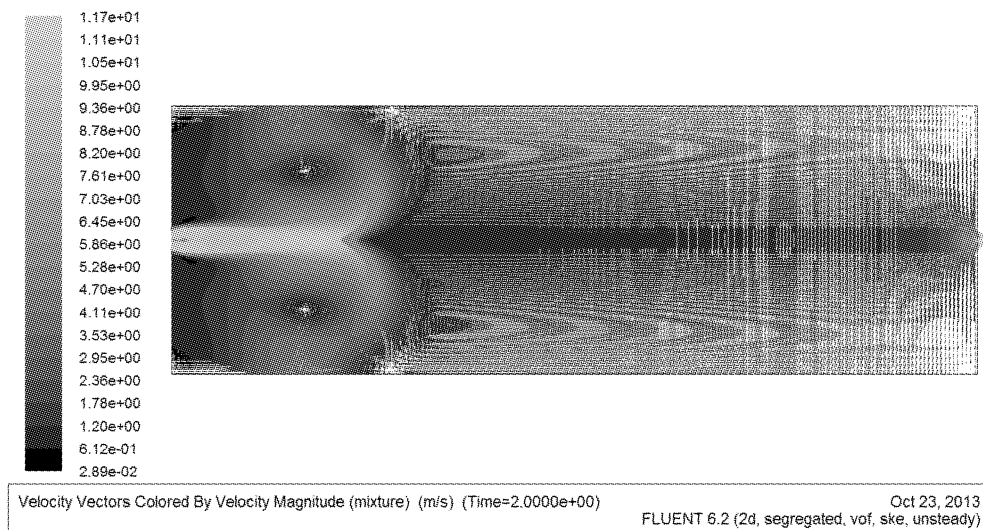
图 2 空气流速 $v=0 \text{ m/s}$ 时的速度矢量图Fig. 2 Air velocity $v=0 \text{ m/s}$

(1)图 2 为没有改进前(按输入空气的速度为 0)进行的数值模拟, 由速度矢量图可以看出: 该喷枪的雾化角小, 雾化行程较长, 而且速度分布不均匀, 液滴主要分布在喷嘴附近, 此状况表明该喷枪的雾化效果较差.

(2)图 3~7 为改进后(该结构能从喷嘴附近

输入一定速度的空气)进行的数值模拟, 由速度矢量图可以看出: 当输入一定速度的空气之后, 喷枪的雾化角、雾化行程变大, 液滴较为均匀的分布在 整个焚硫炉内. 这是因为当有一定速度的空气从 喷枪周围输入时, 在焚硫炉的喷枪附近形成一个 涡流负压区, 加速液硫向四周扩算, 增大雾化角及

图 3 空气流速 $v=2$ m/s 时的速度矢量图Fig. 3 Air velocity $v=2$ m/s图 4 空气流速 $v=4$ m/s 时的速度矢量图Fig. 4 Air velocity $v=4$ m/s图 5 空气流速 $v=6$ m/s 时的速度矢量图Fig. 5 Air velocity $v=6$ m/s

图 6 空气流速 $v=8$ m/s 时的速度矢量图Fig. 6 Air velocity $v=8$ m/s图 7 空气流速 $v=10$ m/s 时的速度矢量图Fig. 7 Air velocity $v=10$ m/s

雾化行程,这一现象与伴随射流理论一致^[6],从而使液硫能够快速雾化。

(3)由图 6~7 的速度矢量图可以看出:当输入空气的速度过大时,导致喷枪附近的涡流强度较大,使液硫雾滴回流,雾滴甩向焚硫炉的壁面,造成硫磺挂壁现象。这种情况不利于雾化,在焚硫炉内要避免发生。

(4)综合图 2~7 可以得出:当喷枪周围输入一定速度的空气后,有利于雾化。在喷枪出口处液硫速度为 5 m/s,空气进口速度为 4~6 m/s 时,焚硫炉内喷枪的雾化效果较为理想。

4 结 语

利用 fluent 软件对焚硫炉内喷枪的雾化情况进行了数值模拟,通过改进局部结构,在特定的工

艺参数下,进行了多组数值模拟,得到多组速度场的分布图,分析雾化角及雾化行程的变化关系,得到了该工艺条件下液硫与空气速度相关的耦合参数。即在喷枪出口处液硫速度为 5 m/s,空气进口速度为 4~6 m/s 时,该工艺中喷枪的雾化效果较好,对生产实践有一定的指导意义,同时也为以后焚硫炉内的燃烧情况的数值模拟研究奠定了坚实的基础。

致 谢:

感谢武汉工程大学研究生创新基金提供的资助,以及武汉都市环保工程技术股份有限公司王呈祥在数值模拟过程中给予的指导。

参考文献:

[1] 冯晓民. 硫磺制硫酸工艺研究[J]. 上海化工, 2007,

- 8(11):26-27.
- FENG Xiao-min. Using sulfur to improve the sulfuric acid technical process [J]. Shanghai Chemical Industry, 2007,8(11):26-27. (in Chinese)
- [2] 侯凌云,侯晓春. 喷嘴技术手册[M]. 北京:中国石化出版社,2007:69-72.
- HOU Ling-yun, HOU Xiao-chun. Handbook for nozzle technology[M]. Beijing: China Petrochemical Press,2007:69-72. (in Chinese)
- [3] 刘国雄. 空气雾化涂料喷枪涂流场仿真及特性研究[D]. 杭州:浙江大学图书馆,2012.
- LIU Guo-xiong. Simulation study on the spray flow field of air atom paint spray gun[D]. Hangzhou: Zhejiang University Libraries System, 2012.
- [4] 韩占中. FLUENT-流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009:266-271.
- HAN Zhan-yuan. FLUENT-fluid simulation calculation of engineering examples and analysis [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009:266-271. (in Chinese)
- [5] 杨红,王呈祥,肖臻. 穿流型搅拌器开孔位置的数值模拟[J]. 武汉工程大学学报,2013,35(2):65-68.
- YANG Hong, WANG Cheng-xiang, XIAO Zhen. Numerical simulation of the hole position of punched impeller [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2013,35(2):65-68. (in Chinese)
- [6] 董志勇. 射流力学[M]. 北京:科学出版社,2005:15-31.
- DONG Zhi-yong. Jet mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2005:15-31. (in Chinese)

Numerical simulation of air-atomizing sulfur gun

YANG Hong ,XIAO Zhen ,ZHOU Yan ,YANG Fan , LIU Yang

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Institute of Technology,
Wuhan 430074, China;2. Hubei Yihua Chemical Industry CO.,LTD., Yichang 443000, China)

Abstract: Air atomization and mechanical atomization are combined to improve the performance of the sulfur spray gun. The FLUENT software was used to analyze the field of velocity on the basis of two-phase-flow model. The actual speed of liquid sulfur air was selected as the inlet boundary condition while the pressure was chosen as the outlet boundary condition. Standard no-slip wall was adopted as the wall of sulfur furnace, which was assumed adiabatic to simplify the gas-liquid boundary conditions of sulfur furnace. The k-epsilon turbulence model was adopted as the calculation of the model, while the pressure-velocity coupling equation and the pressure implicit with splitting of operators algorithm were applied to calculation. The results reveal that there is a negative pressure of vortex near the spray gun when a given velocity of air is steady, which accelerates the expansion speed of liquid sulfur, increases the angle and distance of atomization and makes the atomization distribution more homogeneous. Taking the data of a sulfur furnace, it demonstrates that the best atomization result comes up at 4~6 m/s of the inlet velocity when the speed of liquid sulfur is set at 5 m/s.

Key words: sulfur spray gun; air atomizing; two-phase flow model; numerical simulation

本文编辑:陈小平