

挥发性有机化合物 (VOCs) 催化装置性能fluent流体数值分析

吴兴祥¹ 刘冬^{2*} 原光辉¹ 张亮¹

1. 中船海洋动力部件有限公司, 上海 201306

2. 上海海事大学, 上海 201306

摘要: 通过对挥发性有机化合物 (VOCs) 收集处理装置三维建模, 并运用fluent流体数值分析方法, 对VOCs催化设备内流场进行数值分析, 催化床用多孔介质等效替换, 其结果表明, 其内置流场速度分布与入口布置, 流域形状, 多孔介质层数直接相关。合理的入口布置与流域形状有利流场流速的均匀性, 多孔介质的层数越多其流速均匀性越好。

关键词: VOCs; fluent; 流域形状; 多孔介质; 流速均匀性;

一、引言

油漆间工作时会产生大量的挥发性有害气体, 会不同程度影响当地环境和人们的生活环境水平, 对于有害气体的收集和处理显得愈发重要, 同时新的公约标准对工业区有害气体的排放有进一步要求, 针对这些要求, 公司研发生产了一套VOCs (volatile organic compounds) 收集处理装置。为了更可靠更方便更有科学依据说明此套设备的性能, 现对其展开研究与分析。

而催化设备在整套设备中是关键设备之一, 催化设备工作性能的好坏直接影响整套设备的性能。催化设备中催化剂^[1,2]为贵金属整体式蜂窝型模式, 模拟时采用多孔介质形式来引入此模型。VOCs与空气混合气体从装置进口流入, 经过蜂窝型催化剂, 再经过热交换器流出。其冷却气体进出口就是装置从油漆间收集后的混合气体, 在热交换器处先进行预加热, 同时对催化装置出口起到冷却的作用。而催化剂的催化效果与处理混合气体的含VOCs气体的均匀程度, 以及流经催化剂区域的流速分布情况有关, 不同流速会影响催化剂的催化效率^[3], 同时流速分布不均匀, 会导致整体式催化剂的利用效率下降。

为了研究其催化装置的流场特性^[4,5,6], 需要对其展开分析与研究, 而采用fluent数值分析的方法, 会更加直观了解整个装置流场分布和工作特性。

二、模型

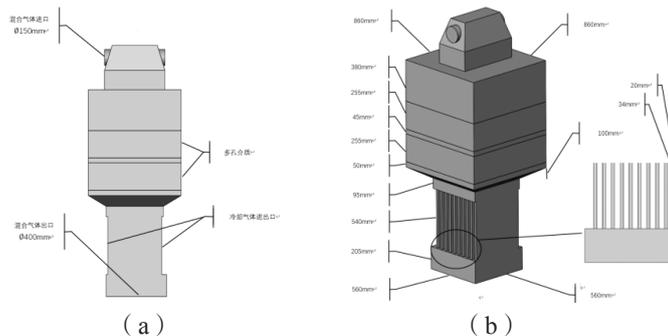


图1 (a) 催化装置内流域各个区域边界; (b) 催化装置内流域尺寸参数

为了准确地反应实际装置工作时的流场特性, 需要对装置流场区域进行三维建模, 根据其装置实际情况来搭建三

*通讯作者: 刘冬, 1997年5月, 男, 汉族, 安徽池州人, 就读于上海海事大学, 硕士。研究方向: 电气工程。

基金项目: 港口机械与海工装备智能装配关键技术研究及其示范应用 (18040501600); 临港新片区高新产业和科技创新专项项目 (SH-LG-GK-2020-37)。

维装置流域^[7]。同时为了减少相应的无关计算量，对其局部等小细节对装置流场分析影响很小的局部区域进行简化、优化。同时对催化区域通过引入多孔介质模型^[8]来等效替代其在流场中对流体流动特性的效果。根据实际装置建立以下相关的流道区域模型，如图1所示。

如图1(a)所示为催化床的边界情况，包括混合气体进口、混合气体出口、冷却气体进出口和多孔介质模拟蜂窝型催化剂。

如图1(b)所示为催化床的尺寸参数，尺寸信息如上图所示，总高2337 mm，最大宽度860 mm，催化剂区域为255 mm。下部为热交换器，冷混合气体从换热板间隔空隙中流过，催化燃烧后气体从换热板内部区域流过，再从混合气体出口排出。

如图1所示，均直接定义催化床的内部流体区域模型，外部壳体不显示在流体模型场景中。

三、Fluent 边界条件确立

整个系统的流量与抽气机的风量直接相关，假设在理想状况下的系统流量完全由抽气机的风量决定，设定整体系统的入口风量：

$$v_v = \frac{Q}{3600 \times S_{in}} \quad (1)$$

Q风机的风量， S_{in} 入口截面面积。将5000 m³/h，以及半径 $r = 0.075$ m，代入式中，求得 $S_{in} = 0.0177$ m²，解得 $v_v = 78.6$ m/s；见图2。

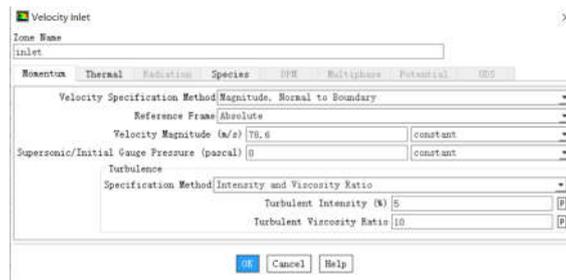


图2 混合气体入口边界流速

根据实际测得的VOCs浓度，来定义混合气体的各组分含量，在此实例中，选用甲苯来代表整个VOCs的组分，来模拟催化处理装置流道的流动分布情况。测得室内VOCs气体浓度为200 mg/m³，将其换算为进口质量分数。在标准状况下一立方米空气质量大约为1.29 kg/m³，其进口甲苯质量分数为200 mg/1.29 kg = 0.0155%，见图3。

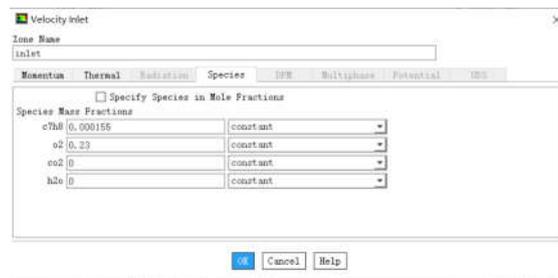


图3 混合气体入口边界气体组分

四、网格无关性分析

表1 VOCs内流域网格数与出口边界流速

单元尺寸	网格单元数	出口流速 (m/s)
默认网格	127385	9.861
25mm	211254	10.234
20mm	310967	10.426
17mm	432815	10.616
15mm	576869	10.407

在fluent数值分析中，通过把流域离散为众多单元区域的形式来计算其流场特性，而数值离散的方法会使其解算结果与真实值存在误差。所以离散单元的数目会直接影响求解精度，在理论上，网格数目越多其求解精度越高，但是过高的求解精度会导致计算量无限制的增大，影响求解速度和电脑的资源配置。在满足一定精度的网格数目和优良的求解速度之间取得一个平衡就至关重要。研究单元网格数与出口流速的无关性。

如表1所示，当网格尺寸达到20 mm后时，其出口流速变化趋于稳定。

五、流场分析

假设VOCs收集处理装置混合气体经过缓冲，过滤吸附装置到达催化装置入口时，已经混合均匀，且比较稳定。在此文分析中着重针对催化装置内部流场速度分布进行分析。因为速度的分布情况直接，影响催化装置的催化效果包括催化转换效率，以及整体催化剂的利用率。同时为催化剂的布置以及VOCs催化氧化仿真模拟提供理论依据。

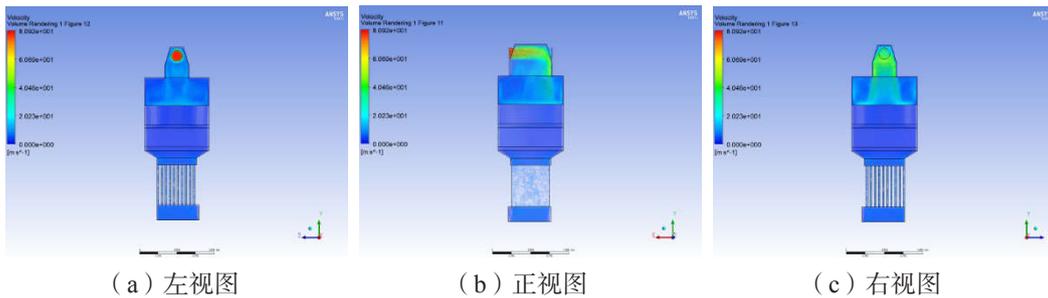


图4 催化装置内部整体流速分布

如图4所示为催化装置内部整体流速分布情况。催化装置进口流速很高达到80 m/s，且入口处速度波动比较剧烈，根据上述云图观察，颜色鲜明处，速度流速较大，此催化装置多孔介质上部气体流速差异较大，局部流速明显。由于进口的布置，会导致气体流速分布不均匀。同时由于进口流速较高，导致其他低流速区域云图颜色变化状况并不明显，但并不意味着流速分布均匀。下面对催化装置催化区域进行局部分析。

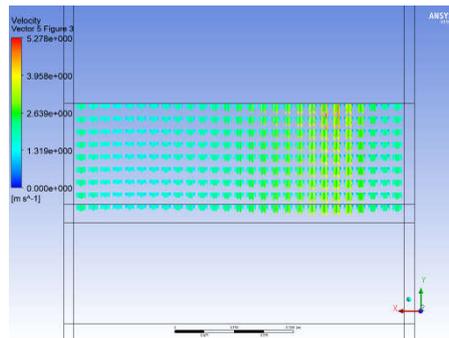


图5 催化装置上层多孔介质速度矢量分布图（左侧靠近入口，右侧远离入口）

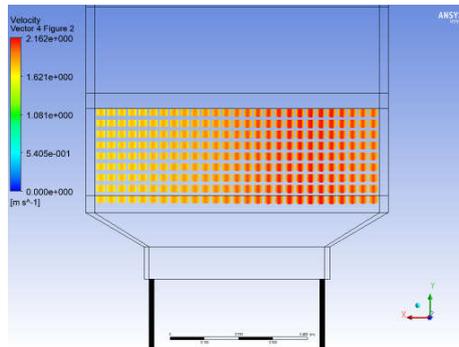


图6 催化装置下层多孔介质速度矢量分布图（左侧靠近入口，右侧远离入口）

如图5与图6所示，多孔区域由于入口布置的影响，远离入口端的混合气体流速比靠近入口段的混合气体流速明显较大。同时上层多孔区域局部流速速度差明显高于下层多孔区域流速速度差。上层多孔区域局部流速最高流速大致为

5.278 m/s, 最低流速大约为1.3 m/s, 已接近四倍的流速差异。而下层多孔区域局部流速最高流速大约为2.162 m/s, 最低流速大约为1.5 m/s。由此可见, 在多孔区域处流速分布不均, 且局部差异较大。而下层多孔区域流速分布均匀性比上层多孔区域更加均匀。

为了观察混合气体流经多孔介质时其黏性阻力对速度分布的影响, 在多孔区域Z轴方向上, 每隔0.16米建立一个平面, 从左到右总共5个平面用来检测多孔区域上层混合气体流速分布情况。

如图7所示, 下端的云图颜色数目明显小于上端的云图数目, 且下端云图最高流速低于上端的最高流速, 且颜色越深的区域, 其流速等高线变化越明显。说明在经过多孔介质时, 由于存在粘性阻力, 对流速区域均匀性存在积极的影响。同时流速越高时, 其效果越明显。

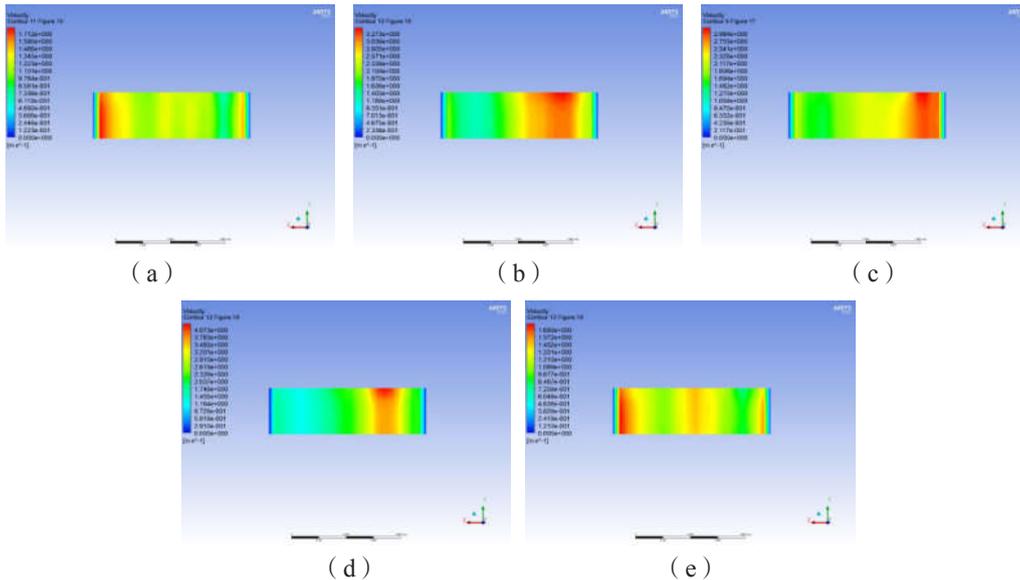


图7 催化装置上层多孔介质Z轴方向上排列速度分布云图 (从左到右)

在多孔区域Z轴方向上, 每隔0.16米建立一个平面, 从左到右总共5个平面用来检测多孔区域下层混合气体流速分布情况。

如图8所示, 在上层多孔区域的流体阻力的影响下, 流速等高线变化不大, 同时其云图颜色跨度也进一步下降, 下层多孔介质中的速度分布均匀性明显上升。

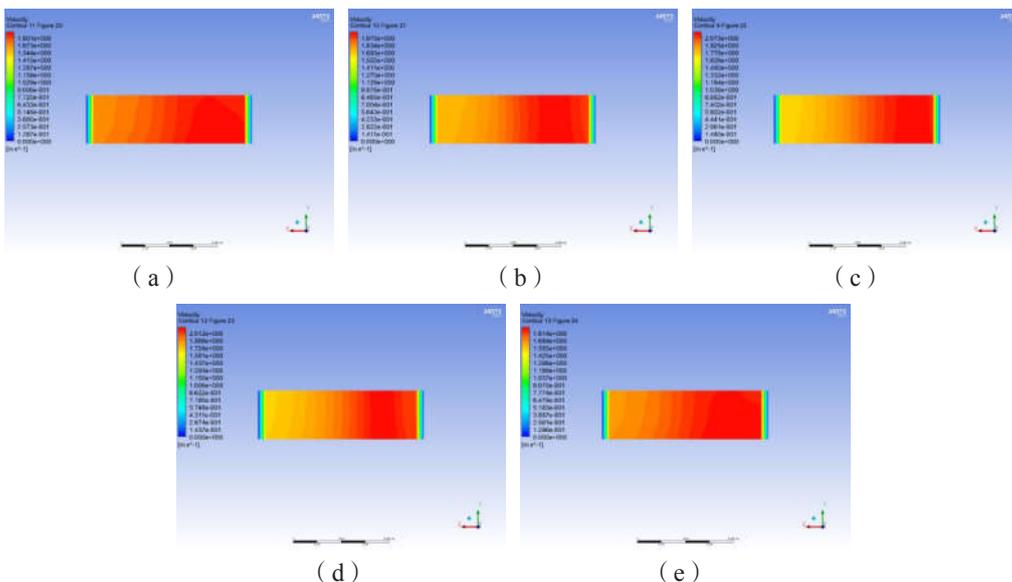


图8 催化装置下层多孔介质Z轴方向上排列速度分布云图 (从左到右)

为了观察混合气体流经多孔介质时速度局部分布的情况，在多孔区域Y轴方向上，每个多孔区域建立三个平面，从上到下总共6个平面用来检测多孔区域混合气体流速分布情况。

如图9所示，受入口布置和流域形状的影响，在上层多孔介质区域，出现两个局部速度较大的流域，其上层的流域均匀性较差，局部流域速度差异较大且变化明显。

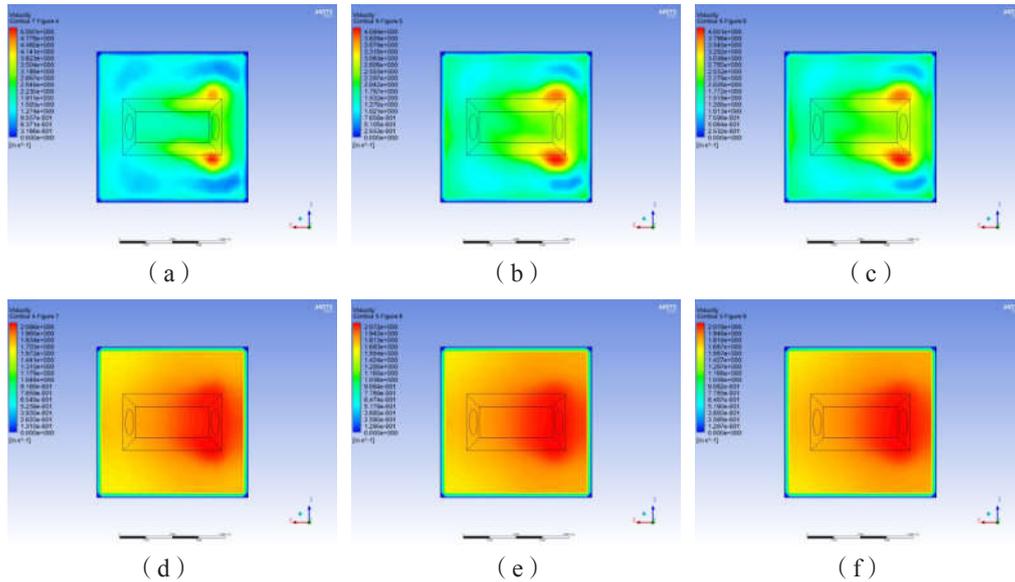


图9 催化装置下层多孔介质Y轴方向上排列速度分布云图(a-f为从上到下分布)

其下层多孔介质也存在一个局部流速较大的区域，但相对于上层多孔介质而言，其流速均匀性也得到了很大改善，其最大流速区域面积也大幅度增大，流速均匀性得到一定的保证。且速度变化范围也大大降低。

六、结论

通过fluent数值分析的方法，对VOCs催化装置进行仿真分析，并得到如下结果。

第一，在此VOCs收集处理装置中，催化装置的流速分布由于进口的布置情况，出现局部流速差异较大的情况，流速分布不均匀，远离入口处流速比靠近入口处偏大。

第二，催化剂的多层布置，对流速均匀性起到积极的作用，由于其存在较大的粘性阻力，有利于增强流速的稳定性和均匀性，改善催化剂区域的流域流场速度分布。

第三，同时流速分布受众多因素的影响，包括入口分布，流域形状，以及多孔介质布置等诸多因素，故为了改善流场流速分布，可通过这些方面进一步改善流场分布。

参考文献：

[1]殷珂,陈瑞洋,刘志明.锰基氧化物上甲苯催化氧化的研究进展[J].材料导报, 2020,34(23):23051-23056.
 [2]陈丹,田树梅,石静,沈华瑶.多孔氧化硅负载银催化剂催化消除VOCs的研究进展[J].环境化学, 2020,39(11):3145-3152.
 [3]梁文俊,刘迪,任思达,李坚.基于Fluent的整体式催化反应系统降解甲苯的数值模拟[J].环境工程学报, 2020,14(02):457-464.
 [4]向靖锋,王立华,黄亚宇.基于Fluent的打叶机内部流场数值模拟[J].农业装备与车辆工程, 2021,59(02):83-86.
 [5]张忱,张人会,李仁年,孟凡瑞.液环泵叶片轴向叶顶凹槽间隙流场及其性能[J/OL].排灌机械工程学报:1-6[2021-04-14].
 [6]郭禹,秦传新,章守宇.基于结构差异性正方体鱼礁的流场效应研究[J/OL].渔业科学进展:1-11[2021-04-14].
 [7]陈磊,谭均军,石小涛,柯森繁,谭红林,李鸿.组合隔板式鱼道水力特性数值模拟研究[J/OL].长江科学院院报:1-7[2021-04-14].
 [8]吕兆华.泡沫型多孔介质中非达西流动特性的研究[J].工程力学, 1998(02):57-64.