



文章栏目: 大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202109016 中图分类号 X742 文献标识码 A

卢衍波, 王振中, 赵飞, 等. 基于三维非稳态模型的车载加油油气回收系统碳罐结构优化[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2586-2594. [LU Yanbo, WANG Zhenzhong, ZHAO Fei, et al. Structure optimization of the carbon canister for onboard refueling vapor recovery system based on three-dimensional unsteady-state[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(8): 2586-2594.]

基于三维非稳态模型的车载加油油气回收系统碳罐结构优化

卢衍波¹, 王振中², 赵飞³, 朱玲^{3,✉}

1. 中国石油化工股份有限公司科技部, 北京 100728; 2. 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 青岛 266071; 3. 北京石油化工学院环境工程系, 北京 102617

摘要 以车载加油油气回收系统 (ORVR) 碳罐吸附过程的传质传热过程为研究对象, 以正丁烷/氮气模拟挥发油气, 采用固定床吸附实验测试和 CFD 数值模拟相结合的方法, 结合物种转移模型、层流模型和多孔介质模型, 建立了三维非稳态 ORVR 碳罐的数值模型, 以穿透时间和温度为特征量, 从腔体体积比和进出口直径两个方面对其结构进行初步优化设计。结果表明, 吸附过程床层温度模拟值与实验值偏差率低于 7%, 双腔体体积比为 5:3 时, ORVR 碳罐吸附过程中温度升高值相比其他结构低 0.9~1.6 °C, 安全性高; 进出口直径为 12 mm 时, 在吸附穿透时间和床层温度升温方面综合性能最好。本研究可为 ORVR 碳罐结构优化设计提供参考。

关键词 ORVR 碳罐; 吸附; 数值模拟; 三维非稳态模型; 结构优化

根据《2020 中国生态环境状况公报》, 全国 337 个地级以上城市 O₃ 浓度同比下降 6.8%。然而, 以 O₃ 为首要污染物的大气超标天数占总超标天数比例仍高达 37.1%^[1]。VOCs 是形成 PM_{2.5} 和 O₃ 的重要前体物, 也是现阶段重点区域 O₃ 生成的主控因子。在生态环境部制定的十四五目标污染物中, VOCs 已替代原来的总量指标 SO₂。因此, 为深入打好污染防治攻坚战, 在强化细颗粒物 (PM_{2.5}) 和臭氧 (O₃) 协同控制的同时, 还需推进 VOCs 减排, 推动重点行业深度治理, 并强化机动车的污染管控。

在我国, 加油过程中油气蒸发排放量占汽车行业蒸发排放总量的 20%。每年因加油过程蒸发排放导致的燃油损失约为 0.26%^[2]。车载加油油气回收系统 (onboard refueling vapor recovery, ORVR) 系统是一种可高效减少加油油气污染的控制技术。根据美国排放控制制造商协会 (Manufacturers of Emission Controls Association, MECA) 2020 年度报告, ORVR 的处理效率可达到 98%。截至 2019 年, 在美国, 装配了 ORVR 的车辆已减少了 91% 加油污染物排放^[3]。在我国, 《加油站大气污染物排放标准》(GB 20952-2020) 要求当辖区内采用 ORVR 的轻型汽车达到汽车保有量的 20% 后, 油气回收系统、在线监测系统应兼容 GB 18352.6 要求的轻型 ORVR 系统^[4]; 《加油站油气排放控制和限值》(DB11/208-2019) 规定, 新、改、扩建加油站应使用与 ORVR 轻型汽车兼容的加油站加油油

收稿日期: 2021-09-04; 录用日期: 2022-05-06

基金项目: 中国石油化工股份有限公司项目 (320109); 北京市长城学者培养计划项目资助项目 (CIT&TCD20190314); 北京石油化工学院重要科研成果培育项目资助 (BIPTACF-003)

第一作者: 卢衍波 (1968—), 男, 硕士, 高级工程师, luyb@sinopec.com; ✉通信作者: 朱玲 (1975—), 女, 博士, 教授, zhuling75@bipt.edu.cn

气回收系统或油气处理装置^[5]。

碳罐 (Carbon Canister) 是 ORVR 的重要组成部分, 能吸附和储存加油过程中产生的油气^[6-7]。活性炭的性能^[8-9] 和碳罐结构^[10-12] 是影响碳罐性能的重要因素。CFD 数值模拟是碳罐结构优化设计的一种方法。BAI 等^[13] 利用 Fluent 建立三维碳罐模型, 采用线性驱动力传热传质速率方程, 研究 He/CO₂ 混合气在活性炭上的吸脱附过程, 发现吸附过程应采用绝热模型。HOU 等^[14] 采用多孔介质模型, 对不同操作条件下碳罐内部流场进行数值模拟研究, 吸附孔、解吸孔与大气孔间的压差不同, 存在压降差异。SOU 等^[15] 建立基于非平衡、非等温和非绝热算法的碳罐固定床系统模型, 用 Dubinin-Astakhov 方程和拉格朗日插值多项式描述固定床中吸附传质传热过程, 分析浓度、温度和压力对 HC 组分在活性炭中吸脱附性能的影响。黄远清等^[16] 将碳罐内的活性炭和无纺布定义为多孔介质, 根据碳罐内的压降验证模型的准确性。翟豪瑞等^[17] 基于多孔介质原理, 运用 k-epsilon 湍流模型, 模拟研究 11 种流量下碳罐内部的通气阻抗值, 分析内部流场的流动特性。李岳林等^[18] 将实验数据、理论计算及模拟仿真相结合, 以碳罐的沿程阻力为参数, 得出碳罐大气口孔径的最优取值范围。此外, 活性炭吸附有机物是典型的放热过程, 会导致床层温度升高, 产生安全隐患。然而, 目前所开展碳罐吸附过程温度场模拟的研究还较少。总体看来, 国内对于 ORVR 碳罐的研究仍处于起步阶段, 针对碳罐处理效率的研究分析仍较少。

本研究拟采用实验与数值模拟相互验证的方法, 借助商业 CFD 数值模拟软件 Ansys Fluent, 建立三维非稳态计算模型, 针对不同体积比的多腔体结构 ORVR 碳罐, 分析吸附有机废气过程中温度场和浓度场的变化, 以期 ORVR 碳罐结构优化设计提供参考。

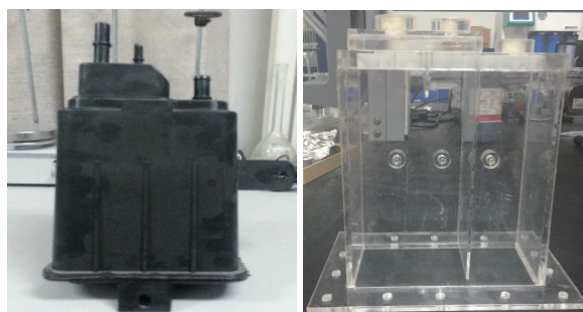
1 实验装置及步骤

1.1 ORVR 碳罐

本研究根据通用汽车公司所开发的多腔体结构 ORVR 碳罐 (图 1(a)), 结合模拟优化后的碳罐结构参数, 利用有机玻璃制作可视化 ORVR 碳罐 (图 1(b)) 进行模拟研究。在同一水平高度、多腔体内分别设置温度监测口, 并通过热电偶测量腔室内温度变化。

1.2 吸附过程参数的测量实验步骤

ORVR 碳罐实验测试系统如图 2 所示。采用 Westvaco 公司 WV-A1500 活性炭颗粒, 实验在室温下进行。反应气体积分数为 15% C₄H₁₀-N₂ 的混合气, 进气口流量为 2 L·min⁻¹。采用北分 BF-3420 气相色谱仪, 在线检测吸附前后尾气中 C₄H₁₀ 体积分数的变化。气相色谱检测的条件: 3 mm×1 m 的总烃柱, FID 检测器, 进样口温度 100 °C, 柱箱温度 80 °C, 检测器温度 150 °C; 氢气流量为 40 mL·min⁻¹, 空气流量为 300 mL·min⁻¹, 载气 (氮气) 流量为 30 mL·min⁻¹; 定量管体积为 0.1 mL。在可视化 ORVR 碳罐外包覆保温层, 以减少床层内热量损失。每隔 5 min 记录 3 个热电偶的温度。



(a) 通用汽车公司多腔体ORVR碳罐 (b) 结构优化后的可视化碳罐

图 1 多腔体 ORVR 碳罐

Fig. 1 Multi-cavity ORVR carbon tank

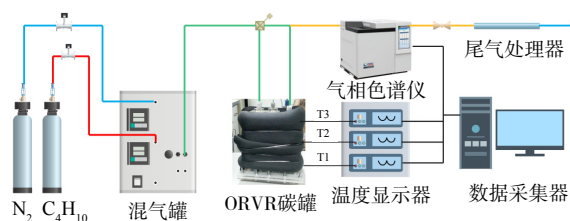


图 2 ORVR 碳罐实验测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the ORVR carbon tank experimental test system

2 CFD模型的建立与验证

2.1 数学模型

质量方程的表达式^[19-20]见式(1)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = S_m \quad (1)$$

式中： ρ 为流体密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； t 为时间， s ； u 、 v 、 w 分别是 x 、 y 、 z 方向上的流体局部速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； S_m 为质量源项， $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s})^{-1}$ 。

能量方程的表达式为^[19-20]见式(2)。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (2)$$

式中： c_p 为比热容， $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ； T 为温度， K ； k 为流体传热系数， $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ； S_T 为能量源项， $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

根据活性炭吸附正丁烷所得吸附热和一级动力学拟合方程参数^[19-20]，质量源项 S_m 和能量源项 S_T 可简化为式(3)和(4)。

$$S_m = \frac{dm_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}{dt \cdot dV_{\text{AC}}} = 28.5021e^{-0.02386 \frac{t}{60}} \quad (3)$$

$$S_T = \frac{S_m}{M_{\text{C}_4\text{H}_{10}}} \cdot Q_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 2.7266 \times 10^6 e^{-0.02386 \frac{t}{60}} \quad (4)$$

将所建立的物理模型导入 Fluent 软件，通过 UDF 将式(3)和(4)所示 S_m 和 S_T 加载到 Fluent 中。采用物种转移模型 (Species Model)、层流模型 (Laminar Model) 和多孔介质模型 (Porous Zone Model)；进口采用进气速度作为边界条件、出口采用压力作为边界条件、壁面设置为无滑移固壁边界。吸附器绝热，与周围环境不存在热交换。该模型为三维非稳态湍流模型，采用隐式算法进行求解。

2.2 几何模型与网格划分

可视化碳罐的尺寸见图 3(a)。进口直径 d_1 和出口直径 d_2 均为 12 mm；腔体总高度为 220 mm，其中进口端气体缓冲区域高 20 mm，吸附剂床层区高度为 160 mm，底部缓冲区域高度 40 mm；2 个腔体的长度分别为 92 mm 和 55 mm。根据上述尺寸建立几何模型 (图 3(b))。网格疏密程度会影响计算

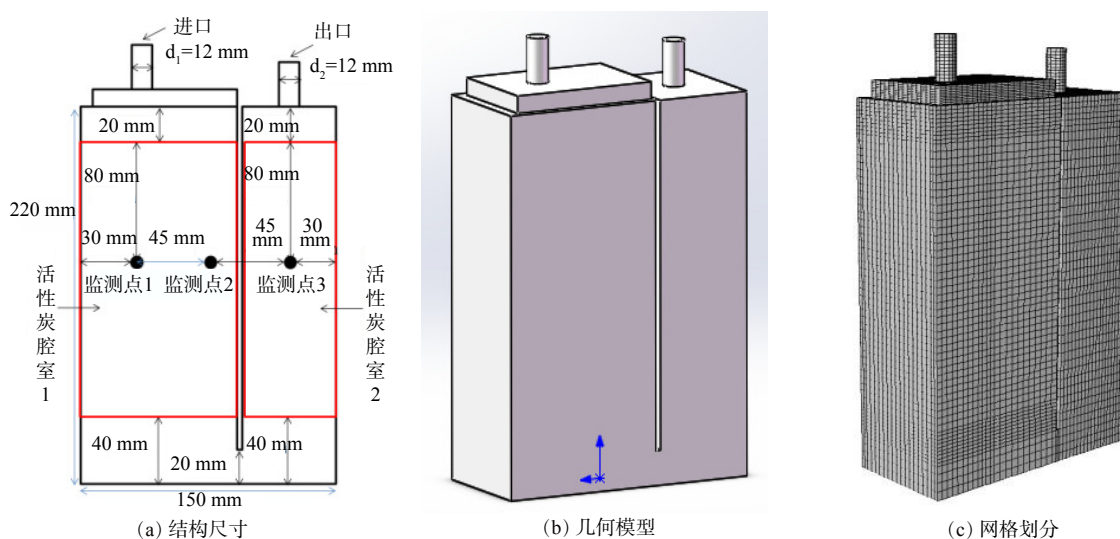


图 3 ORVR 碳罐几何模型与网格划分

Fig. 3 Geometric model and mesh generation of ORVR carbon canister

结果的准确性和高效性。本研究利用 Ansys ICEM 软件划分结构化网格 (见图 3(c))。网格数分别为 52 724、108 112、162 442 和 222 274。

选取 ORVR 碳罐出口污染物体积分数为特征量进行网格独立性验证, 得到不同网格模型下的体积分数值 (图 4)。网格数量从 1.08×10^5 增至 2.22×10^5 , 活性炭吸附饱和时间变化率低于 2%。考虑到网格数对计算时间的影响, 该模型在网格数 1.62×10^5 时达到计算精度要求。

3 结果与讨论

3.1 多腔体碳罐体积比的模拟优化

3.1.1 模型的建立

在几何模型 (图 3(b)) 的基础上, 调整碳罐的 2 个腔体长度 L_1 和 L_2 。 L_1 与 L_2 的比值分别为 2:1、5:3、3:2 和 1:1。4 种碳罐示意图及测温点位置如图 5 所示。其中, 出口监测点用于气体体积分检测, 网格数约为 1.6×10^5 。

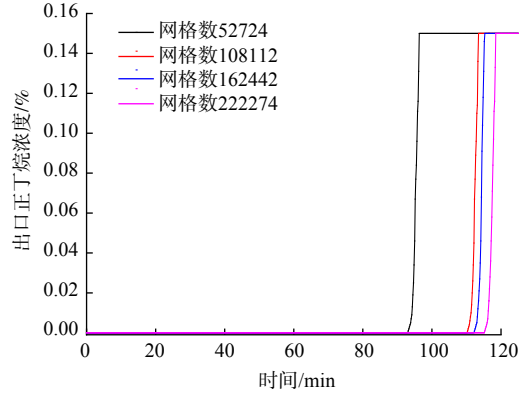


图 4 网格数量对出口体积分数的影响

Fig. 4 Effect of grid number on outlet volume fraction

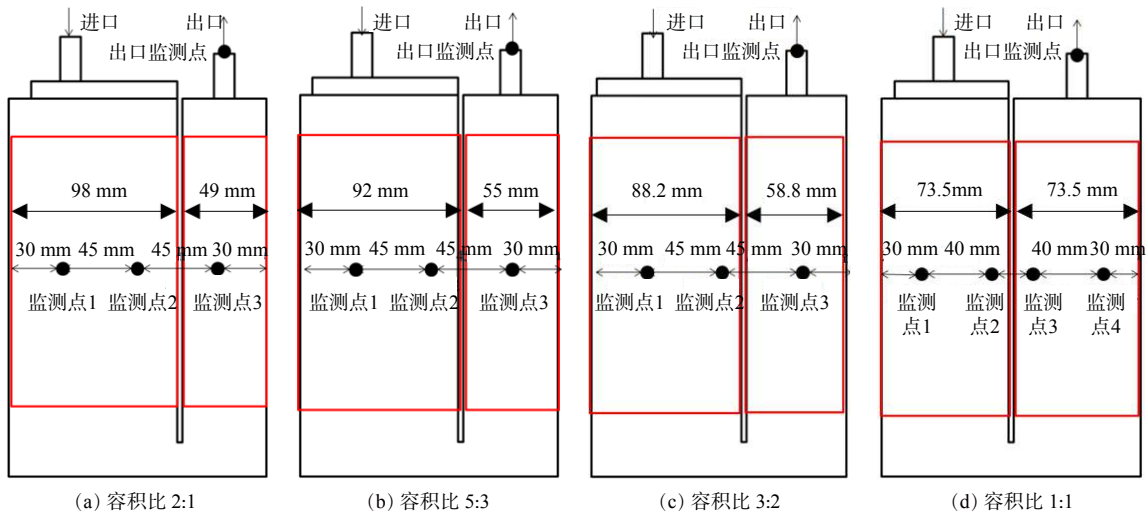


图 5 4 种不同容积比 ORVR 碳罐及测温点分布图

Fig. 5 Distribution of monitoring points of four different volume ratio ORVR carbon canisters

3.1.2 碳罐温度场分析

吸附是放热过程。随着气流中正丁烷分子移向活性炭吸附剂固体表面, 正丁烷运动速度大幅降低, 形成正丁烷与活性炭间的相互作用需要释放能量, 故吸附热量会持续释放^[21]。同时, 活性炭导热系数仅有 $0.15 \sim 0.20 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, 吸附过程中产生的热量难以向外界空间传递, 且吸附器绝热设置, 会导致碳罐腔室内的热量聚集、床层温度升高。在 4 种模型中, 床层起始温度均为室温 27°C , 各测温点的最高温度见表 1。

表 1 不同容积比的 ORVR 碳罐各监测点最高温度值
Table 1 The highest temperature values of each monitoring point of ORVR carbon canister with different volume ratio

容积比	监测点1/ $^\circ\text{C}$	监测点2/ $^\circ\text{C}$	监测点3/ $^\circ\text{C}$	监测点4/ $^\circ\text{C}$
2:1	37.1	36.6	40.5	—
5:3	36.2	35.7	39.3	—
3:2	37.2	36.9	40.9	—
1:1	34.9	34.9	39.1	39.1

对于容积比为 2:1、5:3 和 3:2 的 3 个碳罐, 1 和 2 两个监测点设置在同一个腔室, 距离进气位置高度一样, 且到碳罐壁面的距离接近, 故温度变化趋势基本一致。该条件下, 腔体内最高温度值为 39.5~40.9 °C。

图 6 表明, 吸附区域在径向和轴向均存在温度梯度, 呈现越靠近中心轴床层温度越高、沿两侧温度逐渐递减的趋势。升温区域总体呈现一个椭圆形, 且沿着气流方向的弧度比反向弧线更饱满。这表明进入腔室的气体流向对温度的分布有影响, 气流中未被吸附的 N_2 在流经活性炭床层时, 会携带部分床层热量, 气流温度升高。尤其是在左腔体中活性炭吸附饱和后, 进入右腔体的气流温度高于进口温度, 因此, 设置在右侧窄腔体中监测点 3 的最高温度比对应监测点 1 和 2 高 1.7~3.7 °C。同时, 在容积比为 1:1 的模型中, 2、3、4 监测点相较于其他模型中 2、3 监测点距离壁面更近, 故温度比监测点的 1 和 3 更低。

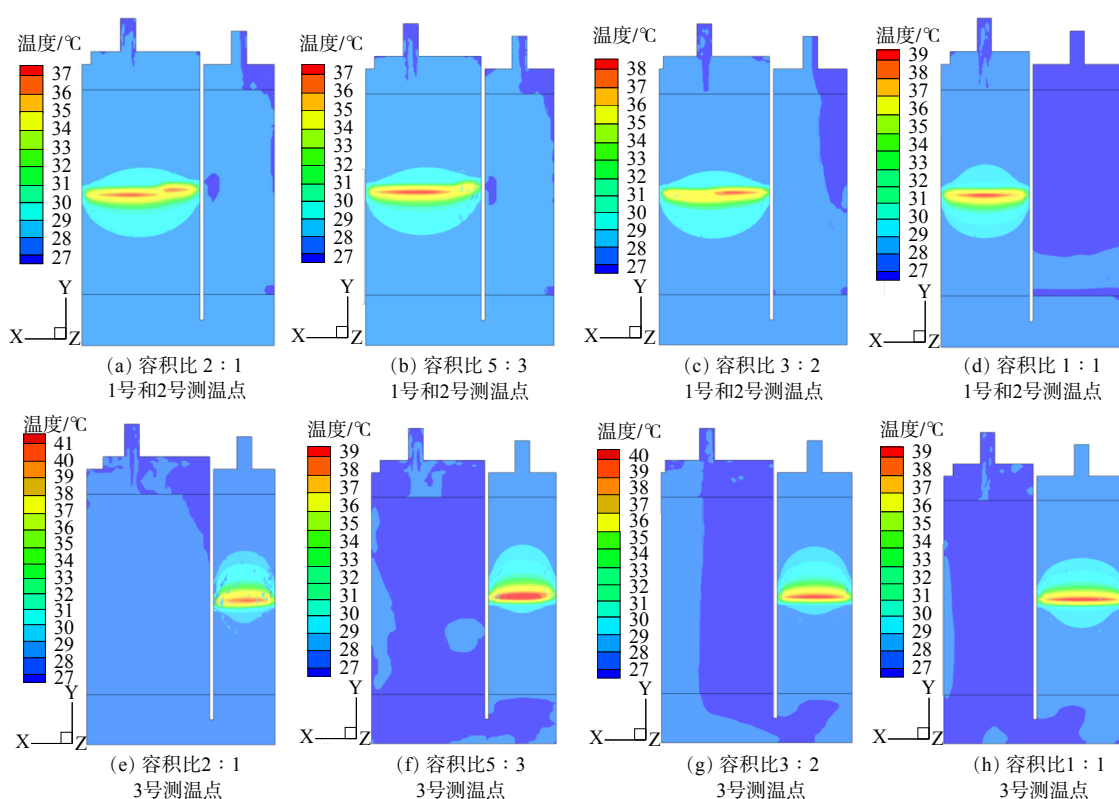


图 6 4 种不同容积比 ORVR 碳罐测温点温度云图

Fig. 6 Temperature contours of monitoring points in ORVR carbon canisters with different volume ratios

综上所述, 容积比为 5:3 时 ORVR 碳罐最高温度均为最小, 安全性最高, 故后续模拟中使用容积比为 5:3 的 ORVR 碳罐。

3.1.3 模型验证

根据上述模拟优化结果, 在 ORVR 可视化碳罐容积比为 5:3 时进行吸附过程实验 (装置见图 2), 3 个测温点的温度如图 7 所示。

表 2 表明, 3 个监测点最高温度的模拟值与实验值偏差率分别为 1.2%、2.1% 和 6.9%, 其中测温点 3 的偏差率最高。这是由于水平方向的热效应相互重叠, 其 1 和 2 测温点附近床层温度的升高也会引起 3 测温点处温度的变化。该结果表明两者吻合度高, 也较好地验证了所建立的 Fluent 模型对本研究中 ORVR 碳罐模拟结果的可靠性与正确性。

3.2 碳罐浓度场的分析

在容积比 5:3 的 ORVR 碳罐内, 3 个监测点的区域气流中正丁烷体积分数的变化见图 8。 C_4H_{10}/N_2 混合气体进入碳罐后, 活性炭表面吸附的正丁烷分子数量在达到吸附饱和后趋于稳定, 气流中有机物与进气的体积分数接近。整个 ORVR 碳罐可分为饱和区和、传质区和未用区, 在传质区 (mass transfer zone, MET) 有明显浓度梯度。在活性炭吸附有机气体的过程中, 活性炭的微观结构和孔径分布是影响吸附效率的主要因素^[22-23], 且在本研究的模拟过程中, 将活性炭物性均一简化处理。因此, 虽然物理吸附过程分为 3 个步骤, 但与孔道结构相关的内扩散在图 8 中并未体现, 故体积分数场随气流流向基本呈现均匀降低。

另外, 随着吸附过程的进行, 饱和区体积增加, 未吸附的活性炭所在未用区气流中有机气体的体积分数很低。最终, 在整个 ORVR 碳罐吸附饱和和穿透后, 进出口体积分数

基本一致。对比图 6 和图 8 发现, 吸附带所处区域与高温区域的高温区域基本重合, 这也说明发生吸附的吸附带区域热效应最显著。

3.3 碳罐进出口直径的优化

设定 ORVR 碳罐进、出口直径 d_1 与 d_2 相等, 分别取值为 6、8、10、12 和 14 mm。网格数量分别为: 173 212、160 548、152 714、162 442 和 169 836。图 9 表现了 5 种进出口直径下出口正丁烷体积分数, 吸附穿透速率接近、吸附穿透时间相差较大。吸附装置进出口直径减小会导致气体在吸附区域的分布不均匀, 有效吸附活性炭的总量减少^[24]。因此, 当进出口直径为 6 mm 时, 碳罐穿透时间为 54.75 min, 其余 4 个模型吸附穿透时间均为 113~125 min, 比其他模型缩短至少一半。同

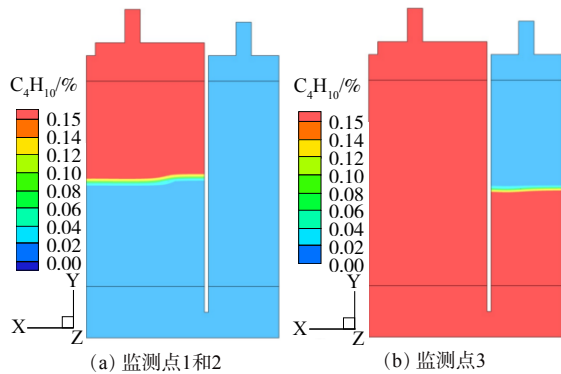


图 8 监测点 1、2 和 3 区域气流中正丁烷浓度云图
Fig. 8 N-butane concentration contours at monitoring points 1,2 and 3

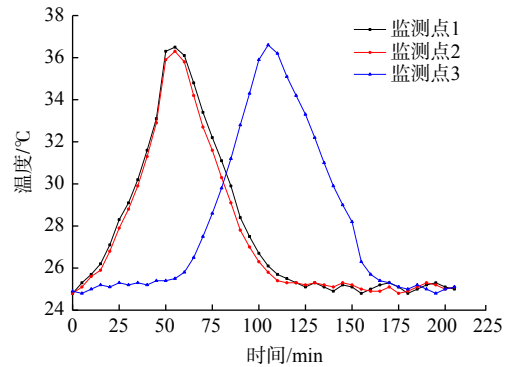


图 7 ORVR 碳罐 3 个监测点的温度曲线 (容积比为 5:3)
Fig. 7 Temperature curves of three monitoring points of ORVR carbon canister

表 2 3 个监测点最高温度的模拟值与实验值
Table 2 Simulated and experimental values of maximum temperature at three monitoring sites

监测点位	模拟值/°C	实验值/°C	偏差率%
监测点1	36.2	36.65	1.2
监测点2	35.7	36.45	2.1
监测点3	39.3	36.75	6.9

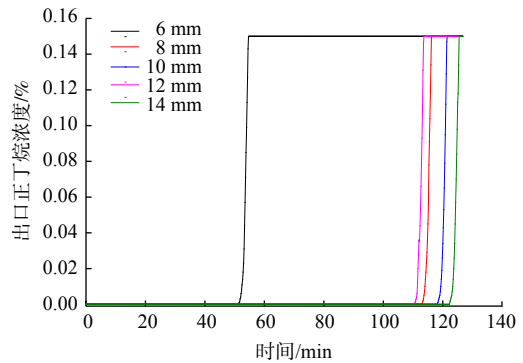


图 9 不同进出口直径下 ORVR 碳罐出口正丁烷体积分数变化

Fig. 9 Change of n-butane volume fraction at the exit of ORVR carbon tank under different inlet and outlet diameters

时, 较小的进出口直径会导致气体在罐内线速度加快、进口压力增加、碳罐内部局部温升, 从而影响碳罐安全性能及活性炭吸脱附性能^[25]。因此, 需增加床层温度作为结构优化的特征量。

图 10 为 8、10、12 和 14 mm 4 种进出口直径下碳罐 3 个监测点的温度变化模拟结果, 表 3 为

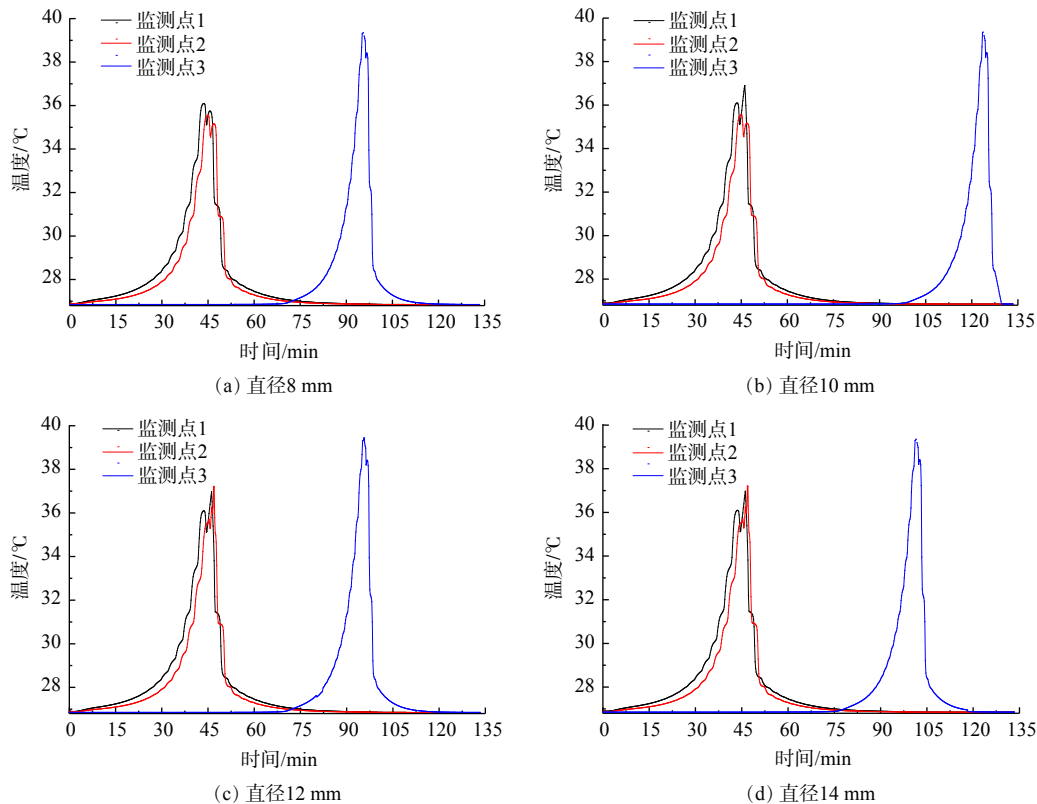


图 10 不同进出口直径下 ORVR 碳罐监测点的温度变化

Fig. 10 Temperature curves of monitoring points for ORVR carbon canisters with different diameter

对应的最高温度。

各测温点温度为 35.7~40.5 °C, 进出口直径 14 mm 的 ORVR 碳罐在监测点 3 区域温度最高为 40.5 °C, 其余 3 种碳罐各测温点的温度各有高低。其中, 进出口直径 12 mm 的碳罐的各测温点温度均为最低。因此, 进出口直径的优化结果为 12 mm。

4 结论

采用实验和模拟相结合的方法, 通过 UDF 将简化推导后的质量源项 S_m 和能量源项

S_T 加载到 Fluent 的数学模型中, 可有效模拟吸附过程中的传质和传热过程。所建多腔体 ORVR 碳罐模型, 吸附过程最高温度值的模拟值与实验值偏差率低于 1%, 验证了模型的准确性。以穿透时间和温度为结构优化的特征量, 腔体体积比为 5:3, 进出口直径为 12 mm 时综合性能最优。

表 3 不同进出口直径下 ORVR 碳罐 3 个监测点的最高温度值

Table 3 Maximum temperature values of three monitoring points for ORVR carbon canisters with different diameter

进出口直径 d/mm	监测点1的 最高温度/°C	监测点2的 最高温度/°C	监测点3的 最高温度/°C
8	36.8	36.7	39.7
10	37.2	36.6	39.5
12	36.2	35.7	39.3
14	36.8	36.5	40.5

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2020中国生态环境状况公报[R/OL]. (2021-05-26).<https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202105/P020210526572756184785.pdf>.
- [2] 胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 等. 国内外储油库 VOCs 排放现状与标准分析[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 139-145.
- [3] Refueling vapor recovery: A history of U. S. experience with ORVR and stage II, a discussion on refueling emission generation and emissions from gasoline dispensing facilities, and a synopsis of ORVR and stage II implementation, in-use efficiency, and costeffectiveness [R]. Manufacturers of Emission Controls Association (MECA). 2020.01. [cms.meca.org/resources/Refueling_Vapor_Recovery_WhitePaper_Final.pdf](https://www.meca.org/resources/Refueling_Vapor_Recovery_WhitePaper_Final.pdf).
- [4] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 加油站大气污染物排放标准: GB 20952-2020 [S/OL]. (2020.12.28).https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjb/dqgdwrywrwpfbz/202012/t20201231_815640.shtml.
- [5] 北京市生态环境局, 北京市市场监督管理局. 加油站油气排放控制和限值DB11/208-2019[S/OL].2019.06.13,<http://sthjj.beijing.gov.cn/portal/fileDir/bjhrb/resource/cms/2019/06/2019062117120472837.pdf>.
- [6] 朱玲, 陈家庆, 王籽凝. 车载加油油气回收ORVR系统应用进展[J]. 油气储运, 2015, 34(5): 469-476.
- [7] 陈家庆, 朱玲. 油气污染排放与控制技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010.
- [8] 宫微羽, 王春雨, 赵飞, 等. 酸碱盐改性对活性炭吸附油气特征的影响[J]. 环境工程学报, 2020, 14(5): 1276-1285.
- [9] 许伟, 刘军利, 应浩, 等. 磷酸活化提升丁烷工作容量并制备高性能汽车碳罐用活性炭[J]. 环境工程学报, 2021, 15(6): 1946-1955.
- [10] 李海亮. 国六碳罐设计简述[J]. 汽车实用技术, 2018(1): 41-44.
- [11] 何彦彬, 李长江. 国VI法规下的碳罐设计[J]. 汽车工程师, 2018(1): 37-40.
- [12] 陈婷, 倪红, 谷雪景, 等. 中国移动源下阶段排放法规综述和分析[J]. 内燃机工程, 2018, 39(6): 24-30.
- [13] BAI X. Multi-dimensional CFD simulation of adsorption/desorption processes in carbon canister[J]. Dissertation Abstracts International, 2004, 1539: 129-132.
- [14] HOU X, XIN L, LIU Z, et al. Flow field simulation and experimental evaluation of carbon canister based on FLUENT[C]. International Conference on Computational Intelligence & Software Engineering. IEEE, 2010.
- [15] LIN J S, DONG M, ALI S, et al. Vehicular emission performance simulation[C]. SAE World Congress & Exhibition. 2012.
- [16] 黄远清, 王斐. 碳罐内通气阻力的数值模拟[J]. 北京汽车, 2013(6): 32-35.
- [17] 翟豪瑞, 葛晓宏, 陈长秀, 等. 基于Moldex3D碳罐本体优化分析及模具设计[J]. 模具工业, 2018, 44(1): 40-45.
- [18] 李岳林, 何兴, 吴钢, 等. 车辆活性碳罐三维数值模拟研究[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(6): 424-430.
- [19] ZHAO F, ZHU L, WANG Z Z, et al. Experimental and numerical investigation of the mass and heat transfer processes of n-Butane adsorption on activated carbon[J]. ACS Omega, 2021, 6(27): 17162-17172.
- [20] 周日峰, 石基弘, 刘全祯, 等. 活性炭吸附甲烷和甲苯的分子模拟研究[J]. 过程工程学报, 2018, 18(S1): 97-102.
- [21] 李树刚, 白杨, 林海飞, 等. CH₄, CO₂和N₂多组份气体在煤分子中吸附热力学特性的分子模拟[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2476-2483.
- [22] LI X Q, ZHANG L, YANG Z Q, et al. Adsorption materials for volatile organic compounds (VOCs) and the key factors for VOCs adsorption process: A review[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 235: 116213.
- [23] ZHANG X Y, GAO B, ANNE E C, et al. Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 338: 102-123.
- [24] 史怡坤, 李瑞江, 朱学栋, 等. 真空变压吸附制氧径向流吸附器的流动特性模拟[J]. 过程工程学报, 2021, 21(1): 19-26.
- [25] 郑新港, 刘应书, 杨俊峰, 等. 基于计算流体力学的吸附过程模拟研究[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(1): 145-150.

Structure optimization of the carbon canister for onboard refueling vapor recovery system based on three-dimensional unsteady-state

LU Yanbo¹, WANG Zhenzhong², ZHAO Fei³, ZHU Ling^{3,*}

1. Sinopec Scientific Development Department, Beijing 100728, China; 2. Sinopec Research Institute of Safety Engineering, Qingdao, Shandong 266071, China; 3. Department of Environmental Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

Abstract The heat and mass transfer characteristic of carbon canister for onboard refueling vapor recovery (ORVR) was investigated using the research methods, the n-butane/nitrogen gas was used to simulate volatile oil and gas, and the three-dimensional unsteady numerical model for ORVR carbon canister was established by using the methods of fixed bed adsorption test and CFD numerical simulation combined with species transfer model, laminar flow model and porous medium model. Based on adsorption penetration time and bed temperature, the structure optimization was carried out from the aspect of cavity volume ratio, inlet and outlet diameter. The results showed that the deviation rate of the simulation value and the experimental value of ORVR bed temperature was lower than 7%. When the cavity volume ratio was 5:3, the bed-temperature value increased in ORVR carbon canister was 0.9~1.6°C lower than other structures, thus the safety performance was high. When the inlet and outlet diameter was selected as 12 mm, it showed the best comprehensive performance in terms of adsorption penetration time and bed temperature rise during the adsorption process. This study can provide reference for structural optimization design of ORVR carbon tank.

Keywords ORVR carbon canister; adsorption; numerical simulation; three-dimensional unsteady-state model; structure optimization

第一作者: 卢衍波, 硕士, 中国石油化工股份有限公司科技部高级工程师, 主要从事公用工程技术科研开发及管理工作。

通信作者: 朱玲, 中国科学院生态环境研究中心毕业博士, 现为北京石油化工学院教授, 任中国环保产业协会有机废气净化委员会委员、学术委员会委员及技术专家。获北京市长城学者项目支持, 以及 2021 年中国石油和化学工业联合会科技进步奖二等奖。长期以来主要从事油品蒸发和油气回收、挥发性有机物控制领域的技术与设备研发工作。作为项目负责人已完成多项国家级、省部级及企业合作项目, 包括国家自然科学基金、北京市教委、中国石化集团公司、生态环境部政研中心及其他企业支持的项目。以第一作者或通信作者发表论文 20 余篇 (SCI/EI 收录), 主编或参编教材 4 本。

研究团队: 北京石油化工学院环保多相流高效分离技术与设备研究团队成立于 2005 年。团队自 2003 年起一直专注于国内外油库、加油站中轻质油品的挥发损耗控制及油气排放污染控制技术领域。开展了面向不同周转量场合的油气回收系统、车载加油油气回收 (ORVR) 系统、新型油气高效吸附剂设计合成、油品挥发过程及模拟、加油站埋地油罐机械清洗系统、加油站各环节污染物排放规律等方面的研究。承担了国家自然科学基金、北京市市属高校长城学者培养计划、北京市自然科学基金重点项目、北京市自然科学基金、北京市教委、中国石化集团公司及其他企业委托等项目, 出版著作 3 部, 发表相关论文近 40 篇。