

应用于恶臭气体稀释嗅辨新型文丘里管设计及优化

田润丰*, 刘锦华#, 刘未杰, 任 娇, 孙 芑, 张艳妮, 宁占武

北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所, 北京

收稿日期: 2023年5月10日; 录用日期: 2023年7月6日; 发布日期: 2023年7月17日

摘 要

本文设计了一种新型的文丘里管, 以套管结构代替渐扩管段, 增加气体的动能传递效率, 目的是解决异味评价中测试仪器气体稀释范围、稀释精度、混合效率等问题。CFD实验对径向流量及截面浓度分布模拟, 结果表明进气口压力条件与出口体积流量具有良好的线性关系, 决定系数 R^2 为0.992, 当相对压力为150 kPa时, 能很好满足出口体积流量20 L/min的要求。以正丁醇(n-butanol)为模拟过程的标准气体, 测试点位浓度均值 \bar{c} 为0.2673 ppm, 不均匀度 S_d 为0.127, 当 $S_d < 0.20$ 时, 表明通过出口截面正丁醇浓度分布均匀。根据EN-13725进行实验验证, 在满足 t 分布的95%置信区间即 $\delta_{w,d}$ 取值为(-0.0541, 0.0431)时, 计算精度 A_d 为0.108, 满足 A_d 取值不超过0.20的要求, 测试精度与设计值吻合。

关键词

新型文丘里管, 高精度稀释, 异味评价, 模拟及优化

Design and Optimization of a New Venturi for the Dilution and Sniffing of Malodorous Gases

Runfeng Tian*, Jinhua Liu#, Weijie Liu, Jiao Ren, Peng Sun, Yanni Zhang, Zhanwu Ning

Institute of Urban Safety and Environmental Science, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing

Received: May 10th, 2023; accepted: Jul. 6th, 2023; published: Jul. 17th, 2023

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 田润丰, 刘锦华, 刘未杰, 任娇, 孙芑, 张艳妮, 宁占武. 应用于恶臭气体稀释嗅辨新型文丘里管设计及优化[J]. 传感器技术与应用, 2023, 11(4): 348-358. DOI: 10.12677/jsta.2023.114040

Abstract

In this paper, a new venturi with a casing structure rather than a tapering section is designed to increase the kinetic energy transfer efficiency of the gas, with the goal of solving the problems of gas dilution range, dilution accuracy, and mixing efficiency of the test instrument in odor evaluation. CFD simulations of the radial flow rate and cross-sectional concentration distribution show that the inlet pressure condition has a good linear relationship with the outlet volume flow rate, and the decision coefficient R^2 is 0.992, and when the relative pressure is 150 kPa, it can well meet the requirement of 20L/min. The mean concentration \bar{c} at the test point is 0.2673 ppm with n-butanol as the standard gas for the simulated process, and the inhomogeneity S_d is 0.127. When $S_d = 0.20$, it means that the n-butanol concentration is distributed uniformly through the outflow portion. When the 95% confidence interval of the t-distribution is satisfied, i.e. $\delta_{w,d}$ is taken as (-0.0541, 0.0431), the estimated accuracy A_d is 0.108, which meets the condition of A_d not exceeding 0.20, and the test accuracy equals the design value, according to EN-13725.

Keywords

Sleeve Venturi, High-Precision Dilution, Odor Assessment, Simulation and Optimization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 介绍

恶臭是能够刺激人体嗅觉器官、引起不愉快以及损坏生活环境的一类气体物质的总称，通常包含有机硫、氨、硫化氢、醇、醚等。恶臭气体在环境中具有瞬时性、传播快、阈值低、影响范围大等特点，是当前污染控制的重点和难点，已被列为世界范围内环保领域七大公害之一[1] [2]。目前中国、日本、美国、欧盟等针对恶臭气体开展了大量的研究，但科学准确的评价异味浓度及强度仍然是一项充满挑战的工作。恶臭气体评价方法采用主观嗅辨的方法[3]，待测气体稀释至不同的稀释倍数后确定嗅觉阈值，稀释范围、稀释精度、混合效率成为制约评价结果可靠性的重要影响因素。

文丘里管是利用流体力学原理实现气体高比例稀释的重要构件，具有尺寸小，结构简单，精度高，提供流量稳定，传质效率高等优点，已广泛用于流体的测量监测及控制。Eric Halibur [4]于1924年发明文丘里管，利用伯努利收敛-喷嘴发散的特殊情况[5] [6]，将动力流体的速度能量转换成为压力能量，形成负压环境，通过压力差，将气体(二次流)吸入混合腔室与动力流体(一次流)混合稀释。ATukimin [7]等研发了基于文丘里流量计的高压湿气测试设备，通过CFD分析确定了设备的实际应用流量系数，对比数值结果与实验数据，结果表明与速度相比，压力对设备的影响更大，但模拟过程没有引入二次流，会使实验数据出现偏差。Danardon [8]等发现文丘里混合器能广泛应用于内燃机领域，其空燃比和压力损失受文丘里喉管面积、喉部位置、进气面积和进气位置影响，混合效果受文丘里喉部直径、燃料喷嘴位置和冲击角的影响。在过去的几十年里，研究人员报告了各种混合器的喷射轨迹、混合方式、压降效果和结构参数等[9] [10] [11]。试图应用主动机构来改善混合器的混合效率，但由于结构形式固定，混合效率提升并不明显。稀释原理的研究则更加广泛，但研究内容主要集中于几何结构，几何参数对混合效果的整体影响并不清楚[12] [13]。传统文丘里管由于结构限制，二次流进入剪切流管段后会沿着管壁流动，只

与一次流发生小规模粘性混合,使其在管段内的混合发生的十分缓慢[14],因此需要较长的混合管载带二次流,进而产生较大的壁面摩擦。本研究满足异味气体装置小型化的实际需求,将针对传统文丘里管输出气体稳定性低、波动性大、浓度不够均匀等问题进行模拟实验,开发结构紧凑、稀释范围宽、稀释精度高、混合效果好的新型结构文丘里管。

2. 材料与方法

本章比较了两种文丘里管的结构参数,以及模拟实验设置的边界条件,模型计算使用的 RNG-k- ϵ 模型,并通过 SolidWorks 和 Ansys 完成了 CFD 模拟分析。

实验仪器及材料

压缩机: 型号 0.2LE 8S5C, 输出压力 0.7 MPa, 南京日立产机有限公司;

比例电磁阀: SMC 株式会社;

质量流量计(MFC) [15]: 量程 0.01 L/min~25 L/min, ASAIR 奥松电子;

玻璃转子流量计: 量程 1.2 L/min, 电子皂膜流量计: 量程 30 L/min, 北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所;

聚四氟乙烯气袋、聚四氟乙烯管;

载带气: 干净空气;

样品气: 正丁醇;

文丘里管: 型号 316, 载带气进气管长度 L_1 为 20 mm, 直径 ϕ_1 为 10 mm, 并与套筒采用过盈连接结合, 喉管长度 L_2 为 2 mm, 直径 ϕ_2 为 1 mm, 套筒长度 L_3 为 100 mm, 直径 ϕ_3 为 12 mm, 样品气进气管长度 L_4 为 10 mm, 直径 ϕ_4 为 3 mm, 与套筒焊接连接。

2.1. 文丘里管结构

传统文丘里管的结构主要包括入口段、渐缩段、喉管段、渐扩段和样品气进气管段,为了减少管内的壁面摩擦损失和压力损失, Ulas.A [16]等提出设置收敛喷角为 15° , 扩张喷角为 7° , 喉管管径与喉管长度之比为 1:2, 结构简图如图 1(a)所示。

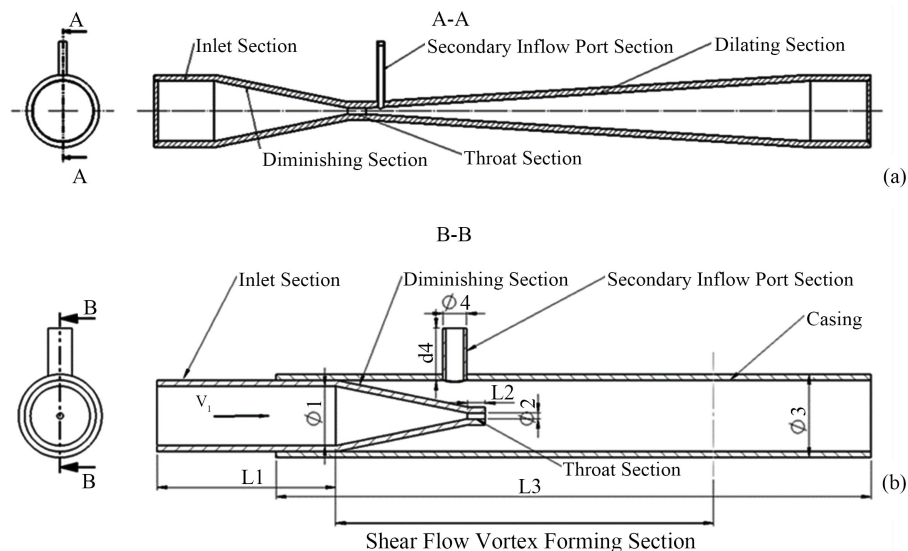


Figure 1. Classical venturi and sleeve venturi

图 1. 经典文丘里管与套筒式文丘里管

恶臭气体稀释嗅辨实验中，文丘里管作为主要仪器构件，对其小体积结构容量的精确度和准确度提出了很高的需求。由于混合过程通过两个流体的强烈冲击驱动，在该过程中会产生很高的能量耗散，较高的湍流动能(TKE)和湍流耗散率会增加两个流体的混合质量[17] [18]，并伴随着压降的增加，从而进一步提升混合效果。新型文丘里管在经典结构的基础上，舍去渐扩管段，以套管结构代替，模拟分析得出在套管剪切流管段形成涡流模型，增加了两种流体的动能传递效率，提高了流体的混合质量。

新型文丘里管剖面图如图 1 所示，整体结构分为三个部分，载带气进气管，样品气进气管，套筒。载带气进气管长度 L_1 为 20 mm，直径 ϕ_1 为 10 mm，并与套筒采用过盈连接结合，喉管长度 L_2 为 2 mm，直径 ϕ_2 为 1 mm，套筒长度 L_3 为 100 mm，直径 ϕ_3 为 12 mm，样品气进气管长度 L_4 为 10 mm，直径 ϕ_4 为 3 mm，与套筒焊接连接。在管的出口段设置了较长的直管段，可以保障剪切流涡流扩散段长度满足要求，有利于两路气流的充分混合。另外二次流进气管段设置位置较出口段偏左 3 mm 处，能够形成稳定的压降过程，利于涡流随着管内结构扩散。

2.2. 套筒文丘里管数值模拟

本模拟采用 SolidWorks 建模，Ansys 系列软件网格划分及模拟分析，对喉管和二次流进气管局部加密处理，能有效提高模拟精确度，网格单元数约为 150 万，节点数约 30 万，整体网格平均质量系数为 0.83，过渡比为 0.272，检验网格质量满足要求，图 2 为模型网格截面。

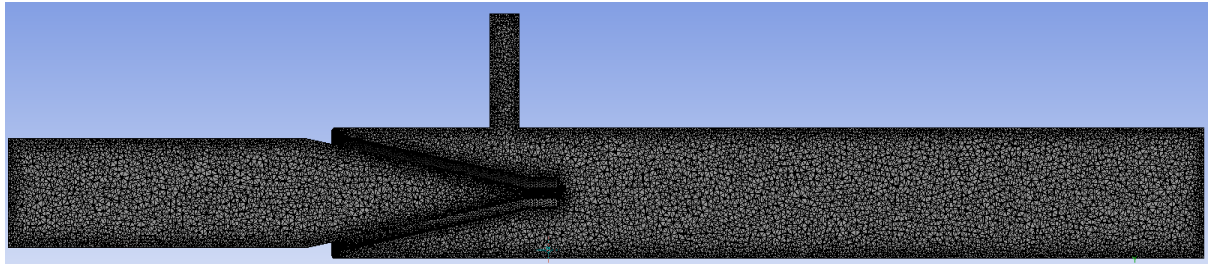


Figure 2. Model mesh section
图 2. 模型网格截面

本研究设计文丘里管内部流体运动是典型的湍流运动，确定两种流体为可压缩定常流，则采用 RNG- $k-\varepsilon$ 模型方程，该模型是在 Standard- $k-\varepsilon$ 模型基础上通过重整化群理论得到[19]，在原 ε 方程中添加了高雷诺数流动粘性的解析式，可以解决复杂剪切流、撞击射流、涡旋流等问题，三维 N-S (Navier-Stokes) [20] [21]解析方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中 G_k 是平均速度梯度产生的湍动能， $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为常数， μ_t 是粘度系数， α_k 和 α_ε 是湍流普朗克数(Prandtl)。

本文模拟采用的边界条件及计算条件如下表 1 所示，选择 RNG- $k-\varepsilon$ 高雷诺数模型是由于该模型能在稳态条件下运行，且运行时间较少，在一致性和可靠性上是使用最为广泛的验证模型，采取 SIMPLE (Semi-implicit method for pressure link equation)算法是由于它只能应用于迭代模式下的稳态计算[22]。

Table 1. Simulation boundary conditions and calculation conditions
表 1. 模拟边界条件及计算条件

模型参数	条件	备注
一次流入口	压力入口	相对压力值 50~200 kPa (间隔 10 kPa 为一个模拟值)
二次流入口	压力入口	环境压力
出口	环境出口	Outflow
求解模型	SIMPLE 算法	动量、湍流动能、湍流耗散率均设置 First order upwind
混合物浓度	0.05	二次流正丁醇浓度(mol/mol)
时间步长	瞬态	$\Delta t = 1$
迭代次数	20	时间步数 3600

3. 模拟分析与验证

3.1. 径向流量及截面浓度分布模拟分析

1) 稀释管入口压力与出口流量确定

ISO 16000-28 [23]规定特定扩散器最小输出气流流速为 20 L/min, 通过改变稀释管一次流入口压力条件, 观测出口体积流量, 模拟情况如图 3(a)所示。

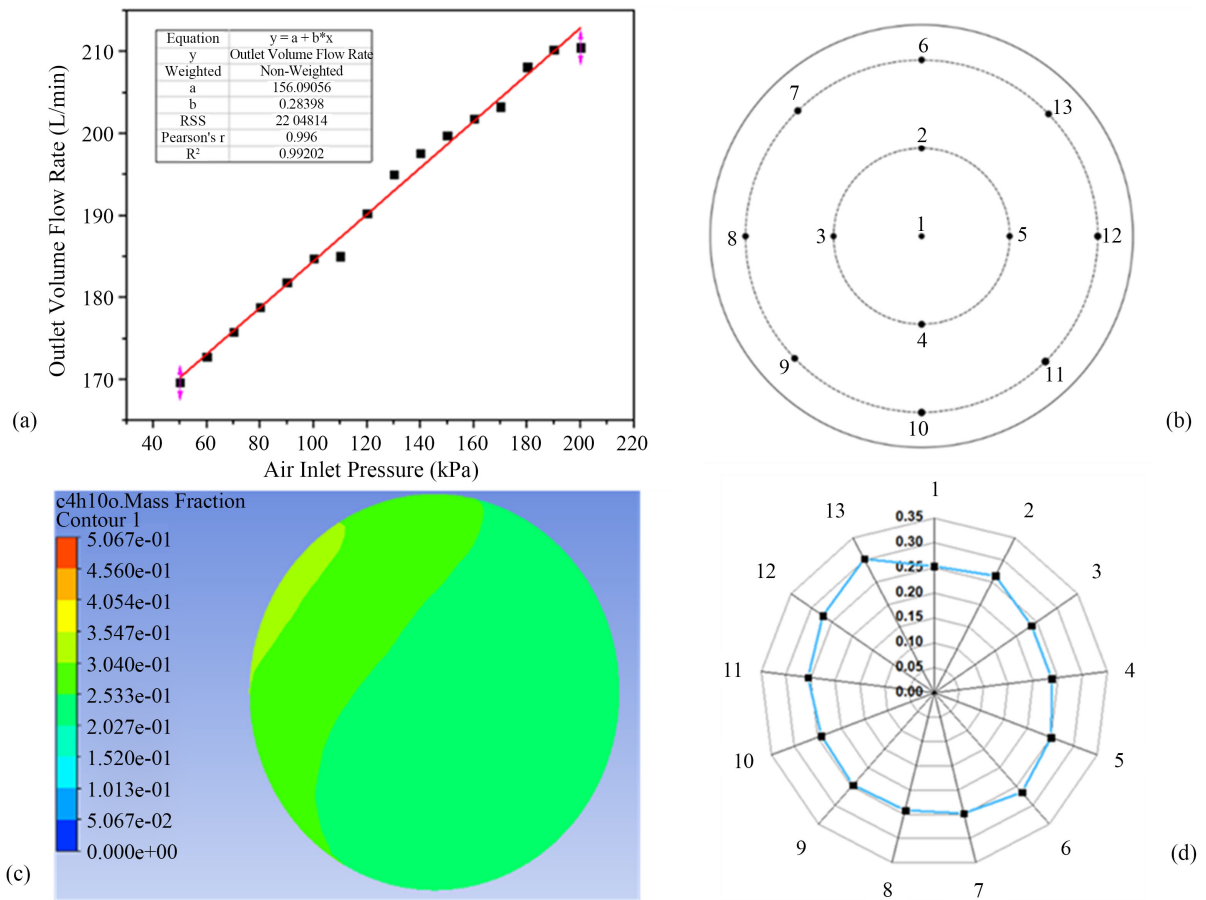


Figure 3. Relationship between inlet pressure and outlet volume flow
图 3. 入口压力与出口体积流量关系

从图中数据可知,随着入口相对压力的逐渐升高,出口体积流量也逐渐增加,说明进气口压力条件与出口体积流量有很好的线性关系,模拟结果中 R^2 为 0.992,表明数据在这条直线上的拟合程度很好,可靠性高。当相对压力为 150 kPa 时,能很好满足出口体积流量 20 L/min 的要求。

2) 出口截面浓度分布

本文以正丁醇(n-butanol) [23]为模拟过程的标准气体,设置二次流进气管中正丁醇浓度为 100 $\mu\text{mol/mol}$,为保证输出混合气体的浓度均匀,在输出管口截面取 13 个采样点检测标准气体的浓度,采样点分布如图 3(b)所示,模拟结果如图 3(c)所示,各采样点正丁醇浓度值如图 3(d)所示。

A.A. Mouza 等[24]提出使用混合不均匀度 S_d 来表征截面物质的浓度分布,其中 c_i 表示各采样点位的浓度值, \bar{c} 表示各点位浓度均值, n 表示测试点位数。

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}{n-1}} / \bar{c} \quad (3)$$

模拟结果得出,各点位浓度均值 \bar{c} 为 0.2673 ppm,最大浓度值为 0.3025 ppm,最小浓度值为 0.2374 ppm,不均匀度 S_d 为 0.127,当 $S_d < 0.20$ 时,可以认为物质在微观层面是均匀混合的[25],即表示通过出口截面正丁醇浓度是均匀的。

3) 气流输出稳定性

本节通过研究稀释管内流体的压力、速度、湍流强度、浓度等条件验证混合流体在管内的流动状况。

图 4 分别为稀释管套筒管段各切面速度云图,压力分布云图,流体流动迹线图,以及湍流强度分布云图。

由图 4(a),图 4(b)可以看出,流体在稀释管的喉道出口位置速度最大,由于管内的突变结构,一次流速度骤降,形成低压空间,二次流在大气压的作用下进入套管,图 4(c)流动迹线形成气旋涡流环境,促进两次流体混合均匀,随着混合流体接近管口位置,平均速度逐渐降低至 0.45 m/s 并趋于稳定,按照 EN 13725-2003 [26]规定出口空气流速需要在 0.5 m/s 以下,本设计构件符合要求。图 4(d)显示出喉管出口处有很强的湍流强度变化,这一骤变结果就会产生很高的湍流动能及湍流耗散率,增加流体的混匀程度,而出口处湍流强度趋于稳定,说明混合流体输出稳定。图 4 中各图都显示出套管内存在较强的涡流结构,随着混合稀释气流的输出,构件出口还存在一定的涡旋流态,这一现象产生的原因在于待稀释气与背景气的速度方向垂直,进气管渐缩段为圆锥结构,待稀释气流沿管壁流动,形成较强的涡流结构,虽然对与气流混合稀释有很好的效果,但也会造成输出气体的浓度不均匀,并严重影响嗅辨实验的准确性,需要进行优化改进。

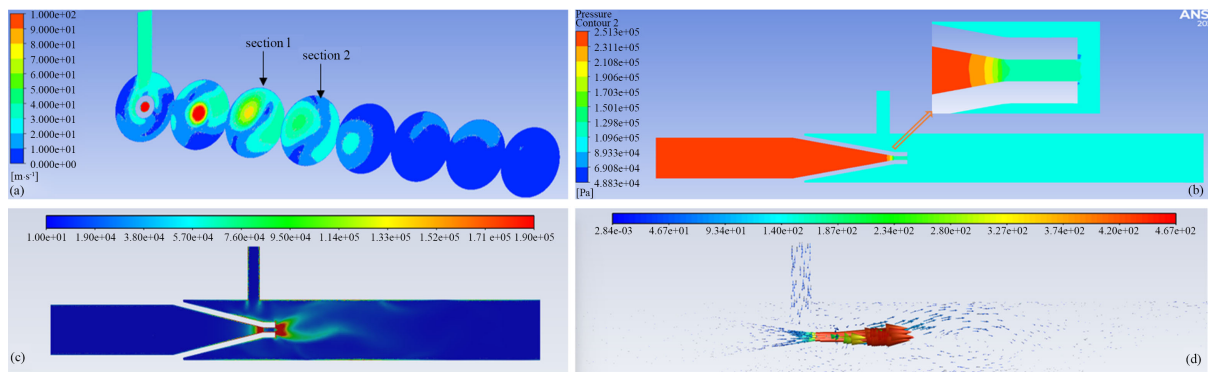


Figure 4. (a) Dilution tube sleeve section velocity cloud; (b) Dilution tube pressure distribution cloud; (c) Fluid flow traces; (d) Turbulence intensity distribution

图 4. (a) 稀释管套筒切面速度云图; (b) 稀释管压力分布; (c) 流体流动迹线; (d) 湍流强度分布

3.2. 测试与验证

精确度(Precision)是衡量稀释管能否准确按比例稀释待测流体的指标之一, 根据 EN-13725 空气质量. 用动态嗅觉测量法测定气味浓度、《Standardized Odor Measurement Practices for Air Quality Testing》规定 [26] [27], 通过计算稀释设置偏差估计值的 95%置信度来验证其精确性。如图 5 所示, 根据 CFD 模型设计加工出套管式文丘里管以及实验设备, 分别测出十次输入压力为 150 kPa 条件下的输出浓度, 实验结果见表 2。

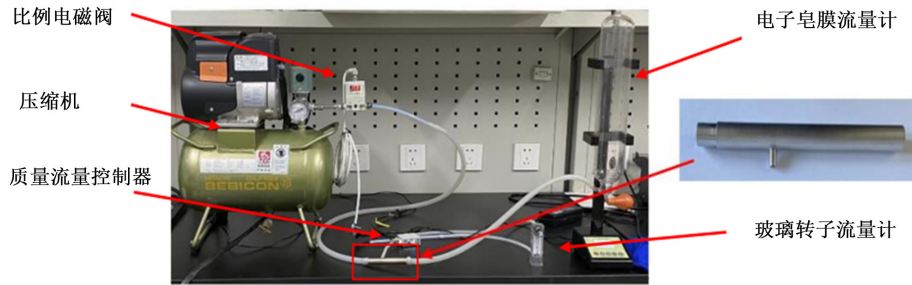


Figure 5. Venturi tube physical diagram and experimental equipment structure
图 5. 文丘里管实物图及实验设备结构图

Table 2. Accuracy calculation data
表 2. 精确度计算数据

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	$\bar{y}_{w,d}$	unit
0.297	0.304	0.277	0.331	0.401	0.269	0.324	0.342	0.253	0.381	0.318	ppm
-0.569	-0.517	-0.558	-0.480	-0.397	-0.570	-0.489	-0.466	-0.597	-0.419	-0.498	\log_{10} ($\mu\text{mol/mol}$)

表中, $y_{i,d}$ 表示第 i 次实验计算测出的流体浓度, $\bar{y}_{w,d}$ 为十次实验的平均浓度, $S_{r,d}$ 表示实验的混合不均匀度(标准偏差), n 表示测试次数。

$$S_{r,d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,d} - \bar{y}_{w,d})^2}{n-1}} = 0.0677$$

为检验设备的准确度和实验室测试偏差(真实度) $d_{w,d}$, 引入 r_d 重复性限值, μ_d 稀释设置参考值(通过实验前校准取得), 分别通过(4) (5)式计算, 其中 t 表示自由度为 $(n-1)$ 时 t 分布在 95% 置信区间的因子, 取值为 2.2622, μ_d 取值为 -0.5000。由(4)得出 $r_d = 0.2171$, 本实验中要求二次流稀释 2^7 倍, 即 $r \leq 0.4772$ ($10^r \leq 3.0$), 符合条件, $d_{w,d}$ 取值为 -0.0055。

$$r_d = \sqrt{2}t \cdot S_{r,d} \tag{4}$$

$$d_{w,d} = \bar{y}_{w,d} - \mu_d \tag{5}$$

为满足自由度为 $(n-1)$ 时 t 分布在 95% 置信区间的条件, 最终实验设置偏差应为 $\delta_{w,d}$, 取值范围 $(-0.0541, 0.0431)$ 。

$$d_{w,d} - A_{w,d} \cdot r_d \leq \delta_{w,d} \leq d_{w,d} + A_{w,d} \cdot r_d \tag{6}$$

$$A_d = \frac{|d_{w,d}| + (A_{w,d} \cdot r_d)}{\mu_d} \tag{7}$$

其中 $A_{w,d} = \sqrt{1/2 \cdot n}$, 值为 0.2236 (n 取 10), 所以计算精确度为 A_d , 表示为式(7), 计算取值为 0.108, 满足 A_d 取值不超过 0.20 的要求, 稀释精度与设计真实性相吻合。

4. 优化设计

4.1. 流体传输模型分析

每一个模型设计及模拟研究都有其优缺点及误差存在, 基于上述 CFD 模拟结果, 该模型的输出气体流量控制能够很好满足 20 L/min 的输出要求, 即稳定输入压力 150 KPa 的条件下, 输出体积流量恒定, 在此条件下输出气流的流速能够很好控制在 0.45 m/s 左右, 输出浓度能满足低浓度条件。

图 4(a)中所示任意两个截面, 坐标分别为 x_1 和 x_2 , 对应截面面积分别为 A_1 , A_2 (该情况下 $A_1 = A_2$), 在理想状态下, 文丘里稀释管内的流动方程为:

$$\frac{du}{dt} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

又有质量流量 Q_m 可以表示为

$$Q_m = \rho Au \quad (9)$$

$$\frac{dQ_m}{\rho A dt} + Q_m \frac{\partial Q_m}{\rho A^2 \partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

对(6)沿流体流程两截面进行积分, 有:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{A} dx \frac{dQ_m}{dt} + \frac{Q_m^2}{2\rho A^2} = \Delta p \quad (11),$$

在稳定流动状态下, 文丘里稀释管质量流量随时间的变化项 dQ_m/dt 可忽略不计, 即测定的实际质量流量为

$$Q_w = \sqrt{2\rho A^2 \Delta p} \quad (12)$$

在平稳输出二次流的基础条件下, 对倒数项 dQ_m/dt 的忽略会导致实际质量流量 Q_w 存在误差, 其中误差 E_r 值可以表示为:

$$E_r = \frac{Q_w - Q_m}{Q_m} \times 100\% = \sqrt{\frac{2\rho A(x_2 - x_1)}{Q_m^2} \frac{dQ_m}{dt} + 1} - 1 \quad (13)$$

通过流场分析, 该误差主要是由导数项 dQ_m/dt 引起, 在模拟过程中发现, 由于模型结构的原因, 套筒剪切流段会产生涡流结构, 进而导致不同时刻的截面流量不同, 但实际监测值相差不大(均值约为 0.0045 kg/s)。根据 ISO 16000-28 规定, 流体在流动状态下, 测流装置内需要符合无涡流且充分发展的流动要求。由于该装置混合原理即通过剪切流段形成较强的涡流结构, 使两种流体能够充分混匀, 为达到规定要求, 本研究将拟使用增加套管长度、出口段设置筛网或流动调节器等方式(Zanker, NEL) [28] [29] 解决该问题。

4.2. 模型优化

通过上一节流场模型分析, 套筒式文丘里稀释管输出混合流体能达到稳定输出的目的, 但由于结构原因, 输出流体还存在涡流现象, 不利于后期进行嗅辨实验, 为了减少输出气流的涡流情况, 现对该模型优化处理, 出口处增设孔板或筛网等稳流结构, 设计出最佳稳流孔板调节器进行模拟实验, 结构参数

参照 K-Lab NOVA 流动调整器[30], 孔板小孔数量和直径分别为 1 个直径为 $\varphi_5 = 2.00 \text{ mm}$ 、8 个直径为 $\varphi_6 = 1.50 \text{ mm}$, 16 个直径为 $\varphi_7 = 1.00 \text{ mm}$ 的结构设计, 孔板厚度为 2.00 mm , 小孔分布如图 6 所示。

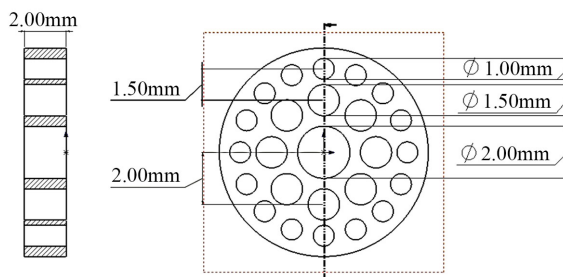


Figure 6. Orifice plate structure and parameters
图 6. 孔板结构及参数

模拟结果显示, 加入孔板后, 紊流状态得到一定缓解, 输出气流不存在涡流状态, 但还存在不稳定现象, 这可能与孔板的位置、孔径大小、数量、结构等因素有关。另外随着孔板结构加入模型当中, 流体的输出流量、流速、压力损失以及进气口的输入压力等边界条件都受到了影响。模型结构及加入孔板前后模拟结果对比如图 7 所示, 加入孔板后稳流效果明显, 满足后期嗅辨实验要求。

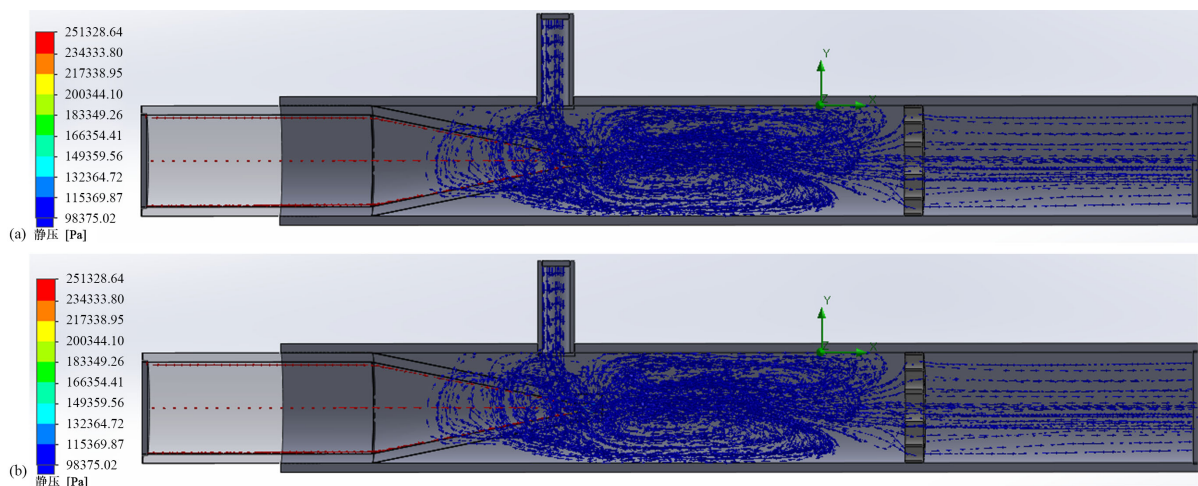


Figure 7. Orifice plate structure flow stabilization effect comparison
图 7. 孔板结构稳流效果对比

5. 结果与讨论

本文开展恶臭气体稀释嗅辨实验, 拟通过小体积文丘里管发生高比例气体稀释, 但经典文丘里管存在混合过程时间缓慢, 距离较长, 且混合质量不佳等问题, 依此提出了新型套管式文丘里稀释结构, 并通过模拟实验进行了计算分析、误差处理以及优化设计, 得出以下结论:

1) 通过分析经典文丘里管的结构弊端, 设计了新型套筒文丘里管, CFD 模拟结果显示满足输出体积流量为 20 L/min 时的最佳输入压力为 150 KPa , 并验证了输出截面二次流浓度分布情况以及混匀程度且输出流体流速为 0.45 m/s , 满足后续实验需求的不超过 0.5 m/s 的速度条件;

2) 实验验证得出稀释管设计稀释偏差在 95% 置信区间及 $\delta_{w,d}$, 取值为 $(-0.0541, 0.0431)$ 时, 计算精度 A_d 为 $0.108 \leq 0.2$, 对比模拟结果, 出口截面的混合不均匀度 S_d 为 0.127 , 两者结果具有一致性, 说明该设

计满足要求;

3) 本研究以正丁醇作为标准样本气体, 能够很好的反应恶臭气体稀释过程, 实验测得稀释比例可达 2^7 倍。通过流场传输模型分析, 找到了该结构的误差来源, 提出了增设孔板或筛网的优化方案, 模拟验证出优化方案的可行性。

致 谢

这项工作得到了高精度高比例稀释异味动态配气仪的研制项目的资助, 项目号为 23CB005。

参考文献

- [1] 朱中杨, 颜玉玺, 金博强, 等. 国内外恶臭污染排放法规的进展[J]. 应用化工, 2021, 50(8): 2194-2199.
- [2] 赵鹏, 刘杰民, 伊芹, 等. 异味污染评价与治理研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30(1): 310-325.
- [3] Capelli, L., Sironi, S., Del Rosso, R., Céntola, P. and Grande, M. (2008) A Comparative and Critical Evaluation of Odour Assessment Methods on a Landfill Site. *Atmospheric Environment*, **42**, 7050-7058. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.06.009>
- [4] Hemeon, W.C.L. (1968) Technique and Apparatus For Quantitative Measurement of Odor Emissions. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **18**, 166-170. <https://doi.org/10.1080/00022470.1968.10469111>
- [5] Topper, P.A., Graves, R.E., Bruns, M.A., Wysocki, C.J. and Wheeler, E.F. (2007) Odor-Reduction Performance of Constructed Wetland Treating Diluted Swine Manure. *Applied Engineering in Agriculture*, **23**, 621-630. <https://doi.org/10.13031/2013.23671>
- [6] Nicolai, R.E., Larson, V.J. and Clanton, C.J. (1999) Dynamicol Factometer Airflow Variation in Determining Odor Dilutions-to-Threshold. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1847-1852.
- [7] Tukimin, A., Zuber, M. and Ahmad, K.-A. (2016) CFD Analysis of Flow through Venturi tube And Its Discharge Coefficient. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **152**, Article ID: 012062. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/152/1/012062>
- [8] Danardon, D., Kim, K.-S., Lee, S.-Y. and Lee, J.-H. (2011) Optimization the Design of Venturi Gas Mixer for Syngas engine Using Three-Dimensional CFD Modeling. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **25**, 2285-2296.. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0612-8>
- [9] Sundararaj, S. and Selladurai, V. (2013) Flow and Mixing Pattern of Transverse Turbulent Jet in Venturi-Jet Mixer. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **38**, 3563-3573. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0643-9>
- [10] Naganuma, T., Sakonji, T. and Shoji, F. (1992) New Gas Mixer for Gas Engines—Optimized Air-Fuel Ratio with Negligible Pressure Loss. SAE Technical Paper No. 922361. <https://doi.org/10.4271/922361>
- [11] Sundararaj, S. and Selladurai, V. (2010) Numerical and Experimental Study on Jet Trajectories and Mixing Behavior of Venturi-Jet Mixer. *Journal of Fluids Engineering*, **132**, Article ID: 101104. <https://doi.org/10.1115/1.4002575>
- [12] Aoki, N. and Mae, K. (2006) Effects of Channel Geometry on Mixing Performance of Micromixers Using Collision of Fluid Segments. *Chemical Engineering Journal*, **118**, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.02.011>
- [13] Suffet, I.H. and Rosenfeld, P. (2007) The Anatomy of Odour Wheels for Odours of Drinking Water, Wastewater, Compost and the Urban Environment. *Water Science and Technology*, **55**, 335-344. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.196>
- [14] Ghassemi, H. and Fasih, H.F. (2011) Application of Small Size Cavitating Venturi as Flow Controller and Flow Meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, **22**, 406-412. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.05.001>
- [15] Blacker, J.H. and Brief, R.S. (1971) A Dilution System for Dynamic Preparation of Gas Concentrations. *American Industrial Hygiene Association Journal*, **32**, 668-672. <https://doi.org/10.1080/0002889718506522>
- [16] Ulas, A. (2006) Passive Flow Control in Liquid-Propellant Rocket Engines with Cavitating Venturi. *Flow Measurement and Instrumentation*, **17**, 93-97. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.10.003>
- [17] Luo, P., Cheng, Y., Zhao, Y., Jin, Y. and Yang, W. (2007) Millisecond Mixing of Two Liquid Streams in a Mixer Model. *Chemical Engineering Science*, **62**, 5688-5695. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.02.038>
- [18] Charbel, H., Thierry, L., Dominique, D. and Hassan, P. (2010) Turbulent Mixing and Residence Time Distribution in Novel Multifunctional Heat Exchangers-Reactors. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **49**, 1066-1075. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.08.007>

-
- [19] Fu, D. (2004) Study on the Phase Equilibria of Hard Core Asakura-Oosawa Fluids with Renormalization—Group Theory. Department of Environmental Engineering.
- [20] M Sallaberger, PDrtna. (1999) Hydraulic Turbines—Basic Principles and State-of-Theart Computational Fluid Dynamics Applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **213**, 1-2. <https://doi.org/10.1243/0954406991522202>
- [21] Shawn, D.B., Mia, W., Michael, G., Thomas, P.E. and Matt, W. (2019) A Novel Olfactometer for Efficient and Flexible Odorant Delivery. *Chemical Senses*, **44**, 173-188. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjz005>
- [22] Utomo, T., Jin, Z., Rahman, M., Jeong, H. and Chung, H. (2008) Investigation on Hydrodynamics and Mass Transfer Characteristics of a Gas-Liquid Ejector Using Three-Dimensional CFD Modeling. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **22**, 1821-1829. <https://doi.org/10.1007/s12206-008-0614-3>
- [23] ISO 16000-28: 2012 Indoor Air Part 28: Determination of Odour Emissions from Building Products Using Test Chambers. ISO.
- [24] Patsa, C.-M., Schönfeld, F. and Mouza, A.A. (2008) Mixing Performance of a Chaotic Micro-Mixer. *Chemical Engineering Research and Design*, **86**, 1128-1134. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.04.009>
- [25] ISO-5725-4 (2020) Accuracy (Tureness and Precision) of Measurement Methods and Results. ISO.
- [26] BS-EN-13725 (2003) Air Quality—Determination of Odour Concentration by Dynamic Olfactometry. British Standard.
- [27] Charles, M. and McGinley, P.E. (2002) Standardized Odor Measurement Practices for Air Quality Testing. *Air and Waste Management Association Symposium on Air Quality Measurement Methods and Technology—2002*, San Francisco, 13-15 November, 2002, 1-2.
- [28] Gonzalez-Trejo, J., Real-Ramirez, C.A., Miranda-Tello, R., *et al.* (2017) Numerical and Physical Parametric Analysis of a SEN with Flow Conditioners in Slab Continuous Casting Mold. *Archives of Metallurgy and Materials*, **62**, 927-946. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0136>
- [29] ISO 5167-1 (2022) Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full—Part 1: General Principles and Requirements. ISO.
- [30] 曹德嘉. 流动调整器在设冷水流量测量改进中的应用[J]. 价值工程, 2017, 36(34): 174-175.