

# 基于Creo的CO<sub>2</sub>气体混合器结构设计与流体仿真

陈发慧, 张春元\*

上海市医疗器械检验研究院, 上海

收稿日期: 2026年4月22日; 录用日期: 2026年5月15日; 发布日期: 2026年5月25日

## 摘要

针对YY/T 0671-2021标准中正压通气面罩“避免重复呼吸的保护”试验对CO<sub>2</sub>浓度稳定性与均匀性的要求, 本文设计了一种用于模拟呼出气体的CO<sub>2</sub>气体混合器。基于Creo Parametric建立三维结构模型, 并采用Flow Analysis模块对其内部流场进行数值仿真。通过构建多工况CO<sub>2</sub>体积分数(5%、10%、25%)条件, 分析混合器内流线分布及出口浓度均匀性, 并以出口截面浓度的变异系数(COV)作为评价指标。结果表明, 该混合器在不同浓度工况下均可实现稳定输出, COV均小于3%, 满足稳定性与均匀性的要求。研究表明, 所设计混合器能够有效提升重复呼吸试验中CO<sub>2</sub>模拟气体的稳定性与可靠性, 为正压通气面罩“避免重复呼吸的保护”试验方法优化提供技术支撑。

## 关键词

睡眠呼吸暂停, 重复呼吸, CO<sub>2</sub>气体混合器, Creo Parametric软件, 多组分流体分析

# Structural Design and Fluid Simulation of CO<sub>2</sub> Gas Mixer Based on Creo

Fahui Chen, Chunyuan Zhang\*

Shanghai Institute of Medical Device Testing, Shanghai

Received: April 22, 2026; accepted: May 15, 2026; published: May 25, 2026

## Abstract

In response to the requirements for CO<sub>2</sub> concentration stability and uniformity in the “protection against rebreathing” test for positive-pressure ventilation masks specified in the YY/T 0671-2021 standard, this paper describes the design of a CO<sub>2</sub> gas mixer for simulating exhaled gas. A 3D struc-

\*通讯作者。

tural model was created using Creo Parametric, and the internal flow field was numerically simulated using the Flow Analysis module. By simulating multiple CO<sub>2</sub> concentration conditions (5%, 10%, and 25%), the study analyzed the flow line distribution within the mixer and the uniformity of the outlet concentration, using the coefficient of variation (COV) of the outlet concentration as the evaluation metric. The results indicate that the mixer achieves stable output under various concentration conditions, with a COV consistently below 3%, thereby meeting the requirements for stability and uniformity. The study results indicate that the designed mixer can effectively improve the stability and reliability of CO<sub>2</sub> simulation gas in rebreathing tests, providing technical support for optimizing the “rebreathing prevention” test method for positive-pressure ventilation masks.

## Keywords

Sleep Apnoea Breathing, Against Rebreathing, CO<sub>2</sub> Gas Mixer, Creo Parametric Software, Multi-Group Fluid Analysis

Copyright © 2026 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. 引言

阻塞性睡眠呼吸暂停(Obstructive Sleep Apnea, OSA)是一种常见慢性疾病,主要表现为睡眠过程中上气道反复塌陷,导致间歇性低氧、睡眠紊乱及多种并发症。目前,全球受影响人群已超过 10 亿,其中中重度患者人群已达数亿规模,且存在大量未被诊断的潜在患者。随着人口老龄化及肥胖率持续上升,OSA 已成为重要的公共卫生问题[1]。持续气道正压通气(Continuous Positive Airway Pressure, CPAP)作为其主要治疗手段,通过提供稳定气道正压维持上气道开放,缓解患者睡眠呼吸暂停状况。持续正压通气治疗期间,正压通气面罩作为患者界面,其密封性及气体交换性能直接影响治疗效果[2]。

面罩内部气体流动不充分可能导致呼出气体滞留,引发 CO<sub>2</sub> 重复呼吸,从而降低吸入气体质量并影响疗效[3]。低通气压力、过小排气结构及较大死腔均会增加重复呼吸的风险。YY/T 0671-2021 标准中要求通过模拟呼吸过程中呼出气体 CO<sub>2</sub> 浓度变化,进行面罩重复呼吸性能指标评价[4]。试验过程模拟呼出气体中 CO<sub>2</sub> 浓度的均匀性与稳定性对试验结果的输出具有重要影响。本文设计了一种 CO<sub>2</sub> 气体混合器,采用 Creo Parametric 软件建立了三维模型并进行流体仿真分析,评估混合装置内的流场分布,拟解决现有测试系统中气体混合不均匀的问题,为正压通气面罩避免重复呼吸保护的性能评价提供可靠的技术支撑。

## 2. CO<sub>2</sub> 气体混合器设计

本文要设计一种气体混合器可实现 CO<sub>2</sub> 与空气的高效均匀混合,有效提升重复呼吸试验中 CO<sub>2</sub> 模拟气体的稳定性与可靠性。该气体混合器需满足以下要求,如表 1 所示。

Table 1. Gas mixer design plan

表 1. 气体混合器设计规划

功能结构	进气口 2 个, 出气口 1 个, 多层次蜂窝状结构
结构尺寸	直径 Φ285 mm, 高度 272 mm
流场体积	1 L

CO<sub>2</sub> 气体混合器设计中, 采用蜂窝状结构。蜂窝结构由大量平行的小截面通道组成, 气流通过截面通道时, 会产生较大的流动阻力, 具有优异的流动均匀性。蜂窝结构是一种经典的轻质高强结构, 能够以更轻的重量保持结构的完整性和尺寸稳定性。

三维模型能够反映出 CO<sub>2</sub> 气体混合器内部较为准确、真实的流场信息。因此, 本文采用 Creo Parametric 三维几何建模软件来完成 CO<sub>2</sub> 气体混合器的三维模型设计, 如图 1 所示。该模型可通过 3D 打印进行加工。

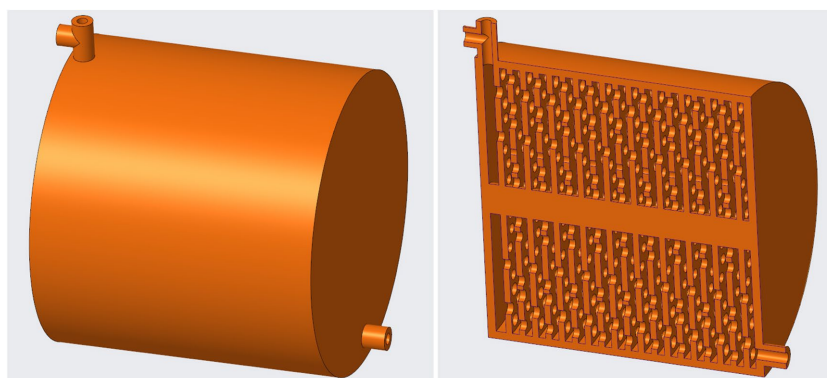


Figure 1. CO<sub>2</sub> gas mixer model  
图 1. CO<sub>2</sub> 气体混合器模型

### 3. CO<sub>2</sub> 混合器仿真模型建立

#### 3.1. 流体域提取

Creo Parametric 软件中, 提取 CO<sub>2</sub> 气体混合器中的内部体积块, 并对体积块进行实体化, 获取该装置的流体域模型, 如图 2 所示。

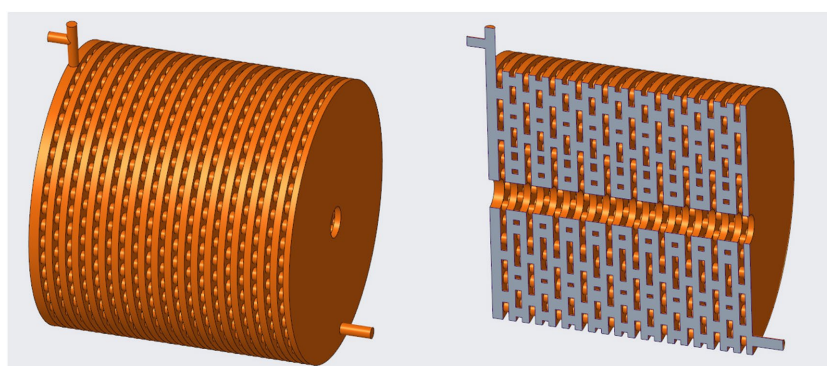


Figure 2. CO<sub>2</sub> gas mixer fluid domain model  
图 2. CO<sub>2</sub> 气体混合器流体域模型

#### 3.2. 网格划分

划分网格是流体仿真过程中的关键步骤, 网格划分的优劣程度直接决定模拟结果是否可靠, 对计算结果的精度和收敛的难易程度具有决定性影响。划分网格的步骤需要操作严谨并对生成的网格的品质展开全面评价, 提前规避失真、畸变、疏密不均等严重问题, 保证后续流体仿真中的计算精度和稳定性[5]-[7]。本文运用 Creo Parametric 软件中的 Flow Analysis 模块对 CO<sub>2</sub> 气体混合器仿真模型进行网格划分, 如

图 3 所示。

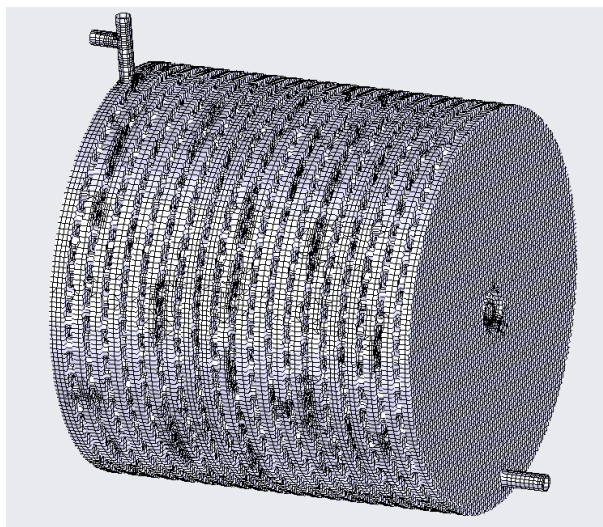


Figure 3. Grid division of CO<sub>2</sub> gas mixer  
图 3. CO<sub>2</sub> 气体混合器网格划分

### 3.3. 边界条件

合理的边界条件是计算出流场解的先决条件。

CO<sub>2</sub> 气体常温常压下化学性质稳定, 与空气无化学反应, 两者混合仅为物理扩散, 不产生热交换和功交换, 因此可忽略气体压缩性, 将输入混合装置腔的流体设为不可压缩理想气体。由于 CO<sub>2</sub> 与空气供气端垂直汇入会产生湍流, 为适配混合器流场分析需求, 在保证仿真精度的同时缩短运算时间, 采用标准湍流模型模拟, 作为 Creo 仿真基础边界条件[8]。

本文在 CO<sub>2</sub> 气体混合器仿真模型中设置 CO<sub>2</sub> 气体入口、空气入口、混合气体出口, 如图 4 所示。其中, 设置 CO<sub>2</sub> 气体、空气均为理想气体。

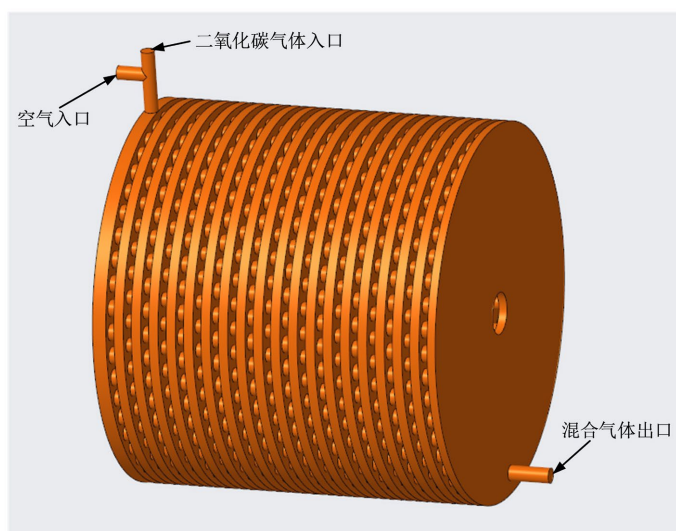


Figure 4. Boundary conditions for CO<sub>2</sub> gas mixer  
图 4. CO<sub>2</sub> 气体混合器边界条件

CO<sub>2</sub> 气体入口、空气入口输入值分别为指定的体积流量, 该体积流量根据所需混合气体中 CO<sub>2</sub> 的浓度进行求解。混合器出口为指定的压力出口, 该压力设定为 0 Pa。

#### 4. CO<sub>2</sub> 气体混合器流体分析

利用流体分析方法, 可以模拟气体在 CO<sub>2</sub> 气体混合装置内的流动状态, 分析气体分布及混合情况。

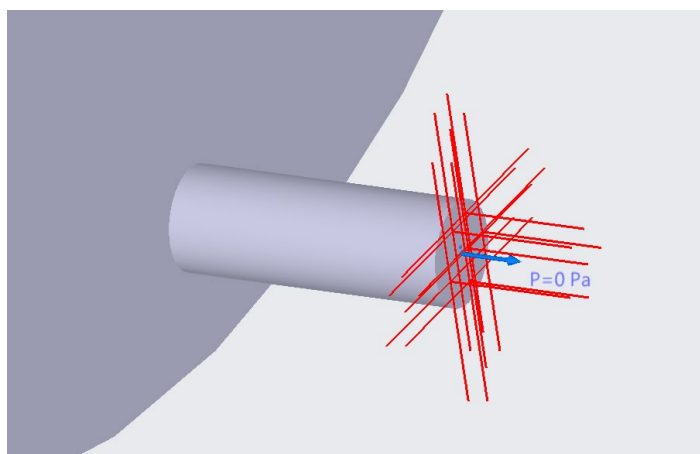
设定 CO<sub>2</sub> 气体混合装置出口体积流量为 15.5 L/min, 选取预期 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度, 分别为 5%、10%、20%。并通过设计分析得到 CO<sub>2</sub> 气体输入体积流量和空气输入体积流量, 如表 2 所示。

**Table 2.** Input data for CO<sub>2</sub> gas mixing device

**表 2.** CO<sub>2</sub> 气体混合装置输入数据

预期 CO <sub>2</sub> 混合气体浓度	CO <sub>2</sub> 气体输入体积流量(L/min)	空气输入体积流量(L/min)
5%	0.5	15
10%	1.05	14.45
25%	2.8	14.7

混合气体出口截面上选取 6 个监控点, 测试二氧化碳气体浓度, 作为气体混合均匀性的判断依据, 如图 5 所示。



**Figure 5.** CO<sub>2</sub> gas mixer monitoring point

**图 5.** CO<sub>2</sub> 气体混合器监控点

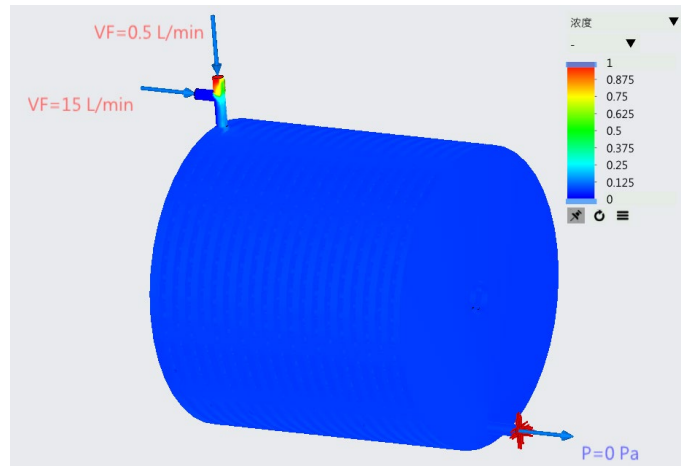
根据上述设定仿真参数, 采用 Creo Flow Analysis 进行流体分析, 设定多组分混合、湍流和流线仿真模块, 湍流模块设定为标准模式, 也就是采用标准 k-ε 模型。采用稳态仿真, 设定迭代次数 500 次, 进行如下流体仿真分析。

##### 4.1. CO<sub>2</sub> 混合气体浓度: 5%

为了获取浓度为 5% 的 CO<sub>2</sub> 混合气体, 设定输入边界条件参数, 如图 6 所示:

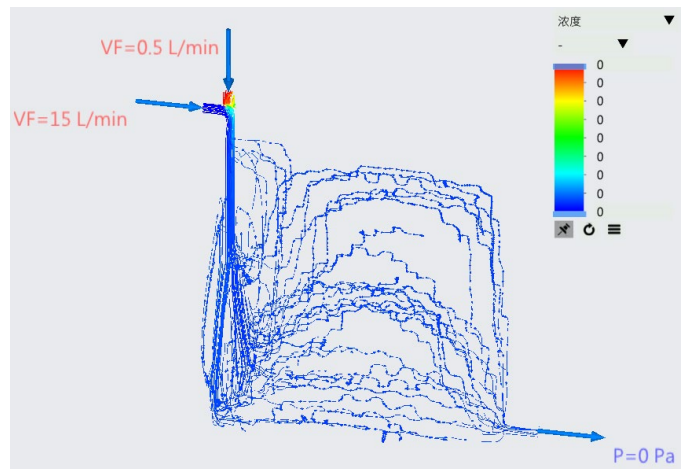
CO<sub>2</sub> 气体入口输入值: 体积流量为 0.5 L/min 的理想 CO<sub>2</sub> 气体; 空气入口输入值: 体积流量为 15 L/min 的理想空气。

运行流体稳态仿真, 迭代次数 500 次, 得到如图 7 所示的流线图。并监测 CO<sub>2</sub> 气体混合器出口 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度变化曲线, 如图 8 所示, 获取稳定时 CO<sub>2</sub> 气体混合器出口 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度为 4.8%, 及 6 个监控点的 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度, 如表 3 所示。



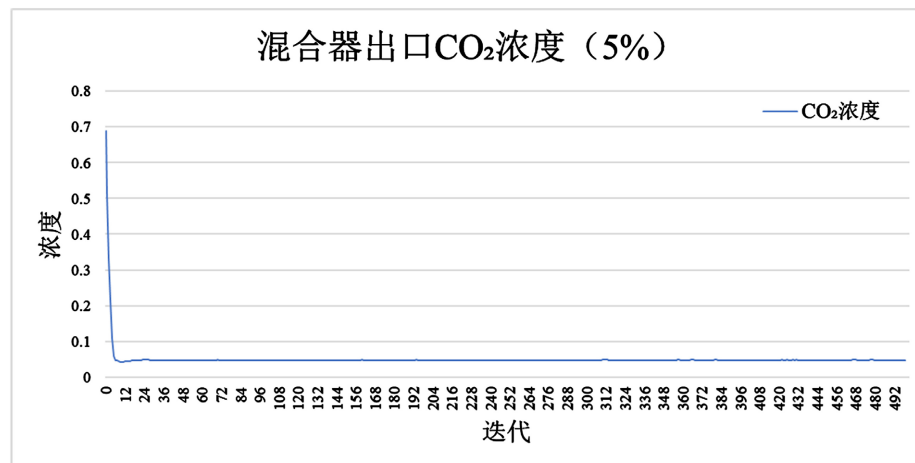
**Figure 6.** Fluid simulation parameter setting for a CO<sub>2</sub> mixed gas with an expected output concentration of 5%

**图 6.** 预期输出浓度为 5% 的 CO<sub>2</sub> 混合气体的流体仿真参数设定



**Figure 7.** Streamline distribution diagram of CO<sub>2</sub> gas mixer (5%)

**图 7.** CO<sub>2</sub> 气体混合器的流线分布图(5%)



**Figure 8.** CO<sub>2</sub> concentration at the outlet of CO<sub>2</sub> gas mixer (5%)

**图 8.** CO<sub>2</sub> 气体混合器出口 CO<sub>2</sub> 浓度(5%)

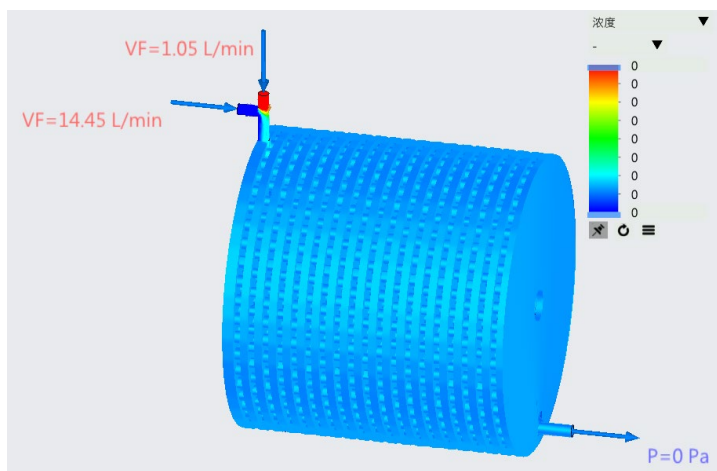
**Table 3.** CO<sub>2</sub> mixed gas concentration (5%) at 6 monitoring points**表 3.** 6 个监控点的 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度(5%)

监控点	POINT_1	POINT_2	POINT_3	POINT_4	POINT_5	POINT_6
CO <sub>2</sub> 混合气体浓度	4.8%	4.7%	4.9%	4.9%	4.8%	4.7%

#### 4.2. CO<sub>2</sub> 混合气体浓度：10%

为了获取浓度为 10% 的 CO<sub>2</sub> 混合气体，设定输入边界条件参数，如图 9 所示：

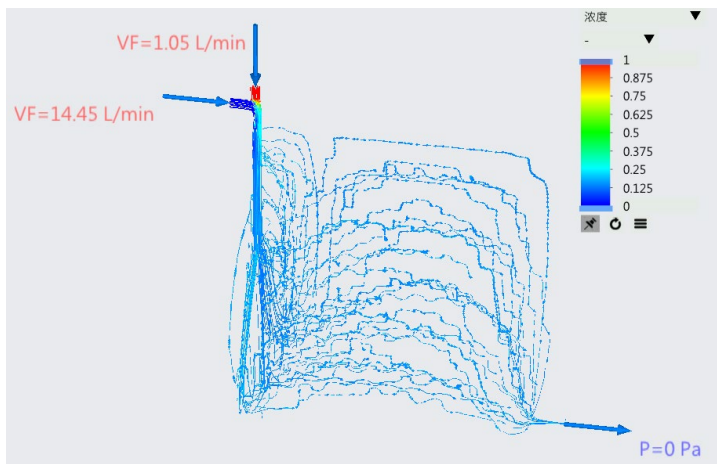
CO<sub>2</sub> 气体入口输入值：体积流量为 1.05 L/min 的理想 CO<sub>2</sub> 气体；空气入口输入值：体积流量为 14.45 L/min 的理想空气。



**Figure 9.** Fluid simulation parameter setting for a CO<sub>2</sub> mixed gas with an expected output concentration of 10%

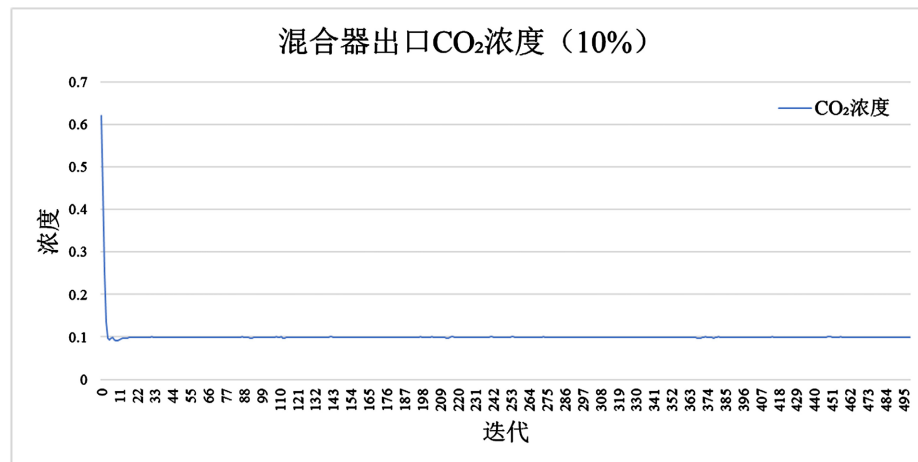
**图 9.** 预期输出浓度为 10% 的 CO<sub>2</sub> 混合气体的流体仿真参数设定

运行流体稳态仿真，迭代次数 500 次，得到如图 10 所示的流线图。并监测 CO<sub>2</sub> 气体混合器出口 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度变化曲线，如图 11 所示，并获取稳定时 CO<sub>2</sub> 气体混合器出口 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度为 9.9%，及 6 个监控点的 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度，如表 4 所示。



**Figure 10.** Streamline distribution diagram of CO<sub>2</sub> gas mixer (10%)

**图 10.** CO<sub>2</sub> 气体混合器的流线分布图(10%)



**Figure 11.** CO<sub>2</sub> concentration at the outlet of CO<sub>2</sub> gas mixer (10%)

**图 11.** CO<sub>2</sub> 气体混合器出口 CO<sub>2</sub> 浓度(10%)

**Table 4.** CO<sub>2</sub> mixed gas concentration (10%) at 6 monitoring points

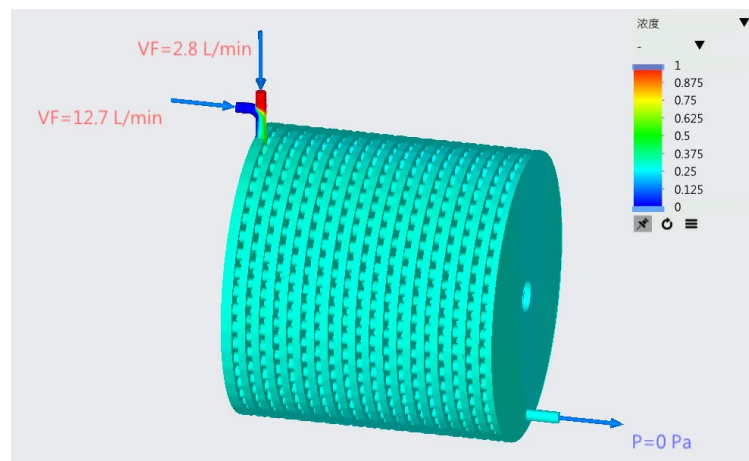
**表 4.** 6 个监控点的 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度(10%)

监控点	POINT_1	POINT_2	POINT_3	POINT_4	POINT_5	POINT_6
CO <sub>2</sub> 混合气体浓度	9.8%	10.3%	9.6%	10.2%	9.8%	9.7%

### 4.3. CO<sub>2</sub> 混合气体浓度：25%

为了获取浓度为 25% 的 CO<sub>2</sub> 混合气体，设定输入边界条件参数，如图 12 所示：

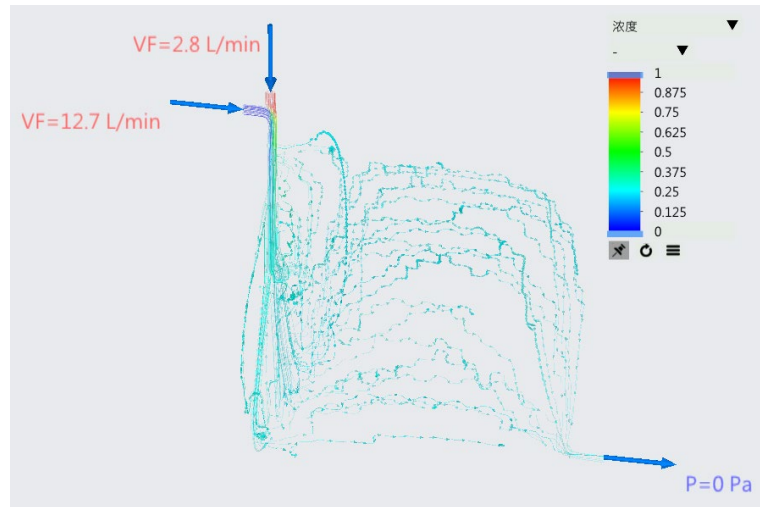
CO<sub>2</sub> 气体入口输入值：体积通量为 2.8 L/min 的理想 CO<sub>2</sub> 气体；空气入口输入值：体积通量为 12.7 L/min 的理想空气。



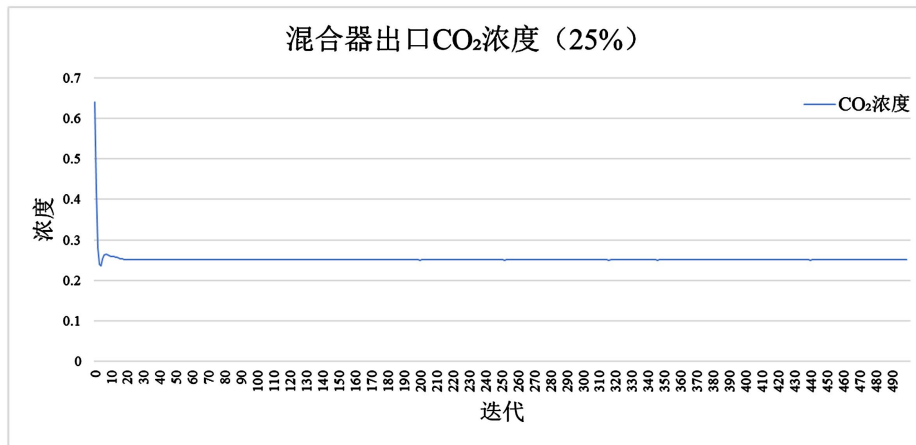
**Figure 12.** Fluid simulation parameter setting for a CO<sub>2</sub> mixed gas with an expected output concentration of 25%

**图 12.** 预期输出浓度为 25% 的 CO<sub>2</sub> 混合气体的流体仿真参数设定

运行流体稳态仿真，迭代次数 500 次，得到如图 13 所示的流线图。并监测 CO<sub>2</sub> 气体混合器出口 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度变化曲线，如图 14 所示，并获取稳定时 CO<sub>2</sub> 气体混合器出口 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度为 25.1%，及 6 个监控点的 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度，如表 5 所示。



**Figure 13.** Streamline distribution diagram of CO<sub>2</sub> gas mixer (25%)  
**图 13.** CO<sub>2</sub> 气体混合器的流线分布图(25%)



**Figure 14.** CO<sub>2</sub> concentration at the outlet of CO<sub>2</sub> gas mixer (25%)  
**图 14.** CO<sub>2</sub> 气体混合器出口 CO<sub>2</sub> 浓度(25%)

**Table 5.** CO<sub>2</sub> mixed gas concentration (25%) at 6 monitoring points  
**表 5.** 6 个监控点的 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度(25%)

监控点	POINT_1	POINT_2	POINT_3	POINT_4	POINT_5	POINT_6
CO <sub>2</sub> 混合气体浓度	24.8%	25.4%	24.5%	25.4%	24.8%	24.6%

#### 4.4. 仿真结果

通过流线图图 7、图 10、图 13 可知, CO<sub>2</sub> 气体和空气在混合器入口处平稳进入, 在混合器内充分绕行, 无明显涡流和大死区, 并有序的流向出口, 证明该混合器内气体混合充分、流场稳定。

出口截面的 CO<sub>2</sub> 混合气体浓度均匀性采用下式中变异系数 COV 判定, 当出口截面的变异系数 COV ≤ 5%时, 认为出口的 CO<sub>2</sub> 气体和空气混合均匀[9]。

$$COV = \frac{s}{\bar{C}} = \frac{1}{\bar{C}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}$$

式中,  $n$  为出口截面设置的监控点的数量,  $C_i$  为第  $i$  点所测的  $\text{CO}_2$  混合气体浓度值,  $\bar{C}$  为所有监控点测量值的平均值。根据表 3、表 4、表 5 计算出 3 种预期  $\text{CO}_2$  混合气体浓度的变异系数 COV 值如表 6 所示。

**Table 6.** The coefficient of variation (COV) for different expected concentrations of  $\text{CO}_2$  mixed gas  
**表 6.** 不同预期  $\text{CO}_2$  混合气体浓度的变异系数 COV

预期 $\text{CO}_2$ 混合气体浓度	5%	10%	25%
COV	1.9%	2.9%	1.7%

通过表 6 可以得出  $\text{CO}_2$  气体混合装置的出口截面的 COV 值均 <3%, 证明该装置出口的  $\text{CO}_2$  气体和空气混合均匀性良好。

## 5. 结论

本文围绕正压通气面罩重复呼吸评价中  $\text{CO}_2$  气体稳定性不足的问题, 设计并验证了一种基于蜂窝结构的  $\text{CO}_2$  气体混合器。通过 Creo 建模与仿真分析, 系统评估了不同目标浓度下的流动与混合特性。结果表明: (1) 蜂窝结构能够有效提高气体流动均匀性, 减少死区与涡流; (2) 各工况下出口截面浓度变异系数均小于 3%, 表明混合均匀性良好; (3) 所构建仿真方法能够有效预测气体混合行为, 可为类似装置设计提供参考。

因此, 本文所提出的  $\text{CO}_2$  气体混合器在结构设计与性能表现上均满足正压通气面罩“避免重复呼吸的保护”性能指标检测过程中对  $\text{CO}_2$  混合气体气体的均匀性与稳定性要求, 可显著提高试验结果的准确性与重复性。后续研究可进一步结合实物测试对仿真结果进行验证, 并优化结构参数以适应更复杂工况。

## 参考文献

- [1] Iannella, G., Pace, A., Bellizzi, M.G., Magliulo, G., Greco, A., De Virgilio, A., *et al.* (2025) The Global Burden of Obstructive Sleep Apnea. *Diagnostics*, **15**, Article No. 1088. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15091088>
- [2] Benjafield, A.V., Ayas, N.T., Eastwood, P.R., Heinzer, R., Ip, M.S.M., Morrell, M.J., *et al.* (2019) Estimation of the Global Prevalence and Burden of Obstructive Sleep Apnoea: A Literature-Based Analysis. *The Lancet Respiratory Medicine*, **7**, 687-698. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(19\)30198-5](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(19)30198-5)
- [3] Noah, W.H., White, D.P., Hete, B. and Messineo, L. (2025) Rebreathing during CPAP Therapy and Its Implications in Obstructive Sleep Apnea. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, **21**, 1759-1771. <https://doi.org/10.5664/jcsm.11802>
- [4] 全国麻醉和呼吸设备标准化技术委员会. YY/T 0671-2021, 医疗器械 睡眠呼吸暂停 治疗面罩和应用附件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [5] 苏勇达, 吴建军. 基于 CREO 和 ADAMS 的烟包平推机构设计及刚柔耦合动力学仿真[J]. 工程机械文摘, 2025(3): 50-55.
- [6] 逢锦伦. 动态连续混气系统均匀度检测方法探讨[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(3): 112-115.
- [7] 张青荣, 张蕊, 李文涛, 孔德利. 基于 Creo Parametric 与 ANSYSworkbench 软件管式车桥压装有限元仿真[J]. 时代汽车, 2025(4): 122-124.
- [8] 孙琨瑜, 胡兆燕, 陈正龙, 赵柏淦. 一种医用一氧化氮流量控制仪的设计与实现[J]. 生物医学工程学杂志, 2016, 33(4): 770-778.
- [9] 郑金阁, 程卫亚, 王晨潇, 郝桂珍, 刘伟富, 郭浩城, 赵宇伦, 陈凌. 应用 CFD 方法研究结构对管道内气体混合均匀性影响[J]. 中国辐射卫生, 2022, 31(2): 172-180.