

# 石墨烯膜微流量敏感元件温度影响分析

王清杨, 李子涵, 史慧超\*

北京化工大学信息科学与技术学院, 北京

收稿日期: 2024年5月17日; 录用日期: 2024年6月18日; 发布日期: 2024年6月30日

## 摘要

差压式流量测量技术在精密化工、生物医学、流程工业等领域具有重要应用。本文以石墨烯膜差压式微流量传感器的敏感元件作为研究对象, 探讨了温度变化对其流量测量结果的影响, 并建立了温度敏感元件的有限元分析仿真模型, 从流体的粘度和密度两个因素, 对温度影响导致的流量变化趋势进行了分析总结, 为探索和改进石墨烯膜差压式微流量传感器在不同温度条件下的性能提供参考。

## 关键词

流量测量, 温度分析, ANSYS仿真

# Temperature Effect Analysis of Graphene Membrane Microflow Sensor

Qingyang Wang, Zihan Li, Huichao Shi\*

School of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing

Received: May 17<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 18<sup>th</sup>, 2024; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Differential pressure flow measurement technology has important applications in precision engineering, biomedical, process industry and other fields. In this paper, the sensitive element of graphene membrane differential pressure microflow sensor is taken as the research object, the influence of temperature change on its flow measurement results is discussed, and the finite element analysis simulation model of temperature sensitive element is established. The flow variation trend caused by temperature is analyzed and summarized from the two factors of viscosity and density of the fluid to provide a reference for exploring and improving the performance of graphene membrane differential pressure microflow sensor under different temperature conditions.

\*通讯作者。

## Keywords

### Flow Measurement, Temperature Analysis, ANSYS Simulation

Copyright © 2024 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

差压式流量测量在精密工程、生物医学、化学工业等领域愈发关键,促进了国内外测量仪器以及流体力学领域的快速发展。差压式流量计是以伯努利方程和流体连续性方程为依据,根据节流原理设计的[1]。贾正安等设计的光纤布拉格光栅热式流量传感器原理是通过检测不同流量液体带走温度的不同而导致光栅波长变化进而推导液体流量变化[2]。传统流量计有节流损失且测量范围窄,为提高测量精度,引进管道约束条件,全未国等建立了基于支持向量机的测量模型[3]。半导体制造业、生物工程的不断发展,使流量测量向微小流量检测方面发展,在微小尺度下,物质的对流、传热速率显著增大,对测量环境的要求明显提高[4]。差压式微流量测量工作原理基于伯努利原理,当流体速度变化时,根据能量守恒定律,静压力会因此改变,从而产生压力差,通过该差压的测量可以确定流体对应的流量[5]。

目前,国内外对于差压式流量传感器的研究已经取得了一些进展。在材料选择方面,隔膜式差压流量传感器采用 pdms 材料的隔膜,利用矩形微通道的起点和终点以及光纤等两个 Fabry-Prot 腔来精确测定压降[6]。液态金属电阻式微流量压力传感器利用液态金属具有高导电性和可塑性,通过压电效应实现压力的测量[7]。压阻式 MEMS 压力传感器采用薄膜硅膜片来测量压力[8]。石墨烯膜 F-P 腔差压式微小流量传感器,将石墨烯薄膜用于微小流量的测量[9]。石墨烯膜具有极高的机械强度和优良的弹性延展率,可作为压力敏感薄膜用于超高灵敏度微压力测量,相比于其他材料的薄膜,具有更高的灵敏度和分辨率,因此利用石墨烯膜的力学和光学性质进行压力测量的方法,因其材料的高敏感度备受关注。

本文以石墨烯膜的差压式微小流量敏感元件为分析对象,首先介绍其测量系统的工作原理,再仿真建立流体温度变化的模型,根据仿真结果分析流体温度变化对石墨烯膜差压式微流量敏感元件流量测量的影响趋势。

## 2. 工作原理

石墨烯膜差压式微流量传感器的工作原理是:当流体流经微流控芯片中的流道时,会分别挤压两个取压点处的敏感元件的 F-P 腔薄膜,该压力会导致石墨烯膜发生形变,形变直接体现出来的是 F-P 腔长变化,进而造成通过光纤进入 F-P 腔内的激光的干涉条纹的变化,最终导致反射光功率发生变化。而对应不同流量时,流道内的压力不同,同一流量的两个取压点间的压力也不同,取压点间会出现压差,造成所测的光功率值不同,通过光功率计测量反射光功率,根据光功率差值与流量的线性关系,可以实现微小流量的测量。

本文采用的传感器适用于流体为不可压缩的水,流动状态为层流状态,流道横截面为正方形,若流体流经此传感器,通过测量压力差即可获得对应的流量值,其压力差和流量之间的差压-流量关系模型可以表示为:

$$Q = \frac{D^4}{32\mu L} \Delta P \quad (1)$$

其中,  $Q$  是流量,  $D$  是横截面边长,  $\mu$  为流体粘度,  $L$  为取压点之间的距离,  $\Delta P$  为两个取压点之间的压力差。

### 3. ANSYS 有限元仿真

为了直观理解流体温度变化对流量的影响, 本文使用 ANSYS 中的流体流动模块, 进行详细的仿真分析。在仿真过程中, 本节将分别仿真温度变化后, 粘度改变和密度改变对流量的影响。

#### 3.1. 粘度影响流量的仿真

在流体力学中, 粘度是描述流体内部阻力的物理量, 它决定了流体层之间的摩擦程度。当流体温度升高时, 分子运动加剧, 导致粘度降低, 减少了流体流动时的内部阻力, 从而影响流道中流体的流量。仿真建立的模型如图 1 所示, 该模型包括流道以及压力敏感元件, 使用 FLUENT 模块分析温度的影响。

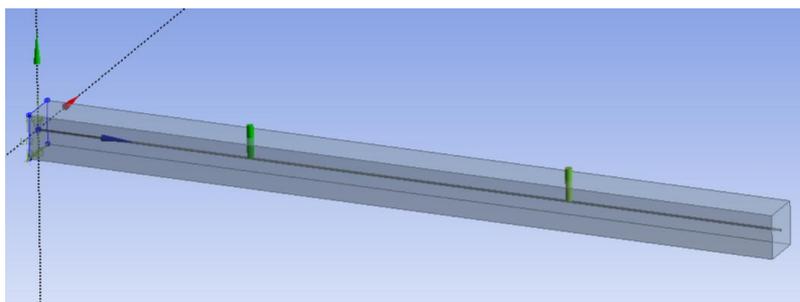


Figure 1. Rectangular flow channel and pressure sensitive element  
图 1. 矩形流道及压敏元件

仿真进入结果界面, 查看结果云图, 如图 2 所示, 计算 face\_1 和 face\_2 的压力平均值, 管道入口流量采用 0 ml/min、0.25 ml/min、0.5 ml/min 三个不同的流量点进行测量, 流体温度范围为 10℃~40℃, 每隔 2℃ 仿真一次, 记录取压点处的压力值。

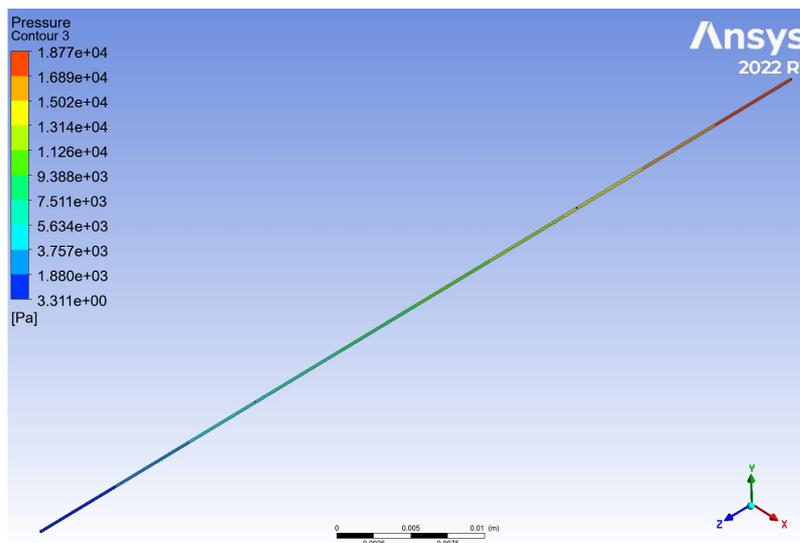


Figure 2. Temperature-viscosity simulation result cloud map  
图 2. 温度 - 粘度仿真结果云图

### 3.2. 密度影响流量的仿真

当流体温度变化后，其密度随之改变，由于流体质量守恒，体积会随密度出现变化，进而影响敏感元件的石墨烯薄膜所感应到的压力，导致流量测量结果改变。建立温度改变引起密度改变的仿真模型如图 3 所示，该模型模拟的是取压点处的流体水柱，使用 ANSYS 静态结构模块分析温度的影响。

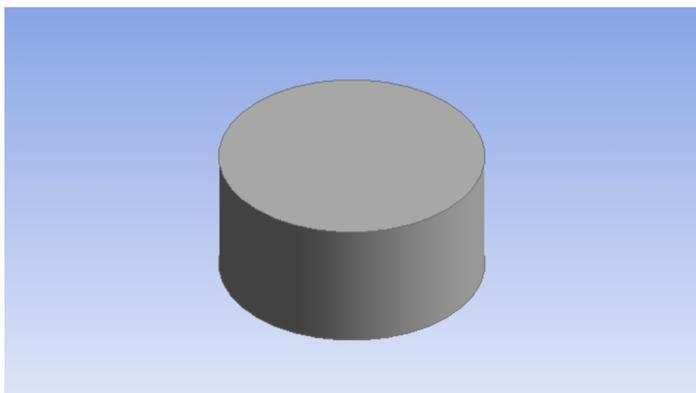


Figure 3. Simulation model diagram

图 3. 仿真模型图

查看应力的对应云图，记录所受到的平均应力值，如下图 4 所示，根据 0 ml/min、0.25 ml/min、0.5 ml/min 三个不同的流量点对应的压力值施加压力，在流体温度 10℃~40℃ 的范围内，每隔 2℃ 改变热条件对应的数值，求解后记录数据结果。

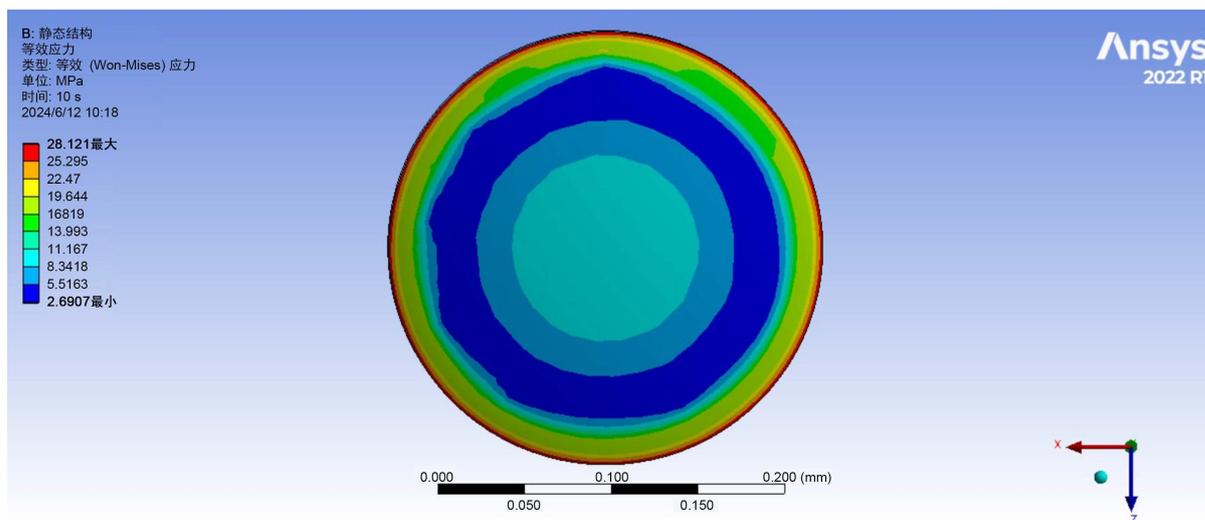


Figure 4. Stress result cloud map

图 4. 应力结果云图

## 4. 结果分析

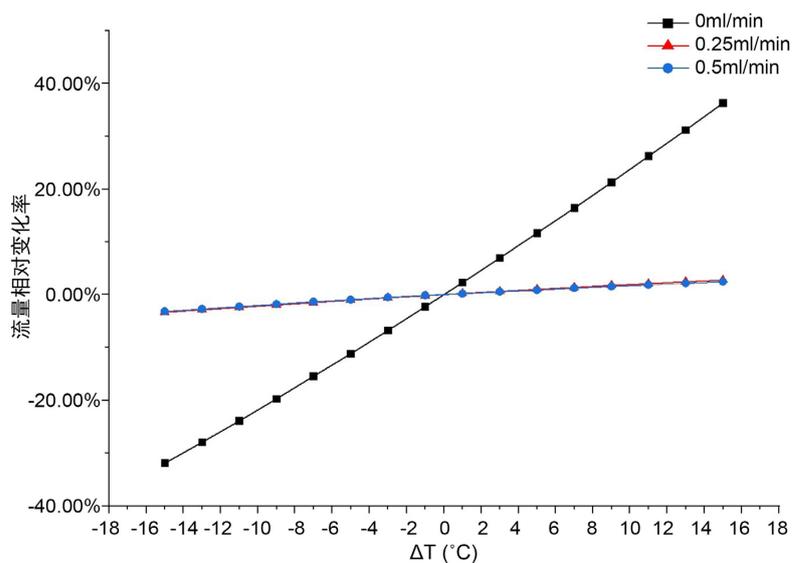
### 4.1. 粘度影响流量的分析

仿真分析流体温度对流量的影响时，根据差压 - 流量模型和记录的压力值数据，计算处于不同温度下的流量相对于 25℃ 时流量的相对变化率，如表 1 所示。

**Table 1.** Relative change rate of each flow point under different temperature differences  
**表 1.** 不同温差下各流量点的相对变化率

$\Delta T/^\circ\text{C}$	流量相对变化率		
	0 ml/min	0.25 ml/min	0.5 ml/min
-15	-31.93%	-3.38%	-3.18%
-13	-27.95%	-2.90%	-2.71%
-11	-23.89%	-2.43%	-2.24%
-9	-19.73%	-1.97%	-1.80%
-7	-15.49%	-1.51%	-1.37%
-5	-11.16%	-1.07%	-0.96%
-3	-6.76%	-0.63%	-0.56%
-1	-2.27%	-0.21%	-0.18%
1	2.29%	0.20%	0.18%
3	6.93%	0.60%	0.54%
5	11.64%	0.99%	0.88%
7	16.42%	1.37%	1.21%
9	21.28%	1.74%	1.53%
11	26.20%	2.09%	1.84%
13	31.20%	2.44%	2.16%
15	36.26%	2.78%	2.46%

绘制曲线如图 5 所示, 流量点为 0 ml/min 时, 差压为接近于 0 的定值, 其主要变化是由粘度引起, 计算得到相对变化率变化较大, 0.25 ml/min 和 0.5 ml/min 的差压随温度降低, 相对变化率近似重合。



**Figure 5.** Relationship curve between fluid temperature difference and relative change rate at each flow point

**图 5.** 流体温差与各流量点相对变化率的关系曲线

#### 4.2. 密度影响流量的分析

通过记录的压力值计算差压, 将差压值带入差压 - 流量模型, 计算处于不同温度下的流量相对于 25 $^\circ\text{C}$

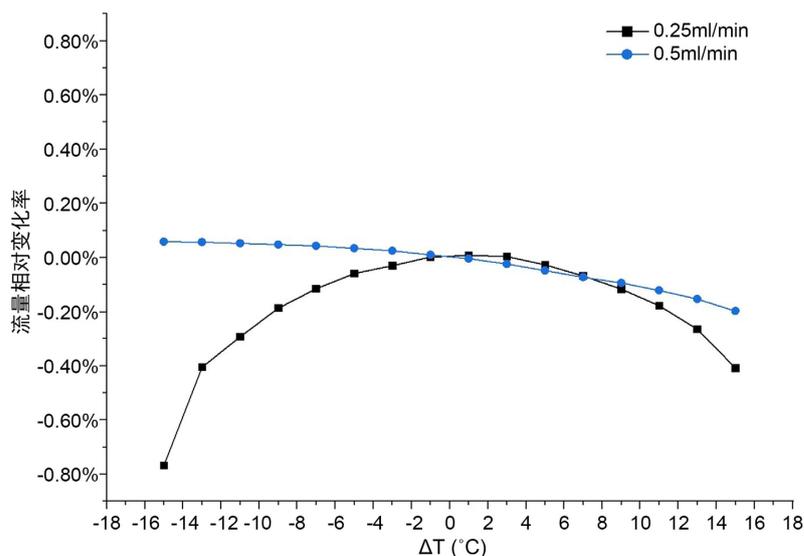
时流量的相对变化率。在该条件下计算的 0 ml/min 差压数值为 0，其流量相对变化率未发生明显变化，结果如下表 2 所示。

**Table 2.** Relative change rate of flow under different temperature differences

**表 2.** 不同温差下流量的相对变化率

$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	流量相对变化率		
	0 ml/min	0.25 ml/min	0.5 ml/min
-15	/	-0.77%	0.06%
-13	/	-0.40%	0.06%
-11	/	-0.29%	0.05%
-9	/	-0.19%	0.05%
-7	/	-0.11%	0.04%
-5	/	-0.06%	0.03%
-3	/	-0.03%	0.02%
-1	/	0.00%	0.01%
1	/	0.01%	0.00%
3	/	0.00%	-0.02%
5	/	-0.03%	-0.05%
7	/	-0.07%	-0.07%
9	/	-0.12%	-0.09%
11	/	-0.18%	-0.12%
13	/	-0.26%	-0.15%
15	/	-0.41%	-0.20%

绘制温差与流量相对变化率的关系曲线如图 6 所示，可以得到密度受温度影响后，压力影响流量相对变化率的趋势，0 ml/min 时流量相对变化率无明显变化，其余两个流量点的温差值越趋近端点值时，流量相对变化率改变越明显。



**Figure 6.** Relationship diagram between temperature difference and relative change rate of flow

**图 6.** 温差和流量相对变化率关系图

## 5. 结论

本文以石墨烯膜微流量敏感元件为研究对象,通过 ANSYS 仿真研究了流体温度对石墨烯膜微流量敏感元件所测流量结果的影响。根据仿真结果分析,流体的温度变化直接影响流体的粘度和密度,当流体温度升高时,分子运动加剧,导致粘度降低,影响流量结果;而流体温度变化导致密度变化,改变敏感元件所直接感应的压力,影响流量结果。具体来说,流体温度升高,流体粘度的降低会导致流量呈现规律性增加的趋势;流体密度的变化幅度越大,流量的变动值也相应越大。因此,在设计与应用此类传感器时,需要充分考虑流体温度变化对流量测量结果的影响。

## 基金项目

本研究受北京市自然科学基金(4232051)资助。

## 参考文献

- [1] 胡淑娟, 冯小丽. 基于 CFD 的差压式气体流量控制器的设计[J]. 煤矿机械, 2018, 39(3): 10-11.
- [2] 贾振安, 杨凯庆, 赵显锋, 等. 一种新型 FBG 热式液体流量传感器[J]. 光子学报, 2021, 50(2): 45-51.
- [3] 仝卫国, 朱赓宏, 刘震, 等. 基于静压差法的流量测量方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 213-218.
- [4] 侯立凯, 范旭, 金羽卓, 等. 液体微小流量测量技术研究进展[J]. 力学学报, 2024, 56(6): 1573-1584.
- [5] 卢嘉敏, 张强, 张达远, 等. 差压式流量计综述[J]. 计量技术, 2018(1): 9-12.
- [6] Eghdami Estarki, H., Saeedian Tareie, Z. and Latifi, H. (2023) Pressure Drop Measurement in Microfluidics Channel by the Fabry-Perot Diaphragm-Based Flow Sensor. *Flow Measurement and Instrumentation*, **91**, Article ID: 102355. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102355>
- [7] 高畅. 基于液态金属的高灵敏微流体压力传感器的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [8] Rajavelu, M., Sivakumar, D., Joseph Daniel, R. and Sumangala, K. (2014) Perforated Diaphragms Employed Piezoresistive MEMS Pressure Sensor for Sensitivity Enhancement in Gas Flow Measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, **35**, 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.12.004>
- [9] Wu, T., Shen, J., Li, Z., et al. (2020) Graphene-Based Ultrasensitive Optical Microfluidic Sensor for the Real-Time and Label-Free Monitoring of Simulated Arterial Blood Flow. *Optics Express*, **28**, 16594-16604. <https://doi.org/10.1364/oe.392993>