

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209465

一种新型双层热感式微流量传感器及参数优化*

祁佳莉,王康宁,王瑞金,杜加友,邵 纯

(杭州电子科技大学机械工程学院 杭州 310018)

摘 要:热感式微流量传感器具备灵敏度高、可靠性好、测量精度高等优势,广泛应用于环境监测系统、生物研究、化工工艺控制等领域,然而传统热感式流量传感器的量程有限,从而限制了其进一步拓展应用领域。本文提出了一种新的设有主次双流道的双层热感式微流量传感器,低流率时输出主流道的温差信号,而大流率时输出次流道的温差信号,从而拓宽量程。为了能获得更好的传感器性能,通过数值模拟优化了支流流道入口大小与位置和流道高度与宽度,优化后双层热感式微流量传感器的量程为 0~145 m/s 式,同时确保灵敏度超过 $0.03\text{ K}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,并且确定了主次流道输出温差信号的转换流速阈值为 63 m/s。最后分析了传感器内部粘性耗散,发现上游探测器前端的粘性耗散是引起传感器失效的主要原因,为改进热感式微流量传感器性能提供参考。

关键词:热感式微流量传感器;灵敏度;量程;粘性耗散;转换阈值

中图分类号: TH7 TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Novel double-layer thermal microflow sensor and preferential parameters

Qi Jiali, Wang Kangning, Wang Ruijin, Du Jiayou, Shao Chun

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Due to the advantages of high sensitivity, reliable performance and high measurement accuracy, the thermal microflow sensors are widely used in various fields, such as environment monitoring systems, biological research, process control chemical engineering, and so on. However, the limited range of such sensor impedes the extension of application fields. In this article, a new double-layer and two-channel thermal microflow sensor is proposed for wider measure range. The temperature-difference output is from the sensor in main-channel at low flowrate, from that in side-channel at high flowrate. To improve the performance of microflow sensor, simulations are conducted to obtain the preferential parameters, such as the size and position of inlet for side-channel, as well as the height and width of main-channel and side-channel. The measure range of improved microflow sensor is 0~145 m/s when the sensitivity being greater than $0.03\text{ K}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$. The switching threshold of inlet velocity for temperature-difference output from the main-channel to side-channel is 63 m/s. Finally, the viscous dissipation of in the microflow sensor is analyzed and found, the viscous dissipation at the front-end of the upstream detector is the main cause of the failure of microflow sensor. This can provide an effective method for improving the performance of the thermal microflow sensor.

Keywords: thermal microflow sensor; sensitivity; measure range; viscous dissipation; switching threshold

0 引 言

流量的测量始终是计量科学中重要的研究主题。用于测定流量的传感器种类繁多^[1],可分为热感式和非热感式,而热感式流量传感器又可分为热线/热膜式、量热

式^[2]和飞渡式^[3]3类。热感式微流量计具有灵敏度高、性能可靠、易于微型化等优点^[4],被广泛应用于环境监测系统、生物研究和化工业工艺控制等领域^[5]。

随着微机电系统技术的发展,微流量传感器得到了越来越多的关注和研究。1974年, Van等^[6]成功研制了世界上第一个集成硅风速计。此后,越来越多的基于不

同工作原理和工作模式的热感式微流量计被研发^[7]。2014年,Miao等^[8]采用0.35 μm CMOS-MEMS工艺制作了热损失型微流量传感器;2019年,Hammerchmidt等^[9]对可以同时测量流速、热导率以及热扩散率的脉冲式MEMS热流量传感器进行了研究;而首个量热式微流量传感器则由Tabata于1986年成功研发^[10];Xu等^[11]提出了一种新型双模热式微流量传感器,该传感器结合了热线式与量热式两种工作模式,拓宽了传感器的量程,同时,Xu等^[12]还提出了一种简单的仅利用惠斯通电桥即可开启双模模式的方法。

为了提高热微流量传感器的性能,前人提出了各种各样的改进措施,并通过数值模拟、风洞测试等方式证实了这些措施的有效性。就提高灵敏度而言,Ye等^[13]对微沟槽进行了参数优化,并针对微沟槽在传感器中数量及位置的不同提出了4种研究模型;另外,通过使用热导率低的材料作为衬底—如SU-8^[14]、多孔硅^[15]或加大衬底与加热器的距离^[16]也能达到提高传感器灵敏度的目的。为了提升传感器的鲁棒性,当热传感器采用正面传感时,可将Parylene-C作为封装层均匀覆盖在传感器上^[12];采用背面传感时,利用粘合胶和金属外壳可使传感器能在恶劣的环境下正常工作^[17]。

目前,尽管越来越多的热感式微流量传感器及改进措施被提出^[18],然而关于拓宽量程的研究却不多,如:Jedermann等^[19]提出的基于量热式原理的用于测量空气流量的传感器,其量程仅为0.2~2 m/s;基于双模模式的热微流量传感器的最大可测流速也仅为73 m/s^[20]。针对上述问题,本文提出了一种双层热感微流量传感器,该传感器包括一个主流道并在此基础上设置一个支流道,小流量下读取主流道内的输出信号,大流量下读取支流道内的输出信号,在确保灵敏度的同时,可以大幅拓宽传感器的量程。

1 微流量传感器模型设计

1.1 工作原理

传统的气体微流量计能够测量的气体流量范围非常有限,为了拓宽传感器的量程我们设计了一种双层热感式微流量传感器(如图1所示)。微流量传感器包含3块晶片(1,2,3)和两个热传感器件,晶片1、3分别同晶片2经过共晶键合后构成了A流道和B流道,两个流道内各设有一个热传感器件,热传感器件均由一个加热器、两个对称分布于加热器上下游的探测器组成。其工作原理为:流体从进口处流入A流道入口后,部分流体被分流到B流道,两个流道的流量均随进口流率增加而线性增大。由于A流道流量大而B流道流量小,当进口流率小的时

候可以根据A流道内的热传感器件输出流量值,当进口流率大的时候A流道内的热传感器件会由于超出了量程范围而失效,而此时B流道内的流量则在量程范围内,因此可以根据B流道内的热传感器件输出流量值,由此,可以达到拓宽量程的目的。

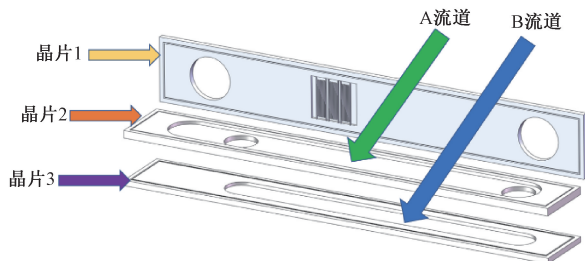


图1 双层热感式微流量传感器的三维模型

Fig. 1 3D model for the double-layer thermal microflow sensor

1.2 几何模型

图2是微流量传感器二维计算域模型,A流道进出口高度 $d_1 = 52 \mu\text{m}$,进口部分长 $x_1 = 200 \mu\text{m}$,出口部分长 $x_3 = 500 \mu\text{m}$,中间部分高 $H_1 = 78 \mu\text{m}$,长 $x_2 = 400 \mu\text{m}$;B流道进出口高度 $d_1 = 25 \mu\text{m}$,进口部分长 $y_1 = 200 \mu\text{m}$,中间部分长 $y_2 = 400 \mu\text{m}$,高 $H_2 = 78 \mu\text{m}$,两个流道入口处的距离为 $L = 100 \mu\text{m}$;两个热传感部分的加热器与探测器构成计算域中的固体域,总长度均为 $180 \mu\text{m}$,其中加热器长 $62.4 \mu\text{m}$,探测器长 $54.2 \mu\text{m}$,上下游探测器与加热器的间距均为 $4.6 \mu\text{m}$ 。

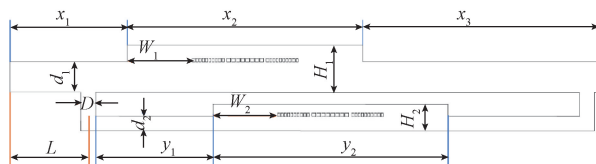


图2 热感传感器的二维模型

Fig. 2 2D geometrical model for the thermal microflow sensor

1.3 数值模型

为了计算微流量传感器内的流动和温度分布,需要建立适当的数学模型,其包含质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

其中, ρ 为流体的密度, u 、 v 、 w 分别为流体在 x 、 y 、 z 方向上的流速。

考虑到真实气体流动最高可达亚声速,因此必须考

虑气体的可压缩性,此时动量守恒方程为:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \times \left\{ \mu \left[\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (2)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \times \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (3)$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \times \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \quad (4)$$

其中, f_x, f_y, f_z 为流体在 x, y, z 方向上的体积力, p 为压强, μ 为流体的动力粘度。

由于粘性耗散对传感器的灵敏度有非常重要的影响^[11],因此能量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_i(\tau_{ij}) \right) + S_h \quad (5)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (6)$$

其中, k 为热传导系数, h 为比焓, T 为温度, J_j 为组分 j 的扩散通量, 上式右边前 3 项分别表示热传导、组分扩散以及粘性耗散引起的能量输运, S_h 为体积热源项。

1.4 基本参数设置

本文基于商业软件 ANSYS Workbench 进行数值仿真,涉及到的模块有 SpaceClaim 模块、Mesh 模块、Fluent 模块、Results 模块。

其中, SpaceClaim 模块用于建立二维计算域模型,该模型是依据以单层式热感流量微传感器为设计基础的双层式热感流量微传感器的三维模型简化而来的。

Mesh 模块用于划分网格,在流道骤扩处、B 流道入口处以及流固耦合处的网格均作了局部加密处理,其余壁面处使用边界层加密。此外,为了验证网格的独立性,对初始划分的网格进行了两次整体性加密后分别在 55 m/s(初始模型 A 流道最大量程)和 145 m/s(初始模型 B 流道最大量程)流速下针对不同网格数量下的模型进行了计算,结果发现,在两种流速下,上下游探测器的温差误差分别为 0.07% 和 0.12%。

Fluent 模块用于求解计算,物理模型选为湍流,流体域为氮气。由于流速会达到亚音速,氮气的可压缩性应被考虑到,因此其密度采用理想气体定律,粘度采用萨瑟兰定律,定压比热容为 1 032.8 J/kg·K,导热系数为 0.024 2 W/m·K;而固体域则由 5 μm 厚的硅、0.2 μm 厚的钼和 1 μm 厚的氮化铝组成,它们的密度分别为 2 329、10 280 和 3 260 kg/m³,比热容分别为 702、250 和 30.1 J/kg·K,导热系数分别为 124、138 和 285 W/m·K。前期工作中^[20]将外壁面温度设为 295.15 K,加热器的钼层温度设为 351.15 K。

1.5 模型验证

由于主要目的在于双层传感器的设计和参数优化方面,因此采用数值模拟的方法为后期商业化作先期探索工作。为了验证模型的可靠性,分别计算了上述模型以及前期工作^[20]中单层热感式微流量传感器温差对流速的响应,并与后者的实验结果进行比较(见图 3)符合得很好,偏差小于 3.8%。单层式传感器与双层式传感器 A 流道内温差对流速的响应也具有高度一致性,这说明了模型及其计算结果的有效性。然而,随着输入流速的增加, A 流道内由上下游探测器温差在流速超过 55 m/s 时输出值开始下降,而 B 流道内的输出温差值曲线在流速超过 145 m/s 时温差输出值才开始下降,传感器测量量程明显提高。

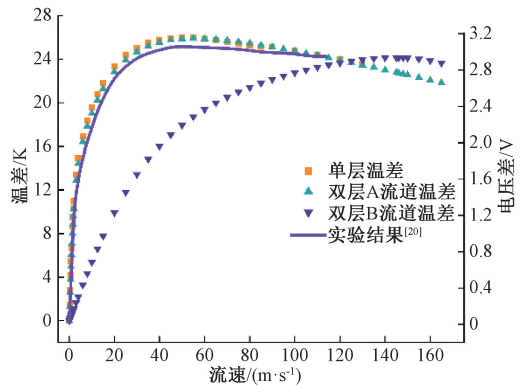


图3 单、双层传感器的温差响应与单层实验结果^[20]

对入口流速的响应

Fig. 3 The temperature difference response to inlet velocity for single-and double-layer sensor chips, A and B channels for double-layer sensors and experimental results^[20]

值得注意的是,若要对 A、B 流道内的输出温差信号进行切换的目的,则需要确定切换阈值,同时还需要表明 A、B 流道内的流量为线性相关。图 4 为 A、B 两个流道中的流量随入口速度的变化,显然二者呈线性相关。由于在低流速时微通道内毛细管效应的影响大,此时使

用 A 流道的测量信号,不需要考虑 A、B 通道的流速相关性;当流速较高时虽然采用 B 通道的温差信号,但此时毛细管效应不明显,可以不考虑,而且传感器经过标定后信号可以得到相应的矫正。确定 A、B 流道切换的阈值,需要考虑测量精度和灵敏度,从图 3 可知,A 流道的输出温差值在入口流速小于 125 m/s 时均大于 B 流道的,有较高的精度,但是 A 流道的输出温差值在流速大于 55 m/s 时呈现下降趋势,而且此时其灵敏度已经远低于 B 流道输出的情况。综上,可以选取 55 m/s 为 A、B 流道切换的阈值。

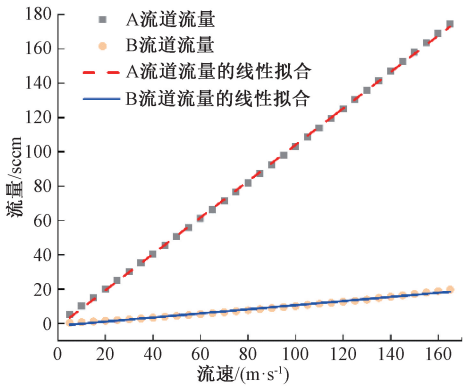


图 4 A、B 流道内的分流流量

Fig. 4 The flowrates in A and B channels

2 几何结构的参数化研究

双层热感式微流量传感器可以在保证灵敏度的前提下有效拓宽量程,为了进一步提高该传感器的输出性能,需要对相关几何结构进行参数化研究。针对图 2 的传感器结构,对 B 流道入口位置 L 、A、B 流道高度及宽度 W_1 、 W_2 、 H_1 、 H_2 、B 流道的入口直径 D 进行参数化研究。

2.1 B 流道入口位置 L 的优选

假设流道 A 和 B 的计算域位置固定,只改变流道 B 与流道 A 的水平方向相对位置,如图 5 所示,B 流道可能的位置有 4 个,即区域 I、II、III、IV,针对每一种可能的位置选取 3 组 L 进行数值模拟,得到 A、B 流道内的最大量程如表 1(最大量程定义为:满足上下游温差随流速增大的最大流速)所示。由于 A 流道内的温差输出值在其失效前均高于 B 流道,因此可将 A 流道的最大量程作为优选指标。由表 1 可见 $L=252.5\text{ }\mu\text{m}$ 时 A 流道的量程最大,同时考虑 B 流道的最大量程可以发现,B 流动进口位置设在 II 区较为合理。最后优选值确定为: $L=252.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.2 A 流道结构参数 H_1 、 W_1 的优选

确定了 B 流道进口位置 L 的值后,再分别对 $H_1=75.2, 78.0, 80.2, 82.5, 85.2, 90.2, 95\text{ }\mu\text{m}$, $W_1=50, 90, 100, 110, 120, 150\text{ }\mu\text{m}$ 进行数值计算,其结果如图 6(a) 和 (b) 所示。

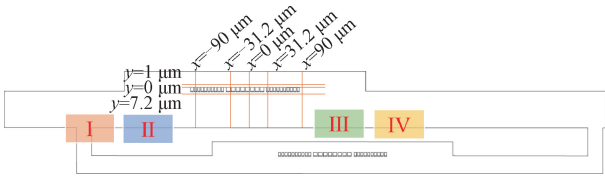


图 5 入口位置参数 L 设置区域划分

Fig. 5 The arrangement of inlet B in various regions and relevant parameter L

表 1 不同区域内参数 L 的数值模拟结果

Table 1 Numerical results for various parameter L

区域	L $/\mu\text{m}$	A 流道 量程 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	B 流道 量程 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	区域	L $/\mu\text{m}$	A 流道 量程 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	B 流道 量程 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
I	112.5	55	145	III	547.5	55	140
	132.5	56	150		567.5	51	141
	152.5	58	151		587.5	50	140
	212.5	67	154		647.5	50	153
II	232.5	74	156	IV	667.5	50	153
	252.5	80	155		687.5	50	158

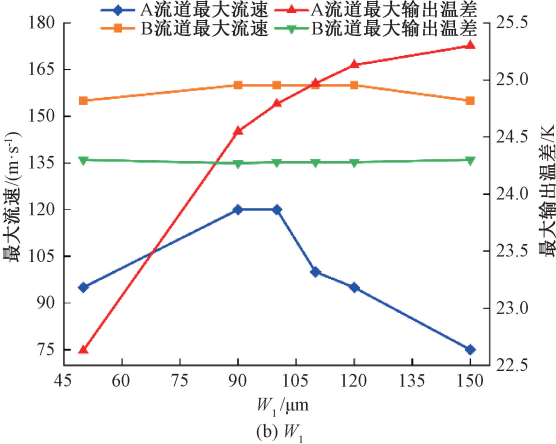
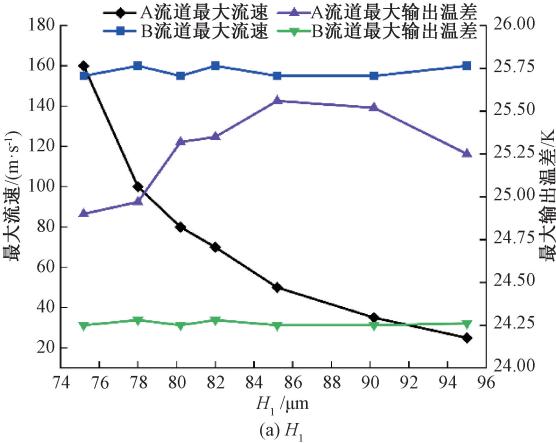


图 6 A 流道量程及输出温差值随几何尺寸的变化

Fig. 6 Range and temperature difference values various with geometric dimensions in channel A

由图 6(a) 可知, H_1 为 78、82、95 μm 时, B 流道的输出温差值和总量程较大, 后者可以达到 160 m/s , 因此, H_1 的选值应优先考虑这 3 个值, 另外, 随着腔体内高度的增加, A 流道的最大量程逐渐降低, 其最大输出温差值相差并不大; 由图 6(b) 可知, W_1 为 90、100、110、120 μm 时, 传感器的总量程可达到 160 m/s , 而在这 4 种情况中, 只有 90 μm 和 100 μm 才能使 A 流道的量程拓宽到最大, 因此, W_1 的选值应优先考虑这 2 个值, 比较两流道的最大输出温差值可以发现, 100 μm 时 A 流道的最大输出温差较高。综上, $H_1 = 78 \mu\text{m}$ 、 $W_1 = 100 \mu\text{m}$ 时为优选值。

2.3 B 流道结构参数 H_2 、 W_2 的优选

分别对 $H_2 = 44$ 、45、46、47 和 49 μm , $W_2 = 50$ 、70、100、110、120 和 150 μm 进行数值计算, 其结果见图 7(a) 和 (b)。从图 7(a) 可知, 随着腔体高度的增加, 总量程呈骤减趋势, 而 A 流道的最大量程则在缓慢增加, 此外, B 流道的最大输出温差增加得较明显, 而 A 流道的温差值几乎不变; 从图 7(b) 可知, W_2 的选值为 50 μm 和 70 μm 时, 总量程最高可达 165 m/s , 然而 50 μm 时 A 流道内的最大量程却是 6 组中最小的。综上, $H_2 = 45 \mu\text{m}$ 、 $W_2 = 70 \mu\text{m}$ 时为优选值。

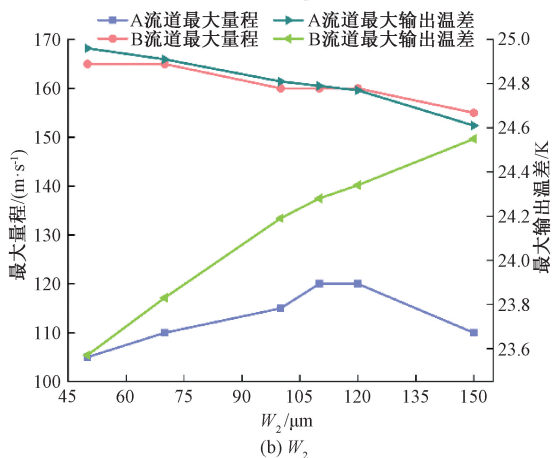
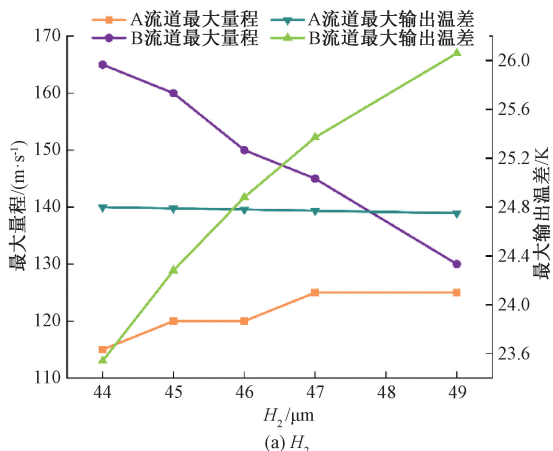


图 7 A 流道量程及输出温差值随几何尺寸的变化

Fig. 7 Range and temperature difference values various with geometric dimensions in channel A

2.4 B 流道进口直径 D 的优选

分别对 $D = 20$ 、25、30、35、40 μm 进行数值计算, 其结果见图 8。可以看到, 随着直径的增加, A 流道的最大输出温差呈缓慢下降趋势, B 流道的最大输出温差几乎不变, 当 D 的选值为 20 和 25 μm 时, 总量程可高达 165 m/s , 而 20 μm 时 A 流道的最大量程却低于 25 μm 时, 因此, $D = 25 \mu\text{m}$ 为优选值。

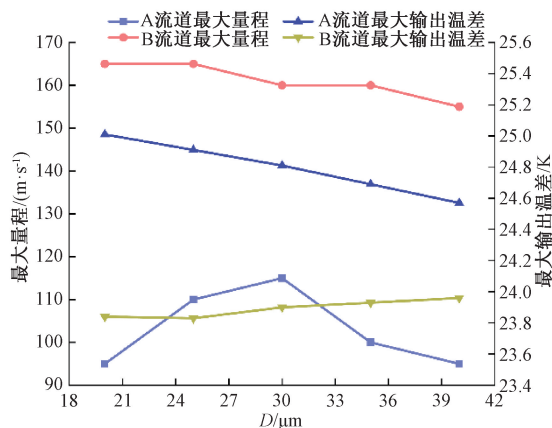


图 8 A 流道量程及输出温差值随 D 的变化

Fig. 8 Range and temperature difference values for various D in channel A

3 结果与讨论

对微流量传感器几何结构优化后确定 $L = 252.5 \mu\text{m}$ 、 $H_1 = 78 \mu\text{m}$ 、 $W_1 = 100 \mu\text{m}$ 、 $H_2 = 45 \mu\text{m}$ 、 $W_2 = 70 \mu\text{m}$ 、 $D = 25 \mu\text{m}$ 为双层热感式微流量传感器的几何参数。由于双层微流量传感器的制作工艺上尚在改进中, 双层微流量传感器只有 A 流道内的温差测量信号得到了验证, 为了确定 A、B 流道信号转换准则, 下面进行精度分析、灵敏度分析, 并探讨产生输出温差下降的内在机制, 也即粘性耗散分析。

3.1 精度分析

在其他条件不变的情况下, 热感式微流量计的测量精度与温差输出值成正比, 为此需要对双层式热感微流量计 A、B 流道的输出温差进行分析。图 9 给出了 A、B 流道内上下游探测器的温度和输出温差随流速的变化。对于 A 流道, 上游探测器的温度随着流速的增加呈下降趋势, 而下游探测器则先升后降, 因此上下游的温差呈现先快速上升(流速 22 m/s)后缓慢上升的趋势, 直至流速大于 115 m/s 后才略有下降。对于 B 流道, 上游探测器的温度随流速呈先降后升, 而下游探测器的温度总是上升的, 因此上下游的温差先快速上升(流速小于 50 m/s)后缓慢上升趋缓, 最后流速大于 165 m/s 时略有下降。

但是,A 流道的温差输出始终比 B 流道的输出温差大,从精度的角度考虑,输出信号的转换阈值应该确定为: 0~115 m/s 时应当读取 A 流道的温差值,115~165 m/s 时应当读取 B 流道的温差值,即转换的阈值为 115 m/s。

3.2 灵敏度分析

传感器的灵敏度定义为:

$$S_T = \frac{\Delta T_{diff}}{\Delta v} \tag{7}$$

式中: ΔT_{diff} 为温差变化率, Δv 为入口流速变化。

根据式(7)可以从图 9 得到 A、B 流道内传感器的灵敏度随流速的变化,如图 10(b) 所示。可以发现:流速较低时,A 流道的灵敏度远高于 B 流道,如图 10(a) 所示;当流速大于 10 m/s 时,B 流道的探测器更为灵敏,如图 10(c) 所示。因此,从灵敏度的角度,A、B 流道温差信号的转换阈值应当确定为 10 m/s。

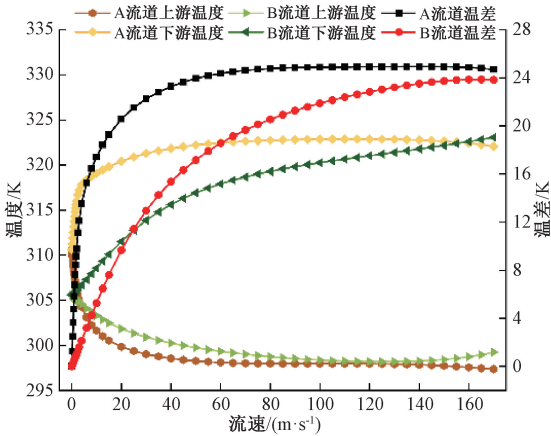
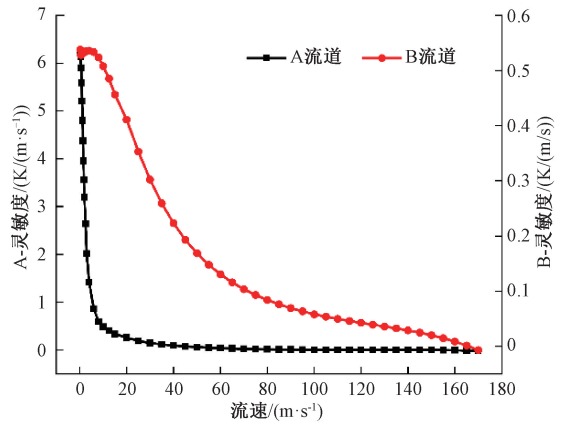
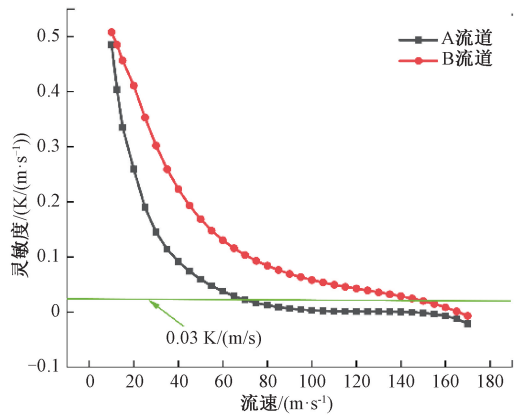


图 9 A、B 流道内上下游探测器温度与温差随流速的变化

Fig. 9 The temperatures of upstream and downstream detectors, as well their temperature difference in channel A and B vary with the inlet velocity



(b) A、B 流道探测器灵敏度对流速(0~170 m/s)的响应
(b) The sensitivities of detectors in channel A and B vary with the inlet velocity (0~170 m/s)



(c) A、B 流道探测器灵敏度对流速(10~170 m/s)的响应
(c) The sensitivities of detectors in channel A and B vary with the inlet velocity (10~170 m/s)

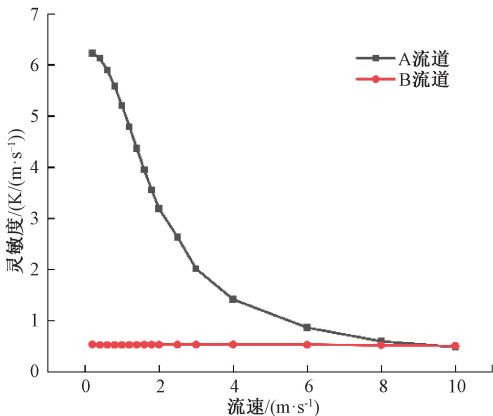
图 10 A、B 流道探测器灵敏度对流速的响应

Fig. 10 The sensitivities of detectors in channel A and B vary with the inlet velocity

然而问题在于,根据精度要求和灵敏度要求所得的阈值不同,而且相差甚远,为此需要综合考虑精度和灵敏度。当 A 流道的输出温差远大于 B 流道的输出温差时,只要保证不同流速的输出温差有足够的差异,就能满足测量要求,换言之,只要灵敏度不小于某一定值即可。灵敏度不小于 0.1, 0.05 和 0.03 K/(m·s⁻¹) 时,阈值分别为 39, 57 和 63 m/s,考虑到流速 145 m/s 时 B 流道中的灵敏度已经小于 0.03 K/(m·s⁻¹),因此将灵敏度大于 0.03 K/(m·s⁻¹) 为判据确定温差输出信号的转换值,此时阈值确定为 63 m/s。

3.3 粘性耗散的分析

由图 9 可以发现,随着流速的增加,A、B 流道内的上游探测器的温度会产生回升的现象,使得输出温差会随流速的增加而降低,进而导致传感器失效,因此需要对该现象进行深入的研究。



(a) A、B 流道探测器灵敏度对流速(0~10 m/s)的响应
(a) The sensitivities of detectors in channel A and B vary with the inlet velocity (0~10 m/s)

首先对不同流速(80、100、120 m/s)下传感器内部粘性耗散的情况进行数值模拟研究,图 11(a)为 A 流道内加热器和上下探测器上表面($y=1.0\ \mu\text{m}$)的粘性耗散情况,从图 11(a)可见最大粘性耗散均发生在上游探测器的前端($x=-90\ \mu\text{m}$),而下游探测器前端($x=31.2\ \mu\text{m}$)则很小,且上游探测器的前端粘性耗散随着流速的增大而显著增大。图 11(b)为 A 流道内加热器和上下探测器下表面($y=-7.2\ \mu\text{m}$)的粘性耗散情况,从图 11(b)可见在上下探测器和加热器前端也有一定的增大,但幅度非常有限。另外下表面的粘性耗散总体上比上表面大,但对输出温差值的影响主要还是上游探测器的上表面的粘性耗散。同样的现象也会出现在 B 流道的热传感器件上,如图 12 显示了流速分别为 150、160 和 170 m/s 时 B 流道内探测器和加热器上下表面(分别对应 $y=1.0\ \mu\text{m}$ 和 $y=-7.2\ \mu\text{m}$)的粘性耗散,由图 12 可见其变化规律与 A 流道的类似。根据以上分析可知,提高测量量程和灵敏度的有效方法是减小上游探测器上表面的粘性耗散。

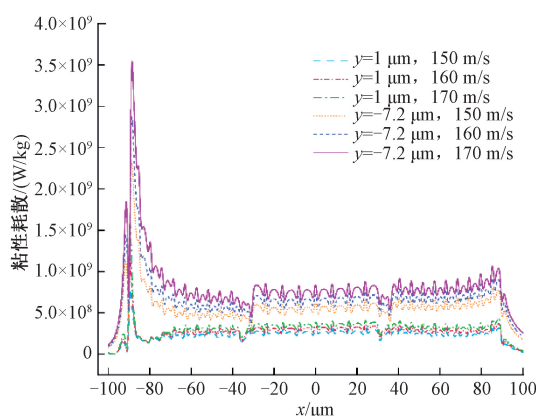


图 12 不同流速下 B 流道内探测器和加热器上 ($y=1.0\ \mu\text{m}$) 下 ($y=-7.2\ \mu\text{m}$) 表面的粘性耗散
Fig. 12 The viscous dissipation on top ($y=1.0\ \mu\text{m}$) and bottom ($y=-7.2\ \mu\text{m}$) surfaces of detectors and heater in channel B for various inlet velocities

4 结 论

本文采用提出了一种新型双层结构的热感式微流量传感器,通过数值模拟优化了其结构参数,并在此基础上分析了传感器的精度、灵敏度和粘性耗散对量程的影响,得出了如下结论:

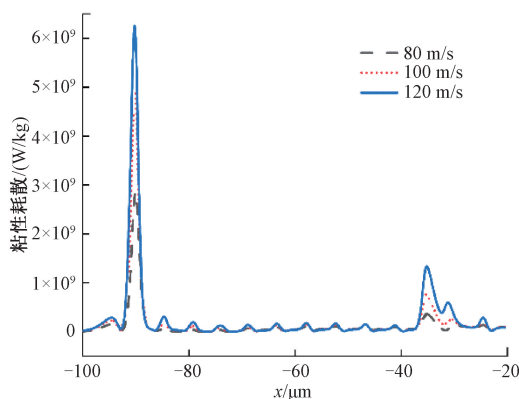
1) 设计了一种新型双层热感式微流量传感器,入口流速低时采用 A 流道内的温差输出,而入口流速比较大时则采用 B 流道内的温差输出,入口速度的转换阈值为 63 m/s,拓宽了有效量程至 0~145 m/s。

2) 入口速度的 A、B 流道转换阈值的确定原则为:在保证灵敏度大于 $0.03\ \text{K}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 条件下,综合考虑输出温差(或测量精度)和有效量程。

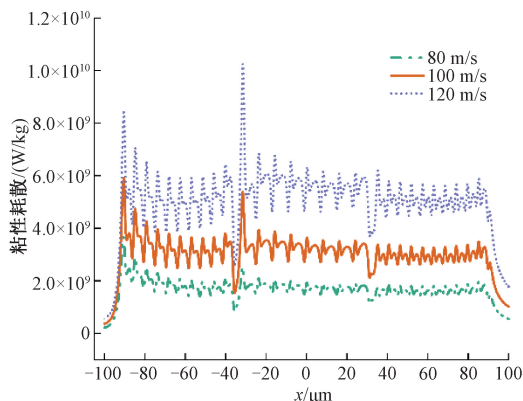
3) 通过对高入口流速下 A、B 流道内的粘性耗散的深入研究发现,粘性耗散随着入口流速的增大而增加,特别在上游探测器前端受粘性耗散的影响最大,是导致传感器的失灵主要原因。

参考文献

- [1] NGUYEN N T. Micromachined flow sensors—A review[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1997, 8(1):7-16.
- [2] LAN Y, ZOU Y, MA X, et al. Fabrication and characterization of dual coordinate self examined thermal flow sensor arrays based on longitudinal heat conduction[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(1): 434-440.
- [3] AHMED M, XU W, MOHAMAD S, et al. Fully



(a) 不同流速下 A 流道内探测器和加热器上表面($y=1.0\ \mu\text{m}$)的粘性耗散
(a) The viscous dissipation on top surfaces ($y=1.0\ \mu\text{m}$) of detectors and heater in channel A for various inlet velocities



(b) 不同流速下 A 流道内探测器和加热器下表面($y=-7.2\ \mu\text{m}$)的粘性耗散
(b) The viscous dissipation on bottom surfaces ($y=-7.2\ \mu\text{m}$) of detectors and heater in channel A for various inlet velocities

图 11 不同流速下 A 流道内探测器和加热器的粘性耗散
Fig. 11 The viscous dissipation of detectors and heater in channel A for various inlet velocities

- integrated bidirectional CMOS-MEMS flow sensor with low power pulse operation[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(9): 3415-3424.
- [4] GARDNER E L W, VINCENT T A, JONES R G, et al. MEMS thermal flow sensors—An accuracy investigation[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(8): 2991-2998.
- [5] OKAMOTO Y, NGUYEN T V, OKADA H, et al. On-chip cooling thermal flow sensor for biological applications[C]. 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, 2021: 756-759.
- [6] VAN PUTTEN A F P, MIDDELHOEK S. Integrated silicon anemometer [J]. Electronics Letters, 1974, 10(21): 425-426.
- [7] KUO J T W, YU L, MENG E. Micromachined thermal flow sensors—A review [J]. Micromachines, 2012, 3(3): 550-573.
- [8] MIAO Z, CHAO C Y H, CHIU Y, et al. Design and fabrication of micro hot-wire flow sensor using 0.35 μm CMOS MEMS technology[C]. The 9th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), IEEE, 2014: 289-293.
- [9] HAMMERSCHMIDT U, SOSNA C, BENKERT A, et al. A novel single-short-pulse MEMS upstream thermal flow sensor for gases also measuring thermal conductivity and thermal diffusivity [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 295: 23-30.
- [10] TABATA O. Fast-response silicon flow sensor with an on-chip fluid temperature sensing element [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1986, 33(3): 361-365.
- [11] XU W, LIJIN B, DUAN M, et al. A wireless dual-mode micro thermal flow sensor system with extended flow range by using CMOS-MEMS process [C]. 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, 2018: 824-827.
- [12] XU W, WANG X, MOUSA B, et al. Self-heated thermoresistive flow sensor coated with parylene-C for reliability enhancement by using 0.35 μm CMOS MEMS technology[C]. 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, IEEE, 2019: 1913-1916.
- [13] YE Y, YI Z, GAO S, et al. DRIE trenches and full-bridges for improving sensitivity of 2-D micromachined silicon thermal wind sensor [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(5): 1073-1081.
- [14] VILARES R, HUNTER C, UGARTE I, et al. Fabrication and testing of a SU-8 thermal flow sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2010, 147(2): 411-417.
- [15] KALTSAS G, NASSIOPOULOU A G. Novel C-MOS compatible monolithic silicon gas flow sensor with porous silicon thermal isolation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 76(1-3): 133-138.
- [16] XUE D, WANG J, LI X. A front-side microfabricated thermoresistive gas flow sensor for high-performance, low-cost and high-yield volume production [J]. Micromachines, 2020, 11(2): 205.
- [17] DONG Z, CHEN J, QIN Y, et al. Fabrication of a micromachined two-dimensional wind sensor by Au-Au wafer bonding technology [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(2): 467-475.
- [18] FANG Z, XU X, ZHENG J, et al. Micro thermal flow sensor for ion solution based on the monitoring of slope of impedance changes [C]. 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, 2021: 864-867.
- [19] JEDERMANN R, HARTGENBUSCH N, BORYSOV M, et al. Spatial profiling of airflow conditions in cold storage warehouses by wireless anemometers[C]. 6th International Cold Chain Management Conference, 2016: 93-98.
- [20] 吴慰, 关镐强, 李金贝奇, 等. 新型双模热感微流量传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 73-80.
- WU W, GUAN H Q, LI J B Q, et al. A new dual-mode thermal micro flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 73-80.

作者简介



祁佳莉, 2020 年于湖州师范学院获得学士学位, 现为杭州电子科技大学研究生, 主要研究方向为流体力学。

E-mail: qijiali@hdu.edu.cn

Qi Jiali received her B.Sc. degree from Huzhou University in 2020. She is currently a graduate student at Hangzhou Dianzi University. Her research interest is fluid

mechanics.

interests include nanofluid technology, microfluidic technology and MEMS technology.



王瑞金,1987 年于浙江工业大学获得学

士学位,1990 年于浙江工业大学获得硕士学位,2005 年于浙江大学获得博士学位,现为杭州电子科技大学机械工程学院教授,主要研究方向为纳米流体技术、微流控技术及微机电系统技术。

E-mail:wangrj@hdu.edu.cn

Wang Ruijin received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Zhejiang University of Technology in 1987 and 1990, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2005. He is currently a professor in the School of Mechanical Engineering at Hangzhou Dianzi University. His research



杜加友(通信作者),2004 年获武汉大学

学士学位,2006 获浙江大学硕士学位,2018 年获浙江理工大学工学博士学位。主要研究方向为微流控技术、微机电系统技术等。

E-mail:abc@hdu.edu.cn

Du Jiayou(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Wuhan University in 2004, received his M. Sc. degree from Zhejiang University in 2006, and received his Ph. D. degree from Zhejiang Ligong University in 2018. His research interests include nanofluid technology, microfluidic technology and MEMS technology.