

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307115

环形间隙式层流元件设计及流量特性研究

陈雨萱¹ 谢代梁¹ 崔骊水² 徐雅¹ 黄震威¹ 刘铁军¹

(1. 中国计量大学计量测试与仪器学院浙江省流量计量技术研究重点实验室 杭州 310018;

2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要:为了解决传统层流流量计(LFM)线性度不佳、长径比较大、加工使用不便和结构易受流体影响等诸多问题,受双锥流量计的启发,提出了一种环形间隙式层流元件结构,介绍了测量原理和流道内非线性压力损失来源。保持该结构外套筒体和圆柱锥体同轴心,其流道截面为同心圆环,通过CFD仿真确定了锥形导流结构的合理锥形角度,确定了层流元件的尺寸参数。将取压孔设置在流道中充分发展的层流段,理论上消除了传统毛细管式 LFM 进出口处流动局部损失和层流发展段的动能损失。制作3种不同间隙大小的试件并进行试验,结果显示,当测量流量值小于53 mL/min时,层流元件的测量误差在3%以内;当测量流量值在(130~6189) mL/min时,测量误差在±2%以内;层流元件的压差和流量之间具有优秀的线性关系。说明环形间隙式层流元件结构可有效克服传统 LFM 的非线性影响,同时测量流量范围可随间隙大小变化而改变。

关键词:层流流量计;微小气体流量;环形间隙式;数值模拟;流量测量

中图分类号: TH814; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and flow characterization of annular gap laminar flow elements

Chen Yuxuan¹ Xie Dailiang¹ Cui Lishui² Xu Ya¹ Huang Zhenwei¹ Liu Tiejun¹

(1. Key Lab. of Flow Measurement Technology of Zhejiang Province, College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: To address various challenges associated with conventional laminar flowmeters (LFM), such as inadequate linearity, significant length-diameter, inconvenient processing and use, and susceptibility to fluid-induced effects, a novel annular-gap laminar element structure is proposed, drawing inspiration from the double-cone flowmeter. This innovative design is accompanied by a comprehensive elucidation of its measurement principles and an analysis of the sources contributing to non-linear pressure losses within the flow conduit. Central to this design is the maintenance of coaxial alignment between the outer jacket cylinder and the cone and circular cylindrical, resulting in a flow channel characterized by concentric circular annual. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were leveraged to ascertain the optimal cone angle of the conical guiding structure and establish the dimensional parameters of the laminar element. Furthermore, pressure taps were strategically positioned within the fully developed laminar segment of the flow channel, thereby theoretically mitigating localized losses at the inlet and outlet typical of conventional capillary-type LFM, as well as kinetic energy dissipation within the laminar development region. Experimental validation involved the fabrication of three distinct test specimens with varying gap dimensions, followed by rigorous testing. Results revealed that for flow rates below 53 mL/min, the measurement error of the laminar element remained within an acceptable margin of 3%. Likewise, within the flow rate range at (130~6189) mL/min, the measurement error was constrained within the range of ±2%. Notably, a robust linear relationship between pressure drop and flow rate was observed, affirming the efficacy of the proposed design in circumventing the non-linear influences inherent in traditional LFM. The elucidation asserts the structural efficacy of annular gap laminar flow elements in effectively mitigating the nonlinear influences characteristic of traditional LFM. Simultaneously, it highlights the adaptability of the measured flow range, which can vary with alterations in gap size.

Keywords: laminar flow meter; micro gas flow; annular gap type; numerical simulation; flow measurement

0 引言

随着 21 世纪高新科学产业的迅猛发展,微小气体流量测量技术广泛的应用在航天航空、半导体加工、医疗生物、电子汽车和微电子等诸多行业中^[1-2]。例如突如其来的新冠肺炎 COVID-19 疫情导致呼吸机的需求激增,其中需要对呼吸机提纯后的气体进行流量控制,实时监测气路中的流量,保证比例阀能按照设定值通气^[3],流量范围大多在(0~80) L/min,尤其是婴幼儿使用时流量范围更小,因此对流量的测量需要满足低流量、高精度和线性度好等要求^[4]。

一直以来,气体的微小流量测量研究面临着较大的阻力,目前国内可实用的微小气体流量计种类较少且适用性较差^[5]。例如孔板式流量计量程小且准确度较差;皂膜流量计操作流程复杂使用不便且误差来源较多;音速喷嘴流量计和小型钟罩式流量计受其量程下限和加工精度要求高难度大;热式流量计适用于工业化大流量测量,但对于小流量测量来说,测量结果易受流体物理参数影响,且精度低、稳定度差、响应速度慢和现场安装条件高等诸多问题^[6-9]。层流流量计(laminar flow meter, LFM)具有测量精度高、响应速度快、重复性好、内部无可动部件等诸多优点,因此被普遍认为十分适合微小流量的测量^[10-16]。

传统的层流流量计一般由层流元件、取压装置、整流装置组成。在层流元件两端设有引压孔测量两端的压差,上下游测得的压差中必然存在层流发展段的动能损失和流道突扩突缩的压力损失,因此测得的压差和流量的关系并非线性关系。

传统的 LMF 通常采用玻璃或者金属制成毛细管束,会根据所测流量大小选择数量合适的毛细管束,许多微小流道构成了层流元件。且在测量过程中,材料的选择对测量精度影响很大,根据美国国家标准与技术研究院(NIST) Berg 的实验^[17]得知,不锈钢毛细管直径小于 0.18 mm 时,测量时会导致±72%的测量误差;塑料和玻璃管测量时会导致±14%的测量误差;毛细管直径大于 0.25 mm 时,玻璃测量误差减小到±3%。因此毛细管一般选择玻璃制作,但由于单个毛细管直径都很细小,在制作过程中实际加工精度达不到,在流道内很容易存在瑕疵影响测量精度,也可能导致毛细管在使用时堵塞、变形或者破裂。若期望测量精度较高时,则该流量计长径比过大,不便于使用。

也有选择用薄金属片制成波纹形状和平板一起卷成波纹板的结构,但其需要较高的工艺水平和特殊材料,制

造难度高不适用于微小流量的测量。史绍熙院士^[16]曾提出过一种片式的结构,利用平行的金属薄板制成,形成了宽深比很大的矩形流道,但这种金属薄片结构刚性较差,使用时受气流影响极易震动、变形^[17-19],且难以解决密封性问题导致测量误差大。根据王筱庐^[18]实验结果可知,当实验流量低于设计流量的 5% 以下时,压差的误差高达 31.49%;当实验流量高于设计流量 20% 以上时,压差的误差也在 2.57%~5.42% 之间。

针对解决传统层流流量计非线性误差来源,提高层流流量计的测量精度,缩短传统层流流量计的长径比,改善层流流量计结构,便于加工和使用,同时使结构不易受流体影响而改变。因此本文提出一种新型的环形间隙式层流元件结构,并以此为基础对其进行了相关技术研究,对其测量原理、结构设计、参数设计等进行研究,并通过试验初步验证该设计的可行性。

1 测量原理和结构设计

LFM 是依据哈根-泊肃叶公式设计的,即对于不可压缩的牛顿流体在温度、管径等参数一定的情况下,充分发展层流流经一圆管时,体积流量 q_v 与管内两截面压力差 Δp 成正比,计算公式如式(1)所示。一般通过无量纲常数雷诺数 Re ,作为判别流体流动状态的依据,通常认为圆管内流体雷诺数 $Re < 2\ 300$ 时处于层流状态,计算公式如式(2)所示。

$$q_v = \frac{\pi \Delta p d^4}{128 \mu l} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2)$$

式中: q_v 为管内体积流量, m^3/s ; Δp 为圆管内上下游取压点处压力差, Pa ; d 为圆管当量直径, mm ; l 为上下游取压点处截面的管道长度, mm ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; v 为流体平均流速, m/s ; μ 为流体动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

传统的层流流量计结构及压力损失如图 1 所示,截面 1~2 为突缩损失,即进口处流动局部损失;截面 2~3 为层流未完全发展段的动能损失;截面 3~4 为层流流动的沿程损失;截面 4~5 为突扩损失,即出口处流动局部损失^[21]。其压力损失 Δp 可由式(3)表示,式中第一项为层流状态下粘性摩擦引起的能量损失,即沿程损失;第二项为入口段效应附加的能量损失。因此传统 LFM 的压差和流量之间的关系并非严格的线性关系,这也是影响 LFM 精度的主要原因。为了消除入口/出口段带来的压损,传统 LFM 通常会采用较大的长径比, Nuszowski 等^[20]制作的 LFM 的长径比甚至高达 3 000。

$$\Delta p = \lambda \frac{Le}{d} \frac{\rho v^2}{2} + s \frac{\rho v^2}{2} \quad (3)$$

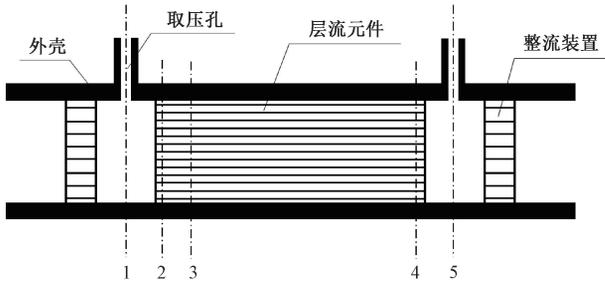


图1 传统层流流量计结构及压力损失

Fig. 1 Traditional laminar flow meter structure and pressure loss

压差-流量之间非线性问题对 LFM 的研究带来了诸多问题,因此本文决定从层流元件结构入手,受双锥流量计启发,提出一种环形间隙式的层流元件结构,其结构剖面如图 2 所示。整个 LFM 由外套筒体和双锥形圆柱体两部分组成,外套筒体和圆柱锥体保持同轴心,中间形成的间隙即为层流通道,通道截面应为一个同心圆环。整体用金属加工制成,两者利用支撑环通过螺栓紧固在一起;通道前后端盖与外套筒体连接处设有密封圈,防止气体从螺栓紧固处流出;外套筒体上设有前后两个引压孔及中间一个绝压孔,从层流通道中间部分进行引压。

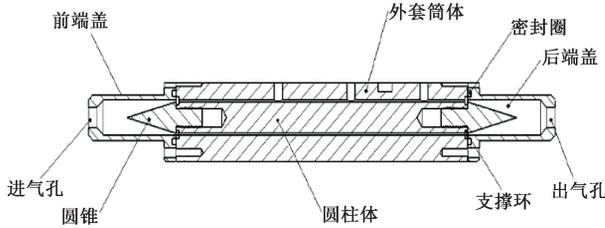


图2 环形间隙式 LFM 的结构设计

Fig. 2 Structural design of annular gap type LFM

双锥形圆柱体对流体具有一定的导流作用,为了方便加工及固定,将圆柱锥体拆分成两个圆锥体和一个圆柱体,令圆柱体两端加工成内螺纹样式,圆锥体加工成外螺纹样式,二者中间加入含有镂空的支撑轴环,通过外部螺栓将三者紧固在一起,圆柱体、圆锥体和外套筒体形成一个整体,则圆柱锥体和外套筒体同轴心,形成了环形间隙通道。为了解决传统 LFM 非线性问题,消除通道突扩突缩的压损和入口层流发展段的压损,因此将测压孔设置在层流元件中间,在充分发展的层流段取压,仅测量充分发展的层流中的沿程损失,即只保留式(3)中第一项,消除第二项带来的能量损失。这种结构的 LFM 内部无可动部件,加工精度易把握,不易产生瑕疵,且在理论上消除了层流发展段和通道突扩突缩带来的压力损失。

2 参数设计

环形间隙式结构的通道是一个环形,它的临界雷诺数会比圆形管道的小,一般通过光滑的同心环状缝隙时雷诺数在 1 100 左右。环形间隙式的参数设计和圆管的设计略有不同,具体公式如下:

$$Re = \frac{q_v D}{\mu A} \quad (4)$$

$$D = \frac{4(\pi r_1^2 - \pi r_2^2)}{2\pi r_1 + 2\pi r_2} = 2(r_1 - r_2) \quad (5)$$

$$Q'_v = \frac{\pi \Delta p}{8\mu l} \left[r_1^4 - r_2^4 - \frac{(r_1^2 - r_2^2)^2}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \right] \quad (6)$$

$$Le = C D Re \quad (7)$$

式中: Q'_v 为理论上环形间隙式层流元件的体积流量; D 为环形通道的当量直径,单位为 mm; A 为环形通道的截面积,单位为 mm^2 ; r_1 、 r_2 为管道内壁半径和同心层流元件的半径,单位为 mm; Le 为取压处到进口的距离,即入口段长度,单位为 mm。

需要特别说明的是 Le 表明的是流体在通道内从湍流转变为层流的最短距离,入口段长度经验系数 C 一般通过试验确定。在设计流量计时应考虑到这个因素,间隙大小不同的情况下,其入口长度也是不同的,取压孔位置的选取也需要根据 Le 的长度来确定。

环形间隙式结构的流量大小可以通过层流元件半径 r_2 和管内半径 r_1 之间形成的间隙进行调整,又考虑到加工的成本和精度条件,本文设计 3 种不同间隙大小的层流元件。为了方便表述将结构简化在图 3 所示。 α 为锥体角度, l_0 为出口段长度, l_1 为环形通道长度, l 为两取压孔处截面的长度, L 为外套筒体长度。三款层流元件结构均设定 L 为 300 mm, l_1 为 200 mm, l 为 100 mm, r_1 为 10 mm; r_2 分别为 9 mm,9.3 mm 和 9.5 mm。

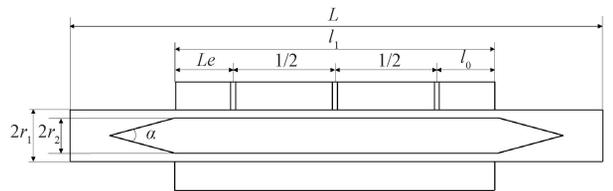


图3 简化结构示意图

Fig. 3 Simplified structure diagram

根据 Janusz 等^[21]关于环形通道入口段长度的研究可以得知,在 $r_1/r_2 < 1.2$ 时,其入口段长度计算值可用 $Le/D = 0.016 1 Re$ 表示。在给定雷诺数 2 000 时,不同间隙大小下的当量直径 D ,计算理论入口段长度 Le^* ,设定实际

的入口段长度 Le 以及出口段 l_0 的长度设置如表 1 所示。可以得出三款结构的层流元件的长径比均小于 200, 相较于传统毛细管式层流流量计较高的长径比, 缩短了层流流量计长度。为了消除实际试件中支持轴环对流体状态的影响, 设置的入口段长度均比理论计算长度大, 以保证是从完全发展成层流段的流道内取压, 避免非线性问题的存在。

表 1 不同间隙下参数设计

Table 1 Parameter design under different gaps

r_2	D	Le^*	Le	l_0
9	2.0	64.4	70	30
9.3	1.4	45.1	50	50
9.5	1.0	32.2	50	50

3 计算模型及仿真结果

为了研究环形间隙式的结构中锥体角度对 LFM 的影响, 同时确定加工时锥体角度, 因此对不同锥体角度下的结构内部流体状态进行分析。将模型简化为二维旋转轴对称模型, 抽取整个流体域为回旋体结构, 可以提高研究效率, 节省研究时间。

采用流体力学数值计算软件 Fluent 进行仿真模拟, 设置流体为空气, 在一个标准大气压下的温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 密度为 1.2252 kg/m^3 , 设置入口质量流量为 $3.3 \times 10^{-5}\text{ m/s}$, 对锥体不同的角度下进行仿真, 探究流道内流体轴向速度的分布。以 $r_2=9\text{ mm}$ 为例, 设置了 7 种大小的锥体角度, 取缝隙流道中心位置的速度, 得出流速的分布情况, 如图 4 所示。

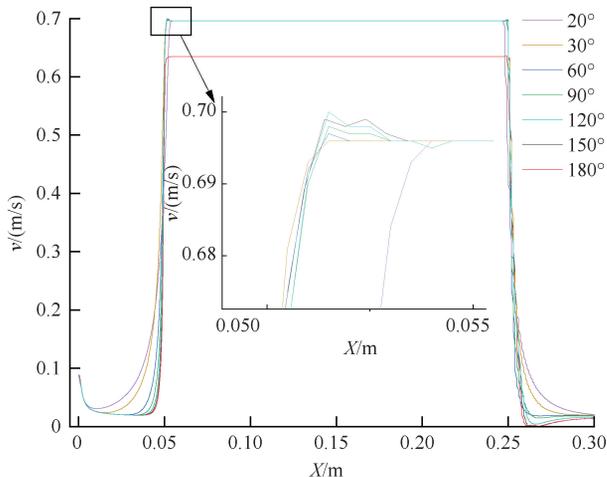


图 4 流道内速度轴向分布

Fig. 4 Axial distribution of velocity in the flow channel

从图 4 中可以看出, 当锥体角度为 180° 时, 即完全无导流结构, 流道内流体尚未达到可测量的层流状态; 随着锥体角度的增加, 流体速度变化越剧烈。当锥体角度为 20° 时, 从湍流发展成层流所需要的长度更长, 因此也会增加整个流量计的长度。局部放大图中可以看出, 流体流速变化在入口处波动相对较大, 而锥体角度为 30° 时, 此时的流速处于一个平稳加速的过程, 此时流体达到层流状态时, 能够在一定程度上减少锥体角度对后面流体状态的影响, 因此设计的流量计锥体角度为 30° , 同时保证前后锥体的角度和尺寸保持一致。

4 试验及结果分析

按照上文的参数制作试验件, 并对其进行了测试, 探究不同间隙下, 流量与差压之间的关系。试验参考了 JJG 736-2012《气体层流流量传感器检定规程》, 试验采用的标准装置为北京中国计量科学研究院设计的一款压力范围为 $(0.1 \sim 0.6)\text{ MPa}$, 流量范围为 $(0.01 \sim 20)\text{ L/min}$, 装置相对拓展不确定度为 $U_{rel} = 0.16\% (k=2)$ 的活塞标准装置。实验装置及流量计实物图如图 5 所示。差压计使用康斯特公司的 ConST221 智能数字差压表, 量程为 $(-100 \sim 400)\text{ kPa}$, 精度为 $\pm 0.05\% \text{ FS}$ 。活塞标准装置内部具有高精度的温度传感器和压力传感器, 可以控制流入试验件气体的温度及质量流量, 在试验件入口端增加一个温度传感器, 将活塞标准装置测得质量流量转化体积流量, 同时利用压力计和差压计测量试验件的绝压及压差。



图 5 实验装置及流量计实物

Fig. 5 Experimental device and flowmeter

试验时采用的气体为干燥空气, 温度为 $21.6\text{ }^\circ\text{C}$, 大气压力为 101.1 kPa 。由于气体具有压缩性, 气体在环形缝隙内流动时密度随着压强变化而变化, 因此体积流量沿着流向是不断变化的, 并且由于试件尺寸不准确等影响因素, 需要在根据公式计算出的体积流量 Q_v' 的基础上, 添加一个流量修正系数 K , 该系数由标定实验确定, 最后工况的体积流量为 $Q_v = K Q_v'$ 。 Q_v 为活塞标准装置测得的流量值, δ 为测量的相对误差, 即 Q_v 和 Q_v' 的相对偏差值, $\delta = (Q_v - Q_v') / Q_v$ 。对 3 个间隙不同的层流元件进

行测试,数据分别列在表2~4,其中 $r_2=9.5\text{ mm}$ 时,系数 $K=2.63$; $r_2=9.3\text{ mm}$ 时,系数 K 为2.33; $r_2=9\text{ mm}$ 时,系数 $K=1.26$ 。

表2 环形间隙式层流元件测试数据($r_2=9.5\text{ mm}$)

Table 2 Test data of annular gap type laminar flow element ($r_2=9.5\text{ mm}$)

$\Delta p/\text{Pa}$	$Q_v'/(mL/min)$	$Q_s/(mL/min)$	$Q_v/(mL/min)$	$\delta/\%$
1.2	19.53	52.98	51.41	2.96
3.0	48.59	130.42	127.94	1.90
8.0	129.97	341.94	342.20	-0.08
11.9	194.87	509.63	513.08	-0.68
17.8	291.58	760.09	767.71	-1.00
27.9	455.73	1 185.95	1 199.92	-1.18
37.6	615.12	1 601.69	1 619.57	-1.12
62.6	1 023.02	2 665.95	2 693.55	-1.04

表3 环形间隙式层流元件测试数据($r_2=9.3\text{ mm}$)

Table 3 Test data of annular gap type laminar flow element ($r_2=9.3\text{ mm}$)

$\Delta p/\text{Pa}$	$Q_v'/(mL/min)$	$Q_s/(mL/min)$	$Q_v/(mL/min)$	$\delta/\%$
1.5	59.04	135.46	137.68	-1.63
4.9	195.67	457.06	456.32	0.16
9.9	392.21	901.36	914.67	-1.48
18.0	714.44	1 650.09	1 666.16	-0.97
25.7	1 024.03	2 384.53	2 388.16	-0.15
35.8	1 422.89	3 338.45	3 318.34	0.60
45.4	1 804.68	4 264.49	4 208.73	1.31
55.1	2 190.77	5 191.01	5 109.12	1.58

表4 环形间隙式层流元件测试数据($r_2=9\text{ mm}$)

Table 4 Test data of annular gap type laminar flow element ($r_2=9\text{ mm}$)

$\Delta p/\text{Pa}$	$Q_v'/(mL/min)$	$Q_s/(mL/min)$	$Q_v/(mL/min)$	$\delta/\%$
1.1	174.58	216.10	220.13	-1.87
2.9	477.82	598.44	602.49	-0.68
5.0	826.68	1 026.95	1 042.37	-1.50
10.0	1 637.70	2 043.77	2 064.99	-1.04
14.8	2 439.06	3 100.37	3 075.43	0.80
19.9	3 262.12	4 152.75	4 113.25	0.95
24.7	4 062.04	5 190.93	5 121.87	1.33
29.4	4 820.64	6 189.61	6 078.40	1.80

由表2可知,整个测量量程比超过50倍,当测量的流量值 Q_v 小于 53 mL/min 时,环形间隙式 LFM 测量总体误差在3%以内;当测量值在 $(130\sim 2\ 665)\text{ mL/min}$ 时,测量误差在 $\pm 3\%$ 以内。表3和4中 LFM 测量误差均小于 $\pm 2\%$ 。在测量数据中微小流量测量的误差较大的主要原因可能是人工读数误差,由于使用的活塞标准装置是被动式,在测量微小流量时可能会存在压强不够的情况,且此时的差压较小,相较于较大差压读数时,其读数误差就

可引起超过1%的测量误差。此外使用的差压计在测量过程中产生的相对测量误差也是误差的来源,受其精度和显示范围波动的影响,在微小流量测量时不可避免的会产生误差。

从表格可以看出,随着锥体半径的减小,其可测量的流量最小值随之增大,可测量的最大值也应随之增大,差压随之减小。需要指出的是,理论上设计出的层流元件的测量范围应比表中给出的范围更大,会有更大的量程比,由于试验过程中使用的是被动式活塞标准装置,测量更大的一些流量点需要更大的压强,会导致不符合气体层流流量传感器检定规程的要求。因此对于更大的流量点的检测需要更换检测的标准装置设备,再进行测量分析。

为了更直观的展示流量和差压之间是否为线性关系,将上表中 Q_v 和 Δp 拟合成一条曲线,如图6所示。

从图6可以得知三种间隙式层流元件的线性拟合优度 R^2 十分优良,可近似看做1,流量和压差保持着良好的线性关系,说明该设计有效的解决了突扩突缩和非线性影响,并且能减少进出口和入口段层流发展段非线性压损,证明了从充分发展成层流中取压这一设计的可行性。与传统毛细管式层流流量计相比,流量和差压之间具有更好的线性关系,并且环形间隙式 LFM 长径比较小,均在200以内,远远小于传统毛细管式 LFM 500~3 000的长径比。理论上能通过改变环形间隙式 LFM 的间隙大小及取压位置等,实现更宽的量程比和更精准的测量范围,更可以据此设计出特定量程范围的流量计。

5 结论

为了克服常规层流流量计在微小气体流量测量时非线性压损的影响,提出了一种环形间隙式的层流元件结构,该结构简单可靠,将取压口置于层流充分发展阶段,避免了流体发展成层流时压损和流道突扩突缩的非线性压损。本文试验的流量计可测量的最小流量值可达到 53 mL/min ,当测量的流量小于 53 mL/min 时,其微小测量误差在3%以内;当测量的流量值在 $(130\sim 6\ 189)\text{ mL/min}$ 时,其流量测量误差均在 $\pm 2\%$ 以内。但是由于装置局限性,试件的最大测量流量值还需具体的其他实验进行测试和展现。

实验说明本文采用的双锥体导流结构设计,能够在一定程度上解决传统 LFM 中非线性因素的影响,且缩短了流量计的长径比,改善了流量计结构,使其便于加工制作固定。不同结构下的环形间隙式层流元件测量微小气体流量时,流量与压差之间均有着优秀的线性度和较高的测量精度,且可以通过改变间隙大小来改变可测量的流量大小,证明本文设计思路及方法基本可行,在层流流

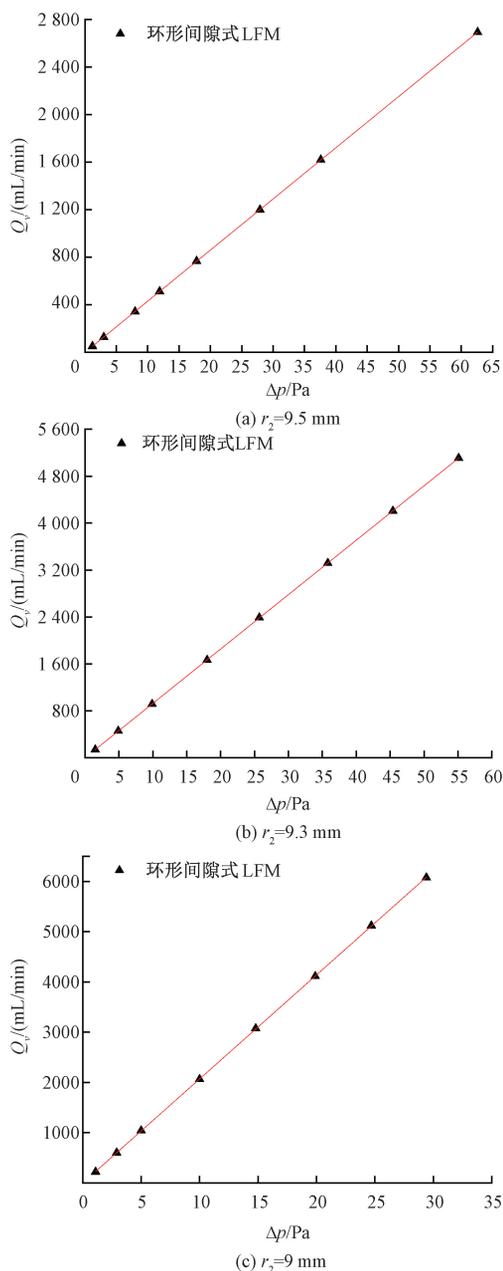


图 6 环形间隙式层流元件流量与压差测试数据
Fig. 6 Flow rate and differential pressure test data of annular gap type laminar flow element

量计和其他相关产品中具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] 张靓, 陆春, 孙国杰, 等. 小微气体流量计量技术的应用[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2022, (2): 15-17.
ZHANG L, LU CH, SUN G J, et al. Application of micro gas flow measurement technology [J]. Instrument Standardization and Metrology, 2022(2): 15-17.
- [2] 陈凡. 基于石墨烯膜的差压式微小流量测量方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.

- CHEN F. Research on differential pressure micro flow measurement method based on graphene membrane [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [3] 朱子孚, 马胜才, 牛航舵, 等. 呼吸机的研制进展[J]. 中国医疗器械杂志, 2021, 45(4): 406-409, 468.
ZHU Z F, MA SH C, NIU H D, et al. Development progress of ventilator [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2021, 45(4): 406-409, 468.
- [4] JAAFAR A, BASIL SH M, RAHEEM A, et al. Laminar flowmeter for mechanical ventilator Manufacturing challenge of Covid-19 pandemic [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 82: 102058.
- [5] 袁琨翔. 热式流量计的误差分析及精度提升方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
YUAN K X. Research on error analysis and precision-promoting method of thermal mass flowmeter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [6] 裴翠萍. 微小流量计的研究与设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2017.
PEI C P. Research and design of the micro flow meter [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017.
- [7] 薛晔, 李晶. 我国微小流量计的发展现状和前景探讨[J]. 自动化仪表, 2016, 37(10): 40-42.
XUE Y, LI J. Exploration on the current developing status and prospects of micro flowmeters in china [J]. Process Automation Instrumentation, 2016, 37(10): 40-42.
- [8] 叶惠传. 气体动态流量测试系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
YE H Z. Research on the gas dynamic flow test system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [9] 陆春, 张靓, 顾斌, 等. 基于层流技术的小微气体流量标准装置应用[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2021(5): 35-37, 48.
LU CH, ZHANG L, GU B, et al. Application of small micro gas flow standard device based on laminar technology [J]. Instrument Standardization and Metrology, 2021(5): 35-37, 48.
- [10] 魏少群, 刘慧平, 黄志凡, 等. 基于层流流量计的多组分气体流量测量与补偿算法研究[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(5): 114-116.
WEI SH Q, LIU H P, HUANG ZH F, et al. Research on multi-component gas flow measurement and compensation algorithm based on laminar flow meter [J]. Metrology and Testing Technology, 2017, 44(5): 14-17.
- [11] 王筱庐, 陈玉春, 蒋翔翔. 基于层流流量计的航发燃油流量动态测量技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2021,

- 42(3): 35-41.
- WANG X L, CHEN Y CH, JIANG Y X. Research on dynamic measurement technology of avionics fuel flow based on laminar flow meter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 35-41.
- [12] 刘臣勇. 气体小流量测试技术研究与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- LIU CH Y. Research an application of small gas flow measurement technology [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017.
- [13] WANG X L, CHEN Y C, JIANG Y X, et al. Rectangle-gap-type laminar flow meter with inward pressure taps[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 79: 101893.
- [14] 王晴晴, 董双双, 李国占, 等. 压力位差式层流流量传感元件数值模拟研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(11): 1587-1593.
- WANG Q Q, DONG SH SH, LI G ZH, et al. Numerical simulation of the laminar flow sensing element of pressure potential differential type[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(11): 1587-1593.
- [15] FENG C C, LIN W T, YANG C T. Laminar flow element type flow meter with straight glass capillary [C]. International Flow Measurement Conference, 2010.
- [16] 王伯年. 史绍熙院士对层流流量计和内燃机空气流量测量的贡献[J]. 内燃机学报, 2001(6): 531-534.
- WANG B N. Contributions on laminar flowmeter and intake flowrate of ICE by academician Shih S H. [J]. Transactions of CSICE, 2001(6): 531-534.
- [17] 王筱庐, 陈玉春, 蒋宇翔, 等. 微小缝隙式层流流量计设计及测量特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 48-54.
- WANG X L, CHEN Y CH, JIANG Y X, et al. Design and measurement characteristic study on micro gap-type laminar flow meter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 48-54.
- [18] 王筱庐, 陈玉春, 蒋宇翔, 等. 小型片式层流流量计研究 [J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(4): 792-796.

WANG X L, CHEN Y CH, JIANG Y X, et al. Study on small laminar flow meters. [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(4): 792-796.

- [19] BERG, ROBERT F. Simple flow meter and viscometer of high accuracy for gases [J]. Metrologia, 2005, 42: 11-23.
- [20] NUSZKOWSKI J, SCHWAMB J, ESPOSITO J. A novel gas divider using nonlinear laminar flow [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2016, 52: 255-260.
- [21] JANUSZ W, CZESLAW O. P. Inherently linear annular-duct-type laminar flowmeter [J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 128: 196-198.

作者简介



陈雨萱, 2017年与中国计量大学现代科技学院计量测试工程学院获得学士学位, 现为中国计量大学研究生, 主要研究方向为流量计量技术。

E-mail: 9225583670@qq.com

Chen Yuxuan, received her B. Sc. degree in 2017 with the School of Metrology and Testing Engineering, Modern Institute of Science and Technology, China University of Metrology. She is now a M. Sc. candidate at China University of Metrology. Her main research interest includes flow measurement technology.



谢代梁(通信作者), 1998年于浙江大学获学士学位, 2005年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学现代科技学院副院长, 教授, 主要研究方向为复杂信号处理、流量计量及流量仪表校准技术、多相流测试技术和微尺度流量测量技术等。

E-mail: dlxie@cjlu.edu.cn

Xie Dailiang (Corresponding author) received B. Sc. from Zhejiang University in 1998, Ph. D. from Zhejiang University in 2005. He is now the director and professor of the Library of China University of Metrology. His main research interests include complex signal processing, flow measurement and flow meter calibration technology, multi-phase flow test technology and micro-scale flow measurement technology.