

# 微流体运动的试验研究\*

江小宁 周兆英 李 勇 叶雄英 杨 岳

(清华大学精密仪器与机械学系,北京 100084)

**摘要** 微流体运动特性研究是微流量控制系统设计和性能完善的基础。本文对微管道流体运动进行了分析,采用液面图像显微观测研制的微流量测量系统可以对微流体运动的有关参数进行方便、较精确的测量。进行了以去离子水和直径为  $\varphi 24 \sim 8 \mu\text{m}$  直圆管为对象的试验,并对试验结果进行了分析。

**关键词:** 微型机械;微流体;微管道;流量测量

## 1 引 言

微型机械作为一新的研究领域,相对其基础技术开发,其基础理论研究尚不成熟。当物体的微小化达到1毫米以下的尺寸领域时,支配物体运动的物理环境及其自身的一些特性发生变化,因此尺寸效应是微型机械需要首先解决的问题。比如,通过初步的尺寸分析可知,与尺寸成低次方比例关系的驱动力适于微致动<sup>[1]</sup>等。对包括微管道、微阀、微流量计、微泵等元件的微量流体控制系统的研究近几年已成为微机械研究的热点之一,随着流路尺寸的减小,流体的运动、力学特性如何改变,如粘性阻力、气泡对微管道流体运动的影响等<sup>[2]</sup>,这在微量流体控制系统的设计中是必须知道的。因此,考察微流体运动对于微量流体控制系统的研究确有必要。

在最近关于微流体的研究中,J. Pfahter 等人考察了利用硅微加工技术制作的矩形微管道中流体的运动特性<sup>[3]</sup>。初步试验结果表明,在断面尺寸相对较大的微管道中,流体的运动规律基本与 Navier-stokes 方程式吻合;而在管道深度小至  $0.8 \mu\text{m}$  时试验观测结果偏离 N-S 方程式的计算值。牧原光宏等人以圆管道为对象,试验考察了 N-S 方程式描述微管道流动的适用性<sup>[4]</sup>,实验结果表明,对于运动粘度  $2.6 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  的硅油,管径直至  $\varphi 4.5 \mu\text{m}$ ;对于管径  $\varphi 11.2 \mu\text{m}$ ,粘度直至  $4.3 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ ,流量与压损成比例关系。

本文在文献[5]、[6]的基础上对微管道流体的运动情况进一步进行了分析,应用所研制的基于图像处理技术的微流量自动测量系统,以去离子水(运动粘度  $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ )与  $\varphi 24 \sim 8 \mu\text{m}$  的圆玻璃管道为对象,进行了微管道流体运动特性的测量试验与讨论。

\* 国家自然科学基金重点基金(No. 59235110)资助项目。

收稿日期:1994年11月5日

## 2 微管道流体运动分析

### 2.1 流体的尺寸效应

#### 2.1.1 雷诺数

流体的流动状态一般可以利用雷诺数的值判别,雷诺数由下式表示:

$$Re = vL/\nu \quad (1)$$

这里  $v$ : 流速,  $L$ : 流管的特征尺寸,  $\nu$ : 流体的运动粘度。微管道由于其特征尺寸  $L$  微小, 从而  $Re$  植极小, 因此可认为微管道中的流体处于层流状态。同时, 由于流体的体积、质量  $L^3$ , 表面积与  $L^2$  成正比, 流路表面的影响相对地增强。  $Re$  又代表惯性力与粘性力之比, 因而随尺寸减小粘性力的影响变强。

#### 2.1.2 表面张力

表面张力当管径微小时对流体的运动有重要影响, 在直圆管内所产生的压力差可表示为:

$$\Delta p_s = 2\sigma \cos\theta / r \quad (2)$$

其中,  $\sigma$ : 表面张力系数 ( $\sigma_{\text{水}} = 73 \times 10^{-3} \text{N/m}$ ),  $r$ : 圆管半径,  $\theta$ : 液面与管壁的接触角。当管径小至  $\varphi 10 \mu\text{m}$  时,  $\Delta P_s$  可高达  $29 \text{kPa}$ 。

### 2.2 管流运动方程

一般, 不可压缩流体的流动可用如下形式的 Navier-Stokes (N-S) 方程描述:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 v_x \\ \frac{dv_y}{dt} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v_y \\ \frac{dv_z}{dt} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 v_z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中:  $v_x, v_y, v_z$  表示流体在单位位置处的  $x, y, z$  方向的速度分量;  $X, Y, Z$  分别为  $x, y, z$  方向的单位质量力分量,  $p$  为表面压力,  $\rho$  和  $\nu$  分别为流体的密度和运动粘度。式(3)左边表示单位质量惯性力, 右边第一、二、三项依次表示单位质量力(一般为重力场加速度), 单位质量的表面压力, 单位质量的粘性阻力。

当流体在圆直管道中处于稳定层流状态时, 由 N-S 方程可推出描述管流阻力与流量关系的 Hagen-Poiseuille 公式:

$$\text{流量} \quad Q = \frac{\pi r^4}{8\mu l} \Delta p \quad (4)$$

或沿程压力损失

$$\left. \begin{aligned} \Delta p &= \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \\ \lambda &= 64/Re \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中,  $\lambda$ : 沿程阻力系数,  $\mu$ : 流体动力粘度,  $\rho$ : 流体密度,  $d, l$ : 管径、管长。

在微量流体运动中, 由于尺寸效应, 表面效应将增强, 粘性阻力受流路边界条件影响变大,

而惯性力变得相对次要。尽管对微管道流体运动已有部分试验研究结果发表,利用式(3)~(5)能否确切表述微流体的运动规律尚未有定论。

### 3 微流量测量系统

作者针对微量流体运动具有流体流量、运动空间微小等特点研制了适于微量流体运动的微流量自动测量系统。

#### 3.1 测量系统的组成

图1为微流量测量系统结构图。气泵注入的压缩气体在压力腔内形成的压力经压力腔、软管、传至压力室。测量软件包括压力测量、CCD定标、流速测量等。压力测量完成压力传感器信号的采集、处理;CCD定标是在不同的显微镜放大倍数下 CCD图像中每个象素所代表的长度;流速测量是通过采集、处理标准管中的液面图像而获得微流体的运动速度。

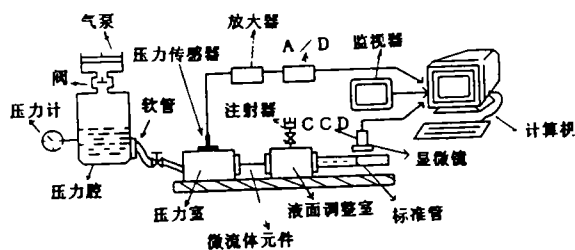


图1 微流量测量系统结构

#### 3.2 测量系统工作原理

压力的测量由压力传感器来完成。测量系统使用传感器的量程为 0.25Mpa,对应放大电路的输出电压为 4~5V。

在某一压力作用下,流体(不可压缩)经过微流体元件进入标准管,记录标准管内液面位置的移动量及相应的时间间隔,便得到流体流过微流体元件的流速(容积/秒)。

图2为标准管液面图像示意图。图中实弧线表示液面位置A,虚弧线表示经过时间t后的位置B。为了提高图像处理速度,边界提取算法不对整幅图像而只对横坐标从  $X_1$  到  $X_2$  的  $N$  条直线(虚线表示)进行边界提取,以获得图像在位置 A、B 各  $N$  个边界点的横向坐标(以像素数表示)  $x(i, 0), x(i, 1) (i=1, \dots, N)$ 。首先取第  $i$  条直线上各点左右  $M$  个点的灰度梯度的均值作为该点的灰度梯度:

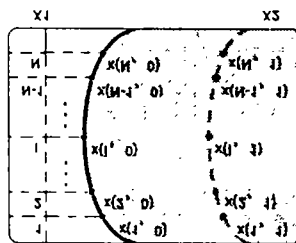


图2 标准管液面图像示意图

$$dgray(j) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M [gray(i, j+k) - gray(i, j-k)] \quad (6)$$

式中  $gray(j)$  表示第  $i$  条直线上  $j$  点的灰度值,将  $dgray(i, j)$  与设定的灰度梯度阈值比较,超过阈值的点即为边界点。在边界提取过程中  $N, M$  及梯度阈值的选取要视图像质量而定。由此,标准管内液面移动速度(米/秒)为:

$$V_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ |x(i, 1) - x(i, 0)| \frac{SCALE}{t} \} \quad (7)$$

式中 SCALE 为显微镜某一放大倍数下 CCD 图像中每个象素所代表的长度,  $t$  表示相应的时间间隔。则相应的微管道内流体运动的流量为  $V_s$  与标准管截面积的乘积。

## 4 微管道流体试验

用上述微流量自动测量系统考察流体在  $\varphi 24\mu\text{m} \sim \varphi 8\mu\text{m}$  圆直微管道内作稳定流动时方程 (3)~(5) 的适用性。

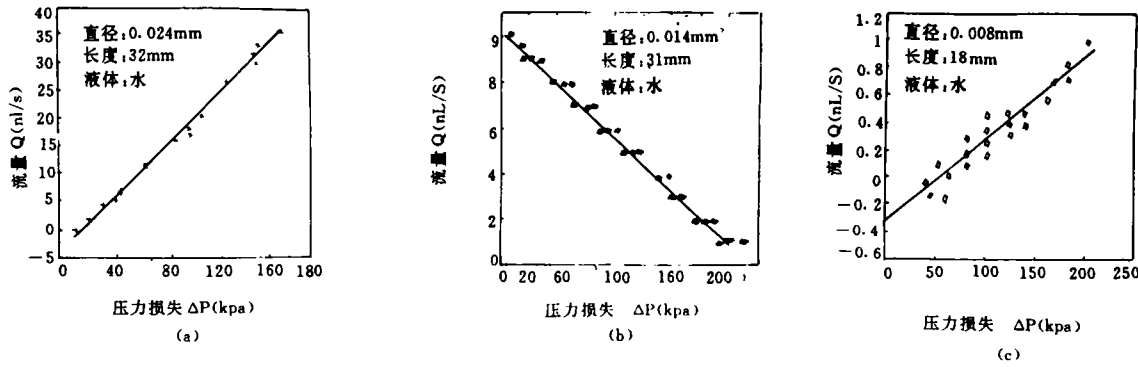


图3 微管道内流体运动压差—流量关系

试验压力范围为  $0 \sim 25\text{kPa}$ , 标准管内径为  $\varphi 1.25\text{mm}$ , 显微镜放大倍数为  $\times 10$ , CCD 图像中每个象素代表的距离为  $0.8552\mu\text{m}$ , 试验测量  $\varphi 24\mu\text{m}$ 、 $\varphi 14\mu\text{m}$  和  $\varphi 8\mu\text{m}$  管道内流体运动的压力—流速特性分别如图 3 中 (a)、(b)、(c) 所示。图中直线为试验数据拟合直线。

由于微管道截面圆度欠佳及微管道直长测量有一定误差, 因此流速的测量值与理论值有偏差。但这不影响考察流量—压力的线性关系。从图中可以看出所测管道内流体运动的压力—流量特性曲线的线性较好, 这与 Hagen-Poiseuille 方程的描述是一致的。试验中发现微管道直径的测量误差是产生试验误差的主要因素, 而且管道越微小, 管径测量误差引起的试验误差越大。此外, 影响试验精度的因素还有: A/D 转换的量化误差、压力的不稳定、部分压力损失的忽略、边界辨识误差、液体的蒸发、气泡的影响及外界干扰等。这些误差可以通过估算与试验进行补偿, 从而使整个测量系统的精度保持在要求范围。

## 5 结 论

考察微流体运动特性对微量流体控制系统的设计与完善具有重要意义。本文对微量流体运动中的尺寸效应、运动方程进行了分析; 试验表明, 在较低压力范围内, 直径小至几微米的微直圆管道中流体的流量与压差仍呈线性关系, 这与 Navier-Stokes 方程式的描述十分相近; 开发的微流量测量系统可实现对微管道、微阀、微泵等微流体元件和微量流体控制系统的流体运动特性的测量, 也可实现对微流量传感器的标定, 测量简单、可靠。

## 参 考 文 献

- [1] 江小宁,周兆英,李勇,叶雄鹰,微致动技术. 中国仪器仪表,1993,(2):10-14
- [2] P. Gravesen, J. Branebjerg and O. S. Jensen, Microfluidics—a Review Journal of Micromechanics and Microengineering,1993,3:168-182
- [3] J. Pfahler, J. Harley and H. Bau, Liquid Transport in Micron and Submicron Channels. Sensors and Actuators,1990,A21-A23:431-434
- [4] 牧原光宏,竺仓久仁彦,永山昭,微小管における液体の流れ-Navier Stokes 方程式の適用性に関する考察. 精密工学会誌,1993,59(3):389-404
- [5] 李勇,江小宁,周兆英,叶雄鹰,微管道流体的流动特性. 中国机械工程,1994,5(3):24-25
- [6] Jiang Xiaoning, Li Yong, Zhou Zhaoying and Ye Xiongying, Experimental Study on Flow Behaviour of Fluid in Micro-Pipe. Proceedings of International Symposium on Manufacturing Science and Technology for the 21th Century (MST'94), Beijing China, July3-5, 1994:118-122

## Study on Microfluid Flow Behaviour

Jiang Xiaoning, Zhou Zhaoying, Li Yong, Ye Xiongying and Yang Yue

(Dept. of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 10084)

## Abstract

It is important to study microfluid flow behaviour in microfluid control system. First, fluid flow in microchannel is discussed in the paper, and a microfluid measuring system which used the method of observing the surface image of fluid under microscope is then developed, which can measure some parameters related to microfluid flowing simply and precisely. Experiments on fluid flow in straight circular micro pipe of diameter  $24 \sim 8 \mu\text{m}$  using deionized water are presented here, the results are discussed at last.

**Key words:** Micromechanics, Microfluid, Microchannel, Flow rate measurement