

# 长微直管内气体低速流动的亚堵塞现象<sup>\*</sup>

丁英涛 何 枫 姚朝晖<sup>†</sup> 沈孟育 王学芳

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

(2003 年 11 月 5 日收到 2004 年 2 月 20 日收到修改稿)

长微直管道内多流态并存的流动特性研究不仅有理论意义, 而且在太空飞行器的控制系统中有着重要的应用价值。采用实验研究和理论模型近似分析相结合的方法研究了长微直管道内的气体流动特性。实验中, 以空气为工作介质, 进口压力分别设定为 130, 250, 320 kPa, 出口压力变化范围为 9—100 kPa, 沿程分布有五个测压点, 进出口设有温度传感器, 测量出口流量的同时可以得到沿程压力分布。近似理论模型采用二维平板近似模型。研究发现, 在保持进口压力不变、不断降低出口压力的条件下, 当进出口压比低于 5.3 左右时, 质量流量随压比增加而增加; 当进出口压比高于 5.3 左右后, 微管道内流动的质量流量随压比的增加变化很小, 基本上趋近于某个常数, 并且出口处的压力扰动波很难向上游传播。将此现象定义为亚堵塞现象, 并将发生该现象时对应的进出口压比定义为亚堵塞临界压比。同时进一步研究了亚堵塞现象与  $S/V$  (表面积与体积比) 值之间的关系。

关键词: 长微直管道, 亚堵塞, 表面积与体积比, 多流态并存, 临界压比

PACC: 0340, 0710C, 4760

## 1. 引言

随着现代科学技术的进步, 微电子机械系统 (MEMS)<sup>[1-3]</sup> 已经被广泛地应用于工业、生物工程和信息技术等多个领域<sup>[4,5]</sup>, 所以 MEMS 的研究尤其是关于微米尺度管道的基本流动特性<sup>[6-8]</sup> 研究成为一个热点。例如长微直管内低速流动研究、多流态并存等物理现象研究等。长微直管道内多流态并存的流动特性研究不仅有理论意义, 而且在太空飞行器的控制系统中有着重要的应用价值。对于压力驱动的长微直管道内的气体流动而言, 沿流动方向, 压力、密度不断下降而速度、马赫数  $Ma$  和克努森数  $Kn$  不断提高。随着密度的降低, 分子平均程提高, 克努森数相应地提高, 同一条长微直管道内部由于克努森数的不断提高将可能出现多种流态(即连续流、滑移流、过渡流、自由分子流等)同时存在的现象。对于微直管内气体各种单流态流动特性的研究, 先后有不同的研究者<sup>[9-11]</sup> 通过实验和理论模型近似分析等手段分别进行了研究, 研究重点主要涉及到摩擦阻力特性、提前转捩、压缩性与稀薄性等方面。已有实验研究中对于多流态同时并存的流动特性研究还鲜有

报道。由于微管道的制作、加工及测量有较大的难度, 所以大多数人的实验研究仅仅局限于测量微管道进出口的压力、温度、出口流量等参数, 流场内部的特征量较难测到, 所以实验得到的数据量很有限。直到 1994 年 Ho<sup>[10]</sup> 等利用 MEMS 技术加工了沿程分布有 14 个压力传感器的微直管道, 实验的数据量丰富了许多。其研究的微直管的长度为 4.5 mm, 宽度为 40  $\mu\text{m}$ , 深度为 1.2  $\mu\text{m}$ , 以气体为工作介质, 出口压力设定为一个大气压, 进出口压比低于 4.0, 测量得到微管道内沿程压力分布呈现非线性。受进出口压力条件的限制, 微管道内流动出现连续流、滑移流、过渡流并存的现象很难实现。与实验结果进行对比的近似理论模型多采用二维平板的近似理论模型<sup>[12-14]</sup>, 该模型基于二维 N-S 方程, 采用不同的速度滑移边界条件<sup>[7]</sup> (无滑移、一阶滑移、二阶滑移) 得到微管道内质量流量与进出口压比之间的关系。

上述不同的研究者大多是对微直管内气体各种单流态流动特性进行了研究。本文采用硅微加工技术在硅片上制作出矩形截面、沿程分布有测压点的长微直管道, 对其进行了以空气为介质的多流态并存实验研究。微管道长度为 39.9 mm, 宽度为 1000  $\mu\text{m}$ , 深度为 7  $\mu\text{m}$ , 出口压力设定低于一个大气压, 固

\* 国家自然科学基金(批准号: 10272066)资助的课题。

† 通讯联系人, yaozh@tsinghua.edu.cn

定进口压力,通过不断降低出口压力,测量出口处的体积流量的同时测量得到沿程压力分布。对实验数据的整理分析发现了区别于常规流动的特殊亚堵塞现象,即当进出口压比达到某一临界值后,随进出口压比的增加,质量流量变化不大,并且出口处的压力扰动波很难向上游传播,而此时对应的出口马赫数却较低。

## 2. 实验研究及结果分析

实验用微管道几何形状尺寸示意图见图1,微管道长度为39.9 mm,宽度为1000  $\mu\text{m}$ ,深度为7  $\mu\text{m}$ ,截面形状为矩形,沿程分布测压点。微管道的制作工艺需要两次掩模方可实现。所用材料包括一片350  $\mu\text{m}$  厚的双抛硅片和一片耐热玻璃。首先,在硅片上生长200 nm的氧化硅,该层为去应力层。紧接着利用低温化学气相淀积工艺在氧化硅上再次生长200—250 nm的氮化硅,由于氮化硅在KOH溶液中腐蚀速率较低,所以通常把这层氮化硅作为体硅腐蚀阻挡层。第一次光刻后,用ICP干法刻蚀工艺在硅片正面形成微管道的主体。第二次光刻后,用KOH各向异性腐蚀工艺在硅片背面形成微管道的进出口。最后,利用阳极键合工艺<sup>[15]</sup>将硅片与Pyrex玻璃键合实现整体的封装。经扫描电子显微镜、激光表面干涉显微镜(WYKO)和台阶仪(Alpha Step)等设备精确测量得到微管道的几何尺寸和相对表面粗糙度<sup>[16]</sup>。几何尺寸的测量误差约为 $\pm 0.1\%$ ,相对粗糙度约为1%,基本上可认为是光滑管。

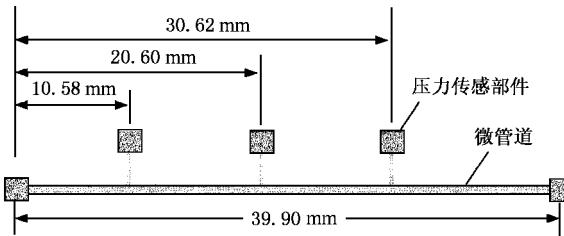


图1 长微直管道几何尺寸示意图

实验装置见图2。为实验提供气源的是空气压缩机,被测微管道沿程分布有五个测压点,进出口设有测温点,出口联有真空泵以实现出口压力低于大气压的实验工况。沿程五点稳态压力测量由美国Scanivalve公司生产的高精度电子压力扫描仪Hyscan设备实现,测温采用铜-康铜热电偶,热电偶输出的毫伏电压由电位差计实时记录。

在给定进口总压、进口总温和出口压力的条件下,测量出口处的体积流量和沿程压力分布。由于在等温条件下,表征气体流动特性的重要参数 $Kn$ 与压力 $p$ 成反比,所以可通过调节进出口的压力值,实现等截面长微直管内气体多流态并存的研究。

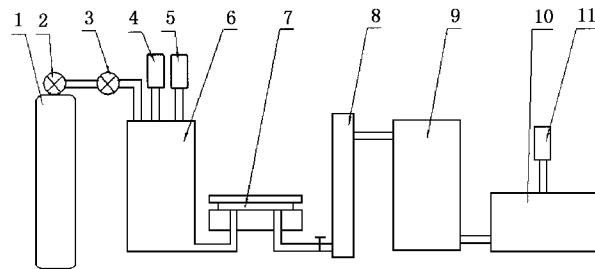


图2 实验装置图 1气源,2调压阀,3调压阀与过滤器组件,4压力计,5温度计,6稳压罐,7被测微管道组件,8流量测量装置,9稳压罐,10真空泵,11真空压力计

保持三个不同的进口压力(130, 250, 320 kPa)不变,通过调节出口压力(由100 kPa逐渐降低为9 kPa)得到不同进出口压比条件下的质量流量和沿程压力分布。图3是进出口压比与质量流量的关系曲线。图4是沿程压力分布曲线。

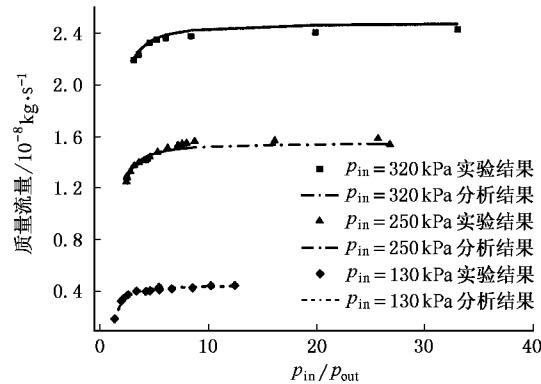


图3 进出口压比与质量流量关系的实验结果和分析结果对比

从图3的实验数据可以看出,当进出口压比低于某一临界值时,随着压比的增加微管道内流动的质量流量不断增加;当进出口压比高于该临界值,微管道内流动的质量流量随压比的增加变化很小,基本上趋近于某个常数。

从图4的实验数据可以看出,当进出口压比低于某一临界值时,在进口压力保持不变的条件下,随着出口压力的降低,即进出口压比增大,沿程压力分布有明显差别;当进出口压比高于临界值时,在进口压力保持不变的条件下,尽管出口压力不断降低,进

出口压比不断增加,沿程压力分布只在出口附近略有变化,亦即出口处的压力扰动很难向上游传播。例如图4(b)中,保持进口压力为250 kPa不变,尽管进出口压比由5.32变化到26.88,但实验数据发现沿程压力分布只在出口附近略有变化。

从图3和图4均可发现,在保持进口压力不变的条件下改变出口压力,当进出口压比达到某一临界值时,微管道内质量流量随压比增加变化很小,并且出口处的压力扰动无法向上游传播。此时对应的

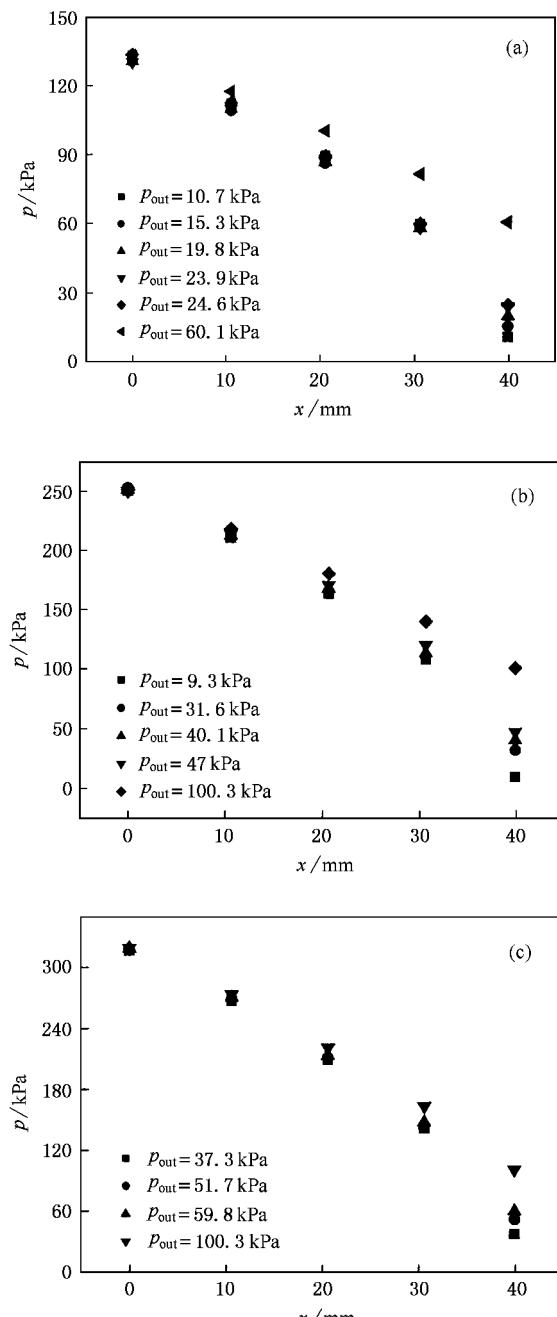


图4 沿程压力分布曲线 (a)进口压力为130 kPa (b)进口压力为250 kPa (c)进口压力为320 kPa

相关流动参数见表1。

表1 质量流量和沿程压力分布特性发生明显改变时对应的流动参数

$p_{in}/kPa$	$p_{in}/p_{out}$	$Kn_{out}$	$Ma_{out}$	$Re$
130	5.29	0.038	0.0062	1.304
250	5.33	0.02	0.011	0.815
320	5.33	0.0158	0.0139	0.239

从表1可以看出,对于实验设定的三个不同的进口压力工况,流动特性发生变化时,对应的进出口压比约为5.3,对应的出口马赫数和流动的雷诺数都很小,出口处维持低速流动,而出口克努森数较大,流动已进入滑移区。

通过上述实验研究,我们发现在如此低的马赫数下,微管道内流动的质量流量开始表现出不随进出口压比增加而增加的状态,并且沿程压力分布只在出口附近有变化。而常规尺度管道,在出口马赫数等于1.0时才会出现质量流量不随压比增加而增加的状态<sup>[17]</sup>。长直微管道中出现的这两个异常现象主要被归结为表面效应,由于微管道具有较大的表面积与体积之比值( $S/V$ ),所以基于近似理论模型来分析 $S/V$ 值对它们的影响。

### 3. 近似理论分析及亚堵塞

在分析实验结果时,发现了一个有别于常规尺度管道内流动特性的特异现象:在保持进口压力不变的条件下,当进出口压比高于5.3后,尽管出口马赫数很小,但微管道内流动的质量流量开始表现出随进出口压比增加而变化很小的现象。采用近似理论模型来分析这种特异现象。由于实验用微管道的深宽比(0.007)较小,所以近似理论模型采用Arkilic等<sup>[12]</sup>提出的二维平板近似理论模型。不失一般性,取 $\sigma_v = 1$ 时,该近似理论模型如下:

$$\dot{M} = \frac{wH^3 p_{in}^2}{24\mu R T L} \left[ \left( 1 - \frac{1}{\Pi_i^2} \right) + \frac{12Kn_{out} p_{out}}{p_{in}} \left( 1 - \frac{1}{\Pi_i} \right) \right], \quad (1)$$

式中

$$\Pi_i = \frac{p_{in}}{p_{out}}, \quad Kn_{out} p_{out} = \frac{\mu}{H} \sqrt{\frac{\pi R T}{2}}.$$

应当指出(1)式的适用范围为 $Kn < 0.1$ 。首先将实验结果与近似理论模型得到的分析结果进行对比(见图3),两者符合较好。

从(1)式可以看出,在保持进口压力不变的条件

下,质量流量将随出口压力的降低而升高.而另一方面,Tison<sup>[18]</sup>的实验数据表明:当流动处于过渡流和自由分子流区域时,即 $Kn > 0.1$ ,随进出口压差的增加,质量流量将下降.综上所述可知:当 $p_{out}$ 下降到使 $Kn_{out} = 0.1$ 时,质量流量将达到最大值.为此,本文定义当 $Kn_{out} = 0.1$ 时,质量流量的值为最大质量流量,即 $(\dot{M})_{max}$ ,而将质量流量 $\dot{M}$ 在与 $(\dot{M})_{max}$ 之间的变化率小于5%的状态定义为亚堵塞状态,将质量流量达到95% $(\dot{M})_{max}$ 时对应的进出口压比定义为亚堵塞临界压比,即 $(\frac{p_{in}}{p_{out}})_{sc}$ .基于近似理论模型即(1)式,来分析亚堵塞临界压比与 $S/V$ 值的关系.

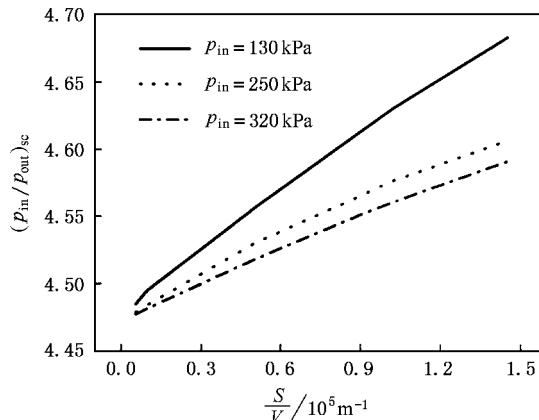


图5 亚堵塞临界压比 $(\frac{p_{in}}{p_{out}})_{sc}$ 与 $S/V$ 之间的关系曲线

图5为在不同 $S/V$ 值时对应三个不同进口压力下的亚堵塞临界压比 $(\frac{p_{in}}{p_{out}})_{sc}$ 随 $S/V$ 值变化的曲线.

从图5可以清楚地看出,对应三个不同的进口压力,随着 $S/V$ 值的增大,微管道内流动的亚堵塞临界压比 $(\frac{p_{in}}{p_{out}})_{sc}$ 值都增大.由上述分析知,这个特异现象也是微管道内流动表面效应的一种反映.

#### 4. 结 论

利用硅微加工技术在硅片上加工出沿程分布有测压点的矩形截面的长直微管道,并对该微管道中的空气流动进行了实验研究.实验中,出口压力低于一个大气压,调节进出口压力得到进出口压比和出口体积流量之间的关系.与此同时,测量得到沿程压强分布以及进出口处的温度值.由于出口压力低于一个大气压,所以可实现微管道内多流态并存的流动.实验结果表明:分别保持进口压力130,250,320 kPa不变,降低出口压力,当进出口压比高于5.3左右后,微管道内流动呈现出亚堵塞现象,此时对应的出口马赫数很低( $Ma < 0.015$ ).在近似理论模型得到的分析结果与实验结果较为一致的基础上,分析近似理论模型发现随着 $S/V$ 值的增大,微管道内流动的亚堵塞临界压比增大.

- [1] He D Y 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 779 (in Chinese) [贺德衍 2001 物理学报 **50** 779]
- [2] Ho C M, Tai Y C 1996 *J. Fluids Engin.* **118** 437
- [3] Yu X M, Jiang X S 2001 *Chin. Phys.* **10** 918
- [4] Mohamed G H 1999 *J. Fluids Engin.* **121** 5
- [5] Cui D F 2001 *J. Mech. Stren.* **23** 471 (in Chinese) [崔大付 2001 机械强度 **23** 471]
- [6] Harley J, Bau H, Zemel J N 1989 *Proc. IEEE MEMS* (Salt Lake City: IEEE) p25
- [7] Beskok A, Karniadakis G E, Trimmer W 1996 *Trans. ASME* **118** 448
- [8] Yao Z H, Yoder G L et al 2002 *Chin. Phys.* **11** 226
- [9] Choi S B, Barron R F, Warrington R O 1991 *ASME DSC* **32** 123
- [10] Pong K, Ho C, Liu J 1994 *ASME FED* **197** 51
- [11] Arkilic E B, Schmidt M A, Breuer K S 1997 *J. MEMS* **6** 167
- [12] Arkilic E, Schmidt M, Breuer K 1994 *ASME FED* **197** 57
- [13] Zhao X P, Gao D J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1115 (in Chinese) [赵晓鹏、郭丹军 2001 物理学报 **50** 1115]
- [14] Gao X Y, Zhao X P, Zheng C Q 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 272 (in Chinese) [高向阳、赵晓鹏、郑长卿 2000 物理学报 **49** 272]
- [15] Lee T, Lee D, Liaw C et al 2000 *Sensors and Actuators A* **86** 103
- [16] Ding Y T, Yao Z H, Shen M Y 2002 *Chin. Phys.* **11** 869
- [17] White F M 2001 *Fluid Mechanics* (New York: McGraw-Hill)
- [18] Tison S 1993 *Vacuum* **44** 1171

# Sub-choking phenomenon of low-speed gas flow in a long-constant-area microchannel<sup>\*</sup>

Ding Ying-Tao He Feng Yao Zhao-Hui Shen Meng-Yu Wang Xue-Fang

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 5 November 2003; revised manuscript received 20 February 2004)

## Abstract

The study on gas flow characteristics in a long-constant-area microchannel in mixed  $Kn$ -regime flows has not only theoretical meaning, but also important application in controlling the system of outer space aerocrafts. Flow characteristics were studied based on experiments and approximate theoretical analysis. The inlet pressure was 130, 250 and 320 kPa, and the outlet pressure ranged from 9 to 100 kPa. Five pressure measuring points were distributed along the microchannel and the temperature sensors were located at the inlet and outlet. The pressure distribution and the volume flow rate of air were measured experimentally. An approximate theoretical model based on Poiseuille flow was adopted. Experimental investigations with the long-constant-area microchannel indicate that the mass flow rate through the microchannel changes little as the inlet-to-outlet pressure ratio reaches a certain critical value. The phenomenon is defined as sub-choking and the corresponding pressure ratio is defined as the sub-choking-critical-pressure-ratio. The phenomenon of sub-choking is due to the surface effects. Moreover, the effects of the ratio of surface to volume on the critical pressure ratio are studied.

**Keywords** : long-constant-area microchannel, sub-choking, surface-to-volume ratio, multi-regime mixing, critical pressure ratio

**PACC** : 0340, 0710C, 4760

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10272066).