

应用二维频移 LDV 测量多孔板管流的湍流特性*

沈熊 张松 刘霄峰

(清华大学, 北京, 100084)

摘要 采用二维 LDV 系统对圆管中装有四孔板和三孔板的湍流特性进行了实验研究. 在孔板下游射流沿管轴逐渐混合. 沿管壁可以观察到反向流区域. 经足够长距离后, 轴向和切向湍流速度逐渐趋于相同数量级. 实验结果表明, 孔板结构和开孔度对湍流特性有重要影响.

关键词 多孔板, 管流, 激光测速.

1 引言

在实际工程应用中多孔板作为流动控制装置用得很多. 已有一些关于多孔板流动特性的研究报道. Sahin^[1~3]和 Ward - Smith 等曾经对用于静电除尘器中广角扩压器的多孔板效应进行过广泛的研究, 包括其压力分布和速度剖面. 孔度比为 50 %. 测量是用 5 孔探针获得的. 采用的孔板孔径大约是管道当量直径的 0.8 %.

Laws 和 Guazanne^[4]详细测量了流经叶轮和一个具有 50 %孔度比的 Laws 多孔板装置的流动, 他用了一个 27 根管子的皮托排. 多孔板孔径为 0.16 倍孔板直径. Laws 和 Quazanne^[5]还研究了分级多孔板深度对 Zanker 流动准直器性能的影响. 有关孔径和开孔度之间的关系可以在 ISO 5167^[6]中找到. 有关化工反应塔中采用多孔板系列的性能研究也可在文献中见到^[7].

虽然多孔板流动的研究很多, 但是它们的结构却各不相同, 而且尚未见到具有低开孔度和高孔径比的孔板结构, 这类装置对于流动控制有潜在的应用价值. 本文的目的是应用二维激光多普勒测速系统, 研究具有 10 %开孔度和 0.18 孔径比的水管流动, 以期对多孔板的流动特性有更深入的了解.

2 实验装置

实验是在一循环水管系统中进行的. 图 1 是装置示意图. 测试段为内径 $D = 103\text{mm}$ 的有机玻璃管. 为了降低圆管壁面折射率的影响, 在外面安装了一个方形水匣.

* 本文于 1996 年 1 月 17 日收到第 1 次稿, 1997 年 1 月 17 日收到修改稿

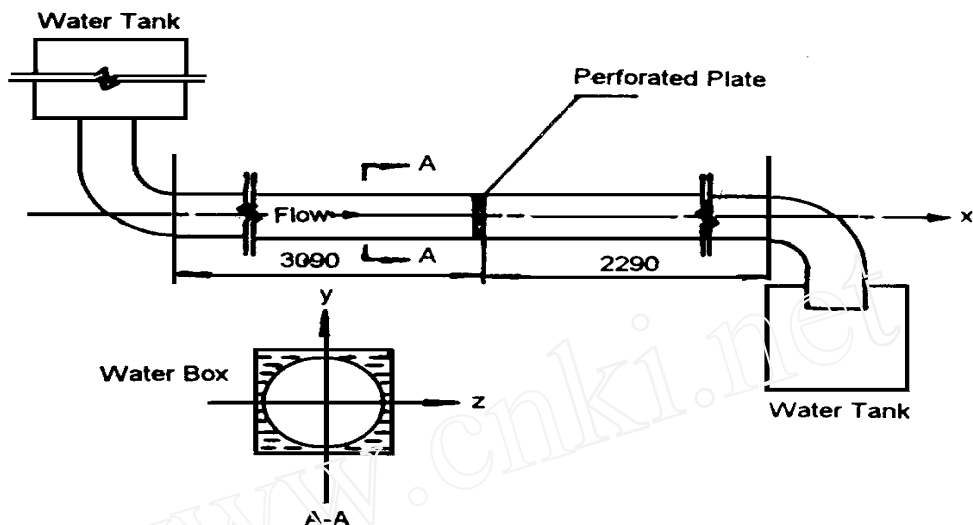


图1 循环水管试验装置

采用了两种多孔板结构,一种是三孔布置,另一种是四孔布置,孔径 $d = 18.5\text{mm}$,孔板厚度 $t = 15\text{mm}$ 。具体的孔板尺寸见图2。对应于四孔板的开孔度为 12.9% ,三孔板的开孔度为 9.7% 。孔板的前后缘均为 90° 。孔板安装在离直管进口 30 倍直径处,以消除进口弯头的扰动影响。

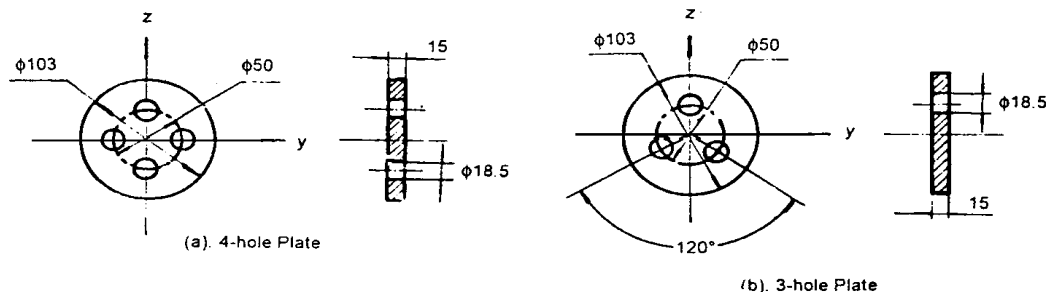


图2 三孔板和四孔板结构

一台 SCD - 2 型双差动声光频移二维激光多普勒测速仪用来测量管流轴向和切向二维速度分量。该系统包括一台 20mW He - Ne 激光器、三光束二维频移入射光单元,偏振分离二维接收光单元以及两台 TSI - 1980B 计数式信号处理器和 PC - 386 数据采集处理系统。整个仪器的光学系统安装在一台四自由度坐标架上,便于测量流场的速度剖面。二维 LDV 系统的布置见图3所示。

为了测得流场的速度剖面,在圆管条件下,由于管壁曲率的影响,测点只能沿着圆管水平子午面移动。三束入射光应布置呈等腰直角三角形,并分别与水平子午面对称,因为只有满足这种条件,才能保证当测点沿水平方向移动时,三光束始终交于一点。

多孔板流动中存在着复杂的回流现象,因此,流速的方向判别十分重要。采用声光调制双差动光混频技术,可以直接从光检测器获得 4.5kHz 至 7.5MHz 的频移量。这不仅简化了频移系统,还能有效提高信噪比。

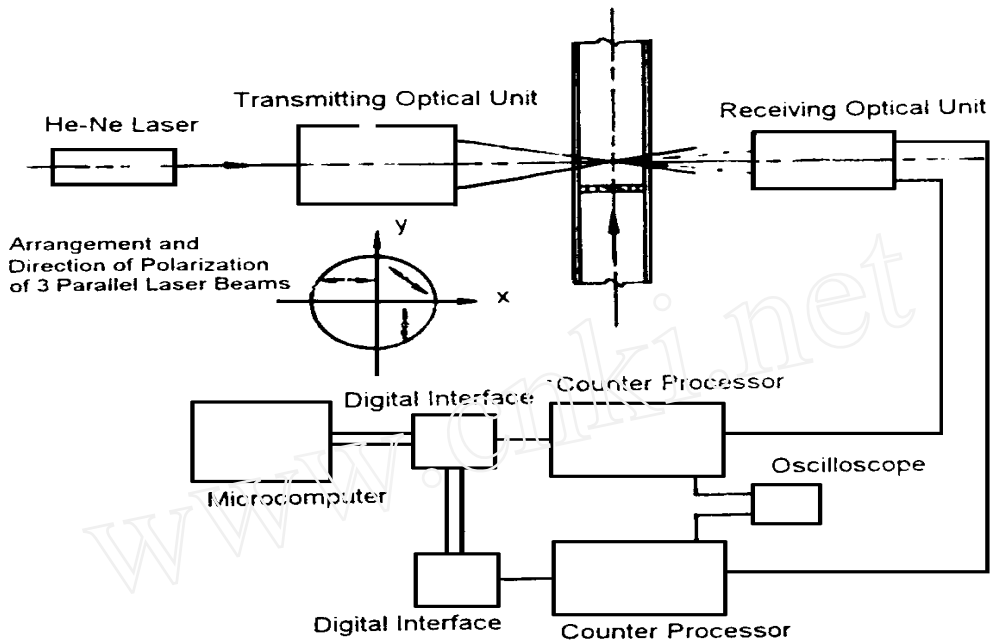


图3 二维频移 LDV 系统布置

采用具有扩束比为 1.9 的扩束器,可提高空间测量分辨率和信噪比,得到的深测体直径为 0.18mm,长度为 2.53mm,干涉条纹间距为 4.44 μ m。

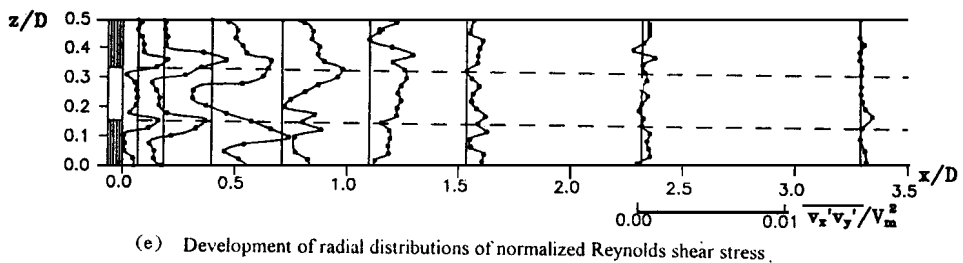
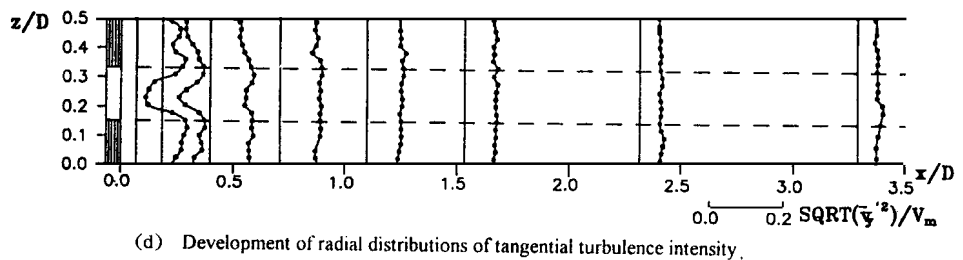
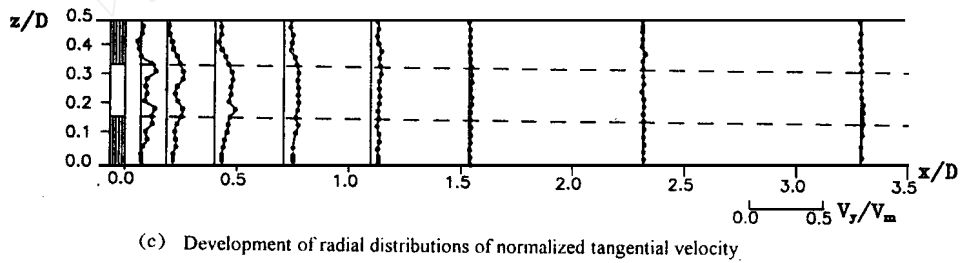
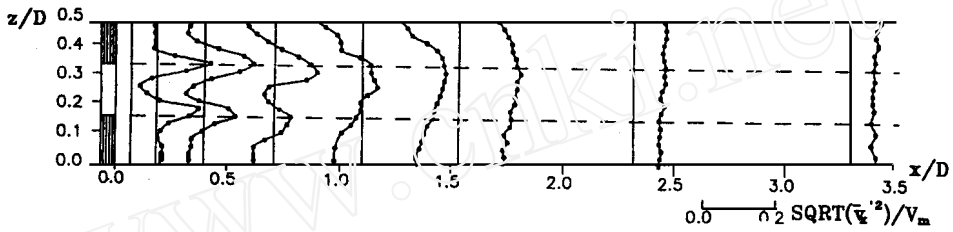
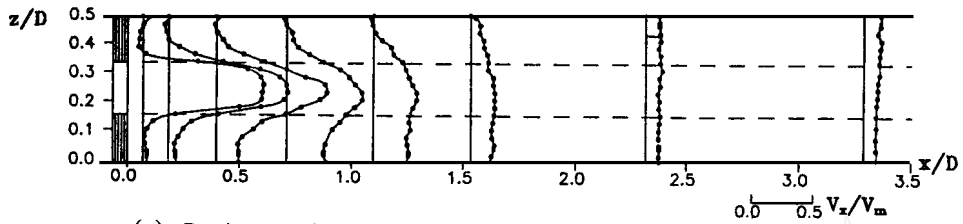
实验雷诺数以射流最大时均流速 V_m 和孔径 d 计算,对于四孔板 $Re = 6.58 \times 10^4$,对于三孔板则为 1.19×10^5 ,都处于湍流状态。

3 结果和讨论

实验中测量了四孔板和三孔板沿孔板下游的流动特性,测得的无量纲化平均速度 V_x/V_m 、切向平均速度 V_y/V_m 、轴向湍流度 $\sqrt{V_x'^2}/V_m$ 、径向湍流度 $\sqrt{V_y'^2}/V_m$ 和雷诺剪应力 $V_x'V_y'/V_m^2$ 的空间分布见图 4 和图 6 所示。其中 V_m 为位于 $X/D = 0.07$ 的最大轴向平均速度, V_x' 和 V_y' 分别是轴向和切向的脉动速度分量。图中的虚线表示了孔口的径向位置,为了便于识别流动特性的发展趋势。图 4 是四孔板情况的流动特性。假设其流动在 $X-Z$ 平面内关于 X 轴是对称的,故只测量了 1/2 管径范围。而对于三孔板情况(见图 5),由于在 $X-Z$ 平面内关于 X 轴非对称,故测量了全管径范围的剖面。

由图 4a 可以清楚地看到轴向速度的发展过程。水流从孔口流出时呈射流状,周围被孔板阻挡所形成得到尾流包围着^[89]射流和尾流间的部分,速度梯度较其他任何地方都大。从图 4e 中雷诺剪应力的分布也可看得到,存在着双峰形剖面 and 很强的湍流渗混。从图 4a 中还能见到,由于湍流渗混和射流卷吸作用,射流的最大轴向速度沿流向逐渐衰减。到 $X/D = 2.31$ 时,剖面已大体上呈均匀分布。

图 4a 中还能看到在管壁一侧存在着不太强的回流区,位置在 $X/D = 0.07$ 至 0.04 之间。回流区长度约为 $X/D = 1.46$ 。在管心区域,虽然轴向的时均值不呈负值,但在直方图中(见图



(a) 轴向平均速度分布 (b) 轴向湍流度分布 (c) 切向平均速度分布
(d) 切向湍流度分布 (e) 雷诺剪应力分布

图 4 四孔板管流的湍流特性 ($Re = 6.58 \times 10^4$)

5) 可以明显看出有负速度存在。

图 4b 是四孔板的湍流度剖面。在 $X/D = 0.07$ 剖面中, 湍流度从射流中心处的 2 % 逐渐增大到射流边缘处的 20 %。沿轴向发展到 $X/D = 0.40$ 位置, 射流中心处湍流度迅速加大到 17 %, 而射流边缘则达到 27 %。在 $X/D = 0.07, 0.18$ 和 0.40 剖面中, 剪切层中的湍流度双峰现象依然可见, 在此区域湍流渗混仍然很强烈。到达 $X/D = 0.71$ 时, 双峰消失, 但轴向湍流度平均水平还继续增大。直到 $X/D = 1.10$ 时, 湍流度平均水平才开始下降。但即使到达 $X/D = 3.3$ 时, 仍未达到完全发展管流的湍流水平。

图 4c 是四孔板的切向平均速度剖面。从原理上说, 如果流动关于 $X-Z$ 平面是对称的, 则切向平均速度应当为零。事实上, 在射流区由于模型加工的误差和射流细微的非对称不稳定性, 可能造成小量的切向速度。

图 4d 的切向湍流度分布的形态与图 4b 中的轴向湍流度分布有较大差别。在 $X/D = 0.5 \sim 1.5$ 之间, 切向湍流度明显小于轴向。直到 $X/D = 2.3$ 时, 尚有 5 % 的差别。这说明在孔板下游 $X/D = 2.3$ 以内, 湍流流动呈非各向均匀同性。

图 6 中表示了三孔板的流动特性。与四孔板情况相比差别较大之处有, 轴向平均速度在射流两侧均出现负值, 回流强度和分布区域也明显较四孔板大。此外, 切向平均速度基本上为零, 其流动关于 $X-Z$ 平面的不对称性也较四孔板小。这种现象, 可能由于在四孔板情况下, 相邻射流之间的相互作用与不稳定性比三孔板更为强烈所致。

图 6b、6d 所示的湍流剖面, 也显示出非各向均匀同性的湍流特性, 但轴向和切向湍流度的差别较四孔板时为小。

4 结束语

应用二维 LDV 测量了两种型式的低开孔度多孔板管流的湍流特性。结果表明, 在射流与壁面之间存在着高剪切流区和回流区, 开孔度和孔板形式对湍流特性影响较大。较低开孔度的三孔板与较高开孔度的四孔板相比, 前者回流速度较强, 回流区域较大, 而后者则轴向与切向湍流度的差别较大。

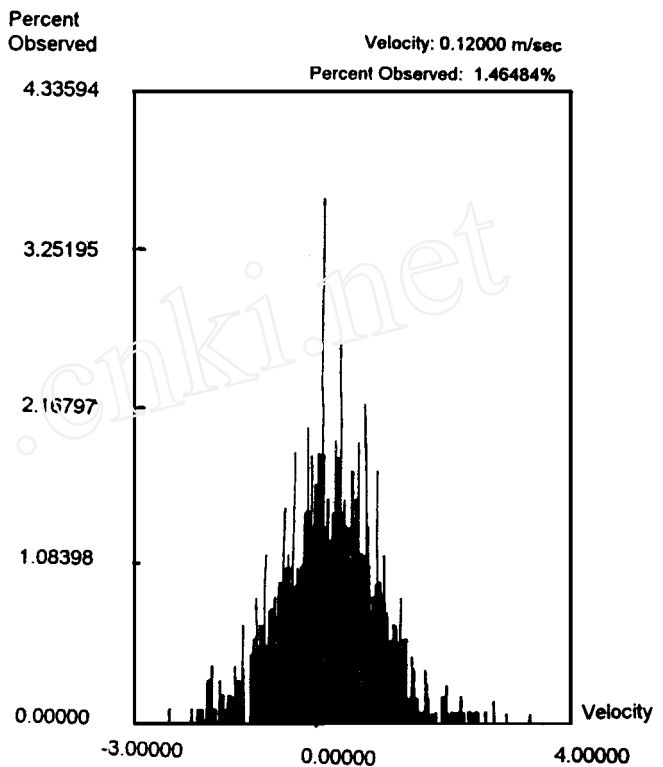
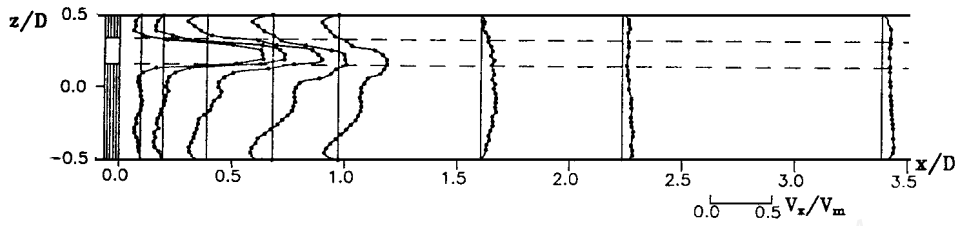
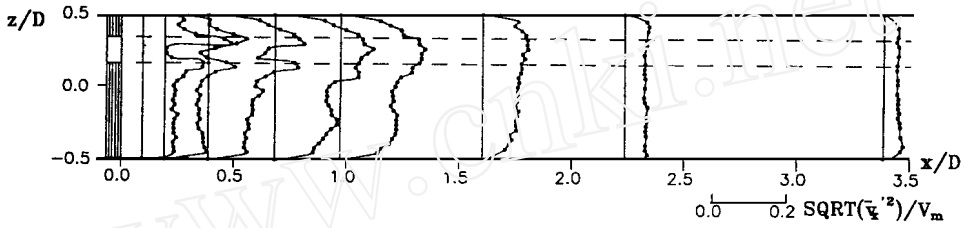


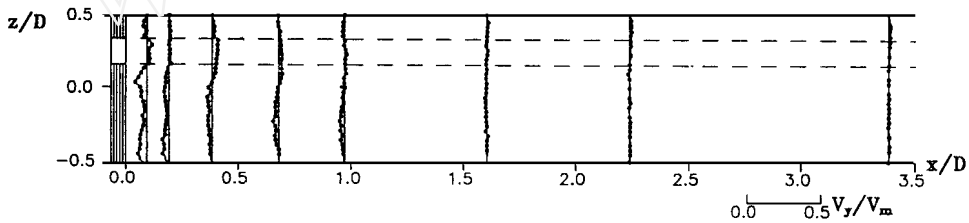
图5 四孔板射流轴向速度直方图($X/D = 0.07, Z/D = 0.08$)



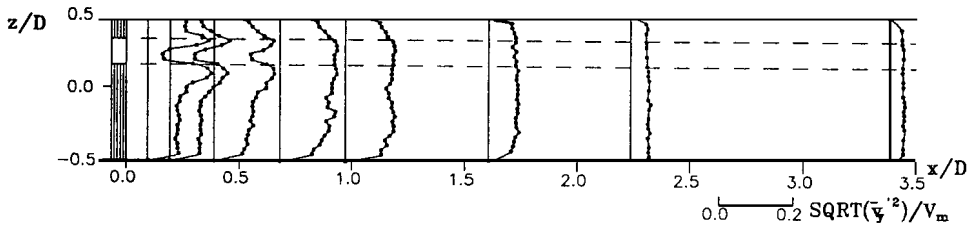
(a) Development of radial distributions of normalized axial velocity



(b) Development of radial distributions of axial turbulence intensity



(c) Development of radial distributions of normalized tangential velocity



(d) Development of radial distributions of tangential turbulence intensity

(a) 轴向平均速度分布 (b) 轴向湍流度分布 (c) 切向平均速度分布 (d) 切向湍流速度分布

图 6 三孔板管流的湍流特性 ($Re = 1.19 \times 10^5$)

参 考 文 献

- [1] Sahin B. Pressure Losses in an Isolated Perforated Plate and Jets Emerging from the Perforated Plate, Int. J. Meach. Sci., 1989, 31(1): 5161
- [2] Sahin B and Ward-Smith A J. Effect of Perforated Plates on Wide-Angle Diffuser Exit Velocity Profiles, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 34(2): 113125
- [3] Sahin B and Ward-Smith A J. Pressure Distribution in and Flow Characteristics of Wide-angle Diffusers Using Perforated Plates for Flow Control with Application to Electrostatic Precipitators, Int. J. Mech. Sci., 1993, 35(2): 117127
- [4] Laws E M and Quazanne A K. Compact Installations for Differential Flowmeters. Flow Meas. Instrum., 1994, 5(2): 7985
- [5] Laws E M and Quazanne A K. Effect of a Zanker Flow Straightener, Flow Meas. Instrum., 1992, 3(4): 257269

- [6] Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plate ,Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross Section Conduits Running Full ,ISO 5167 ,1991
- [7] 朱宪,沈文豪,王守桓. 网角塔板热膜试验. 化工机械,1988,(2):103106
- [8] 沈熊,严幼幼,高建生,丁则裕. 应用共轴型二维激光测速系统测量孔板管流的湍流特性. 力学学报,1991,(3):225-231
- [9] Shen X, Ding Q M, Yu J F and Wang H L. LDV Measurement of Flow through an Axisymmetrical Constriction with a Core Rod. Proceedings of the 1st International Conference on Experimental Fluid Mechanics ,Jun. 17 - 21 ,1991 ,Chengdu , China , 425429

Measurement of Turbulent Characteristics for the Pipe Flow from Perforated Plates by Using a 2D-LDV System

Shen Xiong Zhang Song Liu Xiaofeng

(Tsinghua University)

Abstract The behavior of pipe flow emerging from a 4-hole or 3-hole perforated plate is investigated experimentally in a water circulating system by using a 2D frequency shifting LDV system. It is observed that the jets from the perforated plate mingle out gradually along the pipe axis, that a reverse flow region exists near the pipe wall and that beyond a sufficient distance from the perforated plate, the axial and the tangential turbulence intensities are reaching the same order. It is also found that the turbulent characteristics of the flow is strongly influenced by the porosity and configuration of the perforated plates.

Key words perforated plates, pipe flow, laser Doppler velocimetry.