

低速轴对称层流射流流动形态和失稳机制的实验研究¹⁾

陈 远 李东辉 鄂学金

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

许 凯 华

(中国科学院测量与地球物理所动力大地测量开放研究室, 武汉 430077)

摘要 本文应用染色液和悬浮粒子显示方法, 进一步实验研究轴对称层流射流的流动形态及其失稳机制。首次成功地在从一定口径的喷嘴流出的低速轴对称层流射流中观察到环形回流流动。给出了射流随速度演化及实验容器边界对其流动形态影响的显示照片, 发现实际射流的轴对称波动及失稳过程正好对应射流在容器底部产生的环形旋涡的生长和破碎过程。本文认为由于实验空间有限尺度对流动的限制改变了原来射流的流动形态和流场空间的拓朴性质, 射流与实际边界的相互作用对实际射流的失稳和转换有重要的影响。

关键词 轴对称层流射流, 射流稳定性, 流动显示

一、引 言

层流射流在一些射流元件和化学反应器、塑料注模等流体设备上有着广泛的应用。层流射流涉及到层流失稳、转换等非线性流动现象。因此层流射流流动及演化受到国内外学者的重视和研究。

60 年代, Reynolds^[1], McNaughton 和 Sinclair^[2]等学者在水中用染色显示方法实验研究了轴对称射流的流动。他们看到, 低速轴对称层流射流只能维持有限的长度, 流体汇集在射流前部, 形成足靴状或蘑菇状。1985 年 Schneider^[3]从理论上指出, 从壁面上的点源发出的高速轴对称层流射流, 在有限范围内逐渐滞止, 形成环形回流流动。同期, Zauner^[4]报告了从壁面小孔隙发出的高速轴对称层流射流的流动显示实验, 他在高粘性液体(甘油和水混合液)中悬浮微粒气泡显示出环形回流图像(见图版 I, 照片 2)。这些理论和实验表明轴对称层流射流的流动是有限的, 而不是边界层方程 Schlichting 相似解所描述的, 可以不断地卷吸周围流体一直运动至无穷的射流图像。但是, 现有的实验都没有在低速轴对称层流射流中发现环形回流流动。因此轴对称层流射流的流动形态及演化并没有被完全认识清楚。我们认为传统的实验由于没有意识到环形回流流动是轴对称层流射流的一个重要特征, 未能充分降低设备及染色液对低速射流的扰动, 造成低速射流形态的变

1) 本文于 1990 年 4 月 21 日收到第一稿, 1990 年 8 月 24 日收到修改稿。

形或破坏,所以没有能够显示出低速轴对称层流射流的环形回流图像。

根据实验观察,随着射流速度的增加,轴对称层流射流将很快伸长,直到抵达实验容器下游边界形成柱状流动,然后出现失稳和部分转换现象。Reynolds^[2]指出在射流上可以看到轴对称缩胀和正弦波动。然而,线性小扰动理论对轴对称层流射流的稳定性分析^[5,6,7]表明,层流射流的速度剖面对轴对称小扰动是绝对稳定的。对理论分析和实验观察不一致的一种解释^[8]认为实际失稳是有限振幅扰动造成的,但是,从 McNaughton 和 Sinclair 的实验照片上,可以看到实际层流射流上的扰动波纹是很小的。不少学者测量了轴对称射流的层流长度^[1,2,7,9,10,11],试图找出射流部分转换后射流层流长度和雷诺数的关系,得到的许多经验公式系数相差很大^[7]。轴对称层流射流研究中所出现的这些问题,我们认为与没有考虑实验容器边界的影响有关。当射流流动扩展至容器边界时,其流动形态将发生改变,这时决定实际射流流动的参量将不仅是射流雷诺数和速度剖面,实验边界对射流的作用产生的回流和旋涡运动有可能对实际射流的失稳和转换产生重大影响。

本文的目的在于通过流动显示实验,进一步研究从一定口径喷管流出的轴对称层流射流的流动形态及其失稳机制。本文的实验通过从水箱底部抽出流体,使相同流量的射流从水箱上部的喷管流入水箱。由于采取了不同于以往靠喷管上游高水位流体产生射流的方法,从而大大减少了对射流流动有直接作用的上游扰动。实验时精心配制了染色液的比重,以期尽量降低染色射流的浮力效应。这些措施大大减少了外部因素对低速射流流场的干扰,从而首次成功地观察到低速轴对称层流射流的环形回流流动。本文还用悬浮塑料粒子的方法显示射流周围的流场,研究水箱边界对射流稳定性的影响。通过实验观察,我们认识到实际射流的失稳过程与射流和容器底部边界的相互作用有密切的关系。

二、实验设备和实验方法

本实验是在特制的淹没射流装置中进行的。整个设备包括实验水箱、射流泵、流量计、水泵和储水箱等(见图 1)。实验水箱被隔板分成上、下两部分,上部分装有流体稳定室和喷管,下部分是射流室。流体稳定室不仅起稳流作用,而且阻止水箱上水时的扰动进入喷管。在射流室底部有个出口孔,与喷管在同一轴线上。射流室横截面积为 $360 \times 360 \text{ mm}^2$,从喷管喷嘴位置到射流室底部的高度是可以调节的,调节的最大距离大约为 250 mm。实验用的喷管喷嘴口径为 12 mm。

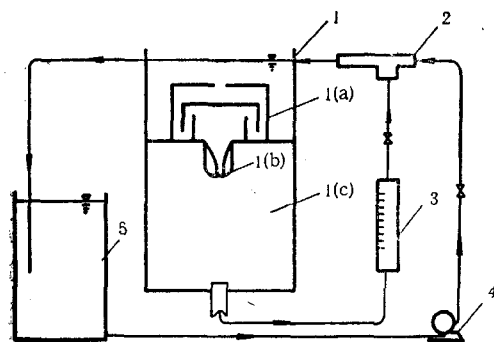


图 1 射流装置示意图

1 实验水箱 (a) 流体稳定室 (b) 喷管 (c) 射流室
2 射流泵 3 流量计 4 水泵 5 储水箱

射流装置使用时,将实验水箱上水到溢流水面,用射流泵在水箱底部抽水,这时水箱上部相同流量的流体经过流体稳定室由喷管流入射流室形成射流流动,同时水箱上部水由射流泵或水泵供给,一部分补充射流流量,其余的经溢水口排入储水箱,使水箱上部水位一直保持恒定。实验表明,本文采用水箱底部抽水的方法,使射流装置中的流体稳定室和射流喷管与外部扰动源如水泵或其它类型

射流装置使用时,将实验水箱上水到溢流水面,用射流泵在水箱底部抽水,这时水箱上部相同流量的流体经过流体稳定室由喷管流入射流室形成射流流动,同时水箱上部水由射流泵或水泵供给,一部分补充射流流量,其余的经溢水口排入储水箱,使水箱上部水位一直保持恒定。实验表明,本文采用水箱底部抽水的方法,使射流装置中的流体稳定室和射流喷管与外部扰动源如水泵或其它类型

的高水位源隔离开,大大减少了可以直接进入射流流场的喷管上游扰动。

实验中射流流量的测量通过国产浮子流量计读数。流量计最小计量每小时 1 升的流量。流量计安装在实验水箱底部出口的管路上,并在下游装有节流阀,可以调节射流流量的大小。

本文分别用染色法和悬浮粒子法显示射流和射流室流体的运动。使用染色法时,染色液在实验前加入流体稳定室。染色液由奶粉加温水调成,调制时添加少量酒精使染色液比重与水相同。配好的染色液滴入水中,可以不浮不沉停留水中直到弥散。悬浮粒子法是将塑料粒子悬浮于射流室液体中,通过激光片光源照明,观察射流室流体带动粒子的运动情况。为了保证塑料粒子有良好的悬浮性能,实验配制了合适比重的盐水作为工作液体。在配好的盐水中,塑料粒子可悬浮 2~3 个小时或者更长的时间。

三、实验结果和讨论

下面将分别介绍低速轴对称层流射流的流动形态和不稳定过程的实验观察结果。记射流在喷嘴处的平均速度 $U_0 = 4Q_0/\pi d^2$ 和雷诺数 $Red = U_0 d/\nu$ 这里 Q_0 、 d 和 ν 分别表示射流流量、喷嘴口径和水动力粘性系数。文中简称 U_0 和 Red 为射流速度和射流雷诺数。

1. 低速轴对称层流射流的环形回流流动

通过染色液显示,可以观察到射流的流动情况。图版 I, 照片 1 (a) 的照片给出了 $U_0 = 5.0\text{mm/s}$, $Red = 50$ 的射流流态。从照片可见,射流离开喷嘴不远就滞止,形成环形回流流动,回流把射流包裹在里面。图版 I, 照片 1 (b) (c) 的两幅照片给出 U_0 提高时,射流的演化情况,相应的 U_0 为 10.0mm/s 和 15.00mm/s , Red 为 100 和 150。从照片上看到,射流长度随射流速度的提高而增加,环形回流依然存在,仍将射流包裹着。这些照片说明,在低速轴对称层流射流中存在着环形回流流动。在实验中,这些流动非常稳定,连续观察四个小时,都没有发现它们变形或破坏。

为了与高速轴对称层流射流进行比较,图版 I, 照片 2 引用了 Zauner^[4] 的实验照片。他在高粘度的甘油和水混合液(粘性是水的 100 多倍)中,用悬浮微粒气泡显示出从孔径为 1.1mm 的壁面孔隙流出的高速轴对称层流射流的流场。照片中射流速度约为 1500mm/s , 比本文射流速度快 2 个量级,射流雷诺数 $Red = 17.1$ 。比较图版 I, 照片 1 和 2 的环形回流形态,可以看到,尽管它们的射流雷诺数相当,但高速射流比低速射流带动了更大范围的环形回流流动。可见,用雷诺数不足以描述轴对称层流射流的流动情况。低速轴对称层流射流环形回流流动的发现,表明尽管其与高速射流在流动形态上差异很大,但却具有一致的拓扑结构。可以认为,轴对称层流射流的演化将是其环形回流区域随射流速度连续扩展的过程,任何实验空间有限尺度对流动的限制,都将最终破坏轴对称层流射流的流动形态,改变其原来流场空间的拓扑性质。因此,研究轴对称层流射流的流动不能不考虑实际空间有限尺度的影响。

以前的许多流动显示实验没有能够发现低速轴对称层流射流的环形回流流动,与他们未能降低实验装置与染色液对射流产生的扰动有关。由于一般扰动的量级可以与低速射流的运动量级相当,因此一旦扰动从上游直接传入低速射流的流场,射流的形态很容易

被破坏变形。只有降低染色液比重的浮力效应,并避免在喷管上游出现扰动源,才能防止上游扰动进入射流流场。我们进行了两组实验来证实扰动对射流形态的作用。首先,我们考虑染色液比重的影响。在图版 I,照片 3(a)的照片中,染色液的比重稍比水大,由于重力的作用,流体在射流前部集结成一团,这正是 McNaughton 和 Sinclair^[2]观察到的蘑菇状(见图版 I,照片 3(b))。如果染色液比重比水轻,则由于染色射流流体的密度分布不会是完全均匀对称的,以及其它非对称性因素的影响,浮力的作用使染色射流偏离轴线向上漂,这时观察不到环形回流流动。文献[2]、[7]都描述了浮力效应对射流流动的影响。为了检验我们所观察到的环形回流是否受到了浮力的影响,我们用比重比水大的蓝墨水或者钙黄绿素加水稀释成很淡的染色液,来显示低的流动,仍然观察到低速轴对称层流射流的环形回流流动(见图版 I,照片 3(c))。

在另一组实验中,我们将流体稳定室与水泵的扬水端或高水位的水箱相连,靠压力产生射流,由于水泵运行时的振动,或高水位水箱水位的小扰动从上游直接传入射流流场,破坏了低速射流的形态,因此没有观察到稳定的低速射流形态。

2. 轴对称层流射流的失稳过程

图版 II,照片 1 的一组照片,给出了射流的不稳定演化过程。随着射流速度的提高,射流长度相应增长,当射流前部接近容器底部时,射流的形态受到底部边界明显的影响(见图版 II,照片 1(a))。在某个射流速度下,射流前部抵达容器底部,在喷嘴和底部出口之间形成柱状流动。开始时,这种流动显得非常稳定(见图版 II,照片 1(b),(c))。随着射流速度的继续提高,在射流柱上逐渐可以看到很小的对称的正弦波纹出现(图版 II,照片 1(d)),并发展为小对涡(图版 II,照片 1(e)),在更高的速度下,对涡长大并发生二次失稳成为紊流的运动(图版 II,照片 1(f))实际轴对称层流射流这一不稳定过程与射流喷嘴口径,以及外部空间尺度大小无关。许多实验在不同的条件下观察到了上述过程,如 Reynolds^[1],McNaughton 和 Sinclair^[2]等。Reynolds 使用的实验玻璃容器,直径 300mm,高 1200mm,喷嘴口径为 0.32mm,McNaughton 和 Sinclair 使用了稍大口径的喷嘴(6.35mm 和 25.4mm),以及各种直径($D76 \sim 610\text{mm}$)和长度($L/D = 1, 2, 3$)的实验容器。在本文的实验条件下,使用其它口径($d2, 6\text{mm}$)的喷嘴,以及改变喷嘴到容器底部的距离,我们依然观察到轴对称层流射流的上述失稳演化过程,只是失稳时的流动参数依具体情况而有所不同。

按照 Schneider^[3]高速轴对称层流射流理论,高速射流所带动的环形回流流动区域的对数尺寸与 Red 的平方成正比。如果喷嘴口径是 1mm 的量级,实验研究 $U_0 = 30\text{mm/s}$ 的水淹没射流,只有在 3000mm 或更大尺寸量级的容器里做实验,才可能使射流不受容器边壁的影响。从本文对射流失稳现象的观察,以及文献[1]、[2]等实验记载,实际轴对称层流射流的失稳都是发生在射流抵达容器边壁以后,这时射流的流动形态及流场空间的拓扑性质都已发生很大改变(见图版 II,照片 1(a),(b))。而在这之前一些实验所描述的轴对称层流射流的不规则形态,正如本文前面已经说明的那样,应归因于外部扰动的结果。因此研究实际轴对称层流射流的失稳现象必须考虑到实验有限空间尺寸对流动的限制所造成的影响,对于高速射流这种影响将会更为显著。一些线性小扰动理论对轴对称层流射流的稳定性分析^[5,6,7],得出的轴对称层流射流对轴对称扰动是绝对稳定的结论与实验观

察不符, 可以认为是因为理论分析没有考虑到实际射流形态受实验边壁作用而发生变化这一实际情况。

为了认识容器边界对实际射流稳定性的影响, 本文用悬浮粒子法显示射流周围流体的运动以及射流与容器底部的相互作用。图版 II, 照片 2 给出了对应于图版 II, 照片 1 (d, e, f) 的流动条件下的一组显示照片。图版 II, 照片 2 (a) 的照片表明, 当射流抵达容器底部出口并建立柱状流动后, 在出口孔壁边缘附近产生了一对小旋涡, 实际上这是一个环形旋涡。随着射流速度的提高, 旋涡不断增大(图版 II, 照片 2 (b)), 最终破碎形成混乱运动(图版 II, 照片 2 (c))。图版 II, 照片 2 所描述的底部出口边界附近环形旋涡的形成、生长和破碎的过程, 对应于图版 II, 照片 1 (d, e, f) 所描述的在射流上出现对称波动、对涡、对涡破碎这一失稳演化过程。因此, 可以相信实际轴对称层流射流的早期失稳现象与射流与容器底部边壁的相互作用有密切的关系。

四、结 论

1. 本文通过染色液显示方法首次成功地观察到从一定口径的喷嘴发出的低速轴对称层流射流的环形回流流动。本文还通过实验证明喷管的上游扰动和染色液的浮力效应使低速轴对称层流射流的流动形态发生了改变, 破坏了环形回流流动。

2. 当轴对称层流射流的流动扩展至容器底部边界时, 射流的流动形态和流场空间的拓扑性质发生了很大变化。

3. 本文通过悬浮粒子法和染色液法对射流与底部相互作用和射流的不稳定过程进行了对比观察, 发现实际射流的轴对称波动及失稳过程正好对应射流在底部产生的环形旋涡的生长和破碎过程。

4. 综上所述, 可以认为环形回流流动是轴对称层流射流的重要特征。轴对称层流射流的演化是其环形回流区域随射流速度连续扩展的过程。实验空间任何有限尺度对流动的限制, 都将最终改变轴对称层流射流的流动形态和流场空间的拓扑性质。射流与实际边界的相互作用对实际射流的失稳和转捩有重大的影响。

本文作者衷心感谢林同骥先生对本工作的支持、指导、感谢吴应湘博士所给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Reynolds, A. J. Observations of a liquid-into-liquid jet. *J. Fluid Mech.* 1962, 14: 552.
- [2] McNaughton, K. J. & Sinclair, C. G. Submerged jets in short cylindrical flow vessels. *J. Fluid Mech.*, 25(1966): 367.
- [3] Schneider, W. Decay of Momentum flux in submerged jets. *J. Fluid Mech.* 1985, 154: 91.
- [4] Zauner, E. Visualization of the viscous flow induced by a round jet. *J. Fluid Mech.*, 1985, 154: 111.
- [5] Batchelor, G. K. & Gill, A. E. Analysis of the stability of axisymmetric jets. *J. Fluid Mech.*, 1962, 14: 529.
- [6] Kambe, J. The Stability of an axisymmetric jet with parabolic profile. *J. Phys. Soc. Japan.*, 1969, 26: 566.
- [7] Mollendorf, J. C. & Gebhart, B. An experimental and numerical study of the viscous stability of a round laminar vertical jet with and without thermal buoyancy for symmetric and asymmetric disturbances. *J. Fluid Mech.*, 1973, 61: 367.

- [8] Gill, A. E. On the occurrence of condensations in steady axisymmetric jets. *J. Fluid Mech.*, 1962, 14: 557.
- [9] Vignes, M. Contribution à l'étude des jets gazeux verticaux dans une atmosphère calme. *Rev. Gén. Thermique*, 1968 7 1205.
- [10] McKenzie, C. P. & Wall, D. B. Transition from laminar to turbulence in submerged and bounded jets. *Fluids Quarts*, 1968, 4: 38.
- [11] Marsters, G. F. Some observations on the transition to turbulence in small, unconfined free jets. Queen's University, Kingston, Ontario, Rep., 1969, 1—69.

EXPERIMENTAL STUDY OF LAMINAR FLOW AND INSTABILITY MECHANISM OF ROUND JET WITH LOW SPEED

Chen Yuan Li Donghui E Xuequan

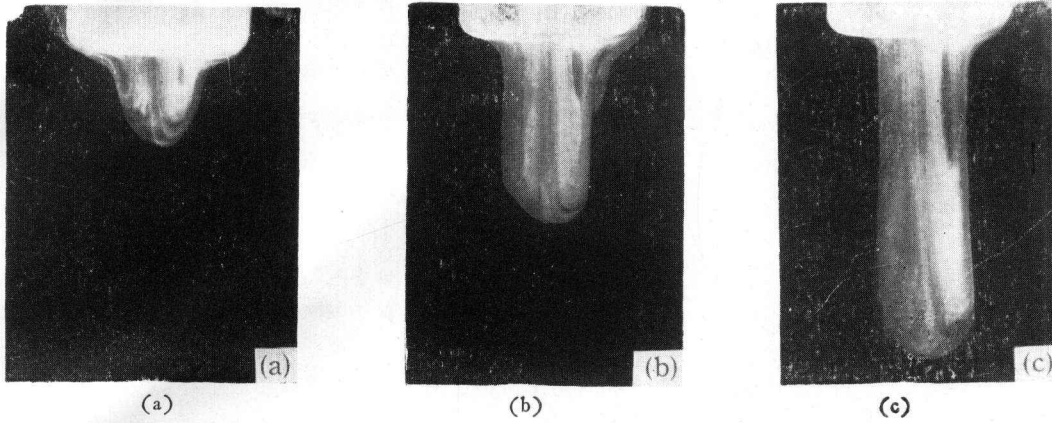
(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China*)

Xu Kaihua

(*Laboratory of Dynamical Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Academi Sinica, Wuchang 430077, China*)

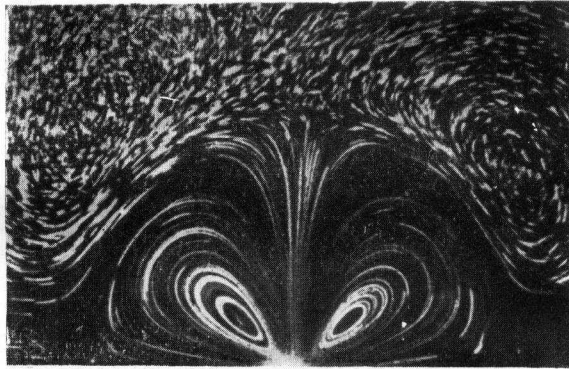
Abstract The laminar flow and instability mechanism of a round jet are investigated by visualization methods of dye and particle tracers. The toroidal backflow in a low speed round jet issuing from a nozzle was observed successfully for the first time. The flow visualization photographs demonstrated both the evolution of jet flow and effect on it of bottom boundary of the test vessel. It was found that the axisymmetric disturbance occurring in the real jet and its instability process are corresponding just right to the growing and breakdown of the circle vortex due to the interaction of jet and vessel boundary. Since the finite dimension of test space will finally change the original jet flow and its topology, it can be held that the interaction of jet and vessel boundary has important influence on the instability and transition process of the round jet. The experiment also shows that the upstream disturbance and buoyancy effects of dye liquid can deform the toroidal backflow of low speed round jet, which is why the phenomena was not observed in previous experiments.

Key words axisymmetric laminar jet, jet stability, flow visualization



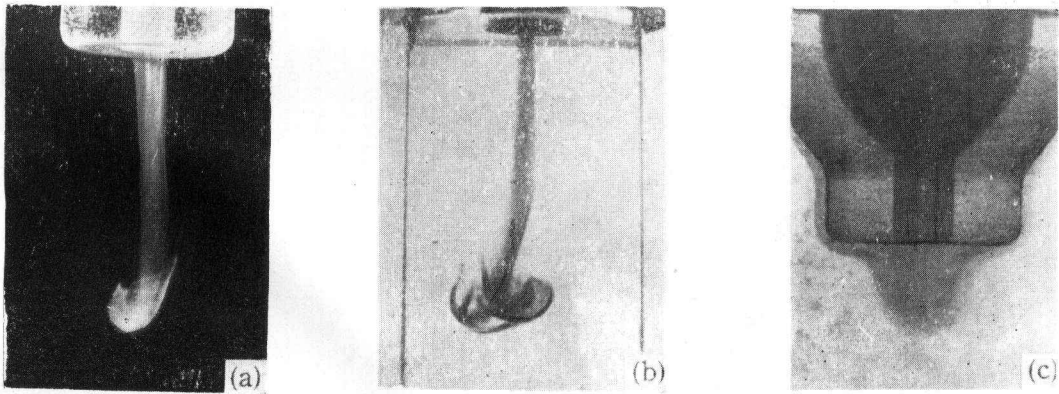
图版 I 照片 1 从一定口径喷嘴流出的低速轴对称层流射流的流动形态

- (a) $U_0 = 5.0\text{mm/s}$, $Re_d = 50$
- (b) $U_0 = 10.0\text{mm/s}$, $Re_d = 100$
- (c) $U_0 = 15.0\text{mm/s}$, $Re_d = 150$
- ($d = 12\text{mm}$)

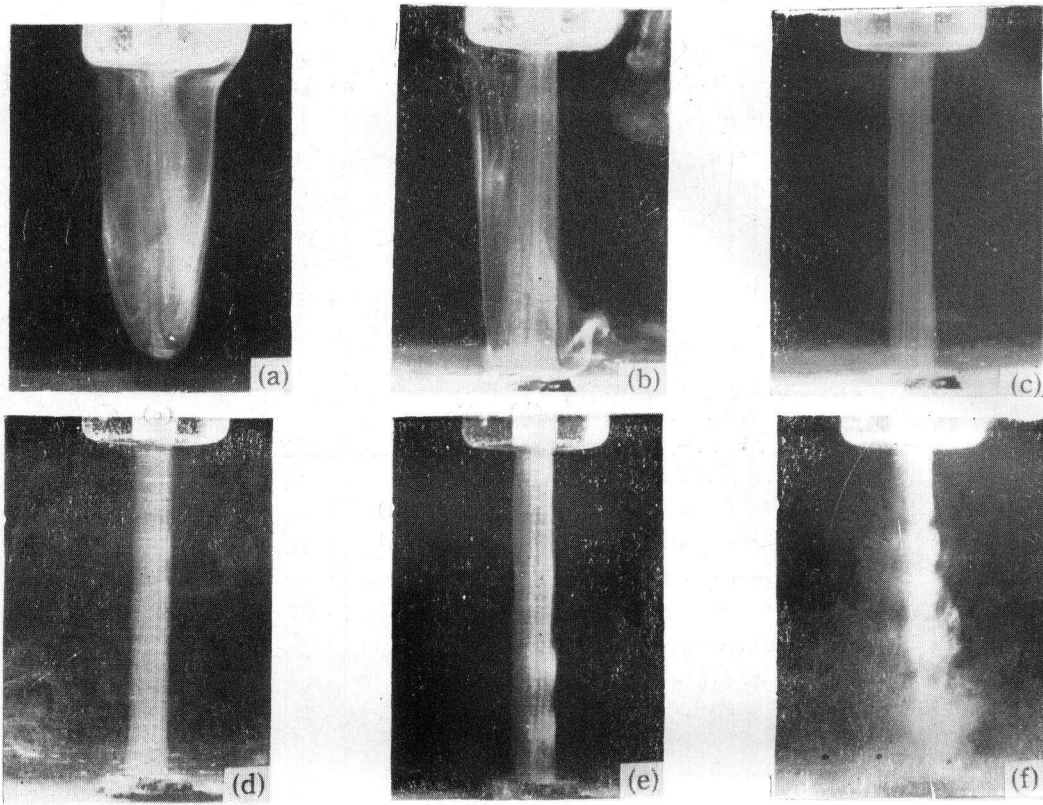


图版 I 照片 2 从平壁面孔隙出射的高速轴对称层流射流的流动形态

- $U_0 \approx 1500\text{mm/s}$, $Re_d = 17.1$, $d = 1.1\text{mm}$
- (引自 Zauner^[4], 1985)

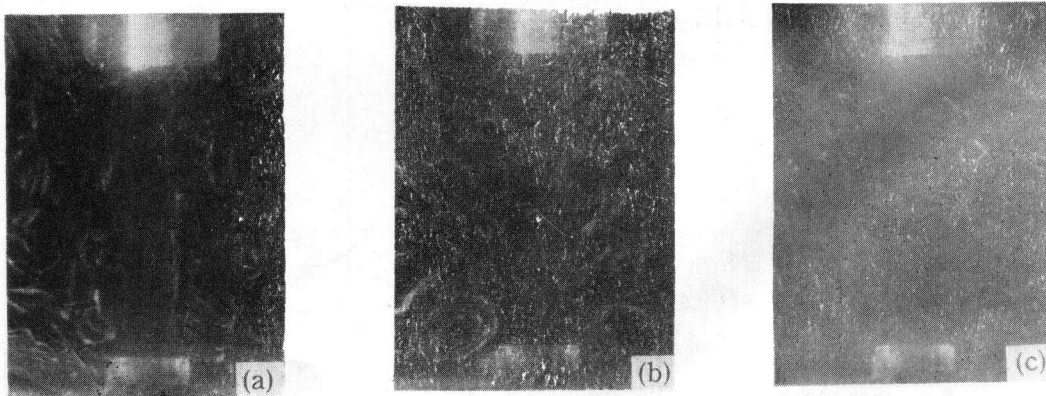


图版 I 照片 3 (a) 染色液比重稍大于水时低速射流显示照片
 (b) McNughton 和 Sinclair^[2]的低速射流显示照片
 (c) 很淡的蓝墨水配置的染色液显示的低速轴对称层流射流的环形回流流动



图版 II 照片 1 轴对称层流射流流动随射流速度的演化

- (a) $U_0 = 18.5\text{mm/s}$ $Re_d = 185$
 (b) $U_0 = 20.0\text{mm/s}$ $Re_d = 200$
 (c) $U_0 = 25.0\text{mm/s}$ $Re_d = 250$
 (d) $U_0 = 37.5\text{mm/s}$ $Re_d = 375$
 (e) $U_0 = 62.5\text{mm/s}$ $Re_d = 625$
 (f) $U_0 = 150.0\text{mm/s}$ $Re_d = 1500$



图版 II 照片 2 射流与容器底部出口边界的相互作用
 照片 (a)、(b)、(c) 的流动条件分别与图 5 (d、e、f) 的情况对应