

流体力学中一些未解决问题 (II)

Lloyd M. Trefethen Ronald L. Panton
美国Tufts大学机械工程系 美国Texas大学机械工程系

17 2次流动损失机理

William Hawthorne 爵士
Cambridge 大学 Churchill 学院

二次流动损失机理是什么？例如：

当2次流动存在时，例如在绕过弯道的流动中，2次流动损失的原因是什么？

同起因于2次流动与壁面边界层内变化有关的损失相比，流体主体中剪应力增大所引起的2次流动损失占多大比例？

令人奇怪的是，在许多人对2次流动作了许多年工作之后，对实际上如何引起2次流动损失的增大，仍然了解得很不够。

18 江河弯曲变迁

John F. Kennedy
Iowa 大学水力学研究所

2次流对发生在笔直河道中交替沙洲的主流的影响，是引起江河弯曲变迁的主要的机理吗？抑或有某种其他的机理？

大家知道（尤其在当今广泛使用航空旅行的时代），天然江河极少有笔直长度达几条河槽宽度的河道。这不仅对于在沙质河槽里流动的江河是这样，而且对于切入岩体或冰体的河槽里流动的江河也是这样。大家还知道，强2次流（螺旋流动）发生在蜿蜒曲折的江河里的流动中。

未解决的问题为，2次流对发生在笔直河道中交替沙洲（alternate bars）的主流的影响，或者某种其他的机理，是否引起江河弯曲变迁（river meandering）开始发生的主要机理。

对于分析江河弯曲变迁的开始发生，已经提出了3种主要的理论类型：2次流（secondary-current）不稳定性^[1]；交替沙洲（alternate-bar）不稳定性^[2,3]；沙洲-弯道（bar-bend）不稳定性^[4]。2次流不稳定性假设了：对河道轴线任何偶然的偏离所引起的2次流，会改变河道的横截面和流动结构，结果将促使河道的弯曲变迁增大。沙洲不稳定性所依据的思想则是，绕流过沿笔直河道堤岸自发形成的交替沙洲的流动，将会冲击堤岸从而

引起河道发生弯曲变迁。在这个方向进行探究的未解决难题，是以交替沙洲向下游迁移的事实为中心，可是沿河道某些固定位置处对河道堤岸的长期侵蚀作用却一定产生河道的弯曲变迁。沙洲-弯道不稳定性理论的基础是，描述调直受扰动河道中交替沙洲的绕流的方程发生共振。实际上为零波速 (zero celerity) 的沙洲波长，已被证明对应于正弦式扰动调直河道中流动本征频率的波长。

遗憾的是，这3个探究方向预言的几乎是同样的主波长，弯曲变迁波速 (meander celerity)，等等。因此，这些实验结果不能用来解决这个难题。

1. Kitanidis, P. K. and Kennedy, J. L. (1984), "Secondary current and river-meander formation," *J. Fluid Mechanics*, 144, pp. 217-229.
2. Parker, G., (1976), "On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers," *J. Fluid Mechanics*, 76, pp. 457-480.
3. Ikeda, S., Parker, G., and Sawai, K. (1981), "Bend theory of river meanders, Part I," *J. Fluid Mechanics*, 112, pp. 363-377.
4. Blondeaux, P. and Seminara, G. (1985), "A unified bar-bend theory of river meanders," *J. Fluid Mechanics*, 157, pp. 449-479.

19 弯管流动

D Goering J A C Humphrey R Greif

California 大学 Berkeley 分校机械工程系

弯管中完全发展层流的数值计算揭示出横向流面中的多涡旋解。在这类流动中加入数值对称性将如何影响所得到那些解的稳定性？

在弯管内可以从实验中引起给定的4涡旋（以及尽可能多的涡旋）流型吗？它们在物理上是稳定的吗？

数值结果表明，4个或更多的涡旋是不稳定的，在什么情形下会发生第3个问题：一般地讲，从多涡旋流型（不稳定的）向少涡旋流型（稳定的）的过渡是怎样演化的？

弯管中完全发展层流的数值计算揭示出横向流面中的多涡旋解 (Dennis & Ng, Nandakumar & Masliyah, Yang & Keller)。进行所有这些计算时都沿着弯管的几何对称平面加入了对称平面边界条件。于是，所计算出的涡旋总是表现为弯管横向流面中的对称涡旋对。在 Goering 的文献中详细讨论了的，我们所得到的相应的2涡旋解和4涡旋解示于图4和图5，其中 $De = 400$, $a/R = 0.05$; $De = Rc(a/R)^{1/2}$ 为流动的 Dean 数， a/R 为管子的半径与管子的曲率之比。

Cheng & Yuen 的流动显示实验示出 $De = 208$ 和 $a/R = 0.1$ 时， 180° 弯管出口平面处为4涡旋型横向流2次运动。然而，在此实验中，为了激发出所观察到的流型，在 90° 弯角处的外半径壁面上插了一根针，沿管子对称平面轻轻地将流动扰动。为了显示弯管内可以引起4涡旋型2次流动，这个实验很重要。然而，从这个实验并不能确定此4涡旋流型是不是稳定的，因为弯管的长度太短了。

Winters 关于横截面方形管内完全发展流动的数值计算工作表明，对于对称性破坏的扰动，对称4涡旋型解是不稳定的。我们的工作表明，弯管内的4涡旋型解对于对称性破坏的

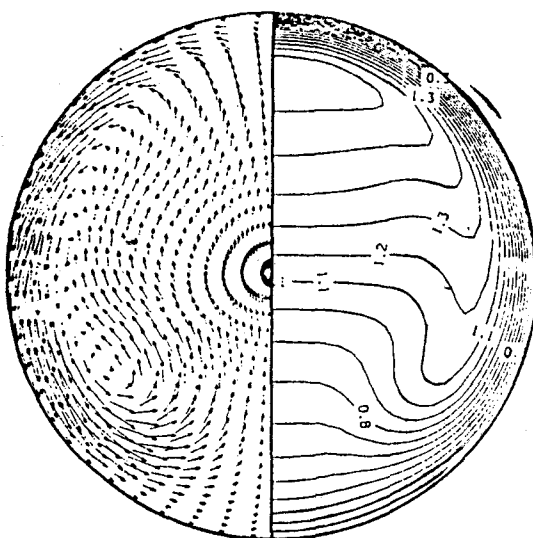


图4 2 涡旋流动

$$u_{\max} = 0.148w$$

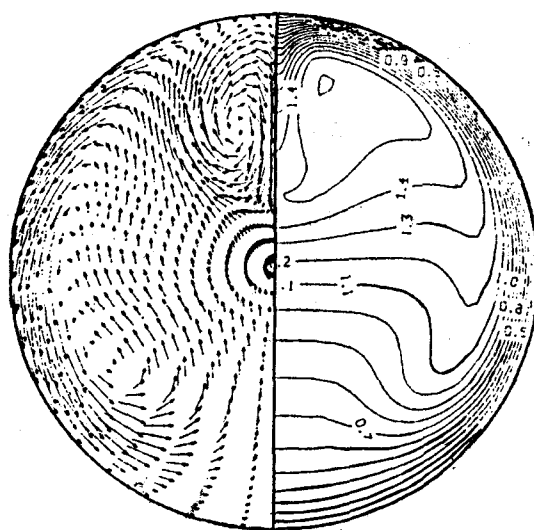


图5 4 涡旋流动

$$u_{\max} = 0.142w$$

扰动也是不稳定的。这些研究结果导致发生上述那些问题。

- Cheng, K. C. and Yuen, F. P., "Flow Visualization Studies on Secondary Flow Patterns in Straight Tubes Downstream of a 180 deg Bend and in Isothermally Heated Horizontal Tubes," *J. Heat Transfer*, Vol. 109, No.3, pp. 49-54, 1987
- Dennis, S. C. R., and Ng, M., "Dual Solutions for Steady Laminar Flow Through a Curved Tube," *Q. J. Mech. Appl. Math.*, Vol. 35, No. 3, pp. 305-342, 1981
- Goering, D. J., "The Effect of Curvature and Buoyancy in Three-Dimensional Pipe Flows," Ph D. Thesis, University of California Berkeley, 1989
- Nandakumar, K. and Masliyah, J. H., "Bifurcation in Steady Laminar Flow Through Curved Tubes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 119, pp. 4755-490, 1982
- Winters, K. H., "A Bifurcation Study of Laminar Flow in a Curved Tube of Rectangular Cross Section," *J. Fluid Mech.* Vol 180, pp. 343-369, 1987
- Yang, Z. and Keller, H. B., "Multiple Laminar Flows Through Curved Pipes," *Appl. Num. Math.*, Vol. 2, pp. 257-271, 1986

20 开口锥内流动

Michael Owen

Sussex 大学工程和应用科学学院

绕锥轴旋转的开口锥内的流型是什么？

转盘引起的流动是大家很熟悉的一个老课题，尤其是层流的情形。一端开口且绕管轴旋转的圆管内的流动，最近曾经作了研究^[1]。这两种情形是圆锥内流动的两个极端，即圆锥的总夹角从180°（转盘）变到0°（开口端无穷长管），最大直径保持不变。

两种极端情形都牵涉到运动固体表面所诱致的边界层引起的流动，不过卷挟进边界层内的流体可能是不同的。对于圆盘的情形，边界层内的流体受离心力的作用被迫径向向外流动，卷挟流体则在轴向发生而维持边界层，对于层流的情形，结果便是厚度不变的经典转盘

边界层。

对于旋转圆管的情形，存在一不旋转流体核把流体供给圆管内表面附近的旋转流体边界层。边界层的厚度随着圆管内距离的增大而增大，离心作用则引起压力梯度从而使边界层流体向后运动，向着开口端流出管外。核流体在管中心附近运动，边界层流体则在壁面附近向外运动。

锥体内流动情形应当包括上述两种极端情形之间连续变化的情形。这在数值计算方面是不难研究的，也许在分析上也不难研究出，尽管这已经进行了，但对有限长圆管所进行的工作^[1]则未曾在文献中报道过这样的解。

1. Unpublished research at the University of Sussex.

21 空气和水的 Newton 粘度

Promode R Bandyopadhyay

美国航空航天局 Langley 研究中心

空气和水在所有的剪切值下都是 Newton 流体吗？

如果是，那是为什么？

空气和水是工程上感兴趣的最普通的流体。大家公认它们遵守 Newton 摩擦定律，此定律将摩擦剪应力 τ 跟速度梯度 dU/dy 线性地联系起来：

$$\tau = \mu(dU/dy) \quad (1)$$

这里，比例常数称为流体的分子粘度。例如，Schlichting 曾经正确地指出，方程 (1) 是一个基本关系，它是有价值的，工程师常用以计算阻力，这时壁面剪应力为

$$\tau_w = \mu(dU/dy)_{y=0} \quad (2)$$

在许多工程教科书中，尤其在空气动力学教科书中，方程 (1) 则是作为一个粗糙的“定律”，而不是强调它的有限的应用方面。另一方面，例如，Batchelor (第 36—37 页) 曾经指出，方程 (1) 仅只是一个经验关系，尽管仅仅“对于足够小的 $\text{abs}(dU/dy)$ 值才能期望它成立”，但是“发现它在 $\text{abs}(dU/dy)$ 值的非常大范围内都是精确的，这个范围包括了实际中常常遇到的那些值。”我们提出如下问题：空气和水在所有的剪切值下都是 Newton 流体吗？如果是，那是为什么？

数学上，方程 (1) 可以看成是如下的一个假设：剪应力写成 (dU/dy) 的分量的 Taylor 级数，并且其 2 阶和更高阶的项可以忽略不计。可是，说了这些并没有什么帮助。检验此假设以及在怎样的范围线性关系成立，主要是实验工作的事情。

根据文献，实验室条件下报道的最大壁面剪应力值之一约为 0.025psia ，这是在 0 压梯度边界层内 Mach 数为 3 时得到的。在飞行中可能有更大的值。

有若干大家公认的说法为，Newton 流体和非 Newton 流体定性上呈现出不同的行为。可是，在很大范围内对空气和水系统地进行剪应力和 dU/dy 的测量，以确定它们的比值是否总是常量，却还没有搞清楚。在任何情形下，如果这两种流体有时是非 Newton 流体这一理解是正确的，那么，悬而未决的问题便是为什么是如此。问题的线索似乎在于粘性的分子性质。不过，因为在水和空气之间有那么多重要的分子的和性质的差异，所以很显然，这

里没有独一无二的机理。流变方法表明，这两种流体本质上也是粘弹性流体，也就是说，它们既能贮存弹性能，同时又能耗散粘性能。然而，前一种行为不容易观测到，因为它牵涉到非常小的时间尺度，很可能其量级为纳秒 (10^{-9} s)。

目前分子动力学计算得到计算机的极大加强并且包含模拟。由于后者，分子动力学的结果最好将是支持性的和启发性的，而不是结论性的。因此，正如现在所看到的，问题只能通过根据流变动力学和分子动力学研究的指导所设计的实验来加以解决。

Batchelor, G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge Univ. Press, 1985.
Schlichting, H. *Boundary-Layer Theory*, McGraw-Hill, 1979.

22 层流中的聚合物

Fred Abnerathy

Harvard 大学工程和应用科学部

稀聚合物激活的流动与湍流流动之间有任何差异吗？

流动的核心区发生猝发事件吗？

大家知道，在湍动水流中加入百万分之几可溶性高分子添加剂，会大大减小流体的阻力，只要在壁面上的应变率足够大。如果流动的局部应变率引起高分子物的激活，则这种激活作用在大应变率层流流动中应当是很明显的。

在能够维持层流流动或湍流流动的圆管流动系统中已经进行了一系列详细的实验。用只有 7 个粘性单位长的激光 Doppler 速度探针来探测流动。探针小得足以分辨速度分布廓线，但又大得足以获得 1000Hz 的速度谱。大应变率层流流动具有的速度分布廓线及速度谱，与最大减阻的湍流流动所具有的相同。速度谱的峰值看来与聚合物分子的转动速率有关。

流动的核心区是否发生猝发事件的问题仍是悬而未决的。

23 液体表面上的气泡破裂

Duncan Blanchard

New York 州立大学大气科学研究中心

在水面上爆裂的气泡将产生液滴，并且多数的直径小于 $1\mu\text{m}$ 。尽管对中央钉状物产生液滴有所了解，但对爆裂膜产生液滴却没有了解。液滴产生的详情如何？可以怎样预计其尺寸分布？

为什么当微风吹过海面时，海水表面上的空气泡能够保持较长的时间不爆裂？

水面上气泡破裂所产生的液滴，其尺寸大小范围可能为直径 $0.01-100\mu\text{m}$ ，约为 4 个数量级。我们很想知道，从水膜开始爆裂到液滴形成所经过的时间小于 100 微秒的时候将发生什么情况。这里出现的一个谜同膜状液滴的喷出有关，它们似乎以一种尚未了解的方式 2 群或 3 群地抛出。

微风对海上气泡持续时间的影响尚未得到了解。发现以某种方式牵涉到 Marangoni 效应是不足为奇的^[1]。这个问题对世界上最大的浮筒即世界大洋有实际应用，在世界大洋中，

仅仅爆裂的气泡每年便喷出约 100 亿吨海盐到大气中。

1. Burger, Scott R., and Blanchard, Duncan C., "The persistence of airbubbles at a sea water surface." *J. Geophysical Res.*, v. 88, pp 7724-7726, Sep. 20, 1983

24 均匀气泡成核

Ho-Young Kwak

南朝鲜汉城 Chung-Ang 大学机械工程系

液体的低液体抗拉强度能够从实验上通过临界簇团的形成而不是临界尺寸气泡的形成来解释吗?

对于正常沸腾或空化 (cavitation) 的起始^[1], 气泡成核的经典理论假定了在下列力学平衡条件下存在临界气泡:

$$p_e - p_0 = 2s/r_c \quad (1)$$

式中 p_e 和 p_0 分别为气泡内的平衡蒸气压 (或气体压) 和环境压, s 为液体和蒸气 (或气体) 之间的表面张力, r_c 为临界气泡的半径。

根据方程 (1), 保持简单的静态蒸气 (或气体) 微气泡是不可能的^[2]。此外, 液体抗拉强度 (需要张力来促使气泡成核) 的实验值至少比用方程 (1) 计算的理论值小 1 个量级^[3,4]。为了解决这个问题, 假定了存在微气泡^[5]。这个矛盾便是通常所说的“微气泡佯谬”。

已经进行了许多工作来了解这个问题。例如, 已经提出了微气泡的稳定机理^[6,7]。Harvey^[8] 关于憎水裂隙中气泡稳定的工作, 非常成功地解释了非均匀气泡成核。然而, 这些稳定机理没有一个适用于均匀气泡成核^[6]。

对于气体的气泡形成^[8] 和蒸气的气泡形成^[9], 已经提出了基于分子相互作用的改进气泡成核模型。这些模型的一个关键性假设是, 气泡形成过程开始于临界分子簇团 (cluster) 的产生而不是临界气泡的产生。对于气体气泡形成和蒸气气泡形成二者, 分子簇团或“临界簇团”的稳定条件为

$$\tau = kt/Vn^{1/3} \quad (2)$$

式中 k 为 Boltzmann 常数, t 为液体温度, V 为适当的分子体积, n 为组成临界簇团的分子的数目。液体的抗拉强度 τ 可以用环境压与平衡蒸气 (或气体) 压之间的压差来定义^[9]。用方程 (2) 算出的抗拉强度值, 与各种气体的水溶液中气体气泡形成的实验值^[9,10] 很一致, 也与负压下^[4,9] 或正压下^[10,11] 蒸气气泡形成的实验值很一致。这对簇团过程作为事件的合理模型作了一定的支持。另外, 我们可以预料, 任何满足方程 (2) 的条件的簇团都成为稳定的, 并且作为簇团发展着直至变为临界气泡, 以致临界簇团可以看成是临界气泡的“种子”。

另一方面, 通过动态加力方法如加一声场^[12] 或受压脉冲^[14] 测得的液体抗拉强度值, 明显低于用经典理论或用改进模型算出的值。对于水, 用这种方法测得的抗拉强度值小于 20atm, 这显然与用离心法得到的 280atm 不一致^[15]。Crum^[13] 把在声场下抗拉强度的减小归因于存在固体杂质 (这形成了裂隙)。可是, Harvey 的裂隙模型不能解释这些观测结

果。实际上, Marston^[16] 利用声技术得到了 He II (在 2.09 K 温度下) 的在 0.3—1.2 bar 之间的峰值抗拉强度。在这里, 由于宇宙线而引起杂质核子或离子的可能性被排除了^[17]。这些测量值依然小于任一均匀成核理论的计算值 (5 bar)。必须有动态加力下液体中空化的某种起始机理, 但是这方面仍然未得到解决。

1. T. J. Jarvis, M. D. Donohue and J. L. Katz, *J. Colloid and Interface Sci.*, vol. 50, pp. 359—368, 1975.
2. F. G. Hammit, *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*, pp. 45, McGraw-Hill, 1980
3. E. A. Hemmingsen, *Science*, vol. 167, pp. 1493—1494, 1970.
4. L. J. Briggs, *J. Chem. Phys.*, vol. 19, pp. 970—973, 1951.
5. A. T. J. Hayward, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 3, pp. 574—579, 1970.
6. E. N. Harvery, D. K. Bames, W. D. McElroy, A. H. Witeley, D. C. Pease and K. W. Cooper, *J. Cellular and Comp. Physiol.*, vol. 24, pp. 1—22, 1944.
7. F. E. Fox and K. F. Herzfeld, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 26, pp. 984—989, 1954.
8. H. Kwak and R. L. Panton, *J. Chem. Phys.*, vol. 78, pp. 5795—5799, 1983.
9. H. Kwak and R. L. Panton, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 18, pp. 647—659, 1985.
10. H. Kwak and S. Lee, "Homogeneous nucleation of liquids predicted by a model of molecular interactions," in *Particulate Phenomena and Multiphase Transport*, ed. by T. N. Veziriglu, vol. 1, pp. 485—500, Hemisphere Publ. Co., 1988.
11. M. Blander and J. L. Katz, *AIChE J.*, vol. 21, pp. 833—848, 1975.
12. H. Kwak and Y. W. Kim, "Homogeneous nucleation and macroscopic growth of gas bubble in organic solutions", Proceedings of the First KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, vol. 1, pp. 125—131, 1988.
13. L. A. Crum, *Nature*, vol. 278, pp. 148—149, 1979.
14. D. C. F. Couzens and D. H. Trevena, *Nature*, vol. 222, pp. 473—474, 1979.
15. L. J. Briggs, *J. Appl. Phys.*, vol. 21, pp. 721—722, 1950.
16. P. L. Marston, *J. Low Temp. Phys.*, vol. 25, pp. 383—407, 1976.
17. R. E. Apfel, "Acoustic cavitation", in *Methods of Experimental Physics*, vol. 19, ed. P. D. Edmons, pp. 355—411, Academic Press, 1981.

25 临界区域中的旋转流动

Fred W Staub

通用电气公司研究与开发中心

在什么条件下临界区域效应控制着旋转系统中高“g”区域内的速度场?

对于下游流场, 这种效应可以稳定或不稳定到什么程度?

当冷却流体在旋转装置的冷却槽中径向流动时, 考虑冷却流体部分地在临界区域运行的情形。由于甚至在恒定温度下在近临界区有大密度梯度, 所以具有由 Coriolis 效应引起的附加 2 次流动驱动力。这种情形看来对热量传递有重大的影响, 并且对层流向湍流的转捩有某种尚未了解的影响。此外, 因为体力是随径向距离连续地变化的, 所以流动入口长度变成几乎是不确定的。

我并不知道着眼于大旋转加速度和临界区性质变化对流动或热量传递的耦合影响方面的任何分析工作和实验工作。我们目前的工作将指出这些影响的征兆, 但留下许多问题以待解决。

26 泡核沸腾中的 Marangoni 流动

W Tong A Bar-Cohen T W Simon

Minnesota 大学机械工程系

沿蒸气泡表面的 Marangoni 流动的范围是什么?

Marangoni 流动与稳定气泡及增长气泡有怎样的不同?

Marangoni 流动与纯净流体及多组分流体有什么不同? 或者与易湿润流体及难湿润流体有什么不同?

Marangoni 流动对沸腾传热的贡献是什么?

液体/蒸气界面上的表面张力梯度所引起的流体流动, 称为 Marangoni 流动。蒸气泡界面上的表面张力梯度由温度梯度及浓度梯度所引起。表面张力梯度引起界面的运动, 后者则引起流体从附着在热表面上的气泡的底部向气泡的顶部流动。这就引起外部的受热液体迁移到自壁面离开的气泡中, 还由于环流液体的流线曲率引起的液体中压力梯度而使气泡可能较长时间驻留在原处。Trefethen, Scriven & Stearnling 是 60 年代初研究表面张力驱动流动的最早几位研究人员。其后, McGrew et al 发现了大范围的液体环流, 只要气泡保持附着在热表面上; 而 Beer 提出了预计气泡界面上最大速度的一个分析模型。最近, 已经进行了热表面上静态气泡的数值研究, 而实验研究已经证明, 绕硅酮油中空气泡的对流速度约为 10^5-10^3m/s 。

然而, 沸腾过程中气泡的行为与附着在表面上静态气泡的行为有显著的差别。当一个气泡从一个活泼的空泡增长时, 它经过几个阶段, 每一阶段都要受到表面张力驱动流动的不同的影响。此外, 单组分纯净流体沸腾时的 Marangoni 流动, 显著不同于混合液体沸腾时的流动或含有溶解气体的液体沸腾时的流动。最近, 当介电液体被看成是冷却剂时, 具有低表面张力流体的沸腾课题已变得日益使人感兴趣。Marangoni 效应和湿润度对沸腾的影响基本上仍是悬而未决的问题。

- Beer, H., 1969, "Beitrag zur Wannübertragung beim Sieden," *Progress in Heat and Mass Transfer*, Vol. 2, pp. 311-370, Pergamon Press, Oxford.
- Marangoni, C., 1871, "Ueber die Ausbreitung der Tropfen einer Flüssigkeit auf der Oberfläche einer anderen," *Annalen der Physik und Chemie*, Vol. 143, pp. 337-354.
- McGrew, J. L., and Bamford, F. L., and Rehn, T. R., 1966, "Marangoni Flow: An Additional Mechanism in Boiling Heat Transfer," *Science*, Vol. 153, pp. 1106-1107.
- Scriven, L.E., and Sternling, C.V., 1960, "The Marangoni Effects," *Nature*, Vol. 187, pp. 186-188.
- Scriven, L. E., and Sternling, C. V., 1964, "On Cellular Convection Driven by Surface-tension Gradients: Effects of Mean Surface Tension and Surface Viscosity," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 19, pp. 321-340.
- Tong, W., Bar-Cohen, A., Simon, T. W. and You, S. M., "Contact Angle Effects on Boiling Incipience of Highly-Wetting Liquids," Accepted for publication, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, January, 1989.
- Trefethen, L. M., 1961, "On the Jet Propulsion of Bubble in a Heated Liquid," Tufts University Mechanical Engineering Report No. 61-8-J.
- Trefethen, L. M., 1964, "Surface Tension in Fluid Mechanics," Educ Services Inc. for Nat. Comm. of Fluid Mechanics Films.

27 水平及铅直流动中的栓塞

G F Hewitt

英国原子能局热水利学部

油气管道中大栓塞的增大是一个没有很好了解的问题，支配栓塞摄取和释放过程的历程是什么？

向上栓塞与环状流动之间的乳沫状流态发生的机理是什么？

从一个液体栓塞摄取和释放液体。水平栓塞流动在油气混合物的管道运输中是非常重要的。一个主要的可能问题是极大栓塞的增大，这些栓塞给管道出口端的工艺设备提出了难题。如果从液体栓塞下游端的液体释放速率等于其上游端的摄取速率，则栓塞尺寸将保持是恒定的。支配此释放和摄取过程的历程是什么？

关于释放速率已经提出了几种假说。这些假说通常与液体栓塞内边界层的生长有关，当边界层在液体栓塞的中心相遇时将达到平衡的释放速率。然而，液体栓塞内的流动很可能比这复杂得多，并且尚未真正得到了了解。

乳沫状流动 (churn flow) 的性质。乳沫状流动是在铅直向上液体流动中栓塞流动与环状流动之间发生的一种流态。这种流态出现的机理是什么？它的支配参量又是怎样的？

有些人把泡沫状流动看成是引起栓塞流动的一个进口条件。不过，有迹象表明，它的发生是由于管子中大气泡内的液泛转变 (flooding transition)。几乎或根本没有泡沫状流动本身的有用资料。参量很可能受进口条件的强烈影响，并且流动是高度湍动的和复杂的。

28 喷 溅

John Lienhard IV

Houston 大学机械工程系

当一高速炮弹以某一角度进入液体中时，喷溅为什么是对称的而无一个方向平行于炮弹的方向？

当一高速炮弹进入液体中时，为什么它形成的萝卜形状坑穴的大小与液体是否在饱和温度下没有很大的关系？

29 液滴凝结时的 Marangoni 流动

Lloyd M Trefethen

Tufts 大学机械工程系

由表面张力变化引起的流动对液滴凝结时所经受的极高传热系数有显著的贡献吗？

在上述的一个问题中，Marangoni 效应是在沸腾的情形下讨论的。一个表面上相似，但细节上非常不同的情形，是对液滴凝结的影响。有液滴时，聚集的非冷凝气体甚至对于单组分液体，也能引起沿液滴侧壁的显著温度梯度。

一个计算对流效应的极粗糙的模型符合于观测到的凝结系数^[1]，但据我所知，尚未有

继续进一步搞清此问题的任何工作。

1. Trefethen, Lloyd, M., "Drop condensation, and the possible importance of circulation within drops caused by surface tension variation." General Electric Report No. 58GL47, 1958

30 池火涡旋脱落频率

Patrick J Pagni

California 大学 Berkeley 分校机械工程系

为什么描述池火焰振荡的脱落频率 $f^2 = 2.3/D$ (f 的单位为 Hz, D 的单位为 m) 大于火焰底部直径 (0.03—60m) 的3个数量级?

池火定义为燃烧水平表面上的稳定的扩散火焰。通常燃料是固相或液相的, 而表面上的质量传递速率受到来自火焰的热量传递反馈的控制。然而, 这里所说的数据也包括了烧结炉 (sintered burners) 中以可变流量供应燃料的气相火焰。也包括了从圆形到矩形的多种多样池子形状。

20 年来已经知道^[1-8], 这种池火以规则的频率脉动着, 从它们的底部释放出巨大的环状涡旋(拟序结构)。所不了解的是, 为什么 $f^2 = 2.2/D$ 描述的池火焰振荡的脱落频率, 大于火焰底部直径 (0.03—60m) 的 3 个数量级?

这种情况示于图 6, 图中包括了有关这个问题的所有可以得到的数据。因为图 6 中所示出的数据代表了从甲醇到 JP4 的范围广泛的燃料, 与燃料类型没有明显的关系, 所以对这个问题回答是取决于问题的流体力学方面, 而不是取决于问题的燃烧或传热方面。

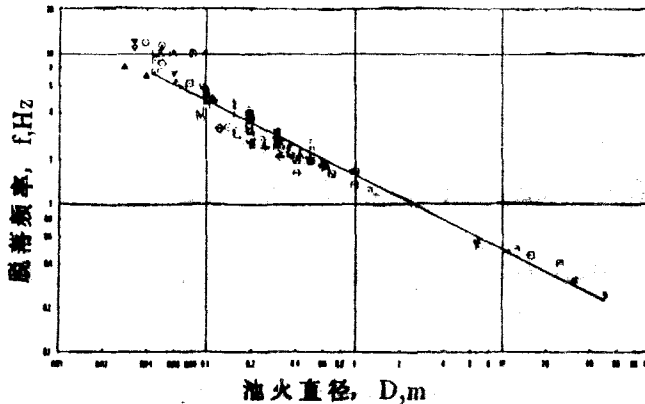


图 6 池火涡旋脱落频率与池火底部直径的函数关系。数据包括: 对于液体, 乙醇, 甲醇, JP4, 各种油类, 汽油, 煤油, 丙酮, 庚烷, 己烷, 戊烷; 对于固体, 有机玻璃, 聚氨酯; 木材; 对于气体, 天然气, 丙烷

1. McCamy, C. S., "A Fire-Band Recording Spectroradiometer." *J. of Res. at NBS, Research Paper 2678*, 293—299, 1956
2. Byram, G. M. and Nelson, R. M., "The Modeling of Pulsating Fires," *Fire Technology*, 6, 2, 102—110, 1970
3. Portscht, R., "Studies on Characteristic Fluctuation of the Flame Radiation Emitted by Fires," *Comb. Sci. Tech.*, 10, 73—84, 1975
4. Sibulkin, M. and Hanson, A. G., "Experimental Study of Flame Spreading Over a Horizontal Fuel Surface." *Comb. Sci. Tech.*, 10, 85—92, 1975

5. Hertzberg, M. et al., "The Diffusion Flame in Free Convection," US Bureau of Mines Report R 18263, Washington D. C., 1978. 33pp. And private communication, February 6, 1989
6. McCaffrey, B. J., "Purely Buoyant Diffusion Flames," NBS Report 79-1910, 1979. And private communication, Jan. 20, 1989
7. Detriche, P. and Lanore, J. C., "An Acoustic Study of Pulsation Characteristics of Fires," *Fire Technology*, 16, 204-211, 1980
8. Cox, G. and Chitty, R., "A Study of the Deterministic Properties of Unbounded Fire Plumes," *Combustion and Flame*, 39, 191-209, 1980

31 凝结“爆炸”事件

Peter Griffith

Massachusetts 理工学院机械工程系

导致凝结事件发生的激发现象是什么？

液体及蒸气的热性质、加热不足和系统压力的怎样的组合导致凝结事件发生？

能够消除凝结事件可能发生的稳定因素是什么？这些因素包括不凝结气体，但是也许还有其他的因素。

几乎任何时候冷水与蒸汽相接触，就有可能发生凝结事件。这就是说，蒸汽在冷水上的有规律的平稳的凝结为迅速的凝结所代替，结果产生弥散相的雾化。这种雾化是由两个相之间的相对运动所引起。蒸汽压的迅速下降引起液体的迅速运动，并且往往导致发生水击。

凝结事件与液-液爆炸事件之间有某些表现相似性。例如，当液态天然气洒在水池上时，它有时只是平缓地蒸发。可是，如果它受到相当大的扰动，那就可能发生一场液体爆炸。这显然是在下述情况下发生的：当两个液体相之间的相对速度，或者也许是析出的蒸气与液态天然气之间的相对速度，大得使液态天然气破碎成非常小的液滴并且蒸气是爆炸式地析出时。联系这些外表上无关的现象的线索，是弥散相的雾化，它是析出相或凝结相与液体之间相对运动的结果。有一个共同的稳定性数值能把易发生爆炸或爆聚行为的系统与不易发生这些行为的系统区别开吗？我想应该有，但是我不知道应当怎样表达出它。

32 云团中的闪电

Bernard Vonnegut

New York 州立大学大气科学研究中心

关于云体中如何发生闪电的几个问题是：

水粒子是怎样变成带电的？

产生云体电场所需的能源是什么？

为什么通常的雷雨云偶极子在顶部是阳电而在底部是阴电？

带电对云体内发生的过程的影响是什么？

雷的声波能够影响云体的空气动力学性质吗？

闪电袭击后雨滴落得更快吗？

到目前为止，关于带电过程的开始和继续的机理尚无大家一致的意见。两个主要的思想

大致是：先带电，并且事实上可能有助于雨的形成；相反，先降雨，然后引起带电。
像上面这些问题的回答，很大程度上将取决于最终确定闪电的起因是什么。

33 Willmarth 小型讨论会上关于湍流壁面层结构研究新方向的问题

Ronald F Blackwelder Ronald L Panton James M Wallace

南 California 大学

Texas 大学

Maryland 大学

33.1 引言

在湍流中观察到重复发生某些运动图型。试图搞清这些事件，确定它们的相互关系，确定它们的重要性，称为**对湍动涡的结构研究**。1988年11月18—19日，湍流结构研究组在 Michigan 大学校园内举行了一次小型讨论会。这是向即将退休的 William W Willmarth 教授表示致敬而举行的讨论会，Willmarth 教授是这一领域的开创性实验工作者之一。

最近几年来已经看到，在实验设备和用计算机直接数值仿真湍流流动两方面都有了重大改进。目前已有相当大数量的可用新资料，而且今后有可能产生更多得多的新资料。正是在这种背景下，邀请了一些研究人员举行了一次小型讨论会，试图对湍流壁面层研究的当前发展状况作出估价，并提出今后的研究方向。

讨论会的议程以重要的术语和专门词汇的综述评论开始。Stanford 大学的 Stephen Kline 教授和美国航空航天局 Ames 的 Steve Robinson 已经编出了一个术语表，他们给与会者提供了进行综述评论的初步材料。Steve Robinson 也提出了**事实、推论和假定** (Facts, Inferences, and Fiction) 的当前文本，即关于 Kline 和 Robinson 的数据总汇及解释的最新资料。在后来的一次会上有几位发言人提出了如下问题：

为了确认、确定、证明和发展体现壁面层结构有关概念的理论 and 模型，需要一些什么新的数据？

然后小组讨论了来自上面这些描述的课题。由于对理论和模拟进行讨论的结果，安排了一次称为**体现拟序结构知识的理论和模型**的会议，作为1990年5月在 Tucson 举行的第11届美国应用力学大会的一个部分。

最后面这次会议是用来使与会者提出他们所考虑的最重要的悬而未决问题。这些问题是本报告的内容。有必要把这些问题分成若干类，并且精炼地概述其主要的思想。也列出了与会者的姓名及工作单位¹⁾。

33.2 背景和术语

文献中有许多不同的术语常用来描述存在于湍流流动中的涡结构 (eddy structures)。在这次小型讨论会上，在针对澄清这些术语中的若干术语以避免今后发生混乱方面作了一些工作。

同意“猝发过程 (bursting process)”是如下一系列事件的总称：在这一系列事件过程中，起初包含在静止壁面低速区内的流体，以变得越来越混乱的运动离开该壁面。这取代了以前在文献中使用的术语“猝发 (burst)”而强调了在壁面区发生的是一系列事件。

1) 名单略。——译者

在一光滑的壁面上，在流动方向大大伸长的低速区域称为“低速脉线 (low speed streaks)”。常常，低速脉线的一些部分自壁面离开，也就是 $y^+ > 10$ 。当这种上升的流体进一步自壁面离开时，就称之为“喷发 (ejection)”，它并且组成向外运动的低速流体。

从外层（因而具有大的速度）以相对于壁面倾斜某一角度流到壁面区的流体的大尺度运动，称为“扫掠 (sweeps)”。 “阱坑 (pocket)” 是可能与某种类型扫掠事件有关的流动显示结果。这些结构单元也对 Reynolds 剪应力有显著的贡献。

一个意见不一致的定义是“涡旋 (vortex)”。看来还没有一个很好的可用的涡旋定义，尽管事实上涡量在数学上是很好定义了的。对于各种旋拧运动 (swirling motions)，这个术语可能不得不继续作为一个含糊的一类。Robinson 和 Kline 的一本最新专门术语表将即出版。

33.3 结构的描述，动力学和演化

猝发过程与造成许多有关结构单元的单一整体涡结构有关吗？或者是它构成许多相对较小的独立结构单元吗？

有更好的方法从有限的实验室数据推出系综平均结构性质吗？数值仿真能够加强这种教学吗？

结构单元的时间演化是什么？结构的时间发生是准周期的，此周期尺度是怎样的？结构单元的长度尺度怎样增大？以什么速率增大？

描述某一结构事件最好是用运动学，动量-力，能量-功，涡量-应变，嫡-螺旋度 (helicity)？或者用另外的观点？

低速脉线是如何与产生结构单元（例如喷发和扫掠）以及如何与壁面应力相联系的？产生这些脉线以及它们的展向间距为 80—100 壁面单位的机理是什么？

上面是涉及结构研究的一些最重要的基础性描述问题。近壁区内意见最普遍一致的结构是低速脉线。许多研究人员已经研究过脉线，它们所有的 3 维的长度尺度和它们的持续时间都是已知的。一个产生湍流能量的主要（但不是唯一）的机理是低速脉线部分的上升和从壁面离开的流体的喷发。这一事件的空间尺度和时间尺度最近已经确定，此外，已经证明，往往发生来自同样一些低速脉线的多个喷发。如果可以找到低速脉线的起源，那就能够改进控制它们发展成猝发的方法。

33.4 内剪切流动

实验和数值仿真揭示，在近壁面区经常有强的内剪切层（在法向和展向两个方向上）。这些剪切层的源和意义是什么？它们如何与其他结构单元相联系？

大多数与会者肯定了强的内剪切层的出现。这些剪切层出现在如下几种情形下：例如，低速脉线与周围流体之间的界面处。内剪切层一定有弯曲的速度分布廓线并且与大的壁面压强有关。关于内剪切流动的可能不稳定的进一步讨论见下面**不稳定性**一节。

33.5 涡旋结构

在壁面层中观察到的结构单元是涡旋结构的一部分吗？如果是，那它是什么类型的？

可以怎样把涡旋动力学的知识应用于了解这些结构的起源、演化和动力学？

具有低压核心的强马蹄涡旋和半边涡旋已在数值仿真中观察到，并且已从流动显示和实验室测量中发现这些涡旋的某些证据。虽然已经把受扰动涡量场的演化假设为这些涡旋的起源，但是尚未确定其正确性。

33.6 不稳定性

某些确定的结构单元的增长和发展可以解释成局部对流不稳定性的结果吗?

有如下这样一个假设:速度分布廓线是短暂时间弯曲的,并且存在足够长的时间使得无粘性不稳定性可以显著地增长而且对湍流的产生作出贡献。猝发过程的这一方面依然是一个悬而未决的问题。

另外一个观点如下。湍流的产生是通过来自远方的一些事件所施加的有限压强图型而开始的,这种压强图型与某确定的速度图型相互作用着。

局部不稳定性与远方压强触发事件之间的关系问题,也是下一问题的一部分。

33.7 内层与外层的相互作用

外层流动中的大尺度单元在空间上和时间上是与小尺度内层流动单元相联系的吗?

猝发现象是时间上准周期地(当然是以平均的频率)发生的。现有证据表明(但确实不是所有研究者都这样认为)具有内变量的频率尺度(存在某种混合标度的证据)。一致的意见是,需要更多的工作来确定,壁面区与外部流场之间是否存在相互作用以及这种相互作用能够怎样影响猝发频率标度。

33.8 Reynolds 数的影响

Reynolds 数对结构单元及这些结构单元的特性的影响是什么?

增大 Reynolds 数实质上意味着,外部流动的尺寸变成大于壁面区的尺度。为了保持相似性,“遥远处”相互作用,如上面不稳定性及内层与外层的相互作用两小节所述,必须来自 log 区。

悬而未决的困难问题之一,是 Reynolds 数对猝发过程结构的影响。对于实验室和计算机仿真二者,一个有关的困难是如何从 Reynolds 数的影响中区分分辨率误差。在非常高的 Reynolds 数下,不能证实结构贡献给湍流产生的作用量与低 Reynolds 数下结构贡献的量一样。Re 的主要影响是 log 区的膨胀和中尺度涡的出现。在随 Re 膨胀的 log 区建立过程的尺度尚未得到了解。

33.9 非典型流动

诸如壁面粗糙度、压强梯度、表面曲率及 3 维性之类的参量,它们对结构单元的影响是什么?

结构的演化历史如何随上述各参量而变化?

来自不同结构单元的 Reynolds 应力贡献如何随各参量而变化,是以结构为基础的计算格式的中心问题。突出的一致意见是,在今后,应把更多的研究工作放在其他非典型的参量上,如平衡的压强梯度、粗糙度、表面曲率,等等。

33.10 模拟

必须将哪些物理机理结合到概念性模型中以恰当表达壁面层动力学?

对于简单的流动单元,能够构造一些有解的简单模型吗?例如,3 维涡可以变换成一个剪切层吗?

怎样才能把这些结构的知识结合到整体计算模型中去,以便计算湍流对升力、阻力及压力脉动之类的影响?

模拟需要一种新型的间歇性随机数学吗?

在表述有界湍流流动壁面层的分析模型和理论方面需要更多的研究工作。这方面的工作没有与实验方面的工作保持一致步调，这主要是由于表述2维或3维非定常模型很困难。数值仿真数据的有效性大大有助于解释壁面区内的某些事件，但是，数值仿真本身并不能产生能够说明流动的物理机理的数学模型。目前有了大量的资料，但是，还严重缺乏使用能够得到分析计算格式的概念性模型来解释这些资料。

33.11 涡的控制

怎样才能控制这些结构，以便获得像减阻和降低噪声之类的有益结果？

改进基于结构概念的模拟，应当提高我们的计算能力，来获得提供技术上控制有益的流动变化的方法。

33.12 小 结

过去几年已经看到，我们在了解典型湍流壁面流动（管流，槽流以及无压强梯度的边界层流动）的结构方面有了良好的进展。现代数值仿真和实验技术，无疑已经产生，并且继续产生新的数据和思想。把这些知识推广到非典型流动是今后的主要目标。把数值仿真和实验二者推广到高 Reynolds 数是非常困难的问题，需要集中努力工作。以结构为基础的湍流计算方法，是一个重大挑战性任务。

某些可能影响结构研究的新思想刚刚冒出地平线。这些方法利用了非线性力学和动力学系统。分解定理已经应用来关联数据场，以抽取出具有大部能量、涡量等的涡或某种其他参量。当研究来自动力学系统的方法时，这些涡看来抓住了猝发过程的某些本质性的单元。另一方面，来自浑沌领域的数学模型已经证实，这种方法可以表达出某些观察到的湍流特征。在这些新领域需要进一步的研究工作。

董务民译自： *Appl. Mech. Rev.*, 43, 8 (1990) : 153—170.

~~~~~  
(上接第 528 页)

目前，这种计算能力正在用来彻底检验和发展一些特殊种类流动的新概念和新方法，也用来改进和校准半经验的实际模型，这些模型不太精确，可是可以应用于较广泛的流动种类，例如广泛用于计算速度场低阶矩的那些流动 [这几页是由 Reynolds (1976) 和 Zeman (1981) 综述的]。

工业和环境问题流动过程的大多数计算不是解偏微分方程组，而是计算代数表达式构成的公式或一阶微分方程组。这些公式只应用于某些有限范围的流动，它们的基础通常是相当大量研究的成果或者是经验关系式。

例如，目前用于复杂地形和表面非均匀体上方的空气流动的公式和简单计算机程序（第 5.2 节中所叙述的），都是基于湍流流动的最新理论和先进的计算模拟，基于在实验室和现场进行的许多实验——事实上，它们都是专家系统！在许多工业流动问题中，把导出计算起来简单的新公式的几种技术同样结合起来的办法，发现是流动计算的最合适的方法。对于许多种流动问题，计算流体力学对实用程序、公式和专家系统的这种贡献，同提供计算（借助于巨大的计算能力）每种情况下的整个流场的算法相比，可能是更有力的贡献。

**参考文献** (107篇，略)

董务民译自： *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23 (1991): 1—41.