



编者按语: Batchelor 流体力学奖和 Hill 固体力学奖是国际理论与应用力学联合会 (IUTAM) 设立的两个奖项, 旨在表彰获奖者过去十年内在其力学分支学科研究中所做出的重要贡献. Batchelor 流体力学奖和 Hill 固体力学奖每 4 年评选一次, 在第 22 届国际理论与应用力学大会 (8 月 24~29 日, 澳大利亚阿德莱德) 上第一次颁奖. Howard Stone 教授和 Michael Ortiz 教授分别是 Batchelor 奖和 Hill 奖的获奖人. 本刊在《简评》栏目刊登胡国庆研究员和黎波教授对两位获奖者成果的简评, 并在《译文》栏目刊登两位教授的代表性论文的译文各一篇, 以饷读者.

## 第一届 Batchelor 奖获得者 Howard Stone 教授研究工作简评

胡国庆

中国科学院力学研究所, 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190

Howard Stone 是哈佛大学工程和应用数学 Vicky Joseph 教授, 因为 1998~2007 年间的出色研究成果获得 ICTAM2008 年度 Batchelor 奖. Batchelor 流体力学奖和 Rodney Hill 固体力学奖是国际理论与应用力学联合会 (International Union of Theoretical and Applied Mechanics, IUTAM) 设立的两奖项, 旨在表彰获奖者过去 10 年中在其力学分支学科研究中所取得的重要贡献. Stone 教授是 Batchelor 奖的第一位获奖人. Batchelor 奖评选委员会对 Stone 教授获奖的评价为:

“Howard Stone 由于 1998~2007 年 10 年间具有广度和深度的研究工作以及在流体力学方面广为公认的领导地位而获得承认. 他特别地因以下的开创性研究工作而众所周知: 微尺度流体力学, 包括对滑移边界条件的研究, 混合控制, 电渗流效应; 泡沫流, 特别是提出和验证了新的泡沫渗流通用方程; 表面张力和表面效应; 生物流体力学; 胶体动力学. 他具有设计和分析简单模型问题的非凡能力, 并通过理论、计算和实验方法对这些模型问题进行研究, 从而获得重要的基础认识 and 实际应用.”

Stone 教授在微尺度流体力学方面做出了很多开创性的研究工作. 微尺度流体力学和近年来迅猛发展的微流控分析芯片密切相关. 作为“芯片实验室 (Lab-on-Chips)”或“微型全分析系统 (micro total analysis systems)”概念的主要发展方向, 微流控分析芯片的目标是把整个实验室的功能, 包括采样、稀释、加试剂、反应、分离、检测等集成在一次性或可多次重复使用的微芯片上. 鉴于微流控芯片主要应用在化学和生物学科, 绝大

多数开创性研究往往首先由这些领域的学者提出和完成, 如 George Whitesides, Andreas Manz, Jed Harrison, Stephen Quake, Mike Ramsey 等均为化学或生物工程学科的专家. 但另一方面, 微流控芯片分析系统在结构上的主要特征是各种构型的微通道网络, 通过对通道内流体的操控, 完成传统生化实验的功能, 而研究与微通道相适应的微尺度流体力学是实现微流体控制的前提和基础. 在微通道中由于固体壁面对流动的影响大大增强, 流体运动呈现出与宏观尺度下不同的特性<sup>[1]</sup>. Stone 以自身在传统流体力学上的深厚造诣为基础, 通过和 Whitesides 研究小组的合作, 找准研究的切入点, 很快在微尺度流动研究中做出了引人瞩目的工作.

在生化反应中, 各种试剂的有效混合非常重要. 由于微通道中液体运动的层流流动特性 ( $Re \ll 1$ ), 混合通常只能依赖分子扩散运动, 使得混合变得困难. Stone 和 Whitesides 研究小组一起对 Y 型微通道中的流体扩散特性进行了实验观测和理论研究, 通过在共焦荧光显微镜下观测荧光物质, 获得了在层流汇聚过程中交界面上的物质扩散特性, 并建立了反应 - 扩散区的  $1/3$  标度率<sup>[2]</sup>. 他们进一步通过在微通道壁面增加一系列不对称的“突起 (ridge)”, 在压力驱动下产生类似于二次流的涡流, 从而搅拌流体, 实现高效混合<sup>[3]</sup>. 这些工作引发了如何增强微尺度混合的研究热点 (据 Web of Science 统计, 这两篇论文至目前的引用次数分别为 125 和 498).

Stone 的另一开创性工作是对微流动中液滴和气泡的研究. 在不相容的液体中形成液滴具有广泛的应用价值,

例如在药物输运和食品加工中经常使用乳液. 使用传统的“自上而下 (top-down)”方法, 很难控制液滴的形成以及液滴尺寸. 微流控芯片提供一种“自下而上 (bottom-up)”的方法来实现单个液滴的产生和控制. Stone 等人利用软光刻技术制造了 PDMS (聚二甲基硅氧烷) 通道, 采用流动聚焦 (flow focusing) 使两种液体 (水和硅油) 通过一微小缝隙, 从而在硅油中形成水滴. 通过改变两种液体的流量和流量比, 可以控制液滴尺寸 [4]. 另外, 设计相应的微通道结构, 实现了液滴的逐级破碎分裂 [5]. 在最近的实验中, 他们将通道中的液体种类增加为 3 种, 实现了在微通道中双重乳液液滴的形成, 进一步拓展了微尺度下液滴的应用范围 [6]. 和液滴相关的研究工作还包括通过微流控生成不同形状、大小和成分的固体微颗粒 [7], 通过表面附着微颗粒来改变液滴或气泡的形状 [8,9], 以及通过液滴运动增强混合 [10] 等.

在其他传统研究领域, Stone 教授的研究成果也引人注目. 他和 Koehler 等人发展了描述泡沫渗流的通用方程, 将泡沫作为多孔介质处理, 其中泡沫渗透率受到流体通道以及节点对黏性耗散的贡献大小的影响. 这一方程和他们所做的相关泡沫渗流实验符合得很好 [11]. 他们进一步研究了微尺度下的泡沫渗流 [12,13]. 在生物流体力学方面, Stone 等人建立流体力学模型来描述细菌 (*Escherichia coli*, 大肠杆菌) 在固体边界附近的顺时针圆周运动 [14]. 此外, Stone 等人通过 DNA 将一串磁性微颗粒联结起来并附着到血红细胞上作为人工鞭毛, 在外加磁场作用下推动细胞运动 [15].

Stone 教授近年来在很多领域做出了优秀的成果, 特别是在微尺度流动研究方面的杰出贡献对我们有许多借鉴和启发. 首先, 他抓住了微流控芯片这一快速发展的研究热点, 并通过和微流控芯片的开创者之一 George Whitesides 合作, 很快进入研究的主流领域. 在此基础上, Stone 根据自身在表面张力以及表面效应研究方面的深厚功底, 以微尺度下的液滴研究作为突破点, 开展了一系列具有原创性的相关工作. Stone 教授的研究具有显著风格. 与传统的流体力学研究组相比, Stone 的研究并未局限于流体力学, 而是积极地通过多学科 (化学, 生物等) 合作, 使得他的研究具有很强的应用背景, 从而获得了不同领域研究者的关注. Stone 善于采用多种研究手段, 包括实验研究, 理论建模和数值模拟, 使得研究内容丰富多彩. 例如, MIT 的 Martin Bazant 研究组具有类似的流体力学背景并从事微尺度电渗流动研究, 主要以理论分析为主, 辅以一定的数值模拟, 很少进行实验. 虽然 Bazant 有许多优秀的研究成果, 但研究方向相对单一, 基本属于机理性探索, 较难直接应用到微流控芯片上. 与哈佛大学的 George Whitesides 研究组和斯坦福大学的 Stephen Quake 研究组相比, 由于这两个研究组专业方面的先天

优势 (分别为化学专业和生物工程专业), 在微流控芯片方面所做的工作比 Stone 更具有影响力, 但他们的工作主要以基于应用的实验研究为主. Stone 从流体力学的角度出发, 对与微流控芯片应用密切相关的流动机理进行了独创性研究, 特别是针对微流控芯片具有很强应用性的特点, 他往往能将复杂的问题简化为通俗易懂的数学模型, 并通过实验手段直观地展现出来, 从而使得研究结果能为其他领域的学者所接受和借鉴, 具有广泛的影响.

## 参 考 文 献

- 1 Stone H A, Stroock A D, Ajdari A. Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annu Rev Fluid Mech*, 2004, 36: 381~411
- 2 Ismagilov R F, Stroock A D, Kenis P J A, et al. Experimental and theoretical scaling laws for transverse diffusive broadening in two-phase laminar flows in microchannels. *Phys Fluid*, 2000, 76: 2376~2378
- 3 Stroock A D, Dertinger S K W, Ajdari A, et al. Chaotic mixer for microchannels. *Science*, 2002, 295: 647~651
- 4 Anna S L, Bontoux N, Stone H A. Formation of dispersions using “flow focusing” in microchannels. *App Phys Lett*, 2003, 82: 364~366
- 5 Link D R, Anna S L, Weitz D A, Stone H A. Geometrically mediated breakup of drops in microfluidic devices. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 054503
- 6 Utada A S, Lorenceau E, Link D R, et al. Monodisperse double emulsions generated from a microcapillary device. *Science*, 2005, 308: 537~541
- 7 Xu S, Nie Z, Seo M, et al. Generation of monodisperse particles by using microfluidics: control over size, shape, and composition. *Angew Chem Int Ed*, 2005, 44: 724~728
- 8 Subramaniam A B, Abkarian M, Mahadevan L, Stone H A. Non-spherical bubbles. *Nature*, 2005, 438: 930
- 9 Subramaniam A B, Abkarian M, Stone H A. Controlled assembly of jammed colloidal shells on fluid droplets. *Nature Mater*, 2005, 4: 553~556
- 10 Stone Z B, Stone H A. Imaging and quantifying mixing in a model droplet micromixer. *Phys Fluid*, 2005, 17: 063103
- 11 Koehler S A, Hilgenfeldt S, Stone H A. A generalized view of foam drainage: experiment and theory. *Langmuir*, 2000, 16: 6327~6341
- 12 Koehler S A, Hilgenfeldt S, Stone H A. Foam drainage on the microscale I. Modeling flow through single Plateau borders. *J Col Inter Sci*, 2004, 276: 420~438
- 13 Koehler S A, Hilgenfeldt S, Stone H A. Foam drainage on the microscale II. Imaging flow through single Plateau borders. *J Col Inter Sci*, 2004, 276: 439~449
- 14 Lauga E, Diluzio W R, Whitesides G M, Stone H A. Swimming in circles: motion of bacteria near solid boundaries. *Biophys J*, 2006, 90: 400~412
- 15 Dreyfus R, Baudry J, Roper M L, et al. Microscopic artificial swimmers. *Nature*, 2005, 437: 862~865