

流体力学与生物流变学*

Alfred L Copley

美国纽约 Brooklyn 工业大学生物流变学实验室

关键词 生物流体力学；生物力学；生物流变学；内皮以内纤维蛋白衬里（EEFL）；流体力学；血流动力学；血液流变学；医学史；科学史；流体动力学；列奥那尔多·达·芬奇；血管外周流变学；流变学；血管-血液器官

“流变学 (rheology)”这一术语一般表示对物质的变形与流动的研究，从逻辑上说，也该包含流体力学。可是，我的朋友，已故的 George W Scott Blair 曾告诉我，他参与创建流变学协会的会议（1929 年于美国首都华盛顿）曾决定把流变学限于对非牛顿系统的研究。之所以做这一决定，是为了保护流变学这门新兴学科不致被其他学科所淹没。然而，早期的几次学术会议并没有强制只讨论非牛顿流体，还进而成立了**生物流变学**的组织。这些会议对于发展生物流变学已经并将继续发挥重要的作用。因为许多生物学系统尤其是**血液都是多成份的弥散体**，即使它们的各个成份都是牛顿流体，它们的总体性质也会是非牛顿的。所以在**生物流变学**（包括**血液流变学**——这是**生物流变学**迄今最为活跃的领域）历次学术会议上，也一直有人宣读经典流体力学分析的工作。

“**生物流体力学** (biofluidmechanics)”这一术语是 George Bugliarello 引入的，他将其定义为“用流体力学来研究各种生命学科中的生物流动，包括基础研究与应用研究”^[1]。最近，Bugliarello 和我针对来源于生物的流体这一方面讨论了流体力学。他的想法可以概述如下：流体力学是“把力学的原理应用于流体的流变性质所限定的具体情况，就这一意义而言，流体力学实际上是力学与流变学的结合。在经典的流体动力学中是把流体当作无粘性的”^[2]。在传统的流体力学中，流体的“应力与应变率”之间的关系是线性的，也就是“牛顿的”，其粘度与应力无关；在生物流体力学中，流体（例如血液）的应力与应变率之间的关系一般是非线性的（“非牛顿的”），而流体系统的性质则“与应力相关，甚至也与时间相关”^[2]。

因为我曾参与过作为生命科学的生物流变学的组建与发展，我想讲一讲切身的体会，主要着重讲**生物流变学**的现状。现在人们还没有普遍地认识或较广泛地知道，生物流变学这门

* 作为第 7 届国际生物流变学大会（1989 年 6 月 18—23 日，法国 Nancy）的卫星会，国际**生物流体力学与生物流变学**学术讨论会于 1989 年 6 月 25—28 日在德国慕尼黑举行。本文是国际生物流变学协会创始人之一、生物流变学杂志主编 A L Copley 教授在这次卫星会上的开幕词。文中从历史发展的角度精辟地论述了流体力学与生物流变学的关系。为了迎接第 8 届国际生物流变学大会北京卫星会（1992 年 8 月 11—13 日）的举行，本刊特登出本文的全文译文。在译文正在排印时，我们惊悉 A L Copley 教授不幸于 1992 年 1 月逝世的噩耗。在此我们谨向这位在流变学特别是**生物流变学**领域做出了卓越贡献的科学家表示最诚挚的悼念。——编者

学科的研究范围已经大大拓广，并发生了根本性的变化，尤其是在最近10年间。我想着重指出当前生物流变学新的研究范围及其拓广。而且，我要向你们讲讲我对**生物流体力学与生物流变学**之间的关系**的看法**。

我第一次听到“流变学”这个术语是在1936年，那时我是瑞士 Basel 大学学物理化学的大学生。1937年我到了美国，1939年在堪萨斯市 Kansas 大学医学院的 Hixon 医学研究实验室开始了我对**血液流动**特性的首次实验研究。研究的成果写成了论文，发表于1942年纽约市洛克菲勒研究所出版的“普通生理学杂志 (*Journal of General Physiology*)”上^[3]。我所以要提及此事，是因为正是这篇论文受到了美国与西欧流变学工作者的特别欢迎，最后促成了生物流变学建立成为一门科学。

1944年，在英国牛津举行了一次流变学与医学学术会议^[4]，邀请我去担任主席。这次会议是英国流变学俱乐部（后来更名为英国流变学协会）组织的。由于当时在打仗，我没能参加这次会议。战后，1948年在荷兰的Scheveningen举行了第1届国际流变学大会，学术委员会邀请我做了一个大会报告，题目是“生物学中的流变学问题”^[5]。我想从这一报告的引言中引述如下一段话：“必须认识流变学问题对于生物科学未来发展的重要意义。这些问题最终可能发展形成为它本身的一门分支学科。为了方便，我建议把它叫做‘生物流变学 (bio-rheology)’。可以预言，从生物流变学角度探索生命的本质与生命的起源，其范围和规模都会不断地扩大。”我还要从这个大会报告的结束语中引述如下一段话：“我相信，流变学将在明天的生物科学（包括医学）中起着极重要的作用。正如观察血液流动有助于开创流变学那样，我坚信，只要我们继续观察生命的这一很特殊的部分即血液，并观察血液的组成成份，流变学与生物学的结合注定会造福人类。”

3年后，在芝加哥召开了美国物理学会 (American Institute of Physics) 成立25周年庆祝会，而流变学协会正是该学会的创建协会之一。我应流变学协会邀请做了一个总报告，题为“血液的流变学 (The rheology of blood)”^[6]。在这一报告中，我引入了术语“血液流变学 (hemorheology)”，定义如下：“血液流变学研究血液中细胞成份与血浆成份在宏观、细观和微观尺度下的变形与流动特性，也研究与血液直接接触的血管结构的流变特性”。1966年在冰岛大学召开了国际血液流变学协会的创建会议，会议采用了上述定义。3年后在 Heidelberg 大学举行的第2届国际血液流变学学术会议^[7]期间，把血液流变学协会的范围扩大到包括生物流变学的所有领域，于是协会的名称也改为“国际生物流变学协会 (The International Society of Biorheology)”^[8]。

在我1951年给出的血液流变学定义^[6]中，已经含有把血液与血管壁看成一个实体的意思。关于这点，1960年在东京举行的第8届国际血液学大会上，我所做的有关“内皮以内纤维蛋白衬里 (Endoendothelial Fibrin Lining)”的大会报告^[9]中又明确提出了。在1981年于东京举行的第4届国际生物流变学大会上，我把这一由血管壁与血液组成的实体定义为一个器官，称为“血管-血液器官”^[10]。这一概念有助于我们给血液流变学下一个新定义，即它是研究血管-血液器官及其组成成份的生物流变学，也是研究这一器官两部分及其相互关系中所涉及的各种过程的生物流变学。**血管-血液器官渗透在所有其他器官之中**，就像神经系统一样^[10]。我把内皮以内纤维蛋白（或纤维蛋白原）衬里 (EEFL) 当作血管-血液器官两部分（即血管壁和血液）之间的重要边界或界面。和一般的说法相反，我假定EEFL

是跨毛细血管输运过程的主要渗透屏障^[11]。

生物流变学的两个领域，即血液流变学与血流动力学（hemodynamics），在生物医学科学中都已有悠久的历史^[8]。公元前3世纪，埃及著名的亚历山大医学院的Herophilus（早于公元前300年）和Erasistratos（公元前310—250年）大概是最早研究血流动力学的人，Erasistratos并且把心脏比作一个泵^[8]。体现了艺术与科学之间某种统一性或亲缘关系的列奥那多·达·芬奇（Leonardo da Vinci, 1452—1519），对于血液循环的观点是摇摆不定的^[8]。有时他接受亚里士多德（Aristotle, 公元前384—322）的观点，即血流起源于心脏。有时他又接受Galen（129—199）关于血液运动的概念，认为血流在静脉端携带着自然界的精灵，而在动脉端则携带着生命的灵魂^[8]。

达·芬奇未能认识到血液是循环运动的^[8,12-16]。尽管如此，他还是对血流动力学、血液流变学以及对生物流变学的其他一些领域做出了若干重要贡献。因为这些贡献还不为人们所知，或者尚未为人们所知，我愿意简要地介绍其中的一些。在评论心脏与其他一些器官的工作机理时，他强调了“自然界的4种动力”；即他所指的运动，重量，力和撞击。他把由于流体质点间的摩擦而在心脏中产生的热看作血管中血液的推动力^[14]。他还发现了心脏中两个新的腔室。他认为，所需的摩擦是血液在上部的腔室（即心房——译者）与下部的心室之间抛来抛去而产生的¹⁾。他不仅描述了两个心房的大小与形状，还认为两个心房同时收缩，而这时两个心室都处于舒张期^[14]。

达·芬奇对于流体力学（他称之为“水的性质”）的研究有持续的兴趣^[14]。可以认为他是采用模型来研究血流动力学的第一人。在考察心脏如何工作时，达·芬奇^[12,16]引用了他关于水流的实验。他在修建渠道时发现，当水由狭窄渠道流向较宽渠道时会形成涡（eddies）。他把这一知识用到了血液通过心瓣的流动。他还注意到了人与其他哺乳动物在解剖学上的相似性。就这样，达·芬奇在其研究中用牛心的主动脉瓣与肺动脉瓣来展示其“真实形状”^[14-16]。他比较详细地描述了如何制作这种薄玻璃模型的技术，即先将蜡液灌注到这些心瓣之内^[14-16]。他画出了血液通过主动脉瓣时的涡，这些涡使瓣尖由一侧向另一侧关闭^[16]。

还可以认为，达·芬奇在描述心脏收缩期与舒张期血液的充盈与排空时最早认识到血管壁的弹性^[14]。几年前我读了他的著作的英译本^[8,12]，其中有他画的不少图画，又发现是他最早预言了存在毛细血管（“vene chapillari”）。在生物医学文献（包括有关血液循环的文献）中还从未提到过这一点。达·芬奇用“vene”这个词有时表示静脉，有时表示血管^[13]。而且，我还发现，达·芬奇敏锐地察觉到血液是有生有灭的。他说过，血液“不断地死亡，又不断地更新”^[8,12]。医学史学家Charles Singer评价说，“达·芬奇的解剖学知识从科学上看相当于17世纪中后期的水平”^[17]。

在本报告中，我已经用了相当多的篇幅讲述了达·芬奇在生命科学（包括生物流变学）史上的某些成就。达·芬奇没有受过正规的科学教育，但他却并非学术性科学的外行，他靠自学成为一位科学家和敏锐而严格的观察者。在他的艺术与科学事业中，他很有天赋，这种天赋我不妨称之为“创造性的灵感”^[18]。正是这种灵感启迪他进行各种各样创造性的工作。

1) 达·芬奇的这一看法并不正确。事实上，血液是由心房单向地流往心室。——译者

“创造性的灵感”是促进科学知识进步的主要推动力，也是在艺术作品中形象表现人生体验的主要推动力。此外，“创造性的灵感”提供了使艺术与科学统一的要素，而达·芬奇正是体现这种统一的大师。

直接照字面来解释，血流动力学研究的是血液流动的动力学。这样一种解释并未计及血液所流经的形形色色血管在形状与内层衬里上有何不同，也没有考虑血压变化如何影响血液的流动。血流动力学也不能只限于讨论大循环，因为血流动力学也影响微循环。冈小天(Oka S)说过，“只要比较一下流体力学与流变学，就能充分说明血流动力学与血液流变学区别何在”^[19]。生命过程中的流体力学不只涉及血管-血液器官，而且它还涉及例如**血管周围空间中的流体；即组织间隙液和淋巴液。血管外周流变学(perihemorheology)**^[20]，这个新提出的术语；指的是**血管周围的流体与结构的生物流变学**。与生命过程有关的生物流体有脑脊髓液，活体中的胆汁流，尿，各种腺体产生的体液和各种管道的分泌液，等等。所以，血流动力学除了直接与血液流变学有关之外，还属于一个大领域，即参与生命过程的各种流体的流体力学领域。

1963年在美国罗得岛州 Providence 的 Brown 大学召开了第4届国际流变学大会，在该会的一部分即生物流变学讨论会上由我致开幕词，题为“**论经典流体力学可否用于生物流变学**”^[21]。我指出了，**在血液流变学中存在一些明显与经典流体力学原理不符合的现象**。首先，**我提到了所谓血浆层；就是在活体微循环中没有红细胞和白细胞的一层**；其次，我介绍了我们的观测结果，即“**如果在毛细管粘度计的玻璃内表面涂上不同的物质，则所测得的表观粘度会随之变化**”。**不同涂层对表观粘度的作用可能意义很重大**。通过毛细管的流量随涂层的性质而变，这种现象对于水是1928年由 Traube 和 Wang^[22]揭示的，对于**血液系统**则是1958年由我^[23]随后又由 Copley 和 Scott Blair^[24-28]证实的。**在玻璃毛细管内涂上纤维蛋白使表观粘度降低**，这一现象被冈小天^[29]称为“Copley-Scott Blair现象”^[11;29,30]。

由于沿壁面存在滑移，滑移的大小依赖于涂层的特性^[21]，这就“要求用一个 Helmholtz 推广的方程来取代 Poiseuille (泊肃叶) 方程”^[21]，Helmholtz 的方程是1868年发表的^[31]。在考虑分子特性均匀的牛顿流体时曾用过滑移假设。这个假设在经典流体力学中被屏弃了^[21]，可是对于像血液这样的弥散体来说，却是完全可用的。Copley 和 Scott Blair 是考察了以不同表面为边界时血液系统流过毛细血管的特性才确定了“**壁面粘附 (wall adherence)**”的存在^[23-28]。在我1963年的开幕词中，我认为：“在有壁面粘附的流动中，应该考虑到质量守恒原理不再成立。这是因为粘附在壁面上的那部分流体不再流动。我们得考虑这一事实而对基本方程做必要的修正。只要考虑了上述这些情况，那么，与经典流体力学之间的关系还是可以重新建立起来的”^[21]。

我也指出了，“**如果在一个封闭体系中可以证实有壁面粘附，那么，它和 Poiseuille 关于不动层 (immobile layer) 的概念也可能是一致的**”^[21]。Copley 和 Staple 在1959年已于仓鼠 (hamster) 颊囊的活体微循环中发现了不动层的若干实验证据^[32]。如果把不动层之上有滑移当作一个假设，那么它仍会与壁面上的零速度假设相容。我下结论说，这样看来，“**在经典流体力学与流变学之间可以存在着密切联系，而不是矛盾**”^[21]。此外，我强调说，“**物理学中的一些不同于经典流体力学的全新方法也可以用于我们的生物流变学问题**”。要知道，无论在活体系统中，还是在生物材料的体外流动中，“都有可能发生一些力学与化

学的相互作用，从而使我们在流体力学中所示范的那些纯力学方法不再能用”^[21]。

从我说这些话^[21]算起，26年已经过去了。我相信，无论是谁，只要对与生命过程有关的流体力学感兴趣，那么读一读 Aharon Katchalsky 和 A. Oplatka 所写的“力学-化学 (Mechanochemistry)”一文都会获益匪浅。这篇文章载于1965年出版的同一流变学大会论文集^[33]中。

在此期间，生物流变学这门学科也有了进展，我们不能再把它只说成是来源于生物的那些流体的流变学。我们不能再无视如下的事实：在来源于生物的那些流体之间还需再细加区分，即把与生命过程有关的生物流体同与生命过程无关的生物流体区分开来，后者如油，乳胶，丝，奶制品等。

我还想再强调一下我在1981年第4届国际生物流变学大会上所说的一些话。在题为“生物流变学学科的未来”的大会报告^[10]中，我提议把生物流变学当作生命科学中所缺失的链环。当时我着重指出，“我们这些人，不管其工作与贡献在于理论、实验还是应用（包括临床）方面，都是从事专业的生物流变学工作者，都应努力完成传播生物流变学的使命，要把生物流变学当作重要的链环，而至今大多数生命学科在其进展中却缺少这样的链环”^[10]。至于为什么要把它当作缺失的链环，Alex Silberberg^[34]最近做了如下的解释：“生命过程的最显著特征，很可能在于这些过程涉及有机体形状的变化和各种相对运动，不只活体系统内各部分之间有各种相对运动，而且活体系统相对于其周围有生命与无生命的环境也有各种相对运动。活体系统的所有结构特点与构造特点，以及在系统内发生的各种化学过程，大都是为了达到上述的最终目的而设计的。所谓生命，就是依靠系统自身所产生的力而赋予它变形与流动的能力。这样一种能力对于系统的复制，生殖，以及消化富含能量的必要化学物质以维持生命功能、排泄废物来说，都是必不可少的。由此可知，各种生物系统如何变形与流动；如何应付周围的力学环境及其自身的力学特性；也就是说，它们在生物流变学方面如何工作，可以看作是一个基本的（如果不说是唯一的话）进化论的‘设计依据’”。

Silberberg^[34]对于生物力学与生物流变学之间的关系是这样说的：“应该更普遍地认识到，生物力学与生物流变学，只不过是一个硬币的两面。其中前者探讨各种生物系统的动力学与动力学 (kinetics)，也就是作用于系统上的力；后者则研究系统的响应特性，也就是根据系统的流变性质做出响应而产生的内力。在许多情况下，不管‘外’力还是‘内’力，都是由于活体系统各部分的结构或力学构造具有某些生物流变特性而产生的。这使我称之为‘匹配’，它可以算是进化论的另一‘设计依据’。”

1986年，Alex Silberberg 和我为“生物流变学”杂志写的一篇社论^[36]中说道：“确实，生物流变学这门学科并不只是流变学的一个分支。当然，按它的本意，生物流变学就是研究生物材料的变形与流动的，也就是生物材料的流变学，不管是在体外还是在生物范围内。可是，与纯粹的流变学不同，生物流变学不只研究生物材料有‘什么样的’行为，还要研究‘为什么’它们有这些行为，而且这后一点占主要地位。”我想，对于任何认识到生物流变学意义的人说来，上述生物流变学的新的学科范围是很重要的。所以，我要继续从这篇社论中引用如下一段话：“这样一来，生物材料的流变特性及其细胞层次与分子层次的解释，就不能单纯地当作材料属性来研究。我们不能不把它们与运输的需要和运动能力的需要联系起来，并且从而与生物系统的分子的、结构的和热力学的描述联系起来。在活体系统中，正因

为除了某一适当水平的流体静压之外还存在力学应力，才得以不只能建立压力梯度，而且还能产生必需的化学势，包括在活体系统中馈送和归零电化学势梯度。在生物材料中出现摩擦类型的力学能损失，主要是由于各部分间有相对流动，并由此引起粘性耗散的缘故。因此，许多生物流变学的研究都在于用结构与分子形态学的观点和各部分相对流动的观点来对观测到的事实做出解释”^[35]。

“生物流变学面临的根本任务是要了解为什么大自然会建成现在这种样子，特别是要了解为什么进化成某些结构与构造，又为什么使用这些材料和尺度。既然运动和伴随运动而产生的能量传递是生命过程的精髓，那么，只要我们讨论活的物质，变形（包括流动）问题就特别接近于事物的核心。很明显，生物流变学并不意味着包罗万象，不过它所研究的对象确实远不止是来源于生物的材料流变特性。活体系统的精髓要求这一系统至少有些部分处于非平衡态。于是，在生物材料中伴随着纯力学能的损失不可避免地会发生化学的再生、生长与衰亡等现象”^[36]。

按照惯例（虽然不是按照逻辑），牛顿流体的流体力学大都不包含在流变学之中。可是它们并不一定不包含在生物流变学这门学科之中^[36]。

生物流变学作为一门有机化的学科在其31年的短短历史中已经取得了巨大的进展。这一进程开始于1958年，当时在伦敦大学慈爱红十字医院医学院召开了“**血流与血管壁关系**”学术会议^[36]。1959年，在牛津大学的生理实验室召开了“**血液和其他生物系统的流动性质**”学术会议，进行了许多不同领域的交流。这次会议是由法拉第协会（Faraday Society）与英国流变学协会共同召开的^[27]。这导致在同一年决定创办一份国际性刊物——“**生物流变学 (Biorheology)**”杂志，第1期是在1962年由Pergamon出版社出版的。

无疑，国际生物流变学协会及其历次国际大会，以及日益增多的国际性、全国性和地区性的生物流变学及其各领域的协会和团体，都对生物流变学这门学科的进展做出了巨大贡献。国际生物流变学协会的两个正式刊物“**生物流变学**”和“**临床血液流变学 (Clinical Hemorheology)**”也做了很大贡献。

生物流变学这门学科正在迅速地扩展，并同越来越多的生命学科建立了联系。目前，已有17个左右的领域属于生物流变学这门学科的范围。上星期我们开国际生物流变学大会时，对于约14个生物流变学的领域进行了交流。在全体大会报告中两个新领域刚刚崭露头角：瑞典Göteborg大学的Patrick Sourander介绍了神经生物流变学（neurobiorheology）^[38]，而美国圣迭戈的加利福尼亚大学的Shu Chien（钱煦）则探讨了“**分子生物流变学 (molecular biorheology)**”^[39]。

结 语

在这次学术讨论会的开幕词的前面部分，我提到了生物流变学这门学科的新的研究范围及其拓广。这一点是Alex Silberberg和我3年前在“**生物流变学**”杂志的社论中就强调了的。我愿意再一次强调指出，生物流变学这门学科是许多（如果不说是大多数的话）生命学科的链环。

生物流变学是一门多学科交叉的学科，因此只要各生命学科中涉及对运动与运输的力学响应，那么在哪些方面生物流变学就是联系它们的链环。生物流变学并不是只讨论力学性质

（下转第227页）

- 66 Coats K H. *ibid*, 20 (1980) : 363—376
 67 Nghiem L T, et al. *ibid*, 21 (1981) : 686—698
 68 Young L C, et al. *ibid*, 23 (1983) : 727—742
 69 Aziz K. Seminar on North Sea Condensate Reservoirs & Their Development (1982) : 53--64
 70 Chien M C H, et al. SPE13385 (1985)
 71 Chase C A Jr, et al. SPE10514 (1982)
 72 Ko S C M. CIM paper 82—33—76 (1982)
 73 Lo T S. SPE13518 (1985)
 74 Bolling J D. SPE15998 (1987)
 75 Mott R E, et al. AEE Winfrith Report R-2171 (1987)
 76 Tompkins M W, et al. SPE17353 (1988)
 77 Kendall R P, et al. SPE11483 (1983)

ADVANCES IN THE RESEARCH FOR GAS-CONDENSATE FLUID FLOWS THROUGH POROUS MEDIA

Ouyang Liang-biao

Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China

Abstract This paper outlines the status of researches for gas-condensate fluid flows through porous media. Characteristics, well-testing and developing schemes of gas-condensate reservoirs are briefly described. Their corresponding governing equations, analytical solutions and numerical simulations are also discussed. Finally, some key research topics of gas-condensate fluid flow through porous media are proposed.

Keywords *gas-condensate reservoir; fluid flow through porous media; well-testing analysis; analytical solution; numerical simulation*

(上接第 276 页)

的。它也研究在自然界中这些性质出现在什么样的结构中，又是供何种功能之用。所以，生物流变学不应与生物力学或其分支（包括生物流体力学）相混淆。据 Alex Silberberg 两天前在法国的 Nancy 向我说的定义，“生物力学和生物流体力学指的是应用于生物流变系统的力学和流体力学”^[38]。而生物流变学的各个领域则在生命过程这一背景之下研究生物材料的变形（包括流动）。

简要地总结一下，可以说，生物流变学这门学科作为与其他生命学科联系的链环正在相当迅速地扩展，因而对于那些至今尚未确立这种联系的许多生命学科讲来，它正变得重要起来。

生物流变学这门生命科学最终将会使我们更接近于了解生命的起源。在这一不断探索的过程中，专攻生物流变学的那些大学生将处于各生命学科的最前沿，他们将和所有人一样，怀着敬畏的心情，面对着生命的奥秘与奇迹。

参考文献 (39篇，略)

严宗毅译自：*Biorheology*, 27, 1 (1990): 3—19. (俞稼梁 董务民校)