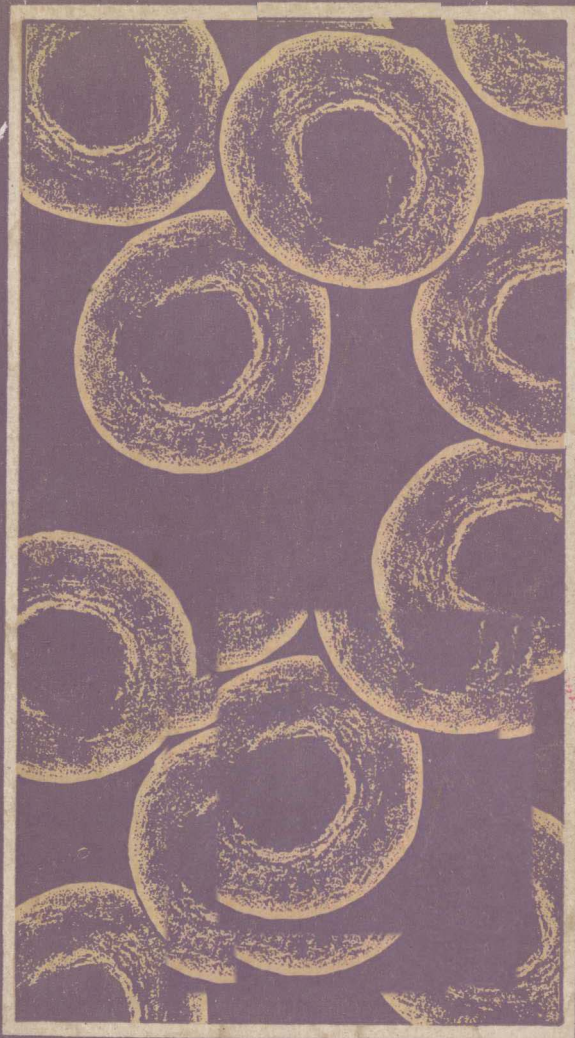




三物流变学

吴云鹏 梁子钧 编著

教育出版社

59.52
W86

高等学校教学参考丛书

生物流变学

吴云鹏 梁子钧 编著

内 容 提 要

本书系统地阐述了生物流变学的基础理论、实验测定、分析方法及医学临床应用等。书中反映了编者的科研成果以及国内外的最新成就。同时,为了便于医学工作者和有关专业的学生阅读,在附录中介绍了张量分析、量纲分析等流变力学基础内容。

全书共分十章。第一、二章为生物流变学概论及理论基础;第三、四、五章详细阐述了血液流变学及其在医学临床方面的应用;第七、八章为血管流变学与软组织流变学;第六、九两章分别介绍了其他体液流变学及肺流变学。最后一章则介绍了血液流变学中的电现象。

本书可供从事医学、生物物理、生物医学工程、力学等学科的广大科技人员和医务人员阅读,也可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

生物流变学

吴云鹏 梁子钧 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 16.625 字数 400 000

1988 年 10 月第 1 版 1988 年 10 月第 1 次印刷

印数 0001— 1 340

ISBN7-04-000820-3/Q·53

定价 4.35 元

前 言

生物流变学是综合医学、生物学、流体力学、固体力学、生物化学、物理学等发展起来的一门新兴学科。它对医学、生物学、生态学、航天生理学以及现代生物医学工程等都具有重要的理论意义与实用价值。目前,有关生物流变学的国内外学术会议频繁,《生物流变学》、《临床血液流变学》等国际性生物流变学专刊相继问世。随着医学和流变学的进展,生物流变学亦得到迅猛发展。

生物流变学是研究构成生物体主要物质的流变特性及生物组织的力学特性等问题,观察分析生物体内器官、组织、细胞乃至分子水平的流变现象和应用,特别是在临床医学方面的应用问题。诸如流变学基础、血液的流变特性、微循环、血管流变学、临床血液流变学,其他体液的流变学、软组织流变学以及肺流变学等,都为生物流变学的重要组成部分。

本书是生物物理学教学参考丛书之一,由吴云鹏、梁子钧主编。其中第三、四、五章由梁子钧编写;六、七、九、十章由吴云鹏编写;第一、二章及附录为杨瑞芳编写;第八章由王公瑞编写。由吴云鹏通校定稿。

作者衷心感谢冯元桢、黄敬荣、毛昭宪、李仁师、陈又亮、Barbenel等教授,他们的著作和惠赠的有关资料对于本书的编写出版,具有很大的帮助。

由于作者的水平有限,书中缺点、错误或不当之处在所难免,恳请广大读者予以批评指正。

作 者

1986年12月

目 录

第一章 序言

§ 1 生物流变学及其历史起源	1
§ 2 流变异常现象	4
2.1 射流稳定性	5
2.2 射流膨胀性	5
2.3 剪切稀化与剪切增稠	6
2.4 沿杆爬升	6
2.5 减阻效应(湍流减阻)	7
2.6 旋涡抑制	7
2.7 无管虹吸	7
2.8 触变现象	8
§ 3 非牛顿流体的分类	8
3.1 不依赖于时间的流体	8
3.2 触变性流体	9
3.3 线性粘弹性体	9
3.4 非线性粘弹性体	10

第二章 生物流变学的理论基础

§ 1 连续体假设	12
§ 2 运动的描述	13
§ 3 流变运动学	14
3.1 变形	14
3.2 应变	16
§ 4 流变动力学	24
4.1 应力的概念	24
4.2 应力分量	25

4.3	任意表面上的应力	27
4.4	平衡方程	29
4.5	运动方程	31
4.6	应力分量的坐标变换	31
§ 5	流变状态方程	34
§ 6	不可压缩物体	35
§ 7	虎克固体和牛顿流体	39
§ 8	主应力与主轴、莫尔图	43
§ 9	血液的本构方程	49
§ 10	非牛顿流体的本构关系	51
10.1	幂定律流体	52
10.2	Bingham 流体(粘塑性流体)	53
10.3	Casson 公式	53
10.4	幂级数定律	54
10.5	其他公式	54
§ 11	触变性流体	55
§ 12	粘弹性物质	56
12.1	应力松弛、蠕变与迟滞现象	56
12.2	基本流变模型	56
§ 13	粘弹性物质的变形振荡分析	64
§ 14	Boltzmann 叠加原理	66
§ 15	宏观与微观流变学	67

第三章 血液流变学 77

§ 1	血液的物理和物理化学特性	77
1.1	血液的组成及其特点	77
1.2	血液的重要物理和物理化学特性	79
§ 2	血液的流变特性	93
2.1	血液粘度对切变率的依赖性——非牛顿粘度	94
2.2	血液的屈服应力	97

2.3	血液粘度对时间的依赖性——触变性和切变稀化以及粘弹性	104
§ 3	影响血液粘性的诸因素——血液微观流变学	129
3.1	血细胞的总体积, 即红细胞压积	130
3.2	红细胞的大小和形态	137
3.3	红细胞之间的相互作用——聚集和分散	139
3.4	红细胞的变形能力和柔顺性	150
3.5	血浆、血清粘度	175
第四章	微循环的血液流变学	187
§ 1	微循环是血液非牛顿粘性的显现场所	187
§ 2	微循环的结构和功能特点	189
§ 3	微循环的血液流变学特点	196
3.1	血管的管径大小对血液粘度的影响	197
3.2	团块流和血浆的循环流动 (Bolus flow)	210
3.3	血浆在毛细血管内外的流动和渗透	213
3.4	血管壁的通透性	216
第五章	临床血液流变学	220
§ 1	评价微循环障碍和弥漫性血管内凝血 (DIC) 发生的原因	221
§ 2	缺血性和出血性脑中风的鉴别和诊断研究	224
§ 3	评定疾病的临床症状表现、病情和病变发展的程度	226
§ 4	估计肿瘤的发生和转移的危险性	230
§ 5	冠心病的血液流变学	233
5.1	心绞痛和心肌梗塞的诊断和鉴别诊断	233
5.2	冠心病的预后判断和疗效观察	238
5.3	冠心病和心肌梗塞发作的警报信号	242
5.4	冠心病和心肌梗塞复发的预测	244
5.5	冠心病的危险因素	245
5.6	动脉粥样硬化的发病机理研究	265

5.7 动脉粥样硬化和心肌梗塞的发生与血液粘度关系的动物模型研究	269
5.8 一些治疗冠心病药物的血液流变学作用原理	273
§ 6 周围血管疾病的血液流变学	283
6.1 周围血管疾病的血液流变学改变的特点	283
6.2 周围血管疾病的血液流变学疗法	292
§ 7 血液粘度异常综合症的诊断和分型	300
第六章 其他体液的流变特性	307
§ 1 血浆的流变特性	308
§ 2 人工血液的流变特性	311
§ 3 呼吸道粘液和痰的流变特性	319
3.1 离体实验	327
3.2 在体实验	328
§ 4 唾液的流变特性	329
§ 5 关节软骨及滑液的流变特性	332
5.1 软骨的构造、粘弹性及润滑性	332
5.2 关节滑液的流变特性	336
§ 6 胆汁的流变特性	341
§ 7 胃粘蛋白液的流变特性	351
§ 8 有关生殖体液的流变特性	352
8.1 子宫颈液的流变特性	352
8.2 精液和受精卵的流变特性	354
§ 9 染色体的流变特性	355
第七章 血管流变学	360
§ 1 动脉血管的构造及功能	360
1.1 内膜	360
1.2 中层	360
1.3 外层膜	361

§ 2 静脉血管的构造及功能	363
2.1 大静脉	364
2.2 中静脉	364
2.3 小静脉	364
2.4 静脉瓣	365
§ 3 微循环中的微血管及毛细血管	366
§ 4 血管的几何特性及血管壁的力学参数	367
4.1 血管的几何特性	367
4.2 血管壁的力学参数	378
§ 5 血管壁的粘弹性	381
§ 6 血管壁的松弛和蠕变	391
第八章 生物软组织的流变特性	394
§ 1 引言	394
§ 2 生物软组织的粘弹性表现	394
2.1 弹性滞后	394
2.2 应力松弛	397
2.3 蠕变	399
§ 3 生物软组织实验	400
3.1 生物软组织实验台	400
3.2 生物软组织实验准备	403
3.3 生物软组织材料的预调	403
§ 4 生理状态对生物软组织流变特性的影响	405
§ 5 生物软组织粘弹性的准线性理论	407
5.1 弹性响应 $T^{(e)}(\lambda)$	408
5.2 应力历程效应 $G(t)$	408
§ 6 肌肉的收缩	410
6.1 骨骼肌的结构和收缩机理	410
6.2 骨骼肌的强直	411
6.3 骨骼肌强直收缩的 Hill 方程	412
6.4 线性粘弹性理论在骨骼肌中的应用	416

§ 7 心肌松弛状态下的性质	421
----------------	-----

第九章 肺流变学 427

§ 1 肺通气概述	427
1.1 解剖结构	427
1.2 肺泡	428
1.3 肺通气原理	430
1.4 肺容量	432
1.5 肺通气与肺血流的调节	435
§ 2 肺组织的弹性与应力应变	436
2.1 肺弹性概念	436
2.2 肺组织的应力张量	437
2.3 肺实质的本构关系	440
§ 3 肺泡的血液流动	453
3.1 肺毛细血管网络的几何模型	453
3.2 肺泡隔膜弹性及片流厚度变化	456
3.3 肺泡隔膜内片流的模化实验	458
3.4 一维肺泡隔膜的片流理论	464
3.5 二维肺泡隔膜的片流理论与实验分析	468

第十章 血液和血管壁的电学性质 479

§ 1 血液的电学性质	479
1.1 红细胞的静息电位	479
1.2 电二重层现象及血液细胞的迁移率	480
1.3 流动电位与电渗	483
1.4 红细胞膜间的势能曲线	484
§ 2 血管壁的电学性质	485
2.1 血管系统概述	485
2.2 血管壁的电学性质及医学意义	486
2.3 双电荷层理论	488

2.4 毛细血管壁上具有电荷分布时对流动的影响·····	491
附录 I 张量分析·····	494
附录 II 量纲分析·····	514

第一章 序 言

§1 生物流变学及其历史起源

要研究生物流变学，首先必须了解什么是流变学。流变学是研究物体流动与变形的科学。流动与变形都是物体中质点之间相对运动的表现和结果。一般力学研究“质点”、“质点系”或“刚体”，而且，在研究分析问题中，均不涉及物体的材料性质。例如水、橡皮、果酱，假如把它们看成一个整体而运动，那么它们的行为可视为相同的。但水会流动，橡皮是有弹性的，果酱是塑性的。若考虑物质各部分相互间的相对运动，则它们的行为大不相同。

在力的作用下，物体都要变形，或是弹性变形，或是塑性变形，或是材料流动。这些流动和变形的问题，不是整个物体的运动，而是组成物体各质点相互间的相对运动。

经典力学是研究限于符合牛顿粘性定律流体的流动，以及符合虎克定律固体的变形。但是有许多能够流动的物质，既不是牛顿流体也不是弹性固体，研究这类物质的流动性质，则由流变学来承担。在这个意义上，它和非牛顿流体力学是一致的。非牛顿流体呈现的流变特性和日常的空气、水有巨大的差异。象悬浮液和高分子物质溶液等均呈现非牛顿特性。我们可以在厨房内找到大量的非牛顿物质，例如调味品、搅拌的奶油、生面团、卵蛋白等。图1-1示卵蛋白的粘性流动情形。大多数生物体液多含有高分子物质成分，因此，多呈现非牛顿性。从流变学观点来看，这些物质都具有流变特性，即：它们既表现有类似固体的弹性变形，又表现有

类似流体的流动粘性。



图 1-1 卵蛋白粘性流动的情况

从流变学历史来看,流变学研究涉及的物质范围非常广泛。因此很早就有许多科学家注意这个学科。Boyle 曾在 1662 年研究过鱼的呼吸和水中空气的关系,提出了热动力学状态方程的 Boyle 定律。1676 年 Hook 第一个创立流变学定律,即弹性体变形与应力成比例关系的 Hook 定律。1686 年牛顿研究了理想流体的特性,建立了牛顿粘性定律。此后,不到 200 年,Maxwell 于 1867 年提出了 Maxwell 粘弹性模型,认为所有的物质(包括气体在内)在剪切运动中,都兼有粘性和弹性性质,并首次计算出干空气的刚性模量。Young 是一个医生,他创造了光的波动理论,同时建立了声带发音的弹性力学理论,提出弹性模量,并以他的名字命名为杨氏模量。

在实验方面, Poiseuille 于 1847 年将血液通过毛细管流动进行实验, 他的实验成功地取得牛顿流体压力和流量之间的关系。著名的 Poiseuille 定律是圆管稳定层流的理论基础, 一直到现在仍在引用。1893 年 Barus 在研究船舶的粘附现象中, 观察到变形恢复的滞后现象。这是第一次直接记录的非牛顿特性。它表明剪切弹性是非牛顿流动的主要因素。

1920 年美国物理化学家 Bingham 对油漆、糊状粘土、油灰泥、印刷墨汁等的流动性进行研究, 认为物质的变形和流动在科学上具有普遍意义。在他的倡议下, 他和其他学者 Weissenberg, Reiner, Scott-Blair 等, 于 1929 年成立了流变学协会。至此, 为流变学作为一门独立学科奠定了基础。

生物流变学是研究生物体, 特别是人体内各部位的流变现象, 包括生物体物质的宏观流变现象和微观流变问题。在生物流变学中, 目前研究最多的是血液流变学。血液流变性的复杂性表现在两个方面, 一是几微米特征尺寸的红细胞悬浮在血液中, 并占 40% 以上; 二是悬浮流体为二相流动, 即其本身呈现非牛顿流体性质。此外, 其他体液的流变特性, 如呼吸系统中粘液的流变特性, 对于婴儿和成年人的呼吸生理都是一个重要影响因素。在关节内滑液的润滑作用, 同样强烈地依赖于它的流变特性, 这些生物流体都具有粘弹性(viscoelasticity)特性。又如消化系统中的肝胆汁, 在正常情况下, 它们可视为牛顿流体, 在胆道感染的情况下, 有时则呈现非牛顿流动特性。

“生物流变学”(Biorheology)是美国学者 Copley 教授早在 40 年代就提出的, 当时没有引起人们的注意。50 年代以来生物流变学特别是包括血液在内的体液流变特性研究, 得到了迅速发展。50 年代中期, 在英国伦敦, 牛津先后召开了血液流变学 (Hemorheology) 学术会议。1964 年首届血液流变学国际学术会议在冰岛召

开。60年代末第二届血液流变学学术会议在联邦德国 Heidelberg 举行。70年代后期,血液流变学推广为生物流变学,此时在法国里昂召开了国际学术会议。80年代初(1981)在日本东京召开了第四届生物流变学大会,我国第一次派学术代表团参加了会议。国际性学术杂志“Biorheology”第一次刊载了中国的文章。

§ 2 流变异常现象

非牛顿体应力-应变关系极其复杂,往往显现流动图象的奇异多样性。举例如下:

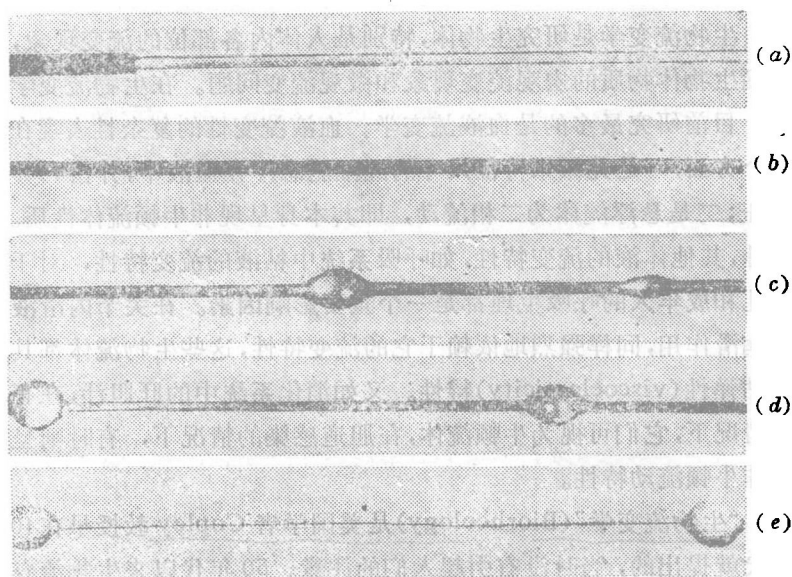


图 1-2 0.25% 的聚丙烯酰胺(separan)水溶液的射流情况
喷嘴直径 0.0414cm, 放大 4.2 倍; 射流速度 792cm/s; 从喷嘴顶端到拍照中点的距离: (a)0.6cm; (b)60.5cm; (c)80.9cm; (d)115.7cm; (e)145cm

2.1 射流稳定性

我们知道牛顿流体射流在流程中必然要破碎。然而，非牛顿流体，不论是自由式还是封闭式射流，由于都具有明显的粘性，因此射流无破碎现象，如图 1-2 所示。

2.2 射流膨胀性

粘性牛顿射流，从毛细管喷嘴流出时，射流直径减小。然而粘弹性射流从毛细管喷嘴流出时，由于弹性力松弛的结果，紧邻喷嘴下的射流直径膨胀起来。如图 1-3 所示。

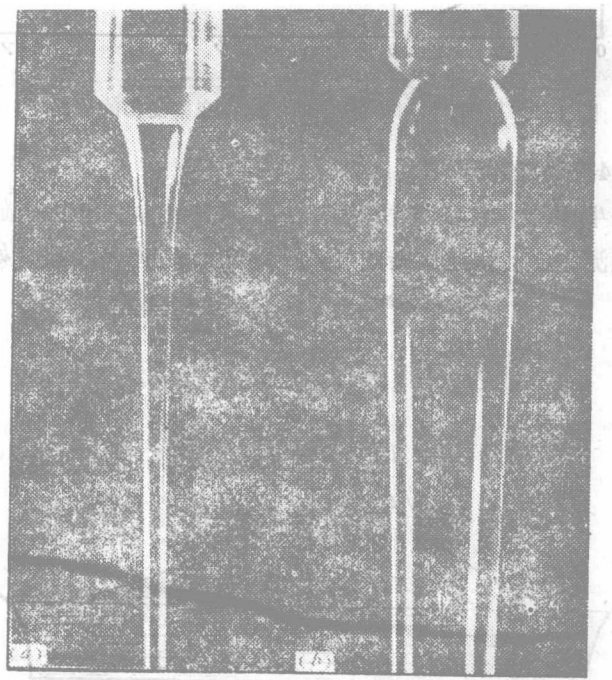


图 1-3 (a) 甘油射流的收缩性; (b) 聚乙烯醇和硼酸钠水溶液射流的膨胀性

2.3 剪切稀化与剪切增稠

非牛顿流体的粘性系数随切变率变化而改变。粘性系数 η 随切变率 $\dot{\gamma}$ 的增加而减少的现象称为剪切稀化(即拟塑性流体)。粘性系数随切变率的增加而增加则称为剪切增稠(即膨胀性流体)。而牛顿流体的粘性系数不随切变率变化。图 1-4 示表观粘度同切变率的关系。

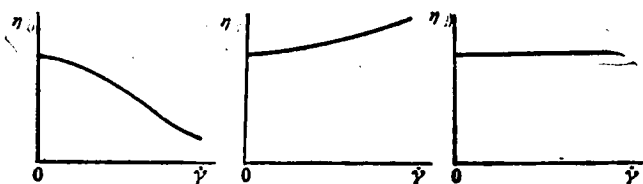


图 1-4 牛顿和非牛顿流体粘度随切变率变化的情况

2.4 沿杆爬升

在牛顿流体中,当杆快速旋转时,只在流体中产生一旋涡。而非牛顿流体,若快速旋转圆杆,液体则沿杆壁面爬升。如图 1-5 所示。

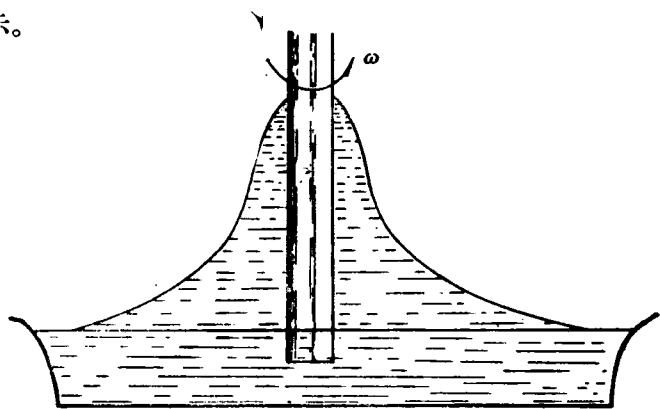


图 1-5 非牛顿流体沿旋转杆壁爬升现象