

生物流变学

[日] 岡 小天 著

科学出版

生 物 流 变 学

〔日〕 岡 小天 著

吴云鹏 陶祖莱 译

科 学 出 版 社

1980

内 容 简 介

本书系统地阐述了生物流变学的基础理论以及国际上的最新研究成果。内容丰富,推导详尽,参阅文献亦较广泛。是生物流变学一本较好的读物。

全书共分十一章,第一章详细介绍了流变学的基础理论及流变仪等,第二章至第九章详细阐述了血液流变学的具体内容以及六十年代以来有价值的研究成果。如循环、血液粘度、屈服应力、血浆层、微循环、血管流变学、脉动流……等。第十章和第十一章分别介绍了最优原理和其他生物流的流变学。这些内容都比较新颖并具有一定价值。书中还列举了不少有用数据及最新实验图线。

本书可供从事生物学、生态学、力学、医学及生物医学工程的科技人员和医务人员阅读,也可作为大专院校有关专业研究生的教学参考书。

岡 小天 著

レオロジー

——生物レオロジー

裳華房, 1974

生物流变学

〔日〕 岡 小天 著

吴云鹏 陶祖莱 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年11月 第一版 开本: 787×1092 1/32

1980年11月第一次印刷 印张: 18 1/2

印数: 0001—3,000 字数: 419,000

统一书号: 13031·1327

本社书号: 1845·13—10

定价: 2.85 元

译者的话

生物流变学是近代发展起来的一门新兴分支学科。目前国际生物流变学专刊问世，国际学术会议频繁。随着流变学的进展，生物流变学得到了迅猛发展。

生物流变学可以说是生物学、流体力学、固体力学、医学、物理学……等综合起来的学科。它既有生物体内可观察到的流变现象，又有构成生物体物质的流变性质问题。诸如流变学基础理论、有关流变现象的测定、血液循环、微循环、血管变形、脉动流以及骨骼、关节、软组织等流变问题。生物流变学是由于医学、生物学、生态学以及现代生物医学工程、宇航工程等的需要而发展起来的。

应当指出，目前深入研究最多、内容最为丰富的是血液和血管流变学。

本书作者是日本学者岡小天教授。他参阅迄止70年代大量较新的参考文献，加上他本人的研究，系统地加以整理而写成此书。可以说这是一本较系统的内容较丰富的基础读物。

我国目前还没有一本生物流变学的专门书籍。为了繁荣我国的科学文化事业，加速实现四个现代化，我们把这本书翻译出来供读者参考。对于原书的印刷错误，译文中已予纠正。但是，由于我们的水平有限，译文一定会有许多错误或不当之处，恳请读者批评指正。

第一至第五章由吴云鹏译，第六至第十一章由陶祖莱译。本书承周漠仁同志审阅，在此顺致谢意。

目 录

第一章 流变学	1
§ 1. 流变学与生物流变学	1
a. 流变学	1
b. 流变学同其它领域的关系	2
c. 生物流变学	2
d. 与流变学有关的学会和国际会议	3
流体流变学	3
§ 2. 牛顿流动	3
§ 3. 非牛顿流动	6
a. 非牛顿流动	6
b. 非牛顿粘性和屈服应力的由来	12
§ 4. 溶液和悬浮液	13
a. 粘度和浓度	13
b. 粘度和颗粒形状	16
c. 屈服应力	20
§ 5. 非牛顿悬浮液流动的统一理论	21
a. 以前的各种理论	21
b. 悬浮液模型	23
c. 流动曲线	24
d. 具有屈服应力的悬浮液	26
e. Casson 公式	27
流体的运动	29
§ 6. 应力	29
§ 7. 应力和速度	30
§ 8. 连续方程式和运动方程式	31
§ 9. 在柱坐标和球坐标中的表示形式	35

a. 柱坐标 (r, θ, z)	35
b. 球坐标 (r, θ, ϕ)	36
圆管内的流动	38
§ 10. 圆管内的层流	38
§ 11. Stokes 关系式	39
§ 12. Poiseuille 流动	40
a. 速度分布	40
b. 流量	42
c. 切变率	43
d. Poiseuille 定律的历史	43
e. 根据 Navier-Stokes 方程的推导	44
§ 13. 流动阻力	46
§ 14. 湍流	48
a. 湍流	48
b. 阻力系数	49
c. 速度分布	51
d. Blasius 阻力公式与速度分布的关系	54
e. Prandtl 阻力	55
§ 15. 非牛顿流体的定常流动	56
a. 速度分布	57
b. 流量	58
c. 平均速度	59
d. 平均切变率	59
e. 牛顿流体	59
§ 16. 符合幂定律的流体	61
§ 17. Bingham 物体的流动	64
a. $f_B < \tau_w$ 时	64
b. $\tau_w < f_B$	66
§ 18. 符合 Casson 公式的流体	69
a. $f_C < \tau_w$	69
b. $f_C > \tau_w$	71
固体的变形	74

§ 19. 应力	74
a. 张力	74
b. 切应力	75
c. 一般应力	76
d. 应力张量	79
e. 应力张量二次曲面	81
§ 20. 应力方程式	83
§ 21. 应变	84
a. 简单应变	84
b. 复杂变形	86
c. 一般无限小变形	88
§ 22. 应变与应力	92
a. 伸长	92
b. 剪切	92
c. 体应变	92
d. 弹性常数之间的关系	93
e. 应力-应变曲线	94
f. 橡胶的应力-应变曲线	95
g. 弹性滞后	96
h. 应力张量与应变张量	98
§ 23. 延迟弹性	101
a. 延迟弹性变形	101
b. 柔度	102
c. Voigt 物体	104
d. Voigt 模型	106
e. 广义 Voigt 模型	107
f. 延迟谱	109
§ 24. 蠕变	110
§ 25. 应力松弛	112
a. 松弛函数	112
b. Maxwell 理论	113
c. Maxwell 物体	113

d. Maxwell 模型.....	115
e. 广义 Maxwell 模型	116
f. 松弛谱	118
§ 26. 动粘弹性.....	118
a. 动柔度	118
b. 动弹性模量	120
c. 向量表示	121
d. 复数表示	123
e. Voigt 物体的动柔度	124
f. Maxwell 物体的动弹性模量	125
g. 四元模型	127
h. 广义 Voigt 模型, 延迟谱	128
i. 广义 Maxwell 模型, 松弛谱	128
§ 27. Boltzmann 叠加原理	129
§ 28. 非线性蠕变	132
§ 29. 有限变形	133
a. 有限变形	133
b. 应变的不变量	135
c. 应变能量密度函数	136
d. 应力-应变关系	137
e. 橡胶	139
流变计	140
§ 30. 旋转圆筒粘度计.....	140
a. 旋转圆筒粘度计	140
b. 具有任意流动曲线特征的液体	140
c. 求 $f(\tau)$ 的方法	144
d. 给定流动曲线的液体	146
§ 31. 圆锥-平板粘度计	155
a. 圆锥-平板粘度计	155
b. 牛顿液体	156
c. 非牛顿液体	157
参考文献	170

第二章 循环	174
§ 32. 循环系统	174
a. 血液的循环	174
b. 体循环和肺循环	174
c. 微循环	175
d. 血液的压力、速度、切变率	176
§ 33. 血管	180
a. 动脉的成分	180
b. 动脉的几何学性质	180
c. 动脉内的血液流动	180
d. 小动脉	181
e. 毛细血管	182
f. 小静脉和静脉	183
§ 34. 血液	185
a. 血液	185
b. 红血球	186
c. 白血球	189
d. 血小板	190
e. 血浆	190
f. 血浆蛋白	191
参考文献	193
第三章 血液的粘度、屈服应力和粘弹性	195
§ 35. 血液的压差-流量关系	195
§ 36. 红血球悬浮液的非牛顿性	197
§ 37. 血浆和血清的流动性	198
§ 38. 血液非牛顿性的机理	200
§ 39. 血液的流动曲线	201
§ 40. 红血球悬浮液的粘度和血球压积	203
§ 41. 血液的屈服应力	205
§ 42. 影响血液流动的因素	206
a. 红血球的挠性	207
b. 渗透压力	208

c. 抗凝剂	208
d. 右旋糖酐	209
§ 43. 红血球的变形和定向	209
a. 红血球的变形	209
b. 红血球的定向	210
§ 44. 血管内的压差-流量关系	211
§ 45. 血液的凝固和粘弹性	212
a. 血液的凝固	212
b. 血液在凝固过程中的粘度	215
c. 血液在凝固过程中的粘弹性	216
d. 在凝固过程中纤维蛋白原-凝血酶系统的粘弹性	217
e. 纤维蛋白胶质的动剪切弹性模量	218
§ 46. 循环异常和流变学	221
a. 循环异常	221
b. 血浆异常	222
c. 红血球异常	223
d. 白血球和血小板异常	224
e. 红血球的凝聚	225
f. 疾病和血液粘度以及粘弹性	226
参考文献	228

第四章 血浆层, 向轴集中, Σ 效应, 管壁效应232

§ 47. 血浆层	232
§ 48. 血浆层对压差-流量关系的影响	234
a. 中心部分看作牛顿流体的情况	235
b. 中心部分看作 Bingham 体的情况	237
c. 中心部分符合 Casson 公式时的情况	241
§ 49. 向轴集中	244
a. 能量耗散的极小原理	245
b. Magnus 效应	245
c. 平面壁的影响	246
d. Poiseuille 流动中的球形颗粒	247
§ 50. Fåhræus 效应	249

a. Fåhræus 效应	249
b. Barbee-Cokelet 的研究	249
§ 51. Σ 效应	252
a. Fåhræus-Lindqvist 效应	252
b. Σ 效应	254
c. Σ 效应的理论	254
§ 52. 管壁效应	257
a. Copley 等人关于血液的实验结果	257
b. 其它实验结果	259
c. 壁面滑移效应	260
d. 计及壁面滑移的理论	260
参考文献	263

第五章 复杂管内的血液流动 268

§ 53. 复杂管内的血液流动	268
§ 54. 血管壁内表面的状态	269
§ 55. 椭圆管内的流动	269
§ 56. 狭窄管内的流动	271
a. 狭窄对压力、红血球分布的影响	271
b. 缓慢的狭窄——Forrester-Young 的研究	273
c. 关于狭窄的 Lee-Fung 理论	284
§ 57. 锥形管内的流动	294
a. 锥形管内的流动	294
b. 锥形管内牛顿流体的流动 (Stokes 近似)	295
c. 锥形管内牛顿流体的流动 (一般解)	302
d. 锥形管内服从幂定律的非牛顿流体的流动	310
e. 锥形管内非牛顿流体流动的一般理论	318
§ 58. 弯曲管内的流动	329
a. 阻力系数	329
b. 二次流动	331
c. 湍流的发生	332
§ 59. 分枝管	333
参考文献	336

第六章 微循环	339
§ 60. 毛细血管壁的渗透性和血流	339
a. 毛细血管壁的渗透性	339
b. 闭锁状态的毛细血管内的流动	340
c. 毛细血管内的血浆流动	341
d. 通过毛细血管壁的水的运动	357
§ 61. 回流	358
a. 回流	358
b. Bugliarello-Hsiao 理论	360
c. Skalak-Chen-Chien 理论	368
§ 62. 片流	376
a. 片流	376
b. 片流模型	378
c. Fung-Sobin 的理论	379
参考文献	383
第七章 血管流变学	387
§ 63. 血管流变学	387
§ 64. 关于血管壁的假设	387
a. 均质性	387
b. 血管壁的应力	388
c. 不可压缩性	390
d. 各向异性	391
§ 65. 血管壁的粘弹性	393
§ 66. 增量粘弹性	394
a. 增量应力和增量应变	394
b. 大变形	395
c. 动态增量应力和动态增量应变	395
d. 本构方程	397
e. 系数 $C_{\theta\theta}$, C_{zz} , C_{rr} 的物理意义	401
§ 67. 非线性	404
a. Green-St. Venant 应变	404
b. 应变能密度函数	405

c. 应力	406
d. 增量应力和增量应变的关系	410
e. 应变能密度函数的说明	412
f. 管壁内的应力分布	413
g. 和各向同性物体 $\overline{W}$ 式的比较	413
h. 和实验比较	415
参考文献	417
第八章 血管壁的张力	419
§ 68. 压力-半径关系	419
a. 管壁十分薄的场合	419
b. 考虑血管壁厚度的场合	421
§ 69. 血管壁的张力	423
a. 血管壁的张力	423
b. 周向张力和轴向张力	425
c. 弹性张力和主动张力	426
d. 周向张力与压力、半径的关系	426
e. 关于厚血管壁张力的 Burton 假说	430
f. 平衡状态的各向同性弹性体	431
g. 受压的中空弹性圆管	433
h. 管壁具有层状构造的空心圆柱管	444
i. 橡皮状弹性壁构成的空心圆管	447
j. 管壁张力和杨氏模量的关系	456
k. 内压作周期性变化时的张力	459
l. 临界闭锁	461
参考文献	462
第九章 脉动流	464
§ 70. 脉搏	464
§ 71. 脉动流理论的历史回顾	465
§ 72. W. Weber 理论	469
§ 73. Resal 理论	470
§ 74. Kortweg 理论	472
§ 75. Lamb 理论	472

§ 76. 充满理想流体的薄壁管	474
a. 管壁的运动方程	474
b. 压力波的速度	476
c. 充满水的橡皮管内压力波传播实验	477
§ 77. Frank 的风箱理论	478
§ 78. Witzig 理论	480
§ 79. Morgan, Kiely 理论	483
a. 运动方程	483
b. 波速和衰减	485
c. 管壁的粘弹性	486
d. 关于组织惯性效应的 Morgan, Ferranti 理论	486
§ 80. 刚性圆管内振荡流的 Womersley 理论	487
a. 运动方程	487
b. 速度分布	487
c. 流量	491
d. α 的值	492
e. 振荡流的理论与实验的比较	493
§ 81. 刚性圆锥管内的振荡流理论	495
a. 运动方程	495
b. 用复数表达的解	496
c. 用实数表达的解	497
d. 定常流	498
§ 82. 关于弹性圆管内脉动流的 Womersley 理论	499
a. 运动方程式	500
b. 波速及波的衰减	501
c. 管壁粘弹性的影响	503
d. 周围组织对管壁约束的影响	503
§ 83. 关于厚壁管的 Jager 理论	505
a. 运动方程	506
b. Navier 方程的应用	507
§ 84. 关于粘弹性壁的 Cox 理论	508
§ 85. 弹性管内的振荡流理论	509

a. 速度分布	509
b. 压力梯度和流量的关系	510
§ 86. 脉搏波的非线性理论	512
a. 脉搏波的非线性	512
b. 准一维模型的基本方程	512
c. 等截面均匀弹性管	514
d. p 和 S 的关系	516
e. 各变量之间的关系	517
f. 变陡现象	517
g. 截面积 S_0 和弹性模量可变的场合	518
§ 87. 微循环中的脉动流	519
参考文献	521
第十章 最优化原理和血管分枝	524
§ 88. 物理学中的最优原理	524
a. Fermat 最短时间原理	524
b. Maupertuis 最小作用原理	525
c. Hamilton 原理	526
d. 广义相对论	526
e. Plateau 问题	527
f. 其它极小原理	527
§ 89. 生物学中的最优原理	527
§ 90. 血管系的最优原理	529
a. 目标泛函	529
b. 分枝	531
c. 与 Roux 经验法则的比较	534
d. 特殊情况	536
e. 毛细血管	537
§ 91. 主动脉半径和湍流	537
参考文献	539
第十一章 生物流变学的其它问题	540
§ 92. 原生质流动, 阿米巴运动, 海胆的卵	540
a. 原生质的皮质	540

b. 原生质流动	540
c. 阿米巴运动	542
d. 海胆的卵	542
§ 93. 关节润滑液, 子宫颈管粘液, 前眼房液, 玻璃体液	547
a. 关节润滑液	547
b. 子宫颈粘液	550
c. 前眼房液	552
d. 玻璃体液	552
§ 94. 痰和唾液	552
a. 痰	552
b. 粘液溶剂对其粘稠度的影响	555
c. 唾液	558
d. 胃粘蛋白	560
§ 95. 鳗鱼表皮的分泌液, 液态丝	561
a. 鳗鱼表皮的分泌液	561
b. 液态丝	562
§ 96. 中空器官的压力-容积关系	563
§ 97. 肠系膜的应力-应变曲线	565
§ 98. 冯元桢等关于软组织的研究	567
a. 软组织的流变学	567
b. 应力-应变曲线的分析	568
c. 各向异性	569
§ 99. 染色体核蛋白质	571
a. 复制的染色质凝胶	571
b. 应力-应变曲线	572
c. 机械-化学系统	573
d. 粘度	573
参考文献	574

第一章 流 变 学

§ 1. 流变学与生物流变学^[1]

a. 流变学

1920年, 美国物理化学家 Bingham 对油漆、糊状粘土、印刷墨汁等流动感到兴趣, 认为物质的变形和流动在科学上具有普遍的重要意义。在他的倡议下, 美国于 1929 年成立了流变学协会。“流变”来源于希腊语中“流动”一词, 意为流动。Bingham 称流变学是物质变形和流动的科学。

研究弹性变形, 已经有了弹性力学; 研究流体流动, 已经有了流体力学。也许有人认为不需要流变学了, 可是, 实际上不是这样。因为, 弹性力学建立在应变与应力成比例的胡克定律基础上, 流体力学建立在切变率(应变随时间的变化率)与应力成比例的牛顿粘性定律基础上, 然而, 对于我们周围形形色色的物质, 实验证明, 胡克定律和牛顿粘性定律并不是都能够成立的。

对于给定的物质, 本构方程式*(Constitutive equation), 一般表示出物质的应力和应变的关系, 但是, 在其应力和应变中, 还具有时间的变化率, 此外, 物质的本构方程也同温度有关。

再者, 弹性力学和流体力学是以物体的变形和运动为其重点, 作为流变学的特征, 则是以物质的本构方程为其重点。由于物质的本构方程表示出了物质的多样性及个性, 所以, 流变学颇为重视和物质构造的关系, 并强调物性论中的物质的

* 本构方程式过去曾被称为物性方程式或物质方程式, 现根据汇编中的流变学统一词汇, 称为本构方程。——译者