

体液的流变特性

吴云鹏 杨瑞芳 编著

科学出版社

体液的流变特性

吴云鹏 杨瑞芳 编著

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书综合了国内外(包括作者)生物流变学方面的研究成果,系统地阐述了各种体液的流变特性、临床应用及测定技术等。内容比较新颖、实用。对于书中所涉及的数学力学问题,叙述时力求深入浅出。全书共分五章,第一、二两章详细阐述研究体液流变特性的意义、内容及理论基础;第三章着重介绍血液的流变特性及临床应用;第四章介绍其他体液的流变特性;最后一章介绍体液流变特性的测定技术及仪器。可供医学、生物力学、生物医学工程和生物学工作者,以及大专院校有关专业的师生、研究生参考。

体 液 的 流 变 特 性

吴云鹏 杨瑞芳 编著

责任编辑 马素卿

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

*

1987年2月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1987年2月第一次印刷 印张:5 5/8

印数:0001—2,100 字数:127,000

统一书号:13031·3401

本社书号:4847·13—10

定价:1.35 元

序 言

生物力学与生物流变学是近代发展起来的一门新兴分支学科,它对生物学、医学以及生物工程等学科的发展,具有重要价值。其中作为生物流变学中的体液流变特性,对于医学诊断、预后和预防,更是具有实用意义。此外,研究体液流变特性所涉及的流变学理论和独特的实验检测技术,近年来也引起数学、力学、物理、化学,以及仪器仪表工作者们的巨大兴趣。

本书的主要内容是介绍占体重高达 60% 的各种体液的流变特性,以及相应的理论基础、测定技术和实际应用等,力求新颖、全面、深入浅出。与此同时,适量介绍国内外有关该领域的最新研究成果,其中包括我们自己的成果。力图使本书成为广大的医学、生物学、生物医学工程工作者,以及理工科研究工作者的一本有用的参考书,并且成为大专院校有关专业的师生、研究生的参考读物。

本书第一章至第四章由吴云鹏编写,第五章由杨瑞芳撰写。全书承杨桂通教授审定校正,在此深表谢意。

在写本书时,承蒙重庆大学荣誉教授冯元桢惠赠了他的讲演书稿作为参考;毛昭宪教授为本书提供了体液流变特性计算程序;李仁师、陈又亮教授也为此书提出了宝贵意见,在此一并志谢。

本书部分资料引自《中国生物物理学会全国首届医学生物物理学术会议综述论文集》、《中国生物物理学会血液流变学会议论文集》、《中国生物医学工程学会第二届学术会议论

文汇编》等会议资料，由于不是正式出版物，故未列入参考文献中。

由于作者水平有限，错误与不妥之处在所难免，恳希参阅本书的同志们给予指正。

编者

1984年7月

目 录

第一章 概论	1
§ 1. 什么是生物流变学	1
§ 2. 生物流变学与医学及其他学科的关系	4
§ 3. 生物体液流变特性研究的意义	5
参考文献	9
第二章 体液流变特性的理论基础	11
§ 1. 生物流体的重度、浓度、压缩性、pH 值、应力	11
§ 2. 生物流体的粘度及牛顿流体	16
§ 3. 生物流体的表观粘度及非牛顿流体	17
§ 4. 圆管内液体流动时的切应力及定常层流流动	19
§ 5. 湍流的基本概念	22
§ 6. 生物体液的粘弹性基本理论及模型	23
参考文献	34
第三章 血液的流变特性	35
§ 1. 血液的压差与流量关系	35
§ 2. 血液的粘度	36
§ 3. 血液的屈服应力及 Casson 图形	37
§ 4. 血液的本构方程	40
§ 5. 影响血液流动的诸因素	41
§ 6. 在微小血管内的血液流变特性	43
§ 7. 血液的凝固与血栓形成	48
§ 8. 血液的电导特性	55
§ 9. 血液流变学中的热因素	57
§ 10. 血管的管壁效应	57
§ 11. 心血管病、脑血管病及其他病症的血液流变特性异常	

及纠正.....	60
§ 12. 有关肿瘤的血液循环异常.....	76
§ 13. 人工血液的流变特性.....	78
参考文献.....	80
第四章 其他体液的流变特性.....	82
§ 1. 痰的流变特性.....	82
§ 2. 关节滑液的流变特性.....	87
§ 3. 胆汁的流变特性.....	94
§ 4. 唾液的流变特性.....	97
§ 5. 胃粘蛋白液的流变特性.....	99
§ 6. 宫颈粘液和精液的流变特性.....	101
§ 7. 眼玻璃体的流变特性.....	106
§ 8. 原生质的流变特性.....	109
§ 9. 若干鱼类血液的流变特性.....	111
参考文献.....	112
第五章 测定体液流变特性的基本实验方法和仪器.....	114
§ 1. 毛细管粘度计及其测量方法.....	115
§ 2. 低剪切可变压头显微表观粘度测量方法.....	122
§ 3. 毛细 (Ostwald) 粘度计和 Englar 粘度计.....	125
§ 4. 同心圆筒粘度计及粘弹性的测量方法.....	127
§ 5. 圆锥平板型粘度计.....	141
§ 6. 凸余弦脉冲动粘弹性测定系统 (RCP 系统).....	144
§ 7. 微珠振荡微流变仪.....	146
§ 8. 低粘度体液粘弹性测定装置.....	151
§ 9. 活体新鲜血液表观粘度的测定.....	152
§ 10. 红细胞变形和激光衍射仪.....	159
§ 11. 少试样显微表观粘度测定仪.....	162
§ 12. 管式粘弹性流变仪.....	168
参考文献.....	173

第一章 概 论

§ 1. 什么是生物流变学

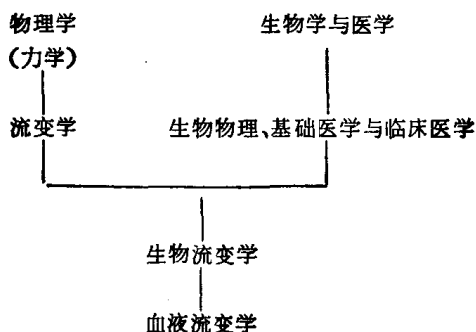
要了解生物流变学,首先必须了解什么是流变学。顾名思义,流变学就是研究物质变形和流动的科学。追溯过去,远在公元前五世纪,人们就流传着希腊哲学家 Heraclitus 的一句脍炙人口的名言:“一切在流,一切在变”。流变学(Rheology)一词即由此而来。

然而,流变学成为一门独立科学,则是由美国 Bingham 教授创于 1928 年。当时,着重于油漆、橡胶、塑料、润滑剂及某些食品等的研究。因为这些物质都包含有流动和变形复杂的物质结构。这些物质所具有的运动现象,很难用经典的弹性力学和流体力学方法来分析。为此,不仅要研究这类物质的流动和变形,而且还要联系其物性和结构。由此可知,流变学是物理中的物性学和力学紧密联系的交叉科学。此外,它还同高分子化学及胶体化学有着密切关系。可以说,流变学是在橡胶工业、塑料工业、纤维工业、土木工程、化学工业、食品工业……等广泛的工业背景下逐渐发展起来的。

应当指出,宇宙万物,大到地球板块之构成、沧海桑田的变化,小到微观世界内的原生质,无一不处于运动之中。而在这生机勃勃的自然界中,特别是人体本身这个奇迹般的“生命工程”中,也完全符合恩格斯所指出的“运动是物质存在的形式”这一普遍规律,存在着大量的流变现象。不言而喻,生物流变学就是研究生物体特别是人体内可以观察到的流变现

象,同时亦研究构成生物体物质的宏观与微观流变性质问题。诸如血液的流动特性和规律、红细胞的变形、血小板的聚集、血管的力学特性、原生质的流变特性,以及胆汁、淋巴液、关节液、脑脊髓液、子宫颈管粘液、前眼房液、支气管分泌物、肌肉、心脏、膀胱、软骨、骨骼、其他软组织等流变学。在遗传工程方面,也有人从事蛋白质、核酸溶液等流变特性的研究。

如上所述,生物流变学也是横向切割各学科的交叉学科,其相互关系大致可表示如下:



在生物流变学中,目前研究最多的是血液流变学,即研究血液及其成分的流动和变形问题。其次,对人体关节滑液、呼吸道粘液等其他体液流变特性的研究,亦日益增多。体液流变特性的研究,对于基础医学、临床医学以及保健事业方面具有重要意义。可以说,生物体液的流变特性是生物流变学的重要组成部分。本书将主要介绍这些内容。

在了解什么是生物流变学的同时,还应该了解这一学科的历史发展。远在40年代,美国学者 Copley 教授就提出了生命现象亦寓于流变规律之中的独特见解,倡议用流变学的规律及方法,以人体为主要研究对象来进行研究,并起名为“生物流变学”。然而,当时在传统的力学与生物学、医学“分道扬镳”的科学偏见束缚下,是很难令人接受的。以后数年,这一

见解未有进展。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的研究得到迅猛发展。50年代中期,在英国伦敦、牛津先后召开了血液流变学学术会议。60年代初,国际性杂志《生物流变学》应运问世。1964年,首届血液流变学国际学术会议于冰岛雷克雅未克召开。迄止60年代末,第二届血液流变学学术大会在联邦德国海德尔堡举行,从事此学科的研究人员骤增。70年代后期,又将血液流变学推广为生物流变学,并在法国里昂召开了国际学术会议。直到1981年,在东京举行的第四届国际生物流变学大会,已成为30多个国家参加的世界规模的学术大会了。由于血液流变学同临床医学有着极为密切的关系,大会决定出版国际学术交流刊物“临床血液流变学”。

在科学史的发展长河中,短短的30年堪称为一个短暂的时期,而在生物流变学的科学园地里,已经呈现出一派繁荣的景象。生物流变学特别是包括血液在内的体液流变特性的研究,之所以有着如此惊人的进展,在于我们可以将流变学的原理用于医学的诊断和治疗中去,前者在临床处理和预防措施中将起着重要作用。正如著名的血液流变学家 Dintenfass 所说:“对于未来几代人来说,血液粘度的科学及速度梯度影响的血液凝聚与血栓形成,以及血细胞的流变学会是很重要的。其重要性正如今天的细菌学与病毒学一样。今天,血液流变学仍面临着种种延误与困难;明天,这一切将会被人们视为可笑和无知,这正如细菌学与防腐剂诞生后所经历过的困难,通过奋斗才得到理解与公认。”作为生命科学与医学工作者,对于生物流变学特别是体液流变特性知识的掌握,是不容忽视的。

§ 2. 生物流变学与医学及其他学科的关系

众所周知,流变学是属于实验方法的学科,不限定其研究对象。因此,作为生物流变学来说,它与整个的生命科学有着重要的关系。首先,作为生物流变学特别是血液流变学的实验和在此基础上所提出的治疗方法,将会不断地被引入医学和外科学的实践中去。临床生物流变学将在临床处理、诊断治疗和采取预防措施中起到愈来愈成功的作用。流变特性的了解和改善,将会有利于优生控制和延年益寿,同时也将给空间生物医学以巨大的影响,促进载人航天飞行的进展。

生物流变学也可以用于研究遗传学、细胞的变异、胚胎学,以及癌的生长等方面。譬如细胞核、染色体、细胞膜结构,甚至由蛋白质、脂肪、核酸自行结合的生物结构,其流变特性是非常重要的。在胚胎发育中所固有的许多变形,都有待于流变学的研究和解释。可以说,胚胎学和遗传学与生物流变学的关系将会越来越密切。

生物流变学还同信息论和控制论有着密切的关系。由于生物材料的宏观特性和微观特性之间的非单一关系,生物流变学与信息论和控制论的结合,可望给生物材料以更深刻的科学描述。譬如,在广义上可以把生物材料的本构特性视为控制论中的一个联络通道过滤器,这种过滤器具有调节和控制机体的能力。

生物组织包括体液在内的流变特性与电现象所具有的耦合效应,在活体组织的生理学中具有重要意义。多种生物材料都具有正、逆两种压电效应,这些压电特性与生物材料的弹性和电解质松弛特性有关。应用正、逆压电效应,可以控制某些组织的生长。譬如人体骨骼弯曲时,其凹部将出现负极化,

相反的区域为正极化,若施以逆压电效应,骨内由此所产生的应力,将十分有助于畸形骨的矫形。此外,这种生物流变电特性又会改善骨骼的代谢,促进骨痂的形成。可以说生物流变电特性与电学结合所形成的电生物流变学,正方兴未艾,展现出诱人的前景。

将量子、分子分析方法应用于生物化学结构中,特别是大分子系统的结构和问题中,所产生的量子生物化学与量子药理学具有重要的应用价值。而这些领域中的主要内容如大分子的键链、范德瓦耳斯力以及电荷转移等,都与生物流变学密切相关。

生物流变学与其他学科的联系广泛,它在解决生命科学的许多问题和医学实践方面将会起到越来越重大的作用。作为生物流变学重要组成部分的体液流变特性的重要性,则不言而喻了。

§ 3. 生物体液流变特性研究的意义

生物体液的流变特性是生物流变学的重要组成部分,对于医学中的诊断、治疗与预防等方面,具有重要作用,因此研究生物体液的流变特性是十分重要的。

人体体液,绝大多数是由多种细胞构成的悬浮液或高分子溶液,显示出较为复杂的流变特性。譬如,粘液在肺气道和支气管处被壁上的纤毛所推进,粘液的流变特性对于这种纤毛运动具有很大的影响。如果粘液为牛顿流体,则纤毛运输的功能就几乎不存在了。此外,象支气管炎、囊性纤维病等阻塞性疾患,粘液的粘度往往反常性增加。药物治疗在某种意义上乃是减少所分泌粘液的粘度,从而提高分泌过程中的廓清能力。又如关节内的滑液,由于透明质酸的存在,在只有剪

切性流动中,会形成一种线性长分子链。在慢、轻活动的低频状态下,这种多糖链能保持布朗运动的紊动性和彼此间的滑移,因此,其粘性就比较突出。然而,在关节动作快速、猛烈所谓高频、高幅动作下,多糖链不能随这种快速动作而及时调整,只能像弹簧一样作弹性变形,因此,滑液的弹性性质就表现出来。滑液在高频时的弹性效应,非常适应骨关节的冲击和振动。而当骨关节面之间的相对速度较低时,滑液显示出在低频下具有很高的粘性而不致被挤出,可见这种流变特性是非常巧妙的。近年,对于关节滑液的流变特性研究表明,不仅可以人们罹患的骨关节病按流变特性更科学的分类(如 D. Bellet 等人的近期研究),而且可以应用滑液的流变特性来治疗某些骨关节病。此外,像关于子宫颈粘液和受精卵内质流变特性的研究,不仅可以深化了解孕酮所致的流变特性在妊娠期的变化,而且在节育避孕方面也有一定的实用意义。对于眼睛内的水晶体和视网膜之间玻璃体的流变特性的研究,可以为人工制造玻璃体提供科学依据。至于胆汁和胃粘蛋白流变特性的研究,可以使我们进一步认识人体消化过程的规律,并且对于胆道结石、胆道炎症及胃溃疡等外科和消化系统疾病的病理学、诊断学都具有十分重要的作用。

就目前来说,研究最为深入、内容最为丰富的是血液的流变特性。因为临床许多疾病可使血液的流变特性发生变化,而后者又是引起血液及微循环障碍、组织灌注不足、缺血、缺氧,以及代谢障碍的原因。众所周知,心血管病(尤其是冠心病)与恶性肿瘤是造成人类死亡或致残的两大威胁。数年来研究表明:高血压、缺血性疾病甚至癌症,虽有诸方面的诱发病因,但其中尤以血液粘度的阈值最重要,一旦超过阈值,机体就会处于危机之中。至于巨球蛋白血症及镰状红细胞贫血症,单纯测定血液的粘度就足以说明症状情况。可以不夸

大地说：不论一些疾病或机能紊乱的起因如何，都要经过血液流变特性或其他体液流变特性异常阶段。特别是血液粘滞性增高，并由此而导致症状恶化(图 1-1)。

追根究底，造成血液高粘滞综合征的成因可分为两大类，即基本成因和某些见于急性状态的促进成因。前者包括红细胞增多症、癌症、糖尿病、遗传或免疫异常、休克或中毒等；促进成因则包括感染、发热、情绪应激、体力应激、食谱的异常、变态反应以及创伤等。上述诸成因均可作用于一个或数个血液粘滞因素。譬如，感染或发热可增加红细胞或血小板的聚集程度；体力劳动可能会造成脱水与局部低氧，并增加红细胞的浓度与刚性，从而导致血液粘度增高。遗传异常可造成镰状红细胞的形成。总之，血液流变特性之一的粘度升高后，则直接造成血液循环与微循环障碍，并可导致缺血。

研究体液流变特性特别是血液流变特性的另一重要意义，在于它可以给某些疾病的发展提供预报性的资料。在尚无临床症状之时，流变学的方法可能作为预报疾病的重要手段。因为不少疾病在用常规的诊断方法诊断之前，往往有一个“匿影藏形”的阶段。譬如就对人类健康有很大威胁的闭塞性血管疾患而言，血液的流动、停滞及血栓的形成，都可能在早期用测定流变特性的方法测出来。现代生物医学检测先进技术的发展，为我们提供了活体、离体或动物实验流变特性研究的广泛可能性(图 1-2)，即使用最简单而又经济的粘度测定方法，也可能在大批人群中区分出血液粘度升高、血浆粘度升高、红细胞刚度升高或血栓表观粘度升高等不同病理的患者，这些特性与测定数据，对于预报病情的发展有重要价值。甚至有的学者建议：应当把血液流变特性的测定作为病理检验的重要组成部分。

在治疗与预防方面，可包括下述改变血液流变特性的措

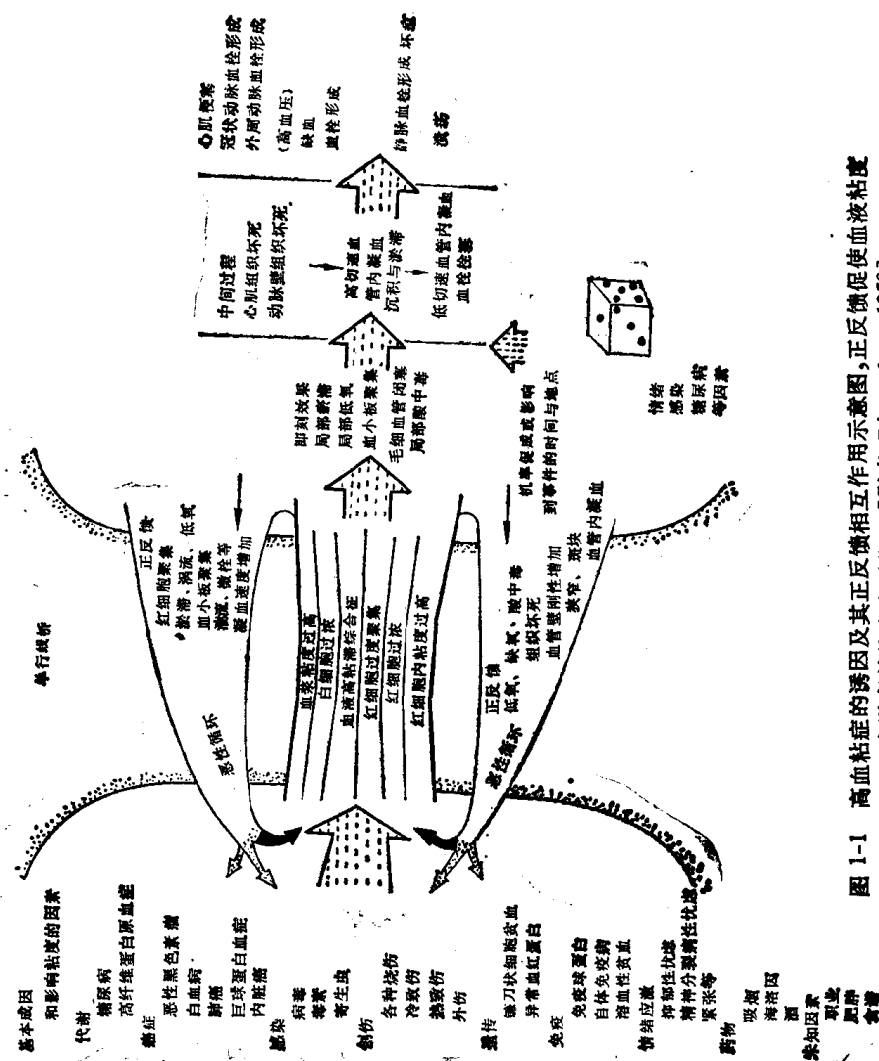


图 1-1 高血粘症的诱因及其正反馈相互作用示意图,正反馈促使血液粘滞进一步增高并使疾病恶化。[引自 Dintenfass, 1959]

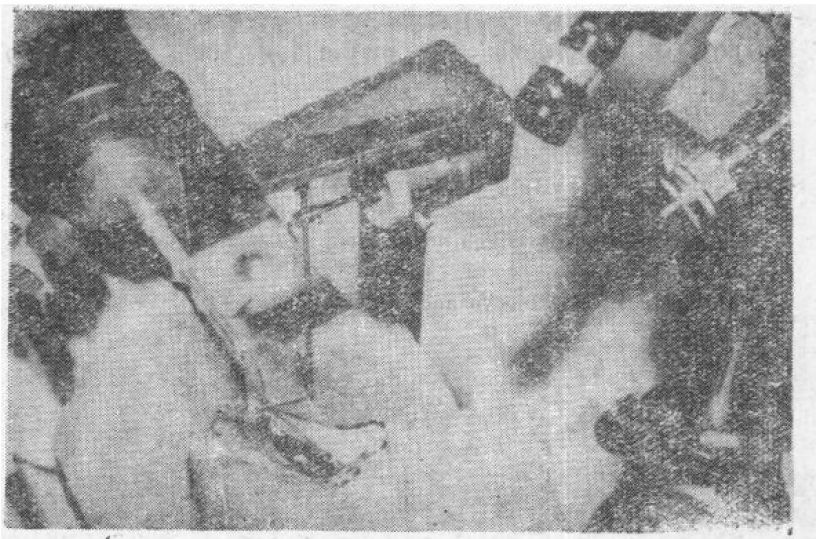


图 1-2 血液动力学动物实验照片。采用了高灵敏度传感器及记录仪器。

施：放血、降低血液粘度、血液稀释、采用降低纤维蛋白原水平的药物、降低红细胞、血小板的聚集性及对抗纤维蛋白的形成等。进而，我们也可用肝素或其他抗凝剂抗聚集药物，以减低红细胞的聚集程度并改善血流。在一定情形下，甚至可对抗血液循环中癌细胞的留存。

体液流变特性研究的意义还见诸于药物学方面。譬如可评价改变食谱、抗凝剂、抗脂药、血管舒张剂、 α 阻断剂、莨菪类药物、“活血化瘀”药物、排石利胆药物、止咳祛痰药物，以及中医辩证施治对于体液流变特性的影响及其疗效等。总之，生物流变学正展现出对一个对生命学科特别是医学应用的绚丽前景。

参 考 文 献

- 〔1〕 冯元桢：《生物力学》，科学出版社，1983。

- [2] 岡小天(吴云鹏,陶祖荣译):《生物流变学》,科学出版社,1980.
- [3] L. 丁坦法思(廖福龙,翁维良译):《血液流变学在诊断及预防医学中的应用》,科学出版社,1981.
- [4] 吴云鹏:生物流变学——内容、进展及其他,大自然探索,第二期,65—79, 1983.
- [5] Fung, Y. C., Perrone, N. Anliker, M: "Biomechanics Its Foundations and Objectives", Prentice-Hall, INC., 1972.
- [6] 岡小天,东健彦訳:スコットブレイヤー入門レオロジー. 朝仓书店,1970.
- [7] Dintenfass, L. : A study in thixotropy of concentrated pigment suspensions part I. equilibria states, *Kolloidzeitschrift*, **163**,48—68, 1959.
- [8] Fung, Y. C.: "Biodynamics Circulation", Springer-Verlag, N. Y., 1984.