

CLINICAL HEMORHEOLOGY

临床血液流变学

主编 王柏生

1.3
6
9

河南医科大学出版社

临床血液流变学

主编

王柏生

副主编

金寒 胡志荣 鄢文海

编委(按姓氏笔划排列)

王柏生 张志坚 张艳萍 金寒
李永欣 李洪涛 岳鹤声 胡志荣
胡志军 高孟哲 鄢文海

河南医科大学出版社

·郑州·

图书在版编目(CIP)数据

临床血液流变学/王柏生主编. —郑州:河南医科大学出版社,1999.9
ISBN 7-81048-342-0

I. 临… II. 王… III. 血液学:流变学 IV. R331.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (99) 第 36571 号

河南医科大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

邮政编码 450052 电话 (0371)6988300

河南医版激光照排中心照排

郑州文华印刷厂印刷

开本 787×1 092 1/16 印张 11.75 字数 279 千字

1999 年 9 月第 1 版 2001 年 3 月第 2 次印刷

印数 2 651~5 650 定价:18.00 元

前 言

血液流变学是 20 世纪 60 年代才逐渐发展起来的一门新兴学科,其内容涉及物理学、化学、生物物理学、生物化学、生物学及医学。因此也是一门多学科交叉的边缘学科。近年来,血液流变学的发展十分迅速,其内容日趋系统和完善,对基础医学和临床医学都有重要的理论意义和应用价值,因此越来越受到广大医学工作者的重视。

现已证明,许多常见疾病(如冠心病、高血压病、糖尿病、缺血性脑病、肺源性心脏病等)和病理过程(如恶性肿瘤、休克、妊娠高血压、创伤及炎症等),患者都存在着明显的血液流变学方面的异常,这种异常的成因和机制可能各不相同,但对上述疾病或病理过程的发展却有着不可忽视的正反馈作用。对预后也有重要的影响。这一点以往并未被医学工作者所了解。事实上,了解和掌握这种变化规律,不仅有助于加深对疾病的认识,为治疗这些疾病开辟新的途径,而且对这些疾病的预防也有积极意义。目前,血液流变学越来越为广大医学工作者所重视,血液流变学检查和治疗也已在许多医院广泛应用。

国内有关血液流变学的书籍较少,为了满足广大医学工作者的需要,我们曾经编写出版了《临床血液流变学》。这次再版,是在该书的基础上,参考国内外有关新进展,结合我们多年从事血液流变学的研究和教学经验,对该书的内容作了部分更新和增添。在编写中,为了适合医学工作者阅读,我们舍弃了许多有关力学和流体力学的公式及其推导过程,着重地阐述了流变学的基本知识,血液流变学特性,血液流变性障碍的发生原因、机制及对机体的影响。本书较详细地介绍了几种常见病时血液流变性障碍的发生原因、环节、机制及对这些病症的影响。本书也介绍了血液流变学的各种检测指标、方法、检测原理、意义以及临床常用的血液流变学治疗方法,故本书仍取名《临床血液流变学》。本书不仅可供医学生、医学研究生和有关研究者阅读,而且也适合广大临床工作者参考使用。

由于我们的水平所限,本书在内容上和文字编排等方面都存在着不少缺点和错误,敬请读者批评指正。

因照顾到专业习惯,书中涉及到的“粘度”、“粘液”、“粘附”、“粘性”等“粘”字,均写为“粘”,暂不改为“黏”。

王柏生

1999 年 5 月于郑州

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 流变学的基本知识	(5)
第一节 流变学、生物流变学及类血液流变学	(5)
第二节 流变学的基本知识	(7)
第三章 血液的流变特性	(17)
第一节 血液粘度对切变率的依赖关系	(17)
第二节 血液粘度对切应时间的依赖关系	(18)
第三节 血液粘度对血管管径的依赖关系	(20)
第四节 几个常用的血液粘度概念	(22)
第四章 血液流变性障碍	(25)
第一节 红细胞异常	(25)
第二节 白细胞对血液流变性的影响	(34)
第三节 血小板功能增强	(36)
第四节 血浆蛋白、脂类及血管因素的影响	(38)
第五章 血液流变性障碍时功能代谢改变	(41)
第一节 微循环障碍	(42)
第二节 对原发疾病的正反馈作用	(44)
第三节 对并发症的促发作用	(45)
第六章 血液流变学检查指标及检测方法	(49)
第一节 血液粘度的测定	(49)
第二节 血细胞比容的测定	(54)
第三节 红细胞聚集性测定	(56)
第四节 红细胞变形性的测定	(61)
附:白细胞变形能力的测定	(65)
第五节 血小板聚集性测定	(66)
第六节 血小板粘附测定方法	(69)
附:硅化问题	(71)
第七节 细胞电泳的测定	(71)
第八节 微循环功能的测定	(73)
第九节 纤维蛋白原的测定	(76)
第十节 红细胞膜流动性测定	(77)
第十一节 体外血栓形成测定	(80)
第十二节 其他	(82)

第七章	血液流变学在疾病诊断、治疗和预防中的意义 ·····	(89)
第一节	血液流变学在诊断和预防医学中的作用	(89)
第二节	血液流变学在治疗疾病中的作用	(92)
第八章	常见心血管疾病的血液流变性障碍 ·····	(95)
第一节	高血压	(95)
第二节	冠心病	(100)
第三节	心肌缺血再灌注损伤	(109)
第九章	脑血管病的血液流变性障碍 ·····	(117)
第一节	中风先兆	(117)
第二节	脑血管病	(120)
第三节	缺血性脑血管病的血液流变学疗法	(123)
第十章	糖尿病的血液流变性障碍 ·····	(127)
第一节	糖尿病的血液流变性障碍及其机制	(127)
第二节	血液流变性障碍对糖尿病的影响	(134)
第三节	糖尿病的血液流变学疗法	(135)
第十一章	肿瘤、肺心病及其他疾病的血液流变性障碍 ·····	(139)
第一节	肿 瘤	(139)
第二节	肺心病	(146)
第三节	休 克	(151)
第四节	溶血性贫血	(154)
第五节	肝硬化	(156)
第六节	吸 烟	(158)
第十二章	血液流变学疗法 ·····	(161)
第一节	血液稀释	(162)
第二节	溶 栓	(172)
第三节	血浆置换	(177)
第四节	抑制血小板聚集	(180)

第一章 绪 论

一、概述

生命的维持与血液循环是分不开的,机体正常的生理及防御功能都必须有正常的血液流动状态,惟此,才能保证脏器和组织得到正常的血液供应。但是,长期以来,人们在研究循环功能时,总是将心脏、血管和血液容量视为3个最基本的因素,而且也往往是通过改善心脏舒缩功能,改变血管口径和调整循环血液容量等血流动力学因素来达到改善血液循环的目的,忽视了血液的流变学特性对循环功能的影响。所谓血液的流变学特性,也即血液流变性,是指血液及其有形成分的流动及变形的特性,包括血液的粘弹性、触变性以及血细胞的变形、聚集以及与血管内皮细胞相互作用等特性。事实上,血液的流变特性对于血液循环同样起着十分重要的作用。甚至即使在心脏功能、血管和血液容量都正常的情况下,仅仅由于血液流变特性的异常,即可引起循环功能的障碍,并进一步导致机体其他一系列的功能、代谢改变。

现已证明,许多疾病和病理过程中(如冠心病、高血压病、糖尿病、动脉硬化、发热、酸中毒、休克以及创伤等),都有明显的血液流变性障碍,不论这种障碍是上述疾病或病理过程的原因或者是结果,但这种血液流变性障碍通过对循环功能的不利影响,促使着原发疾病或病理过程的发展和恶化。因而采取针对血液流变性障碍的治疗措施,纠正已存在的血液流变性障碍,对于改善循环功能、缓解病情、甚至对于预防或延缓并发症的发生都有一定的积极意义。

血液流变学(hemorheology)是研究血液及其有形成分在血液流动中其流动和变形的规律及其对血液循环乃至整个机体的影响的科学,是近年来发展迅速的一门新兴边缘学科,与临床医学和基础医学有着密切的关系,因此,血液流变学已越来越受到医学工作者的重视。

目前根据血液流变学研究的方向和范围,血液流变学包括2个重要的分支。一个分支是从微观的角度出发,以血液组成成分的结构为研究对象,研究血液流变性障碍的发生机制,因此被称为微观血液流变学(microhemorheology)。另一支是从宏观的角度出发,以患病机体或群体为研究对象,研究血液流变性障碍发生的原因、机制、对疾病发展的影响以及纠正血液流变性障碍对疾病的治疗和预防作用。这与临床医学有着直接的关系,因此被称为临床血液流变学(clinical hemorheology)。从目前国内外的研究现状来看,微观血液流变学研究集中在2个层次,一是细胞水平,主要研究血细胞结构与其流变性的关系,因此又称细胞流变学或细胞血液流变学(cell hemorheology)。这方面研究最多的是红细胞,如红细胞膜的结构及红细胞膜流动性、粘弹性及红细胞的变形性、聚集性等等。另一

层次是分子水平,主要研究分子(如 ATP、胆固醇等)与血液流变性的关系,故有分子血液流变学(molecular hemorheology)之称。

二、发展史

人类在几千年前就已经注意到血液的流变现象,例如,巴比伦医生和古埃及医生都熟知炎症、出血和循环性休克;以及压迫颈动脉可导致意识消失等现象,并对上述病理过程作了许多描述,其中有些涉及流变学的内容后来被称为古典血液流变学。早在二千多年以前,就出现了放血疗法(图 1-1)。图 1-1 是公元 1520 年的一幅木刻画,它描绘了一个妇女在放血。这在当时是较常用的一种血流动力学疗法,这种疗法一直沿用了许多年。事实上,现在的所谓血液稀释疗法,即静脉放血和等容输液,正是建立在这一古代放血疗法的基础之上。此外,拔火罐及使用吸血蠕虫(水蛭)的放血,应用得更为普遍,不仅持续了许多世纪,甚至现在还在应用。



图 1-1 古埃及的放血疗法

近几世纪来,人们对血液流变性的观察逐渐详细,1675 年 Leeuwenhoekia 报道了红细胞通过毛细血管时发生的变形现象。1750 年 Boerhaave 在球结膜血管中看到了红细胞的轴流现象。1840 年 Poiseuille 观察了动物肠系膜毛细血管中血液的流动,并在玻璃细管中研究了均质流体的流动规律,阐明了均质流体在圆管中流动时,流量、压力和阻力间的关系,并总结出著名的 Poiseuille 定律。1906 年 Denning 首次观察到血液粘度可以随细管管径变化而改变这一现象。在此基础上,Fahraeus 等于 1931 年观察了血液在不同管径的细管中流动,结果发现,在一定的管径范围内,血液粘度随管径变细而降低。这一现象的发现,对阐明血液在微血管中的流动规律有重要意义。1941 年 Kvinsely 等观察到红细胞聚集现象,并发现显著的红细胞聚集可导致严重的末梢血流紊乱,从而初步揭示了血液的流变性与微循环的密切关系。在此以前,尽管人们已经发现了许多有意义的血液流变学现

象并加以描述,但由于种种原因,血液流变学却没有像医学中其他学科那样得到应有的发展。

1948年在第一届国际流变学学术会议上,Copley首次提出了生物流变学(biorheology)这一概念。认为生命现象亦寓于流变规律之中,倡议用流变学的规律和方法,以人体为主要对象进行研究。然而,当时在传统力学与生物学和医学分道扬镳的学科偏见约束下,上述倡议很难为大家所接受,此后的数年里,有关研究进展十分缓慢。直到20世纪50年代,有关生物流变学,特别是包括血液在内的体液的流变特性的研究才得到较快的发展。

1958年在第四届国际流变学会议上,决定成立国际性常设学术机构——国际生物流变学会,专门从事生物体内液体流动和变形规律等方面的研究。会议还决定创办第一份国际性的专业期刊《生物流变学》,以促进有关研究的交流。此后,这方面的研究日趋增多,尤其是以血液和血管流变学为主题的研究更为活跃。随着科学、工业的飞速发展和实验技术的提高,许多测定血液粘度、红细胞变形性及血小板活性等仪器的问世,使得血液流变学的有关研究方法和手段更为先进和精确,这无疑促进了研究的深入和学科的发展。

1966年在冰岛举行了第一届国际血液流变学会议,与会者提交的学术论文大多数是有关疾病时血液流变性的异常,并对发生这种障碍的原因和机制进行了初步的探讨。此后,每3~4年国际生物流变学会都要组织召开一次世界范围内的生物流变学和血液流变学学术会议。有关血液流变学各个方面的研究论文占会议论文越来越大的比例。这些研究结果显示,各种原因引起、发生各个不同环节的血液流变性异常与许多疾病的发生和发展有着密切的关系,纠正血液流变性异常对这些疾病的预防和治疗将有着重要作用。目前这一观点已愈来愈得到医学工作者的认可和重视。1981年国际生物流变学会决定创办生物流变学杂志的姊妹篇——《临床血液流变学》杂志,以便更及时、更全面地反映血液流变学的研究进展。此后,血液流变学逐渐发展为一门独立的学科。

我国在这方面的研究起步虽然较晚,但近年来的发展十分迅速。70年代以来,国内的一些研究单位、高等院校和部分城市医院相继开展了这方面的研究。在研制国内同类仪器和建立研究方法的同时,开展了大量的基础研究和临床观察,并取得了可喜的结果。目前,中国病理生理学会和中国生物物理学会和血液病学会都设有血液流变学专业委员会,专门从事血液流变学的基础和临床研究,创办了《中国血液流变学》杂志,并定期举行全国性的学术会议,交流研究进展。尤其值得指出的是我国的许多医学工作者,依据血液流变学的理论和方法,结合祖国医学中的淤血症,利用活血化瘀的传统治疗方法,结合其他降低血液粘度的现代方法,取得了更好的治疗效果,这不仅丰富了血液流变学的内容,同时也促进了祖国医学理论的发展。

三、血液流变学的研究内容及其在医学发展中的作用

近年来,血液流变学得到了迅猛的发展,并取得了丰硕的成果,这些成果不仅有助于加深人们对疾病发生发展的认识,而且血液流变学的原理也逐步用于临床医学的诊断和治疗中,并对某些疾病的预防也有指导意义。

在有关血液流变学的研究中,无论是分子水平或者是整体、群体的研究,核心内容是

血液的流变特性。大多数研究都是围绕血液流变性进行的,由于血液粘度是反映血液流变性最有代表性的综合指标,因此大多数研究最终都集中在对血液粘度的影响方面。血液的组成是非常复杂的,且具有特殊的物理、化学属性,这使得血液粘度受到诸多因素的影响,其中任一因素的变化都可能引起血液粘度的改变,进而导致血液流变性障碍。在诸多影响因素中,有关红细胞的变形性和聚集性,白细胞的趋边、粘附和变形,血小板的粘附、聚集和释放功能以及血浆蛋白、血脂的变化等因素最为重要。因此,在疾病或病理过程中,有关上述因素的变化规律、发生原因、机制以及纠正措施等则是目前国内外血液流变学研究中最热门的课题。

应该指出,血液流变学毕竟是一门近年来才发展起来的新兴学科,涉及到的许多问题都有待于人们去探讨去揭示;有关血液流变学的理论,不仅不够系统和完善,而且也不为大家所熟悉。当然,血液流变学也是一门跨学科的交叉、边缘学科。一方面涉及许多物理、化学及生物物理等理论知识,另一方面与医学又有非常密切的关系,因此,许多研究往往需要多种学科的人才共同参与、相互协作才能完成。无论如何,在短短的几十年内,血液流变学不仅得到迅速发展,而且也逐渐成为一门愈来愈受重视的学科。正如著名的血液流变学家 Dintenfass 所说:“对于未来几代人来说,血液粘度的科学以及速度梯度影响的血液凝聚与血栓形成和血细胞的流变学会是非常重要的。其重要性正如今天的细菌学与病毒学一样。今天,血液流变学还面临着种种延误和困难;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,通过不懈的奋斗才得到理解与公认一样。”我们深信,在科学工作者的共同努力下,血液流变学,尤其是临床血液流变学必将得到更快更全面的发展,并将对医学的发展作出重大的贡献。

(王柏生)

第二章 流变学的基本知识

第一节 流变学、生物流变学及类血液流变学

一、流变学

流变学(rheology)一词中的 rheo 起源于希腊语,有流动之意。远在公元前 5 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。”流变学一词由此而来。然而,流变学成为一门独立学科则是 20 世纪 20 年代的事情,当时,由于橡胶、塑料、油漆、润滑剂以及食品工业的迅速发展,推动了对上述原材料的研究。因为这些物质都包含有流动和复杂变形的结构,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的方法来分析,为此,研究这类物质的流动与变形,必须紧密结合这些物质的结构和物理、化学属性,美国的物理化学家 Bingham 在对油漆、糊状粘土、印刷油墨、润滑剂以及某些食品作了大量的研究后,认为这些物质都包含有使其能够复杂变形和流动的结构,其运动方式远较一般弹性体的变形和一般液体的流动复杂。同时还指出,这些物质的复杂变形发生在流动过程中,并对其流动产生重大影响,在他的倡议下,美国于 1928 年成立了流变学会,并把研究物质流动和变形的科学称为流变学。

与流体力学、弹性力学、材料力学以及应用力学相比,流变学有 2 个突出的不同点:其一,流变学研究的重点不仅限于物质的粘性运动和弹性变形,而是兼有这 2 种物理属性,或者更确切地说,是由这 2 种物理属性结合而成的物质的新的物理属性,即粘弹性和塑弹性。其二,流变学研究的内容和范围不仅从宏观角度去探讨物质的力学性质和行为,而且还从微观的角度去揭示物质内部结构及其理化性质与其宏观力学和运动的关系。由此可见,流变学又可以看作是物体的力学与构成物体的物质化学互相渗透的科学,正是从这一点出发,流变学又被定义为有关物体的力学性质和力学行为的物理化学。

物质在外力作用下能够变形或运动,是物质的普遍特性,不论是液体的流动,弹性体的变形或者是更为复杂的塑性、粘弹性以及塑弹性,均属于物质流变性的表现方式。事实上,流变学也是一门研究方法的科学,并不限定其研究对象,涉及的范围很广。其命名多以涉及的范围而定。例如:橡胶流变学、土壤流变学、生物流变学、体液流变学等等。

二、生物流变学

流变学在生物机体和人体的许多重要生命活动现象和过程的研究中,有着极为重要的意义。从宏观的生物机体或人体的运动,机体内部肌肉的收缩与舒张,神经兴奋的传导,各种体液以及各种脏器的运动,骨、关节、韧带在外力作用下的变形,一直到微观的细胞膜内外的物质交换,细胞表面的粘弹性和变形,细胞质的流动以及红细胞、血小板的聚集与分散等,无不与流变学有关。研究生物体特别是人体内可以观察到的流变现象以及构成生物体各种物质的宏观与微观流变性的这一部分流变学,即为生物流变学。如果流变学是应工业需要发展起来的话,那么,生物流变学则是应生物学和医学需要而发展起来的。

三、血液流变学与类血液流变学

在生物流变学范畴内,研究最多、进展最快的是有关人体内(包括器官、组织、细胞及大分子等)生命现象中的流变学。由于血液及血液循环是机体生命活动得以维持的基本保证,加之血液具有复杂组成成分和特有的理化性质,使得血液具有复杂的流变特性。因此,血液在循环中的流变现象及其意义以及影响因素、变化规律等问题已受到极大的重视,进行了大量的研究,并取得了飞速的发展。目前,研究血液及其有形成分流动和变形的血液流变学已发展成一门独立的学科。

人体内除了血液以外,还有许多其他液体,例如,组织间液、淋巴液、脑脊液、关节液、肠液以及胆汁等。这些体液不仅具有复杂的流变特性,且各不相同。在机体的生命活动中,这些液体同样也发挥着十分重要的作用。对人体内除血液以外的各种体液流变性的研究,统称为类血液流变学(parahemorheology)。在有关类血液流变学的范围内,最令人感兴趣,也是最重要的是关于组织细胞之间的组织液中高分子物质的运输。在这方面,Laurcet 等作了许多研究后认为,组织间充满了粘多糖,这些链状结构的粘多糖互相穿插构成网状的胶原纤维。一般情况下,这种链状结构可以保持布朗运动和相互间的滑动,从而使组织间液可以产生较快的对流样运动,这样可使得组织液中的高分子物质能够迅速扩散,从而保证了组织细胞间各种物质的快速交换。

呼吸道上皮细胞分泌的粘液的流变性也有重要意义,粘液流变性的改变可直接影响到纤毛的运输功能。例如,慢性支气管炎患者,其气道上皮分泌物的粘度显著增高,气道上皮细胞表面的纤毛不易将粘稠的分泌物运输并清除,这是导致气道阻塞的重要原因之一。药物治疗在某种意义上乃是降低分泌物的粘度,从而使分泌物易于被气道清除,这样就可以使气道阻塞症状得到一定程度的缓解。

应该指出,虽然血液流变学和类血液流变学主要是研究人体血液或其他体液的流变特性以及病理情况下这种流变性的改变,从而与基础医学和临床医学的关系极为密切,但是其毕竟涉及许多物理学及化学等学科的理论及知识,因此,仍然是横向切割各学科的交叉学科。其相互关系大致如图 2-1 所示。

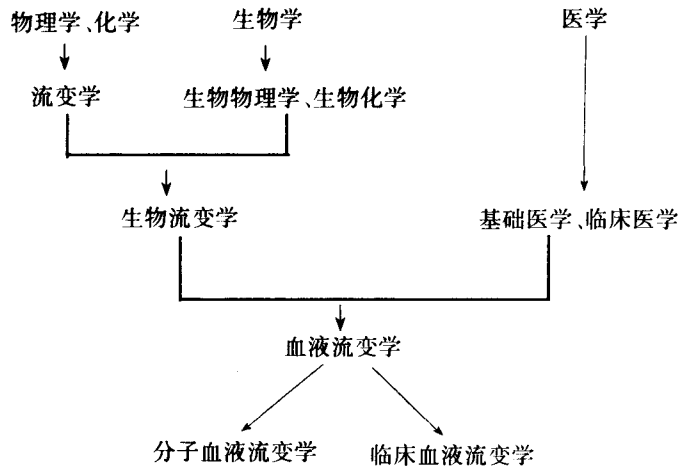


图 2-1 临床血液流变学与其他学科的关系

第二节 流变学的基本知识

一、液体的流度与粘度

液体与固体的主要不同之处,在于液体具有流动性。但这种流动性只有当液体受到外力的作用时,才能表现出来。一切液体都有流动性。但是,在作用力和其他条件相同的情况下,不同液体流动的快慢却不一样,表明不同液体流动的难易程度是不相同的。液体流动的难易程度一般用流度来定量表示,也就是说,流度是表示液体流动难易程度的量度,流度大,表示该液体容易流动;反之,表示该液体不易流动。以水和食用油为例,水较食用油易于流动,因而水的流度大,油的流度小。液体的流度之所以不同,是由于液体内部对流动起阻抗作用的内摩擦力大小不同所造成。液体内摩擦力的存在决定了液体具有粘滞性,两者是平行的。液体内摩擦力大,其粘性也大,粘度是表示液体粘性或内摩擦力的定量指标,与流度呈倒数关系。水的流度大,粘度则小;相反,食用油的流度小,粘度则大。由此可见,液体的粘度是反映液体流动性质的定量指标。鉴于液体的流动是以其变形为产生基础,因此,粘度又是反映液体流变性的重要指标。

二、液体粘性的产生

液体流动时,其内部的摩擦力对液体的流动起着阻抗作用,使液体表现出一定的粘

性。产生于液体内部的摩擦力又称内摩擦力,也只有在外部的推动力大于液体的内摩擦力时,液体才出现流动。不同液体流动时所产生的内摩擦力也不同,从而使它们表现出不同的粘性。液体的内摩擦力又称粘度,粘度是量度流体粘性的最常用的定量指标。了解液体粘性是如何产生的以及影响粘度的因素,是深入认识和分析粘度的基础。为了说明这些问题,首先让我们观察一下液体流经固体表面时所发生的情况(图 2-2)。

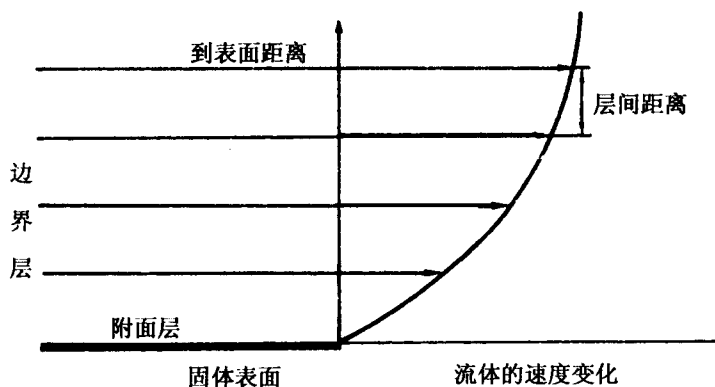


图 2-2 液体流经一固体表面时流速的变化

牛顿对此作了如下假设,液体沿固体表面是以一层一层的方式平行流动。液体按层次的平行流动又称为层流。层流时,各液层均沿力的方面作线性运动,层与层之间的液体不相互混合。经观察发现,各液层的流速并不相同,且随液层与固体表面的距离不同而改变。具体地说,离固体表面距离越远,液层流速越快,越近的液层流速越慢,紧贴固体表面的一层液体流速几乎为零。一般将紧贴固体表面的液层称为附面层,其他的液层称为边界层,边界层的流速随其与固体表面的距离增大而增加。这样,从固体表面起,各液层间就出现了一个速度梯度。经测量,边界层流速随与固体表面距离加大而增加是不均衡的,起初,速度增加较大,然后逐渐变小,当液层与固体表面距离达到一定程度时,各液层间速度的差别不明显,或者说,流速基本上不再随与固体表面距离的改变而变化。因此,我们可总结出,附面层液体流速几乎为零,离开附面层,边界层的流速越来越大,达到一定距离时,流速可为常量;但从液层的速度差别或速度梯度来说,离开附面层后,边界层的速度差或速度梯度却是逐渐减小的。任何液体,只要是以层流的方式流动,都存在着附面层和边界层,液层间速度的变化都遵循上述规律,血液在血管内的流动也不例外。

以层流方式流动的液体出现上述规律,主要取决于 2 个因素的存在。一是液体与所接触固体表面的附着力,这种附着力极为强大,以至可使附面层的流速几乎为零,或者说处于几乎不流动状态。另一是液体分子间存在着较强的吸引力,这种吸引力使液体具有内聚倾向,对液层间的滑动起阻止作用。从整体看,液体流动时受着 2 个力的作用。一是引起液体流动的推动力,作用于整个液体;另一个力是阻止液体流动的力,此力起源于附面层,由于附面层处于几乎不流动的状态,故液层间的吸引力使得附面层对与其相邻的边

界层有较强的牵制作用,阻止相邻边界层的流动,使其流速减小,而这一边界层对与其相邻的另一边界层也有牵制作用。这样一层牵制一层,就形成了速度梯度。离附面层越远,所受的牵制作用越小,速度梯度也越小,流速则越快。流体内每一层分子似乎都阻止其邻层分子的运动,就好像他们是某种程度粘在一起似的,事实上,这正是液体流动时呈现粘性的根本原因。

一般来说,液体的粘性愈大,液体各液层间彼此滑动也就愈困难,故粘性也可以被看作是存在于各液层间的内摩擦力,而且如果各液层继续流动,其内摩擦合力必然与推动液体并使之与流经固体表面的外力所平衡。当液体处于静止状态时,各液层间无相对的运动,此时液体的内摩擦力等于零,液体的粘性就表现不出来。

液体流动时所显现出的内摩擦力方向,一般是沿液层面的切线。其大小除了取决于液体自身的性质外,一方面取决于两液层的接触面积的大小,面积越大,内摩擦力亦越大;另一方面也取决于两液层的速度梯度。19世纪润滑理论研究者彼得洛夫对液体内摩擦力的大小,总结出以下表达式:

$$F = \eta \frac{\Delta V}{\Delta H} \Delta S$$

式中 F 为液体相邻两层间的内摩擦力, ΔV 是两液层流速差, ΔH 是两液层间的距离,因此, $\Delta V/\Delta H$ 是表示这两液层间流动速度变化的快慢,也即速度梯度, ΔV 不变时,两液层间的距离 (ΔH) 越小,速度梯度越大。 ΔS 是两液层间的接触面积, η 为该液体的粘度系数,取决于这种液体自身的性质和当时的温度。为了便于比较,往往用单位面积的内摩擦力,即切应力 τ 来表示:

$$\tau = \eta \frac{\Delta V}{\Delta H}$$

上述公式同样适用于液体在圆管内的流动。液体在刚性圆管内作稳定流动,且管道较长和断面均匀时,入口的影响可以忽略。如果流速较小,可以认为液体各质点均作平行于管轴的运动,也即沿力的方向以层流的方式流动。紧贴管壁处的液层速度几乎为零,其余各层呈同心圆状,各层间互相滑动而不混合,距管轴越近,流速越快,速度梯度越小。一般情况下,血液在圆形管内以层流的形式流动时,血液呈“套管式”流动,即中心快而外围慢。在圆管轴心处血液速度最大,贴近管壁处流速最小,紧贴管壁的血液附面流速为零(图 2-3)。

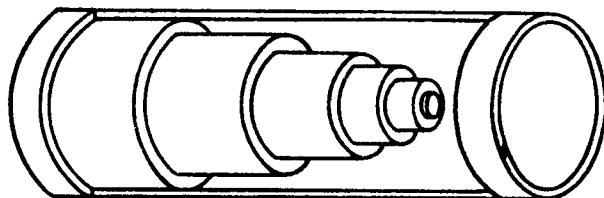


图 2-3 圆管内“套管式”的层流

三、流体的变形与粘度

液体以层流方式流动时,液体各层间出现相对移动。事实上,这也是一种流体体积形状的变化,因此,液体流动,不仅是液体沿作用力方向的运动,而且同时也包括了液体体积变形的过程。为了说明这一问题,我们设计了像长方体形状的液体,在力的作用下流动时,液体形状所发生的改变(图 2-4)。

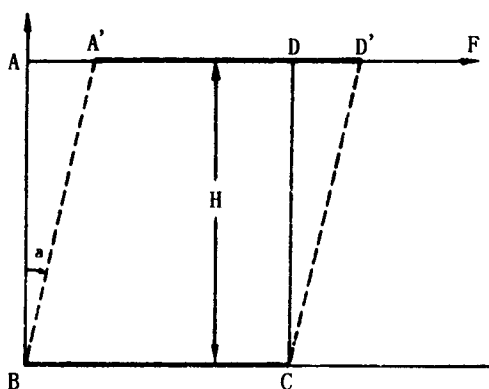


图 2-4 液体流动时的变形过程

如图 2-4 所示,未流动时液体的单元像长方体形状的一块体积,其正面为 ABCD。在力 F 的作用下,液体发生了流动,液体内部各液层间则出现了相对移动和液体体积的变形。原为长方体的液体单位 ABCD,经过时间 t 后,液体质点 A 和 D 分别移动到 A' 和 D' 的位置,整个液体单位则变为正面为 A'BCD' 的平行四边形体。这就直观地说明了液体流动时所发生的变形。同时,每层的运动速度又是不相同的,即 A'D' 边的速度大于 BC 边上的速度。事实上,液体内部各液层同时都受着 2 种力的作用,即运动速度快的相邻层对其的向前拉力和速度慢的相邻层对其的向后拖力。拉力和拖力是大小相等、方向相反的一对力,具有这种特点的力称为切变力或剪切力。正是在这种切变力的作用下,液体发生了由 ABCD 的长方体变为 A'BCD' 的平行四边形体的体积变形。由切变力引起的体积变形又称为切变变形。事实上,切变力是液体在外力作用下发生切变变形时,在液体内部所产生的与推动液体并使之流动的力相平衡的一种力。这种力,前面称之为内摩擦力,故内摩擦就是切变力。单位面积上所承受的切变力称为切变应力,简称切应力,一般用 τ 来表示。在切应力产生的同时,液体的各液层则发生相对的位置移动和切变变形。图 2-4 中的 α 为切变角,表示该液体发生切变变形的速率,也可以说是 AD 与 BC 2 层流速差的产生速率,一般称为切变率,通常用 $\dot{\gamma}$ 表示。

流体的体积变形是各液层之间存在着粘性的表现,也是流动的产生基础。液体流动时的切应力(τ)、切变率($\dot{\gamma}$)和粘度(η)三者间有着密切的关系。牛顿用下式表示它们的关系:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

上式又称为牛顿的粘度定律。可以看出,为维持一定的切变率,粘度越大,所需的切应力也越大;在切应力不变的情况下,液体的粘度越大,切变率则越小;在粘度不变的情况下,切应力越大,切变率也越大。当液体静止时,液层间不出现任何相对的移动和变形,此时切变率为零,液体内部也没有切应力,因此静止时的液体也无粘性可言。可见,粘度本身表现为产生一定切变率所需的切应力。牛顿粘度定律也可用下式表示:

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}$$

从上式中可以看出,粘度的大小可以通过切应力和切变率的比值得出。

四、液体的流动曲线

粘度不仅能反映液体的流动性质,而且也是量度液体流动时各平行液层间的内摩擦力大小的量度指标。由于粘度等于切应力和切变率之比,因此,一切液体的流动性质均可以用切应力和切变率之间的关系来表现。显示液体切应力和切变率的关系的曲线,称为该液体的流动曲线。液体的流动性质不同,其流动曲线也不相同。换言之,流动曲线不同的液体,其流动性质,或者说其粘度也是不同的。一般情况下,对任何液体来说,在一定的切应力作用下,都可产生一定的切变率。如果分别设切应力和切变率为横坐标和纵坐标,即可根据某液体的切应力和相应的切变率描绘出该液体的流动曲线。实验表明,有一类液体,其流动曲线是一通过原点的直线(图 2-5),说明对这一类液体来说,切应力和切变率成正比关系,也就是说,这一类液体的粘度是一恒定值,不随切变率变化而变化(图 2-6 中的 a)。这一类液体称为牛顿型液体,其恒定的粘度则称为牛顿粘度。一般低分子的简单液体,如水、汽油、酒精等属于牛顿型液体。

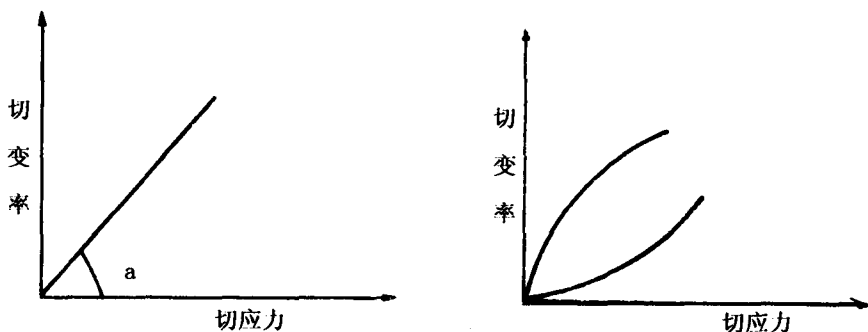


图 2-5 牛顿型和非牛顿型液体的流动曲线

对于另一类液体来说,根据切应力和切变率所描绘的流动曲线不是一条直线,而是一条曲线(图 2-5),说明这类液体的切应力与切变率不呈正比关系。其粘度不是一恒定值,而是随切变率变化而改变的(图 2-6 中的 b),这一类液体称为非牛顿型液体。具有随切变率改变而变化的粘度,称非牛顿粘度。许多大分子及复合的溶液都属于这一类,如石膏水溶液、染料水溶液、胶体溶液、油脂混浊液以及高聚物溶液等。血液和淋巴液也属