

流变学理论基础 及其应用

LIUBIANXUELILUN JICHU
JJI YINGYONG

主 编 杨瑞芳

副主编 龙 勉 吴 西



重庆大学出版社

流变学理论基础及其应用

主 编 杨瑞芳

副主编 龙 勉 吴 西

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍流变学的基本概念、基本问题,以及在生物流变学、食品流变学和聚合物材料等方面的应用,同时还介绍了流变学在检测技术中的实验和方法。

本书可供从事生物力学、生物流变学、生物医学工程、物理学、石油、化工、生物学等有关专业的研究生使用,也可供有关高等院校师生及有关工程技术人员参考。

流变学理论基础及其应用

主 编 杨瑞芳

副主编 龙 勉 吴 西

责任编辑 周 任

版式设计 赵品坚

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

四川外语学院印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:8.75 插页6 字数:240千

1998年5月第1版 1998年5月第1次印刷

印数:1-500

ISBN 7-5624-1024-0/Q·7 定价:15.00元

序

《流变学理论基础及其应用》为生物流变学及生物力学工程丛书的第二本。

近 40 年来,人们对流变学和生物流变学的兴趣日益增长,这是因为它在工业、农业、医学、生物、物理、化学等各学科领域都有交叉并且有长足的发展。

流变学涉及的范围甚广。最初由 Bingham 教授,根据当时塑料工业的发展,倡立了流变学(Rheology)学会。60 年代初期,由于美国生理学家 Copley 教授倡导和促进,生物流变学国际杂志《Biorheology》于 1962 年由 pergamon 出版社发刊。国际血液流变学学术讨论会(INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEMORHEOLOGY)于 1966 年在冰岛首都雷克雅未克召开,并成立了国际血液流变学学会。我国学者于 1981 年第一次出席了第四届国际生物流变学大会。1992 年第八届国际生物流变学大会在北京召开了卫星会议。

由冈小天先生撰写的、吴云鹏教授等翻译的《生物流变学》一书由科学出版社分别于 1980 年和 1988 年出版发行第一、二版。由吴云鹏、梁子钧等教授编著的《生物流变

学》一书亦于1988年高等教育出版社出版发行。袁龙蔚教授所著的《流变力学》一书也由科学出版社出版发行。由此读者不竟要问为什么我们还要编写这本书呢？

各学科的科学家的科学家，譬如物理学家、化学家、生物学家、力学工程工作者、生物医学工程工作者、农业科学家、材料科学家、食品科学家等都对流变科学感兴趣，但实际上不可能在同一本书内写出他们都能满足的内容。这本书是为学习生物力学、生物流变学、材料工程学、物理学和食品流变学等领域的研究生而写的。它从连续介质力学的观点出发，介绍流变学的基本原理及其在生物流变学（着重在血液流变学）、高分子聚合物材料和食品流变物质上的应用，以及流变测试技术等。

本书共分八章。第一章概论，简述自然界中的一些流变现象和流变学发展历史；第二章流变学理论基础，在连续介质的基础上，进一步阐述了流变学的理论基础；第三章连续介质基本方程，简明扼要地叙述了几个基本定律；第四章本构方程及粘弹性理论，论述了有关流变模型及其表达式；第五章流变学测试技术和方法，详细地介绍了流变学的实验技术和方法；第六章血液及其他体液流变性质，着重介绍了粘度和粘弹性等流变参数的测量及其在医学上的应用；第七章聚合物材料流变性质，介绍了高分子材料的流变性质及其在加工中的应用；第八章食品流变性质，着重在乳制品的流变性质及其在加工过程中的应用。

本书第一、二、三、八章由杨瑞芳编写，第四、五、七章由龙勉编写的，第六章由吴西编写。为了适应一些读者尚不熟悉张量分析，书末列出附录，简要地给出了张量基础

知识。希望本书能自成一体。

世界万物流变现象变化万千。大到宇宙、地壳变动，小到微生物、分子流变现象，有许多问题尚未解决，有许多现象尚未被发现，所以一本书的材料不全面是不可避免的。作者所知有限，书中难免有许多错误或者遗漏，恳望读者提出指正，以便我们今后改进。

杨瑞芳

1993.12.8

于美国加州

符 号 说 明

a	常数; 半径; 加速度; 热膨胀系数
a_p	粒子半径
A	面积; 粘度——压力系数
A_1	一阶 Rivlin-Ericksen 张量
A_n	n 阶 Rivlin-Ericksen 张量
b	体距; 圆盘厚度
b_{ij}	张量协变分量
b^{ij}	张量逆变分量
b^j, b^i	张量混合分量
B	膨胀比
\bar{B}_{ij}	张量协变 Euler 分量
\bar{B}^{ij}	张量逆变 Euler 分量
C	浓度; 比热容
C	Cauchy-Green 张量
$C(t')$	相对 Cauchy-Green 张量
C_r	右 Cauchy-Green 张量
C_{ij}	相对 Cauchy-Green 张量的分量
C_{ijkl}	弹性系数
$(C^{-1})^{ij}$	Finger 变形张量分量
d	变形速率张量; 相对距离向量
ds	相对距离标量
d/dt	随动导数; 物质导数
D	直径
\overline{DP}	平均聚合度
D/Dt	应变速率张量

$\mathcal{D}/\mathcal{D}t$	Jaumann 导数; 共转导数
E	杨氏模量; 内能
$E(t)$	瞬时模量; 松弛模量
E_{ij}	协变有限应变张量
E^{ij}	逆变有限应变张量
E_r, E_v	粘流活化能
e_i	基矢量
f	函数; 构形; 体积力
f_k	参考构形
f_i	相对构形
F	形状因子
F	变形梯度张量
F^{-1}	变形梯度张量的逆
$F_i(t')$	相对变形梯度张量
F^T	F 的转置
\dot{F}	变形梯度张量的速率
g	空间度量张量; 基向量
G	重力能; 弹性模量; 剪切模量; 单位圆柱长度力矩
G_T	总力矩
G_1	模量
G'	存贮模量
G''	损耗模量
G^*	复模量
h	热流向量
h	四面体的高
H	红细胞压积; 动量矩; 流动活化能
H_0	零切活化能
H_v, H_r	粘流活化能
$H(t)$	阶跃函数

$H(\tau)$	模量分布函数
I	单位张量; 惯性矩
I_1, I_2, I_3	张量不变量
J_g	柔度, 柔顺性
$J(t)$	蠕变柔度
k	常数
K	外力矩; 动能; 体积模量; 压缩系数; 流动常数; 恢复常数
l	长度; 极间距
L	速度梯度张量
L	长度
$L(n)$	n 阶加速度梯度张量
m	面距矢量; 力偶矢量
M	力矩
\overline{M}_{cr}	临界分子量
\overline{M}_w	分子量
n_a	Couette 修正因子
n	流动指数
\mathbf{n}	法线矢量
n_{ij}	方向余弦
n_j	外法线方向余弦
O	坐标原点
$O x_1 x_2 x_3$	直角笛卡尔坐标系
$O\xi_1\xi_2\xi_3$	随动坐标系
p	压力; 压力梯度
P	压差; 压降; 物质点; 线动量
$P_{出}$	出口压力
$P_{入}$	入口处损耗
$\Delta P_{粘}$	粘性损耗

$\Delta P_{\#}$	弹性损耗
Q	体积流量;热量
\dot{Q}	热量变化率
$Q(t)$	正交向量
r	半径
R	正交张量
R	气体常数;半径
R_a	平均半径
R_1	内筒半径
R_2	外筒半径
Re	雷诺数
S	经过时间;表面积
S_{ij}	偏应力张量
t	时间
$\text{tg}\delta$	损失角正切;内摩擦系数
T	应力;面力;温度
T	二阶张量
T_d	分解温度
T_f	流动温度
T_g	成型温度
u, v	速度
u_w	有效滑移速度
u_1, u_2, u_3	位移分量
U	正对称张量
U	Bingham 粘度
u	平均速度
V	速度向量
V_c	临界平均速度
v_i, v	速度分量

v'_z	v' 对 X^* 求导数
V	体积
\bar{V}	平均流速
V_{ij}	应变率张量分量
W	功; 壁面切应力; 应变能函数
W_{ij}	旋度
W	涡动性张量
x	坐标
X	物质坐标
y	坐标
z	稳定性参数

希腊符号

α	常数因子; 锥角; 动能修正因子
β	体积膨胀系数
β'_i	随动混合分量
γ	应变; 重度
$\dot{\gamma}$	剪切变率
γ_R	壁面可恢复应变
ν_{ij}	移动协变度量
ν^{ij}	移动逆变度量
$\dot{\gamma}_{ij}$	应变率张量分量
γ_{del}	延迟应变
$\dot{\gamma}_w$	壁面切变率
Γ	表面张力
Γ_{ij}	移动协变应变张量
Γ^{ij}	移动逆变应变张量
δ	相位差; 血浆层厚度
δ_{ij}	Kronecker 符号
$\delta(t)$	脉冲函数

$\delta/\delta t$	移动导数(实质导数)
ϵ	内能;振幅;应变
ϵ_d	阻尼器伸长
$\epsilon(t)$	应变函数
ϵ_s	弹簧伸长
ϵ_v	体积应变
ϵ_{ij}	应变张量分量
η	粘度
η_r	相对粘度
η_b	全血粘度
η_B	Bingham 粘度,塑性粘度
η_P	血浆粘度
η_a	表观粘度
η'	动态粘度
η''	表征流体的动态弹性
η^*	复粘度
η_E	单轴拉伸粘度;Trouton 粘度
η_{EB}	双轴拉伸粘度
η_0	零剪切粘度;低剪切率粘度
η_∞	$\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ 的粘度
η_{EP}	平面拉伸粘度
η_K	体积粘度系数
η'_r	形变粘度系数
η_r, η''_r	纯剪切粘度系数
θ_0	锥—板间夹角
λ	Lame 常数
μ	Lame 常数
$\mu(\dot{\gamma})$	粘性系数函数
ν	泊松比;运动粘度

ξ_i	移动坐标系
ρ	密度
τ	剪切应力; 应力参数; 松弛时间; 延迟时间
τ_c	临界切应力
τ_K	Kelvin 模型松弛时间
τ_m	Maxwell 模型松弛时间
τ_y	屈服应力
τ_w	管壁切应力
τ_o, τ_e	标准线性固定松弛时间
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力
σ_{ij}	欧拉应力张量分量
$\Sigma_{(1)}, \Sigma_{(2)}, \Sigma_{(3)}$	应力张量 σ_{ij} 的 3 个不变量
Φ	标量; 流动度
φ	微粒的容积分数
Φ_a	表观流动度
Φ_i	单位质量的重力势
χ	参考坐标
ω	瞬时角速度, 振荡角频率
Ω	集合(空间域); 正交向量; 相对角速度

目 录

符号说明

1. 概 论	1
§ 1.1 流变学历史起源及其发展	1
§ 1.2 生物流变学及其进展	3
§ 1.3 流变现象	4
2. 流变学基础	10
§ 2.1 运动的描述	11
§ 2.2 变形梯度	13
§ 2.3 变形(应变)张量	15
§ 2.4 变形速率和速度梯度	16
§ 2.5 移动(随流)坐标	20
§ 2.6 几种导数的比较	24
§ 2.7 应力	25
3. 连续介质基本方程	33
§ 3.1 质量守恒定律 连续方程	33
§ 3.2 动量守恒定律	34
§ 3.3 动量矩守恒定律	40
§ 3.4 能量守恒定律	44
4. 本构方程及粘弹性理论	48
§ 4.1 物质的本构方程	48
§ 4.2 粘弹性理论	70

5. 流变学测试技术和方法	87
§ 5.1 管式粘度计	87
§ 5.2 旋转式粘度计	115
§ 5.3 动力学测试和粘弹性分析	139
§ 5.4 方法和技术比较	145
6. 血液流变及其它体液流变特性	146
§ 6.1 血液的非牛顿性	146
§ 6.2 血液粘弹性	157
§ 6.3 微循环血液流变学	166
§ 6.4 其它体液的流变特性	171
7. 聚合材料的流变特性	176
§ 7.1 高聚物流变特性的一般特征	176
§ 7.2 高聚物熔体的真实流动	194
8. 食品流变性质	206
§ 8.1 食品流变学的现状和发展	206
§ 8.2 食品物质的流变特性	207
§ 8.3 食品物质的流变特性测量实例	220
§ 8.4 食品物质的流变特性与微观结构关系	228
§ 8.5 在乳制品生产过程中食品流变学的应用	233
附录 张量分析	238
§ 1 笛卡尔坐标系	238
§ 2 曲线坐标系、基矢、度量张量	240
§ 3 坐标变换、物理分量	242
§ 4 张量的定义	243
§ 5 Christoffel 符号、协变导数	246
§ 6 基矢、度量张量及协变分量的计算	248
参考文献	255

1. 概 论

§ 1.1 流变学历史起源及其发展

流变学是研究物质的流动和变形的科学。在古代,人们在日常生活、建筑物的结构、控制河流的流动中,已经获得关于物质的流动和变形的知识。公元前六世纪,人们就流传着希腊哲学家赫拉克里的名言:“一切在流,一切在变”。流变学源于希腊语 rheos(流动)之意,由 rheos 演化为英语的流变学(Rheology),流变学一词即由此而来。我国古代孔子也有类似的名言:“逝者如斯夫,不舍昼夜”他将时间的流逝比如流水,表明世界万物一切在流,一切在变。

虽然,产生流动和变形需要力这是个古老的概念,但古时候的观察和研究没有明确地阐述这两个量之间的关系。胡克最先在1660年阐述了一个弹性物体的应力 σ 和伸长 ϵ 是线性关系;牛顿在1687年阐述了牛顿流体的应力和应变率是线性关系。上述两定律均在17世纪发表,但直到19世纪末才由柯西、纳维、斯托克斯等人将上述两定律推广到三维流动和变形中。从此,胡克弹性固体力学和牛顿流体力学随着它在许多工程的分支学科中的应用而得到巨大的发展。

世界宇宙万物中,有很多复杂的物质材料,这些材料既不服从胡克定律,也不遵循牛顿定律。例如油漆、橡胶、塑料、油墨、某些食品及生物学材料等都是复杂的物质材料,它们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。因此,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……广泛的工业背景下逐渐发展起来的。然而,流变学变成为一门独立学科,则是由美国 Bingham 教授于 1928 年创建的。

1928 年 Reiner 从巴勒斯坦到美国访问并且和宾汉一起工作。到达的时候,宾汉对雷纳说,他,一个化学家,雷纳,一个土木工程师,一起工作解决共同的问题,这就是学科的交叉,因此,需要建立一个物理分支来处理这类问题。雷纳说纳入连续介质力学让人们承认。宾汉则认为会吓跑所有的化学家,于是商定起了一个新名字流变学(Rheology)。这样,在这个新名字下,已经生长成为一个极其有用的独立的分支学科。

在 1929 年 12 月举行了流变学会第一次会议,同年出版了第一期流变学杂志。1933 年后停止出版,1957 年作为 Transactions of Society of Rheology 而重新出版。1978 年恢复了它最初的名字《流变学杂志》(Journal of Rheology)。

直到第二次世界大战爆发为止,美国流变学会是世界上唯一的流变学会。

1945 年 12 月国际科学联合会(International Council of Scientific Unions)组织了一个流变学联合委员会,1947 年在冯·卡门主席的主持下举行了第一次会议,代表们来自物理、化学、生物科学、大地测量、空气物理、理论和应用力学的国际联合会。委员会的职能是:

- (1)对流变学的专门名词进行命名;
- (2)将流变学论进行摘要;
- (3)组织粘度的测量;
- (4)组织流变学家之间的联系。

委员会负责组织第一、二届的国际流变学会议。直到 1968 年为止,国际流变学会议每五年举行一次,1968 年以后每四年举行一次。第九届是 1984 年在墨西哥举行的。