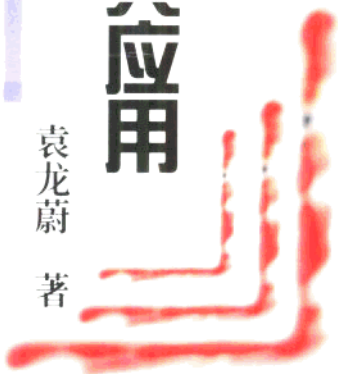


含缺陷流变性材料

破坏理论及其应用

袁龙蔚 著

科学出版社



含缺陷流变性材料 破坏理论及其应用

袁龙蔚 著

国家自然科学基金委资助重点项目(19632030)

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书是一本系统阐述含缺陷流变性材料破坏理论及其应用的专著。从非线性流变动力学、非平衡态热力学、统计物理学相结合出发,强调时间、温度、流变、耗散四项基本因素,在实验研究的基础上,从宏观、介观、微观三个层次统一地探讨含缺陷流变性材料破坏机理。全书共分8章,即:绪论、分形流变破坏理论、统计流变破坏理论、缺陷位移场的实验研究、局域温度场的实验研究、热磁效应的实验研究、含缺陷流变性材料破坏理论基础、应用。本书可作为固体流变学、材料科学、破坏力学、固体物理、高聚物物理等专业研究生的教学参考书以及相关自然科学和工程技术领域科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

含缺陷流变性材料破坏理论及其应用/袁龙蔚著. 北京:科学出版社, 2001.1

ISBN 7-03-009063-2

I. 含… II. 袁… III. 工程材料-缺陷-研究 IV. TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 82570 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

武汉大学出版社印刷总厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2001年1月第 一 版	开本: 850×1168 1/32
2001年1月第一次印刷	印张: 16 3/4 插页: 0
印数: 1~1000	字数: 438 000

定价: 36.00 元

序

20 世纪的一个显著的时代特点就是科学的社会化和社会的科学化。科学技术的发展、进步与成果直接改变了我们周围的一切,影响着人们的生产、生活和思维方式。现今,人类科学技术取得了辉煌的成就,经历了激动人心的变革,对宏观宇宙和微观世界给予了再审视和重新思索。

流变学的基本观念就是认为世界上万物皆流、万物皆变。“流水不腐,户枢不蠹”,平衡即意味着“死亡”。只有不稳定的变化,才能带来生机、带来活力,造成新的有序态,导致新的系统功能。流变学理论和其他科学一样,充满着玄机和诱惑。

自 20 世纪 80 年代提出流变断裂学这一新的分支学科以来,科学工作者在力学、物理学、化学、热力学、材料科学等诸学科的边缘区域、交叉区域进行不断地探索,从宏观到介观、经纳观再到微观,不断地总结、思考、实验、再总结、再思考。1997 年,在北京大学王仁院士的领导与组织下,国际理论与应用力学联合委员会(I-UTAM)于北京成功地举行了“Symp. on Rheology of Bodies with Defects”(缺陷体流变学专题研讨会),这大大促进了这一新分支学科在国内外的的发展。

在此书稿动笔不久,我不幸地意外摔伤导致胯骨骨折,在住院的半年里,天天惦念着本书稿的构思。出院后立即继续,这本书稿是坐在轮椅上完成的,有过沮丧和彷徨,也有过兴奋和喜悦,从每天只能写 300 字到可写 2000 字是艰苦的锻炼,在这一困难过程中,我之所以能够坚持下来,是党组织的关怀、是女儿的悉心照料,以及科学出版社编辑部对我推迟交稿给予的谅解。这是震撼我心、催人泪下的一段人生历程。

将本书作为新世纪的献礼、作为我从事流变学研究整整 50 年

的纪念,我深深感谢 10 多年来国家自然科学基金委员会、美国国家自然科学基金委员会提供的经济资助,美国利哈伊大学 G. C. Sih 教授、堪萨斯州大学 S. E. Swartz 与 K. K. Hu 两位教授、法国第六巴黎大学 J. Lemaitre 教授、澳大利亚悉尼大学 D. V. Boger 教授和 R. I. Tanner 教授、西班牙塞维利亚大学 C. Gallegos 教授、波兰科学院 S. Zahorski 教授、墨西哥科学院力学所 A. S. Balankin 教授及日本京都大学小谷寿教授等的有益讨论或提供的资料。

在国内,中国科学院力学研究所白以龙院士、金属所龙期威研究员、北京大学王仁院士与黄筑平教授、清华大学余寿文教授、北京理工大学邢修三教授、中国科技大学研究生院陈至达教授、宁波大学王礼立教授、华中理工大学杨挺青教授给予我的启示与帮助,以及天津大学、兰州石油机械研究所在实验上的协助,我均衷心表示谢意。对我校张平教授、罗迎社教授、粟建新副教授及罗文波、邓旭华、揭若谷、胡波及研究生黄丽斌、张向霞等同志们多方帮助也表示谢意。他们的无私协助使我深刻地认识到:当代的科学研究是多么需要共同思考的氛围、多么需要群体协作的团队精神!

本书前三章是有关学科发展的简要回顾,第 4~6 章是新的实验成果,第 7 章是理论分析,第 8 章是应用。非常遗憾地是对复合材料、冲击等动力载荷等这样重大领域的问题未能涉及。

含缺陷流变性材料破坏理论还不完善,实验和计算方法与手段均待发展,对新型材料和工程构件的应用研究急需深化。为此,深切期待着广大读者的指正与帮助。

袁龙蔚

2000 年 6 月写于湘潭大学

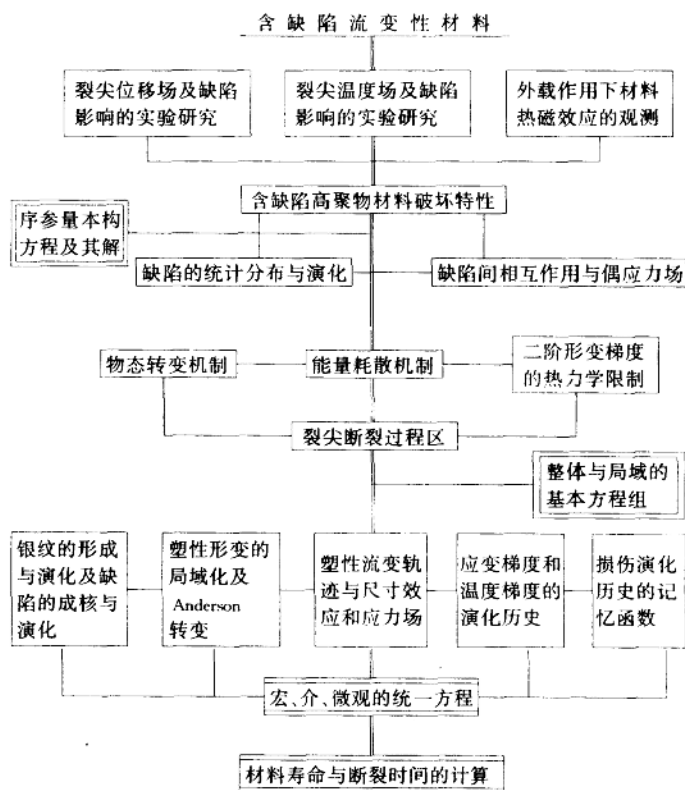
前 言

1997年9月1~5日在北京召开的“带缺陷物体流变学国际专题研讨会(IUTAM Symposium on Rheology of Bodies with Defects)以来,创建于我国的“含缺陷流变性材料破坏理论及其应用”逐渐引起国内外有关学者们的极大兴趣与关注。

含缺陷流变性材料破坏理论是在扬弃经典断裂力学与损伤力学的基础上形成的,它的科学主题是过程。含缺陷流变性材料破坏的全过程,既是序参量产生非线性涨落的层次体系的一个非完全确定性过程,又是整体体积随内部缺陷表面面积变化的一个确定性非周期流变过程。连续介质与离散介质同在,确定性与随机性共存,这是对经典破坏力学的再审视与重新思索。

含缺陷流变性材料破坏理论主要是研究缺陷损伤演化阶段和宏观裂纹扩展阶段中共同具有的非线性与不可逆性的本质,尤其是塑性流变响应的非线性、广义力与广义流间的非线性,以及表现为对称性破缺、黏性耗散及热-力耦合形式耗散的不可逆性。这种非线性与不可逆性贯穿宏、介、纳、微观多层次,有着内在的必然性和概率性。

把含缺陷流变材料的破坏过程看作是热力学意义上的远离平衡态动力过程,其中发生耗散结构的自组织现象,而这些耗散结构的自相似性又为不同标度从微、纳观到介观再到宏观层次的沟通和协调提供了可能性。近年来,我们对这项理论研究的主要思路如下列框图:



从上述框图可以看出:材料内部各种不同尺度、不同类型的介观缺陷呈现无序分布,相关缺陷间的相互作用形成集体协同效应,对裂尖过程区的形变规律和流变运动状态有重要影响。裂尖过程区内各种损伤(银纹、微孔、微裂纹、夹杂等)的成核规律、长大机制、汇合条件、演化特性对整个破坏过程起着关键作用。对这些机

制与规律的微观物理基础应有较深入的了解。宏观不是介观的简单演绎,介观事物更不是微观事物的简单演绎。为寻求不同层次间的内在联系,需要充分利用与大力开发计算模拟、仿真技术和现代宏、介、微观实验技术与观测手段。

含缺陷流变性材料的破坏理论及其应用起步不久,迫切需要营造和保持一种共同的思考,无论这种思考是同一的还是异向的,都必将不断启发和带动这一新分支学科的发展和完善。

目 录

前 言	(iii)
第一章 绪论	(1)
1.1 含缺陷流变性材料破坏理论的缘起	(1)
1.2 流变学发展简史	(4)
1.3 破坏力学发展简史	(9)
1.4 宏观流变断裂学的建立	(12)
1.4.1 裂纹体平衡方程及局域化剩余	(13)
1.4.2 裂尖过程区热力学分析	(16)
1.4.3 流变断裂学梗概	(18)
1.5 流变断裂学的非线性几何分析	(22)
第二章 分形流变破坏理论	(29)
2.1 分形论的基本概念与原理	(29)
2.1.1 分形和分维	(29)
2.1.2 分形论的若干基本原理	(35)
2.2 分维的量测与计算	(36)
2.2.1 分维的量测	(36)
2.2.2 分维的计算	(40)
2.3 金属材料流变破坏的分形分析	(44)
2.3.1 裂纹面粗糙度 Hurst 指数	(45)
2.3.2 统计自相似裂纹	(49)
2.3.3 自仿射裂纹	(55)
2.4 聚合物材料流变破坏的分形分析	(65)
2.4.1 高分子链的分形性	(66)
2.4.2 含缺陷流变性材料多重分形分析	(69)
第三章 统计流变破坏理论	(77)

3.1	损伤断裂的介观力学基础	(77)
3.1.1	基本方程组	(77)
3.1.2	介观层次的塑性流变性	(79)
3.2	连续介质中微结构随机场	(80)
3.2.1	含缺陷流变性材料的耗散机制	(80)
3.2.2	含缺陷流变性材料微结构随机场	(84)
3.3	离散介质中微结构概率结构	(90)
3.3.1	离散介质概率性介观力学	(91)
3.3.2	晶体系概率性介观力学	(95)
3.3.3	高分子链系概率性介观力学	(103)
3.4	含缺陷流变性材料破坏的统计理论	(111)
3.4.1	最弱链模型和链束模型	(111)
3.4.2	近代统计破坏力学的应用	(117)
第四章	缺陷位移场的实验研究	(121)
4.1	实验设备原理及试件制备	(121)
4.2	无缺陷试件位移场的实验研究	(124)
4.3	含缺陷试件位移场的实验研究	(140)
4.4	影响因素的实验研究	(194)
4.4.1	载荷及作用时间的影响	(194)
4.4.2	缺陷方位的影响	(240)
4.5	对实验结果的讨论	(276)
第五章	局域温度场的实验研究	(279)
5.1	实验设备原理及试件制备	(279)
5.2	实验成果	(287)
5.3	对实验结果的讨论	(316)
第六章	热磁效应的实验研究	(320)
6.1	自行研制的量测设备及其原理	(320)
6.2	试件的制备	(324)
6.3	实验成果	(325)
6.4	对实验结果的讨论	(333)

第七章 含缺陷流变性材料破坏理论基础	(335)
7.1 含缺陷流变性材料破坏的特性	(335)
7.1.1 破坏过程独具的特点	(335)
7.1.2 玻璃化转变与 Anderson 转变	(336)
7.1.3 颈缩现象及银纹的形成与演化	(339)
7.2 裂尖断裂过程区的塑性流变特性	(344)
7.2.1 剪切带型断裂过程区	(344)
7.2.2 塑性流变轨迹对应力场的影响	(348)
7.3 序参量本构方程	(351)
7.3.1 缺陷间相互作用与温度梯度	(352)
7.3.2 序参量本构方程的建立	(359)
7.3.3 序参量本构方程的解	(365)
7.4 裂尖过程区的基本方程组	(369)
7.4.1 热力耦合效应的基本原理	(369)
7.4.2 热致磁效应的基本原理	(388)
7.4.3 裂尖过程区内热传导和热磁效应	(394)
7.4.4 裂尖过程区的基本方程组	(397)
7.5 横断宏/介/微观层次的一个统一方程	(401)
7.5.1 变形固体的量子断裂力学模型	(402)
7.5.2 变形固体的量子统计断裂模型	(404)
7.5.3 横断宏/介/微观的材料破坏方程	(408)
7.6 含缺陷流变性材料破坏的“断裂准则”	(410)
7.6.1 分式指数导数与损伤演化记忆函数	(411)
7.6.2 裂尖过程区内应变梯度演化历史	(420)
7.6.3 裂尖过程区内温度梯度演化历史	(425)
7.6.4 记忆函数及断裂时间的计算	(428)
第八章 应用	(430)
8.1 电缆的随机断裂分析	(430)
8.1.1 模型的建立	(430)
8.1.2 随机弱化的二级效应	(433)

8.1.3 电缆的流变断裂力学分析	(439)
8.2 定向凝固 PMMA 疲劳强度分析	(443)
8.2.1 疲劳损伤累积和疲劳裂纹形成	(443)
8.2.2 裂纹的扩展及材料开裂时间	(446)
8.2.3 最终的破坏过程	(452)
8.3 纳米结构材料特性的流变力学分析	(455)
8.3.1 纳米结构材料的特性	(455)
8.3.2 扩散型蠕变和界面应力松弛	(456)
8.3.3 整体材料中的状态转移概率	(458)
总结与展望	(463)
参考文献	(470)
附录 A 局域温度场实验成果及自制热磁量测仪的 照片	(487)
附录 B 热力耦合问题的有限元方法	(496)
附录 C 自制热磁效应量测仪用软件设计框图与源程序 ...	(500)

第一章 绪 论

§ 1.1 含缺陷流变性材料破坏理论的缘起

工程构造物事故的不断出现给人民生命和国民经济造成重大损失,这使得研究固体材料的破坏起因与发展规律及其内在机理成为力学家和材料科学家为之长期奋斗的跨学科命题。20 世纪 80 年代以来,介观力学的形成、实验与计算等研究手段的发展及先进功能材料微结构设计和制造工艺的定量化需要,促使国际上力学、物理学、化学、材料科学、近代数学等领域的有关学者联合作战,带动了材料破坏理论的快速发展。继以裂尖应力场奇异性和断裂准则为理论核心的宏观断裂力学^[1~6]之后,相继出现损伤力学^[7~10]和以微裂纹扩展过程为主线、以微缺陷和失稳带为基元的介观断裂力学^[11~14],以峰峦界面原子聚集构形和裂尖原子运动模式为核心的、对材料解理与位错发射过程进行物理力学研究的纳观(nanosopic)断裂力学^[15~19],以量子统计模型为标志的微观断裂力学^[20~22]。可见,近代材料破坏理论的发展具有以下明显特征:(1)横断力学、物理学、化学、近代数学、材料科学、非线性科学;(2)采用宏、介、纳、微观的层次体系描述材料在外界载荷作用下从变形经损伤至断裂的全过程;(3)考虑多层次的缺陷几何结构及其演化规律与物理机制,使材料的破坏抗力成为可预测的定量指标。

与此同时,国内对材料破坏理论的研究也取得了长足的进展,并逐步地对各类构造物的破坏事故分析及材料改性和新型材料的研制起到有效的指导作用。仅国家自然科学基金委员会在“七五”期间就设立有“金属材料的本构关系与断裂”和“金属材料断裂规律与机理”两个重大项目,“八五”期间又设立了“材料损伤、断裂机

理和宏微观力学理论”重大项目。国家“863”计划及中国科学院、国防科工委等单位也设有相应的重大项目。这些项目的设立为我国材料破坏理论的研究奠定了基础,并取得多项国际瞩目的高水平成果。如弹塑性扩展裂纹裂尖场应力分析^[23~25]、剪切带与局域流动化理论^[26~28]、材料强韧化机理^[29~31]、统计断裂力学^[32~34]、蠕变损伤^[35~37]、界面断裂机理^[38~40]、金属韧性破坏^[41~43]、分形断裂力学^[44~46]、宏微观断裂力学^[47~49]等方面的重要成果。但是,如何将宏、介、纳、微观不同层次的现象统一地联系起来,无论对哪一学科都还是难题^[50]。

鉴于上述成果多属金属材料破坏理论与应用方面的成果,自1985年起,我们着重对另一大类工程、民用、国防用聚合物材料的破坏机理进行探索,先后采用9800QUICK型层析X射线扫描仪、6T61型高灵敏度非接触式红外辐射热像仪、智能云纹仪及自行研制的二维自动跟踪磁强量测仪等分别量测了材料受拉情况下内部裂纹扩展过程中裂尖附近形成的局域位移场、局域温度场、局域磁场、局域变质量密度场的变化规律及其对材料力学性能的影响^[51~55]。在这些实验成果的基础上,于1986年提出宏观的“流变断裂学”(rheological fracture theory)^[56~59]。考虑到各类工程构造物、机电与信息产品及国防工业产品使用的各种材料,在天然状态下或在制造与贮运过程或不同环境与工况条件下使用,往往存在或产生各种介观缺陷并演化至材料失效。研究这类含缺陷流变材料破坏发展规律,需要将材料的宏观力学行为与其介观结构及微观机理相结合进行研究。由于材料的物性与时间相关,缺陷的萌生、形核与演化过程具有时序,外界作用也往往随时间而变化,所以需要定量地表述它们在力学、物理学、化学、热力学等方面的时间相关量的联系。在继续实验的成果的基础上,结合近代材料破坏力学的发展趋势与特征,我们于1992年又进一步提出“带缺陷物体流变学”(rheology of bodies with defects)^[60~65],主要针对流变性固体材料的破坏理论及其应用。

在这里,我们首先需要了解流变性材料与金属材料在理论处

理上的基本差异。作为晶态固体的金属材料,其中原子的平衡位置形成一个平移的周期阵列,这种原子的位置显示出长程序,据此应用 Brillouin 区、群论选择定则等周期性的数学定理,通过晶格理论、位错理论、相变理论,达到对材料的科学认识。作为非晶态固体的流变性材料,则着眼于短程序的化学键,原子平衡位置的阵列是极其无序的,据此应用随机几何模型,包括适用于共价“玻璃”结构的连续无规网络、适用于简单金属“玻璃”结构的无规密堆积、适用于聚合“有机玻璃”结构的无规线团模型,通过定域理论、标度理论、逾渗理论,达到对材料的科学认识。

显然,含缺陷流变性材料力学性能的研究应多着重于统计分布函数、定域 $\rightarrow$ 退定域临界点、标度行为、对维数的依赖性等。可见,这种材料的破坏理论研究必然横跨微观($<10^{-9}$ m)、纳观($10^{-8}\sim 10^{-9}$ m)、介观($10^{-4}\sim 10^{-7}$ m)、宏观($>10^{-4}$ m)各层次。这就是说,含缺陷流变材料意味着是一个层次体系。它的不可逆形变和破坏是与过程(时间)相关,在此过程中的宏观效应取决于介观层次的行为,而后者又要求对纳、微观层次发生的过程及其机理的充分了解。把含缺陷流变性材料看作是热力学意义上的非平衡态开放体系,其中发生耗散结构的自组织现象,而这种耗散结构的自相似性又为不同标度从微、纳观到介观再到宏观层次的沟通或协调提供了可能性。值得注意的是,层次体系的一个重要参量是序参量(order parameter),它可以描述最高层次的子系统间的协同效应,用投影算子方法可以表明序参量的统计涨落。同时,标度不变性为宏观参数在微观、纳观和介观尺度中的计算提供可能性。

综上所述,我们对含缺陷流变性材料破坏理论的研究思路反映在裂尖过程区的表现如图 1.1,这里强调了时间、温度、流变、耗散四项基本要素。

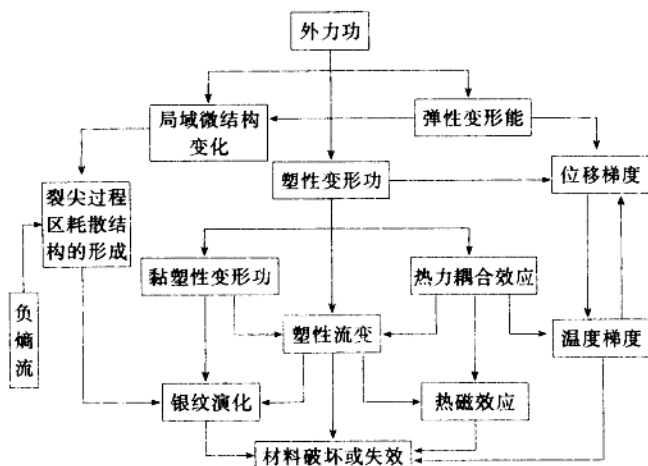


图 1.1 裂尖过程区内塑性形变非平衡态热力学描述框架图

§ 1.2 流变学发展简史

1920 年断裂力学学科的先导者 Griffith 发表了题为“固体的破坏与流动现象”一文^[66]，文中隐含的流变学思想由于历史原因而未受到重视。流变学是研究物质变形与流动发生与发展的一般规律的科学。它是力学、物理学、化学、材料科学、工程科学的交叉和综合在生产实践基础上形成的一门边缘学科。

流变(rheology)一词来源于古希腊人 Heraclitus 所说“ $\pi\alpha\nu\tau\alpha \rho\epsilon\iota$ ”，意即“万物皆流”。毛泽东在《矛盾论》中指出：“人的认识物质，就是认识物质的运动形式，因为除了运动的物质以外，世界上什么也没有，而物质的运动则必取一定的形式。”先哲们的思想为流变学奠定了哲学思想基础。

流变学的研究对象是不符合 Newton 定律的流体、不满足 Hooke 定律的固体及介于流体与固体之间的物质(如悬浮体、胶

冻、凝聚态物质等)。流变学的主要任务是通过实验和理论分析建立物质(材料)的时间相关本构方程,并应用质量、动量、动量矩、能量守恒关系及熵不等式等研究物质或材料的变形和流动规律。可见,一切流变现象均可归结为时间相关的物理-化学-力学现象。

早在19世纪30年代,人们就发现许多物质或材料具有经典理论无法解释的与时间相关的力学性态。例如,Weber^[67]于1835年研究聚合物抽丝时发现弹性后效现象。到1865年,Kelvin^[68]发现金属锌具有黏性性质,其内阻抗与变形速度不成比例。两年后,Maxwell^[69]进一步指出,所有物体的黏性现象都可以用一个一阶线性微分方程描述,提出应力松弛时间概念,认为黏性就等于弹性模量与松弛时间的乘积。稍后,Vicat^[70]提出蠕变变形概念,并将应力松弛理解为一种广义的蠕变。1874年,Boltzmann^[71]发展了线性黏弹性理论,把蠕变变形和应力松弛视作为黏弹性物质的典型准静态流变行为,其基本特征是形变的时间相关性,认为给定时间的内应力不仅取决于该时间的形变,而且也取决于以前的形变,从而建立了适用于线性范畴的迭加原理。1885年,Thurston^[72]进一步指出,瞬时响应后随时间发展的蠕变一般可分成衰减蠕变、定常蠕变、加速蠕变三个阶段。这个时期的上述工作使流变学渐具雏型。

随着人类生产实践范围的扩大和生产力的提高,陆续发现许多固体材料当载荷增大时,其变形逐渐取决于加载速度;应力越接近于材料屈服点,时间因素的作用就越大。这种现象说明,物体的应力、应变、时间之间不是简单的函数关系,因而流变系数一般是应力与应变的不变量及其时间导数的函数。同时,人们还不断发现有许多流体,其剪切应力与剪切速率间不呈线性关系,这样的流体统称为non-Newton流体。如果说non-Newton流体力学是根据已知的本构关系研究其流动规律(如传质、传热、压力损失、边界层流等),那么流变学则是研究它的应力与应变率及其他流动量间的关系,从而建立该流体的本构关系或流变状态方程。和流变性固体材料一样,流变性流体通常也具有复杂的内部微结构,在流动或