

中国流变学研究的最新进展及其困难与对策

Rheology Research in China

袁龙蔚

(湘潭大学流变力学研究所, 教授 湘潭 411105)

提要 本文论述我国流变学研究的现状、成就、任务、困难及其对策。着重介绍诞生在我国并达到国际先进水平的新分支学科——缺陷体流变学和中医基础理论流变学的内容。

现状与任务

流变学是介于化学、力学和工程科学之间的交叉学科,它的研究对象是具有复杂的流动和变形特性的物质以及工农业中工程和工艺过程的物理力学分析。生物流变学和临床血液流变学,由于本身具有的独特领域与对象,已形成独立的分支学科。

自1985年中国化学会、中国力学学会共同成立流变学专业委员会以来,已分别在长沙、成都、上海、广州召开过四届全国流变学会议。在北京还召开过一次国际性会议。国内从事流变学研究的已从几十人发展到逾千人。近五年来,在聚合物的性质与加工工艺、三门峡水电站导洪洞岩石流变性、石油钻井用压裂液流变性、三次采油用聚合物稀溶液的渗流规律、单支墩大头坝裂纹成因与扩展规律、火箭弹托的超塑性加工、直升飞机发动机转子的蠕变成形,医学中的活血化瘀、中风预报、肝胆流变性,中医基础理论中经络感传动态基本方程及人体生物场的本构方程和响应特征方程的建立等方面的理论研究和实践都做出了很好的成绩,提出了一些新观念、新理论、新方法,有的成果在国际上也属开创性的。

与此同时,在高粘弹性流动的数值仿真研究中发现了复杂分形结构,使得整个偏微分方程组严格地等价于与有限维动力学系统对应的一个耦合常微分方程组,这极有利于该数值仿真技术。在原油管道运输的减阻机理研究中发现,增大耗散微涡尺寸时粘性底层厚度也增大,使同一剪切应力产生更高的平均速度,阻力系数减小,但湍流流动中往往出现拟序结构的图象,而时间行为却是混沌的。电

流变性流体的研究表明,它具有在1%秒内实现可逆的液化和固化特性,从而可制造出更可靠且可控性更好的液压装置及制动系统,并可直接实现数字脉冲控制。这是一项具有重大意义的机电一体化高新技术研究,是第三代液压技术和制动技术革命的方向。

此外,在多孔介质中多相非牛顿流体的流动、黄原胶的拉伸变稀和聚丙烯酰胺的拉伸变稠性质、浓聚合物悬浮液流变性、原油全流变曲线量测、水煤浆管道运输、泡沫浆液流变性、纸浆、泥石流、液晶及共混物、食品质构、地震机制、分子理论、物质的光流变性、热粘弹性的研究,以及计算方法和实验手段等方面都有良好的起步与成果。

但是,为在经济建设中进一步发挥作用,流变学在许多领域还需加强研究。例如:

1. 在农业工程和绿化工程中,水与溶质在土壤和植物体中的传输规律及农副产品、食品加工中粘结性、热稳定性、震凝性、可塑性、触变性等有关质构问题的研究,均应置于流变学理论基础之上,方会有真正的突破。

2. 对已开发油田的持续稳产,钻井与完井用泥浆、水泥浆和压裂液的性能改善,悬浮液与泡沫浆液的流动机制及原油管道运输的湍流结构和减阻机理等方面还需做大量深入的研究。

3. 三峡工程中的大坝防裂与防渗、坝基与围堰高陡边坡的稳定性、碾压混凝土的成形、地下结构的岩石流变性影响、巷道变形时围岩作为流变体的计算等方面,流变学均可做出贡献。

4. 航天、潜水器及核反应堆保护层,电子工业及计算机元件等所需的在复杂环境下具有优良性能的新型材料与构件,纳米陶瓷、纳米磁性材料、纳米金属材料的结构与性能研究等,均急待流变学的

参与。

5. 机械工业中液压系统、制动系统的革新,温度稳定性好、无沉淀、无腐蚀、不变质、击穿电压高、电粘特性优良、价格低的电流变性油的研究与配制,流变学性能研究是不可或缺的一环。

6. 塑料反应注射成形、挤压成形、吹模成形等工艺,聚合物的纺丝工艺,金属材料流变铸造工艺、焊接工艺,造纸与橡胶制品工艺等的提高,用于陶瓷制品生产的聚合物模具材料的研制,都离不开流变学。

7. 地震机制与防震措施的研究需要了解地幔岩石圈在高温、高压下的流变性能,在异重流(density flow)尤其是泥石流机理与运动规律的研究中,流变学的研究也不可少。

8. 医学与生物,尤其是血液、胆汁、体液、微循环的流变性研究,骨骼、脏腑、器官的动态流变性能的研究,细胞膜作为信息与药物载体的传输规律的研究,以及中医基础理论、诊断手段的现代化、辨证的规范化等均需流变学的参与。

与上述任务相应的流变学实验手段和技术的研制均应加强,其中包括分子动力学的计算机仿真、粘弹性流动的数值仿真、激光技术的应用、光学流变仪的研制、高速动态图像连续数字处理仪的研制等。在计算方法与软件开发方面,包括流变学问题的模式化并转化为计算机可识别的问题、多重网格等算法的改进、程序的编制、软件及接口软件的开发、耗散系统行为、点格自动机、重正化群方法、辛几何的应用等方面的研究都有待迅速赶上国际先进水平。

热点与成果

在我国产生、发展并具创新前景的流变学分支学科有:

1. 缺陷体流变学

结构及材料的变形与破坏的研究是工程结构设计和材料科学的基础。愈来愈多的近代工程结构和材料都是在大变形、复杂加载史、高温、高速、辐射、腐蚀等恶劣环境下工作。大型结构如核电站设备、航天器、潜水器、火箭发射架、海洋平台、石油化工设备、水电站大坝、地下或海下构造物等,近年来常因变形过程失控或内部缺陷扩展而酿成重大事故。在美国,由于断裂、疲劳及腐蚀等引起的事故及其防范措施,每年耗资约占国民生产总值的4%,我国这方面的损失比率更高。

当前,国际上通常将材料或结构的变形、损伤、断裂或塑性流动直至破坏这一整个过程分由两个分支学科来研究。一是损伤力学,主要研究宏观可见缺陷或裂纹出现以前的力学过程,主要有裂纹型

缺陷的连续损伤理论及孔洞型缺陷的损伤理论。二是断裂力学,主要研究宏观裂纹体的受力与变形以及裂纹的扩展,包括线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学及粘弹性断裂力学。最近,国际上又出现细观损伤力学及界面裂纹的研究,由其带动起来的有材料的增韧理论。

1987年,我们首先采用云纹干涉法配合红外扫描热象仪量测到裂纹扩展过程中裂尖区产生的温度场,对厚4毫米的A3钢析、厚4毫米的聚氯乙烯塑料板、厚2毫米的1Cr18Ni9Ti不锈钢板、厚3毫米的聚氯乙烯塑料板进行了系统实验,随后对同样材料的损伤演化也进行了温度场的量测。与此同时,还采用光纤力学传感器配合CT机量测了缺陷区的质量变化规律,采用无接触传感器配合声发射仪量测了缺陷区的位移量。对金属材料,进一步采用电磁传感器配合低频磁强计,量测了缺陷区的磁强变化规律。

我们研究的目标是:

(1)建立从损伤演化、串接而临界转变至宏观断裂的理论,确定断裂途径的控制及最终断面的图像分形几何学特征;

(2)提出考虑细观损伤演化和宏观裂纹扩展过程中热—力耦合作用的新观念;

(3)建立以过程中的流变与耗散现象为主导的宏—微观结合的新破坏理论;

(4)确定材料内部缺陷从微观演化到宏观扩展全过程中局部温度场、局部质量场、局部磁场的变化规律及其与材料结构的关系;

(5)在分形理论基础上,用有限扩散凝聚(DLA)模型,考虑损伤与断裂的分形特征及流变速率本构方程的分形几何学,提出结构物安全评定的新方法。

我们已着重研究了:

(1)全过程的非线性与不可逆性,尤其是流变响应的非线性、广义力与广义流间的非线性,以及表现为应力张量对称性破缺、热—力耦合形式耗散的不可逆性;

(2)材料的外部本构假设与内部本构假设的关系,采用局部化剩余研究缺陷间的相互作用,把缺陷体破坏理论容于理性热力学框架;

(3)寻找细观损伤演化过程与宏观裂纹扩展过程共有的物理特性及相应的物理量,考虑金属材料结构形态及高分子材料网络结构与缺陷演化、扩展的定量关系及其与分形维数的关系;

(4)考虑各向异性、非比例加载、高温、快速加热、高压、辐射、腐蚀等条件下对材料损伤演化与裂纹扩展的影响,以及缺陷演化扩展速率的分形效应,建立相应的起裂与止裂及再起裂与失稳扩展判据;

(5)以分形计算机模拟为重点,开发适用于破坏理论的三维非线性有限元计算方法及软件,并应用于工程实践,利用分形维数能沟通微观量与宏观量间联系的优点,简化分析和计算过程。

上述研究的主要成果,说明了材料的细观损伤演化与宏观裂纹扩展这两个过程存在如下共性:(1)非平衡态不可逆热力学相容;(2)同时发生热传导和熵产生的能量耗散;(3)动量不守恒而局部质量亦变化;(4)热形式与机械形式的能量共存并相互转化;(5)都是伴有热源汇和热磁效应的非纯粹力学过程;(6)微元的应变和局部转动是同时性的,裂尖区的转动场效应不可忽视;(7)评估损伤程度的分形维数仅取决于损伤状态而和尺寸大小无关;(8)流变与耗散现象并存;(9)都是与变形局部化相耦合的损伤局部化向临界断裂转变的统一过程;(10)都是具有 Lyapounov 函数型流变记忆泛函的历史延拓过程;(11)时空对称性发生破缺且缺陷场具有规范不变性的规范场产生;(12)都是微观动力学可逆与宏观热力学不可逆间的互补过程。

在此共性的基础上,我们建立起材料损伤与断裂相结合的、宏微观统一的流变性缺陷体破坏理论,简称缺陷体流变学。它的特点是:(1)放弃了经典断裂力学有关等温过程的前提假设及经典损伤力学中损伤量演化律的假设;(2)以过程中的流变与耗散现象为主导;(3)结合现代显微技术和计算机技术,用分形维数沟通微观量与宏观量间的联系;(4)考虑热-力、热-磁等耦合效应,把非线性大变形的破坏力学问题纳入严格的理性热力学框架;(5)用整体平衡方程进行局部化时的局部化剩余来表明缺陷间的相互作用;(6)不但建立了起裂判据,而且建立了止裂准则及再起裂、失稳扩展判据。

缺陷体流变学今后的主要任务有:

(1)新理论、新方法的研究与应用

分形理论的研究与应用,主要有分形集的可微性和可积性,非线性分形概念,多重分形及其维数计算,微结构与混沌,缺陷分叉与分形,分形熵与热力学等的研究与应用。

规范场论的研究与应用,主要有通过最小替换和最小耦合原理构造出非线性流变性缺陷规范场的拉格朗日函数,再通过最小作用量原理建立缺陷场的完备的动力学方程组,规范场引入后对有限物体构造相应的边界条件和初始条件等。

(2)对裂纹萌生期的研究

在给定缺陷分布密度和流密度的条件下,研究各种已知缺陷运动引起的耗散和不可逆热力学效应以及各种缺陷间的相互作用。

在缺陷分布密度和流密度未知的条件下,研究缺陷的不光滑、非规则的集和函数及随机分叉形

态,建立起缺陷场的变形几何学和动力学方程。

建立表征广义应力与缺陷分布密度和流密度间的本构方程,并确定定解条件。

(3)对裂纹扩展期的研究

研究与确定裂纹扩展过程中各种基本平衡定律,并应用局部化剩余使全局定律过渡到局部定律的等价类。

在凸泛函的基础上建立不可逆过程的全部非线性流变理论,研究局部质量非闭式热-力耦合系统及 Clausius-Duhem 熵不等式。

(3)研究裂纹扩展过程中裂尖塑性流变区的变形非线性非协调性,以及质量和温度的变化规律与相应的热致磁效应。

(4)研究裂纹分叉与断裂韧性的关系以及断口表面不规则性与断裂的能量耗散间的关系,把宏观物理量与微结构结合起来。

(5)裂尖塑性流变区内,熵不具有极值,最小熵增原理不再有效,需要寻找新的热力学位函数,以判定系统的稳定性,进而确定过程中各阶段的判据。

缺陷体流变学的核心任务是把起裂控制与止裂设计结合起来,以提高结构件的安全度,避免灾难性事故的发生。

2. 中医基础理论流变学

中国传统医学具有十分浓郁的中华民族文化特点,是一门相当重视临床实践的科学。其主要特点有:重视人与自然界的密切联系;强调阴阳相对平衡;注重辨证论治原则;诊断中区分“标本缓急”、“虚实补泻”,治疗中强调“治病求本”、“治贵防变”、“以平为期”、“三因制宜”等原则;注意养生防病和病后调理。但是,由于受历史条件的限制,中医基础理论缺乏定量化,关于“证”的辨证标准也缺乏规范化。这对深化中国人民长期同疾病作斗争的经验总结带来一定制约,给临床诊断和治疗研究带来一定不便。

为了完善中医理论,1992年初,“经络的研究”作为预计在本世纪内可望取得具有中国特色研究成果的项目,被列为国家基础性研究的30个攀登项目之一,并为此先后开展了电、声、光、温度、磁等特性的实验研究,把中国传统医学理论研究推向了自然科学的前沿学科地位。

近年来,在宏微观结合的基础上,根据我国古代《周易》的变易哲理,应用现代流变学“一切皆流,一切皆变”的基本原理,结合现代自然科学的有关最新成果,我们进行了下列各项理论研究:

1. 依“天人相应”和“人天无为”学说,考虑电磁效应和热力学效应,采用算子谱论给出人体生物场的微分型和积分型本构方程,采用耗散结构论建立起人体生物场的热力学基本关系式,并推导出热力

学基本函数的具体形式,以及天地人同源同构电磁谐振和人体自然界间交换能量或信息的感应特征方程。

2. 依“经络学说”和“针灸原理”,根据人体经络感传现象,把经络视为信道,把穴位视为信源,为表明信源与信宿间的关系,应用微分几何给出人体经络感传的非线性动态基本方程、本构关系、边界条件,并考虑了耗散结构原理及约化耗散不等式给予本构方程的限制。

3. 依“四诊方法”和“生物全息诊法”的原理,根据脉动流的强度、速率及入射效应显著程度来区分临床脉象;结合脉象图,应用血液流变学原理建立各类脉象的波动方程,然后用简化 Eringen 微极流体脉动方程求得该波动方程的基本解,并应用 Laplace 和有限 Hankel 联合变换研究复合脉象及其与脏腑间的关系。

4. 依“八纲辨证”原则,尤其是“气血辨证”和“脏腑辨证”原则,根据泛系统变学和“灰箱”系统理论,认为脏腑是功能影系统导出的人体生理内构泛箱,经络作为一个多层次生命系统的子系统则是脏腑集的影系统泛结构集。分“辨证”和“论治”两部分建立乏晰模型及相应的乏晰关系矩阵,然后用电子计算机求解。

5. 依“阴阳学说”和“五行学说”,根据气功的气感效应实测结果,考虑生物重演律和人体宇宙全息律,以 Robertson—Walker 度规为基础,首先构造拉格朗日密度函数,以傅利叶积分表示能量—动量张量,建立起爱因斯坦场方程、能量守恒方程和流变状态方程,然后结合负熵流输入方程组成气功能数学模型。

6. 在经络的物理学的研究中,如声信息传导的循经性、循经感传与经穴发光强度、针刺引起的经穴温度变化、不同机能状态下经穴电阻的变化、经穴的磁特性等都出现自相似性的不规则曲线或自反演性的不规则图形,以及由此带来的不光滑、非规则的集和函数。这种情况也出现在脏腑、脉象、气功

中,值得进一步研究。

研究不光滑、非规则的集和函数的理论是近年兴起的分形理论。分形理论的主要概念是分数维,它可用于研究许多物理现象,而分形几何学则能处理极不规则的形状与图象。分形理论引入空间的分数维数,类似于科学史上四维时空学说的提出,爱因斯坦据此发展了相对论,从而把牛顿力学发展到现代物理的范畴。由于时空观念是一切自然科学和社会科学的基点,分数维的引入对生命科学将会产生什么影响,也需要进行研究。

困难与对策

我国流变学界面临许多困难。最大的困难是缺乏人才和资金。为充分发挥流变学这一交叉学科在经济建设中的作用,笔者建议:

1. 建立一支高质量、高水平的年轻化队伍,迅速在国内设立流变学博士学位点。国内流变学硕士学位点设立虽已有八年,培养的硕士生达 30 余人,但其中约 30% 出国攻读博士学位尚未回国,这对我国流变学的发展极其不利。

2. 国内流变学的实验设备既分散,又落后,可将国家级的流变学开放研究实验室的组建列入“九五”计划,以推动我国流变学的教学与科研工作。

3. 在国家重点工程和国家重大科研课题中,如三峡工程、石油开采与输运、国防工业中构件的加工成型、机械与交通行业中的液压系统与高速制动系统的改革、非线性科学、生命科学等,为流变学的参与提供信息与条件。

4. 为及时交流科研成果,建议发行国家级的《中国流变学学报》中外文版本,在有关学会领导下组建编委会,由有关领导机关在编辑、出版、发行等方面给予必要的资助。

5. 设立国家流变学基金会,在中国科学院领导下,为鼓励青年流变学工作者,每年评选 3~5 名有突出贡献者给予奖励。(责任编辑:刘先曙)

会议动态

首届全国青年可靠性学术会议将于 1994 年 6 月召开

根据中国运筹学会可靠性学会 1992 年桂林会议的决定,将于 1994 年 6 月在秦皇岛市召开首届全国青年可靠性学术会议。会议议程如下:1. 可靠性理论 and 应用成果交流;2. 评选首届全国青年可靠性学术会议优秀论文;3. 选举首届青年可靠性工作委员会委员。欢迎年龄不超过 40 岁的可靠性工作者及博士、硕士研究生参加。

应征论文包括:1. 可靠性数学理论;2. 可靠性统计;

3. 结构可靠性;4. 系统可靠性分析;5. 网络可靠性;6. 软件可靠性;7. 制造系统的可靠性建模与分析;8. 可靠性评估;9. 可靠性设计;10. 可靠性优化;11. 可靠性中的近似理论;12. 可靠性在电子、航空、机械、能源等工程领域中的应用成果。

论文请寄:100080 北京中关村中国科学院应用数学所李伟收(电话:254.1695)