

流变学在我国发展的回顾与展望

江体乾

(华东理工大学化工所流变学研究室, 上海 200237)



江体乾, 1930年1月出生, 安徽宿州市人, 毕业于山西大学工学院化工系。现任华东理工大学化工学院教授、博士生导师, 化学工程研究所流变学研究室主任, 国际流变学会(IRC)中国代表、委员, 中国力学学会理事, 《力学学报》编委, 中国力学学会和中国化学学会流变学专业委员会主任委员。主要从事化工流变学及传递过程原理的教学和研究工作。在非牛顿流体力学、工业流变学及生物医学工程方面有较多的研究, 其中: “非牛顿流体中物质传递”获1988年国家教委科技进步二等奖, 已出版《微积分学导论》、《化工数据处理》、《基础化学工程》、《工业流变学》、《化工教学模型》等专著9部。发表论文160余篇, 其中多篇为SCI收录。

摘要 从作者所能接触到的流体流变学侧面, 回顾了流变学在我国的发展并展望了下一世纪可能获得发展的领域。

关键词 流变学, 回顾, 展望

流变学是介于力学、化学和工程学之间的交叉、边缘学科, 其应用范围虽然十分广泛, 如聚合物加工、石油、食品、血液、悬浮液、润滑剂等均与流变学有关, 但由于其书写习惯多用张量形式, 超出我国工学院学生的数学水平, 所以曲高和寡, 在我国鲜有问津。

流变学在发达国家, 如美国, 今年已召开了第70届年会, 而我国在60年代才有论文发表, 1962年发表在《物理学报》上的论文^[1]被认为是我国第一篇公开发表的有关流体流变学内容的学术论文。在1985年作者参与组建, 由中国力学学会、中国化学学会共同牵头的流变学专业委员会成立之前, 流变学在我国几乎是一片空白, 作者自60年代开始一直坚持此方向至今已40年。如今提笔回顾流变学在我国的发展时, 感慨万千, 现仅就管见所及, 略述其主要成就。

1 流变学研究的主要进展

(1) 文[1]研究了非牛顿流体的边界层。该文系从B.V. Голубев流体边界层一般积分关系式的概念出发, 导出幂律流体边界层的动量方程, 并借此求出了流体沿平板运动时层流边界层发展的定量关系式

$$\frac{\delta}{L} = A \left(\frac{1}{Re^*} \right)^{1/(n+1)} \quad (1)$$

式中, 广义雷诺数 $Re^* = \frac{L^n u^{2-n} \rho}{\eta^n}$; 系数 $A = [8.5 \times 2^n (n+1)]^{1/(n+1)}$, L 为平板长度; δ 为边界层厚度(m); η 为流体的“拟粘度”; ρ 为流体密度(kg/m^3); u 为流速(m/s)。

对于式(1), 当时文献上虽有人推断过 δ/L 应为 $(1/Re^*)^{1/(n+1)}$ 的函数, 但其定量的函数关系还是该文首次求出。而美国A.H.P. Skelland教授1965年在《AICHE》期刊上发表的论文中得到相同的结果。可见, 当时就处于领先水平。

1998-12-30 收到第1稿, 1999-03-16 收到修改稿。

(2) 我国化工界研究非流体力学传递过程起步较早并已形成特色.

我国化工界研究非牛顿流体传递过程原理的首推华东理工大学(原华东化工学院),他们自1958年开始研究此课题,1960年开始出研究论文并一直坚持此方向至今,发表论文已超过170多篇.

在动量传递方面,即非牛顿流体力学,有多层非牛顿幂律流体沿斜面流动的波分析,广义二阶流体沿斜面流动的稳定性分析,搪瓷釉浆沿倾斜平面流动的研究,非牛顿流体中滑移现象的研究进展和应用,壁滑移对粘弹性流体狭缝流和环隙流的影响,田菁凝胶在毛细管及多孔介质中滑移效应的研究,多层彩卷涂布中弯月面的分析,非牛顿流体搅拌功率计算,非牛顿流体湍流边界层以及蚕丝再生液、田菁水溶液、聚丙烯腈溶液的拉伸流动等^[2].

在热量传递方面有:非牛顿流体湍流换热时动量与热量的类似,非牛顿流体薄膜流中传质和传热的理论研究,非牛顿流体在刮板式薄膜蒸发器中传热性能的初步研究,以及高粘非牛顿流体在垂直管中传热的有限元模拟计算^[3]等.

在传质方面有:氧在血液中的扩散系数,淋降塔中非牛顿流体的传质研究,伴有二级不可逆反应的非牛顿幂律流体薄膜流中化学吸收的研究,非牛顿幂律流体自然对流中的传质,粘弹性流体自然对流中的传质研究以及泡沫精馏塔内泡沫液的传质模型^[4]等.

综上所述,可见其特色之一为较系统全面地研究非牛顿流体的传递过程.

对非牛顿流体壁滑移的研究,在前人基础上发展了壁滑移的测定方法,并对石油工业常用的泡沫、瓜胶和田菁胶提供了圆管中流动新的完整的数据和计算公式.因而有圆管直径影响、狭缝流、环隙流以及多孔介质的流量增长的预测方法、层流减阻规律性以及消除影响的对策,形成了一套较完整的成果体系.特别是在多孔介质流动研究中发现 Mooney 法只能在低剪区使用,超过某边界值后,高剪区的拉伸作用,此法不再适用,这样就解释了困扰学术界十多年的“负滑移”现象.因此,这些成果得到国内外学术界的注目和承认.

我们在国内学术界首先提出了凝胶等非牛顿流体壁滑移问题,引起了力学界的重视,以致中科院力学所路展民等用激光测速仪进行了专门的测量,聚合物加工界如唐国俊等将其引入圆管挤出机橡胶加工研究之中,提高了设计和加工水平,某些流变仪由于采取消除壁滑移措施,有效地提高了数据的重复性,推动了国内技术进步,这是特色之三.

(3) 在国际学术界率先发表了胍胶壁滑移的实验数据和定量计算公式^[5].

1986年率先发表了一套石油开采用重要压裂液胍胶壁滑移的实验数据,在此基础上得出滑移速度 v_s 与剪应力 τ_w 之间的定量关系,即

$$v_s = a\tau_w^b \quad (2)$$

式中, a, b 为经验常数,对胍胶压裂液粗略地有 $b = 1.5, a = 1.25 \times 10^{-4}$,并且证明凝胶类物质流动时具有壁滑移现象.这一结论多次被国外学者所引用.

(4) 在国内外学术界率先开发出凝胶带分数导数的本构方程.

由于凝胶的流变性相当复杂,几乎具备了所有非牛顿流体的特性,如存在屈服应力、剪切变稀、Wessenberg 效应、挤出胀大、触变性和壁滑移等,迄今尚无一个本构方程能全面完整地描述其特性.而流变学的中心议题是本构方程,成为近年来研究热点之一.

文^[6]首先在三维粘弹性流体本构方程基础上引入屈服应力参数,得到了一个新的凝胶类本

构方程

$$\left. \begin{aligned} D &= 0, & \text{tr}\tau^2 &\leq 2\tau_y^2 \\ \tau &= \frac{\tau_y}{\sqrt{\frac{1}{2}\text{tr}D^2}} + H, & \text{tr}\tau^2 &> 2\tau_y^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $H = \int_{-\infty}^t G[(t-t'), \Pi_{\dot{C}_t}] \dot{C}_t^{-1} dt'$, \dot{C}_t 为 Cauchy-Green 张量, \dot{C}_t^{-1} 为 Finger 张量, D 为形变速率张量, G 为松弛张量, H 为非线性记忆积分张量, t, t' 为时间, $\Pi_{\dot{C}_t}$ 为 Cauchy-Green 张量的第二不变量.

此方程的特点为: 不但可以据此得到物质函数表达式, 也符合挤出胀大实验, 还对黄原胶、胍胶具有通用性. 特别是能正确反应剪切屈服应力与拉伸屈服应力之间的关系, 这点是其他本构方程所不及的.

但自从 B.B. Mandelbrat 的分形学说发表以来, 有人证明高分子链是分形结构. 凝胶系由天然高分子所组成, 这就使人想起使用分数阶导数或积分来描述. 这是因为几十年来, 既然整数阶导数是描述欧氏空间的得力工具, 则分数阶导数岂不是描述分维空间的工具吗! 这就是用带分数阶导数描写本构方程关系思路的由来. 这一新思路在国际学术界也属起步阶段. 表现在迄今国内外仅发表有关论文 20 篇左右. 1993 年 Li 和 Jiang 在国内发表了一篇论文, 得到了修正 Maxwell 本构关系 [7]

$$\tau + \lambda D^\alpha[\tau] = \eta_0 D^\beta[\dot{\gamma}] \quad (4)$$

式中, $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$, α, β 为导数的阶数, 上式中当 $\alpha = \beta = 0$ 时回到 Hooke 固体; 当 $\alpha = \beta = 1$ 时则得到通常的 Maxwell 流体; 当 $\alpha = 0, \beta = 1$ 时为牛顿流体; 当 $0 < \alpha, \beta < 1$ 时, 则可用于描述非线性的粘弹性流体. 该文为国际学术界所收录. 其后又发表了一篇修正的 Jeffreys 模型 [8]

$$\tau + \lambda_1 D^\alpha[\tau] = \eta_0 [\dot{\gamma} + \lambda_2 D^\beta[\dot{\gamma}]] \quad (5)$$

式中, $0 \leq \alpha < \beta \leq 1$. 由此本构关系可以求出动态粘度 η' 和虚粘度 η'' 的表达式

$$\eta' = \eta_0 \frac{1 + \lambda_1 \omega^\alpha \cos \frac{\pi}{2} \alpha + \lambda_2 \omega^\beta \cos \frac{\pi}{2} \beta + \lambda_1 \lambda_2 \omega^{\alpha+\beta} \cos \frac{\pi}{2} (\alpha - \beta)}{1 + 2\lambda_1 \omega^\alpha \cos \frac{\pi}{2} \alpha + \lambda_1^2 \omega^{2\alpha}} \quad (6)$$

以及

$$\eta'' = \eta_0 \frac{\lambda_1 \omega^\alpha \sin \frac{\pi}{2} \alpha - \lambda_2 \omega^\beta \sin \frac{\pi}{2} \beta + \lambda_1 \lambda_2 \omega^{\alpha+\beta} \sin \frac{\pi}{2} (\alpha - \beta)}{1 + 2\lambda_1 \omega^\alpha \cos \frac{\pi}{2} \alpha + \lambda_1^2 \omega^{2\alpha}} \quad (7)$$

由于此式与黄原胶和田菁胶的数据符合良好 (图 1), 引起国内外的注意. 国外著名杂志《Rheol Acta》接受该论文发表. 现在他们又将其推广应用于香豆胶水基冻胶的描述, 亦获成功.

(5) 用流变学的观点提出必须考虑聚合物的注射成型加工中弹性的影响和剪切速率的影响, 同时发现以前文献中的粘度仅为零剪粘度. 基于这一思路已设法测得了 RIM 过程中动态粘弹性数据和变化规律 (图 2). 论文在国内刊物发表后 [7], 引起欧洲流变学者的注意.

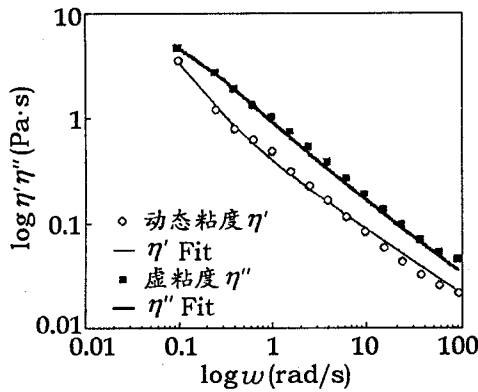
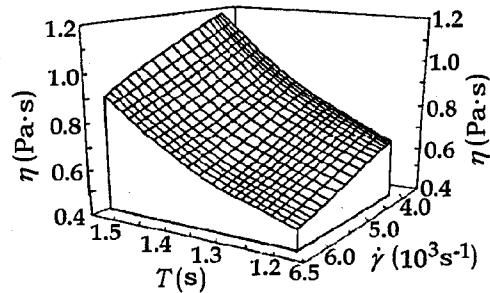
图1 黄原胶的 η' , η'' 对比

图2 RIM PUU 系统粘度变化三维图

(6) 开辟了血液流变医疗技术新方向.

由于血液是非牛顿流体, 血液净化又是分离科学的新分支, 基于这方面的交叉, 在国内独辟了这一新方向. 目前, 对高脂蛋白血症和心脑血管疾病的防治理论研究已经成熟, 可以选择性除去血液中的胆固醇、甘油三酸脂和纤维蛋白原, 降低血液粘度^[10], 上海华山医院临床证明该法对中风病人十分有效.

血液粘弹性和触变性是血液流变学中的重要课题. 自1980年Bureau发现血液在低剪范围内具有粘弹性和触变性, 并测得完整的“8”字型环曲线以来, 人们一直在为定量分析和表征而努力. Huang方程虽能描述其触变环, 但不能描述粘弹环. 方波等^[11]建立的新型5参数时变性本构方程, 可以完整地予以描述. 即

$$\tau = \eta_1 \dot{\gamma} = \mu \dot{\gamma} + G \int_0^t \dot{\gamma} dt + C_1 \beta \dot{\gamma}^n \exp\left(-C_1 \int_0^t \dot{\gamma}^n dt\right) \quad (8)$$

式中, τ 为剪切应力, η_1 为表观粘度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, G 为弹性模量, μ 为粘性参数, t 为时间, C_1 为聚集体解离速度常数, n 为级数, $B = \xi\beta$ 为聚集体触变参数, 式中 β 为聚集体平均浓度, ξ 为触变参数, 按下式计算

$$\tau_1 = -\xi d\beta/dt \quad (9)$$

方程(7)能与临床中风和下肢深动脉血栓病人的血液数据相一致, 说明方程的合理性.

L-天冬酰胺酶能专一地催化水解L-天冬酰胺, 形成天冬氨酸和氨. 而L-天冬酰胺是某些敏感肿瘤细胞代谢链上的一个环节, 一旦被破坏, 将影响整个细胞的氨基酸、蛋白质的合成, 从而可以抑制肿瘤的生长或死亡. 根据这一思路, 我们进行了利用固定化L-天冬酰胺酶体外净化血浆探索性治疗白血病的研究^[12]. 体外循环模拟实验的研究表明, 采用本法所设计的酶反应器能够在较短时间内有效地降低血浆中L-天冬酰胺的浓度, 达到抵制白血病肿瘤细胞生长所需的低浓度范围. 这又为根治白血病, 特别是急性淋巴白血病, 提供一个崭新的治疗技术.

(7) 流变相态学及其工程技术是我国独自倡导的JRG群子统计理论的应用范例^[13]. 它为不同高分子共混、相容问题提出了一个理论预测, 即运用此理论可以得到群子均匀标度与材料流变性能、力学性能的关系, 对研究高分子合金越来越显得重要.

此项研究自从1985年左右开始, 已坚持十余年的研究和应用, 群子理论也得到了发展, 由线性发展到非线性, 尤其须指出的是群子统计理论与古代八卦图相类似, 具有中国特色.

(8) 提出新的各向异性流体(液晶)的本构方程^[14].

液晶是一类各向异性非牛顿流体(材料),它的流变特性显著区别于一般的各向同性的高分子材料或流体,它的第一法向应力为负值,曾引起人们的广泛注意.一时形成研究的热点之一.外力作用于液晶时,既可以产生流体的运动,也可以分子取向,目前此类取向流体的本构理论通常是建立在 Leslic-Ericksen 理论基础之上.我国学者提出了以 Oldroyd 的随体导数观点出发,建立了一个各向异性流体的本构方程.此问题已形成了国家自然科学基金委的一个重点基金项目.

(9) 橡胶混炼和挤出过程的基础研究已有了很好的开端.

文献 [15] 在短口型挤出胀大行为,压出过程中弹性行为,口型入口角的影响,挤出过程中不稳定性及壁滑移,粘弹性流体入口收敛流动等均提出了自己的见解.

上述成就的回顾,仅限于流体流变学,固体流变学已有另文综述.就是流体流变学也肯定是不完全的,难免挂一漏万,但从中已能看出近十多年来由于全国流变学界同仁的努力,中国流变学已初具规模.并加入了国际学术组织 ICR,研究工作受到国际学术界的关注.

如就行业而论,经过 13 年的努力,石油工业(特别是各油田)和医务界流变学知识比较普及和深入,其他各工业界尚待开拓,目前,已向化妆品行业及食品工业发展 [15].

2 21 世纪的瞻望

流变学作为研究物质流动与变形的科学,预计在下一世纪必将在中国的现代化建设中发挥更大的作用.可以设想:

(1) 由于下一世纪是生命科学的世纪,生物流变学,临床血液流变学以及新的流变医疗技术必将在我国获得更大的发展,必将促进城乡老年保健事业的快速发展,并与中医药相结合,对人类健康事业作出更大的贡献.

(2) 21 世纪又是新材料的世纪,可以预料聚合物及其加工流变学能得到更快的发展.无机材料工业也要用到流变学;如耐火材料等.

(3) 21 世纪的支柱技术之一为生物工程,在生物工程及生物制药中充满了流变学的用武之地,急待开发和普及.

(4) 食品工业充满了机遇,食品流变学必将获得较大的发展.因为我国食品为世界各国人民所喜爱,如何改造传统食品是当务之急,估计再过一二十年必将有所突破.

(5) 蓝色工业即海洋工业的开发正在起步阶段,流变学同仁应尽早参与以利学科发展.

总之,流变学在我国的发展,本世纪是从无到有,下世纪必将从小到大,这是一个持续发展规律.

参 考 文 献

- 1 江体乾. 关于非牛顿流体边界层的研究. 物理学报, 1962 (4): 224~226
- 2 江体乾. 壁滑移对粘弹性流体狭缝流和环隙流的影响. 力学学报, 1988, 20(3): 272~277
- 3 Qian X Y, Hou W Q, Jiang T Q. Heat transfer studies of highly viscous non-newtonian fluids in vertical tubes by finite element method. *Chinese J of Chem Eng*, 1996, 4(1): 62~77
- 4 Chu J Y, Jiang T Q. Study on chemical absorption with second-order irreversible reaction in the film flow of non-newtonian power law fluids. *J of Chem and Eng*, 1986 (1): 45~56
- 5 Jiang T Q, Young A C, Metzner A B. The rheological characterization of HPG gel: measurement of slip velocities in capillary tubes. *Rheol Acta*, 1986, 25: 397~404
- 6 李健, 江体乾. 粘弹塑性流体田菁凝胶本构方程的研究. 化工学报, 1992, 43(1): 27~32
- 7 Li J, Jiang T Q. Constitutive equation for visco-elastic fluids via fractional derivative in 《Advances in Strut and Heterogen Continua》(D.A. Siginer ed.). New York: Allerton Press, Inc, 1994. 187~193

- 8 Song D Y, Jiang T Q. Study on the constitutive equation with fractional derivative for viscoelastic fluids-modified Jeffreys model and its application. *Rheol Acta*, 1998, 37: 512~517
- 9 Jiang T Q et al. Rheological study on reaction injection molding process with a slit measuring system. *Chinese J of Chem Eng*, 1996, 4(2): 162~167
- 10 Fang Bo, Jiang Tiqian. Selective removal of low-density lipoproteins from blood by induced precipitation with ASS in Vitro(I). *Chinese J of Chem Eng*, 1998, 6(1): 73~78
- 11 Bo Fang, Jiang T Q. A novel constitutive equation for viscoelastic-thixotropic fluids and its application in the characterization of blood hysteresis loop. *Chinese J of Chem Eng*, 1998, 6(3): 264~270
- 12 周纪宁, 江体乾. 治疗白血病的一种新方法: 固定化 L- 天冬酰胺体外循环净化血管. 98' 上海科技论坛生命科学研究会论文集, 1998. 42
- 13 金日光. 多相高分子材料流变相态学及其工程进展. 96 流变学进展 (金日光主编), 北京: 化学工业出版社, 1996. 5~10
- 14 韩式方. 各向异性流体 - 液晶高分子流变学研究. 96 流变学进展 (金日光主编), 北京: 化学工业出版社, 1996. 15~21
- 15 梁基照. 非牛顿流体自然收敛半角方程的实验验证. 化工学报, 1996 (6): 1~5

THE DEVELOPMENT OF RHEOLOGY IN CHINA

JIANG Tiqian

(Rheol. Research Center, East China University of Sci. & Tech., Shanghai 200237, China)

Abstract In this paper, the author based on his research experience reviews the development of Rheology in China. The author thinks that Rheology in China has developed from nothing to an important research branch in 20 century, in the next century, it will see more substantial process.

Key words Rheology, fractal, medicine

第十一届全国复合材料学术会议征文通知

由中国力学学会、中国航空学会、中国宇航学会和中国复合材料学会联合主办的第十一届全国复合材料学术会议初步定于2000年10月在安徽合肥召开。由中国科技大学承办。

1 征文范围

本届会议将接受所有反映复合材料领域最新研究成果、生产技术和应用技术以及探讨复合材料学科和产业发展规划方面的学术论文, 尤其欢迎反映实用技术, 解决技术难题, 注重新理论解决实际问题的高水平学术论文。

征文内容如下: 复合材料原材料; 树脂基复合材料; 金属基复合材料; 陶瓷基、碳基复合材料; 复合材料性能测试与分析方法; 复合材料力学与结构分析; 复合材料结构设计与试验; 复合材料界面科学与工程; 复合材料应用技术; 复合材料质量评估与辅助设计; 复合材料修补与连接; 功能复合材料与智能复合材料; 纳米复合材料。

2 征文要求

本届会议论文集将由中国科技大学出版社出版, 并向全国各新华书店, 图书馆征订发行, 参加国内外图书展。为便于所收论文进入国际各类文献检索系统, 要求论文具有英文题目与英文摘要。对论文的具体要求: (1) 内容新颖、主题明确、反映近期研究成果; (2) 本届会议不接受已投送在其它会议或国内外期刊上已经录用或发表的论文; (3) 文责自负, 论文内容不得涉及保密问题, 须提交所在单位的保密审查证明; (4) 论文限5000字以内, 即文稿限5页, 每篇论文版面费400元, 每超一页(含不到一页)增收版面费100元; (5) 提供录入稿件的3寸软盘一张; 提供稿件一式三份, 至少含一份原件(包括图表); (6) 不退稿件, 请作者自留底稿; (7) 同意转让论文版权(仅限本届会议论文集); (8) 论文截稿日期为: 2000年2月28日。

(下转第50页)