第17卷 第2期　　力 学 进 展　　Vol. 17 No. 2
1987年5月25日　　ADVANCES IN MECHANICS　　May 25, 1987

非牛顿流体传递过程研究进展及应用

江体乾　　唐寅南
（华东化工学院）

提要　本文简述了非牛顿流体的传递过程的学科发展史。本学科从50年代开始，到80年代形成完整的体系。并综述了非牛顿流体的动量、热量和质量传递的最新研究成果及动向。

关键词　非牛顿流体；传递过程；动量、热量和质量传递

Ⅰ. 引　言

所谓牛顿流体与非牛顿流体，实际上是流变学对自然界一切流体的一种分类。凡剪应力与剪切率之间不存在线性关系的流体，统称为非牛顿流体，其中包括对时间无依赖关系的拟塑性流体和胀流性流体，对时间有依赖关系的触变性流体和反触变性流体，既有粘性又有弹性的粘弹性流体，以及具有屈服应力的宾汉流体。迄今研究得最多的是拟塑性流体，由于其剪应力与剪切率之间的关系可表示为简单的幂次关系，故常称为幂律流体。非牛顿流体的传递过程即是研究以上诸种流体中的动量、热量和质量传递以及化学反应的总称。可见这是一个内容十分广泛、十分丰富的研究领域。

长期以来，对传递过程的研究一向偏重于牛顿流体。直到50年代，高聚物化学工业的蓬勃发展，引起了对非牛顿流体研究的高度重视。事实上，除高聚物化学工业外，其他如石油、建材、食品、轻工、环保、核工业等部门中，无不遇到各种非牛顿流体。因此，对非牛顿流体传递过程的研究也就涉及众多的学科。目前非牛顿流体力学已公认为流体力学的新分支，非牛顿流体的传递过程也已逐渐成为一个独立的研究领域。

Ⅱ. 非牛顿流体的动量传递

众所周知，动量传递方面最引起人们兴趣的奇特性质首推**减阻**。上世纪末从观察海生动物皮肤上分泌出的一种粘液就知道了减阻现象，但直到1948年Toms发现在氯苯中添加10ppm的聚甲基丙烯酸甲酯能使一定流量下的压降减小50％以后，才领会到减阻的重要性。几十年来对减阻机理探讨和应用研究从未间断。综述文章[1—4]中涉及的文献多达1500篇以上，1974和1977年先后举行了两届国际减阻专题学术会议，足见对此现象研究之广泛。这些文献大多注意于各种添加物的开发，减阻流体的物理及流变性质，减阻剂的时效与降解，流体的表面几何形状、摩擦系数、流量及其它物理量间的关系，减阻剂的测定方法，现象解释

等方面的探讨，但至今仍不能完全解释减阻机理，仍不能从高聚物的结构推知减阻效果，以致只能凭经验筛选减阻剂。减阻机理一向是以研究湍流结构为基础的，其中一种观点以猝发现象为研究重点，另一种则以流动稳定性为手段。最近 Fortuin 等[5] 企图用湍流研究的最新结果来解释减阻现象，着意于寻找湍流基本特征与减阻之间的联系。迄今，有一点是明确的，减阻机理与溶液的粘弹性质有密切关系。因此，测量溶液的拉伸粘度与松弛时间这两个流变参数就不容忽视。

减阻的应用十分广泛。早在1961年已用于油井水力压裂，发现流动阻力可降低 70%[6]；还应用于消防可提高射程和流量[7,8]；应用于农田灌溉[9]、废水排放或泄洪[10]、高速水力切割[11]、船舶减阻[12]、原油长距离管道输送[13]、军事上燃料油的快速补给以及提高海军舰艇作战能力。近年来，有人[14]用减阻技术治疗心血管系统疾病并申请了专利[15]。

减阻原来只限于湍流条件下，近年来发现**层流条件下**也可能减阻[16,17]。Popadic[18]已用令人信服的实验结果证实了高分子溶液作层流波动薄膜流时的减阻现象，并提出了波纹流动受抑制的假设来进行解释。最近 Dutta 等[19]认为 Popadic 的解释不尽合理，此现象实际上是大分子离开固体表面迁移引起明显滑移效应的结果。

滑移是非牛顿流体力学研究中既古老又新鲜的概念。经典牛顿流体力学一直将流体在固壁上的速度视为零。即流体能附着于表面而不滑动，只有当理想流体流过固体表面时才产生滑移现象。高分子溶液的流动总是不均匀的，剪切率随位置而变化，大分子从高剪切率区向低剪切率区迁移，结果在固体表面附近形成一层溶剂层，其中几乎完全不存在大分子，这就构成了明显的滑移条件。在流体动力学上，这一问题可通过定义一个滑移速度来处理。Mooney[20]首先发现并评价了此问题，其后一些研究者对毛细管流、多孔介质渗流以及其他几何形状流道中的高聚物溶液或熔体流动，都进行过研究[21-26]，并发现滑移速度可高达主体平均速度的 80%[27]。Kozicki 等[28]发现只在 $D>0.04$ cm，剪切速率为 10^4—$10^5 s^{-1}$ 情况下，才可以不考虑滑移的影响。Kraynik 等[29]研究了挤压成型机中的滑移速度，其结论是滑移可以减小压降和增加传热效果，并发现当剪切率为 $7.6 s^{-1}$ 时即开始滑移现象。Pilehavari 等[30]用热线风速仪测得石油压裂液亦具有滑移速度。Metzner 等[31]从传质观点提出一个滑移机理的解释，认为大分子所以向中心迁移是由于分子扩散的结果。Dutta 等[19]用滑移效应来解释层流减阻，得到满意的结果。Ranade[32]从另一角度解释层流减阻的原因。他用激光多普勒测速仪测出牛顿流体与非牛顿流体在弯管中层流时轴向与周向速度分布，发现粘性受剪变稀的影响在于拉平轴向速度分布而增加紧靠壁面的循环流动，另外粘弹性减少了二次流的产生，因而阻力减小。最近，Jiang & Metzner[33]对滑移现象进行了理论研究，得出滑移对速度分布、流量增长以及阻力影响的定量表达式，与文献数据吻合。由此可见，滑移现象和影响将在塑料成型加工、深度采油、固体管道气力输送[34]以及减阻技术、节能技术上找到应用。

气体、非牛顿流体二相流动系统是高聚物加工、矿产回收、油气集输、食品加工、生物医学工程和生化反应工程中常常遇到的。这种流动系统中，即使液相是牛顿流体，也比单相流动复杂得多。过去此领域进展缓慢。这里的非牛顿流体可以包括乳浊液、悬浮液、浆状、糊状、膏状以及凝胶等物系，所以流动机理复杂，至今无论理论或实验方面都还不能进行透彻的分析。Mahalingam[35]综述了截至1978年的研究结果。这里补充一点 Richardson

等[36,37]最近几年的研究。他们将原来对高聚物稀溶液进行试验的 ϕ 42 mm 试验段放大到内径 207 mm，长 22.86 m 的大口径试验段，主泵电机功率为 220 kW。试验物料为空气与 31.5%及36.5%的絮凝状瓷土悬浮液。观察到这种混合物的流态是波纹状的.实验结果表明，Lockhart-Martinelli 关联式预示的压降较实测值大，而用以前在内径 42 mm 试验段上得到的关联式来计算最小阻力比和空气量都很符合。但是，流型图则几乎不受物性与管径的影响，可以通用于牛顿与非牛顿（有限弹性）流体流动的预测。

固体粒子分散在非牛顿液体中而构成的悬浮液也是工业上常遇到的物料。如油漆、印刷油墨、食品、药品、化妆品、高分子复合材料等，在加工过程中都是以悬浮液的形式存在的。有必要了解细颗粒的沉降、粘度与浓度的关系、悬浮液的流变性质等知识。自 1970 年 Highgate & Whorlow[38] 首先对刚性粒子在非牛顿液体中的流变行为进行实验研究以来，直到最近，理论分析和实验测定方面均不断有研究发表[39,40]。这是当今国际上十分活跃的研究领域，已形成流变学的一个新分支——悬浮液流变学。

非牛顿流体的混合是一个应用广泛而机理十分复杂的问题。Chavan等[41]对此作了详细的回顾和总结。非牛顿流体复杂的流变特性大大影响了流动的型式和速度分布。Metzner & Otto[42] 提出的平均剪切率概念对于计算非牛顿流体的搅拌功率起了十分重要的作用。多年来大量工作是寻找 Metzner-Otto 常数（即 $\gamma_e = kN$ 中的 k 值）的统一处理方法，直到最近还有人[43]从实验得出对于具有轻微粘弹性的流体，其 k 值不同于拟塑性流体的结论。当前的研究特点似乎是考虑流体弹性的影响[44]以及寻找最佳的桨叶型式。

非牛顿流体管道流动这一老课题最近也有了新的开拓。Liu[45]用有限元法算出任意截面管道中流动充分发展区幂律流体的压降与流率之间的关系。管道形状仅由三个几何参数表示，只要这三个参数已知，便能完全确定压降与流率的关系。直管中摩擦阻力系数已有新的计算公式，其中包括了粘弹性的影响，当然，还可回到牛顿流体的情况[46]。非牛顿流体湍流流动的进口段计算也有了新的公式[47]，计算表明流体的拟塑性或弹性的增加导致湍流进口段稳定长度也增加。此外，最近还有对**非牛顿流体过滤**[48]，鼓泡塔中液存量计算[49]，粘弹性流体流化床特性[50]，以及停留时间分布[51]等研究结果发表。这些工作或是在物理模型上，或是在计算方法上有一定的独到之处。研究方法也有所突破，边界层积分法及变分法均有应用[52]。有关非牛顿流体力学以前的研究和应用情况，还可参看[53]。

最后介绍一下**泡沫**。泡沫技术[54]是一种新兴的流变技术，而且泡沫是目前仅知的唯一的一种**可压缩的非牛顿流体**。泡沫可用于消防和石油深度开采[55]。泡沫精馏[56]，泡沫吸附[57]等是环境工程的一个重要手段。用泡沫采油可比单独用气采或液采提高产量，比单独汽采可高 3 倍[55]。这种技术是 1958 年才创始的，如今方兴未艾。研究的课题主要为泡沫的流变特性、传质容量系数、泡沫结构等。泡沫的本构方程目前仅提出二维模型[58]，尚未成熟。此领域近年比较活跃，在第 56 届全美流变学年会（1985）上特别增加了一个泡沫分组[59]，颇受重视。

Ⅲ. 非牛顿流体的热量传递

非牛顿流体传热是研究得较早的一个课题。早期的工作已汇总在 Skelland 的“Non-Newtonian Flow and Heat Transfer”一书中。现将近年来的研究进展作一介绍。

圆管中拟塑性流体的恒热流层流传热是研究得最早的非牛顿流体传热问题。Grigull[1]

曾应用幂律流体充分发展的流动状况作过解析解。之后，Mc Killop[2] 对进口段提出了数值解。这两篇文章的结果表明，不管在充分发展区或正在发展区，拟塑性流体的传热系数较牛顿流体为高。许多文章[3-5]指出，稠度系数 K 的温度依赖关系能进一步增加传热系数。但这些分析还不足以提出一般的关联式。直到70年代才有人[6] 通过数值解的结果得出了关联式。此式适用于进口段内充分发展流动区内传热的计算。对于恒热流及恒壁温管内非牛顿流体的层流传热计算，可在 Bird 等人的专著中找到。为了增强管内层流传热效果，有人[7] 曾考虑用脉动来改进传热。实验发现，对牛顿流体脉动与稳定流动，其传热不变；而对非牛顿液体，则随脉动振幅与频率的不同而有不同的结果。例如对 CMC 溶液，传热可提高 2 %，但对有明显弹性的PAA溶液，可增加12%。但这种外加能量的强化措施，经济上是否得益，乃是付诸应用的关键所在。

平面库埃特流中液体的传热是一有实际意义的问题。其典型应用如液体食品和生物材料的加热消毒，轴承轴套中的传热等。过去几年中这一问题已日益受到注意，但多限于牛顿流体。非牛顿流体相应的研究尚少，而一些液体食品、发酵肉汤和润滑油等均表现出明显的非牛顿流变行为。近年有人[8] 将牛顿流体的研究结果推广到非牛顿流体，对幂律流体得到了速度分布、传热模型，并用差分法进行了数值模拟，找出了无量纲压力梯度、拟塑性指数以及粘性耗散等参数对传热的影响。

搅拌釜中非牛顿流体的传热研究已有二三十年的历史，直到近年仍不断有文章发表[9-11]。这与实际需要是分不开的。因为化学工业及生物工程中许多单元操作如发酵、混合、充气、反应等，都是在搅拌釜中进行的，免不了要加入或移出热量。其早期结果已汇总在 Edwards[12] 的综述中。对于各种类型的搅拌器，各种传热方式均有功率和传热的关联式可供设计计算，但涉及的流体多系幂律型，还缺乏触变、粘弹性等流体在搅拌釜中的传热数据。另外，由于这些关联式都是从特定设备上得到的，而桨叶、夹套和蛇管尺寸的微小变化对传热的影响还不清楚，所以各不同关联式的分歧很大，如何选择适用的公式进行工程计算仍然难于决断。可见非常急需大型设备的数据（如 ϕ120 cm 以上）以检验放大效应，解决目前的分歧。此外，有些工艺操作如氯化、加氢等，系在搅拌釜中处理气液两相混合物，需要研究气相对传热和搅拌功率消耗的影响。Edwards[13] 在直径 1.22 m 带有挡板和盘管的釜中进行了实验研究，观察到充气比不充气时功率明显降低而传热速率基本不变。

从研究历史上看，50 年代都集中在内部问题，Metzner[14] 已作过很好的评述。60 年代初 Acrivos 等[15,16] 首先研究了非牛顿流体流经外部表面层流边界层中的流动和传热，Wolf[17] 分析了对称圆柱体上幂律液体的对流传热。Lee[18] 等求出了楔形流动中幂律流体强制对流传热的相似解。直到现在才有人[19-21] 对不稳定传热进行了研究。对非牛顿流体边界层中流动与传热的研究还很不充分[22,23]，但许多工程问题如减小轴承和船舶摩阻，管道、薄膜反应器和蒸发器中入口段的发展等，都由边界层的特征所决定。

如前所述，在含减阻剂的溶液中表现出令人注目的减阻效果。这种减阻溶液的传热效果如何，显然是一引起兴趣的研究课题[24]。目前对此种流体能否称为非牛顿型尚无定论。**自然对流传热**的研究并不充分。如 Lyons[25] 等在中等粘弹性的减阻液中对水平圆柱传热所研究的，这种溶液含有 10^2—10^3 ppm 的聚氧化乙烯，实验发现随高聚物浓度的增加（意味着弹性和 Weissenberg 数增加）Nu 准数下降。可喜的是此领域近年来渐趋活跃[26,27]。**沸腾**

传热方面，Kotchaphakdee & Williams[28]研究了平板上聚丙烯酰胺和羟乙基纤维素水溶液的大容积沸腾传热，发现对一定的温差，加入高聚物后热负荷明显增加，有时可达250%。还发现如只用粘度作为关联参数，则对不同分子量和浓度的羟乙基纤维素，得到的结果相当一致。此结果后为Miaw[29]所重复。Gannett & Williams[30]用环己烷作溶剂，聚异丁烯作添加剂，研究了有减阻剂的核状沸腾，发现即使在温差较低时也能明显提高热负荷，但临界热负荷值不变。他们实验中用的也是平板加热面。最近，Paul[31]用铂丝作为加热体，对九种不同高聚物添加剂的水溶液进行大容积核状沸腾试验，实验结果恰恰与前人相反，即温差一定时，传递的热量均较纯水低。虽然细丝和平面上汽泡长大和破裂的流体动力学条件不同，但也不至于结果相反。笔者[32]亦发现添加浓度关系极大，超过某一临界浓度则结果相反。添加剂的水溶液传热效果究竟怎样？其机理又是什么？能否发展成一种节能新措施？这些问题有待进一步研究。

Ⅳ．非牛顿流体的质量传递

和传热相比，非牛顿流体传质研究的特点是起步晚，进展小，直到晚近才有较多的文章发表。Luikov[1]是较早对此领域进行探索的研究者之一。他曾对添加有CMC的某种电化发光溶液沿平板纵向流动时边界层的传质进行了实验研究，测定了这种溶液的扩散、光学和流变性质，还作了一些理论分析。

扩散系数的测定是传质的研究基础，在文献中已有较多的报道[2-7]。氧、二氧化碳和乙烯等气体在CMC，PEO等高聚物水溶液中的扩散系数已分别用湿壁塔、转盘平板和层流射流等方法做过测定。气体在高聚物水溶液中的扩散系数多半较在纯水中为低，但也有例外。如氧在聚氧化乙烯水溶液中的扩散系数就比在纯水中高。这是因为在系统中产生了复杂的化学反应所致。由于气体在高聚物稀溶液中的分子扩散系数随高聚物的组成、种类变化很大，所以仍有必要做一些实验和理论研究工作。

非牛顿流体在管道内流动时的传质也有人[8]做过一些研究，如将50和1000 ppm的聚氧化乙烯添加在4%的NaCl溶液中后，传质系数明显降低。最近也有人[9]对粗糙管进行过专门的研究。

在许多实际问题中，如高聚物生产及加工、发酵、血液氧合器、废水处理中常会遇到**非牛顿液体中气体吸收**的传质过程。如何对鼓泡塔、机械喷洒搅拌釜或转盘气液接触器等吸收设备进行合理的设计，是传质研究中的一个重要课题，过去几年已有一些研究者[10-13]在这方面做过一些工作。值得一提的是Trainham等[14]详细研究了不同Schimidt准数下幂律流体传质的影响。Yoshida[10]在关联喷洒搅拌釜中传质数据时，已将Deborah数包括在内，用以反映非牛顿流体的粘弹行为。这较以往处理非牛顿流体的工程计算中采用表观粘度概念来套用牛顿流体的计算公式，无疑是前进了一步。Hikita等[15]最近也研究了幂律降膜流中气体的吸收，认为Sh准数与Graetz准数、流变指数n有关。实际上，此同一问题的工作我们已在两年前发表[16]。Godbole[17]最近对鼓泡塔进行了详细的研究，测定了持液量、体积传质系数和气液接触面积，所用塔径为0.325 m，高3.4 m，可用于发酵设备的设计。

最近，**二相系统非牛顿流体的传质**研究也相当活跃。原油通过多孔岩石的流动，采油后期压裂液通过砂及砂石的流动，高聚物溶液和泥浆的过滤，非牛顿流体通过离子交换床的流动，以及羟基化过程中的催化聚合等问题，均属这方面的研究对象。Hyde[18]研究了单个固

体球与幂律流体间的爬流传质. Bhavaraju[19] 用摄动法求得单个气泡在幂律流体和宾汉流体中的阻力系数和Sh数，发现在两种流体中传质和阻力系数均随非牛顿性的增强而增加，且理论与实验相当吻合. 这些结果与单个固体颗粒在幂律或宾汉流体中获得的结果是一致的，但与固体颗粒群的结果恰恰相反. Kawase[20] 利用 Happel[21] 的自由表面泡模型，用近似解法求出了低 Re 数下幂律流体流经固体颗粒群的阻力系数和传质速率. 理论计算表明，阻力系数随拟塑性的增加而减小，且减小的程度在空隙率低时更为显著. 计算还表明，流动指数的增加只使传质速率稍有提高，遗憾的是尚无传质数据予以验证. Kawase 接着还研究了表面活性剂的影响[22]，发现传质速率降低. 最近，Kawase[23] 利用边界层模型研究了高Re数对颗粒床层中传质的影响. 由于非牛顿流体流经固体颗粒涉及采油采矿等重大技术问题，因此，可以预料，对这一领域的研究必会引起更多的注意.

最近还有人[24,25] 研究了管内非牛顿流体在流动发展区内**有化学反应的对流扩散**问题及**化学吸收**问题. 前者的应用背景是液体食品的加热消毒和进行均相反应的管式聚合反应器的设计；后者针对高聚物制造过程. 考虑到非牛顿流体中的化学反应，说明研究工作又深入了一步.

综观近年来非牛顿流体传递过程的研究成果，可以发现，这个领域已有很大的发展. 50—60年代高聚物材料工业的崛起，推动了本学科的形成和发展. 70年代研究重点已从设计方法转向数值计算与理论分析. 80年代，非牛顿流体的传质研究逐渐增多，并出现了化学反应问题. 这说明非牛顿流体传递过程开始形成了完整的体系.

Ⅴ. 国内研究情况简介

国内的研究始于60年代初. 顾毓珍、江体乾等对非牛顿流体的传热、边界层理论、相似律以及搅拌功率等方面进行了实验研究和理论分析，作了一些有益的开创性工作[1-6]. 其后，上海机械学院、哈尔滨建筑工程学院和海军等单位在减阻方面也进行过探索，直到近年成都科学技术大学、浙江大学还在研究减阻技术[7-9]. 1980年陈文芳、江体乾等在北京大学开办非牛顿流体力学讲习班以来，非牛顿流体的研究有了更大的进展. 逐步形成了上海、北京、成都等几个研究中心. 1982年第2届全国多相流、非牛顿流和物理化学流体力学学术会议共收到非牛顿流体力学方面的论文17篇，其中包括减阻、本构方程、粘弹性流体的应力过度现象和收缩流、单层斜面的流动稳定性、原油低温输送等许多既有实际应用背景又有理论分析的文章[10]. 其他研究工作还有湍流边界层[11]，圆盘间宾汉流体的径向流动[12]，搅拌功率计算[13]，管内层流传热[14]，脉动流中的传热[15]，通气搅拌釜中的传质[16]，非牛顿流体力学在石油工业中的应用[17]，薄膜流中的传质[18]，粘弹性流体的过渡现象[19]，润滑中粘弹性效应[20]，以及非牛顿流体流动稳定性[21] 等. 1984年于墨西哥召开的第9届国际流变学大会上，我国有江体乾、许元泽、陈文芳出席了会议，发表了5篇学术论文[22-26]. 1985年全国第1届流变学年会上关于传递过程方面约有30篇论文，约占总篇数的25%[27]. 此外，近年来在血液流动，氧合器的传质机理，刮板薄膜蒸发器中传热性能以及彩卷多层一次涂布技术等应用项目方面均有所开发[28-31]. 我国在非牛顿流体传递过程方面的研究已取得可喜的成绩. 我国台湾省的学者对此专题也颇感兴趣，文献中常可看到他们的工作[32-34].

Ⅵ. 结束语

非牛顿流体传递过程既是技术性很强的学科领域，有广阔的应用背景，又是一门基础性

很强的交叉学科，有许多特有的性质有待认识。我国在这方面无论是应用研究还是理论研究，都还远远不能满足要求。高聚物材料的生产和加工、原油的开采集输、矿藏开采等一列系工程问题，尚有大量的课题有待研究。特别是非牛顿流体传递过程的研究与流变测量技术是分不开的，目前迫切需要更多地装备先进的测试仪器，大力开展应用研究，注意理论研究，为学科发展，为四化建设作出贡献。

参 考 文 献

动量传递

1 Palyvos, Report No. 741, National Techuical University, Athens, Greece (1974).
2 Virk P. S., *AIChE J.*, **21** (1975): 625.
3 Little R. C., et al, *IEC Fundls.*, **14** (1975): 283.
4 White A., Drag Reduction by Additives, BHRA Fluid Engng. Bedford (1976).
5 Fortuin J. M. H., Klijn P. J., *Chem. Eng. Sci.*, **31** (1982): 677.
6 Ousteskont R. S., Hell, C. D., *J. Petroleum Tech.*, **13** (1961): 217—222.
7 Thorne P. E., Int. Congr. on Drag Reduction, Paper H1 (1974).
8 Fakula A. G., *Trans. A. S. M. E.*, **93**, D3 (1971): 453—455.
9 Sellin R. H., Barnatd B. J. S., *J. Inst. Municipal Engnrs.*, **98**, 8 (1971): 207.
10 Overfield J. L., et al, *J. Water Pollution Control Fed.*, **41**, 9 (1969): 1570.
11 *Hydraullies and Pneunaties*, **27**, 8 (1974): 22—24.
12 Canham H. J. S., et al, *Trans. Royal Inst. Naval Architutes*, **113**, 3 (1971): 187.
13 USSR Patent, 501247.
14 White W.D., Hoyt J.W., Proc. 8th Int. Congr. on Medic. and Biolog. Engng., Chicago(1969).
15 Hoyt J. W., United State Patent 3590124.
16 Kale D. D., et al, *Nature*, **29** (1973): 242.
17 Mashelkar R. A., Devrajan G. V., *Trans. Instn. Chem. Eng.*, **54** (1976): 108.
18 Popadic V. D., *AIChE J.*, **21** (1975): 610.
19 Dutta A., Mashelkar R. A., *ibid*, **29** (1983): 519.
20 Mooney M., *J. Rheology*, **2** (1931): 210—222.
21 Astarita G., et al, *IEC Fundls.*, **3** (1964): 333.
22 Carreau P. J., et al. *Rheol. Acta*, **18** (1979): 600.
23 Vinogradov G. V., Ivanova L. I., *ibid*, **6** (1967): 209.
24 *ibid*, **7** (1968): 243—254.
25 Savins J. G., *Ind. Eng. Chem.*, **61** (1969): 18—47.
26 Cheng D. H-C., *IEC Fundls.*, **13** (1974): 394—395.
27 Metzner A. B., Cohen Y., Nefaile C. R., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **5** (1979): 449.
28 Kozicki W., et al, *Chem. Eng. Sci.*, **25** (1970): 41—52.
29 Kraynik A. M., Schowalter, *J. Rheology*, **25** (1981): 95—114.
30 Pilehavari A., Clark E., Paper SPE 12029 (1983).
31 Cohen Y., Metzner A. B., AIChE Symp. Series Vol. 78 (1982): 77—85.
32 Ranade V. R., *Chem. Eng. Commun.*, **20** (1983): 253.
33 Jiang T. Q., Metzner A. B., In B. Mena (Ed.), Adv. in Rheol., Vol. 2, Mexico Press(1984).
34 Klinzing G.E., et al, AIChE Symp. Series Vol. 80 (1984): 234.
35 Mahalingam R., in "Advances in Transport Processes", Vol. 1, A. S. Mujumdar (Ed.), John Wiley Sons, New York (1980): 58.
36 Farooqi S. I., Richardson J. F., *Trans. Ind. Chem. Eng.*, **60** (1982): 292.
37 Richardson J. F., et al, *Chem. Eng. Res. Des.*, **61** (1983): 56; **62** (1984): 22—32.
38 Highgate D. J., Whorlow R. W., *Rheol. Acta*, **9** (1970): 569.
39 Kawase Y., et al, *Chem. Eng. Commun.*, **20** (1983): 127.
40 Torrest R. S., *AIChE J.*, **29** (1983): 506.
41 Chavan V. V., Mashelkar R. A., in "Advances in Transport Processes", Vol. 1, A. S. Mujumdar (Ed.), John Wiley&Sons, New York (1980): 210.
42 Metzner A. B., Otto R. E., *AIChE J.*, **3** (1957): 3.
43 Ducla J. M., et al, *Chem. Eng. Commun.*, **21** (1983): 29.

44 Nienow A. W., et al, *ibid*, **19** (1983) : 29.
45 Liu Ta-Jo, *IEC Fundls.*, **22** (1983) : 183.
46 Darby R., Chang Hsun-Fu D., *AIChE J.*, **30**, 2 (1984) : 274—280.
47 Shenoy A. V., *IEC Proc. Des. Devel.*, **22** (1983) : 165.
48 Hermia J., *Trans. Ind. Chem. Eng.*, **60** (1982) : 183.
49 Godbole S. P., et al, *Chem. Eng. Commun.*, **16** (1982) : 119.
50 Briend P., et al, *Can. J. Chem. Eng.*, **62**, 1 (1984) : 26—32.
51 Saxena A. K., et al, *ibid*, **61** (1983) : 50.
52 Gala R. S. R., Madden P. E., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **16**, 3 (1984) : 251.
53 Jiang T. Q., *J. Shanghai Institute of Chemical Technology*, 1 (1980) : 135.
54 Patlon J. T., Holbrook S. T., Hsu W., *J. SPE* (1983) : 456.
55 Burley R. W., Nutt C. W., Bayat M. B., *Chem. Eng. Res. Des.*, **62**, 2 (1983) : 92—100.
56 Clarke A. A., Wilson D. J., Foam Flotation, Marcel Dekker Inc., New York (1983).
57 Lemlich R. (Ed.), Adsorptive Bubble Separation Techniques, Academic Press, NY (1980).
58 Khan K., Armstrong R. C., 55th Annual Meeting Abstracts (H2), USA, Knoxville (1981).
59 Falls A. H., 56th Annual Meeting Abstracts (D5), Blackburg, USA (1985).

热量传递

1 Grigull U., *Chemie-Ingenieur-Technik*, **28** (1956) : 553.
2 McKillop A. A., *Int. Heat Mass Transfer*, **7** (1956) : 853.
3 Mizusnina T., et al, *Kagaku Kogaku*, **31** (1964) : 250.
4 Mahalingan R., et al, *Chem. Eng. J.*, **9** (1975) : 161.
5 ——, et al, *Chem. Eng. Sci.*, **30** (1975) : 921.
6 Joshi S. D., Bergles A. E., *AIChE J.*, **27** (1975) : 872.
7 Edwards M. F., et al, *Chem. Engr. (London)*, 279 (1973) : 532.
8 Lin S. H., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **22** (1979) : 1117.
9 Desplanches H., *Can. J. of Chem. Eng.*, **58** (1980) : 160.
10 Freiberg P., Kudrewizki, *Chem. Technik*, **35**, 11 (1983) : 583—585.
11 Kuriyama, et al, *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 6 (1983) : 489—494.
12 Edwards M. F., et al, *Chem. Engr. (London)*, 265 (1972) : 328.
13 ——, *Trans. Ind. Chem. Eng.*, **54** (1976) : 160.
14 Metzner A. B., *Advances in Heat Transfer*, 2 (1965) : 357.
15 Acrivos A., et al, *AIChE J.*, **6** (1960) : 312.
16 Shan M. J., et al, *ibid*, **8** (1962) : 542.
17 Wolf C. J., Szewczyk A. A., Proc. of 3rd Int. Heat Transfer Conf., Vol. 1 (1966) : 388.
18 Lee S. Y., Ames W. F., *AIChE J.*, **12** (1966) : 700.
19 Gorla R. S. R., AIChE J. Symp., Ser. 76 (1980) : 264.
20 ——, *Can. J. of Chem. Eng.*, **58** (1980) : 431.
21 ——, *AIChE J.*, **28** (1982) : 56.
22 Jiang T. Q., *Physics Acta*, **18** (1962) : 224.
23 ——, *Chem. Engng. (China)*, 3 (1978) : 56.
24 Kawase Y., *Chem. Eng. Sci.*, **37** (1982) : 1039.
25 Lyons D. W., et al, *IEC Fundls.*, **11** (1972) : 586.
26 Shenoy A. V., *Can. J. of Chem. Eng.*, **61**, 10 (1983) : 869—872.
27 Som A., Chen J. L. S., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **27**, 5 (1984) : 791.
28 Kotchaphakdee P., Williams M. C., *ibid*, **13** (1970) : 835.
29 Miaw C. B., Ph. D. Thesis, University of Michigan (1978).
30 Gannett H. J., Williams M. C., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **14** (1971) : 1001.
31 Paul D. D., *J. of Rheology*, **27** (1983) : 59.
32 Jiang T. Q., Yu Yong-Bin, *J. East China Institute of Chem.*, Tech. No. 3 (1984) : 395.

质量传递

1 Luikov A. V., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **12** (1969) : 377.
2 Astarita G., *IEC Fundls.*, **4** (1965) : 236.
3 Zandi I., Turner C. D., *Chem. Eng. Sci.*, **25** (1970) : 517.
4 Wasan D. T., et al, *AIChE J.*, **18** (1972) : 928.
5 Greif R., et al, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **15** (1972) : 593.

6 Jerome F. P., et al, *AIChE J.*, **19** (1973): 1073.
7 Mashelkar R. A., Soylu M. A., *Chem. Eng. Sci.*, **29** (1974): 1089.
8 Teng J. T., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **22** (1979): 493.
9 Kawase Y., *ibid*, **27** (1984): 140.
10 Yagi H., Yoshida F., *IEC Proc. Des. Devel.*, **14** (1975): 488.
11 Nakanoh M., Yoshida F., *ibid*, **19** (1980): 190.
12 Ravetkar D. D., Kale D. D., *Chem. Eng. Sci.*, **36** (1981): 399.
13 Lal P., Upadhyay S. N., *ibid*, **36** (1981): 1865.
14 Trainham J. A., Pollard Q. J., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **15** (1984): 155.
15 Hikita H., et al, *Can. J. Chem. Eng.*, **63**, 3 (1984): 352—356.
16 Jiang T. Q., et al, *J. Chem. Ind. Eng. (China)*, Selected Papers, **4**, 3 (1984): 175.
17 Godbole S. P., Schanpe A., *AIChE J.*, **30**, 2 (1984): 213—220.
18 Hyde M. A., et al, *IEC Fundls.*, **22**, 4 (1983): 500.
19 Bhavaraju S. M., *AIChE J.*, **24** (1978): 1063.
20 Kawase Y., *Chem. Eng. Sci.*, **36** (1981): 1193.
21 Happel J., *AIChE J.*, **4** (1958): 197.
22 Kawase Y., *Can. J. Chem. Eng.*, **60** (1982): 87.
23 ——, Ulbrecht J. J., *AIChE J.*, **29**, 4 (1983): 689.
24 Venkatsubramanlan C., *IEC Proc. Des. Devel.*, **22** (1983): 509.
25 Chu J. Y., Jiang T. Q., *J. of Chem. Ind. and Eng. (China)*, 2 (1985): 179—188.

国内研究

1 顾毓珍，江体乾，华东化工学院学报，5 (1960): 34.
2 江体乾，同上，5 (1960): 27.
3 江体乾，同上，5 (1960): 39.
4 江体乾，物理学报，**18** (1962): 224.
5 江体乾，第7届华东化工学院科研报告论文集 (1963).
6 江体乾，化学世界，12 (1965): 571.
7 哈尔滨建筑工程学院水力学教研组，力学学报，2 (1980): 184.
8 吴嘉，朱勤工等，中国石油储运学会第五届论文报告会 (1982).
9 李文端等，油田化学，1 (1984): 64.
10 江体乾等，第2届全国"三流"会议论文汇编，或力学与实践，4 (1982).
11 江体乾，化学工程，3 (1978): 56.
12 戴干策，Bird R. B., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 8 (1981): 349.
13 林猛流等，化学工程，4 (1982): 38.
14 庄震万，化工学报，4 (1980): 405.
15 戴干策，华东化工学院学报，1 (1983): 25.
16 叶勤等，同上，3 (1982): 313.
17 江体乾，管道科技论文集，中国石油储运学会编 (1980).
18 江体乾等，化工学报，2 (1982): 117.
19 蔡扶时，力学学报，6 (1982): 538.
20 陈文芳，蔡扶时，同上，4 (1984): 333.
21 范椿，同上，2 (1982): 155.
22 Jiang T. Q., Metzner A. B., In B. Mena, et al (Eds.): "Advance in Rheology", Vol. 2, Mexico Press (1984).
23 Tang Y. N., Chu J. Y., Jiang T. Q., *ibid* (1984).
24 ——, ——, ——, *ibid* (1984).
25 Xu Y., Qian Renyuan, *ibid* (1984).
26 Schummer P., Xu Yuanze, *ibid* (1984).
27 江体乾等，第1届全国流变学会议论文摘要集 (1985).
28 江体乾，唐寅南，华东化工学院学报，1 (1983): 75.
29 包锦明，瞿谷仁，唐寅南，江体乾，中国生物医学工程学报 (1985).
30 江体乾，余永彬，华东化工学院学报，3 (1984): 395.
31 唐寅南，张荣基，江体乾，第1届全国流变学会议论文摘要集，B-6 (1985).
32 Yih S. M., Huang P. G., *Chem. Eng. Sci.*, **36** (1981): 387.
33 Lin Hsiao Tsung, Shil Yen Ping, CA: 98-181767.
34 Tsay Sun Yuan, Yu Hong Shou, CA: 98-181808.

THE PROGRESS AND APPLICATION OF TRANSPORT PHENOMENA IN NON-NEWTONIAN FLUIDS

Jiang Ti-qian Tang Yin-nan
(East China Institute of Chemical Technology)

Abstract In this paper, the history of transport phenomena studies of non-Newtonian fluids were related briefly. It started in 1950s and the comprehensive system was completed in the eighties. Besides, the recent studies of momentum, heat and mass transfer in non-Newtonian fluids were reviewed. In momentum transfer, the drag reduction flows and the slip phenomena are the two active fields and in heat transfer, some polymer additives would be found useful as a means of enhancement for the boiling heat transfer. Finally, in mass transfer, we think that the future investigator must pay special attention to the problems of mass transfer with chemical reactions.

Keywords *non-Newtonian fluid; transport phenomena; momentum, heat and mass transfer*

书刊评介

《高聚物断裂力学》

J.G. Williams: Fracture Mechanics of Polymers, Ellis Horwood Limited, 1984

众所周知，高聚物具有粘弹性．其变形、应力、应变乃至强度都是时间的函数，这大大增加了问题的复杂性．高聚物的断裂性能也受到粘弹性效应的很大影响．对高聚物的断裂问题的处理，必须把经典断裂力学理论与粘弹性理论结合起来．开拓与发展高聚物断裂力学，标志着高聚物科学又向前迈进了一大步．本书对这一前沿科学领域的最新发展提供了较为完整的描述，是这方面的第一部权威性论著．全书以下列两个最基本的假定为基础：①所有材料含有微裂隙、裂纹或非均匀性，由于它们的传播而引起裂纹的扩展；②材料的断裂韧度可用产生每单位新表面所需的能量来衡量．这样，围绕着能量这根主线，形成了高聚物断裂力学的体系．能量方法是本书鲜明的特点之一．全书共分八章．前五章简略推导了经典断裂力学的主要公式．第一章提出上述两个基本假定，并澄清了断裂力学中一些术语的意义；第二章是弹性体的能量分析；第三章讨论裂纹尖端不同材料的弹性应力；第四章给出许多具体问题的裂纹尖端应力强度因子的解；第五章介绍具有能量耗散的含裂纹系统，包括小范围屈服、限制屈服、全面屈服等弹塑性断裂力学的一些主要结论，最后较全面地介绍了粘弹性（全面能量耗散）的系统． （下转268页）