

非牛顿流体的 流动、混合和传热

王凯 编著

浙江大学出版社

非牛顿流体的流动、混合和传热

王 凯 编著

浙江大学出版社

内 容 提 要

本书从工程应用角度出发,系统地叙述了化工流变学和非牛顿流体在圆管和搅拌槽内的流动、混合和传热问题。全书分二篇共七章。第一篇主要叙述假塑性流体、宾汉流体、粘弹性流体和悬浮液的流变特性及其测量方法。第二篇主要介绍非牛顿流体在圆管中的流动和传热,非牛顿流体的搅拌功率;粘稠性流体的混合原理;粘稠性流体用搅拌器的选型;非牛顿流体在搅拌槽内的传热;还涉及了高分子物质的湍流减阻现象。各章均附有例题。

本书可供高分子化工、聚合反应工程和精细化工专业的大学生和研究生教材,也可供从事合成塑料、合成橡胶、合成纤维、涂料、粘合剂、日用化工产品等的研究、设计和生产的工程技术人员参考。

非牛顿流体的流动、混合和传热

王 凯 编著

责任编辑 平淳莲

* * *

浙江大学出版社出版

德清雷甸印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

787×1092 32开本 9.125印张 210千字

1988年9月第1版 1988年9月第1次印刷

印数1—3000

ISBN 7-308-00076-1

O·015 定价:1.80元

序

关于非牛顿流体在化工设备中的传递过程的研究，国外始于五十年代初，由于受到产业界人士的推动和赞助，此一学术领域从七十年代初开始得到迅速地发展。1971年日本专门成立了“高粘度液的操作研究会”。据该会对日本44个有关企业的统计结果，操作高粘流体的装置中，搅拌槽占50.2%，输送机械占22.6%，其余为挤出机、捏和机等。

近年来，随着我国合成橡胶、合成塑料、合成纤维、涂料、粘合剂、食品和化妆品工业的发展，非牛顿流体传递过程的研究也日益受到重视。但是有关此领域的专著很少。村上泰弘所著“聚合反应装置的基础和解析”（日文，1976年）一书，对高粘流体在搅拌槽式反应器内流动、混合、传热和传质作了较系统的叙述，但全书仅限于牛顿流体。永田进治所著“混合原理及应用”（Mixing Principle and Application, 1975）和Oldshue所著“流体混合工艺”（Fluid Mixing Technology, 1983）二书是论述有关搅拌槽中传递过程的佳作，而其中有关非牛顿流体的篇幅也甚少。

为适应高分子化工专业本科生和研究生教学和化工企业中技术人员自学的需要，作者在1983年至1984年编写了“非牛顿流体传递过程”讲义作为高分子化工专业硕士课程教材和全国合成橡胶行业聚合反应工程培训班教材，并已进行了多次讲授；另外，有关内容已在《合成橡胶工业》杂志上进行连载（1986年第2~5期）。本书是在这讲义和连载的基础上增补改编而成的。

全书分二篇，共七章。第一篇是化工流变学基础，介绍与化学工程密切相关的流变理论及其测量技术，主要讨论流体的宏观流变行为，不致力于追求对流变机理的微观解释。第二篇主要叙述非牛顿流体在搅拌槽中的流动，搅拌功率消耗、混合和传热，同时也用一定篇幅讨论非牛顿流体在圆管中的流动、传热以及湍流减阻问题。

近代流变学专著中大量使用张量方程，这对大多数工科的大、专学生和工科毕业的技术人员来说往往望而却步。其实，由于搅拌槽的复杂性，至今在解决搅拌槽中传递问题时主要还是靠在大量实验的基础上所获得的半经验方程，很少使用解析解。本书力求把所用的数学工具限制在一般工科专业所学的高等数学范围内，以利于读者自学。

作者从事的研究课题“非牛顿流体传递过程及高效混合、传热设备的开发”，在1983至1986年获得中国科学院科学基金的资助，因此本书也可作为对该科学基金项目的一种总结。并借本书出版之机，向该课题的共同研究者宋秋安、徐步泉、朱秀林、潘勤敏、俞生尧、闵卫国、周文俊等致以衷心的感谢。

限于作者水平，书中难免有不足和错、漏之处，敬请读者赐教、指正。

王 凯

1987年10月于杭州

目 录

第一篇 化工流变学基础

引言

第一章 纯粘性非牛顿流体

1-1 粘性率	3
1-1-1 剪切粘性率定律	3
1-1-2 拉伸粘性率	4
1-1-3 体积粘性率	5
1-2 与时间无关的纯粘性非牛顿流体	7
1-2-1 流体的分类	7
1-2-2 假塑性流体	9
1-2-3 胀塑性流体	17
1-2-4 塑性流体	18
1-3 与时间有关的纯粘性非牛顿流体	19
1-3-1 触变流体	20
1-3-2 震凝流体	21
1-4 纯粘性流体的流变测量	22
1-4-1 毛细管粘度计	22
1-4-2 锥板粘度计	34
1-4-3 回转圆筒粘度计	38

第二章 粘弹性流体

2-1 粘弹性流体概述	53
2-1-1 记忆现象	53
2-1-2 Barus效应(膨胀效应)	54

2-1-3 Weissenberg 效应(爬竿效应).....	54
2-1-4 Toms 效应.....	55
2-2 粘弹性流体的力学模型.....	55
2-2-1 Maxwell 粘弹性模型.....	55
2-2-2 Vorgt 粘弹性模型	58
2-2-3 多元素模型.....	59
2-3 非线性粘弹性.....	62
2-3-1 Nutting 方程式.....	62
2-3-2 法向应力效应的发生机理.....	63
2-4 法向应力效应的测量.....	68
2-4-1 平行圆板法.....	68
2-4-2 锥板法.....	70

第三章 液体的粘性

3-1 粘度与温度的关系	73
3-2 溶液和悬浮液的粘度.....	76
3-2-1 粘度的表示法.....	76
3-2-2 Einstein 方程式.....	77
3-2-3 电解质水溶液的粘度.....	78
3-2-4 高分子溶液的粘度.....	79
3-3 浓悬浮液的非牛顿性及其流变方程式.....	83
3-3-1 浓悬浮液的非牛顿性.....	83
3-3-2 浓悬浮液的相对粘度和固相分率的关联式.....	86
3-3-3 浓悬浮液的本构方程式	103
参考文献.....	105

第二篇 非牛顿流体的流动、混合和传热

第四章 非牛顿流体在圆管中的流动和传热

4-1 非牛顿流体在圆管中的层流流动.....	107
4-1-1 流速分布和平均流速.....	107

4-1-2 圆管内压力降和流量的关系	113
4-1-3 摩擦系数	116
4-2 高分子的湍流抑制效应	124
4-2-1 湍流抑制效应(简称 DR 效应)	124
4-2-2 高分子抑制湍流的机理	132
4-3 非牛顿流体在圆管中的传热	136
4-3-1 与传热有关的无量纲准数	136
4-3-2 非牛顿流体在圆管中的层流传热	137
4-3-3 非牛顿流体在圆管中的湍流传热	145

第五章 非牛顿流体的搅拌功率

5-1 牛顿流体的搅拌功率	148
5-1-1 圆筒形搅拌槽内液体的流动形态	148
5-1-2 粘度对固体回转部的影响	150
5-1-3 搅拌功率	151
5-2 非牛顿流体的搅拌功率	161
5-2-1 假塑性流体的搅拌功率	161
5-2-2 宾汉流体的搅拌功率	191
5-2-3 触变流体的搅拌功率	200
5-2-4 粘弹性流体的搅拌功率	202

第六章 非牛顿流体的混合

6-1 混合质量	208
6-1-1 混合过程的定性描述	208
6-1-2 混合质量的定义	210
6-2 搅拌器的混合性能	218
6-2-1 有关搅拌器混合性能的几个无量纲准数	218
6-2-2 搅拌器在层流域的混合特性	221
6-2-3 搅拌器在过渡流域的混合特性	223
6-2-4 流体的性质对混合的影响	225

6-3 混合机理.....	227
6-3-1 层流域.....	227
6-3-2 过渡流域.....	231

第七章 非牛顿流体在搅拌槽内的传热

7-1 概述.....	235
7-2 牛顿流体的给热系数关联式.....	238
7-3 非牛顿流体的给热系数关联式.....	245
7-3-1 非牛顿流体在搅拌槽内的层流传热.....	246
7-3-2 非牛顿流体在搅拌槽内的湍流传热.....	249
参考文献	260

附表

表1 Metzner常数 k_s	264
表2 非牛顿流体对夹套壁的给热系数关联式.....	268
表3 非牛顿流体对内冷管壁的给热系数关联式.....	274
表4 非牛顿流体对内冷搅拌叶壁的给热系数关联式.....	275

主要记号表

第一篇 化工流变学基础

引 言

人们在日常生活中接触各种各样的流体，将它们的流动行为进行比较，可发现有很大差别。水非常容易流动；蜂蜜要比水难于搅动和倾注；牙膏在静置时能保持不规则的形状，而在受到剪切作用时，它又会像液体那样流动；蛋白能呈现一定的弹性。流变学是研究物质的变形和流动的科学。这门学科的任务是使物质具有复杂的变形或流动现象更加明确化、系统化，并进一步把产生这些现象的机理从物质结构上解释清楚。

流变学是一门飞速发展着的科学，它涉及的领域极为广泛，例如：

(1) 工程方面

结构材料的特性：蠕变，应力松弛等。

化学工程：纸浆、泥浆和粉体的输送，高粘流体的混合、传热和传质等。

土木工程：土质力学，土压论等。

塑料工程：塑料成形加工机械的设计，塑料制品的变形等。

粘接，印刷，涂饰等。

摩擦、润滑等。

(2) 胶体化学

(3) 生物学

(4) 与生活有关的流变学

甚至现在也有人认为流变学与心理学也有关系。

本篇仅限于讨论与化学工程有关的流变问题。

第一章 纯粘性非牛顿流体

1-1 粘性率

在流体力学方程中用来说明粘性效应的系数，称为粘性率，或称为粘度。粘性率可分三种，即剪切粘性率，拉伸粘性率和体积粘性率。

1-1-1 剪切粘性率定律

如图 1-1 所示，在面积为 S 的两块平行板间充满一层厚度为 H 的粘性流体，这流体不妨认为是软沥青那样的东西。假定下板静止，而上板在外力 P 作用下经过短暂的过渡期后以一定速度 u 相对于下板进行稳态剪切流动，则剪应力与流体性质间的关系为

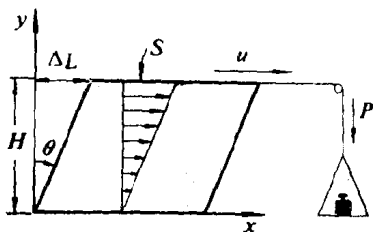


图1-1 剪切流动

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = (1/\phi) \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

这就是牛顿粘性定律。这里 τ 、 $\dot{\gamma}$ 分别是剪应力和剪切速率。在不考虑边缘效应，并设两块板间的流体流速呈线性分布，则：

$$\tau = P/S$$

$$\dot{\gamma} = u/H$$

$\dot{\gamma}$ 表示单位时间内的剪切应变增加量，由图 1-1 可知，剪切应

变为 $c = dL/dy = \tan\theta$, 而 $u = dL/dt$, 于是 $\dot{\gamma}$ 可以写成

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{dL}{dy} = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1-2)$$

因此 $\dot{\gamma}$ 等于在垂直于流动方向上的流动速度随距离的变化率, 亦称为速度梯度。

(1-1)式中的比例系数 η 是表示流体流动的难易程度或流体粘稠程度的物性常数, 称为剪切粘性率或剪切粘度, 它的单位是帕·秒 (Pa·s)。

η 的倒数 ϕ 是表示流动容易程度的常数, 称为流动率, 单位是 (帕·秒)⁻¹。

用密度 ρ 除剪切粘性率 η 得到的值 ν 称为运动粘性系数。

$$\nu = \eta / \rho \quad (1-3)$$

ν 的单位是米²/秒。

水和低分子有机液体, 如苯、酒精、甘油等许多流体都服从(1-1)式表示的牛顿粘性定律, 因而称它们为牛顿流体。凡不服从(1-1)式的流体称为非牛顿流体。

下面举出空气, 水, 甘油作为牛顿流体的代表, 它们在压力为101325帕和温度为15℃时的粘性率值分别为:

空气	0.0182×10^{-3} 帕·秒
水	1.1405×10^{-3} 帕·秒
甘油	2.33 帕·秒

1-1-2 拉伸粘性率

如图1-2所示, 在截面积 S , 长 L 的试料上加外力 P 。如果这试料是沥青或塑料, 承受荷载后会产生弹性形变, 还会不断伸长, 即发生流动, 设试料的拉伸速度为 u , 这时拉伸应力

P_n 和拉伸应变速率 $\dot{e}_n$ 可表示为

$$P_n = P/S \quad (1-4)$$

$$\dot{e}_n = u/L \quad (1-5)$$

P_n 和 $\dot{e}_n$ 之间关系符合牛顿粘性定律, 即

$$P_n = \eta_n \dot{e}_n \quad (1-6)$$

式中, 比例常数 η_n 也称为纵粘性率或拉伸粘性率, 它的单位与剪切粘性率一样, 是帕·秒。

凝胶状物质和沥青, 橡胶, 塑料等的拉伸粘性率和剪切粘性率之间近似地成立如下关系^[1]:

$$\eta_n = 3\eta \quad (1-7)$$

这称为粘性率的三倍法则。利用这三倍法则可通过拉伸和弯曲实验求剪切粘性率 η 。

1-1-3 体积粘性率

一体积为 V 的液体, 受到均一的静压力 P , 当压力快速增加到 $P + dp$ 时, 不可能立即达到平衡的体积应变 $e_v = -dV/V$, 而是以某个体积形变速率 $\dot{e}_v$ 缓慢地进行的。

$$\dot{e}_v = -(dV/dt)/V \quad (1-8)$$

压力增加量 dp 和体积应变速率 $\dot{e}_v$ 之间存在着相当于牛顿粘性定律那样的关系, 即

$$dp = \eta_v \dot{e}_v \quad (1-9)$$

式中, 比例常数 η_v 称体积粘性率或体积粘度。

一般的场合可不考虑由压力变化而引起的体积变化的延迟

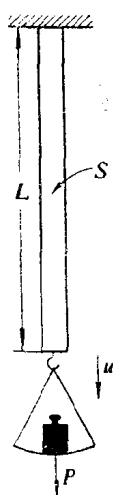


图1-2 拉伸粘性率

问题。而对超声波领域来说，超声波在液体中的吸收情况就与液体的体积粘度有关。

下面通过比较表 1-1 示出的几种液体的剪切粘性率和体积粘性率的大小可知剪切粘性率与体积粘性率之间没有简单的换算关系。

表1-1 几种液体的剪切粘性率和体积粘性率^[2]

种 类	音波的频率 兆赫	η ($\times 10^8$ 帕·秒)	η_v ($\times 10^8$ 帕·秒)	η_v / η
水	5	1.00	3.11	3.1
甲醇	5	0.593	1.20	2.0
乙醇	5	1.20	5.40	4.5
丙酮	5	0.302	1.15	3.8
异丙醇	5	2.20	12.8	5.8
醋酸胺	5	0.890	9.43	10.6
	2		9.19	10.3
间-二甲苯	5	0.618	7.28	11.7
间-二甲苯	2		7.23	11.7
乙基蚁酸	5	0.402	6.23	15.5
乙基蚁酸	4		9.10	23
乙基蚁酸	3		12.9	32
乙基蚁酸	2		39.4	86
氯仿	2	0.570	14.4	25
四氯化碳	2	2.01	58.4	29
苯	2	0.651	70.4	108
二硫化碳	2	0.396	73.7	>200

上述三种粘性率中，剪切粘性率使用得最多，以后无特别指出，文中提到的“粘度”均是指剪切粘性率。

1-2 与时间无关的纯粘性非牛顿流体

1-2-1 流体的分类

一般而言，对流体施加的剪应力 τ 和由剪应力所产生的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 之间存在着一个复杂的函数关系，即

$$\tau = f(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (1-10)$$

对于不同流体，函数 f 是不同的，即使同一流体，在不同温度、压力条件下， f 也不同。(1-10)式被称为流体的本构方程式或流变方程（本构方程的确切定义为：在一定假定下推导出的表达粘性规律的应力张量与应变速度张量之间关系）。对于纯粘性流体，按照这方程所描述流体的流变学特性所作出的图形称为流体的流变图。

对于非纯粘性流体，剪应力不仅与剪切速率有关，还与剪切作用的时间有关；有些流体还会呈现出弹性。这些流体的流变特性仅用 τ 和 $\dot{\gamma}$ 关系描述就不充分。

若把流体分类，可分成完全流体和粘性流体。完全流体是非压缩性的、没有粘性的理想流体；实际流体与完全流体相反，都是粘性流体。粘性流体再可分为纯粘性流体和既具有粘性、又具有弹性的粘弹性流体两大类，具体的分类如图1-3。

纯粘性流体在撤除剪应力后，它们在受剪应力作用期间的任何形变都不会回复；而粘弹性流体在撤除剪应力后，它们会完全或部分地回复原来受到剪应力期间所产生的形变。

纯 粘 性 流 体	与 时 间 无 关 的	牛 顿 流 体		非 牛 顿 流 体
		假 塑 性 流 体		
		胀 塑 性 流 体		
		宾 汉 流 体	塑 性 流 体	
		屈 服 - 假 塑 性 流 体 屈 服 - 胀 塑 性 流 体		
	与 时 间 有 关 的	触 变 流 体		
		震 凝 流 体		
粘 流 弹 性 体	多 种 类 型			

图1-3 粘性流体的分类

图 1-4 示出四种流体在简单剪切流动时的剪应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 间的关系曲线。曲线 A 表示牛顿流体的剪应力 τ 是剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的线性函数。曲线 B 和 C 表示流体具有 $\tau/\dot{\gamma}$ 值不是常量，而是 $\dot{\gamma}$ 的函数的流变特性，即 $\tau = f(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$ 。如果 $f(\dot{\gamma})$ 是随 $\dot{\gamma}$ 的增大而减小的，如曲线 B 所示，则称这种流体为剪切变稀流体或假塑性流体；如果 $f(\dot{\gamma})$ 随 $\dot{\gamma}$ 的增大而增加，如曲线 C 所示，