

高等学校轻工专业试用教材

粘性流体混合及设备

吴英桦 主编

中国轻工业出版社

高等学校轻工专业试用教材

粘性流体混合及设备

吴英桦 主编

中国轻工业出版社

(京)新登字034号

内 容 提 要

全书共七章。主要内容包括：粘性流体流变特性；低粘性液体的混合；高粘性液体的混合，搅拌功率；乳化；静态混合器；搅拌装置的放大。

书中对轻化工、食品、医药等工业常用粘性流体的流变特性，搅拌、乳化、静态混合机理，混合设备性能、结构及功率消耗作了详细论述，并对搅拌装置和静态混合的放大原理与规律作了扼要介绍。内容既侧重基本理论，又注意联系工程实际，并辅以适当例题。

本书是高等院校轻化工、食品机械专业必选教材，并可作为研究生的教学参考书，也可供工艺类专业学生，生产、科研和管理部門的技术人员参考。

高等学校轻工专业试用教材

粘性流体混合及设备

吴英桦 主编

孟寿萱 责任编辑

*

中国轻工业出版社出版

(北京市东长安街6号)

北京市卫顺印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

787×1092毫米1/16 印张：15.5 字数：347千字

1993年10月 第1版第1次印刷

印数：1—1,500 定价：7.55元

ISBN7-5019-1447-8/TH·036

序 言

本书为高等工科大专院校轻工类“化工机械与设备”和“食品机械”专业必修教材，也是适应轻化工、食品工业发展需要而编写的第一本“粘性流体混合及设备”教学用书。

本书着重对轻化工、食品、医药等工业常用粘性流体流变特性，搅拌、乳化、静态混合机理，混合设备性能、结构及功率消耗作了详细论述，并对搅拌装置和静态混合的放大原理与规律作了扼要介绍。编写时力求精选内容，加强基础，联系实际。内容上力求深入浅出，避免繁琐数学推导。

本书内容按50讲课时数编写，供四年制轻化工、食品机械专业本科学生使用，也可作为研究生的教学参考教材。如省略部分章节，四年制的工艺类专业，三年制专科学校或职工大学也可采用。本书除作教材外，也可供有关行业的生产、科研和管理技术人员参考。

本书由吴英桦主编。绪论、第一、二、三、四、七章由成都科技大学吴英桦编写，第五章由成都科技大学徐国全编写，第六章由成都科技大学卢晓黎编写。全书由四川轻化工学院范祥位副教授担任主审。

本书在编写过程中，得到天津轻工业学院魏钟教授、潘永康副教授的指导和帮助，范祥位副教授在审阅中提出了不少宝贵意见，成都科技大学张宁宁为全书描绘插图付出了辛勤劳动，在此表示衷心的感谢。

编 者

1991.11.

3/ADU-1/13

目 录

绪论	1
第一章 粘性流体流变特性	4
第一节 牛顿和非牛顿型流体	4
一、牛顿粘性定律	4
二、牛顿型流体	6
三、非牛顿型流体	8
四、指数律流变方程(流变模型)	11
第二节 塑性流体	12
一、宾汉流体	13
二、屈服-假塑性和屈服-胀塑性流体	13
三、宾汉实验模型	13
四、塑性流体结构特点	14
第三节 粘弹性流体	15
一、概述	15
二、粘弹性流体的特殊效应	16
三、粘弹性体实验模型	17
第四节 非均质流体	17
一、概述	17
二、非均质流体的流变特性	18
第二章 低粘性液体的混合	20
第一节 概述	20
一、搅拌混合设备的基本结构	20
二、搅拌器的类型	21
第二节 混合机理	21
一、主体流动和涡流	21
二、混合过程	23
第三节 混合效果	24
一、调匀度	24
二、分隔尺度和分隔强度	25
三、混合时间	26
第四节 搅拌液体的流动特性	27
一、复合涡流运动	27
二、搅拌液体流型	31
三、搅拌液体循环流量与压头	35

四、搅拌器的性能	37
第五节 搅拌罐及其附件	45
一、搅拌罐	45
二、搅拌附件	47
第三章 高粘性液体的混合	50
第一节 概述	50
一、高粘性液体搅拌操作类型	50
二、高粘性液体用搅拌器的特点	50
第二节 高粘性液体搅拌器及其性能	51
一、搅拌器类型及特性	51
二、混合性能无量纲准数	60
第三节 混合机理	63
一、剪切作用机理	64
二、其他影响因素	64
第四节 粘性液体的搅拌传热	65
一、传热方式	65
二、给热系数关联式	68
三、非均相物系的对流给热系数	78
四、高粘性液体的传热	79
五、非牛顿流体的给热系数关联式	82
六、加热(或冷却)时间	84
第五节 高粘性液体搅拌装置	89
一、单向回转式搅拌装置	89
二、复合回转式搅拌装置	93
第六节 搅拌器传动装置	94
一、常用的几种传动形式	94
二、轴封	99
第七节 搅拌器选型	101
一、选型原则	101
二、选型方法	102
第四章 搅拌功率	107
第一节 功率关联式	107
一、搅拌功率的主要影响因素	107
二、功率关联式	107
第二节 功率曲线及其应用	109
一、功率曲线	109
二、功率曲线的应用	112
三、常用搅拌器的功率曲线及公式	113

第三节 高粘度液体的搅拌功率	124
一、锚式、框式搅拌器	125
二、螺带式搅拌器	127
三、螺杆式搅拌器	127
第四节 非牛顿流体搅拌功率	128
一、假塑性流体的搅拌功率	128
二、宾汉流体的搅拌功率	131
三、触变流体的搅拌功率	134
第五节 非均相系统搅拌功率	134
一、液-液分散系的搅拌功率	134
二、固-液悬浮系的搅拌功率	135
三、气-液分散系的搅拌功率	135
第六节 电动机的功率	136
一、最大搅拌功率 $P_{\max}$	136
二、启动功率	136
三、摩擦损失功率 P_m	137
四、传动机械效率 η	138
第七节 搅拌功率的测量	139
一、电动机反转矩测量法	139
二、应变测量法	139
第五章 乳化	141
第一节 乳化机理和乳化剂	141
一、概述	141
二、乳化机理	142
三、乳化剂	149
第二节 乳化液的特性和稳定性	157
一、乳化液的特性	158
二、乳化液的稳定理论	161
三、乳化液的不稳定形式	163
第三节 乳化操作及设备	170
一、乳化操作过程	170
二、乳化设备	172
第六章 静态混合器	181
第一节 概述	181
一、静态混合器的结构、几何参数及混合原理	181
二、静态混合器的分类及选用原则	185
三、静态混合器的材料及加工	186
四、静态混合器的特点与应用	187

第二节 混合质量确定方法.....	187
一、分割层数模型.....	188
二、统计学方法.....	189
三、数学关联式.....	190
第三节 静态混合器设计中的其他问题.....	195
一、压力降与功率消耗.....	195
二、操作参数的选择.....	197
三、流程系统的设计.....	197
四、牛顿型流体层流时的放大原理.....	198
第七章 搅拌装置的放大.....	203
第一节 搅拌模拟实验.....	203
一、实验的目的.....	203
二、小型模拟实验的规模.....	203
第二节 实验结果放大.....	204
一、放大原理.....	204
二、功率数据放大.....	206
三、工艺过程结果放大.....	207
四、逐级放大试验.....	208
第三节 各种搅拌操作放大关系式.....	210
一、均相系混合过程.....	210
二、固-液悬浮过程.....	211
三、液-液或气-液分散过程.....	212
四、传热过程.....	212
五、放大时搅拌参数的调整.....	217
附录.....	219
主要参考资料.....	239

绪 论

一、混合操作在轻化、食品工业中的应用

混合操作在工业生产中应用范围很广，尤其是食品、医药、造纸、塑料和橡胶等轻化工业使用更为广泛。如各种化学、生化反应器，液-液萃取，气液吸收，浸取，结晶以及其他一些传热、传质过程都涉及混合。许多这种物理和生化变化过程，例如造纸纸料悬浮液调配，油漆、牙膏的制作，食油的拌合，果汁、冰品、饮料用糖液或调味液的调制，面团或面糊的拌合，发酵液的通气或搅拌，液体食品的调色，干酪、奶油、果酱的制备等都是以参与物质的充分混合为前提，因而“混合”这一术语往往包含传质传热方面需要考虑的问题，并成为许多工艺操作过程的重要特征。

随着我国合成橡胶、合成塑料、合成纤维、涂料、粘合剂、食品、化妆品、油漆、染料、医药、造纸等工业的发展，粘性流体、非牛顿型流体的混合操作越来越多，混合过程也比较复杂，理论处理极为困难。长期以来，倚重于经验的状态，已远远不能满足这些工业的发展需要，因而日益受到人们的重视。近几十年来，国际上混合方面的研究论文，每年都在几百篇以上。学术会议，除了化学工程、生物工程会议要涉及这方面内容以外，还举办专门的混合学术讨论会。影响较大的欧洲混合会议，从1974年以来，至今已召开了六次。美国化学工程师协会主办的混合理论讨论会也开了多次。美国还成立了混合设备公司，专门进行混合技术的研究、开发工作，并形成了特殊用途、特殊设计的发展方向。

二、混合的目的

按混合工艺过程的目的可分为以下几种。

1. 制取均匀的混合物

这种混合过程既不涉及化学反应，也不涉及中间相面的质量交换，即无物理和化学的变化，仅以实现浓度的一定均匀程度为目的，如水与糖蜜、水与酒精、石油产品的混匀等操作，最终形成相互混合的液体混合物。

2. 促进物理变化

(1) 加热、冷却：如杀菌加热设备，主要控制过程是传热，而不是混合，即强化传热过程，或避免液体局部过热、过冷，以满足一定的热力工况，确保产品质量，降低能耗。

(2) 溶解：如盐溶于水，使固体盐悬浮在水中，并使其已溶解部分迅速离开，让未溶解部分与液体接触，增加相对速度，促进溶解作用。

(3) 结晶：如制糖、食盐中的结晶，利用混合作用促进结晶运动，达到析出均匀结晶的目的。

(4) 吸附：如用活性炭使糖汁脱色，利用混合作用提高表面吸收速度等。

3. 促进化学、生化反应

如各种化学、生化反应器，混合不是为了达到混合物呈完全的混合状态，而是以促进化学、生化反应为主要目的。

4. 制取乳化物

通过激烈的混合作用，使两种或两种以上不互溶的液体以极细的微滴状态相互分散，形成稳定的乳化液，如奶油、乳油、冰淇淋、调和油漆、化妆品等。

三、混合方法

混合操作按其混合的基本方法分为以下几种。

1. 机械搅拌

利用旋转叶轮，使容器内的物料按一定方式运动，以实现其混合。

2. 静态混合

利用管道或设备内放置的若干静止不动的混合元件，将通过的物料进行多次分割、复合达到混合的目的。

3. 射流混合

利用高速射流卷吸效应，使容器或管道中的流体进行混合。

上述方法都是以一定形式的流体运动，形成一定流场的结果。显然，混合取决于流体动力学，并与混合物料的性质密切相关。

四、混合类型

按所处理的物料状态可分为以下几种。

1. 液体与液体（互溶或不互溶）混合

2. 液体与固体混合

3. 固体与固体混合

工业上常将固体与固体的混合操作称为混合，并且主要是散粒状固体，尤其是干燥颗粒间的混合，如啤酒麦芽及调味料等物料的混合操作。液体与液体或少量固体的混合称为搅拌，包括液-液混合，固体悬浮液的制取以及伴有加速溶解、强化传热等操作，如面浆、混合乳液，原料糖浆的制备以及糖果生产中的溶糖操作等。固体与少量液体或粘稠液体的混合称为捏和（调和或揉和），加工对象主要是高粘度糊状物料及粘滞性固体物料，如生产软糖的糖浆、乳酪、调制面团等。

根据物料特性的不同，又有如下各种术语：

搅拌——指以一定速度将粘性液体加以混合的方法。

捏揉——以搓揉手段使高粘性半固体物料加以混合的方法。

乳化——将两种或两种以上的液相或悬浮液，经混合或碎化处理，使之成为稳定乳化液的方法。

掺和——将固体或液体成分与粉末物料混合，形成均匀分布状态以调整其成分的方法。

本书讨论范围主要限于液体混合，尤其是粘性液体的混合。由于轻化、食品等工业中大多数的混合均系机械搅拌操作，因此，混合方法以机械搅拌为主。尽管也涉及到粘度超过 $100\text{Pa}\cdot\text{s}$ 甚至 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的高粘性液体，但仍以能被搅拌器造成流动为限。至于其他混合方法及混合设备只作扼要的介绍。

第一章 粘性流体流变特性

由于混合操作与混合物料的流变特性密切相关，因而在研究、设计及使用混合装置之前，必须了解混合物料的特性。

各种物质在力的作用下其变形的规律是各不相同的，流变学就是研究物质在力作用下变形的科学，是力学的一个分支。目前食品流变学已发展成为一门食品工业不可缺少的边缘学科。通过物质流变特性的测定，可以控制产品的质量，鉴别成品的优劣，并为工艺及设备的研究、设计提供可靠的科学依据。

轻化及食品等工业中原料、中间产品和最终产品的物质种类极其繁多，一些物质能明显地表现出固体或流体的特性。然而大多数物质在外力作用下表现出的特性，使人很难区分它是固体或流体，往往是既具有固体的特性，又具有液体的特性。根据物质的流变特性可以将它们如下分类：

固体——主要具有固体特性的物质，即在一定范围内变形与作用力大小成正比例，作用力一旦消失，变形完全恢复，呈现出理想弹性体的特性，即虎克固体的性质。

液体——主要具有液体特性的物质，液体受到的剪切应力与表现剪切变形的剪切速率成比例，其比例系数就是液体或流体的粘度。

粘弹性体——同时表现出固体的弹性和液体的粘性的物质。

塑性流体——同时具有固体特性和液体特性，但主要是表现液体特性的物质。当作用在物质上的剪切应力大于极限值（屈服应力）时，物质就流动，否则，物质就保持即时形状并停止流动。

液体中按其物性的不同又可分为牛顿和非牛顿型两类。符合牛顿粘性定律的液体物质，称为牛顿液体，否则为非牛顿液体。

轻化工及食品物质的流变特性，主要指流体的特性、塑性及粘弹性。

第一节 牛顿和非牛顿型流体

一、牛顿粘性定律

设有面积为 A 的上下两块平行放置而相距很近的平板，两板之间充满了静止的液体，如图 1-1 所示。假定下板固定不动，而对上板施加一恒定的外力 F ，使上板作平行于下板的等速直线运动，则板间的液体也随之移动。紧靠上板的液体，因附着在板面上，具有与平板相同的运动速度。而紧靠下板的液体，也因附着于板面而保持静止不动。在两层平板之间的液体速度分布，是从上到下速度由大至小逐渐变化。两平板间的液

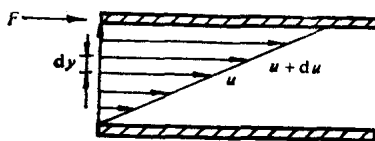


图 1-1 平板间液体速度变化图

体可看成为许多平行于平板的液体层，而层与层之间存在着速度差，即各液层之间存在着相对运动。运动较快的液层对与其相邻运动较慢的液层，有着拖动其向运动方向前进的力，以加速与其相接触的流速慢的液层。而同时，运动较慢的液层，对与其相邻运动较快的液层也作用着一个大小相等、方向相反的力，阻碍较快的液层运动，以减慢与其相接触的流速快的液层。这种在运动着的流体内部相邻两流体层间的相互作用力，称为流体的内摩擦力或粘滞力。

若某层流体的速度为 u ，在其垂直距离为 dy 的邻近流体层的速度为 $u+du$ ，则 du/dy 表示液层速度沿法线方向上的变化率，称为速度梯度或剪切速率。实验表明，两流体层间的接触面积 A 越大，速度梯度 du/dy 越大，则内摩擦力 F 也越大，于是有

$$F \propto A \frac{du}{dy}$$

即
$$F = \eta A \frac{du}{dy} \quad (1-1)$$

流体内摩擦力 F 通常用剪应力 τ 表示，则剪应力与流体性质间的关系为

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{du}{dy} = \eta \dot{\gamma} \quad (1-2)$$

式中 τ ——剪应力 (Pa)

η ——比例系数或粘性系数或动力粘度，简称粘度，表示流体流动的难易程度或流体粘稠程度的物性常数 (Pa·s)

$\dot{\gamma}$ ——速度梯度或剪切速率 (s^{-1})

式 (1-2) 为牛顿粘性定律的数学表达式，即流体所受到的剪切应力与表现剪切变形的剪切速率成比例。流体的粘性愈大，则流动时产生一定速度梯度的剪应力愈大。

物理学上也曾用泊 (P) 或厘泊 (cP) 作为动力粘度单位，其换算关系为

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} = 10^3 \text{ cP}$$

在研究物体在流体中的运动状态或物体所受到的阻力，以及研究流动流体的流动形式等场合时，工程上常用运动粘度 ν 来表示流体的粘性。动力粘度与运动粘度的换算关系为

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-3)$$

式中 ν ——运动粘度 (m^2/s)

ρ ——流体的密度 (kg/m^3)

运动粘度 ν 的单位曾用施 (S_t) 或厘施 (cS_t) 表示，其换算关系为

$$1 m^2/s = 10^4 S_t = 10^6 cS_t$$

有时用粘度 η 的倒数 ϕ 表示液体粘性的程度或流动的难易程度，即

$$\phi = \frac{1}{\eta} \quad (1-4)$$

式中 ϕ ——流动率或流体化系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s})^{-1}$

二、牛顿型流体

如果流体的粘度 η 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 无关，其剪应力与剪切速率的关系符合式 (1-2) 牛顿粘性定律，这类流体即称为牛顿流体。所有气体、低分子量物质（非聚合物）的液体或溶液、普通的油类、醇类等都属于牛顿型流体，如水、苯、酒精、甘油、汽水、淀粉糖浆、蔗糖和食盐溶液、某些食用油、一些蜂蜜、牛奶等，都可用牛顿液体的粘度 η 来表示其流变特性。

牛顿型流体的粘度 η 与温度、压力的关系，严格说来，粘度 η 是温度和压力的函数，特别是受温度的变化影响很大。但在一般情况下，压力的影响很小，可忽略不计。

气体的粘度随着温度的升高而增大。因为气体的粘性主要由分子的交换而形成，流动快的部分分子跑进与其接触的流动慢的部分中去，力图使全体的流速变成一样而产生的阻力，随着温度的增高、分子热运动的激烈、流层间的分子交换增多而增大。当其压力增高时，分子间的引力作用增强，粘度也将随压力的增高而增大。对于液体则相反，其粘性主要是分子间的引力所引起的，随着温度上升其引力减弱，因而粘度下降。其规律是：粘度越大，温度的影响越大。例如水，每增加 1°C ，其粘度下降 (1~3.5)%，而粘度较高的蓖麻油，温度从 20°C 升至 21°C 时，其粘度下降 8%，粘度更高的沥青，在同样温度间隔下，粘度要下降 30%。对于水以外的绝大多数牛顿液体，粘度与温度的关系可用下式表示：

$$\log \eta = \frac{B}{T} + C \quad (1-5)$$

式中 η ——动力粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

T ——绝对温度 ($^{\circ}\text{K}$)

B 、 C ——常数

一些牛顿液体的 B 、 C 值，见表 1-1。

表 1-1 某些牛顿液体的 B 、 C 值

液体种类	B	C	液体种类	B	C
甲 醇	927	0.9123	丁 醇	1742	-0.3285
乙 醇	1178	0.7467	甲 酸	1255	0.8920
丙 醇	1595	-0.0305	乙 酸	970	0.4399

因此在粘度测定中，要注意保持一定的温度，而且必须准确地求得测定粘度时的温度。

液体的粘度随着压力的增高而增大。对于普通的液体，在接近一个大气压时，每增加一个大气压其粘度的变化率约为 (0.1~0.3)% 左右。

根据式 (1-2)，以剪应力为纵轴，剪切速率为横轴，得牛顿流体特性曲线，如图 1-2 所示。

图 (a) 表示在一定温度和压力下，牛顿流体粘度为恒定值时，其剪应力 τ 与剪切

速率 $\dot{\gamma}$ 的关系为过原点的直线。设此直线和横轴的夹角为 θ ，则

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta \quad (1-6)$$

对于这类流体，测定其任意剪切速率和相对应的剪应力，即可求得粘度值。粘度越高的流体，直线与横轴之间的夹角越大。

图 (b) 为表现牛顿流体特性曲线的另一种方法，即表示在一定剪应力下，粘度 η 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系为一水平线，水平线的高低决定于粘度 η 的大小。由此看出，对于特定的牛顿型流体，无论搅拌程度激烈或缓和，其粘度总是与静止时相同，而不会变化，即在同一搅拌容器内各处的粘度都相等。

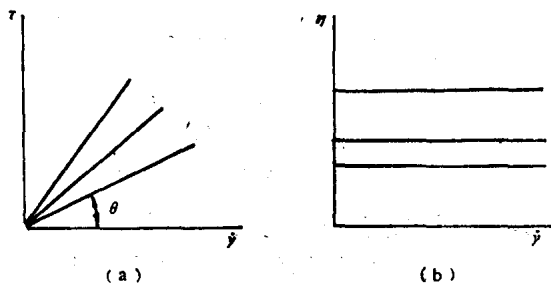


图 1-2 牛顿流体特性曲线

因此，判别一种流体是否属于牛顿流体，只要利用流变仪(或粘度计)测出粘度 η 后，作出 $\tau-\dot{\gamma}$ 和 $\eta-\dot{\gamma}$ 关系曲线，看其关系是否与图 1-2 相符，相同者即为牛顿流体。单组分的液体，浓度很低的、且微粒形状稳定呈球形的悬浮液或溶液，都可视为牛顿液体。

有些牛顿液体的粘度值也相当高，如表 1-2 所示。其中玻璃溶液虽然粘度 η 高达 $10^{11} \text{Pa}\cdot\text{s}$ ，但还是属于牛顿液体。

表 1-2

某些高粘度牛顿液体

液体种类	温度(℃)	粘度(Pa·s)
蔗糖溶液	124.6	1.9×10^4
沥青	0	51.0×10^9
玻璃溶液	575.0	11×10^{11}

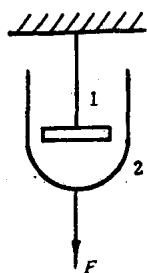


图 1-3 牛顿流体阻尼实验模型

1—活塞 2—贮液容器

牛顿流体实验模型如图 1-3 所示。这种模型由阻尼活塞和充满实验液体的容器所组成，在力 F 的作用下活塞可以在容器内缓慢地上下运动，并受到液体的阻尼。液体粘度越高，对活塞运动的阻尼作用越大；反之，越小。因此，在同样力 F 的作用下，活塞的运动速度就和液体粘度联系起来，并用来模拟牛顿液体的流动。

在力 F 作用下活塞与容器缓慢地进行相对运动时，可设想液体在活塞与容器壁之间所形成的流道中的流动如图 1-1 所示，上平板相当于容器壁，下平板相当于活塞。实验模型同样可得出关系式 (1-2)，即牛顿粘性定律。根据此模型测得的力 F 和剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的大小，可用来测定牛顿液体的粘度值 η 。

为了方便，常用符号 N 代表这种阻尼实验模型。

三、非牛顿型流体

在轻化工、食品、医药等工业中，许多液体不满足式(1-2)牛顿粘性定律，对流体施加的剪应力 τ 和由剪应力所产生的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 之间不成简单的线性关系，而是一个复杂的函数关系，即

$$\tau = f(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (1-7)$$

对于不同的流体，其函数 f 是不同的，即使同一流体，在不同温度和压力条件下，函数 f 也不相同。粘度不是常数，而随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 变化，但还具备流体基本特性的这类流体，称为非牛顿流体。式(1-7)称为流体流变方程(或本构方程)，按照此方程所描述的流变学特性(或剪切应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系)而作出的图形，称为流体的流变图，如图1-4所示。

由于非牛顿型流体流动的复杂性，常采取仿照牛顿粘性定律的方法，对非牛顿流体进行同样的处理。习惯上把非牛顿流体的粘度定义为剪切应力与剪切速率的比值，称为表观粘度(或有效粘度，异常粘度)，即

$$\eta_s = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1-8)$$

式中 η_s ——表观粘度(Pa·s)

一般说来，分子量极大的高分子溶液或混合物，浓度很高的颗粒悬浮液，以及各种乳状液、发酵液都具有非牛顿流体的性质，如高分子聚合物、油漆、涂料、纸浆、奶油、果酱、淀粉、番茄汁、巧克力溶浆、面浆等。通常高粘度液体几乎多数表现为非牛顿型。

非牛顿流体又可分为两大类：一类为稳定流动流体，另一类为非稳定流动流体。稳定流动流体，其剪切应力和剪切速率间的关系不随经受剪应力的时间而改变，这一类有假塑(拟塑)性流体、胀塑(膨胀)性流体。非稳定流动流体，其剪应力和剪切速率间的关系是随经受剪应力的时间而改变，属于这一类的有摇溶(触变)性流体、摇凝(胶变)性流体。

目前在工程应用上对非牛顿型流体的研究，主要集中在稳定性这类非牛顿流体，其中假塑性流体应用最多。

1. 假塑性流体

假塑性流体是轻化、食品、医药等工业中最常见而又最重要的一类流体，特别是一些高分子溶液和悬浮液都具有假塑性特性。这种流体的主要特征是，流体的表观粘度 η_s 随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的增加而呈现出不断下降的趋势，并且不随时间而变化。对于每一个剪应力 τ 值，都有一个确定的剪切速率 $\dot{\gamma}$ ，反之亦然。这种现象称为“稳定”特性。表观粘度随剪切速率的不断增加而降低的现象，称为剪切稀化现象，流变曲线如图1-5所示。图中

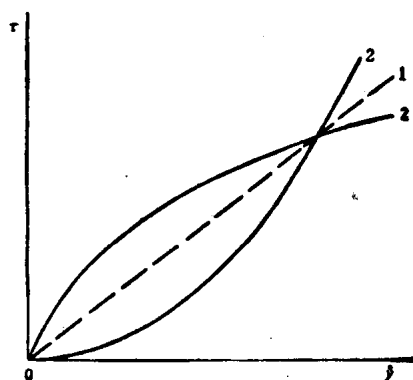


图 1-4 流体的特性曲线
1—牛顿流体 2—非牛顿流体

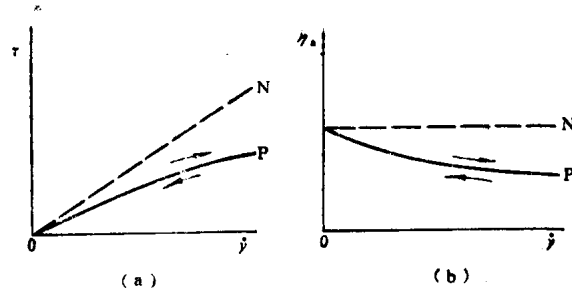


图 1-5 假塑性流体(P)特性曲线
N—牛顿流体

箭头表示在连续实验中剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的增加与下降。

由图1-5看出，假塑性流体的剪应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系不是一条直线，而是一条过原点呈下弯的曲线。当剪切速率 $\dot{\gamma}$ 较低和极高时， τ 与 $\dot{\gamma}$ 都呈近似的线性关系，在这两个极端部分的中间， τ 与 $\dot{\gamma}$ 呈非线性关系。随着剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的增加，曲线的斜率是逐渐减少的，即表观粘度 η_a 是不断下降的。显然，非牛顿流体的表观粘度必须指明是在某一剪切速率范围内的数值，否则就毫无意义。

假塑性流体呈现剪切变稀的原因与流体分子的物理结构有关，并且常常发生在具有高度不对称性的大分子（如长链高分子）流体中，一般常用分子缠结理论解释。静止时，高分子溶液中的大分子链为无规则的线团，彼此缠结在一起，对流动产生很大的粘性阻力。当溶液受到较大剪切应力作用时，卷曲缠结的分子结构，其缠结点被解开，缠结点减少，并被拉直取向，分子或质点沿流动方向排列成线，从而减少了分子或质点层间的相互作用，使得流动的剪应力降低，溶液表观粘度减小。在不同的剪切速率下缠结分子的伸展程度不同，从而溶液表现出不同的表观粘度。随着剪切速率的增大，上述排列愈完善，表观粘度就愈低。当剪切速率大到某一数值，分子排列完全后，表观粘度则保持为常数，如图1-5所示。这时溶液显示出牛顿特性，在恒定温度下粘度为常数。

在轻化、食品等工业中，经常会遇到一些高分子溶液或悬浮液，这些结构复杂的液体大都为非牛顿假塑性液体。一般说来，高分子溶液的浓度愈高或分子愈大，或悬浮液浓度愈高，溶液的假塑性愈显著。如高分子溶液、涂料、醋酸纤维、石膏泥土、油漆、纸浆、果酱、蛋黄酱、番茄酱、酱油、葡萄糖、苹果汁、香蕉酱、羧甲基纤维素水溶液以及一些蜂蜜等均属假塑性液体。

假塑性液体剪切稀化现象对加工过程的影响，一般来说，有利于物料的加工，可改进物料的泵送和灌注性能，并使能量消耗减少。但是，在搅拌混合中，由于在搅拌桨叶附近剪切速率较高，表观粘度大大降低，而罐壁附近剪切速率较低，表观粘度很高，使得物料混匀操作困难。所以，对于这类液体的搅拌操作，在搅拌设备的设计上应采取有效措施，改善搅拌混合效果。

2. 胀塑性流体

胀塑性流体的流变特性，也是不随时间而变化的，对于每一个剪应力 τ 值都有一个确定的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 值，具有“稳定”的特性。但是，流变曲线的变化趋势与假塑性流体相反，即表观粘度 η_a 随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的增加而呈过原点向上弯曲的曲线增加。在一个无限