

液 体 搅 拌

丁绪淮 周理 编著

化 工 学 业 出 版 社

前 言

液体搅拌是许多化工过程的重要组成部分。搅拌效果关系到过程的结果和产品成本。液体搅拌又是理论研究尚不成熟的一种单元操作，这使其长久以来倚重于经验。在不同的使用场所，即使是为了类似的操作目的，也往往采用不同样式的搅拌设备。由于对搅拌器性能缺乏共同的比较基准，因而对于给定的搅拌任务往往难于决定最有效的搅拌手段。在我国，搅拌装置的设计常常成为一项新技术或新工艺能否成功的关键。合理地设计搅拌器，可以减少投资，降低成本，取得满意的过程结果。为此，需要对搅拌理论有相当充分的了解并熟悉迄今人们所积累的丰富经验和重要研究成果。

把液体搅拌作为一种独立的单元操作加以研究，只是最近卅年的事。五十年代前后，根据流体力学和传质原理，应用因次分析和相似理论，奠定了液体搅拌的理论基础。但是，相似论方法不能触及复杂过程的本质，因此始终不能满意地解决搅拌槽系统的设计和放大问题。搅拌理论的进一步发展，取决于对搅拌系统内湍流现象的研究。湍流理论已使人们窥测到混合过程的本质。最近十几年，不断采用新的研究方法和实验技术，使理论研究取得相当的进展。目前虽然还不能建立新的搅拌理论体系，但某些最新的研究成果已为更合理的设计与放大方法提出了有价值的指导原则。

我国尚未出版过关于搅拌的专著。本书的编写目的不仅是比较系统地向读者介绍搅拌的基本理论和研究方法，而且

要反映近年来所取得的进展。同时，尽量提供比较丰富的设计资料，使本书不仅能供教学参考之用，并能对广大科技工作者有一定的参考价值。

本书的讨论范围限于“液体”的搅拌。尽管它也涉及到粘度超过 10^5 厘泊的高粘性液体，但以仍能被搅拌器造成流动者为限；不讨论糊膏状物料的搅拌，因为那是属于不同范畴的另一类操作。

本书内容以机械搅拌为主，因为这种搅拌方法应用最为广泛。但其它搅拌方法在某些特定场合更具优越性，甚至是不可替代的。某些早已使用的混合方法，例如管道内的静力混合，由于新型混合元件的发展和生产过程自动化提出的要求，已成为适合于某些混合操作的新技术。因此编者感到，扼要地介绍其它混合方法也有必要。

由于搅拌器的机械设计不当而发生事故或造成浪费的情况亦不少见。对此，本书亦给予适当的注意。

业已指出，应用液体搅拌的化工操作很多，每种操作都有其特殊问题，但囿于篇幅，凡在不能详述之处，均列举了有关的重要文献并提出文献的题目，以便于读者对特定专题作深入的探讨。限于编者水平，本书错误之处在所难免，还请读者批评指正。

符 号 说 明

本书所用符号，一般均在出处注明，但常用符号则不作重复注释。为便于查阅，兹将各章通用符号的意义说明如下。书中各量采用“米 公斤 秒 (MK S)”单位制。在某些情况下也对同一个量给出目前我国更为熟悉的工程单位。由于MK S 制与SI 制最为接近，这样，完全转变为SI 制亦不困难。

- A_p —— 叶轮的排液截面积, m^2
- A_T —— 槽的横截面积, m^2
- a —— 比表面, $m^2 \cdot m^3$; 或: 热扩散系数, $m^2 \cdot s$
- C —— 叶轮(特别是锚)同槽壁的间隙, m ; 或: 固相浓度, 比重百分数
- c —— 浓度, $kmol \cdot m^3$
- C_p —— 比热, $kcal \cdot kg \cdot ^\circ C$
- D —— 叶轮直径, m
- D_c —— 螺旋管的螺旋直径, m
- D_d —— 分子扩散系数, $m^2 \cdot s$
- D_e —— 气泡的当量直径, m
- d_{Be} —— 各向同性湍动条件下的最大稳定泡径, m
- d_{Bo} —— 上升气泡床的直径, m
- d_0 —— 喷孔直径, m
- d_p —— 颗粒、液滴或气泡的直径, m
- d_s —— 搅拌器轴的直径, m
- d_t —— 螺旋管外直径, m
- d_{st} —— Sauter 平均直径, m
- E —— 萃取级的级效率, $\%$
- F —— 作用力, N
- f —— 轴承摩擦力, N ; 或: 化学反应中的转化率, $\%$
- f_θ —— 混合时间系数

- f_{ϕ} ——滞留量为 Φ 时的 d_{32} 值与 $\Phi=0.1$ 时 d_{32} 值之比
 g ——重力加速度, $m \cdot s^{-2}$
 H ——槽内液体深度, m
 H_c ——螺旋管的盘管高度, m
 H_i ——叶轮距槽底高度, m
 H_s ——悬浮液的悬浮高度, m
 I_s ——被搅拌物系的不均匀强度
 I_T ——翻转率
 K ——指数律流体的稠度指数, $\frac{NS^n}{m^2}$; 或: 总传热系数, $kcal \cdot m^{-2} \cdot C \cdot h$
 K_v ——气体吸收的容量系数, $kmol \cdot h \cdot m^{-3} \cdot at(O_2)$
 k ——比例系数; 或: 热传导系数, $kcal \cdot m \cdot C^{-1} \cdot h$
 k_{Δ} ——传质膜系数, $m \cdot s$
 L ——长度因次; 或: 锚式搅拌器的锚片高度, m
 L_s ——不均匀尺度
 l ——叶轮叶片长度, m ; 或一般地表示某一线度
 M ——质量因次; 或: 被搅拌液体的质量, kg ; 或: 槽内液体通过外换热器的循环速率, $kg \cdot s$
 m ——加热(或冷却)介质的质量流速, $kg \cdot s$
 N ——叶轮转速, $\frac{1}{s}$ (转/秒) 或 $l \cdot min$ (转/分)
 N_c ——达到离底悬浮状态的临界转速, $\frac{1}{s}$
 N_0 ——达到均匀悬浮状态的临界转速, $l \cdot s$
 N_g ——流量数
 n ——气泡数目; 或: 指数律流体的流变性指数
 n_B ——挡板数目
 n_b ——叶片数目
 n_v ——同一轴上的叶轮数目
 P ——搅拌功率, W 或 kW
 P_c ——临界悬浮功率, W
 P_e ——输入被搅拌液体的有效搅拌功率, W

- P_g —— 往液体中通入气体后的搅拌功率, W
 $P_{init.}$ —— 起动功率, W
 P_0 —— 不通气时的搅拌功率, W
 P_s —— 达到悬浮高度 H_s 时的搅拌功率, W
 P_v —— 单位体积液体中的搅拌功率, W/m^3
 ΔP —— 压力降, N/m^2 或 kgf/cm^2
 p —— 螺距, m
 Q —— 体积流量, m^3/s
 Q_1 —— 叶轮排量, m^3/s
 Q_2 —— 槽内液体循环量, m^3/s
 q —— 热流速率, $kcal/h$
 R —— 热阻, $C/kcal \cdot h$; 或: 叶轮的有效作用半径, m
 r —— 反应速率, $kmol/m^3 \cdot s$
 S —— 涡轮搅拌器中水平圆盘的直径, m; 或: 多个叶轮之间的距
 离, m; 或: 表征体系不均匀性的参量
 S_c —— 螺旋管管间距, m
 T —— 搅拌槽的内直径, m; 或: 温度, C
 ΔT_m —— 对数平均温度差, C
 T_b —— 液体主体温度, C
 T_s —— 恒温加热介质温度, C
 TS —— 叶轮速度, m/s
 t —— 被搅拌液体的温度, C
 t_w —— 两相邻叶片通过空间某点的时间间隔, s
 u —— 管内平均流速, m/s
 u_s —— 滑动速度, m/s
 U_0 —— 喷嘴截面处的平均流速, m/s
 u^* —— 摩擦速度, m/s
 V —— 槽内液体体积, m^3 ; 或: 速度, m/s
 V_m —— 悬浮界面以下的液体体积, m^3
 \bar{V} 或 V_m —— 平均流速, m/s
 V_s —— 表观速度, 即单位横截面上的体积流量, m/s
 V_i 或 v_i —— 气泡上升或颗粒沉降的最终速度, m/s

V_{λ} ——漩涡运动速度, m/s

U_0 ——孔处流速, m/s

u_p 和 u_p' ——固体颗粒的真比容和堆比容, m^3/kg

W ——槽内液体质量, kg

W_0 ——挡板宽度, m

W ——叶片宽度, m

x ——位置坐标; 或: 混合斜率; 或: 液-液不均匀体系中某一相的体积分数;

y ——液-液不均相体系中某一相的体积分数

ΔZ ——打漩深度, m

希腊字母

α ——对流传热膜系数, $kcal/m^2 \cdot C \cdot h$; 或: 叶片与旋转平面之间的夹角, 度

β ——功率关联式中的参数; 或: 叶片的后弯角, 度; 或: 萃取中的分配系数,

γ ——重度, kgf/m^3

$\dot{\gamma}$ ——槽内平均剪切速率, $1/s$

δ ——厚度, m

ε ——单位体积液体中的能量弥散速率, $W/m^3 \cdot s$; 或: 单位质量液体中的能量弥散速率, $W/kg \cdot s$; 或: 液体体积分数

ζ ——颗粒在流体中运动的阻力系数

η ——效率, %; 或: 塑性流体的刚性系数, $kg/m \cdot s$

θ ——时间, s; (或: 最终混合时间; 或: 每米液深中的两相接触时间等)

λ ——漩涡尺寸, m; 或: 管内流动 (Darcy) 阻力系数

λ_0 ——最小漩涡尺寸, m 或 μm

μ ——粘度, $kg/m \cdot s$; 或: 流体主体粘度, $kg/m \cdot s$

μ_a ——表观粘度, $kg/m \cdot s$

μ_{cp} ——以厘泊为单位的粘度值, Cp

μ_w ——壁温下的粘度值, $kg/m \cdot s$

ν ——运动粘度, m^2/s

ρ ——密度, kg/m^3

ρ_m —— 平均密度, kg/m^3

σ —— 表面张力, N/m

τ —— 剪应力, N/m^2 ; 或: 时间常数, s

τ_y —— 塑性流体的屈服值, N/m^2

Φ —— 功率函数,

ϕ —— 气体滞留量; 或: 分散相的体积分数。

ω —— 角速度, 弧度/s

下标

a —— 表观值

c —— 连续相; 或: 临界状态; 或: 螺旋管

d —— 分散相

e —— 有效值; 或: 当量值

g —— 通气状态

i —— 内侧; 或: 叶轮

j —— 夹套

l —— 液相

m —— 平均

max —— 最大值

min —— 最小值

o —— 有机相; 或: 初始状态; 或: 孔口位置

s —— 固相; 或: 垢层

w —— 水相; 或: 壁面位置

λ —— 漩涡

1 —— 初始状态

2 —— 终了状态

本书中的准数

$$\text{Re} = \frac{D^2 N \rho}{\mu} \text{ 或 } \frac{D^2 N \rho}{\mu_s}, \text{ 叶轮雷诺数}$$

$$\text{Re}_\lambda = \frac{V_i \lambda}{\nu}, \text{ 漩涡雷诺数}$$

$$\text{Re}_p = \frac{d_p u_s}{\nu}, \text{ 颗粒雷诺数}$$

目 录

前言

符号说明

第一章 叶轮搅拌器与流体运动特性.....	1
✓ 第一节 概述.....	1
一、搅拌、混合与混匀.....	1
二、搅拌目的.....	2
三、混合机理.....	3
四、搅拌程度.....	5
第二节 搅拌槽装置.....	8
一、叶轮.....	8
二、搅拌槽.....	17
三、打漩现象与挡板.....	18
四、导流筒.....	23
五、搅拌槽的几何特性.....	25
六、标准搅拌槽.....	29
第三节 搅拌槽内液体的流动特性.....	30
一、叶轮的排量与流体循环量.....	30
二、搅拌轮的压头.....	35
三、排液量和压头之比 (Q/H).....	36
四、流体剪切速率及其在槽内的分布.....	38
五、叶端速度.....	41
六、叶轮雷诺数.....	42
第四节 搅拌槽中的湍动参数.....	43
一、什么是湍流.....	44
二、湍动强度与湍动尺度.....	46
三、最小漩涡尺寸.....	47
四、搅拌槽中能量弥散速率的分布.....	50
第二章 搅拌功率.....	52

第一节	功率关联式	52
第二节	功率曲线	54
第三节	功率曲线的应用	60
第四节	形状因子对搅拌功率的影响	65
第五节	固液悬浮系统的搅拌功率	74
一、	关于悬浮状态的定义	74
二、	临界悬浮条件	75
三、	完全均匀悬浮条件	80
第六节	气-液分散系统的搅拌功率	84
一、	通入气体引起的功率降低	84
二、	气体的分散程度	86
三、	达到指定分散程度所需要的搅拌功率	87
四、	达到指定的两相接触时间所需要的搅拌功率	89
五、	“再分散点”的确定	90
第七节	液-液分散系统的搅拌功率	93
一、	液-液分散物系平均物性的计算	94
二、	液-液系统的分散特性	95
三、	达到指定的分散程度所需要的搅拌功率	96
第八节	电动机功率的决定	100
一、	最大功率, P_{\max}	100
二、	起动功率, P_{init}	102
三、	机械效率与电流效率	102
第九节	搅拌功率的测量	103
一、	测量方法	103
二、	功率测量中的误差	106
第三章	搅拌槽中的传热	107
第一节	传热方式	107
第二节	对流传热系数关联式	109
一、	有内螺旋管的搅拌槽	111
二、	有外夹套的搅拌槽	113
三、	以纵向盘管作挡板的搅拌槽	115
四、	搅拌槽几何构形对传热系数的影响	116
五、	非均相物系的传热系数	118

第三节	总传热系数	120
第四节	加热(或冷却)时间的计算	121
第四章	搅拌效果	133
第一节	互溶液体的混匀	133
一、	均匀性指数	133
二、	混合时间	134
三、	最终混合时间方程式	135
四、	部分混合时间	142
五、	浓度波动幅度的衰减模型	146
第二节	固液两相间的传质	148
一、	传质过程机理	149
二、	传质系数关联式	150
第三节	液-液两相间的传质	159
一、	液-液两相间的传质速率	159
二、	搅拌速度对萃取设备生产能力的影响	162
第四节	充气与吸收	164
一、	容量系数	164
二、	传质系数	167
三、	气体引入方式、叶轮位置与最小搅拌速度	169
第五节	搅拌槽反应器	173
一、	搅拌对过程速度的影响	173
二、	连续流动串联搅拌槽系统中槽数的决定	175
第六节	搅拌效果的测量	180
一、	混合时间的测量方法	180
二、	非均相搅拌系统中泡、滴直径的测量	183
三、	搅拌槽内速度分布的测定	185
第五章	非牛顿流体与高粘性物料的搅拌	186
第一节	流体的流变性	186
一、	牛顿流体	188
二、	假塑性流体	188
三、	胀塑性流体	188
四、	塑性(Bingham)流体	189
五、	屈服假塑性流体	189

六、指数律流变性方程	190
第二节 非牛顿流体搅拌参数的计算	191
一、由功率曲线计算搅拌功率	191
二、既适用于牛顿流体也适用于非牛顿流体的功率的计算法	195
三、混合时间	205
四、传热系数	206
第三节 粘性物料的混合	208
一、混合机理	208
二、高粘性液体搅拌器	209
三、粘性液体搅拌器的特性	211
四、各种粘性流体混合器性能的比较	224
第四节 操作条件下粘度的测量	228
一、同轴圆杯型粘度计	228
二、无限流体中转鼓型粘度计	235
三、锥盘式粘度计	236
第六章 其它搅拌方法	238
第一节 气流搅拌	238
一、鼓泡器	239
二、巴秋卡槽	249
第二节 射流混合	264
一、流型与混合机理	264
二、射流现象	265
三、槽内的射流混合	269
四、径向壁面射流用于对固体颗粒的悬浮	272
第三节 管道混合	275
一、管道混合方法	275
二、管道混合元件与设计问题	276
三、三通混合	278
四、工业用内部构件混合器	279
五、静力混合器	281
第七章 叶轮搅拌器的放大与机械设计	290
第一节 搅拌装置的选择与实验	291
一、搅拌装置的选择	291

二、小型实验的组织.....	294
第二节 实验结果的放大.....	301
一、放大原理.....	301
二、功率数据的放大.....	304
三、工艺过程结果的放大.....	306
第三节 各种搅拌操作的放大问题.....	310
一、混匀.....	310
二、传热与传质.....	313
三、固-液悬浮系统.....	324
四、液-液分散系统.....	326
五、气-液分散系统.....	327
六、搅拌槽反应器.....	328
七、放大时搅拌参数的调整.....	329
第四节 叶轮搅拌器的机械设计.....	332
一、叶轮.....	332
二、轴.....	337
三、档板的厚度.....	345
参考文献.....	346

第一章 叶轮搅拌器与流体运动特性

本章叙述对搅拌作专题讨论时所需要的基础知识，主要介绍有关术语和概念、搅拌槽装置以及作为一切化工单元操作基础的装置内的流体运动特性。

第一节 概 述

一、搅拌、混合与混匀 [6.7.26. 27]

为便于讨论，首先要弄清有关术语的不同含义。“搅拌”与“混合”绝不是同义词。搅拌 (Agitation) 是指使槽内物料形成某种特定方式的运动 (一般在槽内作循环流动)，混合 (Mixing) 是指使物相不相同的两种或两种以上物料产生均匀的分布。某种单一物相的物料只能被搅拌而谈不上被混合，例如，在往搅拌槽内的冷水中加入某些热水或其它物料 (例如某种酸液或油类或固体粉末) 之前，冷水只是被搅拌，但在这些状态不同的物料加入之后，在搅拌过程中就伴有不同物料的混合过程了。

搅拌的着眼点在于槽内物料的运动方式和激烈程度，以及这种运动状况对给定过程的适应性，混合的着眼点在于被混合物料所达到的均匀程度。搅拌作用的强弱和效果常常用混合的均匀程度及达到指定均匀程度所需时间来衡量。

在搅拌文献中还常常提到“混匀”(Blending)。系指旨在消除均相物料系统中的温度差或浓度差的搅拌操作，因此是

特定条件下的混合。

某些教科书常将搅拌与混合并提，作为一个单元操作的名称。其实，没有搅拌，便不可能进行有实际意义的混合（气体除外）。混匀与混合可能是搅拌的目的，但不是唯一的目的（见下）。编者认为，从操作的实质是促进其它过程的一种手段来看，还是把这一单元操作叫做“搅拌”为好。

二、搅 拌 目 的

用到搅拌的化工过程有：

- （1）互溶液体的混匀；
- （2）固体在液体中的悬浮；
- （3）气-液接触；
- （4）液-液（不互溶液体）接触；
- （5）传热；
- （6）化学反应。

在这些操作中进行搅拌的目的是：

- （1）产生均匀的组成；
- （2）促进化学的或物理的反应。除各类化学反应之外，搅拌可促进像溶解、传热、气体吸收、吸附、萃取和絮凝等操作。
- （3）改变物相关系。其中包括在浮选操作中使气体分散，在萃取操作中使不互溶的液体分散，在结晶过程中控制晶粒的成长等。

有时，一个搅拌器同时起着几种作用。例如，在液体的催化加氢搅拌槽中，搅拌器一方面要使固体催化剂颗粒保持悬浮状态，另一方面要促进通过换热面移除反应热的传热过程，同时也要使气体在液相中均匀分散。针对不同的搅拌目的，选择恰当的搅拌器构型和操作条件，是设计者的重要任务。

三、混 合 机 理

把不同气体混到一起，很快便形成一个不同分子均匀分布的混合物。这个混合过程的机理是气体的分子扩散，即是气体分子相对运动的结果。可是液体的分子扩散速率却很小，单靠分子扩散进行液体的混合没有多大实际意义。在搅拌槽中，通过叶轮的旋转把机械能传送给液体物料，造成液体的强制对流，混合过程正是在强制对流作用下的强制扩散过程。

强制扩散有两种方式，即主体对流扩散和涡流扩散^[9, 28, 29]。搅拌轮把动量传给它周围的液体，产生一股高速液流，这股液流又推动周围的液体，使全部液体在槽内流动起来（良好的设计不会产生停滞液体）。这种大范围内的循环流动称为“宏观流动”，由此产生的全槽范围的扩散叫做主体对流扩散。当叶轮产生的高速液流在静止的或运动速度较低的液体中通过时，处于高速流体与低速流体分界面上的流体受到强烈的剪切作用，因而在这些地方产生大量漩涡。这些漩涡迅速向周围扩散，一方面把更多的液体夹带到这股作宏观流动的液流中，同时形成局部范围内物料快速而紊乱的对流运动。这种漩涡运动被称为搅拌槽内的“微观流动”，而由漩涡运动造成的局部范围内的对流扩散称为涡流扩散。叶轮叶片对流体的直接剪切作用当然也会造成强烈的漩涡运动。

实际混合过程是三种扩散机理的综合作用。^[30, 31] 主体对流扩散、涡流扩散和分子扩散的作用范围依次减小，但主体对流扩散只能把不同物料成较大“团块”地混合起来，而通过这些大“团块”界面之间的涡流扩散，把不均匀的程度迅速降低到漩涡本身的大小。可是，最小的漩涡也比分子大得多，因此主体对流扩散和涡流扩散都不能达到完全的均匀混合，即不能

使被搅拌物料的全部分子呈完全均匀的分布状态。完全均匀的混合状态只有通过分子扩散才能达到^[32]。因此，主体对流扩散和涡流扩散只是进行“宏观混合”，分子扩散才能进行“微观混合”^[33]。宏观混合的结果大大增加了分子扩散的面积，并减小了扩散距离，因此提高了微观混合的速度（图1）。

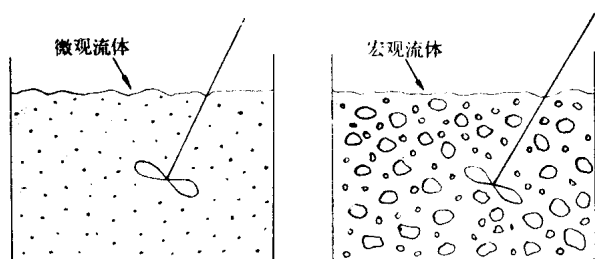


图 1-1 微观混合与宏观混合

虽然许多搅拌操作并不要求达到微观的均匀性，但是对于化学反应系统，物料组成的微观均匀性是很重要的。如果没有微观混合，化学反应只能发生在流体“团块”的表面上，同时，如果这种不均匀的程度不迅速降低，就不可避免地发生反应物的局部浓集，其后果通常是发生本来希望避免的副反应。

Hughes从湍流理论导出，在最小漩涡内通过分子扩散达到完全混合均匀的时间同流体粘度的 $3/2$ 次方成正比^[32]。这样，在化学反应系统中，对于像水这样的低粘度液体，宏观混合速度可能成为搅拌槽反应器性能的限制因素，但在处理粘性液体时，微观混合速度会成为限制因素。这两种情况下所用的搅拌器应具有不同的特点和性能。

对于宏观混合，涡流扩散的混合速度比主体对流扩散快得