

混合设备设计

王凯 冯连芳 著



机械工业出版社

前 言

混合操作广泛应用于化工、石油、水处理、食品、造纸、冶金等行业，是应用最广的化工单元操作之一，深受广大工程技术人员的重视。化学工业出版社和中国石化出版社曾出版过日本永田进治著的《混合原理和应用》、美国欧休著的《流体混合技术》和英国哈贝恩等著的《工业中的混合过程》的译本。虽然这些译本出版在 80 至 90 年代初，而其原著出版在 70 年代和 80 年代，反映的是国外 60 至 70 年代的技术，其内容虽不乏经典之说，但显得陈旧，未反映近十多年来国内外混合技术及设备的进展。

笔者从 70 年代中期起，由于设计和放大搅拌槽式聚合反应器的需要，对混合技术产生浓厚的兴趣，二十多年来对混合技术的研究从未间断过，曾与许多设计院和化工、石化企业合作，成功地设计和放大了很多搅拌槽式反应器，近年来又将研究领域从流体混合扩展至粉体混合。值此即将退休之际，将以往的研究工作进行整理，介绍给读者。

本书定位于应用科学技术书籍，因此对当前还不便付之实用的有关微观混合理论和混合模型忍痛割爱，而着重用大量图片介绍当代新型的混合设备结构，并详细介绍混合设备的设计计算和放大方法。作者曾在浙江大学出版社和中国石化出版社出版过《非牛顿流体的流动、混合和传热》与《工业聚合反应装置》两本专著，其中有很多混合技术的内容。将本书与前两本书比较，会发现对其中有关混合技术及设备的部分做了大幅度的扩充和刷新，篇幅也增加了一倍以上。这些新增加的内容都来自近十年间与冯连芳合作科研和培养研究生所获基础研究成果。其中特别值得一提的有：于鲁强关于用计算流体力学研究刮壁式搅拌设备的硕士和博士论文、毛德明关于用激光多普勒测速仪研究流场的硕士和博士论文、马青山关于研究粉体混合的博士论文、侯治中关于研究气-液搅拌设备的硕士论文、董纪月和刘焯关于剖析国外新型搅拌设备的硕士论文以及在读博士研究生王嘉骏有关高粘液体搅拌器的功耗和搅拌设备专家系统的研究内容。顾雪萍三年多来与笔者合作进行科研和教学的成果也一并写入本书中。

本书分上、下两篇。上篇一方面介绍混合技术及设备的基础知识，同时用大量图片介绍各种新型混合设备的结构，起到开拓眼界的作用，并介绍混合设备选型的原则。下篇主要介绍设计混合设备用的计算公式和设计放大方法，并举出了一些计算和放大过程的实例。特别是下篇第 13 章中介绍的搅拌设备的非几何相似放大法，虽篇幅不多，却是凝集了笔者多年来设计和放大搅拌设备的经验。在下篇第 7 章后半部分和第 14 章还简要地介绍了当前混合设备研究的两个前沿领域，即计算流体力学在混合设备开发中的应用和搅拌设备的计算机辅助设计。由于作者的知识水平有限，对于这两个前沿领域的叙述只是肤浅的，希望能起到抛砖引玉的作用。

本书的上篇和下篇第 5 章至第 11 章以及第 13 章由王凯执笔，下篇第 12 章及第 14 章由冯连芳执笔。

作者对机械工业出版社大力促成本书的写作并资助出版深表敬谢。

浙江大学聚合反应工程国家重点实验室

王凯 1999 年 12 月

本书所用主要符号表

英 文 字 母

A_t	搅拌槽横截面积
\dot{a}	比表面积; 摩擦力参数 [下篇式 (8-47) 中]
b	叶片宽; 摩擦力参数 [下篇式 (8-47) 中]
C	搅拌叶轮离槽底的距离
C_D	阻力系数
C_e^*	比混合能
C_0	粉体的屈服应力
c_p	比定压热容
D	槽内径
D_e	当量直径
D_{\max}	最大稳定液滴直径
D_{\min}	最小稳定液滴直径
D_{set}	能保持悬浮的最大液滴直径
D_{32}	液滴体表平均直径
d	叶轮直径
d_B	气泡体表平均直径, 液滴的平均直径
d_p	粒子直径
d_{50}	粒子的中位直径(累计粒子个数为 50%时粒子的直径)
E_A	凝并能
E_D	湍动能
E_R	内聚能与分裂能之比
E_S	表面能
E_T	分裂能
E_V	粘性能
$E(\kappa)$	三维能谱函数
F	传热面积; 粒子的投影面积
g	重力加速度
H	槽内液体深度; 粒子的高; 粉体物料高度
H_e	压头
H_0	卧式粉体搅拌槽中叶片端部离槽底的距离

h	表面传热系数
h_c	被搅流体对内冷管壁的表面传热系数
h_i	被搅流体对叶轮表面的表面传热系数
h_j	被搅流体对槽壁的表面传热系数
K	总传热系数
K_b	挡板系数
K_e	弹性系数
K_L	液相传质系数
$K_L a$	液相容积传质系数
K_p	功率常数
K_{psu}	稠度系数
K_y	宾汉流体的屈服应力
k	热导率
k_s	Metzner 常数
L	两叶轮的间距；粒子的长轴径
L_B	刮板长度
M	粉体的混合度
m	粘弹性流体的流变参数
N	搅拌转速
N_c	临界转速；循环次数
N_{cd}	临界分散转速
N_{cr}	容器回转式粉体混合设备的临界转速
N_f	泛点转速
N_{fr}	平均径向脉动排量系数
N_{fz}	平均轴向脉动排量系数
N_T	翻转次数
n	搅拌粉体时叶轮的个数；幂定律中之流变参数
n_B	单层叶轮上的刮板数
n_b	挡板数
n_p	单个叶轮上的叶片数
n_s	叶轮的层数
P	搅拌功率
P_A	通气时气体膨胀功
P_{AV}	通气时单位装液量中的气体膨胀功
P_c	临界搅拌功率
P_G	通气时的搅拌功率
P_V	单位体积搅拌功率
P_{vc}	临界单位体积搅拌功率

P_0	不通气时的搅拌功率
p	螺距
Q	热流率
Q_c	循环流量
Q_d	排出流量
Q_G	通气速率
Q_i	诱导流量
R	理想气体常数
S	截面积
S_w	粒子的比表面积
T	温度; 扭矩
T_w	壁温
t	反应时间
u	流体流速; 测粉体流动性时转子运动速度
u_A	槽横截面上的表观流速
u_s	粒子沉降速度
u_{ss}	粒子在密集状态下的沉降速度
u_0	特征速度 [下篇式 (8-47) 中]
V	槽容积; 粒子的体积; 搅拌槽中粉体的体积
V_L	液体体积
V_0	粉体搅拌槽体积
v_G	表观气速
v_i	气泡上升终端速度
W	夹套环隙宽度; 刮板宽度; 粒子的短轴径
W_b	挡板宽
W_V	单位体积混合能
w	搅拌粉体的桨式叶片的宽度

特 征 数

Fr	弗劳德数 ($Fr = dN^2/g$)
Gd	粉体加料数 [$Gd = (H - H_0)/w$]
Gr	格拉晓夫数 ($Gr = D_c^3 \rho^2 g \beta \Delta T G / \eta^2$)
He	赫斯德姆 (Hedström) 数 ($He = K_y \rho d^2 / \eta_{pl}$)
N_A	通气数 ($N_A = Q_G / Nd^3$);
N_P	功率数 ($N_P = P / \rho N^3 d^5$)
N_{qc}	循环量数 ($N_{qc} = Q_c / Nd^3$)
N_{qd}	排量数 ($N_{qd} = Q_d / Nd^3$)

Nu	努塞尔数($Nu=hD/k$)
Pr	普朗特数($Pr=c_p\eta/k$)
Re	搅拌雷诺数($Re=d^2N\rho/\eta$)
Re'	计算流场时用的搅拌雷诺数 ($Re'=\Omega R^2\rho/\eta$)
Re^*	广义搅拌雷诺数($Re=d^2N\rho/\eta_a$)
Re_b	用塑性粘度表示的雷诺数 ($Re_b=d^2N\rho/\eta_{pl}$)
Re_f	刮壁式搅拌槽中的液体轴向流动雷诺数 ($Re_f=du\rho/\eta$, u 为平均轴向流速)
Re_p	粒子的沉降雷诺数 ($Re_p=d_p U_s\rho/\eta$)
r	粘弹性流体的弹性与惯性之比 ($r=Wi/Re$)
Su	速度数 ($Su=u^2/gw$)
T_m	混合时间数 ($T_m=\theta_m N$)
V_{is}	粘度比 (η_b/η_w)
We	韦伯数($We=\rho N^2 d^3/\sigma$)
Wi	韦森伯格数($Wi=\sigma_t N/\eta_a$)

希腊字母

α	后掠角; 刮壁角; 粉体的铲角; 气体再循环系数
β	体积膨胀系数; 粉体的下落角
γ	粉体的压实系数
γ_e	弹性系数
$\dot{\gamma}$	切应变速率
ΔT	传热温差
$\Delta\rho$	两相密度差
δ	搅拌粉体用叶轮的上扬系数 (叶片式 $\delta=1$, 螺带式 $\delta=0$); 固体层厚度; 涡直径
ε	单位流体质量中的平均能量耗散; 粉体物料的空隙率
η	流体的切应变粘度
η_a	表观粘度
η_b	本体温度下的粘度
η_c	连续相粘度
η_d	分散相粘度
η_{pl}	塑性粘度
η_r	相对粘度
η_{sp}	比粘度
η_w	壁温下的粘度
η_{00}	溶剂的粘度
θ	叶片倾角
θ_m	混合时间

κ	波数
λ_0	特征长度
ν	运动粘度
ρ	密度
ρ_a	操作状态下空气密度
ρ_p	粒子的密度
σ	表面张力；法向应力
σ_1	第一法向应力系数
τ	切应力；平均停留时间
τ_c	作用到液滴单位表面积上的力
τ_d	液滴中流体的粘性应力
Φ	持气率；加料系数 ($\Phi=V/V_0$)
ϕ	粉体的内摩擦角
φ	分散相体积分数
φ_{av}	全槽固相平均体积分数
φ_c	连续相体积分数
φ_d	液液分散时分散相体积分数
φ_v	固相体积分数
φ_{vc}	固相最大体积分数

目 录

前言

本书所用主要符号表

上篇 混合设备概论

第 1 章 搅拌设备的类型	3
1.1 槽体	4
1.2 槽与轴的相对位置	5
1.3 叶轮	6
1.4 附件	7
1.5 传动装置	12
参考文献	16
第 2 章 常用搅拌设备的选型	17
2.1 搅拌对象的性质	17
2.2 叶轮的剪切—循环特性	20
2.3 流动状态与叶轮性能的关系	23
2.4 几种常用叶轮的特性	25
2.5 超高粘流体混合设备	30
2.6 搅拌的目的	32
2.7 叶轮的选型	34
参考文献	36
第 3 章 搅拌技术的进展	37
3.1 新型搅拌设备	37
3.1.1 新型轴向流搅拌叶轮	38
3.1.2 新型宽粘度域搅拌叶轮	39
3.1.3 新型卧式搅拌设备	40
3.1.4 处理高粘流体的搅拌设备	42
3.1.5 其它新型搅拌设备	45
3.2 流场的测量和计算流体力学	46
3.3 搅拌设备的机电一体化和智能化	47
3.4 搅拌设备选型和设计的软件	47
参考文献	48

第 4 章 固体混合设备	49
4.1 固体粒子概述	49
4.2 混合度	50
4.3 混合机理	52
4.4 固体混合设备	52
4.4.1 容器回转型	53
4.4.2 容器固定型	56
4.4.3 常用固体混合设备的规格	60
4.5 固体混合技术的进展	62
4.5.1 精细混合	62
4.5.2 精细混合技术与设备	63
参考文献	66

下篇 混合设备的设计和放大

第 5 章 搅拌设备中的流场	69
5.1 搅拌设备流场概述	69
5.2 流场测量方法简介	70
5.2.1 照相法	71
5.2.2 激光多普勒测速仪法	72
5.2.3 流场数值模拟	77
5.3 操作条件和流体的流变行为对流型的影响	78
5.3.1 操作条件对流型的影响	78
5.3.2 流体的流变行为对流型的影响	78
5.4 从流场信息优化搅拌叶轮设计和操作	81
5.4.1 开发新型轴向流叶轮	81
5.4.2 高粘液体用叶轮的设计和操作的优化	82
5.4.3 多层叶轮的设计优化	82
参考文献	89
第 6 章 均相搅拌设备的功耗、排量 and 混合	90
6.1 湍流域常用叶轮的特性参数	90
6.1.1 搅拌功率和排量	91
6.1.2 排量、循环量和混合的关系	105
6.2 层流和过渡流域常用叶轮的特性参数	111
6.2.1 搅拌器在层流和过渡流域的功耗和混合概述	111
6.2.2 常用叶轮搅拌高粘流体时的功耗	116
6.2.3 高粘流体用叶轮的排量、循环量和混合	131
6.2.4 三种新型搅拌叶轮的功耗和混合	132

参考文献	136
第 7 章 搅拌槽的传热	138
7.1 搅拌槽传热概述	138
7.2 热载体侧的表面传热系数	139
7.2.1 管中流体对管壁的表面传热系数	139
7.2.2 夹套中热载体对槽壁的表面传热系数	140
7.3 被搅液侧的表面传热系数	142
7.3.1 牛顿流体的表面传热系数	142
7.3.2 非牛顿流体的表面传热系数	145
7.3.3 三种新型搅拌器的表面传热系数	153
7.4 高粘流体的刮壁式传热	155
7.4.1 刮壁式传热概论	155
7.4.2 刮板固定方式、形状和材料	157
7.4.3 刮壁式搅拌器的流型	158
7.4.4 刮壁式搅拌器的功耗和传热	161
7.5 CFD 在优化刮壁式搅拌设备中的应用	163
7.5.1 用 CFD 模拟搅拌槽流场的概况	163
7.5.2 流场的模拟	165
7.5.3 刮壁式搅拌器的功耗及切应变速率分布	168
7.5.4 刮壁槽内的传热过程的解析	170
7.5.5 结语	176
参考文献	177
第 8 章 固体粒子的性质和测量	179
8.1 固体粒子概述	179
8.2 固体粒子的粒径及粒径分布	180
8.2.1 粒径的表示方式	180
8.2.2 粒径分布	182
8.2.3 平均粒径	187
8.2.4 粒子的形态和形态系数	188
8.2.5 沉降速度	192
8.3 颗粒间的附着力	195
8.3.1 水合作用力	195
8.3.2 静电结合力	197
8.3.3 范德华结合力	197
8.3.4 各种结合力的相互作用	197
8.4 固体粒子的流动性、泛滥性和流态化性的测量	198
8.4.1 固体粒子流动性和泛滥性的测量方法	198
8.4.2 固体粒子的流态化特性	210

参考文献	211
第9章 粉粒体混合设备	212
9.1 粉粒体混合设备的形式和操作条件的决定	212
9.1.1 混合设备形式的选择	212
9.1.2 影响混合的因素	213
9.2 粉粒体混合设备的功耗	214
9.2.1 容器回转型混合机的功耗	214
9.2.2 容器固定型混合机的功耗	216
参考文献	232
第10章 固-液搅拌设备	233
10.1 固-液悬浮的判据	233
10.1.1 以槽底未悬浮固体量作判据	234
10.1.2 以槽内悬浮液的均匀程度作判据	234
10.1.3 其它有关悬浮程度的判据	234
10.2 固-液悬浮搅拌设备	235
10.2.1 搅拌器	235
10.2.2 浆径与槽径之比	239
10.2.3 槽底形状	240
10.2.4 叶轮的离底高度	242
10.2.5 挡板和导流筒	243
10.3 临界转速	243
10.3.1 完全离底的临界转速	243
10.3.2 完全均匀悬浮	247
10.4 物料性质对固-液悬浮的影响	248
10.4.1 液相粘度的影响	248
10.4.2 固相含量的影响	248
10.4.3 粒子大小的影响	249
10.5 固-液悬浮搅拌槽的放大	249
10.6 晶析和细粉在高粘流体中的均匀分散	249
10.6.1 晶析设备	249
10.6.2 细粉在高粘流体中的分散	251
参考文献	253
第11章 液-液搅拌设备	254
11.1 液-液搅拌设备	255
11.2 液-液分散的机理	255
11.3 无表面活性剂存在时对平均滴径和滴径分布的理论分析	256
11.3.1 有关各向同性湍流的基础知识	256

11.3.2	关于平均滴径和滴径分布的解析	260
11.4	液-液分散的实验研究结果	264
11.4.1	临界转速	264
11.4.2	逆分散操作	267
11.4.3	平均滴径和滴径分布	267
11.5	有表面活性剂存在下的液-液分散	272
11.6	液-液分散液的密度和粘度	272
11.7	乳液聚合和悬浮聚合反应器	272
11.7.1	悬浮聚合和乳液聚合中的液-液分散	272
11.7.2	悬浮聚合和乳液聚合反应器	274
	参考文献	278
第 12 章	气-液和气-液-固搅拌设备	280
12.1	标准槽中的气-液分散和功耗	280
12.1.1	气-液分散状态和临界分散转速	280
12.1.2	通气时的搅拌功率	283
12.1.3	比表面积、持气率和气泡平均直径	287
12.2	叶轮形式与分布器对气-液分散的影响	291
12.2.1	叶轮形式的影响	291
12.2.2	气体分布器的影响	295
12.3	用于气-液分散的多层搅拌器	296
12.4	气-液系的传热	299
12.5	气-液-固三相体系	303
12.5.1	临界转速	303
12.5.2	搅拌功率	303
12.5.3	气含率、比表面积、传质系数和传热系数	303
12.5.4	搅拌器和气体分布器	303
	参考文献	304
第 13 章	搅拌槽的放大技术	307
13.1	搅拌槽式反应器放大技术概述	307
13.2	几何相似放大法	307
13.2.1	几何相似放大法概要	307
13.2.2	不同搅拌目的时的放大准则	308
13.2.3	采用不同的放大准则时, 混合参数的变化规律	310
13.2.4	采用不同放大准则时, 传热系数的变化规律	311
13.2.5	由实验确定几何相似放大准则	312
13.3	非几何相似放大法	313
13.3.1	非几何相似放大法概要	313
13.3.2	搅拌槽式聚合反应器的非几何相似放大实例	313

13.3.3 非几何相似放大法的技术要点	319
13.4 关于数学模型放大	322
参考文献	325
第 14 章 搅拌设备的计算机辅助设计	326
14.1 引言	326
14.2 搅拌设备常规设计方法	326
14.2.1 搅拌设备设计过程	326
14.2.2 搅拌设备的选型	328
14.2.3 搅拌设备的化学工程设计	331
14.2.4 搅拌设备的机械设计	333
14.3 专家系统及其化工应用	334
14.3.1 专家系统介绍	334
14.3.2 专家系统的结构	335
14.3.3 专家系统的开发	336
14.3.4 专家系统在化工过程设计中的应用	339
14.4 搅拌设备智能设计系统构成	342
14.4.1 系统的功能和设计覆盖范围	342
14.4.2 系统的基本结构	343
14.5 搅拌器预选型决策分析	347
14.5.1 AHP 选型决策过程	347
14.5.2 知识处理	351
14.5.3 系统实现	354
14.5.4 AHP 方法分析讨论	358
附录 搅拌设备设计用户条件表	360
参考文献	361

上篇 混合设备概论

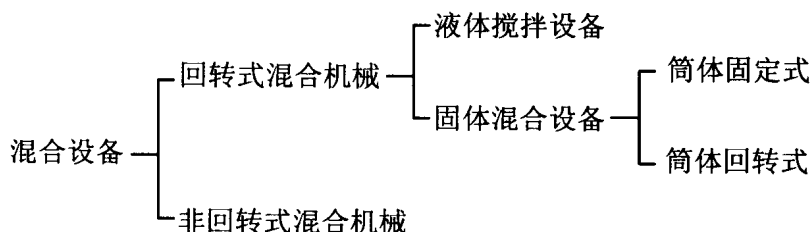
混合设备是一种量大面广、品种繁多的机械产品，在化工、冶金、医药、造纸、化妆品、涂饰材料、食品、饲料及废水处理等行业中都得到广泛的应用，尤以化学工业中使用最多。

混合过程是一个使体系内物料的不均一度不断降低的过程。从相状态考虑，被混物料有气-气、液-液、固-固、气-液、气-固、固-液、气-液-固等七种情况。由于气体与气体的混合非常方便，只有需要极其高速的混合的场合才需要对气-气混合器进行特殊设计。气-固体系在工程上常属于干燥、流态化的范畴。本书对气-气、气-固体系不予讨论。

混合机械可分成两大类，即回转式混合机械和非回转式混合机械。又可根据被操作物料的相状态把回转式混合机械分成液体搅拌设备和固体混合设备。回转式混合机械中，液体搅拌设备都使用一个旋转的叶轮来混合液态物料，液体中也可含有一定量的气体或固体。对液体搅拌设备来说，盛物料的容器绝大多数是固定的，称作搅拌槽。固体混合设备中，大部分与液体搅拌设备同样，容器筒体是固定的，靠一个旋转的叶轮进行混合；另一部分是筒体回转式的。液体搅拌设备和筒体固定的固体混合设备的形式和结构十分相似，两者没有明显的界线。例如，用于混合液体的螺带式搅拌器，也常用于固体与固体，或大量固体与少量液体的混合；而作为粉体高效混合设备的锥形行星混合机，也是高粘液体的高效混合设备。近年来，国外更开发出一种全相状态(All Phases)搅拌机，它对粘性液体和粉体都能高效地进行混合。因此，有时把靠旋转叶轮进行混合的机械笼统地称作搅拌设备。由于液体搅拌设备的应用领域比固体混合设备要广得多，且有关液体搅拌设备的基础研究的论著也比固体混合设备要多得多，本书主要讨论这种靠旋转叶轮进行混合的搅拌设备，尤其是液体搅拌设备，而有关固体混合设备的篇幅较少。

非回转式混合机械靠液流或气流的动能或依靠粒子本身的重力进行混合，例如射流混合器和静态混合器等。本书由于篇幅关系，不予涉及。

混合设备的分类如下：



搅拌设备在许多场合是作为反应器来使用的。例如，在合成橡胶、合成纤维、合成塑料这三大合成材料的生产中，85%以上的聚合反应器是搅拌设备。据在1992年的粗略统计，仅我国石化行业，每年由搅拌设备作为聚合反应器生产的三大合成材料约为250万t。

有些化学反应能使反应物的相状态随反应的进行而发生一系列的变化。如用茂金属催化剂合成间规聚苯乙烯的过程中，在反应初期，物料为低粘液体，随反应进行便有固体粒子沉析出来，且体系逐渐变得非常粘稠，甚至产生强的粘弹性，随反应转化率进一步提高，物料又能变成粉体。对于这样的反应体系，其反应器就必须使用对于粘性液体和粉体都能高效混合的搅拌设备。全相状态搅拌器在这种场合最为合宜。

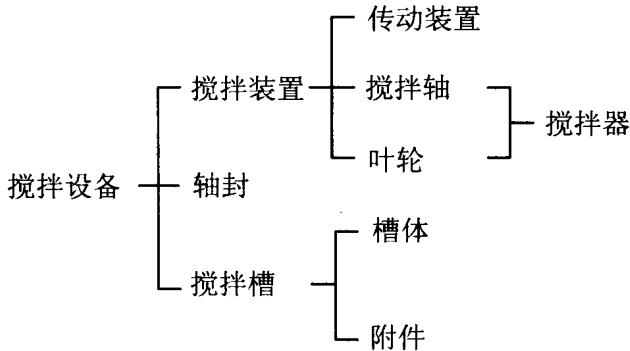
更大量的搅拌设备中并不进行化学反应，而只用于物料的掺混、传热、传质、以及用于制备乳液、悬浮液等。如有一年产2万t合成纤维的工厂，作为其主体设备的搅拌槽式聚合反应器仅有两台，而为其配套的搅拌式溶解槽、配料槽、稀释槽、缓冲槽等则多达30多台。

由于固体与固体间较难发生化学反应，因此固体混合设备中绝大多数只进行物理的掺混过程，如在大量的饲料中加入极少量的维生素和抗菌素。在军事工业中，固体混合设备在制造炸药和火箭燃料时也得到应用。

混合设备大多是非标设备，其结构形式极其多样化。随技术的进步，不断有新型高效的混合设备被研制和开发出来。对搅拌设备的改进，更是日新月异。达到同样的固-液悬浮操作效果，使用新型高效的搅拌器比传统的搅拌器可节能 50%；另一方面，达到同样的混合效果，使用结构简单的新型高效搅拌器可使设备制造成本成倍降低的例子也不少。由于目前混合设备的设计还强烈地依赖于经验，因此掌握先进的混合技术，开发和生产高效混合设备对于国民经济有重大意义。

第 1 章 搅拌设备的类型

搅拌设备由搅拌装置、轴封和搅拌槽三部分组成，其构成形式如下：



搅拌设备的典型结构如图 1-1。有时搅拌轴上可装有多个叶轮，且叶轮的形式有数十种，槽体和附件（如夹套、挡板、导流筒、蛇管）的形式也很多，通过不同组合，实际应用的搅拌设备构型不下数百种。图 1-1 中的搅拌设备是立式的，而混合粉体用的搅拌设备很多是卧式的。图 1-2 是典型的、用于粉体混合的搅拌设备，它使用的是螺带式叶轮。

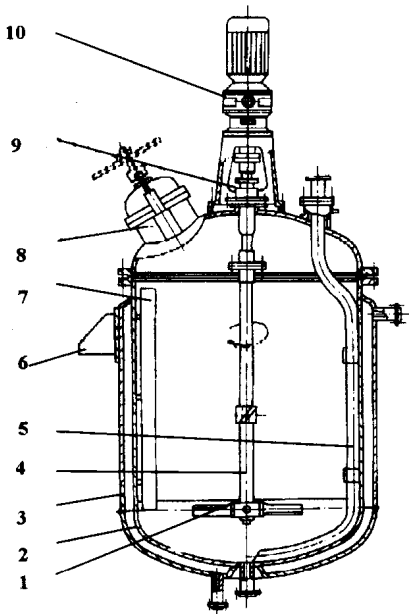


图 1-1 搅拌设备的典型结构^[1]

- 1—叶轮 2—槽体 3—夹套 4—搅拌轴 5—压出管
- 6—支座 7—挡板 8—人孔 9—轴封 10—传动装置

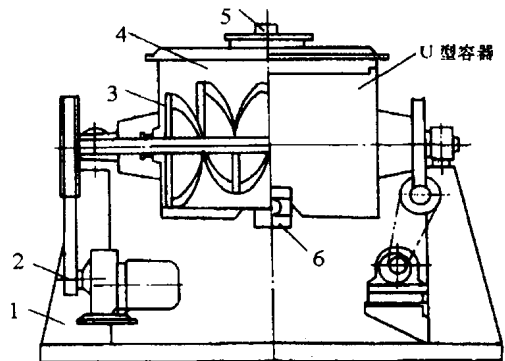


图 1-2 卧式螺带混合机^[1]

- 1—机架 2—传动装置 3—搅拌叶轮
- 4—筒体 5—进料口 6—出料口

搅拌槽常被称作搅拌釜，槽体亦可称作釜体。当搅拌设备用作反应器时，称搅拌槽式反应器，有时简称反应釜。

在组成搅拌设备的各部件中，搅拌叶轮的形式变化最多，槽体、附件、传动装置也有多种形式，下面分别予以介绍。

1.1 槽体

槽体的形式通常是立式圆筒形的，筒体上部和下部都有碟形或椭圆形的封头，如图 1-1。也有一些搅拌设备是卧式的，如图 1-2。立式槽在常压下操作时，为降低槽体的制造成本，也可采用平底槽，当物料对环境没有污染，且被搅物料对空气中尘埃的落入并不敏感时，槽上部也可是敞口的。磷肥工业、湿法冶金业和污水处理业用的数百或数千立方米的大型搅拌槽，绝大多数是敞口的平底搅拌槽。在搅拌含有较大颗粒的淤浆时，为便于固体粒子的出料，常用锥形底的搅拌槽。图 1-3 中槽体是圆锥形的，使用螺带式叶轮，它能混合高粘液体或粉体，与用立式圆筒形槽体的螺带式搅拌机相比，它混合效率更高。

在卧式搅拌槽中大多进行半釜操作，因此卧式釜与立式釜相比有更多的气液接触面积，故卧式釜常用于气液传质过程，如气-液吸收或从高粘液体中脱除少量易挥发物质；另一方面，卧式釜的料层较浅，有利于叶轮将粉末搅动，并可借叶轮的高速回转使粉体抛扬起来，使粉体在瞬间失重状态下进行混合。

卧式搅拌设备有单轴的，也有双轴的，如图 1-4。采用卧式双轴搅拌设备的目的是要使搅拌器获得自清洁效果。当搅拌高粘液体时，若叶轮端部与槽壁有一定的间隙，则高粘液体会滞流于间隙中，这些滞留物的存在往往影响产品的质量。特别当搅拌设备作为反应器使用时，滞留物因反应时间过长或局部过热而变质。为此，搅拌高粘液体的叶轮的外缘都与槽壁很接近，有时还在叶轮上装刮刀，即所谓刮壁式搅拌设备。然而，即使采用了刮壁式搅拌器，若采用单轴型，高粘液体还可能粘滞在叶轮上，随叶轮一起转动，而若采用自清洁型的卧式双轴搅拌设备，通过两支轴上特殊设计的叶轮的啮合，使叶轮之间产生互相清洁作用，可使滞留物减至最少。

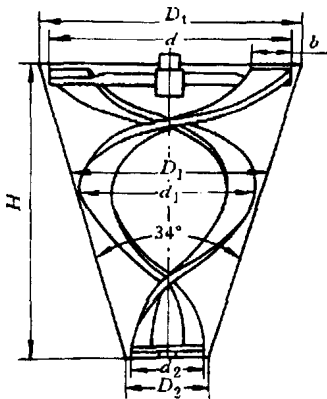


图 1-3 锥形螺带式搅拌设备^[2]

$$d=0.95D_1, \quad d_1=0.95D_1, \quad d_2=0.95D_2$$

$$b=0.158d_1, \quad H=1.12D_1$$

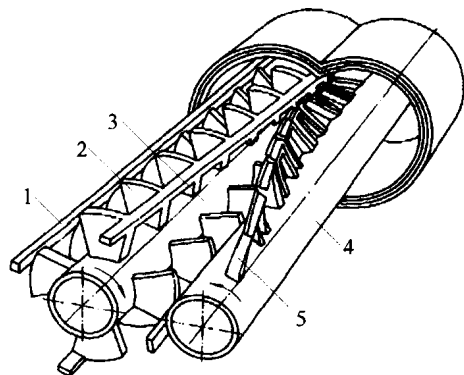


图 1-4 卧式双轴搅拌设备^[3]

1—捏和杆 2—盘片元件 3—主搅拌器

4—清洁轴 5—捏和框