

第 5 篇 搅拌及混合

主稿、编写人 施力田 北京化工大学 教授
编写人 王英琛 北京化工大学 教授
吴德钧 北京化工大学 副教授
林猛流 北京化工大学 副教授
耿孝正 北京化工大学 教授

1 概论	5-4	(1) 直叶涡轮桨	5-14
1.1 搅拌装置的结构	5-4	2.2 按被搅拌物系的性质分类	5-15
1.1.1 槽体	5-4	2.2.1 适用于低粘度流体的桨型	5-15
1.1.2 桨叶与旋转轴	5-4	(1) 框式桨	5-15
1.1.3 挡板	5-5	(2) 三叶后弯桨	5-15
1.1.4 导流筒	5-5	(3) Mig 型桨	5-16
1.1.5 驱动机构	5-5	2.2.2 适用于高粘度流体的桨型	5-17
1.2 搅拌槽内的流体力学特征	5-5	(1) 锚式桨	5-17
1.2.1 流型	5-5	(2) 螺旋式桨	5-17
(1) 切向流	5-5	(3) 单螺带式桨	5-17
(2) 轴向流	5-5	(4) 双螺带搅拌桨	5-17
(3) 径向流	5-6	(5) 螺旋-螺带桨	5-18
1.2.2 槽内的速度分布	5-7	2.2.3 组合桨	5-20
1.2.3 剪切速率分布及其对槽内混合的影响	5-8	(1) 多层桨	5-20
1.2.4 能耗速率的分布及其对槽内混合的影响	5-8	(2) 组合桨	5-20
1.3 搅拌效果的度量尺度与影响搅拌效果的因素	5-9	2.2.4 其他桨型	5-20
1.4 搅拌过程中的特征量及其意义	5-9	2.3 其他混合设备	5-20
1.5 宏观混合与微观混合	5-10	2.3.1 静态混合器	5-20
参考文献	5-11	2.3.2 射流混合	5-20
2 桨叶的分类及其特性参数	5-11	2.3.3 管道混合器	5-21
2.1 按流动形态分类	5-11	参考文献	5-21
2.1.1 轴向流叶轮	5-11	3 低粘度互溶液体的混合	5-22
(1) 推进式叶轮	5-11	3.1 过程的特征及其基本原理	5-22
(2) 斜叶涡轮	5-12	3.2 桨型的选择	5-22
(3) 长薄叶螺旋桨	5-13	3.2.1 推进式叶轮	5-22
2.1.2 径向流叶轮	5-14	(1) 中心插入式	5-22
		(2) 偏离中心安装	5-22
		(3) 侧面伸入	5-22

* 参加本篇编写工作的还有：北京化工大学高正明；华东理工大学蔡志武等。

3.2.2 斜叶涡轮	5-23	5.3 液-液分散系统的搅拌功率	5-37
3.2.3 长薄片螺旋桨	5-23	5.3.1 液-液分散最小搅拌转速	5-37
3.2.4 三叶后弯桨叶	5-23	5.3.2 搅拌器轴功率计算	5-37
3.3 设计计算	5-23	5.4 液-液间的传质	5-37
3.3.1 功率计算	5-23	5.5 液滴大小及分布的测定	5-37
(1) 推进式桨叶的搅拌功率	5-23	参考文献	5-38
(2) 斜叶涡轮	5-23	6 固-液体系搅拌, 固-液悬浮	5-39
(3) 三叶后弯叶轮	5-23	6.1 过程特征	5-39
3.4 多层桨	5-23	6.1.1 固-液悬浮操作	5-39
参考文献	5-23	6.1.2 固体颗粒悬浮状态	5-39
4 高粘度液体的混合	5-23	(1) 均匀悬浮	5-39
4.1 高粘度液体的混合机理	5-23	(2) 完全悬浮	5-39
4.2 高粘度搅拌器的混合性能	5-24	(3) 槽底颗粒全部处于运动状态	5-39
4.2.1 混合性能指标	5-24	(4) 有沉积带但不再增长	5-39
4.2.2 搅拌器的混合性能	5-24	(5) 悬浮高度	5-39
4.2.3 非牛顿流体性质对混合的影响	5-25	6.1.3 固体颗粒的沉降速度	5-39
4.2.4 搅拌器型式的选择	5-25	6.1.4 固-液悬浮机理	5-40
4.3 牛顿流体的搅拌功率	5-26	(1) 完全悬浮机理	5-40
4.3.1 锚式搅拌器的搅拌功率	5-26	(2) 均匀悬浮机理	5-40
4.3.2 螺旋式搅拌器的搅拌功率	5-26	6.2 搅拌设备选择	5-40
4.3.3 多种型式高粘度搅拌器的 K_p 值	5-26	6.2.1 搅拌器型式	5-40
4.4 非牛顿流体的搅拌功率	5-26	6.2.2 桨叶参数的确定	5-40
4.4.1 假塑性流体的搅拌功率	5-26	(1) 搅拌器叶轮直径与槽径之比 (D/T 值)	5-40
(1) 表现粘度法	5-27	(2) 叶轮位置 (C/D 值)	5-40
(2) 直接计算法	5-29	(3) 搅拌槽的结构	5-40
(3) 其他计算式	5-31	6.3 搅拌器轴功率的计算	5-41
(4) 假塑性流体在过渡流区的搅拌功率	5-31	6.3.1 悬浮临界转速	5-41
4.4.2 宾汉流体的搅拌功率	5-31	(1) 完全悬浮临界转速	5-41
4.4.3 触变性流体的搅拌功率	5-31	(2) 均匀悬浮临界转速	5-42
4.4.4 粘弹性流体的混合及功率	5-31	6.3.2 搅拌器轴功率的计算	5-42
(1) 粘弹性流体的混合特性	5-31	6.4 带导流筒的搅拌槽	5-43
(2) 粘弹性流体的搅拌功率	5-32	6.4.1 流动特性	5-43
符号说明	5-32	6.4.2 搅拌槽的型式	5-43
参考文献	5-33	6.4.3 导流筒直径与槽直径之比	5-43
5 低粘度下不互溶液体的搅拌——液-液分散	5-33	6.5 固-液传质、溶解与结晶	5-44
5.1 过程的特征	5-33	6.5.1 固体溶解	5-45
5.1.1 分散操作	5-33	6.5.2 结晶	5-45
5.1.2 分散尺度	5-34	参考文献	5-45
(1) 完全分散	5-34	7 气-液体系的搅拌——气体分散	5-45
(2) 均匀分散	5-34	7.1 过程特性	5-45
5.1.3 相界面面积	5-34	7.1.1 通气式气液搅拌器及槽体结构	5-45
5.1.4 分散机理、分散与聚并	5-34	(1) 搅拌器型式	5-45
5.2 搅拌装置	5-35	(2) 槽体结构	5-46
5.2.1 液-液相搅拌器	5-35	7.1.2 自吸式气液搅拌器及槽体结构	5-46
5.2.2 多级液-液相搅拌装置	5-36	(1) 搅拌器型式	5-46
5.2.3 多层搅拌装置	5-37	(2) 槽体结构	5-46

7.2	气流搅拌槽的分散特性	5-46	8.3.5	双层盘管的传热	5-53
7.2.1	搅拌槽内气体流动状态	5-46	8.3.6	垂直管束的传热膜系数 h_{0a} 的关联式	5-53
7.2.2	最大通气速度	5-47	8.3.7	垂直板式蛇管的传热膜系数关联式	5-54
7.2.3	气泡直径及其分布	5-47	8.3.8	中空螺旋带式搅拌器外表面的传热膜系数 h_{0a} 的关联式	5-54
7.2.4	气含率	5-47	(1)	中空螺旋管式搅拌器的传热膜系数关联式	5-54
7.2.5	气流相界面面积	5-47	(2)	中空内冷双螺旋带搅拌器的传热膜系数的关联式	5-54
7.3	气流搅拌槽内的传质特性	5-48	(3)	中空内冷单螺旋带搅拌器的关联式	5-54
7.4	搅拌器型式的选择	5-49	8.3.9	螺旋轴-导流筒搅拌器的传热关联式	5-54
7.5	设计计算	5-49	8.3.10	六直叶涡轮搅拌器在气液分散中的传热关联式	5-55
符号说明		5-50	8.4	夹套及内部换热构件内的传热膜系数	5-55
参考文献		5-50	8.4.1	内盘管内壁及槽外螺旋管管内无相变时的传热膜系数 h_i 关联式	5-55
8	搅拌槽的传热	5-51	8.4.2	夹套内传热膜系数 h_i 的关联式	5-55
8.1	传热速率方程	5-51	8.4.3	具有螺旋导流板的夹套传热	5-55
8.2	搅拌槽内壁膜系数的关联式	5-51	8.5	间歇操作时的传热计算	5-55
8.2.1	无挡板、涡轮搅拌器槽壁的传热膜系数 h_0	5-51	8.5.1	用恒温分质时物料加热时间的计算	5-56
8.2.2	有换热盘管或无换热盘管的挡板槽的传热膜系数 h_0	5-52	8.5.2	用变温分质时物料加热时间的计算	5-56
8.2.3	三叶推进式搅拌器槽壁传热膜系数 h_0	5-52	8.5.3	有内热源的搅拌冷却传热过程	5-56
8.2.4	六叶后弯式搅拌器槽壁传热膜系数 h_0	5-52	参考文献		5-56
8.2.5	锚式搅拌器槽壁传热膜系数 h_0 的关联	5-52	9	搅拌槽的放大	5-57
8.2.6	螺旋式搅拌器槽壁传热膜系数 h_{0w} 的关联	5-52	9.1	几何相似放大时搅拌性能参数的变化关系	5-57
(1)	双螺旋-锚组合搅拌器的 h_{0w}	5-52	9.2	互溶液体混合的放大	5-58
(2)	内外螺旋-锚组合搅拌器的 h_{0w}	5-52	9.3	气-液分散、液-液分散过程的放大	5-59
(3)	螺旋-螺旋轴-锚组合搅拌器的 h_{0w}	5-52	9.4	固-液悬浮过程的放大	5-59
8.2.7	MIG 搅拌器槽壁的传热膜系数 h_{0w} 的关联	5-53	符号说明		5-60
(1)	七层 MIG 搅拌器的 h_{0w} ($2.4 \leq Re \leq 100$)	5-53	参考文献		5-60
(2)	四层 MIG 搅拌器的 h_{0w} ($3.8 \leq Re \leq 100$)	5-53	10	搅拌器构件	5-61
8.2.8	用单位质量功耗关联的湍流搅拌传热关联式	5-53	10.1	搅拌器	5-61
8.3	槽内传热构件外壁传热膜系数的关联式	5-53	10.1.1	搅拌器材料	5-61
8.3.1	无挡板槽中换热盘管使用涡轮搅拌器时盘管外壁的传热膜系数 h_{0a}	5-53	10.1.2	搅拌器的结构形式	5-61
8.3.2	有挡板槽中换热盘管使用涡轮搅拌器时盘管外壁的传热膜系数 h_{0a}	5-53	10.1.3	装配式搅拌器的连接方式	5-61
8.3.3	三叶推进式搅拌器盘管壁的传热膜系数 h_{0a}	5-53	(1)	搅拌器用键和止动螺栓与轴连接	5-61
8.3.4	六叶后弯式搅拌器盘管壁的传热膜系数 h_{0a}	5-53	(2)	螺栓夹紧式连接	5-61
			(3)	轮毂固定在轴上, 桨叶用螺栓与轮毂上的“耳”连接	5-61
			(4)	通过桨叶底板用螺栓与轴相连接	5-61
			10.2	搅拌轴	5-62
			10.2.1	搅拌轴的结构形式	5-62
			(1)	圆形实心轴	5-62
			(2)	圆形空心轴	5-62

(3) 方形轴.....	5-62	11.1 捏合.....	5-64
10.2.2 搅拌轴的支承方式.....	5-62	11.1.1 间歇捏合机.....	5-64
(1) 悬臂式搅拌轴.....	5-62	(1) 小型混合器.....	5-64
(2) 槽内有支承的搅拌轴.....	5-62	(2) 双臂捏合机.....	5-65
10.2.3 确定轴径的原则.....	5-62	(3) 密炼机.....	5-66
(1) 按扭转强度及刚度确定轴径.....	5-62	(4) 开炼机.....	5-66
(2) 按轴的临界转速确定轴径.....	5-62	11.1.2 连续混合机.....	5-66
(3) 按脉动载荷确定轴径.....	5-62	(1) 单螺杆挤出机.....	5-66
10.3 联轴器.....	5-63	(2) 双螺杆挤出机.....	5-66
10.3.1 夹壳联轴器.....	5-63	11.1.3 Buss-Kneader 连续混合机.....	5-68
10.3.2 刚性凸缘联轴器.....	5-63	11.2 固体混合.....	5-69
10.3.3 弹性联轴器.....	5-63	11.2.1 固体混合状态度量及混合优度的实际决定.....	5-69
10.4 轴封.....	5-64	11.2.2 固体混合机械.....	5-70
10.4.1 填料密封.....	5-64	(1) 转鼓式混合机.....	5-70
10.4.2 机械密封.....	5-64	(2) 容器固定型混合机.....	5-70
参考文献.....	5-64	参考文献.....	5-72
11 捏合与固体混合.....	5-64		

1 概 论

搅拌与混合在化工、医药、食品、采矿、造纸、废水处理等行业中都有广泛的应用，其操作目的基本上可分为下列四个方面：

①制备均匀混合物：如调和、乳化、固体悬浮、捏合以及团粒混合等。

②促进传质：如萃取、浸取、溶解、结晶、气体吸收等。

③促进传热：搅拌槽内加热或冷却。

④上述三种目的之间的组合，特别是一些快速反应对混合、传质、传热都有较高的要求，搅拌与混合的好坏往往成为过程的控制因素。

虽然搅拌与混合是一种很常规的单元操作，但由于其流动过程的复杂性，理论方面的研究还很不够，对搅拌装置的设计和操作至今仍有很大的经验性。

本篇首先介绍搅拌与混合的基础理论，然后介绍各类搅拌操作的特征，设备选型、设计与操作计算，设备传热与放大问题，以及机械方面的问题，最后介绍捏合与固体混合的特性与设备。

1.1 搅拌装置的结构

搅拌装置一般由槽体、桨叶与挡板等内构件以及驱动机构所组成，见图 1-1。

1.1.1 槽 体

搅拌装置的槽体通常为圆筒形，高径比为 1~6，槽

底有平底、椭圆底、锥形底等，有时亦可采用方槽。根据工艺的传热要求，槽体外可加夹套，并通以蒸汽、冷却水等介质。

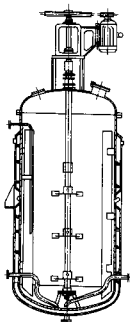


图 1-1 搅拌装置的结构

1.1.2 桨叶与旋转轴

桨叶是搅拌装置的核心部件，根据旋转桨叶在搅拌槽内产生的流型，桨叶基本上可以分为轴向流桨叶和径

第5篇 搅拌及混合

主稿、编写人 施力田 北京化工大学 教授
编写人 王英琛 北京化工大学 教授
吴德钧 北京化工大学 副教授
林猛流 北京化工大学 副教授
耿孝正 北京化工大学 教授

1 概论	5-4	(1) 直叶涡轮桨	5-14
1.1 搅拌装置的结构	5-4	2.2 按被搅拌物系的性质分类	5-15
1.1.1 槽体	5-4	2.2.1 适用于低粘度流体的桨型	5-15
1.1.2 桨叶与旋转轴	5-4	(1) 框式桨	5-15
1.1.3 挡板	5-5	(2) 三叶后弯桨	5-15
1.1.4 导流筒	5-5	(3) Mig 型桨	5-16
1.1.5 驱动机构	5-5	2.2.2 适用于高粘度流体的桨型	5-17
1.2 搅拌槽内的流体力学特征	5-5	(1) 锚式桨	5-17
1.2.1 流型	5-5	(2) 螺旋式桨	5-17
(1) 切向流	5-5	(3) 单螺带式桨	5-17
(2) 轴向流	5-5	(4) 双螺带搅拌桨	5-17
(3) 径向流	5-6	(5) 螺旋-螺带桨	5-18
1.2.2 槽内的速度分布	5-7	2.2.3 组合桨	5-20
1.2.3 剪切速率分布及其对槽内混合的影响	5-8	(1) 多层桨	5-20
1.2.4 能耗速率的分布及其对槽内混合的影响	5-8	(2) 组合桨	5-20
1.3 搅拌效果的度量尺度与影响搅拌效果的因素	5-9	2.2.4 其他桨型	5-20
1.4 搅拌过程中的特征量及其意义	5-9	2.3 其他混合设备	5-20
1.5 宏观混合与微观混合	5-10	2.3.1 静态混合器	5-20
参考文献	5-11	2.3.2 射流混合	5-20
2 桨叶的分类及其特性参数	5-11	2.3.3 管道混合器	5-21
2.1 按流动形态分类	5-11	参考文献	5-21
2.1.1 轴向流叶轮	5-11	3 低粘度互溶液体的混合	5-22
(1) 推进式叶轮	5-11	3.1 过程的特征及其基本原理	5-22
(2) 斜叶涡轮	5-12	3.2 桨型的选择	5-22
(3) 长带叶螺旋桨	5-13	3.2.1 推进式叶轮	5-22
2.1.2 径向流叶轮	5-14	(1) 中心插入式	5-22
		(2) 偏离中心安装	5-22
		(3) 侧面伸入	5-22

* 参加本篇编写工作的还有：北京化工大学高正明；华东理工大学蔡志武等。

3.2.2 斜叶涡轮	5-23	5.3 液-液分散系统的搅拌功率	5-37
3.2.3 长薄叶螺旋桨	5-23	5.3.1 液-液分散最小搅拌转速	5-37
3.2.4 三叶后弯桨叶	5-23	5.3.2 搅拌器轴功率计算	5-37
3.3 设计计算	5-23	5.4 液-液间的传质	5-37
3.3.1 功率计算	5-23	5.5 液滴大小及分布的测定	5-37
(1) 推进式桨叶的搅拌功率	5-23	参考文献	5-38
(2) 斜叶涡轮	5-23	6 固-液体体系搅拌, 固-液悬浮	5-39
(3) 三叶后弯叶轮	5-23	6.1 过程特征	5-39
3.4 多层桨	5-23	6.1.1 固-液悬浮操作	5-39
参考文献	5-23	6.1.2 固体颗粒悬浮状态	5-39
4 高粘度液体的混合	5-23	(1) 均匀悬浮	5-39
4.1 高粘度液体的混合机理	5-23	(2) 完全悬浮	5-39
4.2 高粘度搅拌器的混合性能	5-24	(3) 槽底颗粒全部处于运动状态	5-39
4.2.1 混合性能指标	5-24	(4) 有沉积带但不再增长	5-39
4.2.2 搅拌器的混合性能	5-24	(5) 悬浮高度	5-39
4.2.3 非牛顿流体性质对混合的影响	5-25	6.1.3 固体颗粒的沉降速度	5-39
4.2.4 搅拌器型式的选择	5-25	6.1.4 固-液悬浮机理	5-40
4.3 牛顿流体的搅拌功率	5-26	(1) 完全悬浮机理	5-40
4.3.1 锚式搅拌器的搅拌功率	5-26	(2) 均匀悬浮机理	5-40
4.3.2 螺旋式搅拌器的搅拌功率	5-26	6.2 搅拌设备选择	5-40
4.3.3 多种型式高粘度搅拌器的 K_p 值	5-26	6.2.1 搅拌器型式	5-40
4.4 非牛顿流体的搅拌功率	5-26	6.2.2 桨叶参数的确定	5-40
4.4.1 假塑性流体的搅拌功率	5-26	(1) 搅拌器叶轮直径与槽径之比 (D/T 值)	5-40
(1) 表现粘度法	5-27	(2) 叶轮位置 (C/D 值)	5-40
(2) 直接计算法	5-29	(3) 搅拌槽的结构	5-40
(3) 其他计算式	5-31	6.3 搅拌器轴功率的计算	5-41
(4) 假塑性流体在过渡流区的搅拌功率	5-31	6.3.1 悬浮临界转速	5-41
4.4.2 宾汉流体的搅拌功率	5-31	(1) 完全悬浮临界转速	5-41
4.4.3 触变性流体的搅拌功率	5-31	(2) 均匀悬浮临界转速	5-42
4.4.4 粘弹性流体的混合及功率	5-31	6.3.2 搅拌器轴功率的计算	5-42
(1) 粘弹性流体的混合特性	5-31	6.4 带导流筒的搅拌槽	5-43
(2) 粘弹性流体的搅拌功率	5-32	6.4.1 流动特性	5-43
符号说明	5-32	6.4.2 搅拌槽的型式	5-43
参考文献	5-33	6.4.3 导流筒直径与槽直径之比	5-43
5 低粘度下不互溶液体的搅拌——液-液分散	5-33	6.5 固-液传质、溶解与结晶	5-44
5.1 过程的特征	5-33	6.5.1 固体溶解	5-45
5.1.1 分散操作	5-33	6.5.2 结晶	5-45
5.1.2 分散尺度	5-34	参考文献	5-45
(1) 完全分散	5-34	7 气-液体体系的搅拌——气体分散	5-45
(2) 均匀分散	5-34	7.1 过程特性	5-45
5.1.3 相界面面积	5-34	7.1.1 通气式气液搅拌器及槽体结构	5-45
5.1.4 分散机理、分散与聚并	5-34	(1) 搅拌器型式	5-45
5.2 搅拌装置	5-35	(2) 槽体结构	5-46
5.2.1 液-液相搅拌器	5-35	7.1.2 自吸式气液搅拌器及槽体结构	5-46
5.2.2 多级液-液相搅拌装置	5-36	(1) 搅拌器型式	5-46
5.2.3 多层搅拌装置	5-37	(2) 槽体结构	5-46

7.2	气液搅拌槽的分散特性	5-46	8.3.5	双层盘管的传热	5-53
7.2.1	搅拌槽内气体流动状态	5-46	8.3.6	垂直管束的传热膜系数 h_{0a} 的关联式	5-53
7.2.2	最大通气速度	5-47	8.3.7	垂直板式蛇管的传热膜系数关联式	5-54
7.2.3	气泡直径及其分布	5-47	8.3.8	中空螺旋带式搅拌器外表面的传热膜系数 h_{0a} 的关联式	5-54
7.2.4	气含率	5-47	(1)	中空螺旋管式搅拌器的传热膜系数关联式	5-54
7.2.5	气液相界面面积	5-47	(2)	中空内冷双螺旋带搅拌器的传热膜系数的关联式	5-54
7.3	气液搅拌槽内的传质特性	5-48	(3)	中空内冷单螺旋带搅拌器的关联式	5-54
7.4	搅拌器型式的选择	5-49	8.3.9	螺旋轴-导流筒搅拌器的传热关联式	5-54
7.5	设计计算	5-49	8.3.10	六直叶涡轮搅拌器在气液分散中的传热关联式	5-55
符号说明		5-50	8.4	夹套及内部换热构件内的传热膜系数	5-55
参考文献		5-50	8.4.1	内盘管内壁及槽外螺旋管管内无相变时的传热膜系数 h_i 关联式	5-55
8	搅拌槽的传热	5-51	8.4.2	夹套内传热膜系数 h_i 的关联式	5-55
8.1	传热速率方程	5-51	8.4.3	具有螺旋导流板的夹套传热	5-55
8.2	搅拌槽内壁膜系数的关联式	5-51	8.5	间歇操作时的传热计算	5-55
8.2.1	无挡板、涡轮搅拌器槽壁的传热膜系数 h_0	5-51	8.5.1	用恒温分质时物料加热时间的计算	5-56
8.2.2	有换热盘管或无换热盘管的挡板槽的传热膜系数 h_0	5-52	8.5.2	用变温分质时物料加热时间的计算	5-56
8.2.3	三叶推进式搅拌器槽壁传热膜系数 h_0	5-52	8.5.3	有内热源的搅拌冷却传热过程	5-56
8.2.4	六叶后弯式搅拌器槽壁传热膜系数 h_0	5-52	参考文献		5-56
8.2.5	锚式搅拌器槽壁传热膜系数 h_0 的关联	5-52	9	搅拌槽的放大	5-57
8.2.6	螺旋带式搅拌器槽壁传热膜系数 h_{0w} 的关联	5-52	9.1	几何相似放大时搅拌性能参数的变化关系	5-57
(1)	双螺旋-锚组合搅拌器的 h_{0w}	5-52	9.2	互溶液体混合的放大	5-58
(2)	内外螺旋-锚组合搅拌器的 h_{0w}	5-52	9.3	气-液分散、液-液分散过程的放大	5-59
(3)	螺旋-螺旋轴-锚组合搅拌器的 h_{0w}	5-52	9.4	固-液悬浮过程的放大	5-59
8.2.7	MIG 搅拌器槽壁的传热膜系数 h_{0w} 的关联	5-53	符号说明		5-60
(1)	七层 MIG 搅拌器的 h_{0w} ($2.4 \leq Re \leq 100$)	5-53	参考文献		5-60
(2)	四层 MIG 搅拌器的 h_{0w} ($3.8 \leq Re \leq 100$)	5-53	10	搅拌器构件	5-61
8.2.8	用单位质量功耗关联的潮流搅拌传热关联式	5-53	10.1	搅拌器	5-61
8.3	槽内传热构件外壁传热膜系数的关联式	5-53	10.1.1	搅拌器材料	5-61
8.3.1	无挡板槽中换热盘管使用涡轮搅拌器时盘管外壁的传热膜系数 h_{0a}	5-53	10.1.2	搅拌器的结构形式	5-61
8.3.2	有挡板槽中换热盘管使用涡轮搅拌器时盘管外壁的传热膜系数 h_{0a}	5-53	10.1.3	装配式搅拌器的连接方式	5-61
8.3.3	三叶推进式搅拌器盘管壁的传热膜系数 h_{0a}	5-53	(1)	搅拌器用键和止动螺栓与轴连接	5-61
8.3.4	六叶后弯式搅拌器盘管壁的传热膜系数 h_{0a}	5-53	(2)	螺栓夹紧式连接	5-61
			(3)	轮毂固定在轴上, 桨叶用螺栓与轮毂上的“耳”连接	5-61
			(4)	通过桨叶底板用螺栓与轴相连接	5-61
			10.2	搅拌轴	5-62
			10.2.1	搅拌轴的结构形式	5-62
			(1)	圆形实心轴	5-62
			(2)	圆形空心轴	5-62

(3) 方形轴.....	5-62	11.1 捏合.....	5-64
10.2.2 搅拌轴的支承方式.....	5-62	11.1.1 间歇捏合机.....	5-64
(1) 悬臂式搅拌轴.....	5-62	(1) 小型混合器.....	5-64
(2) 槽内有支承的搅拌轴.....	5-62	(2) 双臂捏合机.....	5-65
10.2.3 确定轴径的原则.....	5-62	(3) 密炼机.....	5-66
(1) 按扭转强度及刚度确定轴径.....	5-62	(4) 开炼机.....	5-66
(2) 按轴的临界转速确定轴径.....	5-62	11.1.2 连续混合机.....	5-66
(3) 按脉动载荷确定轴径.....	5-62	(1) 单螺杆挤出机.....	5-66
10.3 联轴器.....	5-63	(2) 双螺杆挤出机.....	5-66
10.3.1 夹壳联轴器.....	5-63	11.1.3 Buss-Kneader 连续混合机.....	5-68
10.3.2 刚性凸缘联轴器.....	5-63	11.2 固体混合.....	5-69
10.3.3 弹性联轴器.....	5-63	11.2.1 固体混合状态度量及混合优度的实际决定.....	5-69
10.4 轴封.....	5-64	11.2.2 固体混合机械.....	5-70
10.4.1 填料密封.....	5-64	(1) 转鼓式混合机.....	5-70
10.4.2 机械密封.....	5-64	(2) 容器固定型混合机.....	5-70
参考文献.....	5-64	参考文献.....	5-72
11 捏合与固体混合.....	5-64		

1 概 论

搅拌与混合在化工、医药、食品、采矿、造纸、废水处理等行业中都有广泛的应用，其操作目的基本上可分为下列四个方面：

①制备均匀混合物：如调和、乳化、固体悬浮、捏合以及团粒混合等。

②促进传质：如萃取、浸取、溶解、结晶、气体吸收等。

③促进传热：搅拌槽内加热或冷却。

④上述三种目的之间的组合，特别是一些快速反应对混合、传质、传热都有较高的要求，搅拌与混合的好坏往往成为过程的控制因素。

虽然搅拌与混合是一种很常规的单元操作，但由于其流动过程的复杂性，理论方面的研究还很不够，对搅拌装置的设计和操作至今仍有很大的经验性。

本篇首先介绍搅拌与混合的基础理论，然后介绍各类搅拌操作的特征、设备选型、设计与操作计算，设备传热与放大问题，以及机械方面的问题，最后介绍捏合与固体混合的特性与设备。

1.1 搅拌装置的结构

搅拌装置一般由筒体、桨叶与挡板等内构件以及驱动机构所组成，见图 1-1。

1.1.1 筒 体

搅拌装置的筒体通常为圆筒形，高径比为 1~6，槽

底有平底、椭圆底、锥形底等，有时亦可方槽。根据工艺的传热要求，槽体外可加夹套，并通以蒸汽、冷却水等介质。

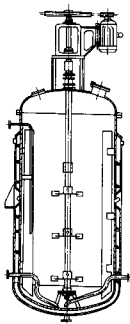


图 1-1 搅拌装置的结构

1.1.2 桨叶与旋转轴

桨叶是搅拌装置的核心部件，根据旋转桨叶在搅拌槽内产生的流型，桨叶基本上可以分为轴向流桨叶和径

向流桨叶,例如,推进式桨、新型翼型桨等属于轴向流桨,各种直叶、弯叶涡轮桨属于径向流桨。

旋转轴通常自搅拌槽顶部中心垂直插入槽内,有时也采用侧面插入和底部插入的方式。

1.1.3 挡板

为了消除搅拌槽内液体的打旋现象,使被搅拌的液体上下翻腾,通常需加入挡板。壁挡板(见图1-2)在槽壁均匀地安装4块,宽度为槽直径的 $\frac{1}{12} \sim \frac{1}{10}$,可满足全挡板条件,再增加挡板数与挡板宽度,功率消耗不再增加。有时,仅装2块或1块挡板就足够了,甚至可以不装挡板。在固体悬浮操作时,还可在槽底上安装底挡板(见图1-3),促进固体的悬浮。搅拌槽中的传热盘管可以部分以至全部代替挡板,装有垂直换热管后,一般可不再使用挡板。

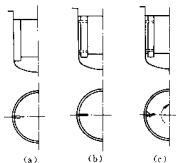


图1-2 壁挡板

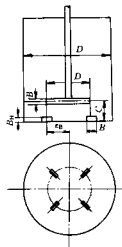


图1-3 底挡板

1.1.4 导流筒

导流筒(见图1-4)置于搅拌槽内,是上下开口的圆

筒,在搅拌混合中起导流作用。通常导流筒的上端部低于静液面,且在筒身上开有槽或孔,当生产中液面降落时仍可从槽或孔进入。推进式搅拌桨可位于导流筒内或略低于导流筒的下端;涡轮式或桨式搅拌桨常置于导流筒的下端。当搅拌桨置于导流筒之下,且筒直径又较大时,筒的下端直径应缩小,使下部开口小于搅拌桨直径。

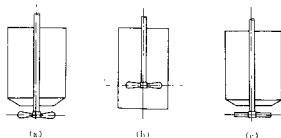


图1-4 导流筒

1.1.5 驱动机构

工业搅拌装置的驱动机构通常由交流电机与齿轮减速机或皮带轮减速装置构成,使搅拌桨达到规定的转速。在实验室中,搅拌装置的驱动机构通常为直流电机或变频电机,可以连续地改变搅拌转速,现在大生产中也有采用变频调速电机,以满足生产过程的需要。

1.2 搅拌槽内的流体力学特征

搅拌槽内的流动状况非常复杂,对这种流动的研究分为两个方面,即实验测量与数值模拟。采用激光、热线(热膜)等先进测速技术,可测出搅拌槽内任一点的时均速度与脉动速度,而以描述湍流的雷诺方程为基础,加上不同的方程封闭假定与过程的简化假定,求解雷诺方程,可从理论上计算搅拌槽内各点的速度。对槽内各点的时均速度与脉动速度数据加以处理,可获得搅拌槽内的流型、速度分布、剪切速率分布、能耗速率分布等重要的流体力学特征量。

1.2.1 流型

搅拌槽内的流型取决于搅拌方式、桨叶、槽、挡板等的几何特征,流体性质、转速等因素。在一般情况下,搅拌轴在槽中心安装,搅拌将产生三种基本流型。

(1) 切向流

在无挡板槽内,流体的流动平行于搅拌桨所经历的路径,即打旋现象,见图1-5。出现这种流型时,流体主要从桨叶排向周围,卷吸至桨叶区的流体量甚小,垂直方向的流体混合效果很差。

(2) 轴向流

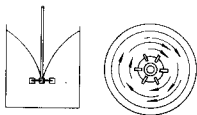


图 1-5 切向流

液体进入桨叶并排出，沿着与搅拌轴平行的方向流动，见图 1-6，轴向流起源于流体对旋转叶片产生的升力的反作用力。

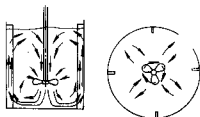


图 1-6 轴向流

(3) 径向流

液体从桨叶以垂直于搅拌轴的方向排出，沿半径方向运动，然后向上、向下输送，见图 1-7，桨叶的圆盘是产生径向流的主要原因。

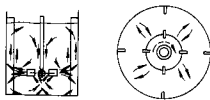


图 1-7 径向流

上述三种流型，通常可能同时存在。其中，轴向流与径向流对混合起主要作用，但切向流应加以抑制，可加入挡板削弱切向流，增强轴向流与径向流。

在无挡板槽中，搅拌桨偏心安装可以有效地进行搅拌，见图 1-8。而在大型油槽中，搅拌桨采用侧面插入方式，可获得较好的槽内整体循环，见图 1-9，若采用侧面射流混合方式，可得到相似的效果，见图 1-10。在搅拌高粘度流体时，液体处于层流运动状态，其流型见图 1-

11，并且许多高粘度流体具有剪切稀化性质，搅拌转速较低时，只有桨叶周围的流体被搅动，而远离桨叶的流体仍处于静止状态，见图 1-12 [A]。与一般流体力学相似，搅拌槽内流体的流动状态（层流、湍流、过渡流）也是用雷诺数来量度的，搅拌雷诺数由下式定义：

$$Re = \frac{\rho D^3 n}{\mu} \quad (1-1)$$

式中 D ——搅拌叶轮直径，m；
 ρ ——物料密度， kg/m^3 ；
 μ ——物料粘度， $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ ；
 n ——搅拌转速，1/s。

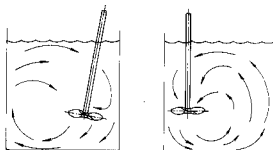


图 1-8 搅拌桨偏心安装时的流型

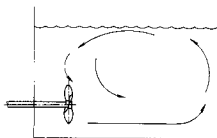


图 1-9 搅拌桨侧面插入时的流型

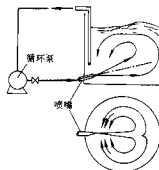


图 1-10 侧面射流混合时的流型

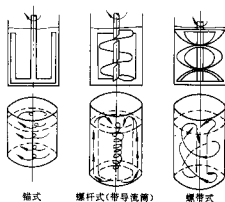


图 1-11 层流时的流型

此处用桨叶的叶端速度(nD)代替一般 Re 数中的流体速度, 因而此 Re 称搅拌雷诺数, 对于标准六直叶涡轮桨, 当 $Re < 10$ 时槽内为层流, $Re > 10^4$ 为湍流, Re 在 $10^3 \sim 10^4$ 之间为过渡流。图 1-12 为八直叶涡轮桨搅拌槽内流动状态随 Re 数的变化情况。

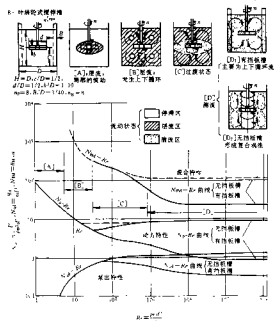


图 1-12 八片直叶涡轮的流型与特性曲线

1.2.2 槽内的速度分布

搅拌槽内的流动属于三维非定常流, 其速度分布也是二维的, 搅拌槽的几何条件、操作条件和物性决定了速度分布, 图 1-13 为八片直叶涡轮以 $72\pi/\text{min}$ 的转速转动

时在槽内产生的三维速度分布图。图中 v_z 、 v_t 、 v_r 分别为流体的轴向、切向、径向分速度。

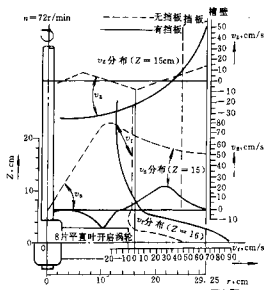


图 1-13 搅拌槽内的三维速度分布

在搅拌槽内, 桨叶附近的区域是剪切与混合的主要区域, 该区域的速度分布是衡量桨叶性能的重要参数, 图 1-14 与图 1-15 表示了六叶透平桨在桨叶区产生的时均速度分布与脉动速度分布。

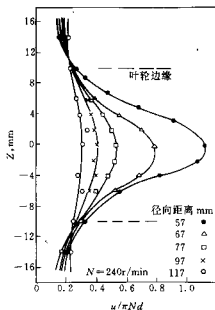


图 1-14 桨叶区的时均速度分布

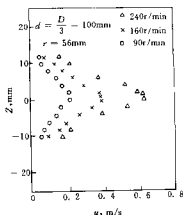


图 1-15 桨叶区的脉动速度分布

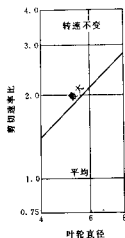


图 1-17 最大和平均剪切速率与桨径的关系

1.2.3 剪切速率分布及其对槽内混合的影响

剪切速率是速度随位置的变化率，由速度分布图很容易转化成剪切速率分布图。对于剪切速率，最重要的是其最大值与平均值，它们主要由转速与桨径所决定，转速增大，最大剪切速率与平均剪切速率均增大，见图 1-16；当转速一定时，桨径增大，最大剪切速率增大，而平均剪切速率不变，见图 1-17。

剪切速率的分布对混合有重要影响，当两种物料混合时，必须通过剪切把物料分散，如均相湍流扩散、气泡或液滴的剪切分散，才能实现物料微小尺度上的混合。在许多情况下，凝并与分散同时并存，这是由于槽内存在剪切速率分布，桨叶区剪切强，物料被分散，循环区剪切弱，分散的物料又发生凝并，最后达到平衡，槽内的液滴、气泡等形成一定的大小分布。

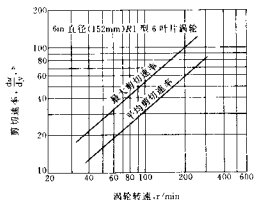


图 1-16 最大和平均剪切速率与转速的关系

1.2.4 能耗速率的分布及其对能内混合的影响

消耗一定功率的搅拌，其能量提供槽内物料进行剪切与循环，但槽内各处的能量耗散速率相差很大，桨叶区的能耗速率往往是循环区的几十倍，如图 1-18 所示，图中的曲线为能耗速率的等值线，其所标数值为实际能耗与槽内平均能耗的比值，从这些数值可以看出能耗速率的相对值及其分布。能耗速率大的地方，其混合程度高

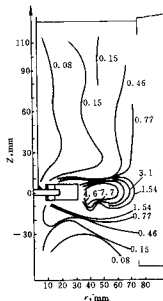


图 1-18 搅拌槽内的能耗速率分布

烈,这对加料位置的选择有重要的指导意义,例如快速反应,其加料位置应选在能耗速率大的桨叶区。另外,在混合过程模拟中,能耗速率分布是从混合初始条件计算混合结果的必要参数,具有重要的理论意义。

1.3 搅拌效果的度量尺度与影响搅拌效果的因素

依操作目的不同,搅拌效果有不同的表示法,常用的表示法列于表 1-1。在实际中,通过实验研究,中试或生产数据分析,整理出搅拌效果与搅拌参数间的关系式。但根据搅拌效果的不同表示法或不同的操作条件,可以得到很多而彼此结果差异很大的关系式。因此,对于给定混合过程,搅拌效果的表示法和主要操作因素的确定,应该特别审慎。选出的关系式的实验条件要尽可能符合给定条件,才能使设计的搅拌装置满足操作目的和经济性。否则,所得结果不一定满足过程要求,至少使过程的经济性

变差。

表 1-2 列出了影响搅拌效果的各种因素,其中流动状态及物性对各搅拌操作的影响程度见表 1-3。利用此表,可以初步找出影响给定操作的主要因素,为选择搅拌器型式和操作参数提供了方向。

1.4 搅拌过程中的特征量及其意义

搅拌过程中的特征量有功率准数 N_p 、流量准数 N_Q 、无因次混合准数 N_{m1} 、 N_F 由式 (1-2) 定义:

$$N_p = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (1-2)$$

式中 P ——搅拌功率, W;

n ——转速, 1/s;

ρ ——物料密度, kg/m³;

D ——桨叶直径, m。

从桨叶排出的高速液流,卷吸周围的液体,形成循环

表 1-1 操作目的和搅拌效果表示法

操作目的	搅拌物系	搅 拌 效 果 表 示 法
均匀混合	调和均相互溶液系	混合时间 θ_m 或 $N_{m1} = n \cdot \theta_m$; 混合指数
非均相分散	液-液相系	均匀分散(乳化)时间 θ_m ; 分散相液滴的比表面积 a , 或滴径分布, 或平均滴径 $\bar{d}_v$
	气-液相系	均匀分散时间 θ_m ; 气泡的比表面积 a , 或气泡平均直径 $\bar{d}_v$ 和气泡直径分布
	固-液相系	悬浮状态, 悬浮临界转速 n_c (n_{lc}); 悬浮固液浓度或比表面积 a
非均相传质	溶解(固-液相系)	溶解速度或平均溶解速度 以固粒表面积为基准的液膜传质系数 k_L , 总容积传质系数 K
	萃取(液-液相系)	萃取速度, 萃取效率, 液滴比表面积 a ; 总容积传质系数 K_V 或液滴内(外)表面为基准的液膜传质系数 k_L
	吸收(气-液相系)	吸收速度, 气泡比表面积 a ; 总容积吸收系数 K_V , 膜传质系数 k_L , k_i
传 热	固-液间	传热速率 Q kcal/h, 单位容积传热速率 Q_V kcal/m ³ ·h 液膜传热系数 k_L , 总传热系数 K

表 1-2 影响搅拌效果的因素

	主 要 影 响 因 素
流动状态	流型, 对流传速率, 潮流扩散, 剪切流
物 性	粘度或粘度差, 密度或密度差, 分子扩散系数、粒径; 表面张力, 比热、导热系数、非牛顿流体之流变性
操作条件	叶轮型式、转数; 溶质加入量、加入速度、分散状况和加入位置
几何因素	连续式或间歇式; 溶质加入方法; 槽、叶轮及槽内构件(挡板、导流筒)的几何形状, 相对尺寸和安装方式

表 1-3 流态及物性对各搅拌操作的影响程度^[1]

搅拌操作目的		流动状态			物 性							
		连续相		相对速度	粘度	粘度差	密度	密度差	扩散系数	表面张力	导热系数	粒径分布及浓度
		循环速率	湍流扩散									
均相系混合	低粘度液 高粘度液	● ○	○ ●	○ ●	○ ●	○ ●	○ ●	○ ●	○ ●	○ ●	○ ●	○ ●
分散	液-液相系 气-液相系	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
固体悬浮 (固-液相系)		○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
溶解 (固-液相系)		○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
结晶 (固-液相系)		○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
萃取 (液-液相系)		○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
吸收 (气-液相系)		○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○
传热 (固-液相系)		○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○

注：1. 表中○●表示该因素的影响程度，○>●；2. ●对于萃取、结晶等操作，液流流动程度影响还不清楚。

流，因此流量准数 N_Q 可进一步分为排出流量准数 N_{Qd} 与循环流量准数 N_{Qc} ，分别由式 (1-3)、(1-4) 定义，它们之间的关系^[2]见式 (1-5)。

$$N_{Qd} = \frac{Q_d}{nD^3} \quad (1-3)$$

式中 Q_d ——桨叶排出流量， m^3/s 。

$$N_{Qc} = \frac{Q_c}{nD^3} \quad (1-4)$$

式中 Q_c ——循环流量， m^3/s 。

$$N_{Qc} = N_{Qd} [1 + 0.16 \{ (T/D)^2 - 1 \}] \quad (1-5)$$

式中 T ——搅拌槽直径， m 。

混合时间是达到规定的混匀标准时所需的时间，无因次混合时间 N_{M} 是混合时间 θ_M 与转速 n 的乘积，即式 (1-6)，其物理意义是达到规定的混匀标准时所需的搅拌器转数。

$$N_M = \theta_M \cdot n \quad (1-6)$$

N_F 、 N_Q 、 N_{M} 随搅拌雷诺数 Re 的变化关系见图 1-12，在湍流区 ($Re > 2000$)， N_F 、 N_Q 、 N_{M} 基本上保持为常数，因此，它们可以作为搅拌过程中的特征量。通常， N_F 越小， N_Q 越大， N_{M} 越小，则搅拌性能越好。

1.5 宏观混合与微观混合

两种物料加入搅拌槽后，其混合机理为主体扩散、湍流扩散和分子扩散。刚加入的物料先形成大尺度的涡旋集团，在湍流拉伸、剪切作用下，大涡旋分裂成较小尺度的涡旋，能量从大涡旋传递到小涡旋，小涡旋则向更小

的涡旋传递，直到最小尺度即 Kolmogoroff 尺度的涡旋，最后因粘性应力的作用耗散为热。这个过程表明，混合首先将从大尺度对流运动开始，继之以小尺度，直到最小尺度的集团的形变与分子扩散，最后达到分子水平上的均匀。

对混合现象的认识，1953 年是一个转折点，Danckwerts 在这一年发表了三篇著名论文^[3,4,5]，提出停留时间分布、混合标准、分隔尺度和分隔强度。随后一段时间，Danckwerts 以及 Krevier、Zwietering 等提出两种混合：宏观混合与微观混合；两种流体：宏观流体与微观流体；两种极限混合状态：最大混合与完全分隔。这些先驱者的研究工作，奠定了混合理论的基础。从那时开始，人们在理论和实验两方面对宏观混合与微观混合进行了大量的研究，并取得了很大的进展，但直到八十年代末，对宏观混合与微观混合的概念一直众说纷纭，模糊不清，在研究中，大体上倾向于用停留时间分布描述宏观混合，用分隔指数描述微观混合。九十年代初，对宏观混合与微观混合的认识有了进一步发展^[7,8]，其概念也从定性转为定量描述。

在搅拌槽中，转动的叶轮将能量传给液体物料，产生高速液流，又推进其周围的流体，形成全槽流体的流动，这种宏观流动产生了全槽范围内的宏观混合，其混合尺度是很大的。叶轮推动的高速液流在流动时，与周围静止液体的界面处，存在较大的速度梯度，液体将受到强烈的剪切，形成大量旋涡，旋涡又迅速向周围扩散，造成局部范围内的物料对流动从而形成液体的湍流扩散。涡旋集团的尺寸在运动中又不断减小，直至达到 Kolmogoroff 尺度，这也就是宏观混合的最大限度。

微混混合是指分子尺度上的混合, 它的最终实现只能依靠最小尺度微团间的分子扩散, 因此分子扩散是最终实现微混混合的控制因素, 当然分子扩散在宏观混合中已经存在着, 只是因为物料团块尺度大, 分子扩散作用并不明显, 湍流运动使料液的微团微团尺寸不断地减小, 从而加剧了分子扩散的进行, 最后达到了分子水平上的混合。

宏观混合与微混混合虽然同时存在, 但其相对的作用取决于设备条件、操作条件和料液的物理化学性质, 低粘度的湍流 ($Re > 10^4$) 搅拌中, 宏观混合是主要的, 高粘度的层流 ($Re < 10$) 搅拌中微混混合是主要的, 在过渡区二者都很重要。

随着湍流理论的发展, 对宏观混合、微混混合及其相互作用的研究将会更加深入。

参考文献

- [1] 卜羽美次, 化学工场, 20, (2)31(1976).
- [2] 山本一夫、水田进治, 改订搅拌装置, 别册化学工业, 23, 2 (1979).
- [3] Danckwerts, P. V., Research, 355(1953).
- [4] Danckwerts, P. V., Chem. Eng. Sci., 2, 1(1953).
- [5] Danckwerts, P. V., Appl. Sci. Res., A3, 279(1953).

- [6] Zwietering, Chem. Eng. Sci., 11, 1(1959).
- [7] Geisler, R., Intern. Chem. Eng., 31, 4, 642(1991).
- [8] 蔡志武、戴千策, 华东理工大学学报, 19, (5)529(1993).

2 桨叶的分类及其特性参数

搅拌桨叶是搅拌混合中的关键部件。由于要求混合的物系千差万别, 混合的要求也各有不同, 因此就需要有合适的桨叶和与之相适应的操作条件。

搅拌桨叶形式和种类相当多, 这里只介绍各类典型的结构形式及其性能, 对桨叶的具体选用, 将按其操作的对象和特点分别予以介绍。

2.1 按流动形态分类

2.1.1 轴向流叶轮

此类叶轮的共同特点是流体通过叶轮轴向排出为主, 槽内流型如图 1-6 所示。

(1) 推进式叶轮

此类类型, 通常用于低粘度的流体中, 其结构图见图 2-1, 亦称为船用推进式叶轮, 化工部部颁标准, HG 5-222-66) 叶轮的 $S/D=1\sim 2$, 常用的 $S/D=1$, 叶片数

表 2-1 典型叶轮的泵出流量参数

叶轮型式	叶片数 n_p	W/D	D/T	C/T	S/T	挡板数 n_B ($B=0, 10$)	N_{00}	参考文献
船用推进式	3	0.1	1/3	0.5	1	3	0.45*	* 平均值
	3		0.2~0.6	0.4~0.8	1	4	0.42	$D=490\sim 320$
	3	0.1	0.5		1	导流筒	0.52	
折叶桨式	8	0.1	0.5		倾角 45°	无	0.31	
	8	0.1	0.5		倾角 45°	8	0.87	
	2	0.1	1/3	0.25	倾斜角	4	0.713	
	3	0.1	1/3	0.25	45°	4	0.782	
	4	0.1	1/3	0.25	45°	4	0.852	
	6	0.1	1/3	0.25	45°	4	0.994	

注: 表中 D , C , W , n_p , S ——分别为叶轮直径, 安装高度, 叶片宽度, 片数及螺距; T ——槽径; B , n_B ——挡板宽度, 挡板数。

表 2-2 中心安装的推进式叶轮在不同安装条件下的 N_{00} 值^[2]

槽直径 m	有挡板槽		无挡板槽		其他实验条件
	$\frac{C}{T} = \frac{3}{8}$	$\frac{C}{T} = \frac{1}{2}$	$\frac{C}{T} = \frac{3}{8}$	$\frac{C}{T} = \frac{1}{2}$	
0.32	90	91	121	130	$\frac{D}{T} = \frac{1}{4}$, $\frac{H}{T} = 1$, 挡板 $\frac{B}{T} = 0.1$, 4 块
0.54	100	92	177	176	电导法测定 θ_0

注: 表内 H ——槽内液层高度 (m), 其余符号同表 2-1。

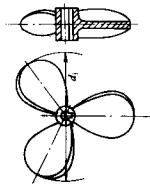


图 2-1 推进式叶轮

$n_p = 3$, 操作中常用的叶端速度为 $7 \sim 10 \text{ m/s}$, 最高可达 15 m/s , $D/T = \frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$, $H/T = 1 \sim 1.2$, $C = D$. 此处 D 为桨径, S 为叶片的螺距, n_p 为叶片数, T 为搅拌槽直径 m , C 为桨叶离槽底的距离 m .

推进式叶轮的 N_p 值可由 N_p-Re 的关系曲线求得,

见图 2-2。

湍流区操作时, 推进式桨叶的排出流量准数 N_{oi} 与其结构参数的关系可见表 2-1。

混合准数 N_{mi} 在湍流区为一常数, 但其具体数值与实验装置的结构参数和采用的测量方法有关^[1]。

表 2-2 给出了在确定条件下的 N_{mi} 值^[3]。

(2) 斜叶涡轮

图 2-3 给出了斜叶涡轮桨叶的结构示意图, 图中 (a) 为折叶桨或 45° 斜桨, 图中 (b) 为一六叶折叶开式涡轮, 使用较多的是 4 叶, (c) 为一盘式折叶涡轮, 通常是由六个叶片结成。涡轮桨的叶片数最多可达 8 片, 若再增加其性能亦无变化, 但制造却复杂得多。

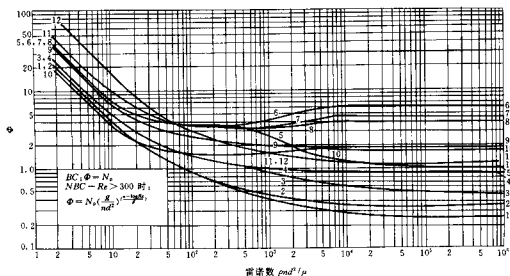
常用的 2~4 叶涡轮所采用的参数为:

$$D/T = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}, \text{ 最常用的为 } \frac{1}{3},$$

$W/D = \frac{1}{4}$ $C/D = 0.8 \sim 1.5$, 斜角为 45° , 叶端线速度为 $1.5 \sim 7 \text{ m/s}$, 常用的为 $3 \sim 7 \text{ m/s}$ ^[2]。

图 2-2 给出了 8 叶折叶涡轮的 N_p-Re 关系曲线。

永田进治^[4]提出无挡板条件下二叶桨或折叶桨计算

图 2-2 各种叶轮的 N_p-Re 曲线

曲线 1. 推进式 $S=d$ NBC

曲线 2. 推进式 $S=d$ BC

曲线 3. 推进式 $S=2d$ NBC

曲线 4. 推进式 $S=2d$ BC

曲线 5. 六直叶盘式涡轮 NBC

曲线 6. 六直叶盘式涡轮 BC

曲线 7. 六弯叶涡轮 BC

曲线 8. 六弯叶涡轮 BC

曲线 9. 八折叶涡轮 ($\theta=45^\circ$) BC

曲线 10. 桨式 BC

S ——叶片螺距; BC——有挡板槽 ($n_b=4$, $B=0.1D$); NBC——无挡板槽

曲线 5, 6, 7, 8 $d+1 \leq b \leq 20 \times 5 \times 4$

曲线 10 $b/d=1/6$

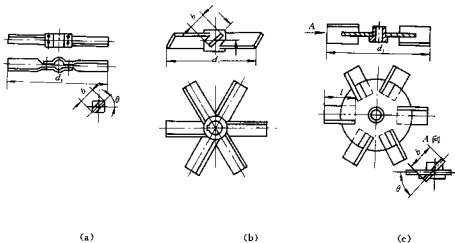


图 2-3 斜叶涡轮桨

N_p 的计算公式:

$$N_p = \frac{A}{Re} + B \left(\frac{10^2 + 1.2 Re^{0.66}}{10^2 + 3.2 Re^{0.66}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{H}{T} \right)^{(0.35 + \frac{W}{T})} \sin \theta^{0.2} \quad (2-1)$$

$$\text{式中 } A = 14 + \left(\frac{W}{T} \right) \left[670 \left(\frac{D}{T} - 0.6 \right)^{2.8} + 185 \right] \times \left[1.3 - 4 \left(\frac{W}{T} - 0.5 \right)^2 - 1.14 \frac{W}{T} \right]$$

$$B = 10$$

$$P = 1.1 + 4 \left(\frac{W}{T} \right) - 2.5 \left(\frac{D}{T} - 0.5 \right)^2 - 7 \left(\frac{W}{T} \right)^4$$

当 Re 很小时式 (2-1) 右端的第二项可忽略, Re 很大时则第一项可以忽略。

在全挡板条件下, 应先求出临界 Re_c , 再将其代入式 (2-1) 中:

对二叶片 $\theta = 90^\circ$

$$Re_c = \frac{25}{W/T} \left(\frac{W}{T} - 0.4 \right)^2 + \left[\frac{W/T}{0.11 \left(\frac{W}{T} \right) - 0.0048} \right]$$

(2-2)

$$\theta < 90^\circ \quad Re = 10^{(1 - \sin \theta)} Re_c$$

根据北京化工学院的研究^[3]当槽径小于 1.2m, $D/T < 0.5$ 无挡板条件下式 (2-1) 的计算值与实际相符, 槽径大于 1200mm 时, 其最大偏差值可达 100%, 但在全挡板条件下, $D/T = 0.35 \sim 0.5$, $W/T = 0.1 \sim 0.25$, $\theta = 45^\circ$ 折叶桨其偏差小于 20%。

式 (2-1) 用于多叶桨的条件是总叶片面积与二叶桨相等, 液体粘度小于 100cP。

此类桨叶的送液特性可见表 2-1。

(3) 长薄叶螺旋桨

这是一种较新型的桨叶, 与前二种相比其特点是:

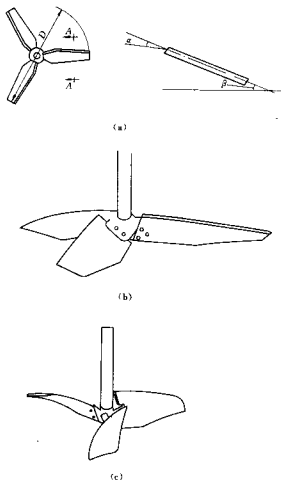


图 2-4 长薄叶螺旋桨

(a) HPM20; (b) A310; (c) CBY