

第3章 液体的搅拌

3.1 概述

工业背景([录像](#))

3.1.1 搅拌的目的([录像](#))

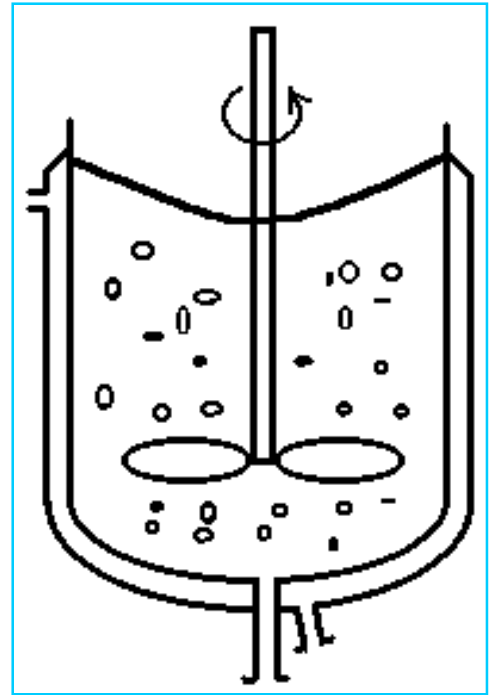
1. 互溶液体的均匀混合
2. 多相物体的分散和接触

气泡分散于液体中

液滴分散于不互溶液体中

固体颗粒悬浮于液体中

3. 强化传热

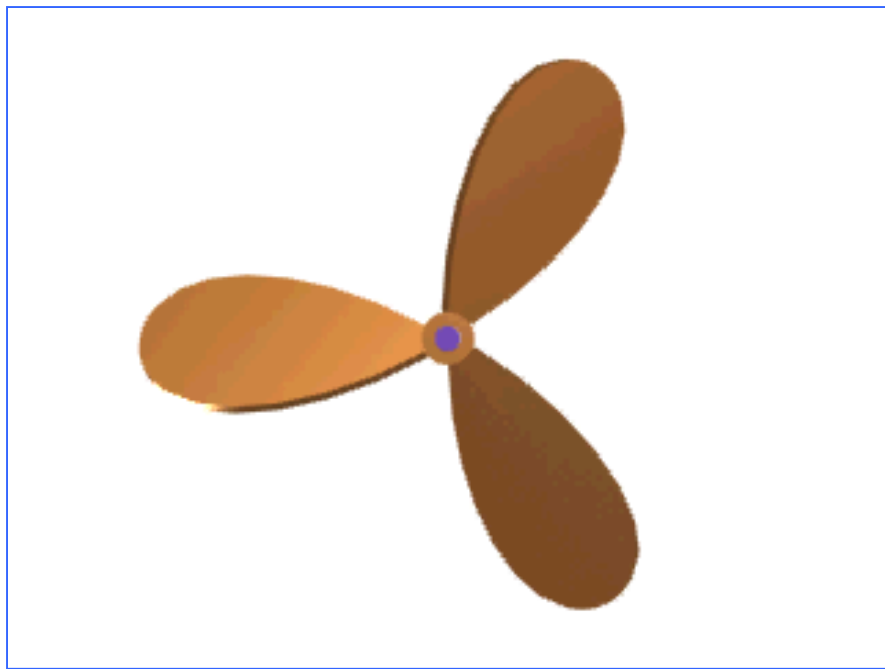


([动画](#)) ([录像](#))

3.1.2 搅拌器的类型

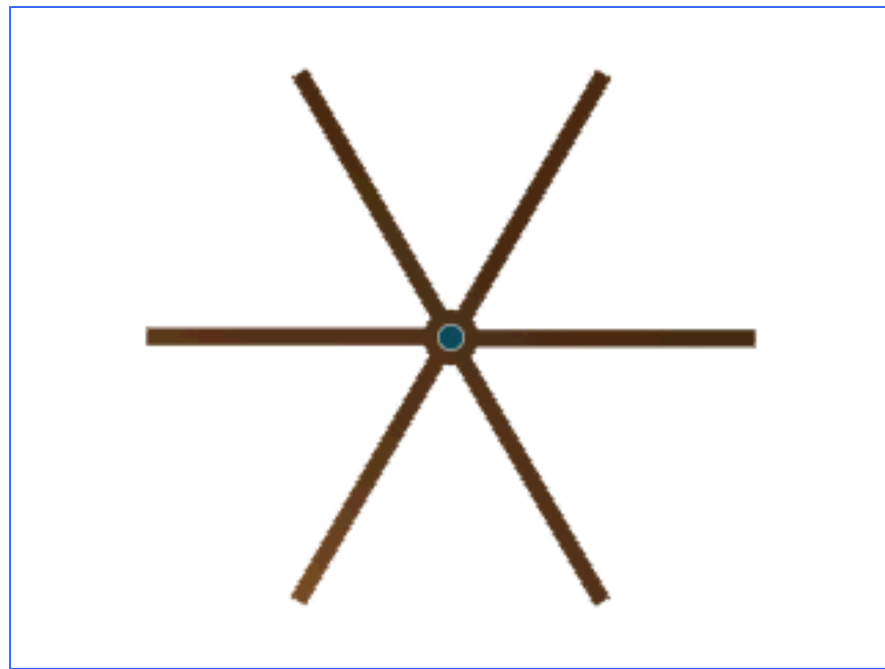
按工作原理可分两大类：

旋桨式：



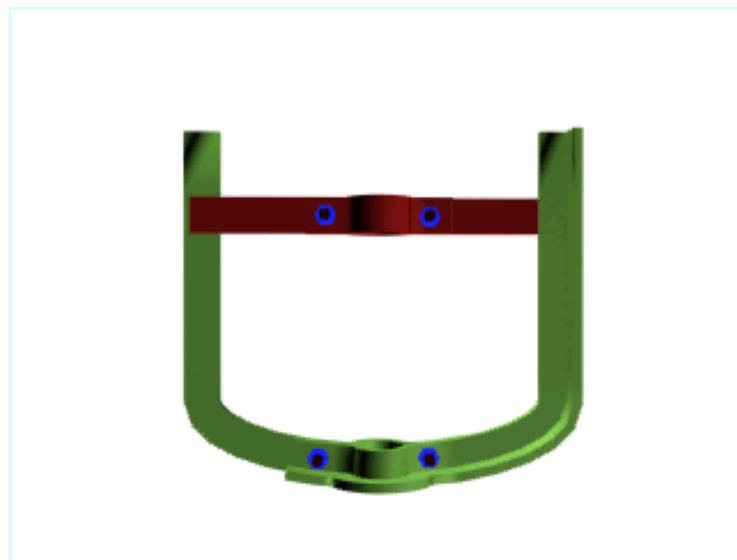
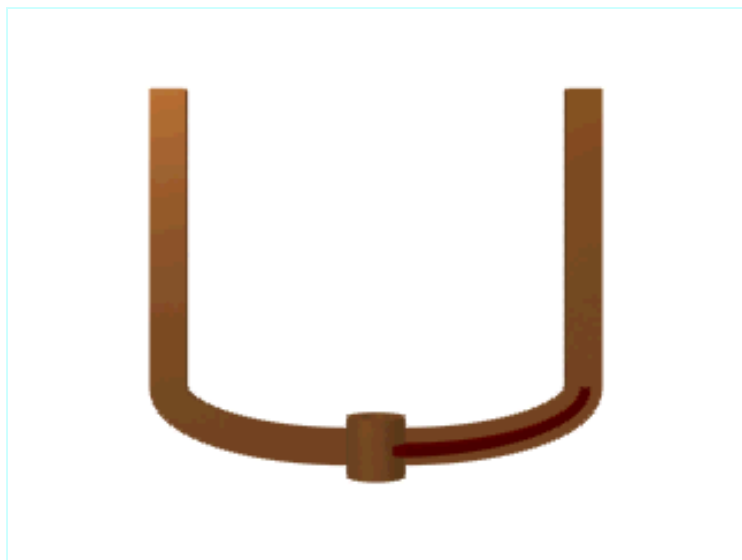
旋桨式

涡轮式：



平直叶

桨式：



锚式



框式

螺带式

3.1.3 混合效果的度量

1. 调匀度 I

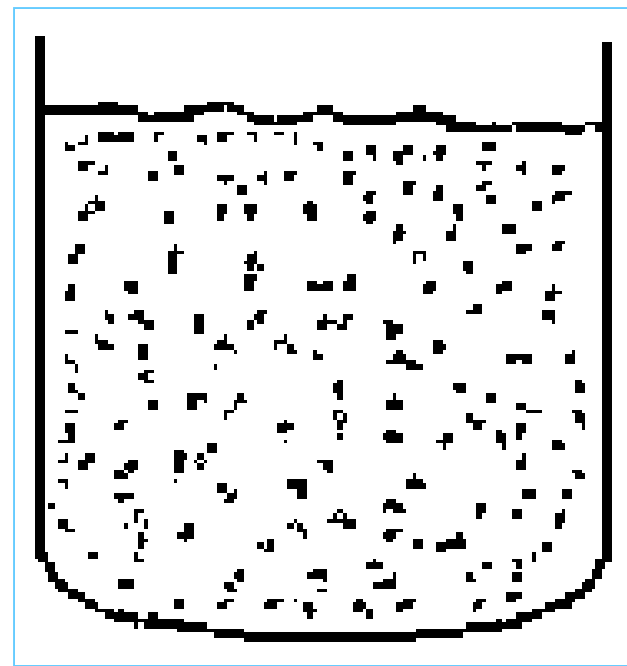
$$C_{A0} = \frac{V_A}{V_A + V_B}$$

$$I = \frac{C_A}{C_{A0}} \quad \text{当 } C_A < C_{A0}$$

$$I = \frac{1 - C_A}{1 - C_{A0}} \quad \text{当 } C_A > C_{A0}$$

平均调匀度

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i$$



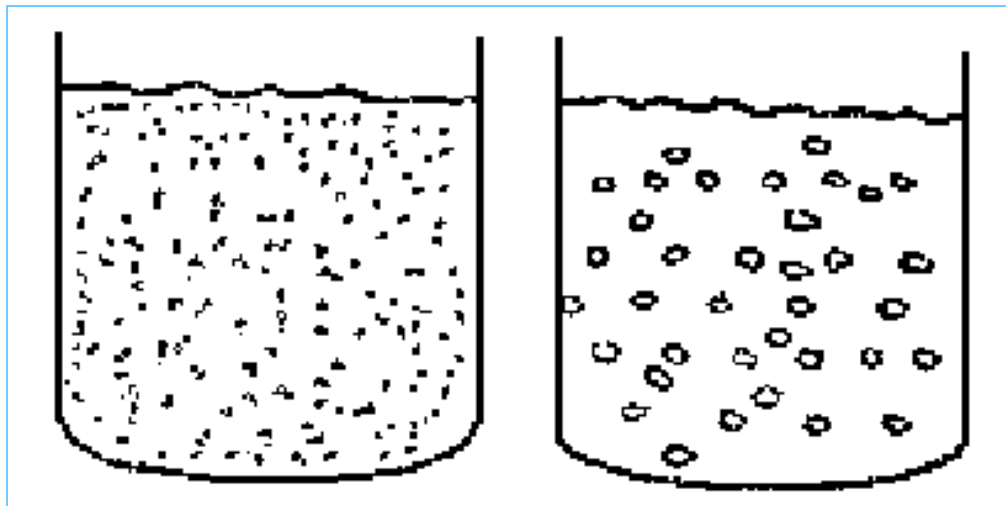
2. 分隔尺度

调匀度与取样尺寸有关

气泡直径

液滴直径

颗粒直径



3. 宏观混合与微观混合

设备尺度混合——总体流动

旋涡尺度混合——剪切力场

（液滴大小分布、气泡大小分布）

分子尺度混合——分子扩散

3.2 混合机理

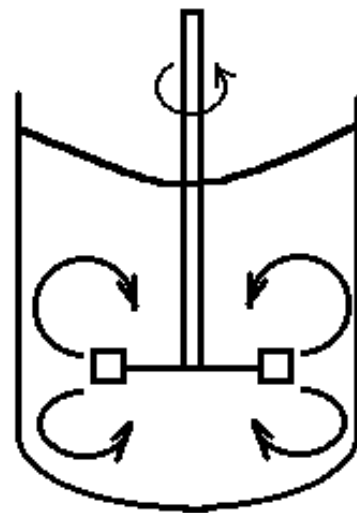
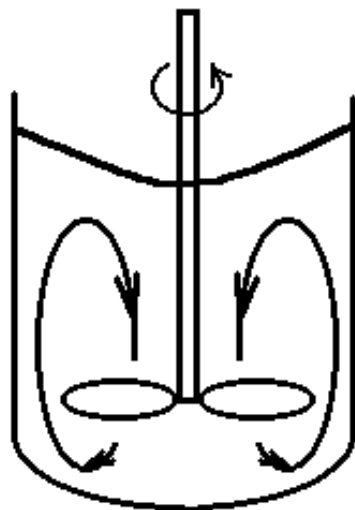
3.2.1 搅拌器的两个功能

1. 总体流动

——将流体输送到搅拌釜内各处大尺度宏观混合

2. 强剪切或高度湍动

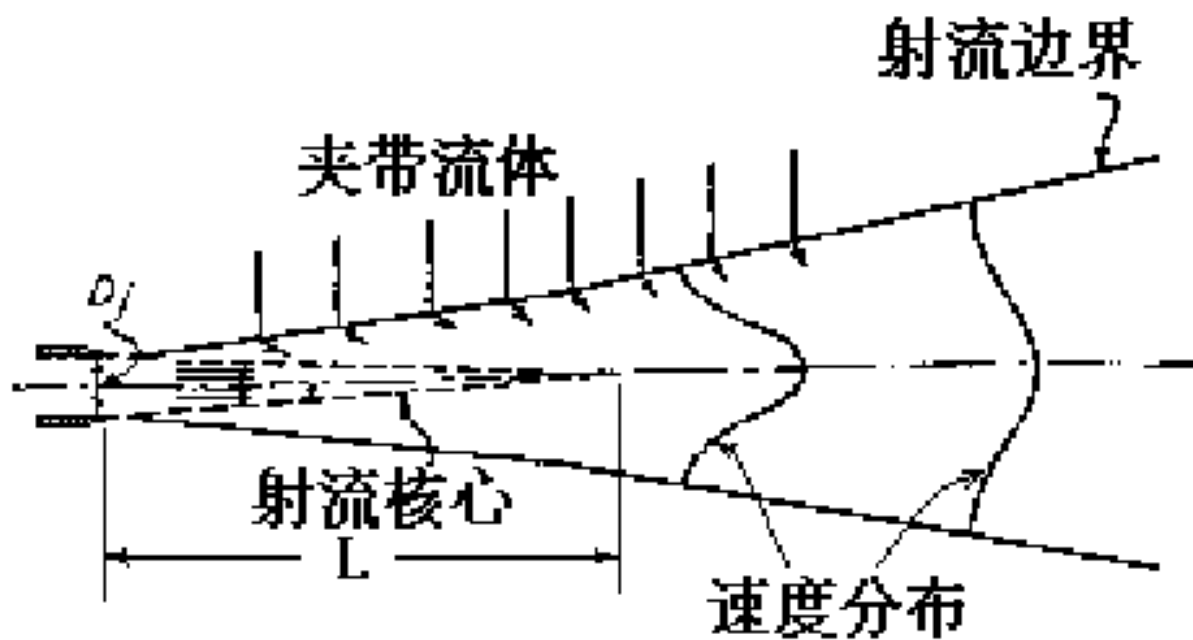
——产生剪切力场或旋涡小尺度宏观混合，促进微观混合



注意：

流体不是靠桨叶直接打碎的，而是靠高剪切力场撕碎的。

射流现象



作用 ①夹带
②剪切, 脉动

3.2.2 均相液体的混合机理

低黏度液体的混合

总体流动+高度湍动

最小液团尺寸为 $10\mu\text{m}$ 量级

高黏度及非牛顿流体的混合

多处于层流状态

—混合机理主要依赖于充分的总体流动

3.2.3 非均相物系的混合机理

1. 液滴或气泡的分散



界面张力是抗力， σ 大不易分散

稳定时，液滴破碎与合并达到动态平衡

液滴大小分布不均的原因：

叶片附近—剪切强度大、液滴小

边角处—剪切强度小、液滴大

保持液滴均匀的措施：

①尽量使釜内湍动程度均匀

②加少量保护胶或表面活性剂，使液滴难以合并

2. 固体颗粒的分散

细颗粒——打散颗粒团聚体

粗颗粒——全部颗粒离底悬浮

操作转速应大于悬浮临界转速

3.3 搅拌器的性能

3.3.1 常用搅拌器的性能

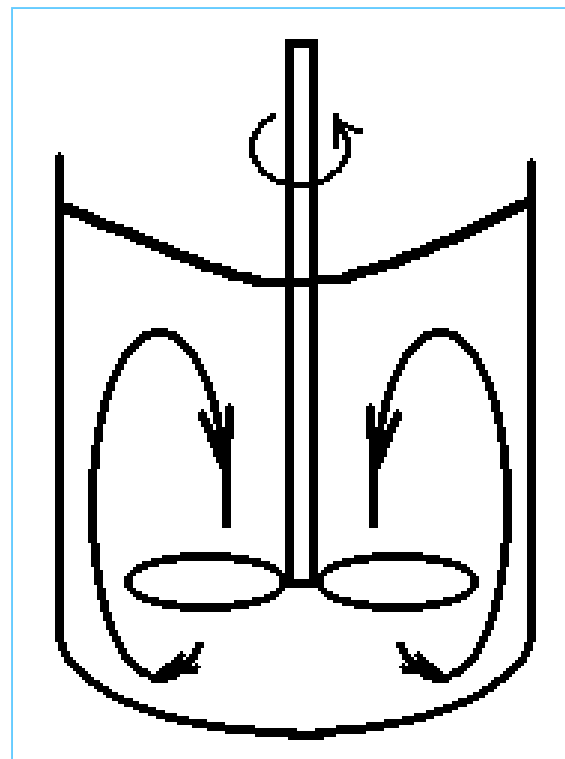
1. 旋桨式搅拌器([录像](#))

q_v 大, H 小, 轴向流出

叶片端速度5~15m/s

适于低黏度液体

$\mu < 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$



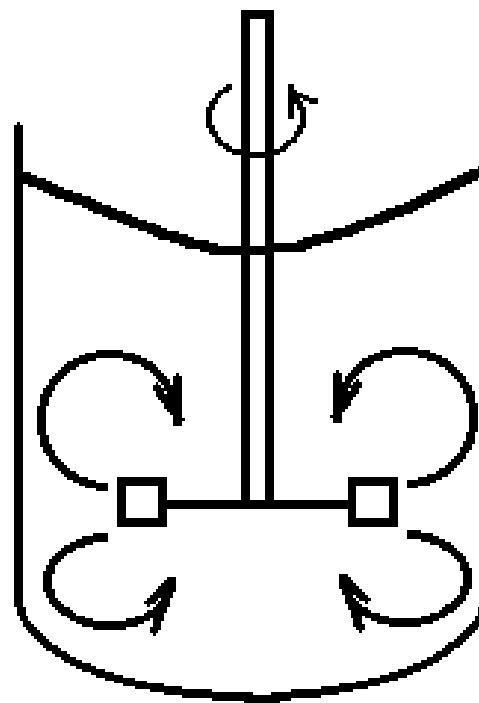
2. 涡轮式搅拌器([录像](#))

q_v 小, H 大, 径向流出

叶片端速度 $3\sim 8\text{m/s}$

适于中等黏度液体

$\mu < 50\text{Pa}\cdot\text{s}$



3. 大叶片低转速搅拌器([录像](#))

锚式、框式、螺带式

端部速度**0.5~1.5m/s**

适于高黏度液体、颗粒悬浮液能防止器壁沉积现象。

4. 性能综述([录像](#))

3.3.2 强化过程的工程措施

不利因素——抑制

有利因素——调动

不利因素

1. 打旋

卷入空气 电机负荷不稳定 液体溢出

2. 流体走短路

q_v 不足 有死区

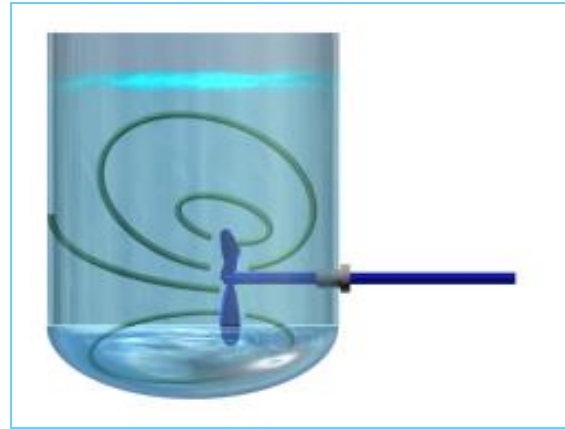
3. 阻力不足

能量加不进、打滑



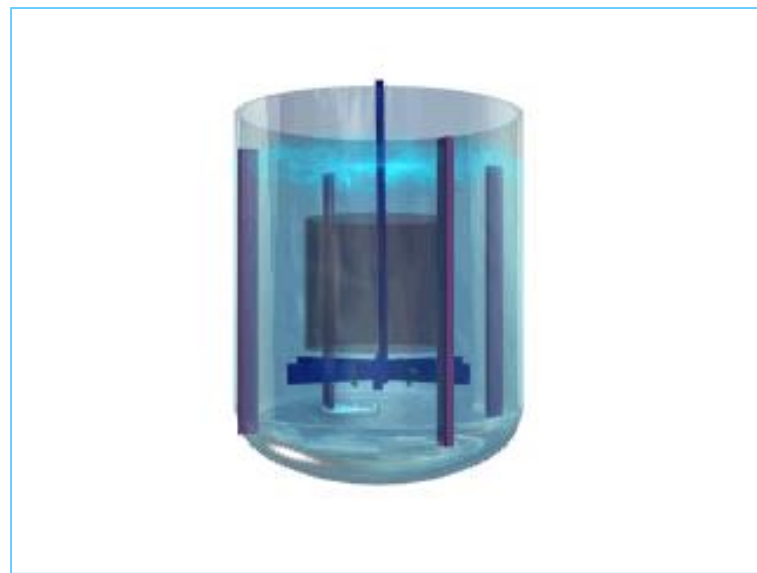
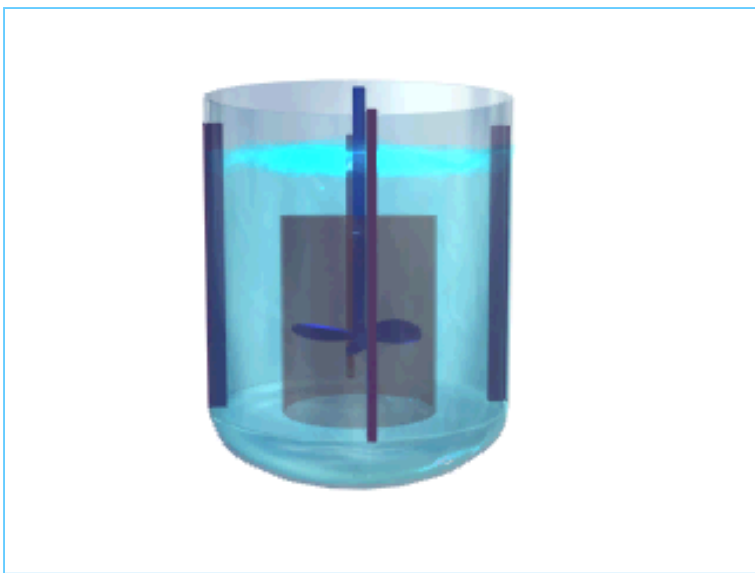
工程措施:

1. 提高转速——提高流量 q_v 、压头 H
2. 加挡板——消除打旋，增加阻力
四块挡板——全挡板 ([录像](#))



3. 偏心安装
——破坏循环回路
的对称性([录像](#))

4. 装导流筒——避免短路及死区



3.4 搅拌功率

3.4.1 混合效果与功率消耗

功率消耗 $P = \rho g H q_v$

增加功率—改善混合效果

能量合理有效利用—与桨形、尺寸选择有关

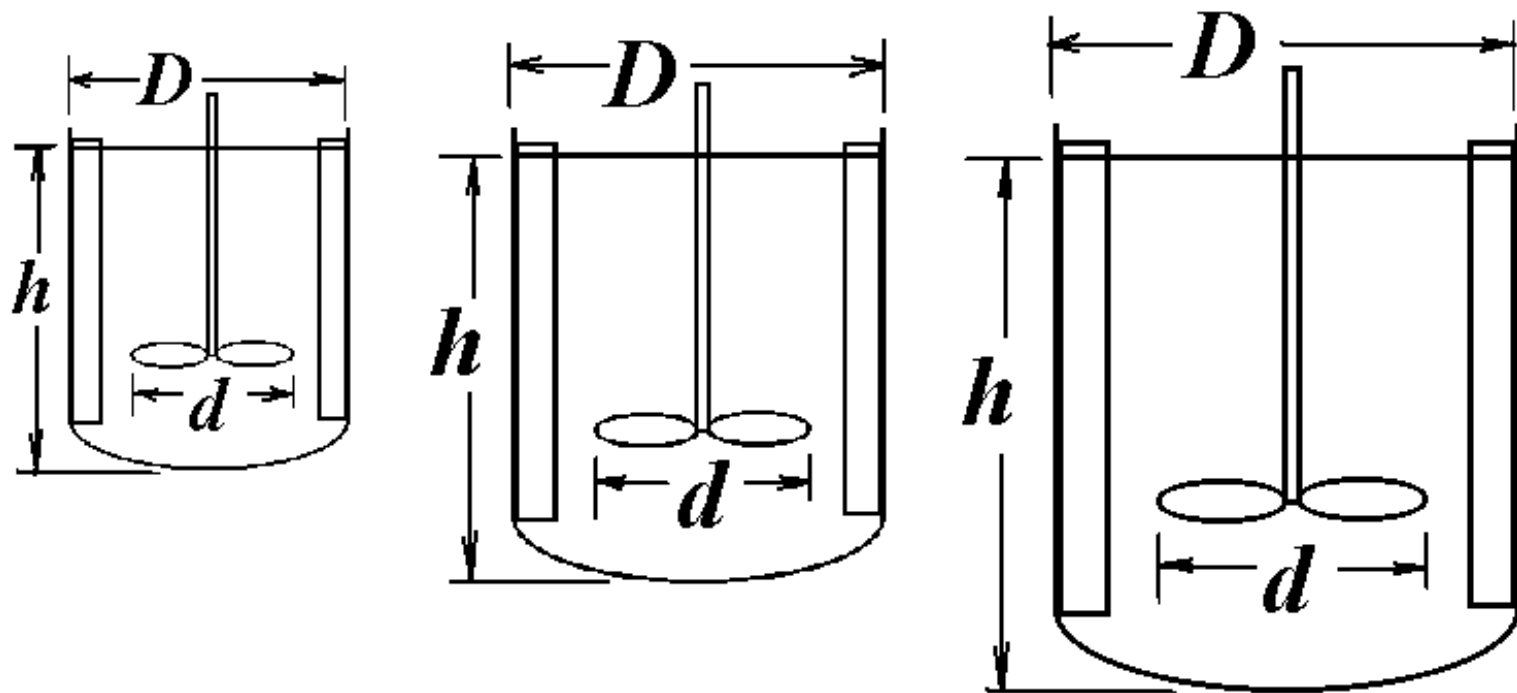
3.4.2 功率曲线([录像](#))

1. 影响因素 $P = f(d, \rho, n, \mu, h, D, \dots)$

无量纲化

$$\frac{P}{\rho n^3 d^5} = \Psi \left(\frac{d^2 n \rho}{\mu}, \frac{h}{d}, \frac{D}{d}, \dots \right)$$

几何相似条件下，对应边成同一比例， $\frac{h}{d}, \frac{D}{d}$ 都相同，

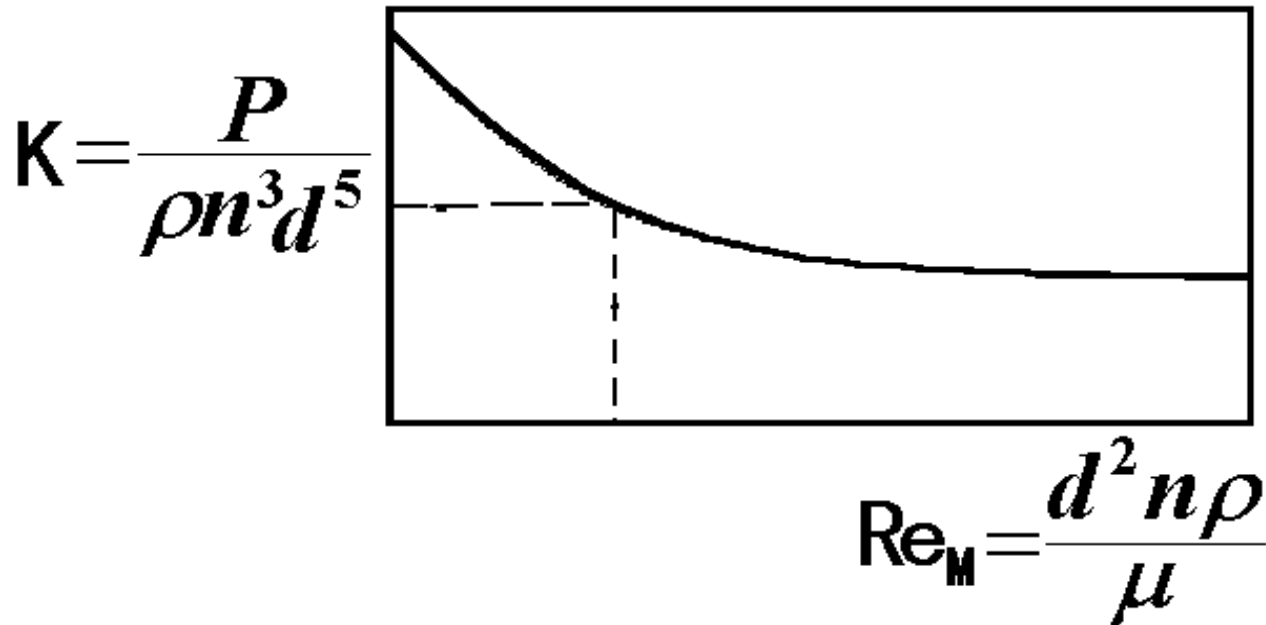


此时，

$$\frac{P}{\rho n^3 d^5} = \Psi \left(\frac{d^2 n \rho}{\mu} \right)$$

2. 功率曲线

功率准数**K**与搅拌雷诺数**Re_M**的关系
实验结果为：



应用条件：几何相似
功率 $P = K \rho n^3 d^5$

3.4.3 搅拌功率的分配

$$P \propto q_v \cdot H \left\{ \begin{array}{l} q_v \propto nd^3 \\ H \propto n^2 d^2 \end{array} \right\} \frac{q_v}{H} \propto \frac{d}{n}$$

当 $P = K\rho n^3 d^5$ 为一定值时 $\frac{q_v}{H} \propto d^{8/3}$ 或 $\frac{q_v}{H} \propto \frac{1}{n^{8/5}}$

小直径，高转速——强剪切力场

大直径，低转速——大流量

转速与直径可根据需要而人为调整

3.5 搅拌器的放大

5.5.1 放大过程（设计）

小试→中试→工业设计，逐级放大
设计中要解决：

1. 搅拌器的类型、搅拌釜的形状

——看工艺过程特点

2. 几何尺寸、转速 n 、功率 P

——看放大准则

几何相似放大——便于用同一根功率曲线

5.2 放大准则

1. $R_{eM} = \frac{\rho n d^2}{\mu}$ 不变, $n_1 d_1^2 = n_2 d_2^2$

2. 单位体积能耗 $\frac{P}{V_0}$ 不变, $P \propto n^3 d^5$, $V_0 \propto d^3$

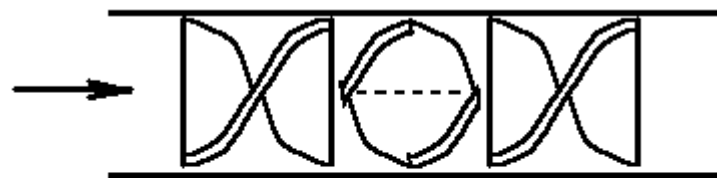
3. 叶片端部切向速度不变, $n_1 d_1 = n_2 d_2$

4. 由经验式 $n_1 d_1^b = n_2 d_2^b$

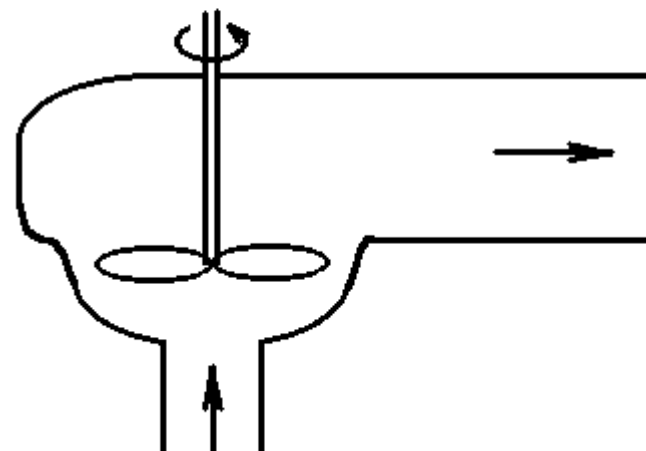
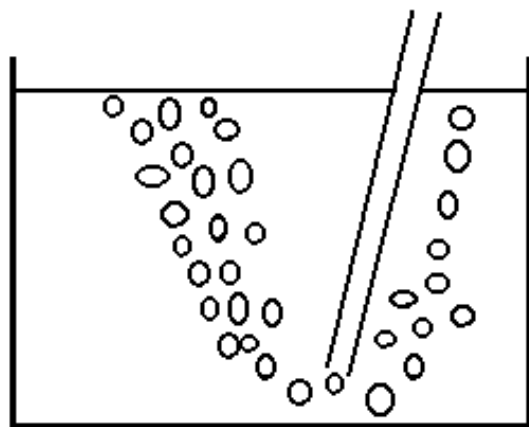
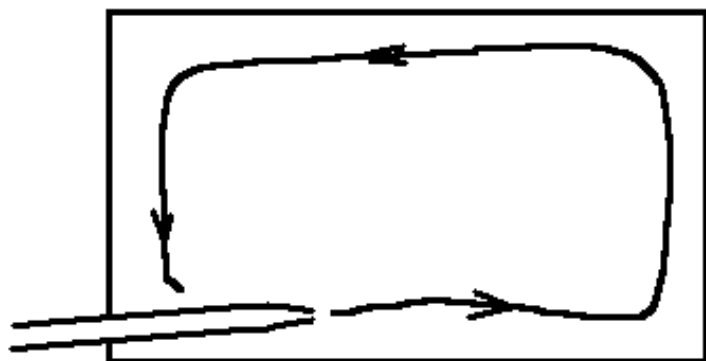
具体要看混合效果, 可能这四个准则都不适用, 须找新的放大规律。

3.6.1 其他混合设备

1. 静态混合器([录像](#))



2. 管道混合器([动画](#))



3. 射流混合器([动画](#))

4. 气流搅拌器([录像](#))

本次讲课习题：

第三章 2~3