

[苏] Э. А. 瓦西利佐夫 B. Г. 乌沙科夫 编著

搅 拌 设 备

参 考 手 册

.7

化 学 工 业 出 版 社

搅 拌 设 备

参 考 手 册

〔苏〕 Э. А. 瓦西利佐夫 编著
B. Г. 乌沙科夫
姚兆生 译

化 学 工 业 出 版 社

本书叙述化学、石油、食品以及其它一些工业部门使用的搅拌罐的结构与设计问题。着重讲解了搅拌罐罐体、搅拌器及搅拌器轴、轴封和传动装置等的设计计算方法；并且阐述搅拌过程的流体力学与传热问题。书中还列出了搅拌罐主要元件的基本系列以及标准零部件的几何特性。

本书供从事搅拌罐设计、制造和运转的广大工程技术人员阅读。

Э. А. Васильцов, В. Г. Ушаков
АППАРАТЫ ДЛЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКИХ СРЕД
СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ
《МАШИНОСТРОЕНИЕ》 1976

搅 拌 设 备

参考手册

姚兆生 译

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₃₂印张10⁷/₈字数241千字印数1—7,110

1983年10月北京第1版1983年10月北京第1次印刷

统一书号15063·3524定价1.15元

前 言

在化工、石油化工和其它工业部门新工艺流程的主要设备产量中，具有搅拌装置的搅拌设备占有相当大的比例。目前在世界各国这种设备是搅拌液态多相系统用的、占主导地位的主要设备。之所以如此，是因为这种搅拌设备各处通用，结构可靠，比起其它型式的搅拌机构来这种搅拌器的效率最高。

机械搅拌机构可以保证搅拌罐整个体积中能量分布均匀和能够很有效地将电能变成机械能。苏联科学院H. M扎沃隆科夫院士和И. Г罗曼科夫通讯院士决定了许多化学和石油化学工业生产的基本发展方向，提出了有关化学反应和化学工艺过程基础研究和这些反应和过程的数学描绘，以及建立新的工程计算方法等许多现代的重大课题〔42〕。

为了完善具有搅拌机构的搅拌设备的结构，已经提出了进一步研究强化流体动力过程、传热与传质过程方法的课题，以及深入研究搅拌紊流状态以及紊流脉动对设备效能的影响的课题。

解决上述各项课题就可以建立统一的计算和选择搅拌设备的方法，并且可以创造搅拌设备全套标准化和通用化，扩大其系列生产，和提高其技术水平、质量与可靠性的条件〔15，16〕。

为了解决这些课题，本手册将搅拌设备现有的选择方法和计算方法做了系统整理加以报道，并给出了最佳设计的推

荐数据，讲解了这种搅拌设备在化工各种单元过程中的应用。

对本手册中所讲述的计算方法的各种意见，发现的印刷错误和进一步改进本手册的建议，请告知出版社。

目 录

第一章 搅拌罐的结构

1. 化工基本过程	1
2. 搅拌罐的用途及其使用范围	2
3. 搅拌罐的主要参数	9
4. 搅拌罐的结构特点	12
5. 立式搅拌罐	14
6. 卧式搅拌罐	35
7. 轻便型搅拌机构	36

第二章 立式搅拌罐的结构元件

8. 搅拌器	39
9. 传动装置	57
10. 密封	72
11. 搅拌罐的壳体	75
12. 搅拌机构的轴	84
13. 内件	85
14. 搅拌罐轴的支承	88

第三章 高速搅拌机构的计算

15. 搅拌机构的流体动力学	90
16. 搅拌功率	117
17. 相互溶解和相互混合的介质	142
18. 分散	171

第四章 低速搅拌机构的设计

19. 搅拌的流体动力学	188
20. 搅拌功率	204
21. 搅拌罐内的换热	211
22. 搅拌罐的最佳工作条件	217
23. 非牛顿流体的搅拌	227

第五章 结构元件的选择与计算

24. 搅拌机构轴的计算	238
25. 搅拌罐壳体的计算	290
26. 传动机构的计算	304
27. 密封的设计	309
28. 内件的计算	319

第六章 搅拌罐的制造、安装和试验

29. 研制和制造	325
30. 存放和安装	330
31. 工业试验和使用	331
32. 搅拌罐质量的提高	333

参考文献

第一章 搅拌罐的结构

搅拌罐是化学工艺中进行各种物理过程与化学过程使用最广的设备之一。这种搅拌罐的选择及其结构特点取决于过程的特性、被搅拌介质的性质、工艺流程的生产能力、过程进行的温度和压力。影响结构选择的因素如此之多，因而获得搅拌罐最佳设计是很难的。解决这个课题需要有搅拌过程的流体动力学、物理机理与化学机理方面的知识，此外，还取决于有没有结构材料，标准结构的成熟程度以及不能采用标准的设计方法时对特殊结构进行设计的可能性。

只有对这种设备的每种特性进行详细的研究，并且在研究的基础上，选择一些限定整个过程进行速度以及表明影响设备结构形态的主要参数，才可能解决这样非常复杂的问题。

1. 化工基本过程

应用搅拌罐的化工基本过程通常是在非均匀液态介质中进行的。非均匀液态介质应理解为一种浓度或者温度不均匀的单组分或者多组分介质，以及由分散相分散于液态分散介质而形成的一种液态非均匀系统。化工基本过程分为物理的和化学的两类[90、91]。这种分类法的根据是这些过程的物理化学特性[34、76]，参阅图1。在一定条件下可以认为，同所有的过程相比，流体动力学过程是最简单的，因此，对于搅拌罐总的要求应该是随着使用这类搅拌罐的工艺操作量

的增多而提高。不管搅拌罐的用途如何，流体动力学计算应该是主要的，此外，并需要对有关的其它过程作补充计算。

2. 搅拌罐的用途及其使用范围

通常，化学工艺基本过程（图1）是在具有搅拌机构的搅拌罐内实现的。在这种情况下，为了完成搅拌，给介质施以附加的能量。

大家都知道，对被搅拌介质施加能量的方法有下列几种〔83〕：

- 机械法；
- 循环法；
- 射流法；
- 脉冲射流法；
- 汽化法；
- 气举法；
- 电磁法；
- 磁涡流法。

在实用上，机械法应用最广。这种方法是靠工作构件（搅拌器）对工作介质施予机械作用而实现的。

一般由壳体、搅拌机构构成的搅拌罐均应用机械法进行搅拌。

搅拌机构的型式与结构在搅拌罐的工作中起着最重要的作用。搅拌机构的工作在于通过壳体造成的阻力将旋转元件的机械能转变为热能。这样，搅拌机构在搅拌罐空间内把能量进行分散，而分散的能量的大小取决于搅拌器的结构和机械传动的性质以及搅拌罐与罐内附件的结构。搅拌罐的这些

特性在整体上决定了搅拌功率 N [83]。搅拌功率取决于搅拌罐内液体的流动状态。表明搅拌罐内能量分散的体积功率也可以做为搅拌功率的量度[8、83]；

$$\varepsilon = N/V_m \quad (1)$$

式中 V_m ——被搅拌液体的体积，它等于搅拌罐充满系数 $\chi=1.0$ 时搅拌罐的容积 V (在这里，系数 $\chi=V_m/V$)。

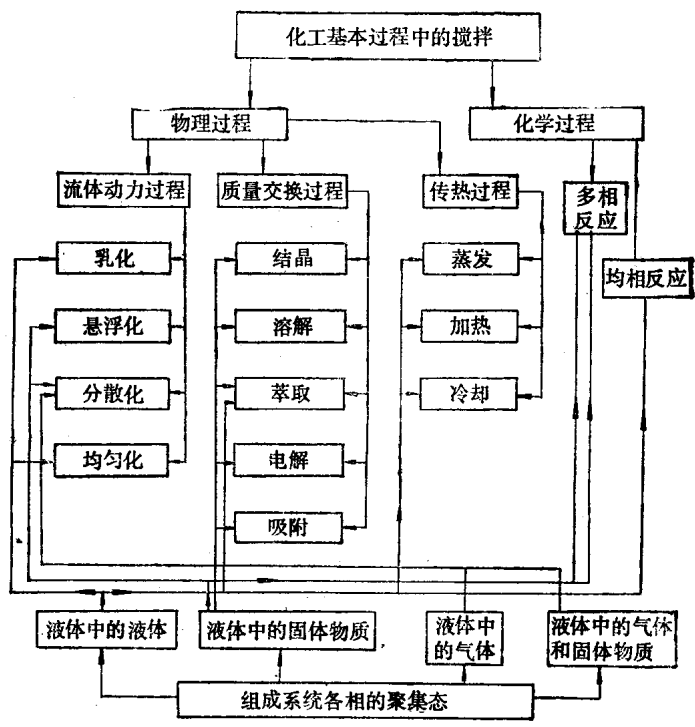


图 1 化工基本过程的分类

在任何容积的搅拌罐内，根据搅拌器转速 n 的不同，液体的流动具有不同的流体动力状态。这些状态决定 ε 值。因此，搅拌罐的工作范围可以用功率准数 K_N 这个量来度量。 K_N 可以利用下式来确定 [2、43、52、64、102、116、119]：

$$K_N = N / (\rho n^3 d_M^5) \quad (2)$$

式中 ρ ——被搅拌介质的密度；

d_M ——搅拌器的直径。

对于一切型式的搅拌罐， K_N 值主要取决于离心雷诺准数 Re_n ，因此，

$$K_N = f(Re_n) \quad (3)$$

在这里，

$$Re_n = \rho n d_M^2 / \mu \quad (4)$$

式中 μ ——动力粘度。

公式 (3) 表明搅拌罐内液体运动的最普遍的规律。更为详细的分析表明 [26、102、119]，功率准数还取决于这里没有指出的某些其它参数，根据必要程度，可以把这些参数以一定的无量纲组合数的形式和相似准数的形式引入所研究的公式中。

图 2 上的曲线 1 和曲线 2 表明函数 (3) 的变化特征。化工机械制造业还生产装有各种内件的搅拌罐。这些搅拌罐的函数 (3) 的曲线位于曲线 1 和曲线 2 之间。

对于所有的搅拌罐，可以分成三种工作区：

- a 搅拌罐内液体流动为层流状态的 I 区；
- b 从层流状态过渡到紊流状态的 II 区；
- c 表明搅拌罐内液体运动呈紊流状态的 III 区。

搅拌罐在工作区 I 内工作的特征是流体呈微束有向运动 (图 3)。

在 $K_N=f(Re_n)$ 曲线上，层流状态由点1₁限定，而对应的最大雷诺准数由 Re_n 坐标上的点a表明。

在这里存在

$$K_N = A/Re_n \quad (5)$$

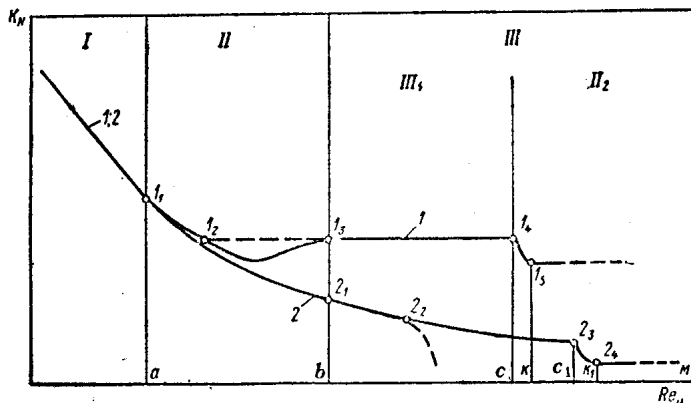


图 2 不同型式搅拌罐 $K_N=f(Re_n)$ 函数的变化特征
曲线1—具有折流挡板的搅拌罐；曲线2—光壁搅拌罐

公式(5)中系数A的选择决定于搅拌器的结构。

I区的特点主要是层流，但是，随着雷诺准数的增大越来越趋于复杂的紊流脉动。这种流动发生在由点a和点b所限定的雷诺准数的数值内。

II区的特点是复杂的空间涡流运动(图4)，而且由于紊流脉动而使流动更加复杂。对于这种工作区，公式(3)具有如下形式：

$$K_N = B/Re_n^\alpha \quad (6)$$

系数B和幂指数 α 取决于搅拌机构的形式、几何尺寸和搅拌罐的结构特性。对于光壁搅拌罐， $B > 0$ 和 $0 \leq \alpha \leq 1.0$ 。

B 和 α 的这种数值既适用于Ⅰ区（从点 1_1 到点 2_1 和从点 1_2 到点 1_3 ），也适用于Ⅱ区（由点 2_1 到点 2_3 和从点 1_3 到点 1_4 ）。对于具有挡板的搅拌罐来讲（工作在Ⅱ区），系数 B 是常数， $\alpha \approx 0$ 。

可以将液体流动的紊流状态区（Ⅱ区）分成两个分区：液流保持连续性的分区Ⅱ₁和液流连续性破坏了的分区Ⅱ₂。

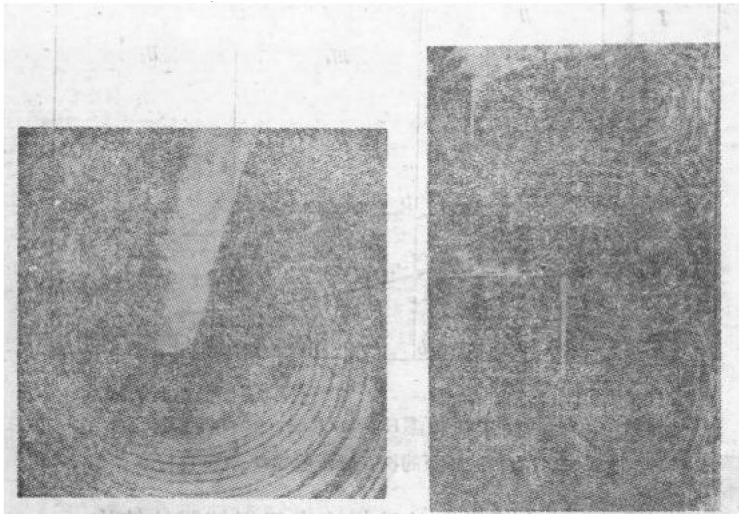


图 3 光壁搅拌罐内液流的层流状态

图 4 具有折流挡板的搅拌罐内液流的紊流状态〔74〕

对于光壁搅拌罐来讲，由于空气通过中心涡旋进入被搅拌的介质中，结果减少了液体的密度 ρ ，因而破坏了流动的连续性。因此，功率准数 K_N 随雷诺准数 Re_n 的增大而开始减小。

在图 2 上，由点 2_1 到点 2_3 的曲线段表明光壁搅拌罐的分区Ⅱ₁。从点 2_2 处开始的虚曲线对应于空气经过涡旋表面开始强烈地进入被搅拌介质中的工作条件。决定这种状态开始的

Re_n 值取决于加里略准数 Ga 的数值以及搅拌器距搅拌罐底部的相对高度 (图62)。

$$Ga = d_M^3 \rho g / \mu^2 \quad (7)$$

$$\bar{h} = h_{M2} / d_M \quad (8)$$

上面两式中 g ——重力加速度;

h_{M2} ——高速搅拌器的对称中心线或者低速搅拌器的下叶边到搅拌罐罐底的距离 (图7)。

在具有挡板的搅拌罐中, 当向搅拌器下部强制输气和发生汽蚀现象 (形成汽蚀空穴) 的情况下都会使液流连续性遭到破坏。

在这里, 对于汽蚀空穴应理解为产生于紊流中某些确定点处的、封闭的、且为溶解于液体中的气体和液体蒸气所充满的空腔 [46]。这时, 在曲线 1 上的点 1_1 ($Re_n = c$) 处和曲线 2 上的点 2_1 ($Re_n = c_1$) 处开始汽蚀。汽蚀空穴的存在导致 K_N 值急剧地下降, 一直到饱和状态时为止。这种状态的特征是存在强烈的发展汽蚀。汽蚀空穴在搅拌器叶片表面附近破灭 (图 5)。在曲线 1 上由点 1_5 处开始, 在曲线 2 上由点 2_4 处开始, 再增大 Re_n , K_N 值不发生任何改变。目前, 对于 $Re_n > k$ (曲线 1 上的 1_5 点) 和 $Re_n > k_1$ (曲线 2 上的 2_4 点) 的工作区研究的还不充分, 因此, 将函数 $K_N = f(Re_n)$ 在此区内的变化用虚线表示。

在液-气系统中多相介质的搅拌罐的工作区, 用强制方法将气体送入被搅拌的介质中时, 气体组分要改变液体的粘度和密度, 因而减少了搅拌功率 N 。可以用参数 E 表示这种减少的程度:

$$E = K_{Nf} / K_N \quad (9)$$

式中 K_{Nf} ——气液系统的功率准数。

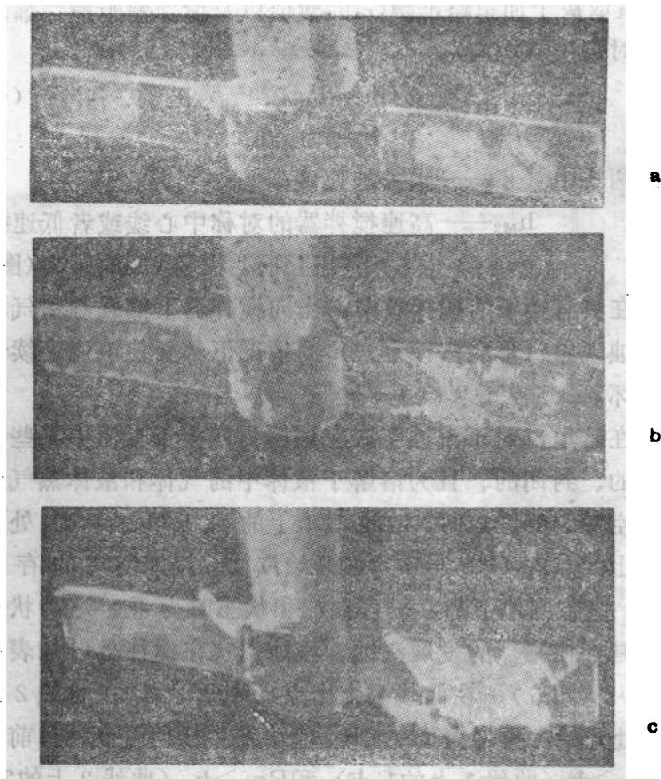


图 5 搅拌罐内液流的层流状态 (由于汽蚀破坏了流动连续性)[46]

- a. 搅拌器在 b 到 c 范围内工作 (图 2), 搅拌罐内没有汽蚀; b. 搅拌器在 c 到 k 范围内工作, 搅拌罐内发生发展的汽蚀现象; c. 搅拌器在 k 区外工作, 在搅拌叶后面存在一个连续的汽蚀空穴

参数 E 取决于许多因素, 然而主要决定于向工作腔内的送气准数 K_r 。

$$K_r = Q_r / (nd_M^3) \quad (10)$$

式中 Q_r ——通过搅拌罐的气体的体积流量。

3. 搅拌罐的主要参数

搅拌液态非均匀介质的搅拌罐的主要参数是：额定容积，搅拌罐体内的压力，换热器内的压力，被搅拌介质的温度，换热器内载热剂的温度，传动功率的大小，输出轴的转速。

搅拌罐的额定容积是决定它生产能力的主要特性。额定容积 $V[8]$ 是指计入了可拆盖体积后的罐内体积，但是没有考虑管接头，人孔，衬里和置于罐内附件等的体积，这些器件的体积用 ΣV_i 表示，并且每一个 i 号体积的数值表示一定器件的体积，例如，代表衬里的体积或者代表起泡器所占据的体积。

体积为 V_{BH} 的罐内附件的存在减少了搅拌罐的实际容积 V_n ，因此，在做设计的时候，应该按实际容积来选择搅拌罐的额定容积，而且实际容积与额定容积之差不应超过 $(+10\%)$ 和 (-5%) 。这样，便存在 $0.95V < V_n < 1.1V$ ，和 $V_n = V - V_{BH} + \Sigma V_i$ 的关系。

搅拌液态介质的搅拌罐的额定容积和搅拌罐壳体直径 D 的数值应该符合全苏国家标准 ГОСТ20680—75 给出的数据 [8]。

介质的公称压力与温度 决定壳体元件强度计算的公称压力对搅拌罐结构的选择有很大的影响。搅拌罐和它的换热器的公称压力 p_v 是 20°C 下介质的工作压力。根据全苏国家标准 [8] 的规定，应按 0.3, 0.6, 1.0, 1.6, 2.5, 3.2, 4.0, 6.4 和 10 兆帕斯卡来选择公称压力 p_v 。标准搅拌罐的设计也应该使它能在静压力或者真空条件下工作，真空度不应低于 0.67 千帕斯卡 (5 毫米汞柱)。

对于工作压力应理解为最大压力而不考虑造成安全膜片

破裂的瞬时最高值。

极限工作压力 P 取决于公称压力、工作介质的温度和性质以及壳体结构材料的特性。按公式 $P = \eta \cdot p_y \sigma_{\pi,0n}^t / \sigma_{\pi,0n}^{20}$ 来确定此压力。在此式中, η 为修正系数, 它和工作介质的性质有关[100]; $\sigma_{\pi,0n}^t$ 和 $\sigma_{\pi,0n}^{20}$ 分别为工作温度下和 $t = 20^\circ\text{C}$ 下壳体材料的许用应力[99]。表1中给出了搅拌罐的工作压力和设计压力与公称压力以及温度的关系。

表 1 搅拌罐的工作压力和设计压力与公称压力
以及温度的关系

公称压力 P_y		工 作 压 力 (表压) 兆 帕							
		工作介质的温度, $^\circ\text{C}$							
兆 帕	公斤力/ 厘米 ²	20	100	150	200	250	300		
0.6	6.0	0.6	0.57	0.55	0.52	—	—		
1.0	10.0	—	—	—	—	—	—		
1.6	16.0	1.6	1.53	1.46	1.4	—	—		
2.5	25.0	—	—	—	—	—	—		
4.0	40.0	4.0	3.8	3.67	3.5	—	—		
10.0	100.0	11.0	9.5	9.2	8.8	8.6	8.2		

公称压力 P_y		工作压力 (表压) 兆帕						设计压力 (表压) 兆帕	
		换热器内载热剂的温度, $^\circ\text{C}$							
兆 帕	公斤力/ 厘米 ²	20	100	150	200	250	300	对于搅 拌罐的 壳体	对于换 热器
0.6	6.0	0.6*	0.57	0.55	0.52	—	—	0.66	0.66
1.0	10.0	1.0	0.95	0.92	0.88	—	—	—	1.1
1.6	16.0	1.6	1.53	1.46	1.40	—	—	1.76	1.76
2.5	25.0	2.5	2.37	2.3	2.2	2.15	2.05	—	2.75
4.0	40.0	—	—	—	—	—	—	4.04	—
10.0	100.0	—	—	—	—	—	—	12.5	—

* 原文为6, 疑有误——译者