

化工设备设计全书

搅拌设备

化工设备设计全书

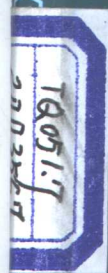
搅拌设备

《化工设备设计全书》编辑委员会
王凯 虞军 等编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心



化工设备设计全书

搅 拌 设 备

《化工设备设计全书》编辑委员会

王凯 虞军 等编

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北 京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

搅拌设备/王凯, 虞军等编. —北京: 化学工业出版社,
2003. 8

(化工设备设计全书)

ISBN 7-5025-4401-1

I. 搅… II. ①王…②虞… III. 搅拌-化工设备
IV. TQ051.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 030838 号

化工设备设计全书

搅 拌 设 备

《化工设备设计全书》编辑委员会

王凯 虞军 等编

责任编辑: 张兴辉

责任校对: 顾淑云

封面设计: 蒋艳君

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787 毫米 × 1092 毫米 1/16 印张 16 1/4 字数 546 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4401-1/TQ·1704

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

京工商广临字 2002-24 号

前 言

《化工设备设计全书》第一版由原化学工业部化工设备设计技术中心站组织全国高校、科研、设计、制造近百家单位参与编写。

《化工设备设计全书》以结构设计、强度计算为主，从基础理论、设计方法、结构分析、标准规范、计算实例等方面进行了系统的阐述，并对相应的化工原理作简介。《全书》在重视结构设计、强度计算的同时，结合化工过程的要求去研究改进设备的设计，提高设备的效率，降低设备的成本，以求实现化工单元操作的最佳化，并力求反映当前国内及国际的先进技术。《全书》自 20 世纪 80 年代出版发行后，因其内容的实用性，得到化工、石化、医药、轻工等相关行业的设备专业人员欢迎。

近十余年来，我国化工装置的设计，化工设备的研究、开发、制造和标准化工作有了较大的发展，建造设备用的结构材料也有了新的进展，有必要对《全书》的内容加以更新、补充，以适应现代工程建设要求，满足广大工程技术人员，特别是年青一代工程技术人员的需要。中国石油和化工勘察设计协会、中国石化集团上海医药工业设计院、全国化工设备设计技术中心站组成了《化工设备设计全书》编辑委员会，负责《全书》的修订工作。《全书》的修订原则是“推陈出新”，以符合现代工程建设要求。

《化工设备设计全书》计划出版 15 种，计有：《化工设备用钢》、《化工容器》、《高压容器》、《超高压容器》、《换热器》、《塔设备》、《搅拌设备》、《球形储罐与大型储罐》、《废热锅炉》、《干燥设备》、《除尘设备》、《铝制化工设备》、《钛制化工设备》、《石墨制化工设备》和《钢架》等。

本书为《搅拌设备》，全面介绍了搅拌过程原理、搅拌器型式、搅拌罐设计的相关问题。

本书原编审者为：衣军、王尚武、杨福媛、于广彦、苏敏贤、陈乙崇、李肇鏊、单克涛负责校审，王尚武统稿。

现由浙江大学王凯（第一～七章），全国化工设备设计技术中心站虞军、中国石化集团上海医药工业设计院戴季煌（第八、十、十一章），中国天辰化学工程公司沈鹏飞（第九章），合肥通用机械研究所李鲲、姚黎明（第十章）负责修订；由王凯、虞军负责统稿。

《化工设备设计全书》编辑委员会

2003 年 1 月

内 容 提 要

《化工设备设计全书》共有 15 种，计有：《化工设备用钢》、《化工容器》、《高压容器》、《超高压容器》、《换热器》、《塔设备》、《搅拌设备》、《球罐和大型储罐》、《废热锅炉》、《干燥设备》、《除尘设备》、《铝制化工设备》、《钛制化工设备》、《石墨制化工设备》和《钢架》等。

本书为《搅拌设备》，全面介绍了搅拌过程的原理、搅拌器型式、搅拌罐及其附件的设计计算、强度校核等相关问题。

本书可供从事搅拌设备设计工作的专业人员使用，也可供有关科研、使用、管理的技术人员和高等院校相关专业师生参考。

目 录

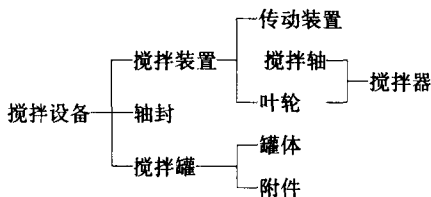
第一章 绪 论	1	第五节 一些常用的传热数据	100
第一节 搅拌设备在工业生产中的应用	1	第六章 搅拌罐中的非均相混合	104
第二节 搅拌物料的种类及特性	6	第一节 固液悬浮	104
第三节 搅拌装置的安装型式	7	第二节 液液分散	113
第二章 搅拌过程与搅拌器型式	12	第三节 气液分散	117
第一节 搅拌过程的种类以及对搅拌的要求	13	第七章 搅拌罐的放大技术	129
第二节 搅拌器的功能	17	第一节 搅拌罐式反应器的放大技术概述	129
第三节 搅拌器的选型	24	第二节 几何相似放大法	129
第四节 新型搅拌器及其应用	37	第三节 非几何相似放大法	132
第五节 搅拌器的结构与强度计算	45	第八章 搅拌罐结构设计	139
第三章 搅拌功率	57	第一节 罐体的尺寸确定及结构选型	139
第一节 搅拌器功率和搅拌作业功率	57	第二节 顶盖的结构及强度计算	144
第二节 搅拌功率的计算概述	57	第三节 传热部件的结构及强度计算	145
第三节 算法法计算 N_p	58	第四节 工艺接管及观测部件	160
第四节 计算搅拌功率用的公式	65	第九章 传动装置及搅拌轴	163
第四章 搅拌罐中的均相混合	80	第一节 传动方式及选型	163
第一节 均相混合过程的定性描述	80	第二节 机座及轴承	172
第二节 循环次数 N_{TC} 和翻转次数 N_T	81	第三节 搅拌轴的计算	178
第三节 混合速率和混合效率	81	第十章 轴 封	215
第四节 按整体流速设计互溶液体混合设备	83	第一节 填料密封	215
第五节 湍流域多层叶轮的混合	83	第二节 机械密封	226
第六节 新型宽黏度域搅拌器的混合速率	84	第三节 与密封有关的其他装置	244
第五章 搅拌罐的传热	86	第十一章 制造及检验	248
第一节 概 述	86	第一节 零部件的加工要求及检验	248
第二节 热载体侧的表面传热系数	87	第二节 搅拌设备的试运转	250
第三节 被搅液侧的表面传热系数	90	附录	252
第四节 高黏度流体的刮壁式传热	96	附录一 常用物质在常压下的黏度	252
		附录二 几种测定方法	255

第一章 绪 论

搅拌可以使两种或多种不同的物质在彼此之中互相分散，从而达到均匀混合；也可以加速传热和传质过程。搅拌操作的例子颇为常见，例如在化验室里制备某种盐类的水溶液时，为了加速溶解，常用玻璃棒将烧杯中的液体进行搅拌。又如为了制备某种悬浮液，就要用玻璃棒不断地搅动容器中的液体，使固体颗粒不致沉下，而保持它在液体中的悬浮状态。在工业生产中，搅拌操作是从化学工业开始的，围绕食品、纤维、造纸、石油、水处理等，作为工艺过程的一部分而被广泛应用。

搅拌操作分为机械搅拌和气流搅拌。气流搅拌是利用气体鼓泡通过液体层，对液体产生搅拌作用，或使气泡群以密集状态上升借所谓气升作用促进液体产生对流循环。与机械搅拌相比，仅气泡的作用对液体所进行的搅拌是比较弱的，对于几千毫帕·秒以上的高黏度液体是难于适用的。但气流搅拌无运动部件，所以在处理腐蚀性液体，高温高压条件下的反应液体的搅拌是很便利的。在工业生产中，大多数的搅拌操作均系机械搅拌，因此本书主要叙述的是常见的机械搅拌，以中、低压立式钢制

容器的搅拌设备为主。搅拌设备主要由搅拌装置、轴封和搅拌罐三大部分组成。其构成形式如下：



搅拌设备的结构如图 1-1 所示。

第一节 搅拌设备在工业生产中的应用

搅拌设备在工业生产中应用范围很广，尤其是化学工业中，很多的化工生产都或多或少地应用着搅拌操作。化学工艺过程的种种化学变化，是以参加反应物质的充分混合为前提的。对于加热、冷却和液体萃取以及气体吸收等物理变化过程，也往往要采用搅拌操作才能得到好的效果。搅拌设备在许多场合是作为反应器来应用的。例如在三大合成材料的生产中，搅拌设备作为反应器约占反应器总数的 90%。其他如染料、医药、农药、油漆等行业，搅拌设备的使用亦很广泛。有色冶金部门对全国有色冶金行业中的搅拌设备做了调查及功率测定，结果是许多湿法车间的动力消耗 50% 以上是用在搅拌作业上。搅拌设备的应用范围之所以这样广泛，还因搅拌设备操作条件（如浓度、温度、停留时间等）的可控范围较广，又能适应多样化的生产。

搅拌设备的作用如下：①使物料混合均匀；②使气体在液相中很好地分散；③使固体粒子（如催化剂）在液相中均匀地悬浮；④使不相溶的另一液相均匀悬浮或充分乳化；⑤强化相间的传质（如吸收等）；⑥强化传热。对于均相反应，主要是①、⑥两点。混合的快慢、均匀程度和传热情况好坏，都会影响反应结果。至于非均相系统，则还影响到相界面的大小和相间的传质速度，情况就更复杂。所以搅拌情况的改变，常很敏感地影响到产品的质量和产量，生产中的这种例子非常普遍。在溶液聚合和本体聚合的液相聚合反应装置中，搅拌的主要作用是：促进釜内物料流动，使反应器内物料均匀分布，增大传质和传热系数。在聚合反应过程中，往往随着转化率的增加，聚合液的黏度也增加。如

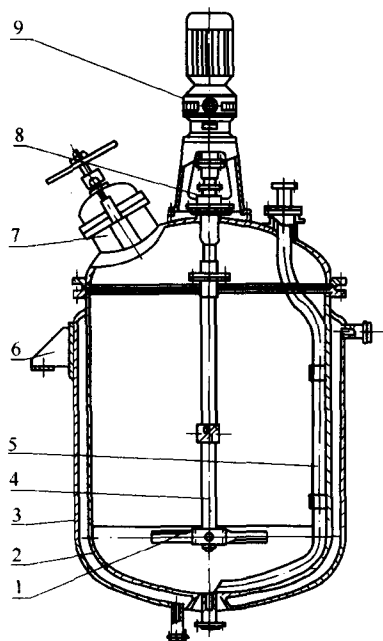


图 1-1 搅拌设备结构

1—搅拌器；2—罐体；3—夹套；4—搅拌轴；5—压出管；
6—支座；7—人孔；8—轴封；9—传动装置

果搅拌情况不好，就会造成传热系数下降或局部过热，物料和催化剂分散不均匀，影响聚合产品的质量，也容易导致聚合物粘壁，使聚合反应操作不能很好地进行下去。

在互不相溶的液体之间或液体和固体相互作用时，搅拌在加速反应的进行方面起着非常重要的作用。因为增加一物相混入另一物相的速度，接触面就会增大，物质就以较大速度相互作用。在某些情况下，搅拌是在反应过程中创造良好条件的一个重要因素。例如，使传热作用加强，减少局部过热，以及避免加热过程中物质焦化等。如高压聚乙烯生产中，由于搅拌器的作用，使物料在反应器内有一定的停留时间，更重要的是使催化剂在器内分布均匀，以防止局部猛烈的聚合作用而造成爆炸。因此搅拌设备在工业生产中起着非常重要的作用。

搅拌设备在石油化工生产中被用于物料混合、溶解、传热、制备悬浮液、聚合反应、制备催化剂等。例如石油工业中，异种原油的混合调整和精制，汽油中添加四乙基铅等添加物而进行混合使原料液或产品均匀化。化工生产中，制造苯乙烯、乙烯、高压聚乙烯、聚丙烯、合成橡胶、苯胺染料和油漆颜料等工艺过程，都装备着各种型式的搅拌设备。

在石油工业中因为大量应用催化剂、添加剂，所以对搅拌设备的需要量很大。由于物料操作条件的复杂性、多样性，对搅拌设备的要求也复杂化了。如炼油厂的硅铝反应器、打浆罐、钡化反应釜、硫磺化反应釜、烃化反应釜、白土混合罐等都是装有各种不同型式搅拌器的搅拌设备。大型原油贮罐中，由于原油里含有多种不同的组分，各组分重度不同，因此油罐中会出现各处组成不一的现象，为使油罐中上下组成均一，就必须将原油不断地进行搅拌。

搅拌设备在化学纤维生产中，如聚酯、尼龙等生产装置中就有多种。功率从 0.09 ~ 37kW，转速从 6.5 ~ 1500r/min，种类繁多，桨叶的型式也多种多样。如催化剂活化设备，是将雷尼镍催化剂在进入加氢反应器前在该设备中活化。活化过程是用 NaOH 和含在合金中的铝进行化学反应，产生可溶性的铝酸钠而形成骨架镍，以促进其活化。活化设备（图 1-2）的本体分两大部分，上部是活化部分，下部是增稠部分，搅拌器安装在罐顶，功率为 5.5kW，转速为 20r/min。在同一轴上分别装有三种搅拌器。在设备的活化部分，有特殊锚式搅拌器，可加速并充分完成活化过程。设备中间的螺旋带

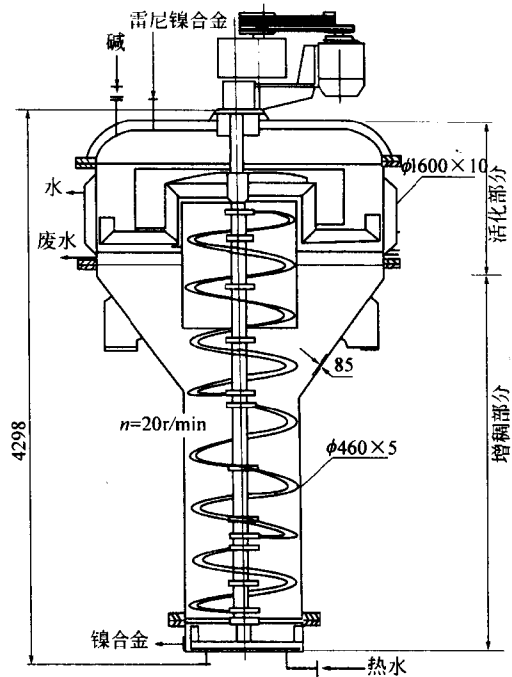


图 1-2 催化剂活化设备

式搅拌器是为了促进增稠作用，因为热工艺水由罐底进入后，便向上逆流洗涤活液，将较轻的铝酸钠和过量的 NaOH 向上冲洗，直至由增稠部分顶部的废水出口排出。设备底部的锚式搅拌器是为了防止较重的镍长期沉积在罐底。

在新型农药——胺菊酯的工业化试验中，是在液相中以铜粉为催化剂的反应，成功地使用了行星搅拌器（图 1-3）。主要由一对圆锥齿轮和一根带有

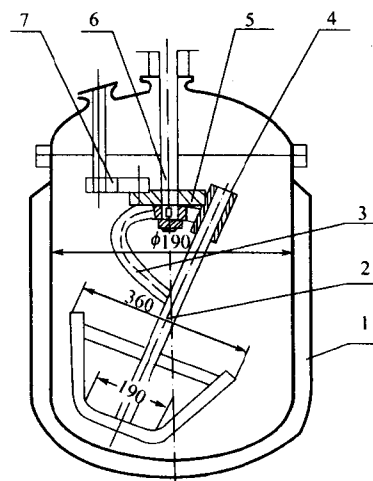


图 1-3 行星式搅拌器简图

- 1—夹套；2—搅拌器；3—曲柄；4—小圆锥齿轮；
- 5—大圆锥内齿轮；6—传动轴；7—固定夹

曲柄的锚式搅拌器组成。当传动轴通过曲柄带动搅拌器转动时，搅拌器上端的小圆锥齿轮绕着大圆锥齿轮滚动，从而获得了两种方式的运动。一种是以搅拌器本身为轴心的转动，称为“自转”，另一种是旋转的搅拌器以反应釜中心线为轴心的转动，称为“公转”。这两种运动互相迭合，使流体在釜内既有垂直方向的运动，又有水平方向的运动。强烈的对流遍及反应釜内每一个角落，从而使密度相差悬殊的固、液两相混合，解决了因铜粉易沉淀，不易混合均匀的问题。

生产高压聚乙烯的反应器是超高压反应设备(图1-4)。乙烯气与催化剂、调节剂进入反应器后在200MPa的超高压、250℃的高温下进行聚合。反应器内有一搅拌器进行搅拌。根据产品种类不

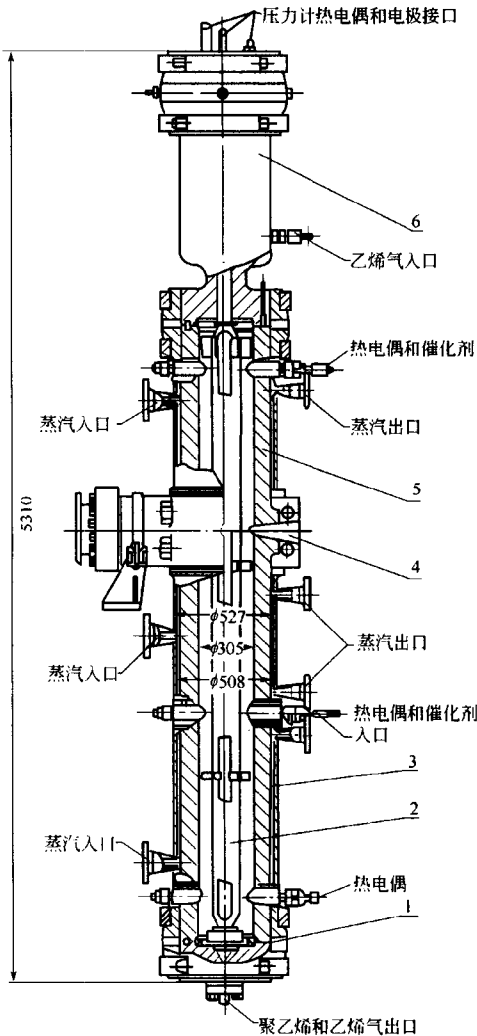


图1-4 高压聚合反应器

- 1—B形环密封装置；2—搅拌器；3—夹套；
- 4—泄爆装置；5—筒体；6—电动机罩

同，可在搅拌轴上安装区间挡板，组成单区操作或同压异温的双区操作。由于采用带槽和开有孔的搅拌轴，在保证刚性的条件下，大大地减轻了轴的重量，而且增加了反应空间，改善了搅拌性能。在轴的两端带有平衡块，以满足调整轴的动平衡精度的要求。桨叶为弓形，用螺钉与轴连接。搅拌轴上桨叶与筒体内壁的间隙较大，为55mm，区间挡板与筒体内壁的间隙为16mm。搅拌转速为1000r/min或1500r/min。搅拌的传动装置电机等亦装在反应器内，这样避免了超高压条件下的动密封问题。

电影胶片厂使用了高速搅拌器(图1-5)，转速达8000~10000r/min。在搅拌头内，装有与搅拌轴直联的高速回转透平转子，它以微小的间隙安装在不动的定子内。操作时，由于轴的高速回转，带动着透平转子高速回转，这样，便在搅拌头的上下部

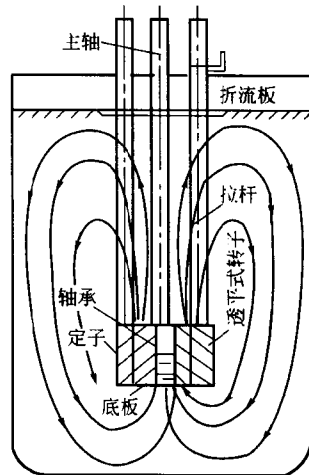


图1-5 高速搅拌设备示意图

位形成压力差，被搅拌的液体便沿着搅拌头底部的吸入孔不断地吸入，吸入的液体经定子与转子之间的缝隙流至上部，并以极大的动能冲至上部折流板，液体再被折流板折回，并沿搅拌器边壁流至搅拌器底部。由于液体不断受到反复的强制循环，同时在搅拌头内又承受着高速旋转的转子与定子产生的强烈剪切、撞击、粉碎、研磨等作用，因此能在极短的时间里使被分散物质微粒化、均匀化。这种搅拌设备用于彩色胶片成色剂分散时，分散后的油珠细小、均匀，一般在0.2~0.5μm之间，制成的影片效果好。这种搅拌设备不仅可用于分散油溶性成色剂，而且对染料、涂料、印刷材料、化纤、食品工业也是一种理想的设备。

搅拌设备使用历史悠久，应用范围广。但对搅

拌操作的科学研究还远远不够。搅拌操作看来似乎简单，但实际上，它所涉及的因素却极为复杂。对于搅拌器型式的选择，从工艺的观点以及力学观点来说，迄今都研究得不够。

过去有很多文献论述了搅拌设备的动力消耗，并给出了不少情况下的计算公式，但是由于使用介质操作条件的不同，物理化学性能的差异，容器形状及内部设施的不同以及各种搅拌器特性上的区别，正确确定搅拌功率并适当地选择驱动电机是十分困难的。在没有模拟试验的情况下，设计新的搅拌设备时，常采用现有设备数据的方法，宁大勿小，结果造成了不少浪费。国内有些单位对一些生产中的搅拌设备进行了功率测试，从测试的结果可以看到，由于功率消耗难于计算准确，电动机选用过大，造成了负荷率很低的不合理现象。

对于搅拌设备的研究，除功率问题外，有关搅拌的流体力学研究具有重要意义。这方面已做了许多工作，但尚需扩大和深入。在液体中进行搅拌时，搅拌器的功能不仅引起液体的整个运动，而且会在液体中产生湍动，湍动程度与搅拌器使液体旋转而产生的旋涡现象有密切关系。这些旋涡因经常地互相撞击和破裂，使液体受到剧烈的搅拌。由此可见在搅拌操作中，对于流体力学理论的研究是极其重要的。

近代化学工业中，流动的物料不再只是一些低黏度的牛顿型流体，许多高黏度流体也常常遇到，尤其是各种各样的高分子溶液以及混有催化剂粒子的浆状流体等非牛顿型流体的应用日益广泛。它们与通常的牛顿型流体具有不同的流动特性，所以对于非牛顿型液体的研究是当今的一个重要课题。对高黏度流体，特别是非牛顿型流体的搅拌传热的研究，也是近年来一个方向。聚合釜的传热特性与其中所用的搅拌器的型式关系甚大。对于各种常用搅拌器型式的搅拌设备的传热，前人给出了许多方程式，近年来在一些文章中也补充了有关搅拌设备的传热系数的推算公式。

关于搅拌器，除非遇有特殊的任务，需要特殊设计之外，现有的各种搅拌器，尤其常用的框式、平桨式、推进式和涡轮式等已足够应用。而且这些搅拌器已有相应的标准，所以对已有搅拌器性能的深刻了解，应予以更多的注意，以便使它们在使用中能够充分发挥作用。涡轮式搅拌器现正被广泛使用，因为这种搅拌器在工业上适应性是很大的，它几乎能有效地完成所有的搅拌任务，并能处理那些特别是化学工业中经常遇到的各种黏度的物料。

搅拌设备的轴封多是用填料密封和机械密封。

一百多年前初期的密封都是采用一些天然材料如皮革和浸油绳等作为轴封。以后浸油绳密封逐渐发展成为今天的软填料密封。由于石油化学工业的发展，易燃易爆物质比较多，对密封性能要求较严，1935~1945年间在英美等国均开始研究和应用机械密封，并得到较快发展。机械密封较填料密封有很多优点：①泄漏量极少，机械密封的泄漏量是填料密封的1%；②摩擦功率损失相当小，由于接触面的摩擦系数很小，因此，机械密封的功率损失约为填料密封的10%~15%；③使用寿命长，一般质量好的机械密封可用2~5年，在正常工作条件下不需要维护调整。对轴的精度和光洁度的要求没有填料密封那样严格，耐振性能好。当轴摆动较大时，机械密封也能良好工作。同时，轴对密封腔孔的偏斜也不十分敏感，减少了轴或轴套的磨损。在轴上有防腐蚀涂层时（喷、涂、衬、搪、包等），能克服填料密封将防腐层磨损或破坏的缺点。机械密封的缺点是结构复杂，装拆不便，对动环和静环的表面光洁度及平直度要求高，不易加工，成本较高，但和优点相比只占次要地位。因而机械密封已日益得到广泛应用。

随着科学技术的发展，设备有大型化发展的趋势，也要求搅拌设备大型化。如国外聚合釜的容积已由最初的8~40m³扩大到60~100m³，最大的已达到200m³。采用大型聚合釜可大大减少操作和检修人员，有利于自动化，减少投资，提高生产率，稳定产品质量。随着容积的大型化，釜型逐渐由细长型向矮胖型发展，而且采用底部搅拌的方式越来越多。多用三叶后掠式搅拌器，三叶后掠式搅拌器是目前大型聚合釜采用的一种较好搅拌器。因它排出量大，釜内液相循环充分，每分钟可达5~10次，能促使釜内反应均匀一致。另外，经实践证明，此种桨叶必须配合挡板使用，以提高剪切功能，才能更好地发挥作用。

搅拌也可以在管路中进行，采用在管路中安装装置的办法对气-液系和液-液系进行混合。例如采用喷射泵对水及醋酸丁酯进行混合。在石油精制中，也采用使液体流过设置在管路中的锐孔板或挡板，以便使两种液体进行接触。还有在管道中放入搅拌器的，即所谓管道搅拌。

管道搅拌设备能连续输送一切流体，也能输送含有固体的流动化的半流体。此种搅拌型式，相当于搅拌设备的筒体部分，容积较小，液体在此停留时间极短（数十秒）的情况比较多。在其内部为了充分进行混合分散或传热等需要极强的搅拌。由于管道搅拌设备空间很小，装置小，可使搅拌力均匀

作用,可减少过剩的搅拌,所以对整个液体减少了功率消耗。对于连续化、自动化,特别是对成本有严格要求的,要求特别小的形状和高性能时,使用管道搅拌设备是很有效的。正因为管道搅拌设备有这些优点,所以在石油精制、石油化工、化学纤维、食品等工业和水处理技术中广泛被用于液-液混合、浓度调整、液-液萃取、油脂乳化、液-液稀释溶解、固-液溶解、液-液和气-液反应等场合。

管道搅拌设备的种类,按混合壳体不同大体分为直管型、交错型、角型和偏心角型等。最简单的型式是直管型(图1-6),它容易制造,压力损失低,清扫方便。但停滞时间分布大,也就是说存在短路比较多,准确度低的问题。对此有所改进的是交错型(图1-7)。角型(图1-8、图1-9),因介质出入方向不同,特别是截面积变大,能诱起液体的旋转,搅拌力容易均匀作用,但因筒体轴线和搅拌轴轴线同心的情况比较多,容易引起离心作用。

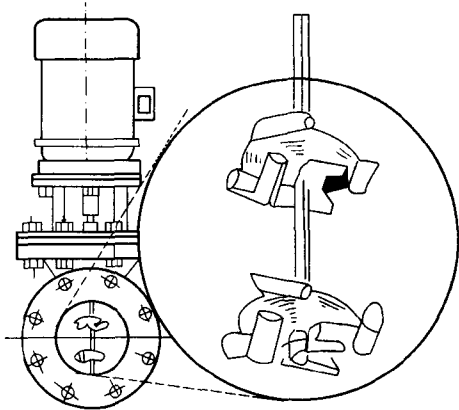


图 1-6 直管型管道搅拌设备

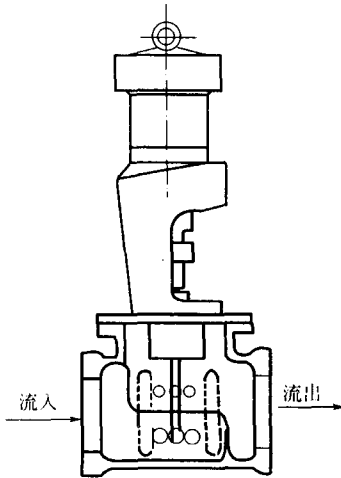


图 1-7 交错型管道搅拌设备

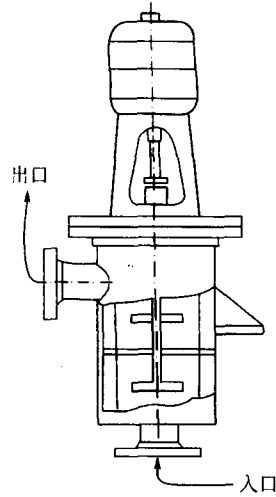


图 1-8 带挡板角型管道搅拌设备

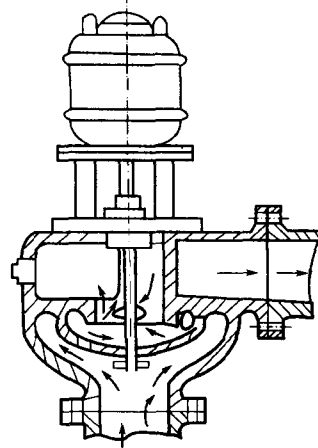


图 1-9 节流孔角型管道搅拌设备

静态混合器是一种没有机械运转部件的混合器。在一段管道内装置有若干个长度很短的右旋或左旋的螺旋元件,这些元件相互之间交错排列。两元件相互连接的两边成 90° 。通常,每个螺旋元件的长度约为管道内径的1.5倍。这些元件每6个事先焊在一起,称为一组,然后封装在通常的标准管径的管道内,构成一台所需要的静态混合器。图1-10表示右旋和左旋元件的结构形状和组装以后的静态混合器。被混合的物料进入混合器时,有两种混合作用方式同时进行,分流作用方式和径向混合作用方式。表现为一种近于塞流的流动特征。

由于静态混合器结构紧凑,有较好的混合效果,维修保养费用低廉,在工业中逐步得到广泛应用。没有运动部件的静态混合器从20世纪60年代初开始,激起了工业界的广泛兴趣。这种混合器在

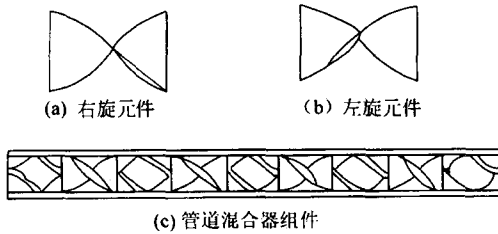


图 1-10 混合元件和混合器组件

改善和强化热交换作用以及要求严格控制混合作用等，都发挥优异的作用。它可以进行诸如乳化、引入添加剂、易爆物质缓和谨慎的混合等多种用途的操作。美国的 Kennics 公司于 1969 年在 100 多个工厂示范试用该公司所生产的静态混合器，受到使用者的欢迎。

第二节 搅拌物料的种类及特性

搅拌物料的种类主要是指流体。在流体力学中，把流体分为牛顿型和非牛顿型。在搅拌设备中，由于搅拌器的作用，而使流体运动。设有如图 1-11 所示相距为 dy 的两块板，板间充满液体，若下层不动，而在上层加一剪切力 F 时，就发生了运

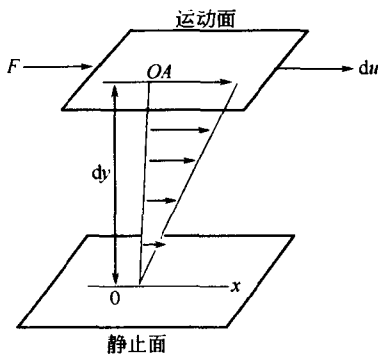


图 1-11 流体在两块平行平板间的剪切流动

动。在稳态下，此力必与流体内部由于黏度而产生的内摩擦力相平衡，如剪切应力 τ 与速度梯度（亦称剪切率） $\dot{\gamma}$ (du/dy) 成比例，即：

$$F/A = \tau \propto du/dy$$

或写成

$$\tau = \mu du/dy = \mu \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

则此比例常数 μ 就称为黏度。

流体的物理性质一般是指密度 ρ 、黏度 μ （或运动黏度 $\nu = \mu/\rho$ ）等。含有气和液滴的异相系中，

表面张力 σ 等也是很重要的特性。

一、牛顿型流体

服从式 (1-1) 的流体叫做牛顿型流体。对于牛顿型流体，无论搅拌程度激烈或缓和，它的黏度是与静止时相同的。在同一搅拌设备内，各处的黏度也是一致的。由图 1-12 看出，牛顿型流体 $\tau = \mu (du/dy)$ 的关系曲线是通过原点的直线，直线的斜率为 μ ，即其剪切应力与速度梯度成正比，而黏度为其比例系数。所有的气体和低分子量物质（非聚合的）液体或溶液、普通的油类、醇类等都属于牛顿型。

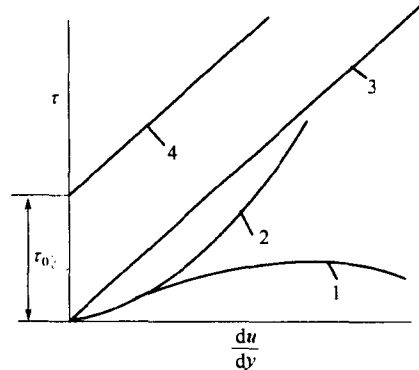


图 1-12 四种流体的剪应力-剪切率曲线

- 1—假塑性流体；2—胀塑性流体；
3—牛顿型流体；4—宾汉塑性流体

二、非牛顿型流体

凡是黏度随着剪切应力及速度梯度的不同而有变化时，即不符合式 (1-1) 的线性关系的流体，称为非牛顿型流体。非牛顿型流体的搅拌比牛顿型流体复杂。近二十年来，国内外对非牛顿型流体的搅拌研究进行很多，已积累了不少数据和经验。

对于牛顿型流体，其剪切应力 τ 与速度梯度 du/dy 之比称为流体的黏度。而对于非牛顿型流体，这一比值称为表观黏度。用下式表示：

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K_{psu} \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1-2)$$

对非牛顿型流体的表观黏度，必须指明是在某一速度梯度范围内的数值，否则是无意义的。 K_{psu} 为稠度系数，其值的大小即代表黏性的大小，而 n 值则代表非牛顿型的程度。

在非牛顿型流体中，按其性质，随着时间而变化的称为与时间有关的非牛顿型流体。未成型的塑料，分子量大于百万的聚环氧乙烷均属这一类。其性质不随时间而变化的非牛顿型流体，称为与时间无关的非牛顿型流体。与时间无关的非牛顿型流体，又可分为宾汉塑性、假塑性与胀塑性三种，其

剪应力-剪切率曲线分别见图 1-12。

(一) 宾汉塑性流体

从曲线图中可看出, 它的关系曲线是不通过原点的直线。这种非牛顿型流体和牛顿型流体间的差别, 在于剪应力和速度梯度的直线关系不通过原点, 与 τ 轴相交于某一点 τ_0 , 这一点称为屈服应力, 即当搅拌剪应力未达到一定值前, 流体不会运动, 但当剪应力达到一定程度, 大于 τ_0 时, 流体才能引起流动, 并和牛顿型流体具有相同的流动特性。所以在搅拌运动中, 宾汉塑性流体的黏度特性也和牛顿型流体相似。因此其剪应力和速度梯度间的关系为:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式中, μ_p 称塑性黏度。对宾汉塑性流体的这种特性通常的解释是, 在静止状态下, 这种流体具有一种三维的结构, 其坚固性足以经受某一数值的剪应力。当应力超过该数值后, 此三维结构即被破坏, 于是流体显示出与牛顿型流体相同的特性。属于这一类的流体如含有固体颗粒的白垩、岩粒的悬浮液, 以及污水泥浆等。

(二) 假塑性流体

这是非牛顿型流体中最重要的一种, 大多数非牛顿型流体均属于此类。在算术坐标系中, 假塑性流体的剪应力和速度梯度的曲线是下弯的曲线形状。但是在对数坐标系中, 它常常在很大的剪应力范围呈一条线关系。此时式 (1-2) 中的 $n < 1$ 。 n 的数值离 1 越远, 假塑性越大。对特定的物料, 黏度值随搅拌程度的强化而减小, 而在静止时的黏度最大。在同一搅拌设备内, 受剪应力最大处其黏度最小, 而受剪应力最小处其黏度最大。

从式 (1-2) 可看出, 假塑性流体的表观黏度的变化是因速度梯度的增大, 液体分子或质点间的相互作用逐渐减小所致。这种情况常常发生在具有高度不对称性的分子, 如长链的高分子物质。当流体静止时, 这些分子彼此纠缠在一起, 在剪应力的作用下, 这些分子或质点逐渐排列起来, 而使它们的轴与流动方向平行, 此时排列好的流体层间呈平行的流动。由于高分子物质的混乱运动较小, 即动量交换较小, 因此在排列好的流体层间的剪应力是不大的。随着速度梯度的增大, 这种分子的定向排列愈完全, 分子间的作用力愈小。所以表观黏度就随速度梯度增大而减小。但是在很高的速度梯度下, 当分子排列已经完全后, 显然表观黏度就不再降低, 此时流体就显示出牛顿型流体的性质, 即在定温下, 其黏度为常数。

属于假塑性流体的有高分子溶液、醋酸纤维、油漆、纸浆、葡萄糖以及羧甲基纤维素水溶液等。

(三) 胀塑性流体

和假塑性流体相反, 胀塑性流体的表观黏度, 随着速度梯度的增大而增加。此时式 (1-2) 中的指数 $n > 1$ 。如 n 的值越大, 膨胀性越大。由图 1-12 中看出, 胀塑性液体的关系曲线是通过原点的向上弯曲的曲线, 其斜率随剪应力的增加而变大。属于这类液体的如含有淀粉、硅酸钾、阿拉伯树胶的水溶液等, 以及沙子等一类物质的高浓度悬浮液。

实际上, 高黏度液体几乎多数表现为非牛顿型, 黏度又随温度而显著变化。知道这些非牛顿型流体与温度的关系, 就可以对搅拌设备采取有效措施。搅拌高黏度液体的流型除由资料知道外, 还可用实测法观察。对这些复杂流动特性的液体进行搅拌时, 将流动特性用正确的数学公式表现出来是非常繁杂的, 因为多数情况是不能进行解析计算的, 所以一般是用表观黏度 μ_a 而和牛顿型流体相同情况来处理的。

第三节 搅拌装置的安装型式

搅拌设备可以从各种不同的角度进行分类, 如按工艺用途分、按搅拌器结构型式分或按搅拌装置的安装型式分等。以下仅就搅拌装置的各种安装型式进行分类说明。

一、立式容器中心搅拌

将搅拌装置安装在立式设备筒体的中心线上, 驱动方式一般为皮带传动和齿轮传动, 用普通电机直接联接或与减速机直接联接。从功率方面看, 可从 0.1kW 到数百千瓦。但在实际应用中, 常用的功率为 0.2~22kW, 有人统计这种范围内的电机数量约占电机总数的 50%。由于设备的大型化, 超过 400kW 的大型搅拌设备也出现了。一般认为功率 3.7kW 以下为小型, 5.5~22kW 为中型。转速低于 100r/min 为低速, 100~400r/min 称中速, 大于 400r/min 称高速。桨叶的形状, 根据用途可以考虑各种各样的组合方式, 以三叶推进式、涡轮式为主体, 而组合各种形式。轴封以填料函密封的比较多, 但对于真空 (真空度 400mmHg 以上) 及承受压力比较高的, 要采用机械密封。

中、小型立式容器搅拌设备, 在国外多数已标准化。转速为 300~360r/min, 电机功率大约为 0.4~15kW 的范围, 用皮带或齿轮一级减速。

对于立式容器大型搅拌设备的搅拌器直径一般都很大, 所传递的扭矩很大, 而且在减速机的齿轮

制造上以及随着轴及桨叶的大型化，而使轴承、轴封装置的制造等均受到限制。因而大型立式容器搅拌设备的标准化是比较困难的，只有根据使用条件来设计是比较经济的。立式容器搅拌设备如图 1-1 所示。

二、偏心式搅拌

搅拌装置在立式容器上偏心安装，能防止液体在搅拌器附近产生“圆柱状回转区”，可以产生与加挡板时相近似的搅拌效果。偏心搅拌的流型示意图如图 1-13。搅拌中心偏离容器中心，会使液流在各点所处压力不同，因而使液层间相对运动加强，增加了液层间的湍动，使搅拌效果得到明显的提高。但偏心搅拌容易引起振动，一般用于小型设备上比较合适。

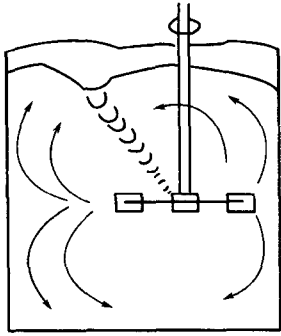


图 1-13 偏心搅拌示意图

三、倾斜式搅拌

为了防止涡流的产生，对简单的圆筒形或方形敞开的立式设备，可将搅拌器用夹板或卡盘直接安装在设备筒体的上缘，搅拌轴斜插入筒体内（如图 1-14 所示）。

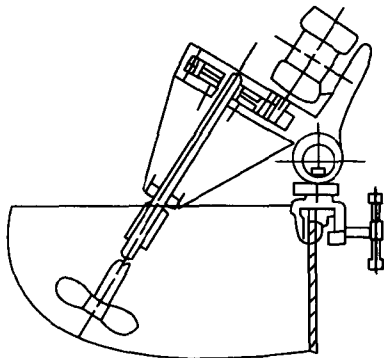


图 1-14 倾斜式搅拌

此种搅拌设备的搅拌器小型、轻便、结构简单，操作容易，应用范围广。一般采用的功率为

0.1~2.2kW，使用一层或两层桨叶，转速为 36~300r/min，常用于药品等稀释、溶解、分散、调和及 pH 值的调整等。

四、底搅拌

搅拌装置在设备的底部，称为底搅拌设备。底搅拌设备的优点是：搅拌轴短、细，无中间轴承；可用机械密封；易维护、检修，寿命长。底搅拌比上搅拌的轴短而细，轴的稳定性好，既节省原料又节省加工费，而且降低了安装要求。所需的检修空间比上搅拌小，避免了长轴吊装工作，有利于厂房的合理排列和充分利用。由于把笨重的减速装置和动力装置安放在地面基础上，从而改善了封头的受力状态，同时也便于这些装置的维护和检修。底搅拌装置安装在下封头处，有利于上封头接管的排列与安装，特别是上封头带夹套，冷却气相介质时更为有利。底搅拌有利于底部出料，可使出料口处得到充分的搅动，使输料管路畅通。

对于大型聚合釜搅拌设备的结构，在设计上有很多实际困难。通常聚合釜的搅拌轴是通过釜的顶盖伸入设备内的。若是 100m³ 的聚合釜所需的搅拌轴，必然是很粗、很长，而且费用昂贵，搅拌器必须装在接近聚合釜底部，才能使放料期间达到有效混合，但若采用底搅拌就可以解决这些问题。

底搅拌虽然有上述优点，但也有缺点，突出的问题是叶轮下部至轴封处的轴上常有固体物料粘积，时间一长，变成小团物料，混入产品中影响产品质量。为此需用一定量的室温溶剂注入其间，注入速度应大于聚合物颗粒的沉降速度，以防止聚合物沉降结块。另外，检修搅拌器和轴封时，一般均需将釜内物料排净。底搅拌如图 1-15 所示。搅拌器的型式有涡轮式、螺带式、推进式、三叶后掠式。

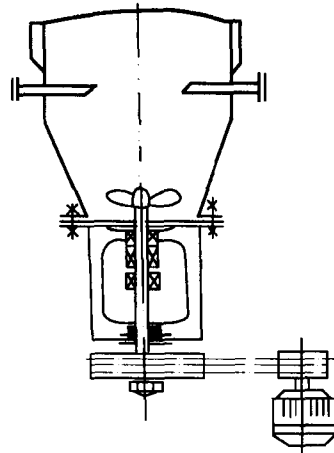


图 1-15 底搅拌示意图

五、卧式容器搅拌

搅拌器安装在卧式容器上面,可降低设备的安装高度,提高搅拌设备的抗震性,改进悬浮液的状态等。可用于搅拌气液非均相系的物料,例如充气搅拌就是采用卧式容器搅拌设备的。搅拌器可以立在卧式容器上,也可以斜装在容器上。图 1-16 所示为卧式容器上安装四组搅拌器装置的结构,用于搅拌气液非均质物料。

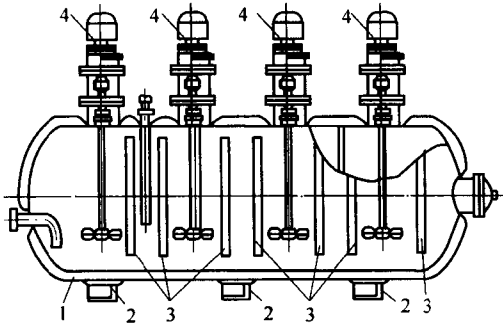


图 1-16 卧式容器搅拌
1—壳体; 2—支座; 3—挡板; 4—搅拌器

六、卧式双轴搅拌

搅拌器安装在两根平行的轴上,二根轴上的搅拌叶轮不同,轴速也不等,如图 1-17,这种搅拌设备主要用于高黏液体。采用卧式双轴搅拌设备的目的是要获得自清洁效果。当搅拌高黏液体时,若叶轮端部与罐壁有一定的间隙,则高黏液体会滞留于间隙中,这些滞留物的存在,不仅影响产品的质量,并大大降低罐壁的传热系数。为此,搅拌高黏液体的叶轮的外缘都与罐壁很接近,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,高黏液体还可

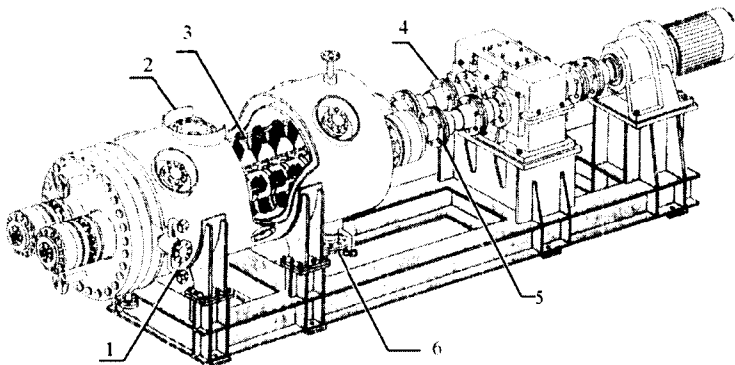


图 1-17 卧式双轴式搅拌机
1—原料入口; 2—排气口; 3—搅拌叶轮; 4—低速轴; 5—高速轴; 6—制品出口

能黏滞在叶轮上,随叶轮一起转动,而若采用自清洁型的卧式双轴搅拌设备,通过二根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。

七、旁入式搅拌

旁入式搅拌设备是将搅拌装置安装在设备筒体的侧壁上,所以轴封结构是最费脑筋的。在小型设备中,可以抽取设备内的物料,卸下搅拌装置更换轴封部分,所以搅拌装置的结构要尽量简单。但是在大型设备中,为了在不抽出设备内液体的条件下而便于更换轴封部件和传动部件,多半在设备内设置断流结构。

对于旁入式搅拌利用推进式搅拌器,在消耗同等功率情况下,能得到最高的搅拌效果。这种搅拌器的转速一般是 $360 \sim 450 \text{r/min}$,驱动方式有齿轮和皮带两种。

旁入式搅拌,一般用于防止原油贮罐泥浆的堆积,用于重油、汽油等的石油制品的均匀搅拌,用于各种液体的混合和防止沉降等。特别是在大型贮槽中,投入少量的功率便可以得到适当的搅拌效果,因而被广泛采用。旁入式搅拌又分为下述两种。

(一) 角度固定的旁入式搅拌

这种搅拌设备是将推进式桨叶的轴流方向与筒底中心线偏左 $7^\circ \sim 15^\circ$ 安装,在设备内能产生相同程度的上下流和水平流。

(二) 角度可变的旁入式搅拌

在原油或重油的大型贮罐中,为使不同种类的油均匀,特别是在 10000m^3 以上的大型原油罐中,为了防止淤渣堆积而进行搅拌,使用角度可变的旁入式搅拌设备(图 1-18)是很有效的,能形成较好流型。

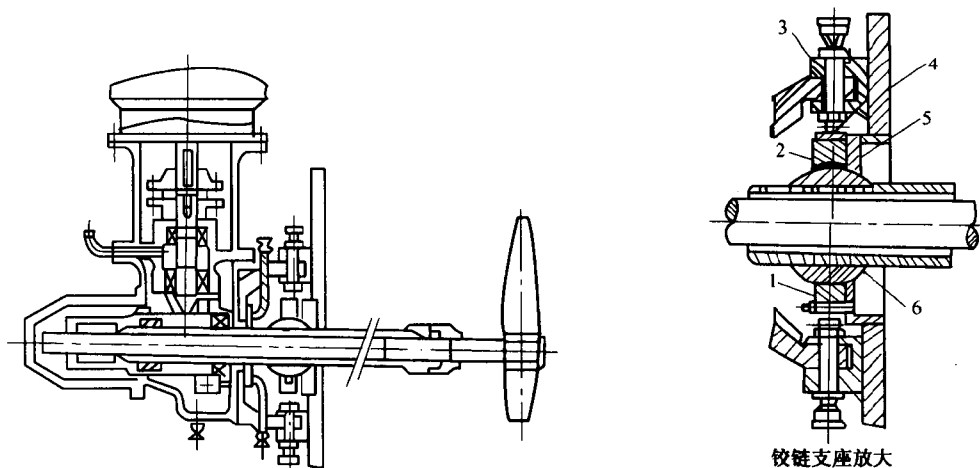


图 1-18 角度可变的旁入式搅拌

1—垫料压盖 (切成两块); 2—垫料 (可更换); 3—铰链;
4—开槽螺母; 5—动 O 形圈; 6—不锈钢球 (SCS13)

角度固定的旁入式搅拌设备比泵的循环搅拌还要轻微, 特别是在为了节约动力和含有大量泥浆的情况下, 如果用角度固定的旁入式搅拌, 天长日久就容易产生大量的底部堆积。若用角度可变的旁入式搅拌设备, 由于连续周期的扫掠搅拌, 增加了液体的无规则流动, 可防止底部周边和搅拌器中间安装部分的泥浆堆积。

角度变换的程序是以左 30°、中心、右 30°、中心、左 30°的顺序进行运转, 变换时间应根据物料的种类和操作条件而定。

八、组合式搅拌

有时为了提高混合效率, 需要将两种或两种以上形式不同、转速不同的搅拌器组合起来使用, 称为组合式搅拌设备。图 1-19 中是一台用于生产牙膏、涂料等的搅拌设备, 通过三种叶轮的协同作用, 将固体粉末均匀地分散到黏稠性液体中。齿片式叶轮以大于 1500r/min 的高速进行回转, 具有打

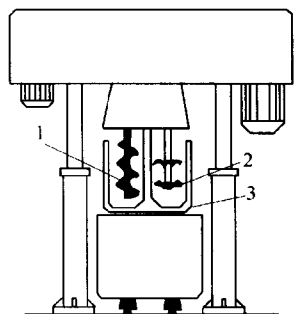


图 1-19 锚-齿片-螺杆组合型搅拌设备

1—螺杆; 2—齿片; 3—锚

散粉团和打碎固体颗粒的作用; 螺杆式叶轮以每分钟数十转至数百转的速度旋转, 它造成强有力的轴向流动; 锚式叶轮以每分钟十多转至数十转的低速转动, 把罐内液体输送至齿片式叶轮造成的高剪切区和螺杆式叶轮形成的轴向流区。由于这三个叶轮的旋转轴互不重合, 故称作非同轴组合式搅拌设备。

图 1-20 中的搅拌设备把框式搅拌器与另一个仔心搅拌器进行组合, 由于两个搅拌叶轮安置在同一轴线上, 故称作同轴组合式搅拌设备。框式搅拌器上可带刮板也可不带刮板; 中心搅拌器可以是高

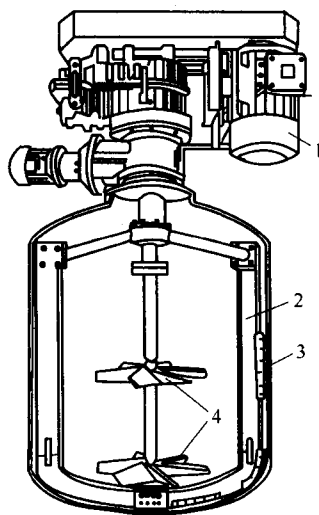


图 1-20 框-涡轮组合型搅拌设备

1—电机; 2—框式搅拌器; 3—刮板; 4—双层涡轮

速旋转的齿片，也可如图所示的双层涡轮，也可以是适合于更高黏度的不规则四边形叶轮等。驱动电机可以是定速的，也可是无级变速的。可通过开环或闭环的控制单元来控制功率的输入并进行黏度的

测量。这种搅拌设备适合于非牛顿型流体和热敏性液体的混合，也适合于作为中、高黏物料的反应器。最大适用黏度为 $3000\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，其最大的容积达 25m^3 ，最大输入功率为 250kW 。