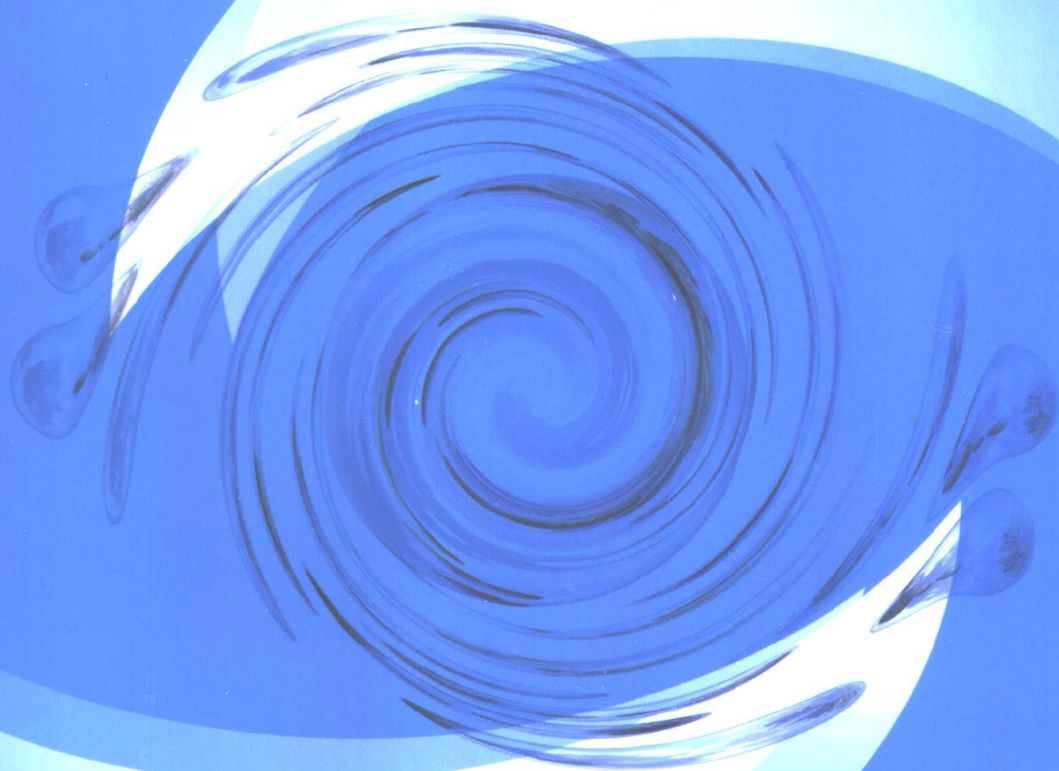


水力旋流器 分离技术

● 赵庆国 张明贤 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

水力旋流器分离技术

赵庆国 张明贤 编著

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

水力旋流器分离技术/赵庆国, 张明贤编著. —北京:
化学工业出版社, 2003.7

ISBN 7-5025-4620-0

I. 水… II. ①赵…②张… III. 水力旋流器-基本
知识 IV. TD454

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 055039 号

水力旋流器分离技术

赵庆国 张明贤 编著

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 麻雪丽

责任校对: 洪雅姝

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

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 18· 字数 440 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4620-0/TH·125

定 价: 45.00 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 2003-003 号

前 言

水力旋流器是一种应用非常广泛的液体非均相混合物的分离设备,其基本原理是将具有一定密度差的液-液、液-固、液-气等两相或多相混合物在离心力的作用下进行分离,分离效率高、分离设备占用空间小,并且可连续操作。由于两相或多相液体混合物的分离在各种行业里都是一种非常普遍的现象,因此水力旋流器在化工、石油、选矿、环保、制药、食品、轻工、城市废水处理、造纸等诸多行业都有非常广阔的潜在应用市场。其中固-液旋流器发展得比较早,目前已经应用于液体的除砂、澄清、浓缩、颗粒分级、矿粒分选等多种用途,技术上相对比较成熟,但在小尺寸固-液旋流器以及小粒度旋流分级器等方面还有待于技术上的进一步完善;液-液旋流器则发展得相对晚些,产品品种也相对单调。另外,目前在各行业虽然经常应用水力旋流器,但不同行业里对水力旋流器的命名不尽相同,而且不同行业在水力旋流器应用方面的经验也很少直接交流。基于这种状况,目前水力旋流器的应用方面有两个特点:一是不同行业里旋流器的实际使用情况以及潜在的应用前景要远远大于一般人所了解的情况;二是很多场合都可以使用高效的旋流器作为分离设备,但在设计时可能因为对旋流器设备的陌生而失去了选用旋流器的机会。这两个特点对于水力旋流器的应用以及旋流器分离技术的发展是非常不利的。目前关于水力旋流器方面的参考书以及设计资料不多,作者希望通过此书的出版能够让不同行业的相关人员对水力旋流器有比较全面的了解,促进旋流器技术与各行业生产实际的结合,也同时为水力旋流器的设计提供比较系统的基础理论依据。

本书共分12章。其中前3章介绍水力旋流器技术中的基本概念;第4章集中介绍水力旋流器的各种结构形式;第5、第6章系统介绍水力旋流器的工艺设计方法;第7章介绍作者近年来针对液-液旋流器的最新研究成果,第8章简要介绍水力旋流器技术中的计算流体力学方法、重介质旋流器的基本概念以及有关旋流器设计中需要注意的一些问题;第9~11章介绍水力旋流器的实际应用情况以及相关的制造、安装与调试方面的情况;第12章为几种典型的旋流器制造厂商与旋流器产品介绍。本书的特点是:(1)各章节内容相对独立,不同的读者可根据自己的兴趣选择性地阅读;(2)将近年来液-液水力旋流器的研究成果融入了本书各章节内容;不仅融入学术界关于水力旋流器的最近研究成果,而且从写作风格上尽量按照教材的方式写作,便于读者的阅读或自学。因此本书的内容可作为工程技术人员以及科学研究人员的设计资料或参考书,也可作为高等学校相关专业课程的教材使用。

本书前8章由北京工业大学环境与能源工程学院赵庆国博士完成,后4章由北京联合大学生物化学工程学院张明贤副教授完成。

学无止境,每个人的知识都是有限的。本书在写作过程中会存在着这样或那样的缺点,作者恳请各界人士提出宝贵意见。

编 者

2003年6月 北京

内 容 提 要

本书共分 12 章。分别对水力旋流器的基本概念，水力旋流器内的流体流动，水力旋流器的工艺参数、结构、工艺指标计算、分离性能计算，内流场与分离性能的解析求解方法，在技术中存在的问题，以及水力旋流器的选用与工艺设计，水力旋流器的应用、制造与调试和典型水力旋流器进行了介绍。内容具体，实用性强。

本书可供化工、石油、水处理、冶金、采矿、食品、给排水等专业的工程技术人员以及大专院校相关专业师生参考。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 分离的基本常识与分类	2
1.3 流体旋转运动的基本知识	3
1.3.1 有旋运动与无旋运动	3
1.3.2 旋转流体的能量方程	5
1.3.3 强制涡与自由涡运动的速度方程	6
1.4 固-液两相流的基本知识	6
1.4.1 连续相与分散相	6
1.4.2 密度	7
1.4.3 浓度	7
1.4.4 密度与体积浓度之间的关系	7
1.4.5 密度与体积固-液比之间的关系	7
1.4.6 密度与质量浓度之间的关系	7
1.4.7 密度与质量固-液比之间的关系	8
1.4.8 黏度	8
1.5 两相流动过程中的分离原理	9
1.5.1 颗粒在流体中运动时的流体曳力	9
1.5.2 两相流中的受力分析	10
参考文献	11
第 2 章 水力旋流器内的流体流动	12
2.1 概述	12
2.2 水力旋流器的工作原理	12
2.3 旋流器内流体的流动区域与流动类型	14
2.4 水力旋流器内的流速分布简介	15
2.4.1 切向流速分布	15
2.4.2 轴向流速分布	17
2.4.3 径向流速分布	18
2.5 旋流器内的短路流与循环流	20
2.6 停留时间分布	21
2.7 空气柱	23
2.7.1 空气柱的产生	23
2.7.2 空气柱的大小与空气柱内的流动	25
2.7.3 空气柱的形状	26
2.8 涡流运动中的压力分布	27

2.9 最大切线速度轨迹面·····	28
参考文献·····	29
第3章 水力旋流器的工艺参数 ·····	31
3.1 概述·····	31
3.2 水力旋流器的分类·····	31
3.2.1 按分散相类型分类·····	32
3.2.2 按混合物组分密度分类·····	32
3.2.3 按水力旋流器的结构分类·····	32
3.2.4 按分散相浓度分类·····	33
3.2.5 按有无运动部件分类·····	33
3.2.6 按用途分类·····	34
3.3 分离效率·····	34
3.3.1 (总) 分离效率 ϵ ·····	34
3.3.2 折算分离效率·····	36
3.4 (分) 级效率与迁移率 ·····	37
3.5 分割效率 (cut size) 与分级精度 (classification sharpness) ·····	39
3.6 压力降·····	40
3.7 水力旋流器技术中的主要参数·····	41
3.7.1 基本结构参数·····	41
3.7.2 物性参数·····	42
3.7.3 操作参数·····	42
3.7.4 性能参数·····	45
3.8 旋流器的能耗与节能·····	46
参考文献·····	47
第4章 水力旋流器的结构 ·····	48
4.1 概述·····	48
4.2 水力旋流器的组合结构类型·····	48
4.2.1 长锥型旋流器·····	49
4.2.2 短锥型旋流器·····	49
4.2.3 长柱型旋流器·····	50
4.2.4 短柱型旋流器·····	51
4.2.5 全柱型旋流器·····	52
4.3 水力旋流器的局部结构类型·····	52
4.3.1 进料管结构·····	52
4.3.2 溢流管结构·····	53
4.3.3 旋流器器壁结构·····	56
4.3.4 底流管结构·····	60
4.4 水力旋流器的内件·····	65
4.4.1 带导向装置的旋流器·····	65
4.4.2 圆柱段带螺旋导向叶片结构的旋流器·····	66

4.4.3	带涡流发生器的轴向旋流器	66
4.4.4	带挡板的旋流器	66
4.4.5	中心带固棒的旋流器	66
4.4.6	溢流管外带旋转叶轮的旋流器	67
4.4.7	内带空气导管的旋流器	68
4.4.8	内部具有小旋流器的旋流器	68
4.4.9	带弹簧振子的旋流器	69
4.4.10	内部增加卸料螺旋的水力旋流器	70
4.5	特殊形式的水力旋流器	70
4.5.1	磁力水力旋流器	70
4.5.2	磁流体水力旋流器	71
4.5.3	电化学水力旋流器	71
4.5.4	充气水力旋流器	72
4.5.5	气液水力旋流器	72
4.6	类水力旋流器	73
4.6.1	液-液-固三相分离装置	73
4.6.2	旋流式浮选器	73
4.6.3	喷射式浮选槽	74
4.6.4	旋流动态薄层气压过滤机	74
4.7	常见的几种旋流器	74
	参考文献	75
第5章	水力旋流器的工艺指标计算	80
5.1	水力旋流器中的压降	80
5.1.1	基于最大切线速度轨迹面法的压降计算	80
5.1.2	Tarjan 的等压面法	83
5.1.3	空气柱界面法	84
5.1.4	经验公式	85
5.2	生产能力的理论计算法	86
5.2.1	基于最大切线速度轨迹面法的生产能力计算式	86
5.2.2	波瓦洛夫 ^[6] 的空气柱界面法	87
5.3	生产能力的经验关联式法	88
5.3.1	达尔斯特罗姆 (D A Dahlstrom) 计算式	88
5.3.2	普里特 (L. R. Plitt) 计算式	89
5.3.3	Lynch 和 Rao 的计算式	89
5.3.4	Arterburn 的计算式	90
5.3.5	Mular 和 Jull 的计算式	90
5.3.6	陈炳辰等的公式	90
5.4	应用效果对比	90
5.4.1	最大切线速度轨迹面法计算示例	91
5.4.2	几种生产能力计算方法的应用效果比较	92

5.4.3 Plitt 计算方法与 Lynch 和 Rao 方法的比较	94
5.5 旋流器的产物分配计算	96
5.5.1 分股比 (流量分配) 的经验模型	97
5.5.2 流量比的经验模型	98
5.5.3 水量比的经验模型	99
5.5.4 物料衡算法	100
5.5.5 实际应用效果	103
参考文献	105
第 6 章 水力旋流器的分离性能计算	107
6.1 水力旋流器分离性能指标的定义及其相互间的关系	108
6.1.1 分离效率	108
6.1.2 折算分离效率	109
6.1.3 级效率与迁移率	110
6.1.4 分离粒度与分级粒度	111
6.1.5 基本关系	112
6.2 折算分离效率曲线与折算迁移率曲线	113
6.2.1 Plitt 模型	113
6.2.2 Lynch 模型	113
6.2.3 Antunes & Medronho 模型	114
6.2.4 Colman & Thew 模型	114
6.2.5 Martins 模型	114
6.2.6 分析模型	115
6.3 计算分离粒度的平衡轨道法	115
6.3.1 最大切线速度轨迹面法	116
6.3.2 内旋流法	117
6.3.3 零轴向速度包络面法	118
6.3.4 外旋流法	119
6.4 计算分离粒度的停留时间法	120
6.4.1 Rietema 计算式	120
6.4.2 Holland-Batt	120
6.5 计算分离粒度的挤流排料法	121
6.6 计算分离粒度的两相湍流法	121
6.7 计算分离粒度的回归模型法	122
6.7.1 Dahlstrom 模型	122
6.7.2 Yoshioka & Hotta 模型	122
6.7.3 Lynch 模型	122
6.7.4 Plitt 模型	123
6.7.5 Mular & Jull 模型	124
6.7.6 Arterburn 模型	124
6.7.7 Antunes 模型	125

6.7.8 Svarovsky 模型	125
6.8 液-液分离中的分割尺寸计算	125
6.8.1 Thew 的模型	126
6.8.2 Martins 模型	126
6.8.3 分析模型	126
6.9 水力旋流器分离性能模型的应用与对比	127
6.9.1 分级效率与迁移率	127
6.9.2 分离粒度的预测	129
6.9.3 旋流器的串联与并联	130
参考文献	132
第 7 章 水力旋流器内流场与分离性能的解析求解	135
7.1 概述	135
7.2 旋流器内连续相流体的内流场求解	136
7.2.1 固-液旋流器	136
7.2.2 液-液旋流器 (轻质分散相)	141
7.3 流场计算结果分析	144
7.3.1 固-液旋流器	144
7.3.2 液-液旋流器	147
7.4 液-液旋流器的分离效率模型	149
7.4.1 基本假定	149
7.4.2 单锥旋流器的分离效率 (迁移率) 模型	150
7.4.3 双锥旋流器的分离效率 (迁移率) 模型	152
7.5 分离效率 (迁移率) 的理论计算结果	156
7.5.1 对比基准	156
7.5.2 对比结果	156
7.5.3 分析模型的进一步预测	158
7.5.4 分离模型结果在实际操作过程中的应用	162
7.5.5 液-液旋流器分割尺寸的理论预测	163
参考文献	165
第 8 章 水力旋流器技术中的其他问题	167
8.1 两相湍流的数值模拟	167
8.1.1 连续相液体的湍流数学模型	167
8.1.2 水力旋流器内分散相颗粒运动的数学描述	169
8.1.3 计算流体力学方法的应用	170
8.2 重介质旋流器	174
8.2.1 概况	174
8.2.2 重介质悬浮液的特性和要求	176
8.3 水力旋流器设计中需要注意的一些问题	180
8.3.1 旋流器尺寸对旋流器性能的影响	181
8.3.2 旋流器分离系统设计的基本原则	182

参考文献	183
第9章 水力旋流器应用	185
9.1 应用范围	185
9.1.1 澄清	185
9.1.2 浓缩	186
9.1.3 颗粒分级	186
9.1.4 颗粒分选	187
9.1.5 液-液分离	189
9.1.6 气液分离	189
9.1.7 三相同时分离	189
9.2 旋流器的并联与串联	190
9.2.1 水力旋流器的并联	190
9.2.2 旋流器的串联	191
9.3 水力旋流器与其他分离设备的联用	193
参考文献	195
第10章 水力旋流器在工业中的应用	196
10.1 水力旋流器在造纸工业中的应用	196
10.1.1 前向式水力旋流器	197
10.1.2 反向式水力旋流器	200
10.2 水力旋流器在煤炭工业中的应用	201
10.2.1 重介质选煤	202
10.2.2 水介质选煤	211
10.3 水力旋流器在选矿工业中的应用	214
10.3.1 在磨矿中的典型流程	214
10.3.2 用水力旋流器中选矿	217
10.4 水力旋流器在非金属矿加工和超细粉体技术中应用	218
10.4.1 精细分级用旋流器的结构特征	219
10.4.2 水力旋流器在高岭土生产中的应用	222
10.4.3 水力旋流器在氧化铝生产中的应用	224
10.5 水力旋流器在食品工业中的应用	226
10.5.1 淀粉加工业	226
10.5.2 其他方面	231
10.6 水力旋流器在石油工业中的应用	233
10.6.1 地面上的应用	234
10.6.2 井下应用	238
10.6.3 钻井液的固控	240
10.7 水力旋流器在化学工业中的应用	241
10.7.1 逆流晶浆增稠	241
10.7.2 重碱浆液浓缩-澄清	241
10.7.3 密封液除杂	242

10.8 水力旋流器在陶瓷工业中的应用	242
参考文献	243
第 11 章 水力旋流器的制造与调试	245
11.1 水力旋流器的磨损	245
11.1.1 磨损情况	245
11.1.2 磨损机理	247
11.2 材料	247
11.2.1 金属材料	248
11.2.2 无机非金属材料	248
11.2.3 有机材料	249
11.2.4 复合材料	250
11.3 制造技术	251
11.3.1 水力旋流器在制造上的要求	251
11.3.2 材料选择	252
11.3.3 安全性	252
11.3.4 常用的制造方法	253
11.4 安装技术	254
11.4.1 水力旋流的放置方式	254
11.4.2 管汇布置	255
11.5 工作点的调试及堵塞现象	256
11.5.1 平衡设计的水力旋流器的工作特点	256
11.5.2 淹没底流孔的设计	256
11.5.3 进入水力旋流器的工作压力调节	257
11.5.4 水力旋流器的工作点调试	257
11.5.5 旋流器的底流排出形状	259
参考文献	260
第 12 章 典型水力旋流器简介	261
12.1 NATCO 公司水力旋流器	261
12.1.1 Oilspin AV 液-液水力旋流器	261
12.1.2 Mozley Sandspin 固-液水力旋流器	262
12.1.3 Mozley Wellspin 井口除砂器	263
12.1.4 Mozley 水力旋流器的布置方式	264
12.2 Krebs Engineers 公司水力旋流器	265
12.2.1 用于细粒分级的大直径 Krebse MAX 型旋流器	265
12.2.2 Krebs D 系列标准旋流器	266
12.3 Conoco Specialty Products Inc. 公司水力旋流器	269
参考文献	270
符号说明	271

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

水力旋流器是一种分离非均相液体混合物的设备，它是在离心力的作用下根据两相或多相之间的密度差来实现两相或多相分离的。由于离心力场的强度较重力场大得多，因此水力旋流器比重力分离设备的分离效率要大得多。

水力旋流器的基本结构见图 1-1，由圆柱体、锥体、溢流口、底流口与进料口组成。溢流口在圆柱体的上端与顶盖连接，进料口在圆柱体上部沿侧面切向进入圆柱腔内。混合物料沿切向进入旋流器时，在圆柱腔内产生高速旋转流场。混合物中密度大的组分在旋转流场的作用下同时沿轴向向下运动、沿径向向外运动，在到达锥体段沿器壁向下运动，并由底流口排出，这样就形成了外旋涡流场；密度小的组分向中心轴线方向运动，并在轴线中心形成一向上运动的内旋涡，然后由溢流口排出，这样就达到了两相分离的目的。

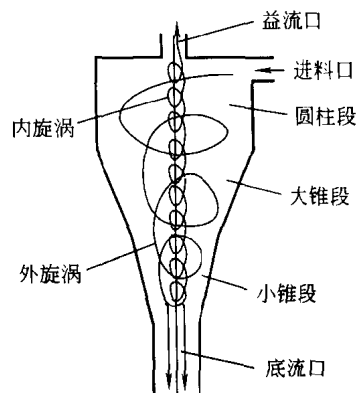


图 1-1 水力旋流器的基本结构

早在 1891 年，Bretney^[1] 就在美国专利上申请了第一个水力旋流器专利。1914 年水力旋流器正式应用于磷肥的工业生产。直到 20 世纪 30 年代后期，水力旋流器才以商品的形式出现，主要是用于在纸浆工业中水处理。在 20 世纪 40 年代前期，荷兰国家矿产部开始资助大吨位的选煤和矿石处理方面的研究，此时水力旋流器的应用提供了两相分离所需的动量。1943 年，美国原子能委员会的 Tepe 和 Woods 将水力旋流器用于乙醚-水系统的分离。1953 年，Van Rossum 将水力旋流器用于脱出油中的水分。以后，才开始出现大量的有关水力旋流器方面的文献，同时旋流器也出现了广泛的应用市场^[2]。

对水力旋流器的研究是从理论与工程应用研究两方面展开的，后者直至二次大战期间在美国原子能委员会与英国原子能管理局共同支持下才开始进行，主要是集中在关联操作性能以及在各种分离过程中的应用。在后续的研究中才比较多地考虑流体力学原理及其分析方法，至 1965 年，文献中共积累有 600 多篇有关水力旋流器方面的研究论文及 55 篇专利，此时水力旋流器已经成为一种标准的固-液分离设备。

20 世纪 60 年代以后，人们开始将水力旋流器用于实验设备以及其他更广泛的工业领域，主要的有矿冶行业中的颗粒分级、矿物质回收与水处理，化学工业中液-液萃取、固-液滤取、结晶，空间技术中的零重力场分离，机械加工行业中回收润滑油及贵金属，电子工业中回收稀有金属，生物化学工程中的酶、微生物的回收，食品与发酵工业中的淀粉、果汁、酵母等与水的分离，石油工业中的油-水分离、油-水-气分离与油-水-泥分离等。目前，水力旋流器已经在广泛的领域内被认同，而且其应用领域正在越来越多。

水力旋流器的应用包括固-液分离、液气分离、固固分离（分选）、液-液分离、液气固三相同时分离以及其他应用。目前水力旋流器还作为一种高效的颗粒分级设备。单个水力旋流器的直径一般可以从 10mm~2.5m，多数固体颗粒的分离粒度可以小至 $2\sim 3\mu\text{m}$ ，单个水力旋流器处理能力的范围一般为 $0.1\sim 7200\text{m}^3/\text{h}$ ，其操作压力一般在 $0.034\sim 0.6\text{MPa}$ 范围内，较小直径的旋流器通常以较高压力操作。

与重力分离设备相比，水力旋流器的优点如下。

(1) 结构紧凑，体积小 这是由于离心力场远大于重力场（约 1000 倍的数量级），所以在料液处理量相同的情况下，物料在水力旋流器中所需的停留时间（典型的停留时间数据为 2s 左右）远小于在重力分离设备中进行分离时所需要的停留时间（物料的平均停留时间正比于设备体积），另外，由于离心力场基本上不受重力场的影响，因此水力旋流器可根据空间需要采用立式安装或卧式安装。

(2) 质量轻 由于待分离物料在水力旋流器中所需的停留时间很短，所以旋流器分离系统中累积的料液量及其相应的设备质量大大地减轻。与传统的分离设备（如浮选池系统）相比，采用旋流器系统后油-水分离系统的质量降低到采用重力分离系统质量的 $\frac{1}{5}\sim\frac{1}{6}$ 。

(3) 易于设计、安装 静态水力旋流器可以模块化单元的方式进行设计、组装，当料液处理量增加或减小时，可以随时增减旋流器的个数，而且由于旋流器的体积小、质量轻，在应用现场可以很方便地吊装，甚至可以人力搬动、组装。这样既可以最大限度地降低初始设备投资，又可以随时调节设备单元以满足生产量变化时的需要。如果采用重力分离设备，则必须按可能出现的最大料液处理量进行设计。

(4) 需要的系统配件少 静态水力旋流器中没有运动部件，实现两相分离所需要的能量只是进口处的压力，除了进料泵外，整个分离系统不需配备其他机械及其相关的连接配件。

(5) 维修费用低 由于没有运动部件基本上不需维护，虽然料液中固体颗粒的存在有可能磨损旋流器的衬里，但是工业现场的使用经验证明，旋流器的使用寿命一般都在 5 年以上。

(6) 易于调节与控制 由于旋流器中无运动部件，只要安装的旋流器能满足料液处理量的要求，就不需要其他的控制与调节装置。

(7) 较宽的操作范围 现场测试及操作经验证实水力旋流器在流量发生波动时性能比较稳定，即使流量的波动很大、很快，旋流器的操作性能也不受影响。例如液-液旋流器可在调节比为 3 或更大的范围内获得比较稳定的操作状态。

(8) 对基础的运动不敏感。

1.2 分离的基本常识与分类

对于流体混合物，其不同组分的分离可分为均相分离与非均相分离。均相分离是指各组分以分子的形式相混合、没有明显的相界面的多组分流体之间的分离；非均相分离则是指具有明显的相界面的各流体组分之间的分离。另外，我们还可以将分离过程分为机械分离与传质分离两大类：所谓机械分离是指简单地利用机械的方法就可以将两相混合物进行分离，而相间并不发生物质传递过程，如过滤、沉降、离心分离、旋风分离、静电除尘等，这类分离过程在工业上有大量广泛的应用；传质分离是指在相间同时发生质量与能量传递的分离过程。可以在均相中发生，也可以在非均相中进行，常见的化工单元操作如蒸发、精馏、吸

收、萃取、吸附、浸取、干燥、结晶等都是在非均相中进行的，而热扩散、气体扩散、超滤、反渗透、电渗析、液膜分离等均相分离过程，则是通过某种介质在压力、温度、组成、电势或其他梯度所造成的强制力的作用下，依靠气体或溶液中不同组分的微观粒子（如微团、离子、分子等）的迁移速度的差别实现的分离过程。

分离过程之所以能够进行是由于混合物中待分离的组分的各种物理化学性质之间，至少存在着某一种性质上的差异，可用于分离的常见物性见表 1-1 所示^[3]。

表 1-1 可用于分离的性质

物理方面的性质	
力学性质	密度, 摩擦因数, 表面张力, 尺寸, 质量
热力学性质	熔点, 沸点, 临界点, 转变点, 蒸气压, 溶解度, 分配系数, 吸附平衡
电、磁性质	电导率, 介电常数, 迁移率, 电荷, 磁化率
输送性质	扩散系数, 分子飞行速度
化学方面的性质	
热力学性质	反应平衡常数, 化学吸附平衡常数, 离解常数, 电离电位
反应速度性质	反应速度常数
生物学方面的性质	生物学亲和力, 生物学吸附平衡, 生物学反应速度常数

水力旋流器分离技术是利用密度差进行多相分离的非均相机械分离过程，因此适用于水力旋流器分离的物料必须是具有一定密度差的多相液体混合物，密度差越大，分离过程越容易进行，反之越难。利用水力旋流器进行分离的液体混合物可以是液-液、液-固、液-气以及其他的三相或多相料液，但其中必有一相为液体。

另外，必须注意的是，从热力学角度来说，分离过程是使物质达到更为有序化的过程，因此，不是一种熵增过程，也就是非自发过程，因此，分离过程的进行必然要消耗外界能量。因此，分离过程的能耗与分离能力的大小是衡量一种分离过程的有效性的两种主要性能。

1.3 流体旋转运动的基本知识^[4]

水力旋流器是在压力的作用下将流体的直线运动转化为旋转运动的装置，在旋流器内部，流体的运动方式是复杂的三维旋转运动，流体的旋转运动简称为涡流。水力旋流器的分离过程，就是流体旋涡的产生、发展和消失的过程。因此，在研究水力旋流器分离原理和设计计算方法之前，简要介绍流体旋涡运动的基础知识十分必要。

1.3.1 有旋运动与无旋运动

涡流运动就是流体的旋转运动。根据流体在旋转运动时质点有无自转的现象，将其分为自由涡运动和强制涡运动两大类。凡流体质点不围绕自身瞬时轴线旋转的运动叫自由涡运动，自由涡运动亦称为无涡或无旋运动。自由涡运动的标志是角速度矢量为零，即 $\omega = 0$ 。凡流体质点围绕自身瞬时轴线旋转的运动叫强制涡运动，强制涡运动亦称有涡或有旋运动，强制涡运动的标志是角速度矢量不为零，即 $\omega \neq 0$ 。

强制涡是旋涡运动的主要形式，自由涡只有在理想的流体中才能实现。具有黏性的实际流体不会形成真正的自由涡，但当其黏性对其运动影响很小以致可以忽略不计时，才能把实

实际流体的运动按自由涡运动处理。实际流体是有黏性的，而黏性对其旋涡的形成和发展有决定性的作用。

在自然界和工程技术中，还经常见到中心为强制涡而外围为自由涡的组合涡运动以及涡流与汇流组成的螺线涡运动等。

表征流体旋涡运动的量是角速度，正如速度矢量一样，角速度也是矢量，可用描述速度矢量的方法来描述角速度矢量。

涡线是涡场中的一条光滑的曲线，在任何时刻涡线上各点的切线方向与该点的角速度矢量相重合，见图 1-2。很明显，涡线就是流体质点的瞬时转动轴线。由一组涡线构成的管状表面叫涡管，如图 1-3 所示。

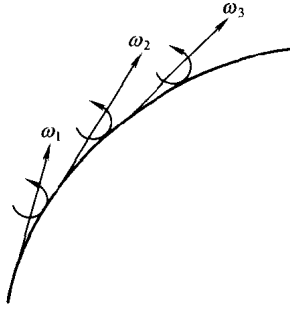


图 1-2 涡线

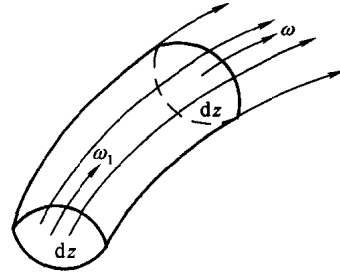


图 1-3 涡管

涡管中涡线的总体叫涡束或元涡，单位面积上的涡束叫做旋涡强度，简称涡强，可用下式表示

$$\Omega = 2\omega = \nabla \times U \quad (1-1)$$

式中 Ω —— 涡强（流体微团的旋转角速度矢量）；

ω —— 角速度；

U —— 速度矢量；

∇ —— 哈密顿算子。

在柱坐标系 (r, θ, z) 中， ω 在径向、切向及轴向的分量与相应的速度分量 u_r, u_θ, u_z 的关系可表示为

$$\omega_r = \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} - \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \quad (1-2a)$$

$$\omega_\theta = \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad (1-2b)$$

$$\omega_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (ru_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \quad (1-2c)$$

涡管断面面积与涡强的乘积叫涡通量。如图 1-3 所示，微元涡管和有限涡管的涡通量分别为

$$dJ = \Omega dA = 2\omega dA \quad (1-3)$$

$$J = \int dJ = \int_A \Omega dA = \int_A 2\omega dA \quad (1-4)$$

应该指出，涡线与流线的区别就在于涡线是由角速度矢量构成，流线是由线速度矢量构成。

对有旋（或有涡）运动， $\Omega \neq 0$ ，而对无旋（或无涡）运动， $\Omega = 0$ 。需着重指出的是流体运动的有旋或无旋，需视流体微团是否围绕着通过其自身的瞬时轴旋转，而与微团轨迹的形状无关。如下面将要介绍的，虽然强制涡与自由涡的流体质点轨迹都是圆周线，但前者为有旋流动，而后者则是无旋流动。

在有势质量力作用下的理想流体，自由涡始终是自由涡，强制涡始终是强制涡，两者不能互相转换。实际流体由于其黏性作用，可以使没有旋涡的流体发生旋涡，亦可把原有的旋涡削弱甚至于消失。因此，实际流体的运动情况要比理想流体复杂得多。

1.3.2 旋转流体的能量方程

如图 1-4 所示，当流体围绕垂直轴线作旋转运动时，在其半径 r 处取一宽度为 dr 和厚度为 dz 的长方形流管，则得同一水平面上的伯努利方程

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u_\theta^2}{2g} \quad (1-5)$$

式中 H ——总压头；
 z ——势压头；
 p ——半径 r 处压力；
 ρ ——流体密度；
 u_θ ——半径 r 处切向速度；
 g ——重力加速度。

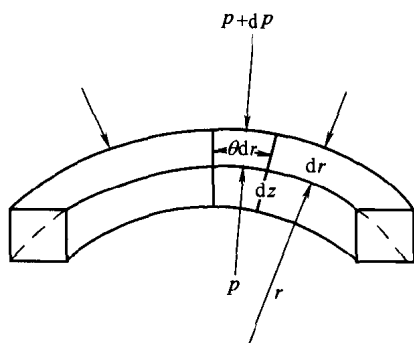


图 1-4 旋转流运动微元体

将式 (1-5) 对半径 r 微分，得

$$\frac{dH}{dr} = \frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dr} + \frac{u_\theta}{g} \frac{du_\theta}{dr} \quad (1-6)$$

从式 (1-6) 可以看出，在旋转运动流体中，沿径向总压头的变化率与径向的压力和速度的变化率有直接关系。

就微元体积 $dr \cdot dz \cdot r d\theta$ 中的流体而言，当作用于该体积上的压力和离心力相平衡时，沿径向的外力之和为零

$$p r d\theta dz - (p + dp) r d\theta dz + \rho r d\theta dr dz \frac{u_\theta^2}{r} = 0$$

$$\text{即} \quad \frac{dp}{dr} = \rho \frac{u_\theta^2}{r} \quad (1-7)$$

将式 (1-7) 代入式 (1-6)，则得

$$\frac{dH}{dr} = \frac{u_\theta}{g} \frac{du_\theta}{dr} + \frac{1}{g} \frac{u_\theta^2}{r} = \frac{u_\theta}{g} \left(\frac{du_\theta}{dr} + \frac{u_\theta}{r} \right) = \frac{1}{g} \frac{u_\theta}{r} \frac{d}{dr} (r u_\theta) \quad (1-8)$$

式 (1-8) 是旋转运动流体能量的微分方程，它反映出旋转运动流体在运动过程中的能量变化规律。式 (1-8) 也是旋转运动流体的基本方程，在不同的条件下，可以导得不同旋转运动流体的基本规律——速度和压力沿径向的分布规律。