

水力旋流器

非牛顿流场理论研究

梁 政 杨 琳 任连城 著

SHUILI XUANLIUQI

FEINIUDUN LIUCHANG LILUNYANJIU



科学出版社

水力旋流器非牛顿流场 理论研究

梁 政 杨 琳 任连城 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在水力旋流器理论研究与流场激光测试的基础上,应用计算流体力学理论和专业CFD软件,对以牛顿流场为基础的水力旋流分离理论进行完善,对以非牛顿流场为基础的旋流流场及分离理论进行了比较深入系统的研究,提出了相关理论与系列计算新公式。

本书可供从事黏性介质旋流分离技术开发与产品设计的研究人员与大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力旋流器非牛顿流场理论研究 / 梁政, 杨琳, 任连城
著. —北京: 科学出版社, 2014.7

ISBN 978-7-03-041375-8

I. ①水… II. ①梁… ②杨… ③任… III. ①水力旋
流器-非牛顿流动-理论研究 IV. ①TD454

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 150544 号

责任编辑: 罗 莉 / 封面设计: 墨创文化

责任校对: 邓利娜 / 责任印制: 余少力

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年7月第一版 开本: B5 (720×1000)

2014年7月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 220千字

定价: 48.00元

前 言

旋流器具有结构简单、紧凑, 占地面积小, 分离能力强(旋流流场的离心力场约为重力场的 1000 倍), 操作简单方便, 分离效率高, 设备维护费用低, 工作流程易于控制等优点, 在各领域的应用越来越广泛。目前, 旋流分离技术已在分离、澄清、浓缩、逆流洗涤、颗粒分级与分选等方面获得广泛的应用。

旋流分离技术在石油工业中有着广阔的应用前景, 目前在各大油田广泛采用旋流分离技术来完成钻井液固相分离及油田地面工程中的原油脱水、除砂、污水处理、聚合物分离等一系列分离作业。可以预见, 旋流分离由于其分离效率明显高于重力分离, 有望成为 21 世纪国内外石油工业分离作业中的主体技术。

目前, 国内外关于水力旋流分离技术的研究, 不论是流场理论还是工艺参数及结构设计, 绝大多数是建立在以清水(牛顿流体)作为介质的研究基础之上, 是把介质设为理想流体, 采用牛顿力学的数学模型来研究和测定流场。由于旋流流场本身高旋转、强湍流的复杂性, 在现有理论或经验公式的推导过程中都作了大量的假设, 这样的处理基本上忽略了介质黏性及流变性对流场的影响, 大大简化了研究问题的复杂性, 对于选矿、造纸、食品加工等低黏度分离领域是可以接受的; 但在石油行业等高黏介质的分离作业(如油水分离、黏油除砂、聚合物污水处理, 以及钻井泥浆净化(固控)作业)中, 由于分离介质都属于黏性较高的流体, 大部分介质还是典型的非牛顿流体, 其剪切应力随剪切速率的变化规律已不符合牛顿内摩擦定律, 介质流变性引起的内部流场(速度场、压力场)的变化已经不能被忽略, 介质的黏性及流变性对分离效果、分离粒度以及生产能力有直接的影响。随着旋流技术的发展及应用领域的拓展, 其面临的工作介质将越来越复杂, 研究介质黏性及流变性对旋流分离流场的影响很有必要。

目前关于非牛顿流体自身性质的研究相对较多, 但是对非牛顿流体旋流分离流场的研究还比较少, 针对黏度较高的牛顿及非牛顿介质旋流分离流场的机理及定量的理论研究还非常缺乏。

本书建立了基于黏性流场及非牛顿流体力学理论、考虑分离介质实际物性参数(黏度及流变性)的水力旋流器流场理论。书中以现有牛顿流场(清水)的研究成果为参照基础, 利用计算流体力学仿真软件的模拟仿真结果与现有激光测试及流体力学理论做对比验证, 获得了考虑介质黏度及流变性影响的旋流分离流场机理研究成果, 导出了一系列考虑介质黏度及流变性对流场关键参数影响

作用机理的定量表达式。

本书第1章简要介绍了旋流器基本概念及国内外研究发展概况,提出了建立考虑介质黏度及流变性的旋流分离理论的必要性。第2章介绍了黏性流场及非牛顿流场的基本理论及相关概念。第3章在《固液分离水力旋流器流场理论研究》的基础上,介绍了以清水为介质的牛顿流体旋流分离理论的进一步研究成果,提出了更为准确的运动区域划分,及组合涡指数应该是一个从-1到1的沿半径变化的分段函数,导出了新的以清水为介质的水力旋流器切向速度计算公式,首次给出了流场压力损耗系数及静压力的计算表达式,并与现有激光测试实验及相关研究做对比,验证了研究结果的正确性及优越性。第4章提出了分离介质黏度影响的组合涡指数及相应的切向速度计算公式,得出了黏度对轴向速度及径向速度影响不大的结论,提出了分离介质黏度影响的压力损耗系数及静压力的计算公式,通过不同黏度公式计算值与模拟实验值的对比,结果吻合很好,充分证明了作者提出的公式的正确性和实用性。第5章通过对石油行业中典型的非牛顿流体(钻井液、聚驱污水、原油)与牛顿流体(清水)在旋流分离流场中运动特性及各种参数的对比研究,全景显示了非牛顿流体在流场中的运动规律,分析了非牛顿流体与牛顿流体的异同。第6章通过对非牛顿流体中的幂律流体的流变对流场运动特性及各参数的影响研究,通过正交实验计算了4组不同幂律流体的稠度指数和4组不同流动指数对流场的影响,得出了非牛顿流体的稠度系数与牛顿流体黏度对流场各参数影响具有相似性。第7章通过对非牛顿流体中的幂律流体流变对流场运动特性及各参数影响的研究,首次通过叠加方式提出了反应稠度系数和非牛顿指数对组合涡指数及切向速度的计算公式。

以上研究为考虑介质黏性影响的旋流分离技术提供了理论基础,可供从事黏性介质旋流分离技术开发与产品设计的研究人员与大专院校师生参考。

由于作者学识和相关验证试验条件的限制,理论研究结果还需进一步在工业应用实践中对比验证。对书中错误及不完善的地方,恳请读者批评指正,以期推动黏性介质旋流分离流场基础理论研究与应用技术的发展。

本书的研究工作得到国家自然科学基金项目(项目批准号:51074202)的资助。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 水力旋流器基础理论	1
1.1.1 水力旋流器结构及工作原理	1
1.1.2 水力旋流器分类及应用	2
1.1.3 水力旋流器基本设计参数	4
1.1.4 水力旋流器内部流场参数	5
1.1.5 水力旋流器工艺评价参数	6
1.1.6 水力旋流器关键参数研究意义	7
1.2 旋流器研究方法及进展	8
1.2.1 数学方法	9
1.2.2 试验方法	10
1.2.3 数值模拟方法	11
1.3 主要研究工作及取得的成果	13
1.3.1 清水为介质流场机理研究的完善	14
1.3.2 介质黏度对牛顿流场影响的定量研究	14
1.3.3 非牛顿流场与牛顿流场的全景显示及对比分析	14
1.3.4 幂律流体流变性对流场影响的定性对比研究	15
1.3.5 稠度系数与非牛顿指数对组合涡运动影响的定量研究	15
第 2 章 分离介质黏性及非牛顿流场基本理论	16
2.1 牛顿流场基础理论	16
2.1.1 牛顿流体	16
2.1.2 黏度(分子黏度)	17
2.1.3 理想流体	18
2.1.4 黏性流体	18
2.2 非牛顿流场基本理论	18
2.2.1 非牛顿流体	18
2.2.2 表观黏度	19
2.2.3 非牛顿流体的分类	19
2.2.4 非牛顿流体的特性及应用	22
2.2.5 非牛顿流体力学与石油工业	25

2.3	湍流基本理论	25
第3章	以清水为介质的旋流器流场机理研究	28
3.1	清水($\mu=1\text{ mPa}\cdot\text{s}$)基本流场模拟结果及其运动特性分析	29
3.1.1	切线速度分布规律及数据统计平均处理	30
3.1.2	压力分布规律及数据统计平均处理	35
3.1.3	速度与压力耦合常数 C_p	38
3.2	组合涡运动指数 n 定量研究的进一步完善	39
3.3	切向速度定量研究	46
3.3.1	势流区(即组合涡运动区域)切向速度定量研究	47
3.3.2	边界层区域切向速度定量研究	50
3.4	速度场研究结果对比验证	52
3.4.1	在不同结构参数条件下验证公式的正确性	52
3.4.2	在相同结构参数条件下与原有理论对比验证	53
3.5	以清水为介质($\mu=1\text{ mPa}\cdot\text{s}$)流场能量损耗和静压力定量研究	55
第4章	介质黏度对速度场与压力场影响的定量研究	59
4.1	介质黏度对组合涡运动指数 n 的影响	59
4.2	介质黏度对切向速度的影响	65
4.3	介质黏度对径向速度的影响	72
4.4	介质黏度对轴向速度的影响	73
4.5	介质黏度对压力场的影响	75
第5章	非牛顿流变性对旋流分离流场的影响对比研究	79
5.1	油田适合于旋流分离作业的非牛顿流体	79
5.2	非牛顿流体与牛顿流体的对比研究	81
5.2.1	模型选择及入口边界条件设置	81
5.2.2	压力分布对比分析	82
5.2.3	速度场分布对比分析	83
5.2.4	两项体积比分布对比分析	86
5.2.5	剪切速率分布对比分析	86
5.2.6	黏度分布对比分析	88
第6章	幂律流体的流变特性对流场影响机理研究	92
6.1	稠度系数 K 对流场运动特性的影响	92
6.1.1	不同 K 值压力分布对比分析	92
6.1.2	不同 K 值速度分布对比分析	94
6.1.3	不同 K 值剪切速率分布对比分析	95
6.1.4	不同 K 值湍流黏度分布对比分析	96

6.1.5	不同 K 值黏度分布对比分析	96
6.2	非牛顿指数 N 对流场运动特性的影响	97
6.2.1	不同 N 值压力分布对比分析	98
6.2.2	不同 N 值速度场分布对比分析	99
6.2.3	不同 N 值剪切速率分布对比分析	100
6.2.4	不同 N 值黏度分布对比分析	101
第 7 章	幂律流体对组合涡运动特性影响的定量研究	105
7.1	非牛顿流体与牛顿流体对组合涡指数 n 影响的定量对比研究	106
7.2	两种典型非牛顿流体组合涡指数 n 的数学表达式及验证	115
7.3	幂律流体流变性对组合涡指数 n 值影响的定量研究	119
7.3.1	不同 K 值对组合涡指数 n 影响的定量对比研究	120
7.3.2	不同 N 值对组合涡指数 n 影响的定量对比研究	129
7.3.3	幂律流体流变性对组合涡指数 n 影响的定量研究	138
7.3.4	幂律流体流变性对切向速度影响的定量研究及验证	148
参考文献		157
彩色图版		163
索引		171

第 1 章 绪 论

1.1 水力旋流器基础理论

1.1.1 水力旋流器结构及工作原理

按照 Bradiey 最初给出的水力旋流器的定义，水力旋流器是一种利用流体压力产生旋转运动的装置^[1]。这一定义虽然不够全面，但揭示了旋流器工作原理的本质特征。当旋流器正常工作的时候，流体以一定的压力与初速度沿切线方向进入旋流器，对静态旋流器而言，其工作过程是混合液从进口沿切向进入旋流器，受边壁约束，切向运动变为旋转运动，产生高速旋转的涡旋流。当混合液从圆柱段进入锥段，受锥面的作用，涡旋流强度加强并保持，液体高速旋转，因此产生很大的离心加速度。受离心力作用，密度较大相(水)向边壁运动，通过下游出口(底流出口)排出旋流器体；而密度较小相(油)向轴中心迁移，通过上游出口(溢流出口)排出旋流器体。上下游出口流量可通过调节上下游出口背压阀的开度来改变，也可通过改变进口流量来改变，其结构示意图见图 1-1、图 1-2。

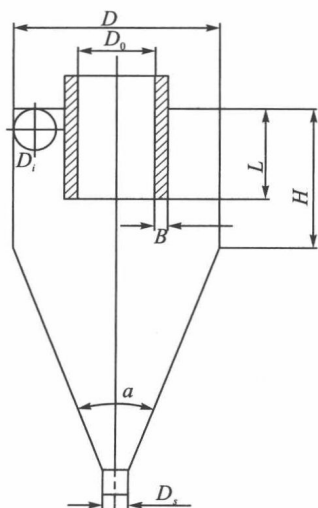


图 1-1 旋流器几何结构示意图

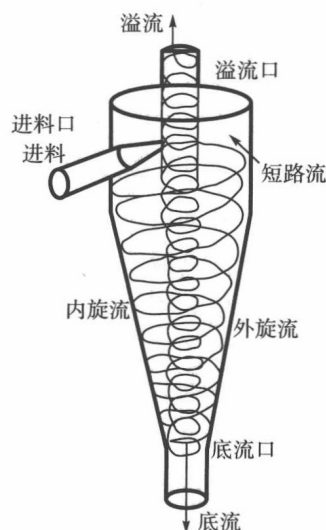


图 1-2 水力旋流器内流体的双螺旋模型

如果忽略重力的影响和压头的损失,内部的流场基本上是组合涡流场,符合组合涡运动通式(1-1)的规律:

$$v_t r^n = C \quad (1-1)$$

式中, v_t ——切向速度, m/s;

r ——半径所在位置, mm;

n ——组合涡指数;

C ——常数。

由式(1-1)可以看出,在准自由涡区域切线速度基本上是随半径的减小而增大。在同一流线上不同的两点满足式(1-1),则有

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_{t1}^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_{t2}^2}{2} \quad (1-2)$$

式中, p_1, p_2 ——分别为不同两点处对应的压力, Pa;

v_{t1}, v_{t2} ——分别为不同两点处对应的切线速度, m/s;

ρ ——流体密度, kg/m³。

当液体以静压力 p_0 、初速度 v_0 沿切线方向进入旋流器,此时流体对应的半径为旋流器的最大半径 R ,在内部任一点 $r_m < r < R$ 处,根据式(1-2),必有 $v_t > v_0$, $p < p_0$,所以流体静压力转化为流体的旋转运动。在这样的旋转运动中,原来流体中携带的固体颗粒(或液滴以及气泡等)在离心力的作用下重新分布,其中颗粒粒度(或密度)大的由于所受的离心力大,分布在半径较大的外旋流,最终以底流的形式由底流口排出,而粒度(或密度)小的大多分布在小半径的内旋流,最终以溢流的形式由溢流管排出^[2]。

1.1.2 水力旋流器分类及应用

水力旋流器按分离介质的物理性质可分为固-固分离、固-液分离、固-气分离、液-液分离以及固-气-液分离等;按形状可分为圆筒-圆锥型与圆筒型等;按筒壁是否转动可分为静态旋流器和动态旋流器等;按入口形式不同可分为单进液型、双向进液型、螺旋进液型等。

水力旋流器依靠流体在其内强旋所产生的离心力场来实现低密度差的液-液两相分离,离心力场强度为 1000~2000 倍重力加速度,两相分离时间大约两秒,仅为常规分离设备所需时间的几十分之一,具有分离性能好,处理量大,体积小,重量轻,操作费用低,对安装环境无特殊要求等特点。此外,水力旋流器无运动件,工作可靠,操作方便,维护和保养费用极低^[3],其在化工、石油、选矿、环保、制药、食品、造纸等诸多行业中的应用十分广泛,旋流分离技术在分离^[4]、澄清^[5]、浓缩^[6]、逆流洗涤^[7]、颗粒分级^[8]与分选^[9]等分离作业中应用良好。在生产中,习惯按作业分类。由于用途不同,所处理的对象不同,其

结构参数也有所不同。水力旋流器在石油工业中的应用可以解决现有重力分离工艺^[10](图 1-3)普遍存大型设备多、占地面积大、工程造价及后期维护费用高、存在整个生产不连续等问题,同时可以缓解随着采油工艺发展所需要处理的分离作业量越来越大与除砂、脱水、脱油处理系统负荷越来越大的矛盾。旋流分离工艺^[11](图 1-4)具有所用设备结构简单、占地面积小、分离能力强、设备维护费用低、工作流程易于控制等优点,在石油工业中得到了越来越广泛的应用;但由于现有旋流分离设计理论不完全满足黏性流体与非牛顿流体的分离器设计,需要系统研究针对不同分离介质(特别是黏性流体与非牛顿流体)的旋流器设计理论,研发出相应的旋流分离装备,满足油气田黏性流体与非牛顿流体分离作业的需要。

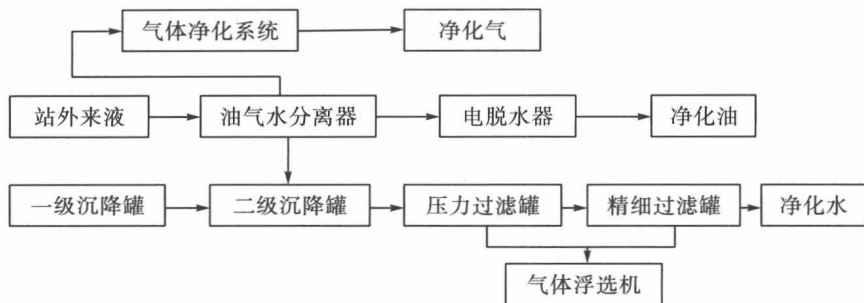


图 1-3 油田现场原有固控系统

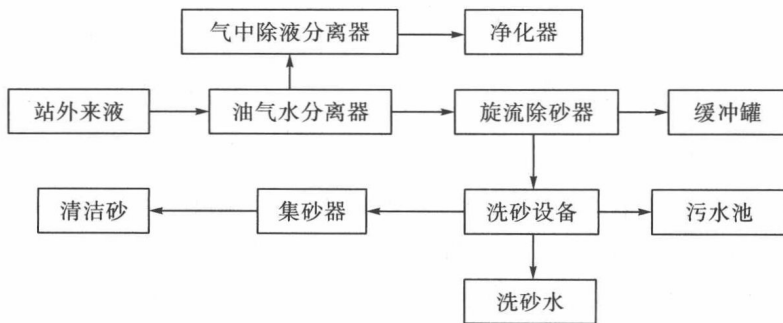


图 1-4 油田地面旋流除砂工艺流程图

目前旋流器在石油工业中应用较为成熟的工艺主要有三种类型:一是钻井液固控系统的除砂、除泥固-液旋流分离器,结构简图见图 1-5^[12];二是含油污水(包括三次采油产生的大量含聚合物污水)处理的液-液旋流器,结构简图见图 1-6^[13];三是原油、稠油除砂、脱水用的动态旋流器,结构简图见图 1-7^[14]。

从石油工业中的几种典型应用中可以看出,现场应用的旋流分离处理技术所面临的介质黏度都较高,且大多数分离流体都是典型的非牛顿流体,其流变

性对旋流流场会产生很大的影响, 直接导致油田现场应用效果不理想, 情况严重的甚至分离失效, 设备闲置。

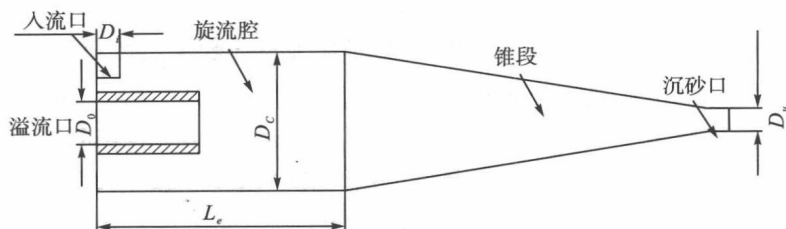


图 1-5 固液分离除沙器结构图

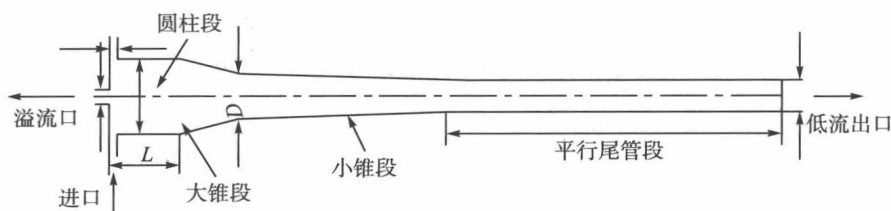


图 1-6 四段式液-液旋流器结构示意图

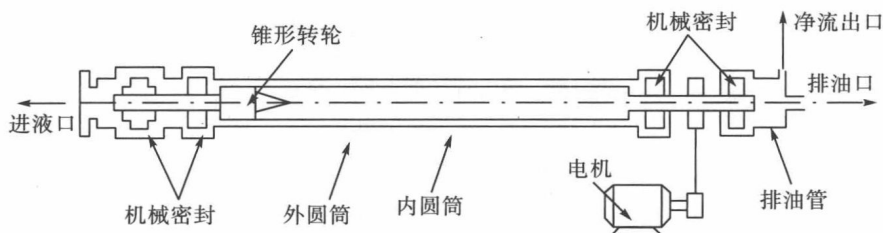


图 1-7 旋转式(脱油型)旋流器结构示意图

旋流分离技术的推广应用, 不仅在石油工业中遇到技术瓶颈, 在选矿、造纸等其他工业也面临分离介质矿浆浓度较高, 呈非牛顿流动特征的分离问题。因此, 在原有以清水为介质(理想流体)的理论研究成果基础上, 开展以黏性流场及非牛顿流场为基础的旋流分离流场理论研究是解决问题的关键, 对推动旋流技术在高黏度流场及非牛顿流场中的作业是非常必要的。

1.1.3 水力旋流器基本设计参数

旋流分离技术研究始于 20 世纪 50 年代末期, 通过几十年的实验研究表明, 影响旋流分离的因素至少有 14 个变量, 可分为三大类: 第一类为尺寸变量, 如旋流器的公称直径、进口直径等; 第二类为操作变量, 如进口流量、压力等; 第三类为混合液变量, 如连续相和分散相的黏度、平均粒径、浓度和分散相与

连续相密度差等。任何变量的不同组合都会产生不同的分离效率和能量消耗。因此,要找到一个较好的旋流器模型,需要做大量的实验研究。

旋流分离的数值模拟试验主要是分析旋流器的基本参数对旋流器内部流场各物理量及分离效率的影响关系^[15]。旋流器的基本参数可以分为以下三组:

(1)结构参数。包括进液口直径、溢流口直径、底流口直径及长度、圆锥段直径及长度、圆柱段直径及长度、大小锥角等。

(2)操作参数。包括进口流量、进口速度、分流比等。

(3)进口物性参数。包括进口物料的黏度、温度、两相之间的密度差、分散相的进口浓度、分散相粒径大小等。

实际工况中,水力旋流器的分离介质均为多相流流体,严格意义上讲,都属于黏性流体及非牛顿流体,介质的浓度、密度差、黏度都会对多相混合流体的流动性产生很大的影响,必然会对旋流流场的各种物理量的分布、分离过程产生严重的影响,最终影响整个旋流分离的效果。

1.1.4 水力旋流器内部流场参数

水力旋流器内部流体的真实运动属于组合螺线涡和螺旋流组成的螺旋涡运动,其流体质点的运动速度可以分解为切向速度 v_t 、径向速度 v_r 和轴向速度 v_a 三部分,其激光测试图见图 1-8^[16]。在目前旋流理论研究中,内部流场由于其对称性较强,可将其视为二维的平面运动,属于组合螺线涡运动。

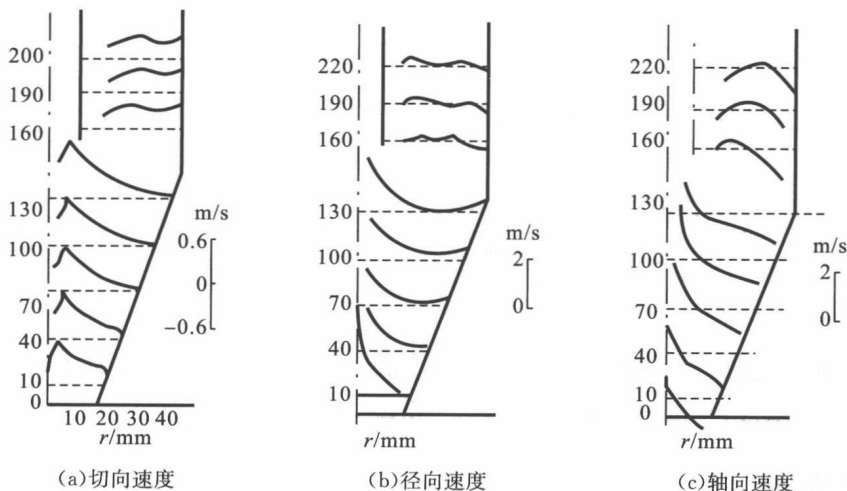


图 1-8 水力旋流器三维速度激光测试图

旋流器内部各物理量包括流场的静压、动压、总压、组合涡指数、切向速度、轴向速度、径向速度、湍动能、湍流黏度、剪切速率、分散相的集中度等,这些参数由旋流器基本参数的设计而决定,并都将影响旋流器的分离效果。其

中切向速度占据着最为重要的地位,这不仅是因为切向速度在数值上要远大于其他两向的速度,更重要的是切向速度是产生离心力的基本前提。在水力旋流器的工艺设计中,几乎所有的设计指标都要涉及切向速度,所以对水力旋流器切向速度本身精确的描述对水力旋流器流场研究和工艺设计有着非常重要的意义。

目前,学者们对水力旋流器切向速度的认识逐渐趋于一致:认为水力旋流器内部切向速度基本上符合组合涡运动,切向速度满足公式^[17-21]:

$$v_t r^n = v_{kt} R^n = C \quad (1-3)$$

式中, R 、 r ——分别为水力旋流器公称半径和旋流器中流体的旋转半径, mm;

v_t ——旋流器半径为 r 处流体的切线速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

v_{kt} ——液体在旋流器壁处(最大半径处)的切线速度;

n ——结构参数(自由涡运动指数);

C ——常数。

1.1.5 水力旋流器工艺评价参数

评价旋流器的工艺参数主要有生产能力、分离粒度、分离效率、压力降等。

1. 压力降

压力降描述^[22]为

$$\Delta p = p_k - p = \frac{\rho v_{kt}^2}{2n} \left[\left(\frac{R}{r} \right)^{2n} - 1 \right] \quad (1-4)$$

式中, p_k 、 p ——分别为旋流器壁处和半径 r 处的压力, Pa;

Δp ——旋流器壁处与半径 r 处的压力差(降), Pa;

v_{kt} ——旋流器壁面处的切向速度, m/s。

文献 [22] 取 $n=0.64$, 并根据经验公式

$$v_{kt} = 3.7 \frac{r_i}{R} v_i \quad (1-5)$$

得出了水力旋流器内部压力降沿半径的分布表达式。这是一个非常重要的公式,其不足之处是把 n 取为常数。

2. 生产能力

将式(1-5)代入式(1-4)解得

$$v_i = 0.38 \frac{R}{r_i} \sqrt{\frac{n \Delta p}{\rho \left[\left(1.5 \frac{R}{r_o} \right)^{2n} - 1 \right]}} \quad (1-6)$$

式(1-6)就是庞学诗先生提出的最大切向速度轨迹法生产能力计算公式^[23,24]。根据式(1-6),对于一定结构的水力旋流器而言,只要确定了其 Δp 就确定了生产能力。根据文献[22-24],这里的 Δp 就是水力旋流器的供液压力,是水力旋流器分离过程中的实际能量消耗,用作选择供液泵功率的依据。

3. 分离粒度

由于分离粒度是水力旋流器分离性能中非常重要的指标,一直以来人们对它的研究也比较多,不同学者根据不同的假设或理论提出了各种不同的分离粒度计算公式,详见表 1-1。

表 1-1 不同分离粒度值计算公式

参考文献	公式表达式	关联的相关参数
文献[102]	$d = \sqrt{\frac{-18\mu r v_r}{(\rho_m - \rho) v_i^2}}$	$v_i = 4.527 \text{ m/s}$ $v_r = -0.068 \text{ m/s}$ $r = 17 \text{ mm}$
文献[25]	$d_{wa0} = r_i \left(\frac{r_{va0}}{R} \right)^{\frac{(k+1)r_{va0}}{R+kr_{va0}}} \sqrt{\frac{18\mu r_{va0}}{v_i(\rho_m - \rho)(r_{va0} + r_d)(H-h)}}$	$v_i = 2.5 \text{ m/s}$
文献[26]	$d_{50} = 20.914 \left[\frac{\mu(1-R_w)\tan\theta}{q_m D(\rho_m - \rho)} \right]^{0.5} \left(\frac{2.3d_o}{D} \right)^n \left(\frac{d_i^2}{\alpha} \right)$	未查到该公式中 α 和 n 的取值
文献[27]	$d_{50} = \frac{80d_i^2}{\sqrt{q_m(\rho_m - \rho) \left[H_c + (R-r_o)/\tan\frac{\theta}{2} \right]}} \left(\frac{r_o}{R} \right)^n$	$q_m = 44.18 \text{ m}^3/\text{h}$ $n = 0.64$
文献[22]	$d_{50} = 448.5 \sqrt{\frac{D^{0.36} d_o^{0.64} d_i \rho^{0.5} \mu}{(\rho_m - \rho) \left[H - h_o + \frac{3D-2d_o}{6\tan\frac{\theta}{2}} \right] \Delta p_m^{0.5}}}$	$\Delta p_m = 0.10044 \text{ MPa}$
文献[28]	$d_{50} = 1100 \sqrt{\frac{D^{0.36} d_o^{0.64} d_i \rho^{0.5} \mu \tan\frac{\theta}{2}}{(\rho_m - \rho) [3D-2d_o] \Delta p_m^{0.5}}}$	$\Delta p_m = 0.10044 \text{ MPa}$
文献[29]	$d_{50} = \frac{13.7(d_i d_o)^{0.68}}{q_m^{0.53} (\rho_m - \rho)^{0.5}}$	$q_m = 44.18 \text{ m}^3/\text{h}$

1.1.6 水力旋流器关键参数研究意义

尽管水力旋流器的结构非常简单,但影响因素众多,内部的流场十分复杂。以清水为介质(理想流体)的理论基研究已经较为成熟了,其正确性和可靠性也在选矿、造纸等低黏度领域的工程应用当中得到了很好的验证。

现有的研究主要集中在结构参数及操作参数对内部流场及工艺参数影响的研究,随着旋流技术在高黏度、高浓度等复杂分离介质的分离作业中推广应用,研究介质的物理性质(黏度、浓度、密度差)等对流场运动特性及分离性能的影响

响就显得尤为重要。介质的各种物理性质可以最终归结为,也是最为重要的表现就是介质的流动特性。流变学研究表明,介质的浓度、分散相粒径、密度差、温度等都最终可以用介质的流变性来描述。

流变性对于牛顿流体可以用分子黏度的大小来表述,对于非牛顿流体,可以用表观黏度来表述。这就是本书选择的设计变量中物性参数——介质流变性对旋流分离流场及分离性能影响的关键参数。

从 1.1.3~1.1.5 小节的分析内容中不难看出,旋流器的基本设计参数(即某一组设计结构参数、操作参数及分离介质物性参数)的选择,可用于决定内部三维流场的参数分布规律,这也就决定了工艺评价指标的好坏。由这些具体的计算表达式可以看出:组合涡运动指数 n 的值与诸多参数相关联,研究旋流流场组合涡运动及旋流理论问题的关键在于如何准确确定 n 值,因为 n 值的大小直接决定了流场速度场的分布, n 值直接决定了评价旋流器分离性能好坏的几乎所有关键性参数(速度场分布、压力降、分离粒度、生产能力),所以一直是人们研究的重点,也是本书研究中的关键参数。

不同学者在不同的条件下提出的 n 值不同。目前在旋流器的设计中,由于无法得到准确的 n 值,只能根据经验或专家推荐的方法大致选择一个值(国内一般采用庞学诗提出的 $n=0.64$)。但是,由于原有的旋流流场理论基础是建立在理想流体的基础上,组合涡的理论描述没有充分考虑介质黏度的内部摩擦造成的能量损耗,导致按原有理论设计出的旋流器在面对较高黏度分离作业时就不太适用了(如钻井液的分离作业),因此很有必要对旋流分离流场组合涡运动做进一步的分析研究,这也是本书分析旋流分离牛顿和非牛顿流场的出发点和核心内容。

1.2 旋流器研究方法及进展

旋流分离技术有着独特的技术优势,在越来越多的领域中完成分离作业,已经历了一百多年的发展。水力旋流器在越来越多的行业和领域展示着它越来越广泛的应用前景,使得人们对水力旋流器的研究工作一直没有停止过。我国在该领域研究成果集中体现的专著最具代表性的是 1997 年庞学诗编著的《水力旋流器工艺计算》、1998 年徐继润等著的《水力旋流器流场理论》、2003 年赵国庆编著的《水力旋流器分离技术》、2005 年庞学诗著的《水力旋流器理论与应用》及 2011 年梁政等著的《固液分离水力旋流器流场理论研究》。遗憾的是所有专著虽然都谈到了物性参数的概念及其对分离性能的影响,但主要还是基于清水为介质,对介质物性参数的简化处理使得其与实际工程中高黏度复杂介质的分离作业出现较大差异。本书将首次重点讨论黏性这一流体固有属性对分离

流场关键参数的影响。

随着技术条件的提高,人们对旋流器的研究方法和手段也日渐完善。从总的方面看人们对水力旋流器的研究主要有以下几种方法,并且在特定时期取得了一些适用的研究成果。

1.2.1 数学方法

用数学方法来研究旋流器就是用数学解析的方法来描述水力旋流器内部的流场特性,它一直是水力旋流器流场研究的重要方法。早在20世纪50年代初,Driessen就曾推导出空气柱直径与溢流管尺寸的数学关系式。60年代以来,许多学者相继开始应用纳维-斯托克斯(N-S)方程及流体连续性方程来研究水力旋流器内部单一流体介质的运动情况,但由于N-S方程本身是一组相当复杂的二阶非线性偏微分方程,迄今为止在数学上还没能对其作完整的解析,所以所有的研究者在应用此方程时都必须作出这样或那样的假设,使得得出的结论或多或少带有主观的成分。

另外,水力旋流器内部的流场是高度的湍流流场,目前关于湍流的研究还没有获得突破性的进展,对湍流产生的机理还不是很清晰,所以很难准确地用数学解析的方式表达出来。就整体而言,目前对湍流理论上的研究基本上还是停留在当初雷诺提出的雷诺方程上;在纯理论研究中,旋流器内流场的数值解精度主要取决于湍流模型。通过研究表明:广泛使用的 $k-\epsilon$ 模型不能用来描述旋流器内部的强旋湍流运动,必须采用非各向同性的湍流模型。因此,建立正确的湍流模型是旋流器理论研究的重点,也是难点。

Pericleous^[30]根据Prandtl^[31]混合场理论,提出了一种旋流器湍流模型,在数值计算中采用SIMPLE方法;HsiehRa、Rajamani^[32]和Hargreaves^[33]也提出了类似于Pericleous的旋流器湍流模型。国内关于旋流器内组合涡运动在理论上形成了一个相对统一的认识,庞学诗^[1]、褚良银^[34]、赵国庆^[2]、李晓钟等^[35]许多人在这方面进行了大量的研究,取得了一些成果。关于非牛顿介质的流变性的影响,对旋流分离器的影响,Dyakowski等^[36]、Tavares等^[37]采用Maxey的理论,通过改进的模型研究了高密度悬浮液对流体速度场的旋流器性能影响。

目前比较常用的几种湍流模型基本上都是用了不同的假设和边界条件来表达雷诺应力,而且都是半经验的公式。这也在很大程度上制约了旋流器流场理论在数学理论上的发展。可以看出,如果能在这一方面取得突破性的进展,推出一个比较令人满意的统一的水力旋流器数学模型,那将是水力旋流器发展史上具有划时代意义的大事,但至少到目前为止,还是有相当大的难度。