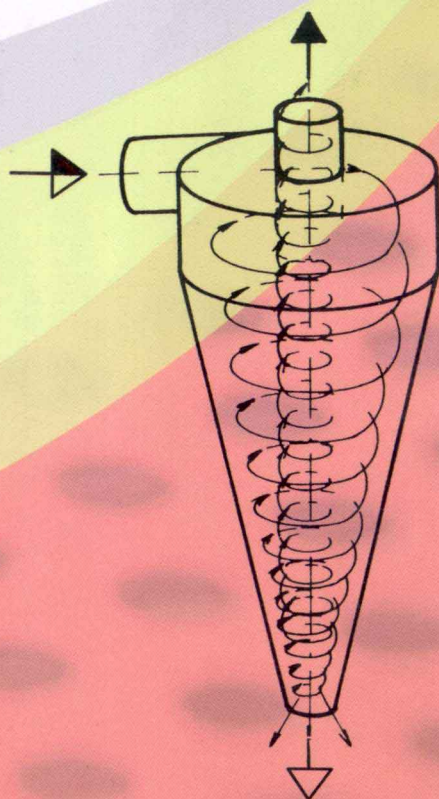


彭荣任 何青松 杨喆 编著

ZHONGJIEZHI XUANLIUQI XUANMEI LILUN YU SHIJIAN

重介质旋流器选煤 理论与实践



 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

内 容 简 介

本书主要介绍了重介质旋流器选煤的理论与实践,具体内容涵盖了重介质旋流器的基本原理、使用要求、影响因素、选型、自动化控制及具体的重介质选煤厂技术管理等内容,并从实践出发着重介绍了大直径、小直径重介质旋流器选煤的发展和应用。

本书可供从事重介质旋流器选煤的科研、设计及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

重介质旋流器选煤理论与实践/彭荣任,何青松,
杨喆编著. —北京:冶金工业出版社,2012.7

ISBN 978-7-5024-5938-3

I. ①重… II. ①彭… ②何… ③杨… III. ①重选
机—重介质选煤 IV. ①TD94

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第155121号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 李 雪 卢 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5938-3

三河市双峰印刷装订有限公司印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012年7月第1版;2012年7月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;12.5印张;300千字;189页

40.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

1998年彭荣任等编著的《重介质旋流器选煤》一书出版，至今已14年了。在这期间，国内外重介质旋流器选煤技术又有了很大的发展，特别是国内大直径重介质旋流器、直接串联三产品旋流器、粉煤重介质旋流器，以及一批新工艺、新设备脱颖而出。然而，系统地介绍重介质旋流器选煤技术方面的图书却没有及时出版。

回顾过去，开拓未来。随着重介质旋流器选煤技术的发展和生产工艺的进步，笔者认为有必要在1998年出版的《重介质旋流器选煤》一书的基础上，重新编写一本系统介绍重介质旋流器选煤技术的图书。笔者将从事重介质选煤50余年的理论研究、生产实践和工程设计的经验成果搜集和整理相关资料，结合国内外重介质旋流器的新发展，组织编写了这本《重介质旋流器选煤理论与实践》一书。此书在介绍重介质旋流器选煤基本知识的基础上，增加了相关的新技术和新设备，并增加了实践内容，希望本书的出版能为从事重介质旋流器选煤的科研、设计、生产技术和管理人员提供一定的借鉴作用。

全书共12章，其中第1~8章由彭荣任编写，第9章由杨喆、白守义编写，第10~12章由何青松、李善业编写。

本书在编写过程中，承蒙科研、设计和生产单位的有关同志，提供大量技术资料和实践数据，特此深表感谢。感谢有关领导给予的大力支持，特别是南桐选煤厂给予了大力支持。受限于作者水平和本书篇幅，书中未尽内容及不妥之处敬请读者批评指正。

彭荣任

2012年3月

目 录

1 绪论	1
1.1 重介质旋流器的发展	1
1.2 重介质旋流器的分类	2
2 重介质旋流器分选基本原理	3
2.1 重介质旋流器分选机理综述	3
2.2 流体在重介质旋流器中的运动规律	9
2.2.1 切向速度	9
2.2.2 轴向速度	11
2.2.3 径向速度	12
2.3 重介质旋流器中密度场的分布	14
2.4 重介质旋流器内液流压力分布	17
3 重介质旋流器选煤悬浮液的特性和要求	19
3.1 综述	19
3.2 加重质的选择	19
3.2.1 加重质的密度	20
3.2.2 加重质的粒度组成特性	21
3.2.3 加重质的机械强度	23
3.2.4 磁性加重质的磁性	23
3.2.5 加重质的其他特性	24
3.3 悬浮液的流变性	24
3.3.1 悬浮液流变黏性	24
3.3.2 悬浮液流变黏度的测定方法	27
3.4 悬浮液的密度和稳定性	31
3.4.1 悬浮液的密度	31
3.4.2 悬浮液的稳定性	32
3.4.3 影响悬浮液动态稳定性的因素	32
4 影响重介质旋流器工作的主要因素	36
4.1 重介质旋流器的结构参数	36
4.1.1 重介质旋流器的圆柱直径	36
4.1.2 旋流器的圆柱长度	37

4.1.3 重介质旋流器的溢流口直径	38
4.1.4 旋流器溢流管长和器壁	39
4.1.5 旋流器底流口直径	39
4.1.6 旋流器入料口的形状和尺寸	40
4.1.7 重介质旋流器的锥比	40
4.1.8 旋流器圆锥角	41
4.1.9 重介质旋流器的安装角	41
4.2 重介质旋流器的入料压头	41
4.3 分选悬浮液密度	42
4.4 分选悬浮液中煤泥含量	43
5 重介质旋流器类型结构和效果	45
5.1 圆柱圆锥形重介质旋流器	45
5.1.1 D. S. M 型圆柱圆锥形旋流器	45
5.1.2 涡流旋流器	47
5.1.3 DBZ 形圆柱圆锥形重介质旋流器	49
5.2 圆柱形重介质旋流器	51
5.2.1 周边(有压)给料圆柱形二产品旋流器	51
5.2.2 中心(无压)给料二产品圆柱形重介质旋流器	52
5.3 三产品重介质旋流器	59
5.3.1 周边(有压)给料圆筒、圆锥旋流器串联选三产品的重介质旋流器	59
5.3.2 中心(无压)给料圆柱、圆锥旋流器并式串联三产品重介质旋流器	62
5.3.3 中心(无压)给料双圆柱轴式串联选三种产品重介质旋流器	65
5.3.4 单一密度悬浮液、双段旋流器间接串联三产品的重介质旋流器	67
6 大直径重介质旋流器的发展和应用	69
6.1 大直径重介质旋流器的发展	69
6.2 大直径旋流器的应用	70
6.3 今后的方向	72
7 小直径重介质旋流器选粉煤	75
7.1 重介质旋流器选粉煤探索(试验)	75
7.1.1 试验条件	75
7.1.2 试验内容	76
7.2 重介质旋流器选煤泥的应用	77
8 重介质旋流器选煤原则流程	80
8.1 重介质旋流器选煤工艺的原煤准备	80
8.1.1 原煤预先筛分、破碎和检查筛分	80

8.1.2 脱泥脱水作业	81
8.2 重介质旋流器选煤流程	83
8.2.1 选二产品重介质旋流器的流程	83
8.2.2 选三产品重介质旋流器选煤流程	85
8.2.3 非磁性介质旋流器选煤流程	90
8.3 重介质旋流器选煤悬浮液的净化和回收流程	91
8.3.1 磁性悬浮液净化回收流程	91
8.3.2 非磁性悬浮液净化回收流程	93
8.4 磁铁矿加重质的制备和补添流程	95
8.4.1 磁铁矿(加重质)的制备系统	95
8.4.2 磁铁矿(加重质)的补添系统	97
9 重介质旋流器选煤自动化	99
9.1 重介质悬浮液密度自动检测与自动控制	99
9.1.1 双管差压密度计	100
9.1.2 水柱平衡式密度计	100
9.1.3 浮子式密度计	101
9.1.4 γ 射线密度计	101
9.1.5 在线式压差密度计	103
9.1.6 悬浮液密度自动调节系统	103
9.2 介质桶液位自动检测及自动控制	104
9.2.1 压力式液位计	104
9.2.2 电容式液位计	105
9.2.3 电阻式液位计	106
9.2.4 浮标式液位计	107
9.2.5 γ 射线液位计	109
9.2.6 超声波式液位计	109
9.2.7 介质桶液位自动调节系统	110
9.3 悬浮液流变性自动检测及自动控制	110
9.3.1 磁性物含量测量仪	111
9.3.2 悬浮液流变特性自动调节系统	113
9.4 旋流器入口压力自动检测及自动控制	114
9.4.1 压力测量仪表	114
9.4.2 旋流器入口压力自动调节系统	115
9.5 产品灰分自动检测及自动控制	116
9.5.1 γ 射线灰分仪	116
9.5.2 产品灰分自动调节系统	117
9.6 重介质旋流器选煤自动化实例	118
9.7 单一低密度双段旋流器选煤自动控制	119

9.7.1	主选重介质旋流器的悬浮液密度和流变特性自动测控	119
9.7.2	再选重介质旋流器的悬浮液密度自动测控	120
9.8	小直径重介质煤泥旋流器选煤泥密度控制	121
9.8.1	煤泥悬浮液密度的测量与控制	121
9.8.2	煤泥悬浮液桶液位的测量与控制	121
9.8.3	煤泥(多功能)旋流器入口压力的测量与控制	121
9.8.4	煤泥悬浮液磁性物含量的测量与控制	121
9.8.5	小直径重介质煤泥旋流器选煤泥密度控制实例	122
10	重介质旋流器选煤的主要设备及选择	124
10.1	原煤准备设备	124
10.1.1	入选原煤粒度检查筛分机	124
10.1.2	破碎机	126
10.2	原煤脱泥筛及产品脱介筛	128
10.2.1	原煤脱泥筛	128
10.2.2	产品脱介筛	128
10.3	磁性悬浮液的净化回收	131
10.3.1	磁力脱水槽	131
10.3.2	磁选机	133
10.3.3	磁性加重质的退磁和预磁	140
10.4	悬浮液输送泵	142
10.4.1	工艺对悬浮液输送泵的要求	143
10.4.2	悬浮液输送泵的选择	144
10.5	管道、溜槽的设置和管材的选用	145
10.5.1	自流输送	145
10.5.2	压力输送	147
10.5.3	耐磨管道在重介质选煤系统中的应用	147
10.6	其他辅助设备	149
10.6.1	贮存桶	149
10.6.2	重介质旋流器的定压给料箱	152
10.6.3	悬浮液风力提升罐	153
11	重介质选煤厂的生产技术管理	155
11.1	重介质旋流器的分选效果分析	156
11.1.1	重介质旋流器分选可能偏差及实际分选密度	160
11.1.2	重介质旋流器的分选数量效率	160
11.1.3	错配物的总量	161
11.1.4	计算入料和实际入料各密度的产率均方差	161
11.2	磁性加重质损失测定与分析、技术管理	161

11.2.1 磁性加重质的工艺(技术)损失	161
11.2.2 磁性加重质的管理损失	164
11.2.3 介质消耗控制的生产技术管理措施	166
11.3 现场生产操作技术管理与实例	172
11.3.1 入料压力的控制	172
11.3.2 入洗量的控制	172
11.3.3 分流量的确定	173
11.3.4 入洗密度的调整	173
11.3.5 配煤的均值化	173
11.3.6 洗煤操作	173
11.3.7 不脱泥重介质旋流器选煤工艺中煤泥重介质旋流器的操作要求	177
11.3.8 重介分选工技术操作规程(以南桐选煤厂操作规程为例)	178
11.4 月综合资料的整理与分析	180
11.5 主要设备周期性管理	180
12 重介质旋流器选煤生产实践(以南桐选煤厂为例)	182
12.1 选煤厂概况	182
12.2 工艺特点	182
12.2.1 工艺设计	182
12.2.2 分选效果	183
12.2.3 脱硫效果	184
12.2.4 介质消耗	185
12.2.5 选煤效率	186
参考文献	187

1 绪 论

1.1 重介质旋流器的发展

重介质旋流器是从分级浓缩旋流器演变而来的,它是用重悬浮液或重液作为介质,在外加压力产生的离心场和密度场中,把轻产物和重产物进行分离的一种特定结构的设备,是目前重力选煤方法中效率最高的一种。

1891年美国公布了分级浓缩旋流器专利;1945年荷兰国家矿山局(Duth State Mines)在分级旋流器的基础上,研制成功第一台圆柱圆锥形重介质旋流器,用黄土作加重质配制悬浮液进行了选煤中间试验。因为黄土作加重质不能配成高密度悬浮液,而且回收净化困难,所以在工业生产上未能得到实际应用。只有在采用了磁铁矿粉作为加重质之后,才使这一技术在工业上得到推广。这是因为磁铁矿粉能够配制成适合于选煤使用的不同密度的悬浮液,而且易于用磁力净化回收的缘故。随后,美、德、英、法等国相继购买了这一专利,并在工业使用中,对圆柱圆锥形重介质旋流器做了不同的改进,派生出一批新的、不同型号的重介质旋流器。如1956年美国维尔莫特(Wilmont)公司研制成功的无压给煤圆筒形重介质旋流器,简称DWP;60年代英国研制成有压给料圆筒形重介质旋流器,即沃赛尔(Vorsyl)旋流器;1966年苏联研制成功,用一台圆柱形旋流器与另一台圆柱圆锥旋流器并相串联组成“有压”和“无压”三产品旋流器;1967年日本田川机械厂研制成倒立式圆柱圆锥形重介质旋流器,即涡流(Swirl)旋流器;80年代初意大利学者研制成用两台圆筒形旋流器轴线串联组成(Tri-Flo)三产品重介质旋流器;80年代中期英国煤炭局吸收DWP和沃赛尔两种旋流器的特点,推出直径为1200mm的中心给料圆筒形重介质旋流器(Large Coal Dense Medium),用于分选粒度为100~0.5mm的原煤。

中国重介质选煤是从1958年在吉林省通化矿务局铁厂选煤厂建成第一个重介选煤车间开始的。1966年又在辽宁省采屯煤矿选煤厂建成重介质旋流器选煤车间^[21,28,43,41],采用我国自行研究设计的 $\phi 500\text{mm}$ 圆柱圆锥形旋流器分选6~0.5mm级原煤。1969年又在河南省平顶山矿务局建成一座350万吨/年的田庄选煤厂,采用 $\phi 500\text{mm}$ 重介质旋流器处理13~0.5mm级原煤。随后,有多处选煤厂使用重介质旋流器再选跳汰机的中煤,并相继研制成功 $\phi 600\text{mm}$ 、 $\phi 700\text{mm}$ 二产品圆柱圆锥形重介质旋流器。在此基础上,在20世纪80年代中至90年代中对重介质旋流器选煤工艺与设备进行了一系列的改革和创新。先后推出重介质旋流器分选50~0mm不脱泥原煤的工艺;有压给料三产品重介质旋流器;无压给料二产品和三产品重介质旋流器;DBZ型重介质旋流器;分选粉煤的小直径重介质旋流器以及“单一低密度介质、双段自控选三产品(四产品)的重介质旋流器”选煤新工艺。到90年代末,中国的重介质旋流器选煤方法得到飞速发展。2005年中国的重介质选煤方法比例约占41%^[56],其中包括从国外引进一批大中型的重介质选煤厂,如山西省平朔安家岭选煤厂,设计能力达1500万吨/年。

重介质旋流器具有体积小、本身无运动部件、处理量大、分选效率高等特点,故应用范围比较广泛。特别是对难选、极难选原煤,细粒级较多的氧化煤、高硫煤的分选和脱硫有显著的效果和经济效益^[50]。因此,国内外都在广泛推广应用。同时,对重介质旋流器的分选机理与实践继续进行深入的研究。如重介质旋流器内速度场和密度场的模拟测试;重介质旋流器结构改革及分选悬浮液流变特性对分选效果的影响等,特别是近年在扩大入选上限、降低重介质旋流器的分选下限、改革重介质旋流器的分选工艺等方面有了新的突破。这些研究都将进一步推动重介质旋流器选煤技术向高新阶段发展

1.2 重介质旋流器的分类

重介质旋流器分类方法较多,下面介绍几种常规的分类方法:

- (1) 按其外形结构可分为:圆柱形、圆柱圆锥形重介质旋流器两种。
- (2) 按其选后产品的种类可分为:二产品重介质旋流器;三产品重介质旋流器。
- (3) 按给入旋流器的物料方式可分为:周边(有压)给原煤、给介质的重介质旋流器;中心(无压)给原煤、周边(有压)给介质的重介质旋流器。
- (4) 按旋流器的安装方式可分为:正(直)立式、倒立式和卧式三种。

重介质旋流器的分类见图 1-1。

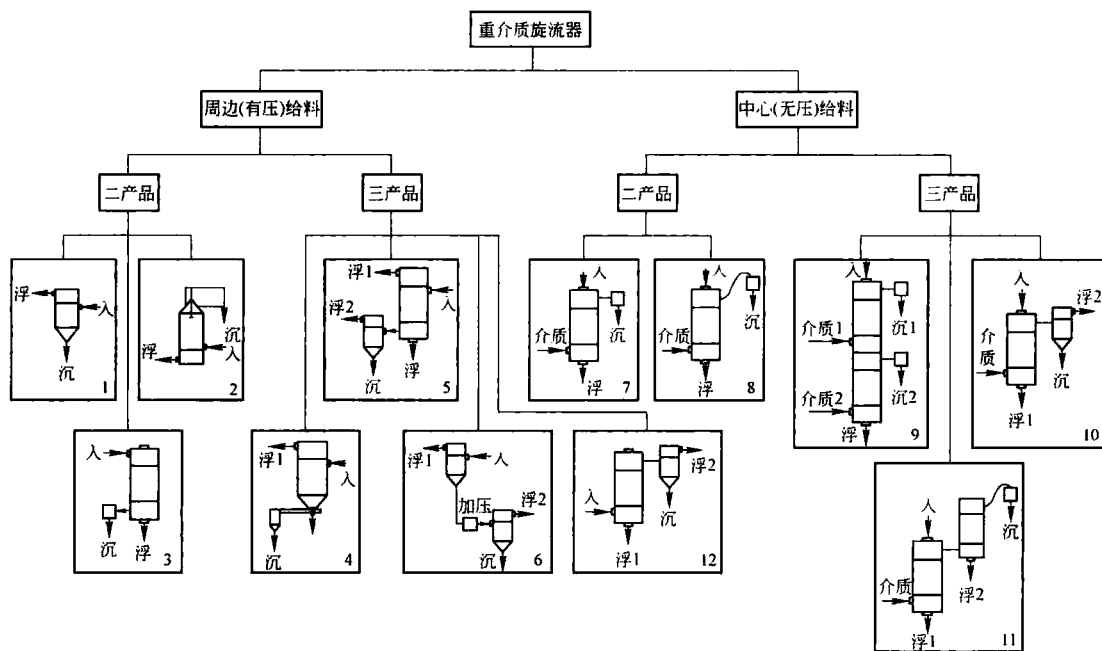


图 1-1 重介质旋流器的分类

- 1—圆柱圆锥形二产品旋流器; 2—倒立圆柱圆锥形二产品旋流器; 3—沃赛尔圆筒形二产品旋流器;
 4—圆柱圆锥形三产品旋流器; 5—圆柱圆锥并列串联式三产品旋流器; 6—单一低密度介质、双段
 自控三产品重介质旋流器; 7—圆筒形中心(无压)给料二产品旋流器; 8—DWP 圆筒形二产品旋流器;
 9—双圆筒轴向串联式中心(无压)给料三产品旋流器; 10—圆筒圆锥串联式中心(无压)给料三产品旋流器;
 11—双圆筒并列串联式中心(无压)给料三产品旋流器; 12—PRN 煤泥旋流器

以上各种类型的重介质旋流器都有自己的特点。因此,在选择使用时,应根据不同时期不同条件,结合具体需要的产物等生产的要求多方权衡考虑,才能达到理想的效果。

2 重介质旋流器分选基本原理

2.1 重介质旋流器分选机理综述

关于重介质旋流器分选机理的学说^[8]很多,第一种学说认为:重介质旋流器与水介质旋流器分选机理是基本相同的,所不同的只是前者介质的密度场和黏度是个变数,而不是一个常数。矿粒是在旋流器中垂直零速面和最大切线速度恒速面的交线处分离的。垂直零速面的一端在溢流口下方的截面上 $0.542R$ (R 为旋流器半径) 处,另一端与底流口截面上的气柱相交,其半径为气柱半径,其垂直高度为 h 。在旋流器溢流口下端,形成的圆锥周线与垂直零速面交线上的径向速度为零,穿过垂直零速面的平均径向速度为:

$$u_p = \frac{Q_o}{S_A} \quad (2-1)$$

因为: $S_A = \pi L(0.542R + 0.083R) = \pi LD \times \frac{0.625}{2} = 0.981LD$ (2-2)

所以: $u_p = \frac{Q_o}{S_A} = \frac{Q_o}{0.981LD} = 1.02 \frac{Q_o}{LD}$ (2-3)

式中 u_p ——垂直零速面的平均径向速度, m/s;

Q_o ——进入旋流器的溢流总量, m^3/s ;

S_A ——垂直零位界面的总面积, m^2 ;

R ——旋流器半径, m;

D ——旋流器直径, m;

L ——垂直零速分离锥面侧线的长度, m。

而在垂直零速面上,旋流器溢流口下端 $0.38h$ 处的径向速度刚好等于 $u = \frac{2.2Q_o}{hD}$,从而绘

出垂直零速锥面的轮廓(见图2-1)。被选矿粒进入底流口之前,若能越过垂直零速锥面时,则进入溢流,否则进入底流。而恰好处于零速锥面上的矿粒,进入溢流或底流的可能性都有。

第二种学说认为:矿粒在重介质旋流器内受上升和下降液流作用的过程中,是按密度进行分离的,使分离点在重介质旋流器的下部,即底流口附近。因此,重介质旋流器的底流介质密度是决定矿粒在旋流器内分离密度的主要因素。并提出分离密度计算经验公式如下:

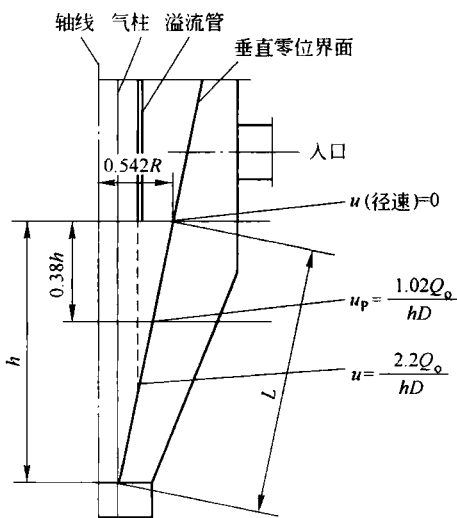


图2-1 重介质旋流器垂直零速锥面轮廓图

$$\delta_p = \frac{\Delta_U}{1.42} \quad (2-4)$$

式中 δ_p ——矿粒的实际分离密度, kg/m^3 ;

Δ_U ——旋流器底流介质密度, kg/m^3 。

第三种学说认为:当重介质悬浮液给入旋流器后,可以设想在旋流器内形成如图 2-2 所示的圆锥分离面。锥体的上端在旋流器圆柱的顶部,锥体的下端在旋流器锥部的顶点附近。具体位置与旋流器的锥角、溢流口的大小和插入深度等因素有关。物料进入旋流器后,成等角螺旋线下降到 mH 面(旋流器溢流管下端与分离锥面的交线),由于离心力的作用,一部分密度大的矿粒随液流分离出来,进入底流;另一部分密度小的矿粒随液流进入锥形面内,在内螺旋上升流的作用下进入溢流。其 m 值一般为 0.5。

第四种学说认为:在旋流器中存在一个垂直零速锥形分离面,在这个锥面上液流的轴向速度等于零。认为这个轴向零速面,就是矿粒的分离面。矿粒在离心力的作用下,密度轻的矿粒进入分离锥面内,随上升流从溢流口排出;密度大的矿粒靠近旋流器壁,随着下降液流从底流口排出,如图 2-3 所示。

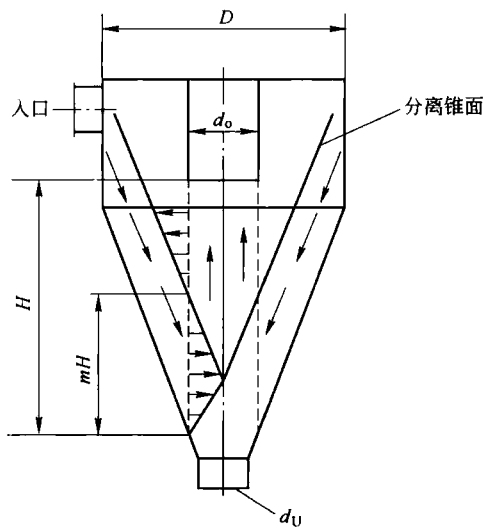


图 2-2 重介质旋流器分离锥面示意图

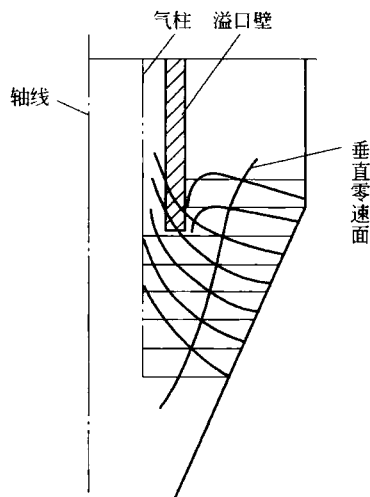


图 2-3 旋流器垂直零速锥形分离面形成图

第五种学说认为:把染色液体注入透明旋流器中,发现在旋流器锥体上半部出现一个明显的染色液环。认为这个染色液环的界面代表着垂直零速面,同时也是径向零速面。染色液环直径为 $0.43D$ (D 为旋流器直径),并在 $0.7D$ 截面下形成矿粒分离锥面,如图 2-4 所示。认为轻密度矿粒只有进入锥面内才能从溢流口排出;否则,从底流口排出。分离锥面的计算公式如下:

$$A = \frac{\pi}{2} \times 0.43DL_1 \quad (2-5)$$

$$L_1 = \frac{0.43D}{2 \tan \frac{\theta}{2}} \quad (2-6)$$

$$\text{因为: } A = \frac{\pi}{2} \times 0.43D \times \frac{0.43D}{2 \tan \frac{\theta}{2}} = 0.145 \frac{D^2}{\tan \frac{\theta}{2}} \quad (2-7)$$

所以, 分离锥上的平均径向速度为:

$$u_p = \frac{Q_o}{A} = \frac{Q_o}{0.145D^2 \tan \frac{\theta}{2}} \quad (2-8)$$

式中 A ——圆锥分离面积的面积, m^2 ;

D ——旋流器的直径, m ;

L_1 ——分离锥的垂直高度, m ;

θ ——分离圆锥的顶角, rad ;

Q_o ——旋流器的溢流总量, m^3/s ;

u_p ——分离锥面上的平均径向速度, m/s 。

此外, 还有一些学者提出有关旋流器圆柱分离面的学说, 以及其他分离锥面的学说, 这里不再一一列举。

矿物在重介质旋流器中的分选机理学说很多, 但是, 大多数学者都认为: 在旋流器中存在一个分离锥面。这个分离面是轻密度与重密度矿物的分离界面, 而且这个界面的周线与旋流器的结构有关。学者们在这方面做了大量的检测、试验和研究。由于检测手段和试验条件不同, 加上试验环境的局限性, 各位学者的结论差异是难免的。但是, 只要从具体条件出发, 理论和实践相结合, 既重视前人的经验, 又不忽视自己的实践, 就能使理论不断地提高和完善, 成为指导实践的指南。

作者在广泛吸收各派学者在旋流器分选机理方面有价值的学说的基础上, 进行了大量的研究、试验和测定工作^[1,3], 认为: 重介质旋流器的分选机理与水介质旋流器有较大的差别。在重介质旋流器内, 由于重悬浮液给入后, 在离心场的作用下, 旋流器内形成不同密度的“等密度”线 (即密度场), 密度自上而下、由内而外增加, 越靠近锥壁和底口的密度越大; 在旋流器溢流管处 (即中心空气柱) 附近的悬浮液密度最小, 从而使旋流器内的底流和溢流悬浮液密度、加重质粒度有所差异。这种差异在一定程度上决定了煤和矸石的分离密度, 对分选精度有一定影响。根据作者的试验结果^[9,24], 其关系式为:

$$\delta_p = \frac{(\Delta_o/1000)^n + (\Delta_u/1000)^m}{2} \times 1000 \quad (2-9)$$

式中 δ_p ——被选矿粒的分离密度, kg/m^3 ;

Δ_o, Δ_u ——旋流器溢流、底流密度, kg/m^3 ;

n, m ——分离指数, 与旋流器的结构、加重质的特性有关, 当旋流器的锥角为 20° 时, 一般情况下, $n = 1.5 \sim 2.0$, $m = 0.5 \sim 0.8$ 。

所以, 矿粒在重介质旋流器内的分离, 基本上遵循阿基米德原理。当矿粒进入旋流器, 逐渐扩散后, 可以认为不同密度的矿粒, 开始处于相应的等密度上, 在离心力的作用下, 密度大的矿粒很快奔向器壁, 在外螺旋流的作用下, 由底口排出; 其余矿粒在各自的等密度线上向锥部移动; 部分轻密度矿粒进入“分离锥面”内, 如图 2-5 所示。这个界面上的平均悬浮液密度, 在理想情况下近似等于矿粒的分离密度。进入分离锥面内的轻密

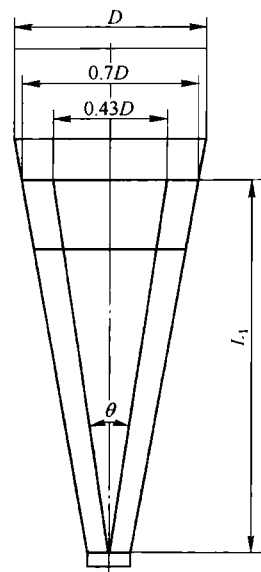


图 2-4 重介质旋流器分离锥面定位图

度矿粒，将在内螺旋流的作用下从溢流口排出。部分中间物则位于旋流器的内壁和分离锥面之间，或在旋流器圆柱内壁与溢流管之间形成旋涡流，作一定时间的循环旋转运动后，分别进入旋流器的溢流或底流中，如图 2-6 所示。余下的矿粒在旋流器底部附近，受高密度悬浮液阻挡层和强烈内旋流器的作用，迫使这部分矿粒进行二次分离。轻密度矿粒在内螺旋上升流的作用下，从溢流口排出；高密度矿粒则穿过高密度介质层，在外螺旋流的作用下从底流口排出，从而完成全部分选过程。

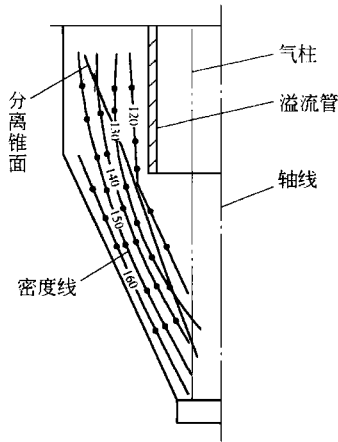


图 2-5 重介质旋流器密度场与分离锥面关系图

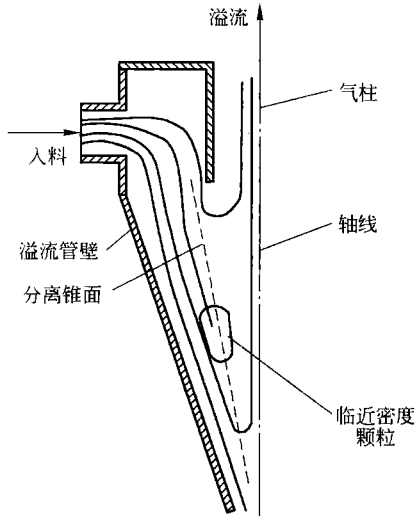


图 2-6 重介质旋流器流线示意图

关于“分离锥面”的形成，决定于垂直零速面，并与径向零位面有关。而“分离锥面”周界面的确定则与旋流器的结构有关。煤炭科学研究总院唐山分院曾对不同结构的水介质和重介质旋流器内液体流场运动特性进行全面测试，并在煤炭分选的试验结果中得到证实。可以设想“分离锥面”的一端在旋流器入口以下，其直径 D_0 等于旋流器的直径 D 减去 $2d$ (d 为旋流器 inlet 口直径)。另一端在旋流器溢流口下端至锥体距 m_0L 处 (见图 2-7)。它是垂直零面与最大切线恒速面的相交线。 m_0 值的大小，与旋流器的结构参数、入料压力、溢流与底流量分配、旋流器的锥比有关。当旋流器的锥角为 20° 时， m_0 值在 $0.4 \sim 0.6$ 范围之间。

但是，被选矿粒在旋流器内旋流的密度场流中受到的作用力，主要是离心力和重力。它们分别是：

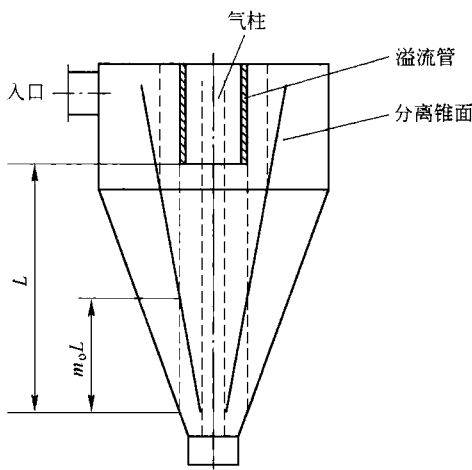


图 2-7 重介质旋流器分离锥面构想图

$$F_1 = m \frac{v_t^2}{R} = ma_c \quad (2-10)$$

$$F_2 = mg \quad (2-11)$$

式中 F_1 ——离心力, N;

F_2 ——重力, N;

m ——矿粒质量, kg;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

a_c ——离心加速度, m/s^2 ;

R ——回转半径, m。

矿粒在旋转的密度场所受到的离心力, 比重力大几十倍至几百倍。这种离心力与重力的比值, 叫做离心系数 (i), 并有:

$$i = \frac{F_1}{F_2} = \frac{ma_c}{mg} = \frac{a_c}{g} \quad (2-12)$$

根据作者的研究结果, 为了保证两种不同密度的矿粒 (特别是细粒级矿粒) 在旋流器内得到有效分离, 首要的问题就是要使被选矿粒 (主要是细粒级) 在旋流器内获得相应高的离心系数^[24]。

怎样才能使被选的最小矿粒获得相应高的离心系数呢? 首先分析一下粒度较小的矿粒在离心力的作用下, 在密度场流中的下降速度 v_c :

$$v_c = \frac{v_t^2 d^2}{18R\mu} (\delta - \Delta) \quad (2-13)$$

式中 v_t ——切线速度, m/s ;

d ——矿粒直径, m;

R ——回转半径, m;

μ ——黏滞系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

δ, Δ ——矿粒密度、悬浮液密度, kg/m^3 。

因此, 被选矿粒从离心力场流中的 r_1 处位移到 r_2 处, 所需要的时间 (t) 可用下述公式计算:

因为:

$$v_c = \frac{dr}{dt} \quad (2-14)$$

所以:

$$t = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{v_c} dr \quad (2-15)$$

将式 (2-13) 代入式 (2-15) 得:

$$t = \frac{18\mu}{d^2(\delta - \Delta)} \int_{r_1}^{r_2} \frac{r dr}{v_t^2} \quad (2-16)$$

又因为:

$$v_t^2 = \frac{c^2}{r^{2n}} \quad (2-17)$$

式中 c ——常数;

n ——指数, 取 $n=0.5$ 。

若将式 (2-17) 代入式 (2-16), 整理得:

$$t = \frac{6\mu}{d^2(\delta - \Delta)c^2}(r_2^3 - r_1^3) \quad (2-18)$$

所以, 矿粒从旋流器中心到器壁的时间为:

$$t' = \frac{6\mu}{d^2(\delta - \Delta)c^2}R_x^3 \quad (2-19)$$

式中 R_x ——旋流器的半径。

式 (2-19) 表明, 矿粒在旋流器内的分离时间与旋流器半径的三次方成正比, 与矿粒直径的平方成反比, 与矿粒密度及悬浮液密度有关, 两者密度差值大时分离时间短, 密度差值小时分离时间长。试验表明, 当入选矿粒密度与悬浮液密度差超过 200kg/m^3 时, 矿粒在旋流器内停留时间一般不超过 4s ; 当悬浮液密度超过矿粒密度时, 矿粒向旋流器中心移动; 当悬浮液密度与矿粒密度相等时, 矿粒在旋流器的“分离锥面”附近作一定时间的循环运动后, 分别从旋流器的底流口和溢流口排出。

式 (2-10) 说明, 被选矿粒在旋流器内受到的离心力的大小, 取决于旋流器给料的切线速度和旋转半径。而切线速度 v_t 又与旋流器的入料压头有关, 即:

$$v_t = k\sqrt{2gH} \quad (2-20)$$

式中 H ——旋流器的入料压头, mH_2O , $1\text{mH}_2\text{O} = 9.806\text{Pa}$;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

k ——系数。

将式 (2-20) 代入式 (2-10), 整理得:

$$F_1 = \frac{2}{3} \frac{\pi d^3 H k^2}{D} (\delta - \Delta) g \quad (2-21)$$

式中 D ——重介质旋流器的直径, m 。

$$\text{令} \quad \frac{2}{3} \pi k^2 = k'$$

$$\text{则} \quad F_1 = k' \frac{H d^3}{D} (\delta - \Delta) g \quad (2-22)$$

式 (2-22) 说明:

(1) 矿粒在重介质旋流器中受到的离心力, 取决于入料压头大小, 与旋流器直径成反比, 与被选矿粒直径的立方成正比, 与矿粒密度和悬浮液密度差成正比。

(2) 对分选小粒度物料, 宜采用小直径旋流器, 以获得比大直径旋流器高的离心系数, 但是, 小直径旋流器的入选上限较小。若采用大直径旋流器, 必须适当增加旋流器的入料压头, 才能确保小粒度级物料得到有效分选, 但是, 过多地增加入料压力, 将给实际生产带来困难, 会造成“顾此失彼”, 得不偿失, 在经济上也不太合理, 因此应当全面考虑。

作者对直径 $100 \sim 700\text{mm}$ 重介质旋流器分选大于 0.5mm 级煤的离心系数和旋流器直径的相关性进行了试验研究, 结果见表 2-1。在入料压头为 $(9 \sim 10)D$ 的情况下, 对重介质旋流器的离心系数和直径的关系进行了试验, 得出如图 2-8 所示的结果。

表 2-1 不同直径的重介质旋流器分选大于 0.5mm 级煤的离心系数

旋流器直径/mm	100	150	250	350	500	600	700
离心系数	63.14	62.00	54.00	50.60	45.60	39.70	37.00
离心加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	$63.14g$	$62.00g$	$54.00g$	$50.60g$	$45.60g$	$39.70g$	$37.00g$

注: $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

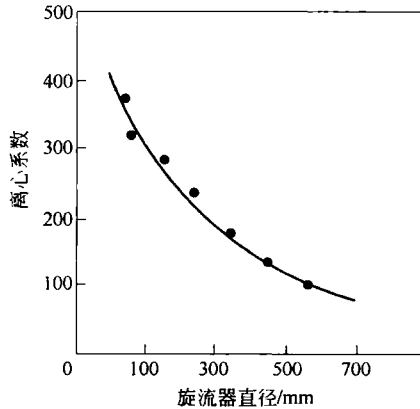


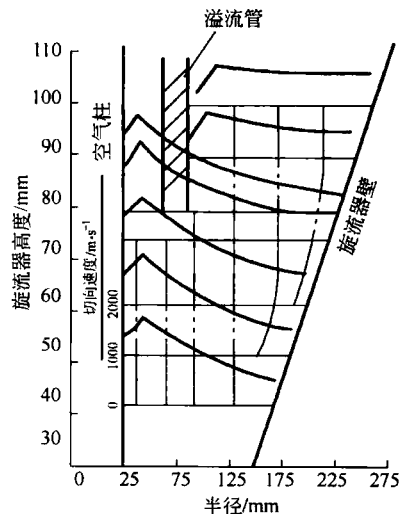
图 2-8 重介质旋流器直径与离心系数的关系

2.2 流体在重介质旋流器中的运动规律

重介质旋流器内液体的运动是个较为复杂的漩涡流运动^[7,15,41]，可用三元空间的流向进行分析。对旋流器内任一点的速度可分为：切向速度 v_t 、径向速度 v_r 以及轴向速度 v_z 。从矿物在旋流器内分离的角度看，切向分速度与径向分速度具有较大的实际意义。前者是确定离心力大小的重要因素，后者确定径向液流的动压（力）分布，对向心曳力起重要作用。而离心力和向心曳力是加速物料分离的主要动力。轴向液流决定着被选物料在外螺旋下降流和内螺旋上升流中的位移时间。尽管被选物料在旋流器内由于受阻力的影响，所获得的切向、径向和轴向速度与相应的液流速度并不相同，但在一定程度上，物料的分离是取决于上述三种速度的。

2.2.1 切向速度

旋流器本身的结构比较简单，但是内部液流的运动却是极其复杂的旋转流场。在强大的离心力作用下，中心部分的流体做高速旋转运动，产生了空气柱。根据实测，旋流器内不同断面、不同半径 r 上液流的切向速度 v_t 分布如图 2-9 所示。并由此得到如下结论：



(1) 在旋流器内同一水平断面上的切向速度 v_t 图 2-9 旋流器内液流切向速度分布图