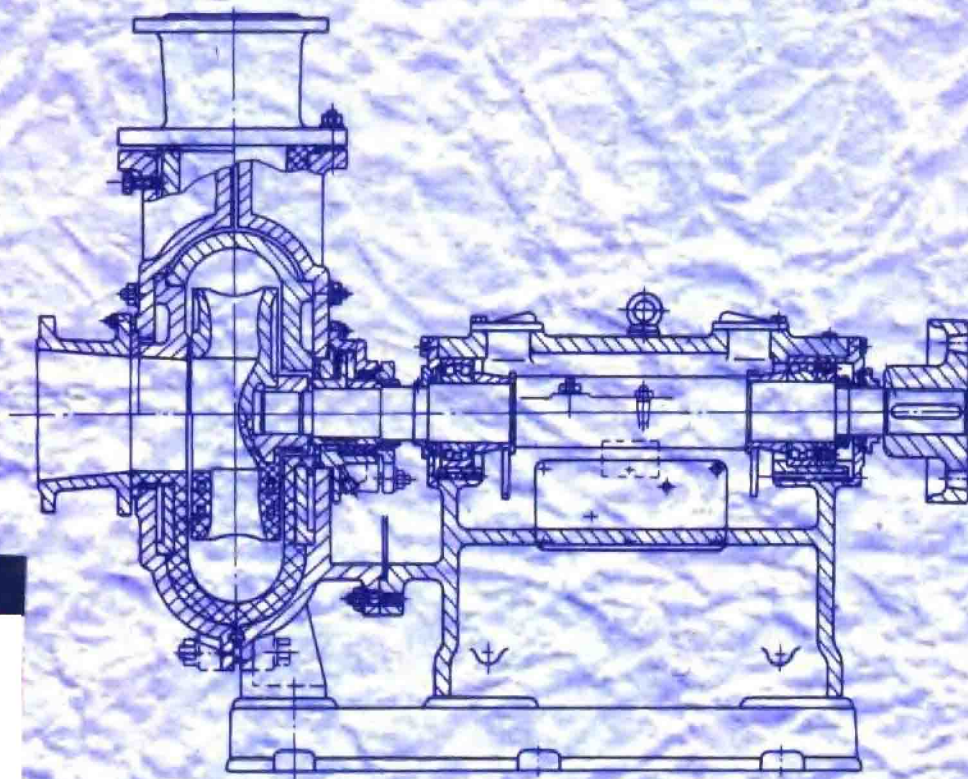


# 磨料固液泵

许洪元 罗先武 主编



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

00007540

TH38

03

# 磨料固液泵

HK71/09

许洪元 主编  
罗先武

江苏工业学院图书馆  
藏书章

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

## 内 容 提 要

本书主要介绍磨料固液泵的基础理论及应用,分3篇共15章。内容包括固液两相流、固液泵的基本理论知识,固液泵的结构,管道两相流阻力特性的计算,泵抽送两相流时的性能,固液泵的选型、运行与维护,固液泵的现场测试,固液泵的磨损与防护,固液泵常用耐磨材料的生产工艺等。

本书层次清晰,实用性强;结合作者近年研究实践,提出了泵使用效率和延长使用寿命之间的经济效益关系等。

本书可供冶金、矿山、电力、煤炭、化工、水利及环保等方面的有关技术人员阅读,是一本固液混合物管道输送研究、设计、运行和泵业制造人员的实用参考书,也可作为高等学校有关专业学生的参考教材。

书 名: 磨料固液泵

作 者: 许洪元 罗先武

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研楼,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京市密云胶印厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 14.5 字数: 332 千字

版 次: 2000年3月第1版 2000年3月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-02261-5/TV·32

印 数: 0001~4000

定 价: 20.00 元

# 序 言

在工农业部门有大量输送含有固体颗粒液体的机械和设备,如在含沙河流上的水轮机、灌溉泵和挖泥泵,在矿场上用的矿渣泵、灰砂泵、煤泥泵等杂质泵,以及建筑过程中用的灌浆泵、混凝土泵等等。含有固体颗粒流体为工作介质的泵,现在称为固液泵。因泵中的固体颗粒对液体流动产生干扰而使其水力性能远低于清水泵,因固体颗粒对边壁的撞击而产生材料的损伤,轻则损伤泵内部表面线型,重则造成结构破坏。

因为固液泵的性能偏低,全国每年要多消耗大量的电力,而固液泵由于磨损带来的失效和损坏,是更大的投资损失。因此进行研究并寻找防范或扼制磨料对泵的磨损是生产中亟需解决的问题,也是提高国民经济生产效益的一个方面。

许洪元、罗先武老师和几位固液泵行业的专家共同编写了这本《磨料固液泵》,比较全面地介绍了磨料磨损的现象和机理,现有固液泵的设计方法与使用经验,以及固液泵磨损的防范措施与抗磨材料的应用等方面的现状,对与固液泵有关的设计、制造、使用和管理人员均提供了有用的知识。

本书的编写深入浅出,没有引入详尽的理论分析和设计细节,也没有罗列多如繁星的磨损实例,只对上述三方面的问题简明扼要地加以叙述,使本书易读易懂,有助于解决实际问题。因此,在出版之际,向本专业同行郑重推荐。

梅祖彦

2000年1月

# 前 言

磨料固液泵主要用来抽送含有硬质颗粒的固液混合物(简称磨料),如用于选矿厂抽送精矿和尾矿、火电厂抽送灰渣、选煤厂抽送煤泥、挖泥船上抽送砂砾等。被输送的固体颗粒在高速旋转的泵轮中运动,非规则运动的固液混合物犹如液体砂轮,泵到过流件在这种“液体砂轮”的环境中工作,经受强烈的磨损破坏。针对磨料固液泵效率低、磨损严重这两大难题,笔者近年来致力于高效耐磨新型固液泵的研究、开发和推广工作,取得一定进展。在工作中深切感到,提高固液泵的运行效率和延长其使用寿命,需要设计、生产、选型和运行维护各工序人员的共同努力,如设计人员如何设计出符合固液流动规律的叶型和流道,生产人员如何制造出高强耐磨的固液泵,选型人员如何选择与实际工况匹配的固液泵,运行人员如何合理地使用和维护现场用泵。这就要求每一个环节的技术人员对固液泵应用方面的知识有相当的了解。因此一本适合固液泵使用人员的参考书是必不可少的。鉴于目前国内、外缺乏这类书籍,本书的出版正好填补了这一空缺。

本书分3篇共15章。第1篇介绍与固液泵有关的基础知识,包括固体的粒度分布,颗粒的沉降,两相流的浓度、流变特性和淤积临界流速,固液泵的基本参数、基本方程式、相似理论和比转数等。第2篇介绍固液泵的应用,主要包括固液泵的分类与结构,浆体管道的阻力计算,泵的选型、运行和维护,泵的现场测试等。第3篇主要介绍泵的磨损与防护,泵用耐磨材料的生产工艺等。这三篇内容相对独立,自成体系,读者可根据自己的基础和需要选读有关章节。

本书的特点:①注重实用性,学以致用。除了必要的理论基础知识外,书中尽量不涉及两相流和固液泵深层的理论问题。初学者在比较快地掌握了必备的理论知识后,就能比较顺利地阅读书中有关内容。②提出垂直管道和倾斜管道中浆体阻力新的计算方法,把固体对压强的影响直接放入管路扬程计算中,简化了计算。③阐明提高泵使用效率和延长泵使用寿命之间的经济效益关系,对泵的应用有参考价值。④鉴于磨料固液泵对材料抗磨性这一特殊要求,首次在泵类书籍中比较详细地介绍了泵用耐磨材料的生产工艺。

许洪元、罗先武、李玉薇、洪亮、李双寿等人参与本书编写工作,其中第1、2、7、8、9、10章由许洪元、罗先武编写,第3、4章由罗先武、李玉薇编写,第5、6章由洪亮编写,第12、13、14、15章由李双寿、卢达溶编写,第11章由李年兆编写。全书由许洪元、罗先武主编,罗先武、李玉薇对全书作了整理和校对。另外李元同志参加了第10章的编写工作,王屹松同志参加了本书的校对和部分录入工作,在此谨表示衷心的感谢。

书中不足之处,敬请读者指正。

作 者

1999年6月

# 目 录

## 第 1 篇 基础知识

<b>第 1 章 固液两相流</b> .....	3
1.1 两相流体的密度和相对体积质量 .....	3
1.2 固体颗粒的粒径和粒度分布 .....	3
1.3 两相流的浓度、稠度和含沙量.....	5
1.4 液体中运动颗粒的阻力 .....	8
1.5 阻力的一般公式和阻力系数 .....	9
1.6 球形颗粒在静水中的自由沉降.....	11
1.7 颗粒形状对沉速的影响.....	15
1.8 浓度对沉速的影响.....	15
1.9 两相流体的流变特性.....	18
1.10 管道两相流流区的划分 .....	19
1.11 淤积临界流速 .....	21
参考文献 .....	25
<b>第 2 章 固液泵</b> .....	26
2.1 概述.....	26
2.2 固液泵的基本参数.....	28
2.3 固液泵的汽蚀特性.....	29
2.4 固液离心泵的两相流基本方程式.....	34
2.5 相似理论.....	35
2.6 泵的比转数.....	37
2.7 比例定律与相似抛物线.....	39
参考文献 .....	40
<b>第 3 章 固液泵设计原理简介</b> .....	41
3.1 固液泵设计的理论基础和原则.....	41
3.2 固液泵的水力设计方法概述.....	42
3.3 固液两相流设计原理.....	46
参考文献 .....	48

## 第 2 篇 固液泵的选择与运行

<b>第 4 章 固液泵的应用</b> .....	53
4.1 固液泵的分类 .....	53
4.2 固液泵的应用 .....	61
4.3 普通固液泵应用中存在的问题 .....	68
4.4 X 型固液离心泵的运行效果 .....	71
参考文献 .....	73
<b>第 5 章 叶片式固液泵的结构</b> .....	74
5.1 重型固液泵的结构 .....	74
5.2 轻型固液泵的结构 .....	79
5.3 液下固液泵的结构 .....	81
5.4 潜水固液泵的结构 .....	84
参考文献 .....	85
<b>第 6 章 容积式固液泵的结构</b> .....	86
6.1 往复式固液泵的结构 .....	86
6.2 油隔离固液泵 .....	93
6.3 水隔离固液泵 .....	94
6.4 膜隔离固液泵 .....	95
参考文献 .....	97
<b>第 7 章 离心式固液泵抽送两相流体时的性能</b> .....	98
7.1 试验结果及分析 .....	98
7.2 固液泵抽送两相流体时的性能换算 .....	101
7.3 固液泵的清水性能标准 .....	104
参考文献 .....	106
<b>第 8 章 管道两相流阻力计算</b> .....	107
8.1 浆体管道流区的划分 .....	107
8.2 均匀悬浮浆体的阻力特性 .....	108
8.3 均匀颗粒非均匀悬浮浆体的阻力特性 .....	110
8.4 均质-非均质复合流的阻力计算 .....	112
8.5 关于摩阻系数 .....	113
8.6 垂直与倾斜管道浆体的阻力计算 .....	118
8.7 浆体管道扬程计算 .....	119

8.8 工业浆体管道摩阻损失的两种计算方法 .....	122
参考文献 .....	124
<b>第9章 固液泵的选型计算 .....</b>	<b>125</b>
9.1 固液泵的选型注意事项 .....	125
9.2 固液泵的选型计算 .....	126
9.3 泵选型中相似抛物线的应用 .....	128
9.4 配用电机的选择 .....	129
9.5 应用举例 .....	129
参考文献 .....	134
<b>第10章 固液泵的运行 .....</b>	<b>135</b>
10.1 固液泵的拆装与调试 .....	135
10.2 固液泵的操作 .....	136
10.3 固液泵的维护与故障排除 .....	137
10.4 如何提高固液泵的运行性能 .....	140
10.5 泵的串联和并联 .....	141
10.6 固液泵的运行工况调节 .....	145
10.7 固液泵的运行效率和使用寿命的经济效益分析 .....	150
参考文献 .....	152
<b>第11章 固液泵的现场测试 .....</b>	<b>153</b>
11.1 现场测试的主要参数 .....	153
11.2 现场测试方法与使用的仪器 .....	156
<b>第3篇 固液泵的磨损与耐磨材料</b>	
<b>第12章 固液泵的磨损与防护 .....</b>	<b>165</b>
12.1 固液泵磨损的严重性 .....	165
12.2 固液泵的磨损机理 .....	168
12.3 固液泵的磨损规律 .....	171
12.4 固液泵的性能与磨损的关系 .....	180
12.5 固液泵的抗磨技术 .....	183
参考文献 .....	186
<b>第13章 固液泵常用抗磨铸铁 .....</b>	<b>187</b>
13.1 固液泵抗磨铸铁发展简介 .....	187
13.2 镍硬铸铁 .....	188



---

13.3 高铬铸铁.....	193
参考文献.....	198
<b>第 14 章 固液泵抗磨铸铁的熔炼和铸造 .....</b>	<b>200</b>
14.1 熔炼与浇注.....	200
14.2 抗磨铸铁铸造工艺.....	205
参考文献.....	208
<b>第 15 章 固液泵抗磨铸铁的热处理和切削加工 .....</b>	<b>211</b>
15.1 抗磨铸铁的热处理工艺.....	211
15.2 抗磨材料陶瓷刀具切削加工.....	216
参考文献.....	220

第 1 篇

基础知识



# 第1章 固液两相流

固体与液体组成的混合物(常称为固液两相流体)的流动称为固液两相流动。如工业上精矿、尾矿、煤泥、灰渣的管道水力输送就是这种两相流动,其中液体是水,固体是离散的颗粒群。两相流中的“相”系指某一系统中具有相同成分及相同物理、化学性质的均匀物质部分。就物态而言,相是物质的单一状态。如固液两相流体中的固体即为固相,液体即为液相。本章主要阐述与固液泵有关的固液两相流(以下简称两相流)的基本知识。

## 1.1 两相流体的密度和相对体积质量

### 1.1.1 固体的密度和相对体积质量

固体的密度是指单位体积中密实固体所具有的质量,用符号  $\rho_s$  表示。在物理单位制中,密度的单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

固体的相对体积质量是固体的质量与同体积纯水(温度  $4^\circ\text{C}$ )的质量之比;用  $S_s$  表示。因此,相对体积质量是一个无量纲的物理量。由固体的相对体积质量定义可知:

$$S_s = \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (1-1)$$

下标  $s$  和  $f$  分别表示固体和液体。在工程上,近似地把水看成是不可压缩流体,密度近似等于  $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ ,相对体积质量  $S_f=1$ 。

### 1.1.2 两相流体的密度和相对体积质量

单位体积两相流体的质量称为两相流体的密度,用  $\rho_m$  表示。

两相流体的质量与同体积纯水的质量之比是两相流体的相对体积质量,用  $S_m$  表示。

$$S_m = \frac{\rho_m}{\rho_f} \quad (1-2)$$

## 1.2 固体颗粒的粒径和粒度分布

实际输送的固体物料颗粒形状不规则,大小不等。用粒径来表示颗粒大小,它是两相流中一个重要参数。下面首先讨论衡量颗粒大小的方法,然后讨论颗粒群的粒度分布和代表粒径。

### 1.2.1 衡量颗粒大小的方法

对形状不规则的固体物料,常用下述方法来衡量其大小。

### 1 等容粒径

所谓等容粒径是指体积与颗粒体积相等的球体的直径。如某一固体颗粒的体积为  $V$ ，则颗粒的等容粒径

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (1-3)$$

如果已知颗粒的质量为  $m$ ，密度为  $\rho_s$ ，则

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho_s}} \quad (1-4)$$

### 2 筛分粒径

通过具有标准筛孔的筛子区分颗粒的大小。该方法仅指明固体颗粒大小介乎上、下两个筛孔之间。在这上、下两筛孔范围的平均尺寸  $d_i$  可以用代数平均值  $(d_1+d_2)/2$  或几何平均值  $\sqrt{d_1d_2}$  ( $d_1$ 、 $d_2$  分别为上、下筛孔孔径) 表示。在工业上常用这种筛分方法确定粒径。采用的标准筛孔径用“目”表示，“目”与筛孔径的对应值见表 1-1。

表 1-1 泰勒制“目”与标准筛孔径的关系

泰勒制“目”	4	6	8	10	16	20	28	35
筛孔径/mm	4.76	3.37	2.38	1.68	1.19	0.84	0.60	0.42
泰勒制“目”	48	65	100	150	200	270	400	
筛孔径/mm	0.30	0.21	0.15	0.105	0.074	0.053	0.037	

### 3 沉降粒径

沉降粒径是指密度与颗粒密度相同且在静水中的沉降速度与颗粒沉降速度相等的球体的直径。由于 0.1mm 以上的较粗颗粒沉降太快，不易测准，故这种确定粒径的方法适用于 0.1mm 以下的细颗粒。根据沉速  $v_i$  确定粒径  $d_s$  的公式为

$$d_s = \frac{3C_D \cdot v_i^2}{4g(S_s - 1)} \quad (1-5)$$

式中  $C_D$  为颗粒在水中下沉时的阻力系数。

#### 1.2.2 粒度分布曲线

对于大小不等的固体颗粒群，往往先画出其粒度分布曲线，并由该曲线求出物料的代表粒径。

为了确定颗粒的粒度组成，往往用一组不同的筛孔的筛子来分筛颗粒，得出相邻上、下两筛孔间的物料质量  $m_i$ ，并计算其在总质量  $m$  中所占的质量分数  $X_i$ ，即

$$X_i = \frac{m_i}{m} \quad (1-6)$$

粒度组成常常用粒度分布曲线亦称颗粒级配曲线来表示，如图 1-1 所示，横坐标表示粒径，纵坐标为小于等于某粒径  $d_i$  的质量百分数  $P$ ，即  $P = \sum_{d_{\min}}^{d_i} X_i \times 100\%$ 。不同的粒度分

布曲线反映了不同的颗粒粒径组成形式,如图 1-1 中:曲线 a 表示固体物料中粗颗粒较多,曲线 b 则表示细颗粒较多,若各种颗粒的粒径接近相等,则粒度分布曲线与 c 相似。

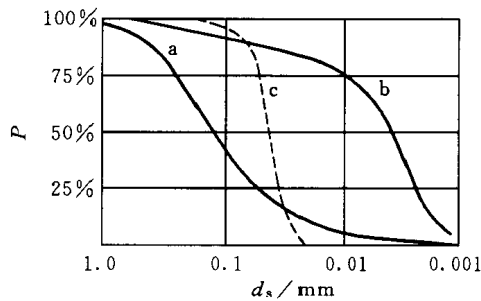


图 1-1 颗粒粒度分布曲线示意图

### 1.2.3 颗粒群的代表粒径

表示固体物料代表粒径的方法很多,以下列举两种:

#### 1 质量平均粒径 $\bar{d}_s$

各粒径  $d_i$  与其质量分数  $X_i$  乘积的总和,即

$$\bar{d}_s = \sum X_i d_i \quad (1-7)$$

#### 2 中值粒径 $d_{50}$

中值粒径  $d_{50}$ ,即粒度分布曲线上  $P$  为 50% 的粒径。

无论是质量平均粒径还是中值粒径,都不能反映颗粒组成的不均匀程度,而后者对管道输送和固液泵的性能有很重要的影响。另外还有两个描述颗粒群体特性的重要粒径参数。其一是物料中最大颗粒直径。沉降快的粗颗粒及其含量多少是造成管道堵塞的重要原因,也是增加管道阻力和加快管道磨损的主要因素之一。在固液泵叶轮水力设计中,确定叶轮流道宽度和叶片数时需要考虑所通过的最大直径的颗粒。另一个粒径参数是细颗粒的含量。固体物料中具有一定含量的细颗粒,对减小粗颗粒的沉速,维持浆体的稳定运行,减少固液泵的水力损失有重要意义。但细颗粒含量太多,又会增加浆液的粘性,增加管道阻力和泵的水力损失。

## 1.3 两相流的浓度、稠度和含沙量

浓度是固液两相流中最基本也是最重要的物理量。它反映了两相流体中固体的含量。

### 1.3.1 浓度

#### 1 体积浓度

两相流体中固体体积流量  $Q_s$  和两相流体体积流量  $Q_m$  之比称为体积浓度,用符号  $c_v$  表示:

$$c_v = \frac{Q_s}{Q_m} \quad (1-8)$$

对于两相流中的液体(一般为水),其体积浓度可表达成

$$c_f = \frac{Q_f}{Q_m} = 1 - c_v \quad (1-9)$$

## 2 质量浓度

两相流中固体质量流量( $\rho_s Q_s$ )和两相流体质量流量( $\rho_m Q_m$ )之比称为质量浓度,用  $c_m$  表示

$$c_m = \frac{\rho_s Q_s}{\rho_m Q_m} \quad (1-10)$$

所以质量浓度与体积浓度有如下关系:

$$c_m = \frac{\rho_s}{\rho_m} c_v \quad (1-11)$$

除浓度外,也有用稠度、含沙量等来表示两相流体中固体的含量。

### 1.3.2 稠度

#### 1 体积稠度

体积稠度定义为固液两相流体中固体体积流量  $Q_s$  与液体(一般为清水,下同)流量  $Q_f$  之比,用  $c_t$  表示:

$$c_t = \frac{Q_s}{Q_f} \quad (1-12)$$

$c_t$  与  $c_v$  有如下关系:

$$c_t = \frac{Q_s}{Q_f} = \frac{Q_s}{Q_m - Q_s} = \frac{c_v}{1 - c_v} \quad (1-13)$$

#### 2 质量稠度

质量稠度定义为固液两相流体中固体质量流量( $\rho_s Q_s$ )与液体质量流量( $\rho_f Q_f$ )之比,用  $c_z$  表示:

$$c_z = \frac{\rho_s Q_s}{\rho_f Q_f} \quad (1-14)$$

所以质量稠度与体积稠度有如下关系:

$$c_z = \frac{\rho_s}{\rho_f} c_t \quad (1-15)$$

当固液两相流体中的液体为清水时,上式又有

$$c_z = S_s c_t \quad (1-16)$$

### 1.3.3 含沙量

在水利部门,习惯用含沙量  $\gamma$  来表示固液两相流体中(一般为砂水混合物)固体的含量,定义为单位体积两相流体中固体的质量,通常用  $\text{kg}/\text{m}^3$  为单位。含沙量与体积浓度的关系为

$$\gamma = c_v \rho_s \quad (1-17)$$

### 1.3.4 有关浓度和稠度的若干关系式

两相流体的质量流量等于固体质量流量和液体质量流量之和,即

$$\rho_m Q_m = \rho_s Q_s + \rho_f Q_f$$

$$\text{则} \quad \rho_m = \rho_s \frac{Q_s}{Q_m} + \rho_f \frac{Q_f}{Q_m} = \rho_s c_v + \rho_f (1 - c_v) \quad (1-18)$$

$$\text{所以} \quad c_v = \frac{\rho_m - \rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (1-19)$$

式(1-19)是两相流体体积浓度的一个重要表达式。可以看出,只要知道了固体、液体和混合物的密度,就可求出两相流的浓度。

根据上面各物理量的定义可以推出如下一些关系式:

$$c_v = \frac{c_t}{1 + c_t} \quad c_t = \frac{c_v}{1 - c_v} \quad (1-20)$$

$$c_m = \frac{c_z}{1 + c_z} \quad c_z = \frac{c_m}{1 - c_m} \quad (1-21)$$

$$c_m = \frac{\rho_s}{\rho_m} \frac{c_t}{(1 + c_t)} \quad c_z = (1 + c_t) \frac{(1 - c_v)c_m}{1 - c_m} \quad (1-22)$$

$$\rho_m = c_v \rho_s + (1 - c_v) \rho_f \quad s_m = 1 + (s_s - 1)c_v \quad (1-23)$$

$$s_m = \frac{s_s}{c_m + (1 - c_m)s_s} \quad (1-24)$$

$$c_v = \frac{c_m}{s_s - (s_s - 1)c_m} \quad (1-25)$$

### 1.3.5 输送浓度和当地浓度

上述所说的浓度实际上是两相流体的输送浓度,它与固、液之间的相对速度有关。如两相流体通过管道输送到目的地后的浓度就是输送浓度。当地浓度反映某一瞬间在某一体积(或某一质量)两相流中固体的含量。

$$\text{当地体积浓度} \quad c_s = \frac{\bar{V}_s}{\bar{V}_m} \quad (1-26)$$

$$\text{当地质量浓度} \quad c_g = \frac{\rho_s \bar{V}_s}{\rho_m \bar{V}_m} = \frac{\rho_s}{\rho_m} c_s \quad (1-27)$$

式中  $c_s$ 、 $c_g$  分别是两相流体的当地体积浓度和当地质量浓度;  $\bar{V}_s$ 、 $\bar{V}_m$  分别是某一瞬间所取两相流体体中固体积和两相流体体积;  $\rho_s$ 、 $\rho_m$  分别是固体和两相流体的密度。如在等直径的两相流管道中任取一微段  $L$ , 假设  $L$  段各断面固体所占面积相等,  $A_s$ 、 $A_f$ 、 $A_m$  分别为固体、液体及两相流的断面面积, 则

$$\text{当地体积浓度} \quad c_s = \frac{\bar{V}_s}{\bar{V}_m} = \frac{A_s L}{A_m L} = \frac{A_s}{A_m} = \frac{A_s}{A_s + A_f}$$

$$\text{输送体积浓度} \quad c_v = \frac{Q_s}{Q_m} = \frac{Q_s}{Q_s + Q_f} = \frac{A_s v_s}{A_s v_s + A_f v_f} = \frac{A_s}{A_s + A_f \cdot \frac{v_f}{v_s}}$$



从上面可以看出,只有当固体和液体的速度相等时,输送浓度才等于当地浓度。一般情况下,固、液之间有速度差(尤其是固粒质量较大时更明显),故两者是不相同的。

### 1.4 液体中运动颗粒的阻力

从广义上讲,液体中的运动颗粒受到三种阻力,即① 稳态阻力;② 无粘加速度阻力;③ 粘性加速度阻力。

#### 1.4.1 稳态阻力

稳态阻力与颗粒-液体之间的相对速度有关。由于液体中粘性的存在,当颗粒与其周围液体的速度(大小或方向)不一致时,这种阻力就始终存在,一般称其为稳态阻力。

#### 1.4.2 无粘加速度阻力

当颗粒相对于液体作加速运动时,必将带动其周围的部分液体加速,使这部分液体做功。应用理想流体力学理论可以证明,这种效应等价于颗粒具有一个附加质量。对于球形颗粒,其附加质量等于球体所排开的液体质量的一半。由于这种广义阻力不是由流体的粘性引起的,故称为无粘加速度阻力,亦常称为附加质量力。

#### 1.4.3 粘性加速度阻力

当颗粒相对于液体加速时,由于液体中粘性的存在,受边界层影响带动一部分流体运动。由于惯性作用,液体不能马上运动,产生瞬时阻力——粘性加速度阻力,即 Basset 力。因此液体对颗粒的作用力不仅依赖于当时颗粒的相对速度(稳态阻力),当时的相对加速度(附加质量力),还依赖于在这以前加速度的历程。

以上三种力统称为广义相间阻力,其中稳态阻力属颗粒的相对速度阻力,常简称为阻力,后两种力属颗粒的加速度阻力。最常见又十分重要的是稳态阻力。下面主要分析稳态阻力。

当一物体在流体中运动时,由于运动物体对流体的影响,流体对物体产生作用力。作用力一般分为升力和阻力两部分,升力是与速度方向垂直的分力,阻力是与速度方向相反的分力。

如图 1-2 所示,在物体表面上取微元面积  $dS$ ,作用于该微元面积上的压强及切应力分别用  $P$  和  $\tau$  表示,作用于微元面积上的摩擦力  $dF = \tau \cdot dS$ ,压力  $dP = PdS$ ,此时沿整个物体表面上的阻力  $R$  等于作用于物体表面上的切向力与法向力在流动方向上的投影之和,即

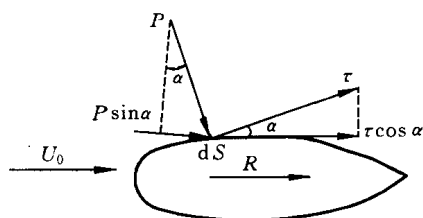


图 1-2 运动物体阻力类型

$$R = \int_S \tau dS \cos \alpha + \int_S P dS \sin \alpha = R_m + R_p$$

上式表明,运动物体的阻力分为两部分:一部分是由切应力产生的摩擦阻力  $R_m$ ,另一