

陈次昌  
刘天宝

刘正英  
袁寿其

编著

# 两相流泵 的理论 与设计

兵器工业出版社

# 两相流泵的理论与设计

陈次昌 刘正英 编著  
刘天宝 袁寿其



兵器工业出版社

(京)新登字049号

图书在版编目CIP数据

DL 63/63

两相流泵的理论与设计/陈次昌等编著. —北京: 兵器工业出版社, 1994.7

ISBN 7-80038-797-6

I. 两… II. 陈… III. 混流泵-结构设计 IV. TH313

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第01665号

兵器工业出版社 出版发行  
(北京市海淀区车道沟15号)

各地新华书店经销

北京市建华印刷厂印装

开本: 787×1092 1/32 印张: 7.5 字数: 193千字

1994年7月第1版 1994年7月第1次印刷

印数: 1—1100册 定价 9.80元

## 内 容 简 介

本书较系统地介绍了国内外两相流泵的理论与设计方法。全书共分六章。主要包括两相流动与两相流泵概况、两相流泵理论基础、气液两相流泵的理论与设计、固液两相流泵的理论与设计、两相流参数测量和两相流管道输送等。本书既可供从事两相流动研究和两相流泵设计的科技工作者参考，也可作为高等院校有关专业的研究生和大学学生的教材。

**责任编辑：聂笃克 孙 锐**  
**封面设计：张 铭**

## 前 言

两相流泵是在工业生产各部门应用广泛的流体机械，但是它的理论基础与设计方法还不成熟，是正处在探索与发展阶段的新兴学科领域。目前国内尚未见到系统地介绍这方面的著作，我们翻阅了大量文献、资料，在为研究生开设的《两相流动及两相流泵》课程讲义的基础上编著成这本书。书中除简要地介绍了两相流动的基础理论外，着重介绍了气液与固液两相流泵的性能、内部流动、堵塞、磨损及设计等问题。书中力图全面反映当前两相流泵理论与设计的进展情况和前沿领域的研究工作。书中每章末尾附有相当丰富的参考文献目录，可供读者对有关问题作进一步了解。因此本书既是一本可供流体机械专业高年级学生及研究生用的教材，又是一本可供工程技术人员、设计和研究人员使用的参考书。

限于作者水平，本书在选材、编排与论述中，疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者予以指正。

作者

1993年12月于镇江

## 主要符号说明

|       |                    |
|-------|--------------------|
| $A$   | 面积, 导纳             |
| $b$   | 单位容积体积力, 宽度        |
| $c$   | 浓度                 |
| $C_D$ | 阻力系数               |
| $D$   | 管径, 叶轮直径           |
| $d_r$ | 颗粒直径               |
| $E$   | 光子能量, 感应电动势        |
| $e$   | 单位流体能量             |
| $F$   | 力                  |
| $f$   | 相的单位容积上受的力, 频率     |
| $G$   | 重力, 质量流速, 重量, 系统增益 |
| $g$   | 重力加速度              |
| $H$   | 扬程                 |
| $h$   | 水力损失               |
| $I$   | 射线强度               |
| $i$   | 单位长度上摩阻系数          |
| $K$   | 常数, 系数             |
| $L$   | 长度, 功              |
| $M$   | 力矩                 |
| $m$   | 质量, 质量流量           |
| $N$   | 叶片数                |
| $P$   | 功率, 叶片数            |
| $n$   | 转速, 指数             |
| $p$   | 压强                 |

|               |                        |
|---------------|------------------------|
| $Q$           | 泵流量, 能量                |
| $q$           | 单位面积上的热量               |
| $Q_v$         | 体积流量                   |
| $R$           | 阻力                     |
| $r$           | 半径                     |
| $T$           | 热力学温度                  |
| $S$           | 质量源, 滑差比               |
| $S_s$         | 固体物相对密度                |
| $t$           | 时间                     |
| $u$           | 内能                     |
| $u$           | 圆周速度                   |
| $V$           | 绝对速度, 容积               |
| $v$           | 比容                     |
| $V_k$         | 临界速度                   |
| $W$           | 功                      |
| $w$           | 相速度, 相对速度, 激光功率        |
| $W_t$         | 沉降速度                   |
| $x$           | 干度, 管道周界, 射线           |
| $Z$           | 坐标, 位高                 |
| $\alpha$      | 空隙率                    |
| $\beta$       | 安放角, 容积含气率, 射线, 颗粒浓度函数 |
| $\gamma$      | 射线, 重度、角度              |
| $\varepsilon$ | 电导(容)率                 |
| $\eta$        | 效率                     |
| $\theta$      | 角度                     |
| $\lambda$     | 波长                     |
| $\mu$         | 粘性系数, 线性吸收系数, 泊松比      |

|           |            |
|-----------|------------|
| $\rho$    | 密度         |
| $\tau$    | 剪切应力       |
| $\varphi$ | 球形系数, 包角   |
| $\chi$    | 管道周线       |
| $\psi$    | 扬程系数       |
| $\omega$  | 角速度        |
| 下标        |            |
| 1         | 泵入口, 断面    |
| 2         | 泵出口, 断面    |
| $A$       | 加速度        |
| $d$       | 设计值        |
| $e$       | 有效值        |
| $F$       | 摩擦         |
| $G$       | 重力         |
| $g$       | 气相         |
| $H$       | 均匀流        |
| $i$       | $i$ 分量, 界面 |
| $l$       | 液相         |
| $m$       | 混合相        |
| $o$       | 壁面上        |
| $r$       | 径向力        |
| $s$       | 固相, 冲击     |
| $T$       | 理论值        |
| $V$       | 体积         |
| $W$       | 重量         |

# 目 录

## 前 言

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| 第一章 绪 论                  | ( 1 )  |
| 第一节 两相流动与两相流泵            | ( 1 )  |
| 第二节 两相流泵的发展              | ( 2 )  |
| 一、气液两相流泵                 | ( 2 )  |
| 二、固液两相流泵                 | ( 3 )  |
| 参考文献                     | ( 4 )  |
| 第二章 两相流泵理论基础             | ( 6 )  |
| 第一节 气液两相流动的特性参数和<br>基本流型 | ( 6 )  |
| 一、两相流的特性参数               | ( 6 )  |
| 二、气液两相流的流型               | ( 11 ) |
| 第二节 气液两相流动的基本方程          | ( 15 ) |
| 一、均匀流动                   | ( 15 ) |
| 二、分离流动                   | ( 18 ) |
| 第三节 固液两相流中颗粒的特性          | ( 23 ) |
| 一、物理性质                   | ( 23 ) |
| 二、固体颗粒的几何性质              | ( 24 ) |
| 三、固体颗粒的沉降特性              | ( 26 ) |
| 四、颗粒的阻力系数                | ( 29 ) |
| 第四节 固液两相流动的基本方程          | ( 32 ) |
| 一、连续方程                   | ( 32 ) |

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| 二、运动方程.....                   | ( 33 ) |
| 三、能量方程.....                   | ( 35 ) |
| 第五节 固液两相流动的近代计算模型.....        | ( 36 ) |
| 一、两相流数学模型.....                | ( 36 ) |
| 二、固液两相流计算模型.....              | ( 38 ) |
| 参考文献.....                     | ( 41 ) |
| <b>第三章 气液两相流泵</b> .....       | ( 43 ) |
| 第一节 气液两相流泵的性能.....            | ( 43 ) |
| 一、泵的扬程.....                   | ( 43 ) |
| 二、无限叶片数理论扬程.....              | ( 46 ) |
| 三、有限叶片数理论扬程.....              | ( 47 ) |
| 四、泵内流动损失.....                 | ( 50 ) |
| 五、泵的性能曲线.....                 | ( 53 ) |
| 六、汽蚀对泵性能的影响.....              | ( 57 ) |
| 第二节 气液两相流泵叶轮中气泡运动的<br>分析..... | ( 58 ) |
| 一、液流流场的三元流动的计算.....           | ( 59 ) |
| 二、气泡运动方程.....                 | ( 64 ) |
| 三、数值计算方法.....                 | ( 68 ) |
| 四、气泡在叶轮内的运动.....              | ( 71 ) |
| 第三节 气液两相流泵的设计.....            | ( 74 ) |
| 一、采用较大的叶片出口安放角.....           | ( 74 ) |
| 二、提高水泵的转速、增加叶片数.....          | ( 75 ) |
| 三、采用半开式或开式叶轮.....             | ( 75 ) |
| 四、采用多段式叶片.....                | ( 76 ) |
| 五、在叶轮盖板上开回流孔.....             | ( 76 ) |

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 六、采用带有导叶的扩压室·····        | ( 77 )  |
| 七、减小蜗室入口宽度·····          | ( 77 )  |
| 八、采用抽气结构·····            | ( 78 )  |
| 参考文献·····                | ( 79 )  |
| <b>第四章 固液两相流泵</b> ·····  | ( 81 )  |
| 第一节 概述·····              | ( 81 )  |
| 第二节 杂质泵·····             | ( 81 )  |
| 一、杂质泵的性能·····            | ( 82 )  |
| 二、杂质泵叶轮中固体颗粒运动的分析·····   | ( 94 )  |
| 三、杂质泵的壁面磨损·····          | ( 104 ) |
| 四、杂质泵的水力设计·····          | ( 108 ) |
| 第三节 无堵塞泵·····            | ( 130 ) |
| 一、螺旋离心泵·····             | ( 132 ) |
| 二、旋流泵·····               | ( 143 ) |
| 三、单流道泵·····              | ( 157 ) |
| 参考文献·····                | ( 162 ) |
| <b>第五章 两相流参数测量</b> ····· | ( 165 ) |
| 第一节 主要设计参数测量·····        | ( 165 ) |
| 一、压强降·····               | ( 165 ) |
| 二、空隙率·····               | ( 168 ) |
| 三、两相流流量测量·····           | ( 172 ) |
| 第二节 基本参数测量·····          | ( 176 ) |
| 一、固液两相混合物的浓度·····        | ( 176 ) |
| 二、局部速度·····              | ( 179 ) |
| 三、颗粒、液滴和气泡尺寸的测量·····     | ( 182 ) |
| 第三节 固液两相流泵参数的测量·····     | ( 186 ) |
| 一、测量原理·····              | ( 186 ) |

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 二、两相流泵的试验装置·····         | ( 189 ) |
| 三、参数的测量·····             | ( 189 ) |
| 参考文献·····                | ( 193 ) |
| <b>第六章 两相流管道输送</b> ····· | ( 195 ) |
| 第一节 概述·····              | ( 195 ) |
| 一、两相流管道输送的发展·····        | ( 195 ) |
| 二、两相流管道输送系统·····         | ( 196 ) |
| 第二节 泵送设备·····            | ( 203 ) |
| 一、离心浆体泵的用途·····          | ( 204 ) |
| 二、分类·····                | ( 204 ) |
| 三、一般型式·····              | ( 205 ) |
| 四、特殊型式·····              | ( 206 ) |
| 五、闭口和开口叶轮·····           | ( 207 ) |
| 六、泵体和叶轮材料·····           | ( 207 ) |
| 七、轴封·····                | ( 207 ) |
| 第三节 管道输送中的水力学问题·····     | ( 208 ) |
| 一、混合液的主要特性·····          | ( 208 ) |
| 二、两相流体的流动模式·····         | ( 211 ) |
| 三、阻力特性与极限沉淀速度·····       | ( 216 ) |
| 四、两相流伯努里方程·····          | ( 218 ) |
| 五、摩阻损失的预测·····           | ( 219 ) |
| 第四节 输送设计简介·····          | ( 223 ) |
| 一、浆体输送的规划设计程序·····       | ( 223 ) |
| 二、泵的选取·····              | ( 224 ) |
| 参考文献·····                | ( 227 ) |

# 第一章 绪 论

在自然界及工程实际中，常遇到各种多相流动问题。如大气风沙运动，河川泥沙运动，血管中血液与红血球运动，锅炉里空气与煤粉的运动，水力输送中的水与固体物料的运动等，均属多相流动问题。在实际工程上，不断地提出泵送各种多相流体的问题，故近年来对多相流泵的研究也越来越受到人们的重视，并有了较快的进展。

## 第一节 两相流动与两相流泵

在流体力学中，将动力学性质相同的一群物质称为一相。据此，一个包含两种以上不同态物质的流动是多相流，有时也把流动中包含的不同尺寸和形状之同态物质颗粒，当不同相来处理，例如可以根据具体情况，把同流体一起运动的不同形状、不同尺寸的各种固体颗粒分成许多不同的相。对多相流中的每一相都需要一组力学和热力学的参数来描述，同时还要考虑相间的力学耦合关系，多相流通常是由连续介质与不连续介质组成的流体流。连续介质称为连续相，不连续介质称为分散相。一般常碰到的多相流，往往是在连续相中含有分散相的均匀的混合物的两相流动，如固液两相流、气液两相流等。

我们把专门输送多相流体的泵称为多相流泵，特别地把输送两相流体的泵叫两相流泵。由于在工程实际中经常碰到泵送气液和固液两相流体的问题，因此我们在这里也只限于

阐述两相流泵的有关情况。

## 第二节 两相流泵的发展

### 一、气液两相流泵

人们早就知道，在泵送浆液和石油时，液体内含气体游离出来，为防止汽蚀产生，可以往泵吸入管中通入一定量的空气。这将使泵在气液两相流动状态下运转，常碰到的气液两相流泵可分两类：一为输送含空气的液体泵，二为输送含蒸气的液体泵。

1960年山拼<sup>[2]</sup>研究了泵内混入空气以后，由于液体密度降低而导致冲击的可能性。70年代以来，从实验和理论两个方面，比较系统地研究了空气混入以后，对泵性能的影响。在实验方面，有江<sup>[3]</sup>研究了吸入空气所引起的泵汽蚀性能的变化；村上<sup>[4,5]</sup>研究了泵运行条件与空气吸入方式的关系；Florjonec研究了吸入不同种类气体时对多级泵性能的影响；Isay探讨了单翼、西山<sup>[8,9]</sup>研究了叶栅在含气液体流中的特性。

为了确定两相流泵特性与其内部流动状态的关系，村上<sup>[10]</sup>提出了预测泵在输送两相流体时性能变化的方法，并研究了叶片数<sup>[11]</sup>、叶端间隙<sup>[12]</sup>和泵比转速<sup>[13]</sup>对泵性能的影响。另外，村上还推导了叶轮内气泡运动的方程式，提出了数值计算方法，并据此计算了离心泵<sup>[14,15]</sup>及轴流泵<sup>[16]</sup>的性能。

80年代以来，原子能反应堆的安全问题，引起了人们的高度重视，从而推动了气液两相流泵的研究。当反应堆内出现冷却液泄漏时，随着冷却系统内压力的降低，冷却液开始沸腾，从而使冷却泵在气液两相流状态下运动。Olson研

制了进行冷却液喷出的实验装置[17]，进行了空隙率从0%~100%的各种实验[18]，实测了泵在气液两相流状态下的性能，以及在冷却液喷出过程中泵的过渡特性[19]。1973年在美国原子能委员会的指示下，美国电力研究所组织了一系列研究，包括：在各种条件下的实验[20]，两相流状态下泵性能的模型换算[21, 23]，流动状态观察[24]，以及两相流所引起的不稳定现象[25]。另外，Wilson展望了气液两相流泵的性能计算法[26]；Mikielcowicz提出了以扬程损失比形式整理两相流泵性能的方法[27]；为了预测泵在冷却液喷出过程中的过渡特性，研究了用性能下降率整理泵静特性实验结果的方法[28]。

## 二、固液两相流泵

早在70年代，对泵在输送固液两相流时性能的变化就已开始有人研究[29]。近年来随着海底资源的开发，煤炭水力输送等问题的提出，对固液两相流泵的研究又重新活跃了起来，泵在输送固液两相流体时，不仅性能发生变化，而且还带来了磨蚀问题。

宫江[30]的试验表明：普通清水泵在输送含固体颗粒的介质时，会引起泵效率的下降，下降程度主要取决于颗粒的大小[31]，板谷[32]测定了离心泵叶轮内玻璃球的运动轨迹，并与二元理论计算结果进行了比较。峰村[33]先用准三元理论计算了离心泵内水流流场，再把计算结果代入反映水流影响的颗粒运动微分方程组内来计算颗粒的运动，求出了球形颗粒运动的轨迹，以及与壁面的冲击速度。同时，还研究了固体颗粒的直径、密度对流量的影响。随后，村上又用有限元法对离心泵[34]、斜流泵[35]内部流场作了全三元计算，在此基础上计算了颗粒的三元流轨迹，并讨论了重力对颗粒运动的

影响。蔡保元1982年提出两相流泵的设计理论[36],并据此设计了各种杂质泵,取得了很好的效果。何希杰在实验资料基础上,运用分析研究和数理统计方法,得出离心渣浆泵在设计工况下输送浆体时性能计算方法[37]。此外,对无堵塞泵,如旋流泵、螺旋离心泵、单叶片泵等也进行了很多研究。

## 参 考 文 献

- 1 任桂森编,多相流动基础,浙江大学力学系教学讲义,1982
- 2 山折,日本机械学会论文集,1969,26-162: 219
- 3 有江,福迫,日本机械学会講演论文集.
- 4 Murakami M, et al.Pro of the 13th congress,1967,1 AHR 2B: 71
- 5 Murakami M, et al.Memoirs of the Faculty of Eng. Nagoya Univ.1971, 23-1: 124
- 6 Ftorjancic D.Sulrer Research,1970, Number : 35
- 7 Isay W H and Roental Th.I Augem. Math, Mech. 1974, 54-9: 571
- 8 [日]西山,日本机械学会论文集,1978, 44-38: 1571
- 9 [日]西山,日本机械学会论文集,1978, 44-386: 3471
- 10 [日]村上,峰村,日本机械学会论文集,1973, 39-328: 31715
- 11 [日]村上,峰村,日本机械学会论文集,1973, 40-330: 49
- 12 [日]村上,峰村,日本机械学会论文集,1976, 42-354: 489
- 13 [日]村上等,日本机械学会论文集,1978, 44-380: 1291
- 14 [日]峰村,村上,日本机械学会论文集,44-380,(1678): 1291
- 15 Minemura K and Murakami M. Trans.J Fluid Eng (1980), 102-4: 440
- 16 [日]村上等,日本机械学会论文集,1981, 17-417: 754
- 17 Olosn D J.Proc Topical Meeting on Water Reactor Safety Conf.1973, 739-304: 758