



10 气固两相流的测量技术

10.1 两相流分散相浓度的测量

10.2 空隙率或浓度的测量

10.3 流量的测量

10.4 压力及压力降的测量

10.5 气泡、液滴和颗粒尺寸的测量



10.1.1 分散相浓度的表示方法

■ 气相：

含气率，质量含气率（干度）：
$$x = \frac{q_{mg}}{q_m} = \frac{q_{mg}}{q_{mq} + q_{mp}}$$

容积含气率：
$$\beta = \frac{q_{vg}}{q_v} = \frac{q_{vg}}{q_{vq} + q_{vp}}$$

截面含气率（空隙率）：
$$\alpha = \frac{A_g}{A} = \frac{A_g}{A_q + A_p}$$

体积平均空隙率：
$$\alpha = \frac{V_g}{V} = \frac{V_g}{V_q + V_p}$$

■ 固相：1—气相

气固中较多采用截面含固率，液固中常用质量流量含固率



10.1.2 各参数之间的关系

$q_{vg} = Av_g$, $q_{vp} = Av_p$, $q_{mg} = \rho_g Av_g$, $q_{mp} = \rho_p Av_p$ 代入 x 、 β 的表达式

得 $x = \frac{\rho_g v_g}{\rho_g v_g + \rho_p v_p}$, $\beta = \frac{v_g}{v_g + v_p}$, 合并二式, 可得 $x = \frac{\frac{\rho_g}{\rho_p}}{\frac{1}{\beta} + \left(\frac{\rho_g}{\rho_p} - 1\right)}$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{A_p}{A_g}}, \quad \beta = \frac{1}{1 + \frac{q_{vp}}{q_{vg}}} = \frac{1}{1 + \frac{A_p v_p}{A_g v_g}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{S} \frac{A_p}{A_g}}$$

其中 S 称为两相滑动比 $S = \frac{v_g}{v_p}$, 合并后得 $\alpha = \frac{1}{1 + S \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)}$

$S=1$ 时, $\alpha=\beta$, 气相速度等于颗粒相速度, 截面孔隙率与容积空隙率在数值上相等。



10.1.3 两相流合流的密度

- 流动密度 ρ_0 ：单位时间内流过截面的两相混合物的总质量与总体积之比，即

$$\rho_0 = \frac{q_m}{q_v} = \rho_g \frac{q_{vg}}{q_v} + \rho_p \frac{q_{vp}}{q_v} = \rho_g \beta + \rho_p (1 - \beta)$$

- 真实密度 ρ_m ：某时刻在管道某处取微元体 $\Delta V = A\Delta l$ ，则在该微元体内两相介质的总质量 Δm 与微元体体积 ΔV 之比为真实密度。

$$\rho_m = \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{\rho_g \alpha A\Delta l + \rho_p (1 - \alpha) A\Delta l}{A\Delta l} = \rho_g \alpha + \rho_p (1 - \alpha)$$

$$S=1 \text{ 时, } \alpha = \beta, \rho_0 = \rho_m$$



10.2 空隙率或浓度的测量

10.2.1 直接测量法

- 假定气液两相流为定常流，一般采用快关阀门同时迅速关闭实验段的阀门，然后通过两相分离获得二阀门之间的平均空隙率，然后在用该空隙率与某些流动参数（如压力降、流速、密度、粘度等）进行回归得到空隙率的计算式或图解式。
- 准确、有效，主要用于实验室的两相流研究以及对空隙率测量装置的标定。
- 缺点：需要切断正常流动，不能在线实时测量。



10.2.2 气体颗粒流的等速取样法

- 原理：1、先对流场进行测量；2、调节抽气泵流量使探头流速等于流场当地流速；3、探头中心线应对准流线；4、使用滤筒收集颗粒并称重。
 - 取样时间、取样探头口径的确定。
 - 误差：1、气流速度误差；2、取样方向偏差。
- 以此为原理发展了一些半自动等速取样装置。



10.2.3 射线吸收法

- 某种射线源发出的射线（如 γ 射线、X射线、 β 射线等）经流体时部分被流体所吸收，吸收的程度与混合物空隙率有关。



10.2.4 射线散射法

- 主要有 γ 射线散射法和中子散射法，通过 γ 射线混合物时要产生衰减，其中衰减的一部分能量由康普顿散射所引起



10.2.5 电学法

- 阻抗法：根据两相介质的介电常数与电导率不相等来进行测量。
- 电容法：利用固相介质浓度改变介电常数的方法。难点：变量很小，需要先进的信号降噪技术。



10.2.6 光学法

- 当光线通过两相流时，根据Beer定律，光强产生衰减。

10.2.7 热学法

- 利用混合物热容的变化来进行测量。



10.3 流量的测量

- 一. 节流法：基于两相流通过节流装置时产生的两相压差与两相流量的关系，或两相压差与单相压差的关系的测量，通过测量和模型计算得到两相流量。
- 二. 速度法：基于测量两相流混合物的流速和平均密度或分相含率来得到两相流量、
- 三. 分相测量法：先用某种分离装置把两相分离，各自测量流量，然后又返回。
- 四. 力学法：利用流体的动压、动量矩和离心力等进行测量
- 五. 相关法：通过两点的相关函数测量流速
- 六. 光学法：利用激光多普勒效应或光导显微等技术测量
- 七. 声学法：利用超声波原理进行测量
- 八. 热学法：热线（膜、球）风速仪、量热计
- 九. 电磁法：电磁感应原理
 - 一○. 核磁共振法：
 - 一一. 示踪法：利用脉冲中子触发示踪
 - 一二. 容积法：利用一定容积的两相混合物，其压力、体积和温度间的热力学关系测量



10.4 压力及压力降的测量

- 液柱式压差计，压力传感器，压差变送器
- 主要问题：引压管重往往随机存在两相介质，引起管重流体密度的变化，压力波动大
- 改进引压系统：采用分离罐、液体通入法、采用冷凝器、气体反吹技术、隔离罐、固态压力传感器等。
- 脉动压力的测量：选择较高响应频率的差压变送器，尽可能缩短引压管。



10.5 气泡、液滴和颗粒尺寸的量

- 一. 筛分法：使用不同大小网孔的筛子进行筛分，获得颗粒尺寸分布。成本低，但操作要求高、时间长，且不太准确。
- 二. 气体沉降法、液体沉降法
- 三. 电阻法（库尔特法）：颗粒样品悬浮在电解质中，电解质中有一个小孔板，孔板浸没在两个电极之间。当颗粒经过小孔时，就会把电解质排开，从而引起暂时的电阻变化。
- 四. 光电沉降法：结合了沉降和光吸收原理。利用颗粒在液体中沉降速度来测量粒径，而利用不同位置的投光强度来测量颗粒大小和分布。
- 五. 电子显微镜法：常用来标定或校验其它颗粒测量仪器。
- 六. 全息照相法：记录被测量颗粒的散射光与非散射光之间的干涉图样，通过适当的再现可重现颗粒场的三维图像，可以得到被测颗粒的尺寸、形状等信息。
- 七. 干涉法：利用多普勒原理，同时测量颗粒的尺寸及速度，测量速度快。
- 八. 光散射法
- 九. 超声波衰减法：当超声波通过颗粒的混合介质时会产生衰减，其吸收的能量与颗粒大小、浓度和超声波频率有关，可用于 $25\sim 600\mu\text{m}$ 的颗粒直径测量。



11 气固两相流的模化理论与实验技术

11.1 相似与模化原理

11.2 研究进程必须有完整而详细的规划

11.3 测量手段的选取

11.4 系统的建造与调试

11.5 工况的设计与数据的分析与处理

11.6 气体颗粒流研究实例



11.1 相似与模化原理

■ 在实验研究时，势必要用到缩小或放大的模型，也存在工质的替代（例如用室温空气替代热烟气）。根据相似原理，进行等温冷态模化试验应遵循的原则是：

- (1)、模型与实物几何相似；
- (2)、保持气流进入自模化区；
- (3)、边界条件相似。

所谓“自模化区”，就是指当Re数大于某一个定值后，Eu数 $Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} = f(Re)$ 不再与Re数有关而保持为一定值，此时惯性力是决定性因素而粘性影响可以忽略不计，流场图谱也不再改变。通常，进入自模化区的 $Re \approx 10^5$ 。流道越复杂，进入自模化区越早。一般认为 $Re > 2 \sim 5 \times 10^4$ 时进入自模化区。



描写气固两相运动的相似准则有：

$H_o = \frac{v_g \tau}{l}$ — 均时性准则，速度场随时间的改变速度的反映；

$Re = \frac{v_g l}{\nu}$ — 雷诺准则，气流惯性力与粘性力比值的反映；

$Fr = \frac{gl}{v_g^2}$ — 弗鲁德准则，气流惯性力与重力比值的反映；

$Eu = \frac{\Delta p}{\rho_g v_g^2}$ — 欧拉准则，气流压力与惯性力比值的反映；

$St = \frac{\rho_P d_P^{1+k} v_g^k}{C_D \rho_g^{1-k} l \mu^k}$ — 斯托克斯准则，颗粒阻力与惯性力比值的反映；

以及 $\frac{v_P}{v_g}$ 、 $\frac{\rho_P}{\rho_g}$ （气固物性准则）、 $\frac{\overline{v'^2}}{v^2}$ 、 $\frac{\overline{v'_i v'_j}}{v^2}$ （湍流准则）



颗粒分布相似： $R_x = 100e^{-bx^n}$ 中， n 相等，以及煤粉浓度 μ 相等。另外，还要求颗粒的阻力处于同一区，即 St 中的 k 值相等。同时，模化还必须遵循几何相似和进口条件相似。事实上要做到所有准则数相等是不可能的。模化技术的核心在于把握研究对象中的支配性作用。由此，根据实验条件及所述的气固受力分析，可作以下简化：

- (1)、流动过程稳定，均时性准则 Ho 不考虑；
- (2)、试验表明，几何条件相似时，气流流动达自模化后，湍流准则基本上也达自模化，如果此时，颗粒处于同一阻力区，即 k 相等，则气流脉动对颗粒的影响亦可近似得到相似；
- (3)、若能满足进口条件相似，则 $\frac{v_P}{v_g}$ ， μ ， n 三个准则能满足相等；
- (4)、准则 $\frac{\rho_P}{\rho_g}$ 在冷态模拟热态时很难得到满足，应通过气固受力分析进行近似模拟。



经以上简化，模化实验所需遵循的准则为：

$$Fr = \frac{gl}{v^2}$$

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad \text{或 } k = \text{常数}$$

$$St = \frac{\rho_P d_P^{1+k} v^k}{C_D \rho_g^{1-k} l \mu^k}$$

这相当于重点把握的相互作用为：气流与颗粒的重力，气流的粘性力，气流对颗粒的拖曳力。

但在实际中，要使Fr，Re和St达到完全相等仍然有一定的困难。而且颗粒的性质也不能绝对保证达到严格的模化条件。实验中，用粒度分布较完整的煤粉代替了不易获得完整分布的灰进行试验。对模型实施了近似模化，就是保证主要的准则数有相当的量级。



11.2 研究进程必须有完整而详细的规划

- 一. 在充分调研以前的类似研究的情况下，确定一个完整而详细的时间计划表。
- 二. 对整个研究过程的工作量，涉及的仪器、场地、条件、人力、资金、社会关系问题必须要有清楚的认识。
- 三. 对研究对象必须有清晰的思路：想得到什么样的信息？证明或否定什么？想得到什么计算公式或方法？推广的范围有多大？前人做了多少工作（我不应重复，或必须重复其中的一部分）？前人的工作还有什么不足以至于不能解决我面临的问题？我通过什么办法了解我想知道的问题？
- 四. 对研究过程中可能出现的困难必须要有足够的认识和准备，做好最坏结果出现的打算。对各种想象得到的困难制订处理预案。



11.3 测量手段的选取

- 必须是能够保证得到充分使用的仪器。
- 应该有一定的使用经验。
- 对其原理应该有充分的认识，从而对其可能产生的误差甚至错误有足够的认识。最好能定量计算或估算其误差。



11.4 系统的建造与调试

- 往往是研究周期中用时最长、困难最多的环节。涉及资金、场地、人力、市场供应、社会关系等多个环节。
- 必须首先合理确定实验系统的规模，然后进行动力设备的合理选取。
- 必须有充分的试运行过程，完全消除妨碍稳定运行的因素。



11.5 工况的设计与数据的分析与处理

- 必须设计完整合理的测量项目，以保证收集到足够达到目标的数据。因此，在建造系统之前，就应该在计划中有了完整的数据收集计划和数学处理的路线。由此设计测孔、测量项目，还设计动力设备、测量仪器的选取。
- 工况覆盖范围选取的原则：在工程应用范围上扩大。
- 工况个数（测点个数）的选取：按单个工况（测点）的操作时间和总操作时间来确定。