

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 13 集

(水力学)

水利电力出版社

内 容 提 要

本集为水利水电科学研究院水力学所近年来科学研究论文选集，主要包括：掺气水流浓度与速度的量测方法；泄水建筑物局部突体初生空穴数；门槽水流空化特性及快速闸门动水下降的水力学问题；水锤计算；地震激起水体表面波的壅高分析及海中圆柱的波浪特性；水库滑坡涌浪和波浪对坝面的作用；平流冲刷坑速度场的分析计算和高铝水泥胶砂模拟岩基冲刷；宽尾墩和窄缝式消能工以及水跃前部几种型式消力墩的空化特性等十五篇论文。

本论文集可供从事水利水电工程科研、设计、施工、运行人员和大专院校有关专业师生参考。

中国科学院 水利水电科学研究院
水利电力部

科学研究论文集

第 13 集

（水力学）

*

水利电力出版社出版

（北京德胜门外六铺炕）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17 印张 386 千字

1983年2月第一版 1983年2月北京第一次印刷

印数0001—2750册 定价1.80元

书号15143·5047

目 录

自然掺气水流浓度和速度量测方法的试验研究

.....	时启燧 郭志杰 黄荣彬 陈炳新 林秉南	(1)
泄水建筑物局部突体初生空化数试验研究.....	刘长庚	(36)
门槽水流空化特性的研究.....	金泰来 刘长庚 刘孝梅	(57)
快速闸门动水下降某些水力学问题的分析.....	谢省宗	(79)
水电站水锤计算研究.....	肖天铎	(95)
地震激起水体表面波的壅高分析	倪浩清	(114)
钻井平台圆柱体上波浪作用力的现场试验	倪浩清 周 胜	(128)
密云水库九松山副坝风浪要素及坝坡波浪压力的原型观测	陈志达 周 胜	(142)
水库库岸滑坡激起涌浪的试验研究	黄种为 董兴林	(157)
平流冲刷坑速度场的分析计算	董兴林 潘德嘉	(171)
用高铝水泥胶砂模拟岩基冲刷	朱荣林 陈秀瑜 徐国藩 严 振	(183)
宽尾墩挑流式消能工若干特性的研究	刘树坤	(192)
窄缝式消能工的消能特性和体形研究	高季章	(213)
水跃前部几种型式消力墩的空化特性研究	靳国厚	(237)
过溢流坝的流量和流场的有限元法计算	胡惠良	(255)

自然掺气水流浓度和速度 量测方法的试验研究*

时启燧 郭志杰 黄荣彬 陈炳新 林秉南

【提要】 自然掺气水流中浓度和速度的量测方法,是研究水流掺气现象的前提条件。本文首先采用取样器与毕托管联用的方法,并通过实验研究了它们的工作特性,给出了必要的修正系数;其次,建立电阻式浓度仪与毕托管的联用系统,验证了电测原理的合理性,实现了快速量测;第三,进行了一系列的实测验证,证明了上述方法给出的结果是可靠的。

一、概 述

随着高坝建设的发展,高速水流问题日益引起人们的重视。高速水流掺气现象是其中一个重要课题。因为:第一,水流掺气以后体积膨胀,导致水深增加,明流泄洪隧洞的直径必须相应加大,此即所谓“明流隧洞余幅”问题。第二,人为使水流掺气可以减轻或避免过水建筑物遭受空蚀破坏,此即所谓“通气减蚀”课题。第三,利用水流掺气来促进消能,如各种挑流消能方式,已成为重要手段之一。另外,掺气水流包含气、水两相,在学科上属多相流体力学的一个分支,研究气、水两相的掺混机理,在学科上有一定实用意义。

掺气现象起因于高雷诺数水流的强烈紊动,一般说来只有工程原体才会产生真实的自然掺气水流,因此,有人主张从原体观测着手, Hall^[1]是最早进行明渠掺气水流原体观测的人。但是,原体观测条件不易控制,限于仪器、设备和观测手段、人力物力耗费较大,为此,通过室内试验探索水流掺气规律仍是不可忽视的重要一环。最早进行掺气现象室内试验的当推 Ehrenberger^[2] (1926年)。之后,由于二次大战的影响,这方面的研究停顿了一段时期。战后,法国 Halbronn^[3,4] 美国 Straub^[5~8]、意大利 Viparelli^[9~12] 和苏联 Разумовская^[13] 等人先后建制了为掺气水流室内试验用的陡槽设备,研制了量测仪器。但就已发表的文章看,这方面的工作还只是初步的。影响工作进展的主要原因在于施测手段不完备,因此有必要对量测方法进行专门的研究。

鉴于高速掺气水流是两相非均质流体,除须了解速度场外,尚须研究相应的浓度场;由于同时存生着动量输移和质量输移,要求能同步地测量其速度和浓度;并要求除各量的时均特性外,还要了解其脉动特性(速度、浓度、压力……的脉动)。所以,就高速水流

*参加试验研究工作的还有姜凯、龚振耀、宋保卿和童世增同志。

掺气专题研究来说,施测手段就是研究工作本身不可缺少的一部分。

我所60年代初期开始进行掺气水流量测方法的研究,建制了掺气陡槽,并在掺气陡槽中进行了较系统的研究工作。本文主要介绍用取样法和电测法量测掺气水流的浓度和用毕托管测量速度的方法。其中利用取样法标定电测仪器是主要目的。同时,采用毕托管与取样器联用、联解、从而得到掺气水流中速度和浓度的对应分布资料,为探索水流掺气机理提供较完整的时均数据,是研究的另一目的。

二、掺气水流浓度的量测方法——取样法

在掺气水流中的应用

(一) 掺气浓度量测方法

1. 水面线法

测定水流掺气后的平均水面高程(边墙水面线),并与清水水深相比,换算得断面平均掺气浓度 $\bar{c}$ 。过去原型观测多用此法^[1,14]。由于掺气水面强烈地随机波动,很难用目测准确判定其平均位置,而且边墙水尺读数也包含了边墙壅高的影响,故这种方法比较粗放。

2. 测压管法

在边墙装设测压管测取沿水深的压力分布,并与不掺气水流的静水压力分布相对照,从而求得沿水深的浓度分布。

3. 同位素法

五十年代及六十年代初期,许多人应用同位素(γ 射线)来量测两相流的浓度。其能量衰减规律如下式

$$E = E_0 e^{-\mu \rho \delta} \quad (1)$$

式中 E_0 —— γ 射线具有的强度;

E ——衰减后的强度;

δ, ρ, μ ——分别为所穿过的介质层的厚度、密度和吸收系数。

根据所测密度 ρ 而换算得介质层的平均掺气浓度。上式表明:能量衰减与速度无关,是此法的优点。但是,它只能被用来测取沿射线的平均掺气浓度,而且放射性污染的保护,限制了它的广泛应用。

4. 取样法

在含砂水流等两相流领域,广泛使用取样法测取水流中悬移质的浓度^[15],而在气水两相流中,最早采用取样法测取水流掺气浓度的应推Delapp^[16]。取样法虽然设备繁笨,但它是最基本的方法,可作为标定其它浓度仪的手段,具有其独特的意义。

5. 电测法

鉴于水气两相导电率不同,可用两电极间电阻值的变化来推算测点的气水比。这方面Lamb^[17]的工作给人以有益的启示,其理论依据是Maxwell关于多相介质的电导理论^[18]。电测法的主要优点是设备简单、施测迅速、并可反映瞬时浓度脉动。

电测和取样是目前普遍应用的量测水流掺气浓度的手段, 它们的共同缺点是需将测器置入流场, 因而扰动了原状水流, 甚至导致气水分离, 使量测结果失真; 在高速水流中要固定测器往往亦是个难题, 从发展角度看, 应着眼去研究无接触量测技术。

(二) 掺气水流取样法的基本条件

综观现有掺气浓度取样器, 按其取样的方式可分为四类: ①自流式取样器; ②唧筒式取样器; ③虹吸式取样器; ④机械式取样器。

取样法的三个基本要求: ①应有外加吸取力, 以使取样速度等于来流速度, 这样才能保证原状水流不致因外加干扰而严重分离, 导致样品失真; ②取样头的形状、尺寸应设计合理, 以使置入流场时, 对原状水流的扰动最小; ③取样历时要大于测点浓度的变动周期, 使所得样品能反映来流的平均特性。

在上列形式中Дмитриев^[10]设计的取样器是虹吸式的代表, 而Delapp^[16]所采用的装置是机械式的代表。机械式取样装置有其独特的特点: 它可以任意调节作用在取样嘴的吸取力以控制取样速度, 并且还能保持均衡的连续取样, 任意选择取样时段。特别是 Delapp 的取样系统, 在取样嘴前端等间距地设置了三个测孔做为控制取样速度的指标, 给了我们很大的启示。

(三) 取样系统的设计及运用经验

1. 取样设备

按照取样法的三个基本要求, 参照 Delapp 的系统, 我们设计并建制了成套的取样设备, 见图 1。全套设备按其工作职能划分为吸取、控制、分离和量测三部分。

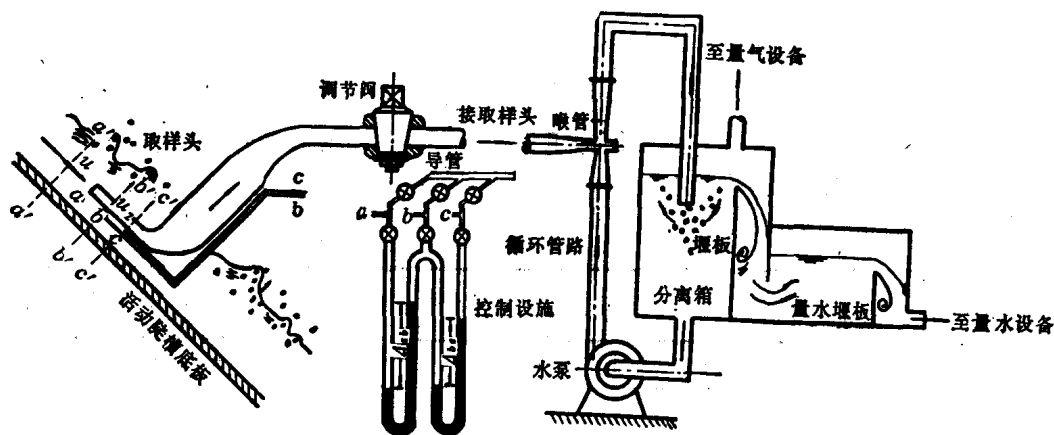


图 1 取样设备工作原理图

(1) 吸取系统 包括取样头、喉管、水泵、循环管路及连接取样头和喉管的导管。取样头的形式尺寸见图 2 及表 1, 它是根据陡槽水流尺度(水深, 水团或气泡直径)而设计的。喉管按射流泵原理设计, 是产生负压形成吸取力的主要部件, 经多次改进而定型的体型尺寸如图 3。

(2) 控制系统 包括控制设施及调节阀。控制设施如图 1。测点 a 设于取样嘴旁的静压测管上, 位置与取样嘴平齐。b、c 是在取样嘴内由进口边缘计起等间距($L_{ab}=L_{bc}$)

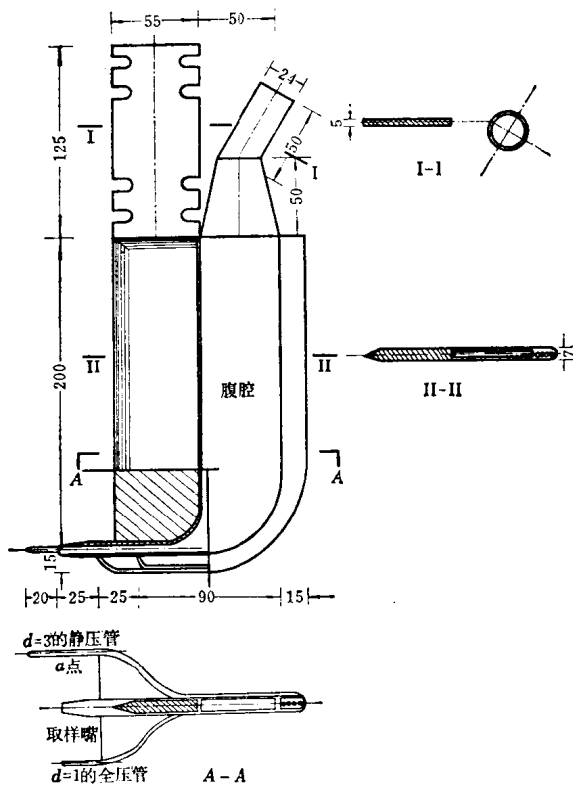


图 2 取样头

设置的二个测孔。当取样器工作时， a 、 b 两点间的测压管水头差 Δ_{ab} 包含了管嘴进口局部水头损失及内外速度水头的变差，还包含 ab 段的沿程损失，与此同时， b 、 c 两点间的压差 Δ_{bc} 只反映 bc 段的沿程损失。如果不考虑管嘴进口边界层的发展及样品浓度分布不均匀等因素，则 Δ_{ab}/Δ_{bc} 可用来反映取样速度与来流速度之比。其函数关系可写为

$$\Delta_{ab}/\Delta_{bc} = f(u_s/u, \beta_s/\beta, \xi_{进口}, \xi_{沿程}) \quad (2)$$

此关系称“取样器工作特性”； Δ_{ab}/Δ_{bc} 称“控制指标”；式中 β, u 为来流含水和速度， β_s 和 u_s 为攫取样品的含水和速度。

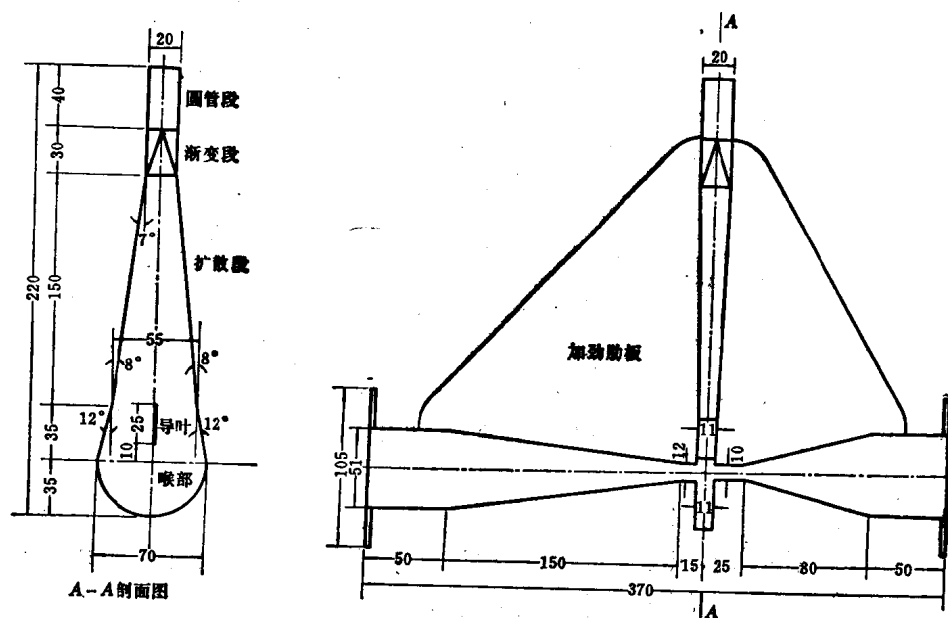
由于 a 、 b 、 c 三点所测是气水两相流中的压力，为此须有倒灌水排气设施，并在测压系统增加阻尼，以保证传递液体的连续和稳定。

控制指标靠调节阀（图 1）来调节。

（3）分离和量测系统 包括能使样品中气水分离的分离箱，量测水流量的三角堰及量测气流量的集气筒（图 4）。集气筒的工作原理即常用的排水取气法，可用于测读微小气量，有较高的精度，并可借抽气泵使整个取样系统处于相对稳定的动平衡状态，即抽气

表 1 取 样 头 尺 寸

本 文 使 用 的 取 样 头					DeLapp ^[16] 使用的取样头
编 号	B^*	D^*	F^*	G^*	$D_s = 0.541$ 厘米 (0.213")
管内径 D_s (厘米)	0.58	0.70	0.61	0.50	
进口面积 ω (厘米 ²)	0.264	0.385	0.292	0.192	
b , c 开孔 位 置	顶 部	底 部	底 部	底 部	
$L_{ab} = L_{bc}$ (厘米)	4.0	3.5	3.0	2.5	
$(\Delta_1/\Delta_2)_{kp}$ 清水中	1.3	2.3	1.2	—	



量恰等于分离箱的来气量，筒内水面维持不变，这样可在任意时候关闭抽气阀进行取样。取样设备的总体布置参见图 5。

2. 取样设备工作原理

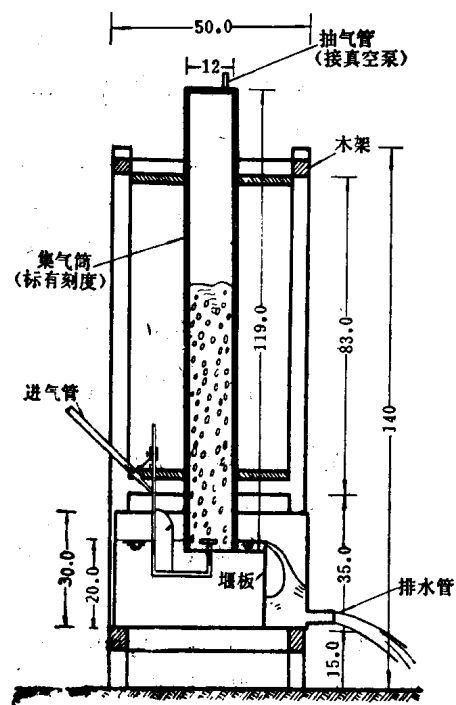
试验前，先将分离箱充水，启动水泵后，水体经分离箱、循环管路自成一封闭循环系统。这时喉管产生负压。打开调节阀后，气水混合物样品则通过取样头被吸入喉管，汇入循环管路，最后导入分离箱。样品在箱内分离为水和气，水体从箱内溢流堰板溢出淹没底孔，泄至箱外，由量水堰板测定其流量；析出的气体由导管引至量气设备。

取样速度由调节阀控制，按控制指标 $(4_{ab}/4_{bc})$ 的要求取样。

整个取样系统工作起来是连续、均衡的，搜来的样品在分离箱内连续分离，经测水、测气设备而外逸。这样可以较方便地截取取样时段，测得样品中含有的水量及气量的稳定、平均值，进而利用下式计算出测点浓度

$$\beta = \frac{V_w}{V_w + V_a} \approx \frac{Q_w}{Q_w + Q_a} \text{ (含水量)}$$

$$c = 1 - \beta = \frac{V_a}{V_w + V_a} \approx \frac{Q_a}{Q_w + Q_a} \text{ (掺气浓度)}$$



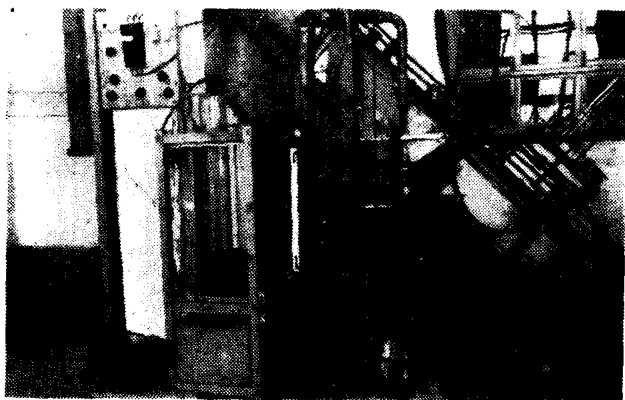


图5 取样设备总体布置

(四) 掺气浓度取样器在清水中的工作特性

把取样器用于不掺气水流(清水)中,研究其工作特性。设来流速度为 u , 取样速度为 u_s (参见图1), 列出 a 、 b 、 c 三断面的能量方程为

$$\frac{u^2}{2g} + \frac{p_a}{\gamma} = \frac{u_s^2}{2g} + \frac{p_b}{\gamma} + (\xi_{进口} + \xi_{ab沿程}) \frac{u_s^2}{2g} = \frac{u_s^2}{2g} + \frac{p_c}{\gamma} + (\xi_{进口} + \xi_{ac沿程}) \frac{u_s^2}{2g} \quad (4)$$

若 $\xi_{ac沿程} = 2\xi_{ab沿程} = 2\xi_{沿程}$

$$\text{则 } \frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{bc}} = \left(\frac{p_a - p_b}{\gamma} \right) / \left(\frac{p_b - p_c}{\gamma} \right) = 1 + \frac{1}{\xi_{沿程}} \left[1 + \xi_{进口} - \left(\frac{u}{u_s} \right)^2 \right] \quad (5)$$

上式表明, 控制指标 Δ_{ab}/Δ_{bc} 是损失系数与速度比的函数。当 $u_s = u$ 时得临界指标

$$\left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right)_{kp} = \left(\frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{bc}} \right)_{u_s = u} = \left(1 + \frac{\xi_{进口}}{\xi_{沿程}} \right) \geq 1 \quad (6)$$

$$\text{所以, 当 } u_s > u \text{ 时, } \frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{bc}} > \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right)_{kp} \quad \left. \begin{array}{l} \\ u_s < u \text{ 时, } \frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{bc}} < \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right)_{kp} \end{array} \right\} \quad (7)$$

上述关系已为清水试验所证实, 如图6所示。对于某一具体取样头, 速度比 (u_s/u) 与控制指标 $(\Delta_{ab}/\Delta_{bc})$ 之间的标定关系是肯定的。其中, 来流速度 u 用经过标定的小型毕托管量测, 取样速度 u_s 可由单位时间通过取样咀单位面积的水量表示, 即

$$u_s = Q_w / \omega_j \quad (8)$$

就图6所示“在清水中的工作特性”说明如下:

(1) 当 $u_s/u = 1$ 时, D^* 取样头的临界指标 $(\Delta_1/\Delta_2)_{kp, D} = 2.3$, 其他编号取样头的临界指标则在1.2~1.7之间, 这是由于制造因素, 使损失系数之比 $(\xi_{进口}/\xi_{沿程})$ 不同之故。对于各个取样头应逐个进行标定。

另外, 临界指标中包括了进口边界层发展的影响。为此, 曾据Солодкин^[20]对圆管进口段紊动边界层的发展及沿程阻力系数的研究结果进行了估算, 如仅考虑边界层发展的两段水头损失之比, 约为 $(\Delta_{ab}/\Delta_{bc})_1 \approx 0.38$ 。

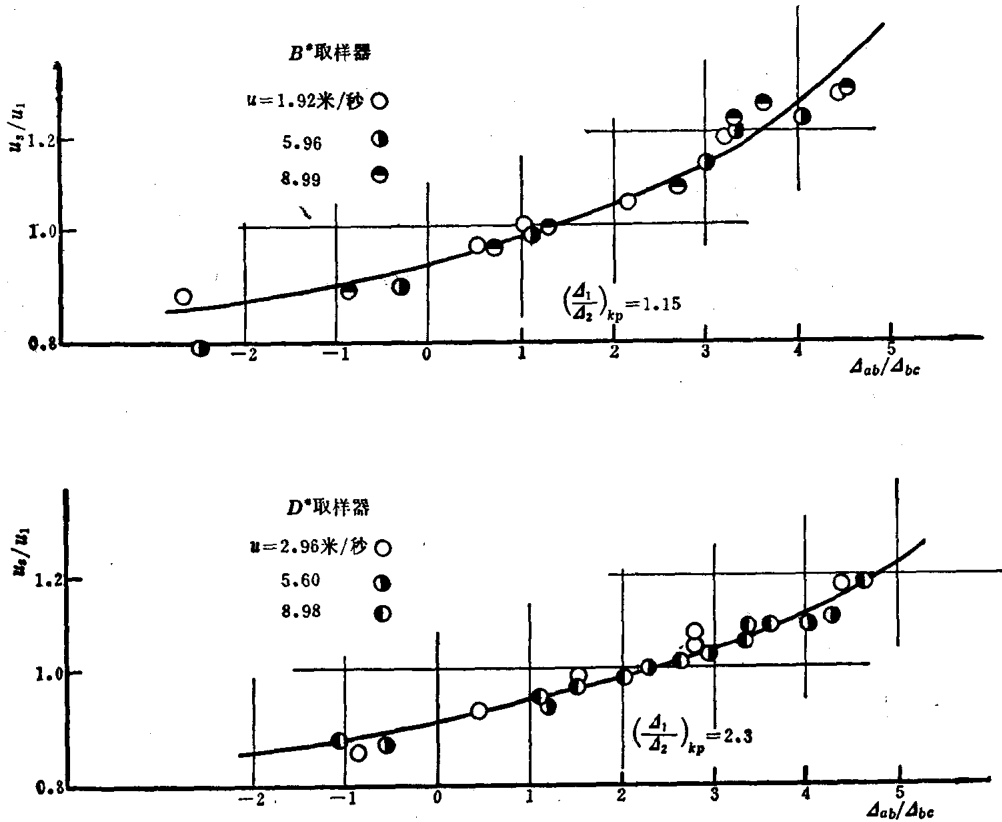


图 6 取样器在清水中的工作特性

(2) 临界指标的物理背景可由下述试验阐明。把取样嘴放置在水面附近，使之刚刚淹没，然后启动取样系统，若 $\frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{bo}} < \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2}\right)_{kp}$ ，则见取样头附近水花四溅，流态紊乱；而 $\frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{bo}} \geq \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2}\right)_{kp}$ 时，则流态平顺。表明取样指标等于临界指标时， $u_s = u$ ，来流水体被取样嘴吸入，在取样嘴附近没有发现绕流、分离现象。

(3) 清水标定结果还给出一个有利的论据，即当控制指标发生较大偏差时，导致速度的偏差程度却不大。以 D* 取样头为例，当控制指标 $(\Delta_{ab}/\Delta_{bo})$ 变化从 1.3 到 2.3 时，相应速度比 (u_s/u) 的变差仅为 0.94~1.06。实际操作时按临界指标要求控制 Δ_{ab}/Δ_{bo} 变差在 10% 之内是完全能办到的，这样取样速度的变差很小。

(五) 掺气浓度取样器在掺气水流中的工作特性

取样器用于掺气水流中必须考虑密度（或掺气浓度）的因素，这时与式（4）相应的能量方程，可写为

$$\begin{aligned} \frac{\rho u^2}{2} + p_a &= \frac{\rho_s u_s^2}{2} + p_b + (\xi_{进口} + \xi_{ab沿程}) \frac{\rho_s u_s^2}{2} \\ &= \frac{\rho_s u_s^2}{2} + p_b + (\xi_{进口} + \xi_{ab沿程}) \frac{\rho_s u_s^2}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

于是有
$$\frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{bc}} = 1 + \frac{1}{\xi_{沿程}} \left[1 + \xi_{进口} - \frac{\rho}{\rho_s} \left(\frac{u}{u_s} \right)^2 \right] \quad (10)$$

掺气水流的密度 $\rho = \beta\rho_w + c\rho_a = \left(1 + \frac{c\rho_a}{\beta\rho_w} \right) \beta\rho_w \approx \beta\rho_w \quad (11)$

则密度比等于浓度比 $\rho/\rho_s = \beta/\beta_s \quad (12)$

上式是式(2)函数关系的具体形式,而式(5)只是 $\beta/\beta_s = 1$ 的特殊情况。

在掺气水流中标定取样器较之在清水中要复杂的多。

在掺气浓度较低的水相连续区取样,改变不同控制指标来攫取水样和气样,随着指标 Δ_{ab}/Δ_{bc} 值的的增长,水量增长较慢而气量增长较快,在 $\frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{bc}} = \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right)_{kp}$ 附近水量增长率发生突变,如图7。这是由于取样嘴进口附近的绕流形态,随着指标 Δ_{ab}/Δ_{bc} 的由小到大,从 $u_s < u$ 的“扩散状”,渐渐转变为 $u_s \geq u$ 的“收缩状”,如图8。与此同时,气量的增

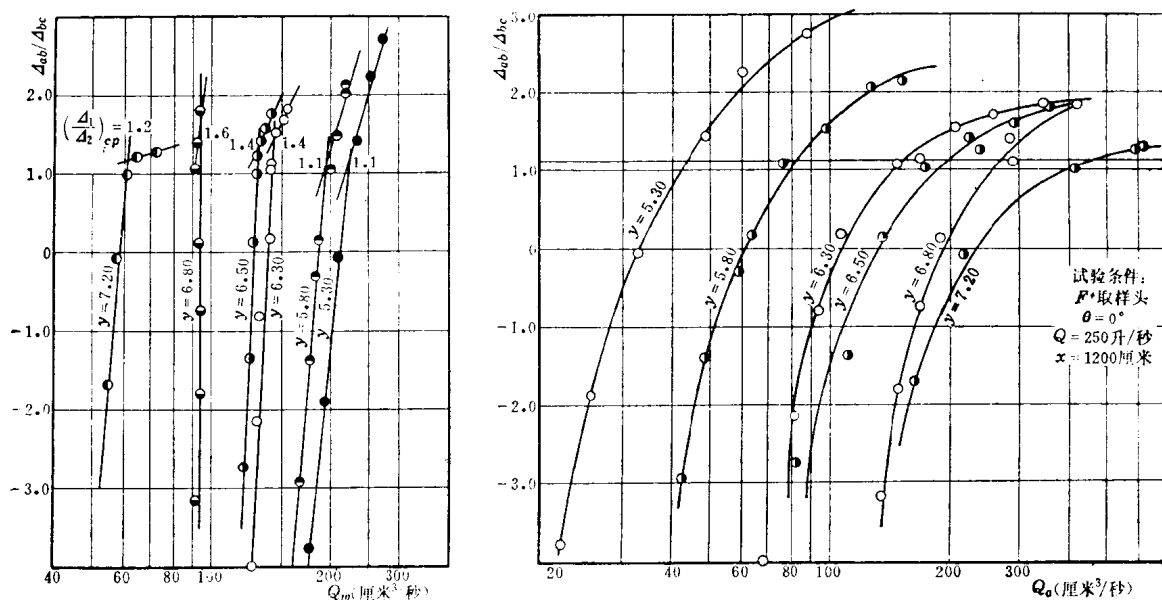


图7 水样(Q_w)和气样(Q_g)随控制指标 Δ_{ab}/Δ_{bc} 的变化

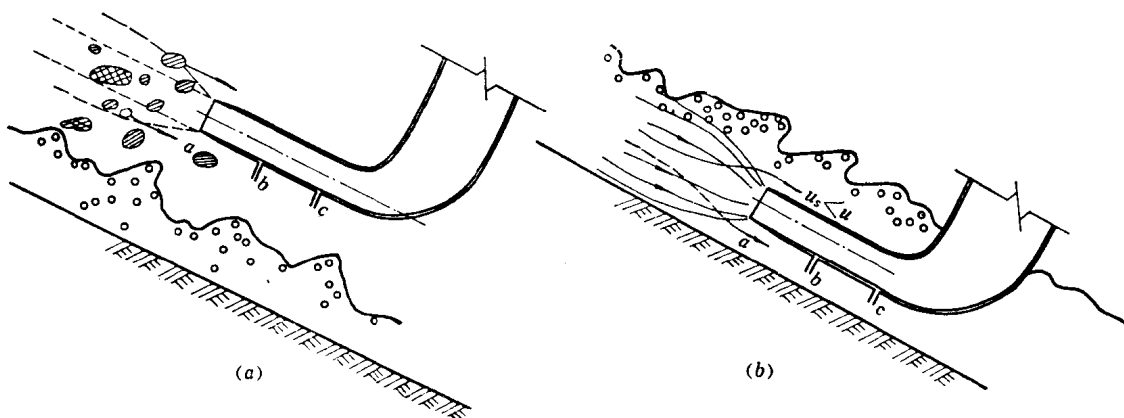


图8 取样器在掺气水流中工作形态

(a)水相不连续区(跃移区)取样时绕流形态;(b)水相连续区(悬移区)取样时绕流形态

长虽然不象水量那样有截然的变化,而在 $\frac{A_{ab}}{A_{bo}} > \left(\frac{A_1}{A_2}\right)_{kp}$ 后,亦有加快的趋势。图7表明,当取样速度不等于来流速度时,使气相加速比水相要容易得多,这时由于流线不平顺而有偏转,则气水两相产生了分离。但即使产生了分离,而水量的变差却很小。如果,不考虑气样,而只着眼于水样,那么,按清水标定的临界指标 $\left(\frac{A_1}{A_2}\right)_{kp}$ 来控制,吸得的水样与原状来流可望一致。

在掺气水流中,由水量增长率突变而定出的临界指标值,与测点浓度的关系如表2。对于某一具体取样头指标与浓度的关系不明显,可近似当作常数,且与清水标定结果十分接近。例如, B* 取样头, <表2>给出 $\left(\frac{A_{ab}}{A_{bo}}\right)_{kp, B} = 0.95 \sim 1.5$, 而清水标定结果 $\left(\frac{A_1}{A_2}\right)_{kp, B} = 1.3$ (见表1),即使把它们视为同一数值,从而产生的取样速度偏差亦不会很大。

其次,在掺气浓度较高的水相不连续区取样,尽管指标 A_{ab}/A_{bo} 由小到大变化,但进入管嘴的水量只能是迎着取样嘴袭来的那一部分,即使加大吸取力仍不可能把四周跃移水团攫入;反之,尽管吸取力很小,但迎面袭来的水团亦会由于自身动能而冲入管嘴,储集起来,等到积水封堵通道,喉管负压因而提高后,遂即把储水全部攫走。所以在水相不连续区取样时,所得水量几乎不随指标大小而变。但是,为了攫取水量而控制一定指标时,所得气量却显然偏大很多,这时,不宜用式(3)计算含水度。

表 2 临界指标与测点浓度关系

	取 样 头 F*					取 样 头 B*					备 注
y(厘米)	5.30	5.80	6.30	6.50	6.80	1.50	3.80	5.50	6.00	6.50	y 为陡槽中垂线上距槽底的距离,它代表了来流浓度不同的各测点
$\left(\frac{A_{ab}}{A_{bo}}\right)_{kp}$	1.1	1.1	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.2	1.25	0.95	

(六) “舍气取水”, 取样器-毕托管联用法

从上述分析中自然联想到,如果取样法只取水样,而舍去气样,问题可大为简化。这时,只需按清水标定的临界指标 $\left(\frac{A_1}{A_2}\right)_{kp}$ 控制取样,即可得到所要的水样,并且可连续应用于整个掺气水流流场(包括水相连续和不连续区域)。此外,还可以省去量气设备,亦不必再耽心取样系统漏气而引起的气样失真;并且可缩短量测过程的平衡稳定时间,加快测读速度。

但是,只有水样换算不出测点浓度,必须将取样器与毕托管联用,如果能得到水相速度 u_w ,则测点含水度可写为

$$\beta = \frac{Q_w}{u_w \cdot \omega_f} = \frac{q_w}{u_w} \quad (13)$$

式中 $q_w = \frac{Q_w}{\omega_j}$, 即取样嘴单位面积通过的水流量。上式对于任何浓度的测点都成立。

下文《毕托管在掺气水流中的应用》一节给出水相速度的表达式为

$$u_w = K_1 \sqrt{\frac{K_2 2g \Delta h}{\beta}} \quad (14)$$

联解式(13)和(14), 即相当于将取样器与毕托管联用, 可得浓度与水相速度的表达式如下

$$u_w = \frac{K_1^2 K_2 2g \Delta h}{q_w} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{q_w^2}{K_1^2 K_2 2g \Delta h} \quad (16)$$

式中, 系数 K_1, K_2 见下文, Δh 为毕托管压差。

兹将用“舍气取水”法(或称联用法)标定得取样器工作特性与一般方法(同时取水、取气)标定的结果比较如下。

1. 速度特性

以取样头 F^* 为例, 先在清水中标定其工作特性, 得到临界控制指标 $\left(-\frac{\Delta_1}{\Delta_2}\right)_{kp, F^*}$; 然后, 置于某一定浓度的掺气水流测点, 控制指标 $\left(-\frac{\Delta_1}{\Delta_2}\right)_{kp, F^*}$ 攫取得水样 q_w ; 同时, 对同一测点用毕托管测取压差 Δh , 利用式(15)求得测点水相速度 u_w 。

对每一测点, 改变不同的取样指标, 得到相应的水样、气样 (Q_w, Q_a 或 q_w), 如取样速度按下式计算

$$u'_s = \frac{Q_w + Q_a}{\omega_j} \quad (17)$$

可得取样器工作特性如图 9(a), 呈一组曲线; 若取样速度按式

$$u_s = \frac{K_1^2 K_2 2g \Delta h}{q_w} \quad (18)$$

计算则有图 9(b) 工作特性, 呈一束曲线。

2. 浓度特性

仍以取样头 F^* 为例, 来流含水度 β 按式(16)计算。如果取样浓度 β_s 由式(3)计, 可得工作特性如图 10(a), 呈一组曲线; 如用式(16)计算所得样品含水度 β_s , 工作特性呈一束曲线, 如图 10(b)。

图 10(b) 即舍气取水法的取样器浓度特性。

图 9(b) 和图 10(b) 表明, 当 $\frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{bc}} = \left(-\frac{\Delta_1}{\Delta_2}\right)_{kp}$ 时, 即满足 $u_s = u_w$, 又满足 $\beta_s = \beta$ 的要求。但是, 随控制指标的偏差导致速度比 u_s/u_w 与浓度比 β_s/β 的变化率却不同, 而且与测点浓度有关。图中给出, 当指标 Δ_{ab}/Δ_{bc} 偏差不大于 10% 时, 取样浓度的偏差约在 3% 以内, 而取样速度的偏差仅 2% 左右。

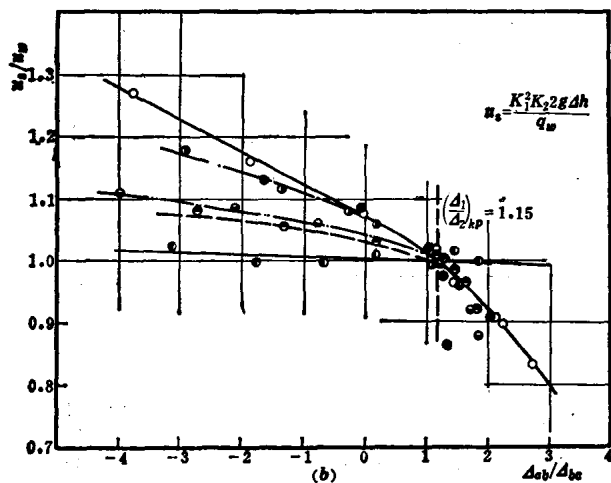
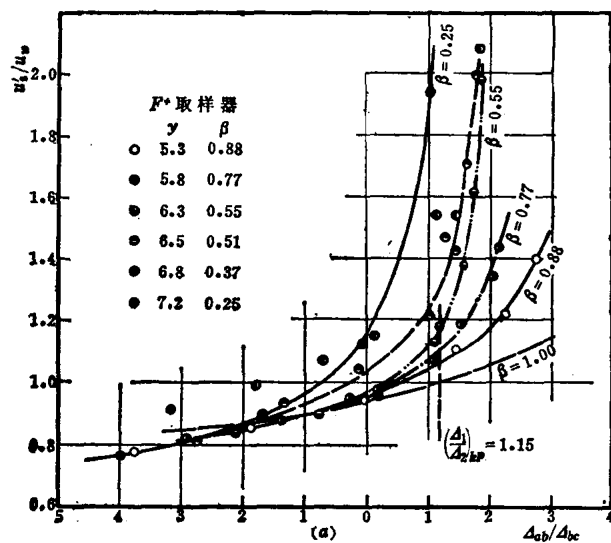


图 9 取样器速度特性图

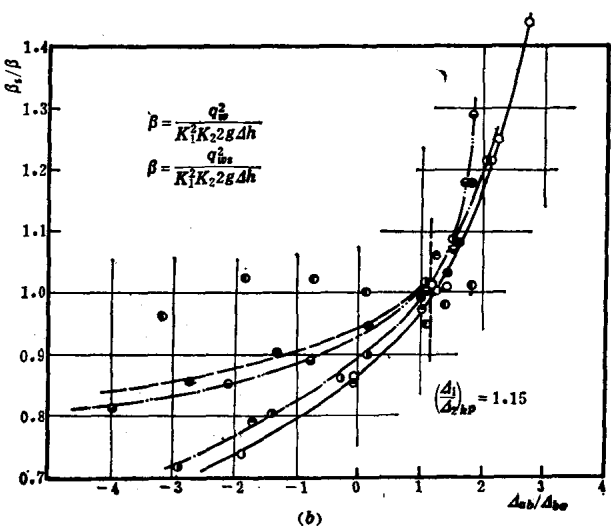
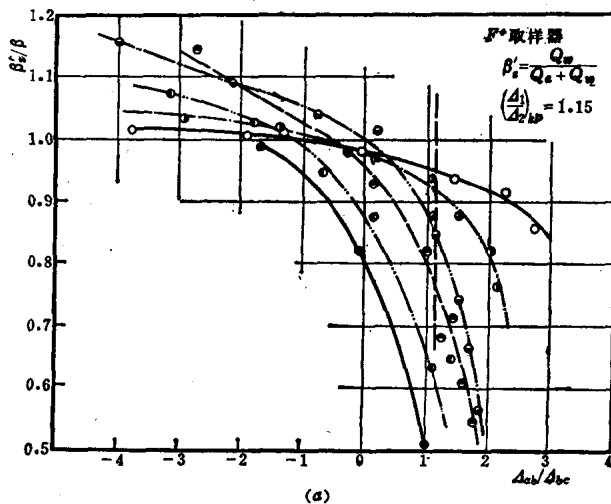


图 10 取样器浓度特性图

(七) 取样法用于掺气水流的两个重要概念

1. 水流掺气浓度的定义

通过取样实施看出，两相流中两相物质的相对滑移（亦称跟随性）问题，机制复杂，影响很大，虽然引入“舍气取水”概念后，只着眼于水相而不去研究气相如何？但习惯上各种不同定义的浓度常有混淆，因此有必要说明如下：

(1) 体积浓度 如式(3)，在取样法中应用最普遍。

$$\beta_v = \frac{V_w}{V_w + V_s}, \quad c_v = \frac{V_s}{V_w + V_s} \quad (3)'$$

(2) 流量浓度 按取样所得气、水样品的流量可以写出

$$\beta_q = \frac{q_w}{q_w + q_s}, \quad c_q = \frac{q_s}{q_w + q_s}$$

因为

$$\beta_q = \frac{q_w}{q_w + q_a} = \frac{u_w \cdot \omega_w}{u_w \omega_w + u_a \omega_a} = \frac{\beta_v}{\beta_v + c_v \left(\frac{u_a}{u_w} \right)}$$

则只有 $u_a/u_w=1$ 时, 流量浓度才与体积浓度一致见式(3)。

(3) 面积浓度 设取样嘴断面积为 ω , 其中气、水两相分别占 ω_a 和 ω_w , 且 $\omega_a + \omega_w = \omega$; 而且, 一般情况, 取样得水速 u_w 和风速 u_a 是不相等的。用取样嘴各相所占面积比给出

$$\beta_w = \frac{\omega_w}{\omega_w + \omega_a}, \quad c_w = \frac{\omega_a}{\omega_w + \omega_a} \quad (19)$$

因为

$$\beta_w = \frac{u_w \omega_w}{u_w \omega_w + \left(\frac{u_w}{u_a} \right) u_a \omega_a} = \frac{q_w}{q_w + \left(\frac{u_w}{u_a} \right) q_a}$$

亦是只有 $u_a/u_w=1$ 时, 面积浓度、流量浓度与体积浓度才完全一致。

(4) 时间浓度 从欧拉观点看, 空间任一位置, 或则为水占据或则为气充填, 二者必居其一, 而且气、水两相随时间交替变化, 由此引出“时间浓度”的定义式

$$\beta_t = \frac{\Sigma t_{wi}}{T}, \quad c_t = \frac{\Sigma t_{ai}}{T} \quad (20)$$

式中, Σt_{wi} , Σt_{ai} 分别表示在周期 T 时间内水相和气相占据的历时; $T = \Sigma t_{wi} + \Sigma t_{ai}$ 。因

$$\Sigma t_{wi} = \frac{\Sigma l_{wi}}{u_w}, \quad \Sigma t_{ai} = \frac{\Sigma l_{ai}}{u_a} \text{ 则有}$$

$$\beta_t = \frac{\Sigma t_{wi}}{T} = \frac{\Sigma l_{wi}/u_w}{\frac{\Sigma l_{wi}}{u_w} + \frac{\Sigma l_{ai}}{u_a}} = \frac{\beta_v}{\beta_v + \frac{u_w}{u_a} c_v} \quad (21)$$

只有当 $u_w/u_a=1$ 时, 时间浓度才与体积浓度一致。

以上分析表明: 只有气、水两相无相对滑移时, 上述各种定义的浓度值才会一致。实际上, 无论水中气泡或气中水团相对滑移是不可避免的, 严格地说, 上列各种定义浓度不宜混用。但是, 采用舍气取水系统, 并不涉及气相速度和流量 (u_a , q_a), 浓度值由式(16)决定, 这时, 即使引用时间浓度定义, 气相通过的时间 Σt_{ai} 亦是其前后水相速度

所决定, 即 $\Sigma t_{ai} = \frac{\Sigma l_{ai}}{u_w}$, 于是式(21)化为

$$\beta_t = \frac{\Sigma l_{wi}/u_w}{\frac{\Sigma l_{wi}}{u_w} + \frac{\Sigma l_{ai}}{u_w}} = \beta_v \quad (22)$$

本文采用体积浓度定义式(13), 用毕托管测速时引入了时间浓度概念, 在舍气取水系统中, 它们是一致的。

在固液两相流中, 常用重量比表示掺混物质的浓度(重量浓度), 但在两相密度相差悬殊的掺气水流中不宜采用它。

2. 取样历时的选取

为了探测测点浓度的脉动周期, 用电阻式浓度仪记录了浓度瞬态变化, 如图11。图示波形为测点浓度 $c=0.55$ 的情况, 传感器尺寸 $6 \times 6 \times 20$ 毫米与取样头尺寸相当。曾对 $c=$

0.20, 0.50和0.80的三个测点记录其浓度瞬态变化, 然后统计其按时间累计的平均浓度 $\bar{c} = \frac{\sum c(t)}{t}$ (%), 给出 $\bar{c}$ 与统计历时的关系如图12, 图中达到稳定值所需的累积时间约8~10秒。就室内陡槽试验条件, 取样历时大于15秒, 即可认为所得结果已趋近稳定平均值。至于原体水流, 取样历时还可缩短。

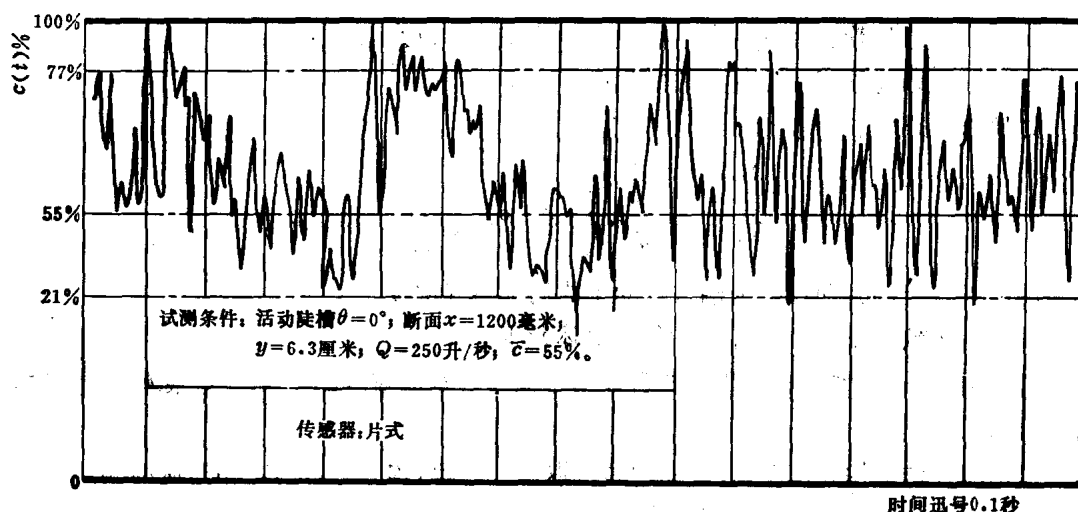


图 11 电测法记录的浓度脉动示波图

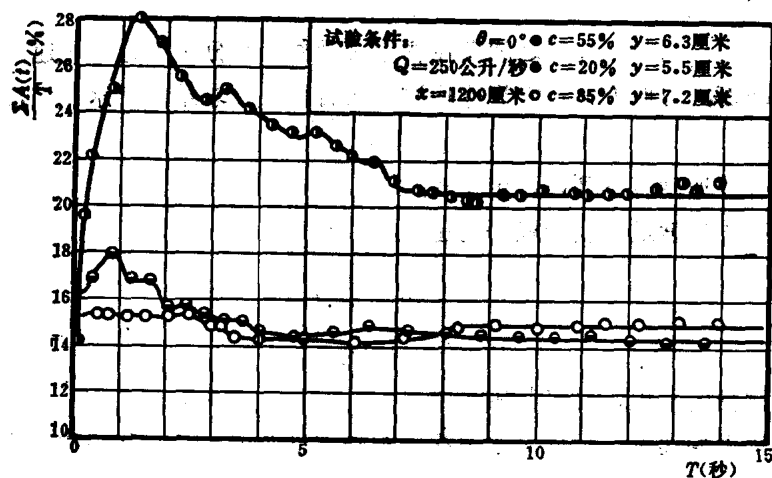


图 12 平均浓度与取样历时的关系

三、掺气水流速度的量测方法——毕托管在掺气水流中的应用

(一) 毕托管用于掺气水流的情况

毕托管是用来量测流体速度的古典测器, 它物理概念清晰, 使用可靠, 操作简便, 被

广泛应用于连续介质的测量。

1951年始,法国G.Halbronn^[3,4]用毕托管量测掺气水流的速度,并给出表达式

$$\left. \begin{aligned} P &= \gamma_w \cdot \Delta h \approx \gamma_w (1 - Kc) \frac{u_w^2}{2g} \\ u_w &= \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - Kc}} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式中 Δh ——毕托管在掺气水流中感应的动静压差,以米水柱表示;

K ——毕托管用于掺气水流时的修正系数。

文献[21]给出了类似关系式

$$\left. \begin{aligned} u_w &= K_0 \sqrt{2g\Delta h} \\ K_0 &= 1 + \frac{1}{2} C_a \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{U_a^2}{U_w^2} \right) (1 - K_1) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

C_a 为测器置入流场时动压孔前端被扰动了的局部掺气浓度。

但是,文献[4,21]未给出 K 和 K_0 的具体数据。

意大利M.Viparelli亦曾用毕托管作为量测掺气水流速度的手段,他根本未考虑掺气水流的修正^[10]。

采用取样法测掺气浓度,并建立“舍气取水”系统,须有一种与之相适应的测速手段,为此亦采用毕托管量测掺气水流的速度。

(二) 毕托管用于掺气水流的几个问题

1. “速度”的定义问题

掺气水流中,气、水两相物质之间存在着相对滑移,须分别考虑水相速度(u_w)和气相速度(u_a),然而,习惯上常把它视作均质流场看待,要求给出“水、气混合物的平均速度(u)”。

两相流的代表性速度有下列四种定义式:

(1) 算术平均速度或浓度加权平均速度:

$$u = \frac{1}{2} (u_w + u_a) \quad (25)$$

$$\text{或} \quad u = \beta u_w + c u_a \quad (26)$$

它们都要求同时测得 u_w 和 u_a ,是极其困难的。

(2) 混合物平均速度:把气、水两相流视作密度为 ρ ($\rho_a < \rho < \rho_w$)的均质流场,且

$$\rho = \beta \rho_w + c \rho_a \quad (27)$$

如果把测点动能的复杂变化,转化为等价的周期性脉冲(参见图13)。那么假想均质流场中测点动能的时间平均值为

$$\frac{\rho \bar{u}^2}{2} = \beta \frac{\rho_w \bar{u}_w^2}{2} + \bar{c} \frac{\rho_a \bar{u}_a^2}{2} \quad (28)$$

$$\bar{u} = \bar{u}_w \sqrt{\frac{1 + \frac{\bar{c}}{\beta} \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{\bar{u}_a}{\bar{u}_w} \right)^2}{1 + \frac{\bar{c}}{\beta} \frac{\rho_a}{\rho_w}}} \quad (29)$$