

水工建筑物中的掺气水流

Aerated Flow in Hydraulic Structures

〔美〕H.T.法尔维著 王显焕译

水利电力出版社

TV135
F01

水工建筑物中的掺气水流

〔美〕H.T.法尔维著 王显焕译

水利电力出版社

DUC40/12

内 容 提 要

本书根据美国已有的科研成果编写而成,可供设计人员使用,使科研成果能用于生产建设。在目前尚无掺气和通气问题方面的成熟计算方法的情况下,提出了有实用价值的系统建议。主要内容包括明渠水流中的气泡尺寸及上升速度,水流掺气起点及充分掺气的位置,含气量及空气分布,掺气对消力池运行的影响,封闭管道水流(部分充水管道水流、水跃阻塞管道水流、阀门及闸门出流、进水口闸门骤关时管道内的水流)通气孔设计准则及计算,抽水系统,竖井中气流,自由跌落水股掺气特性等。并附有平均含气量及闸门突关时需气量的电算程序。

水工建筑物中的掺气水流

[美]H.T.法尔维著 王显焕译

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

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 8印张 179千字

1984年8月第一版 1984年8月北京第一次印刷

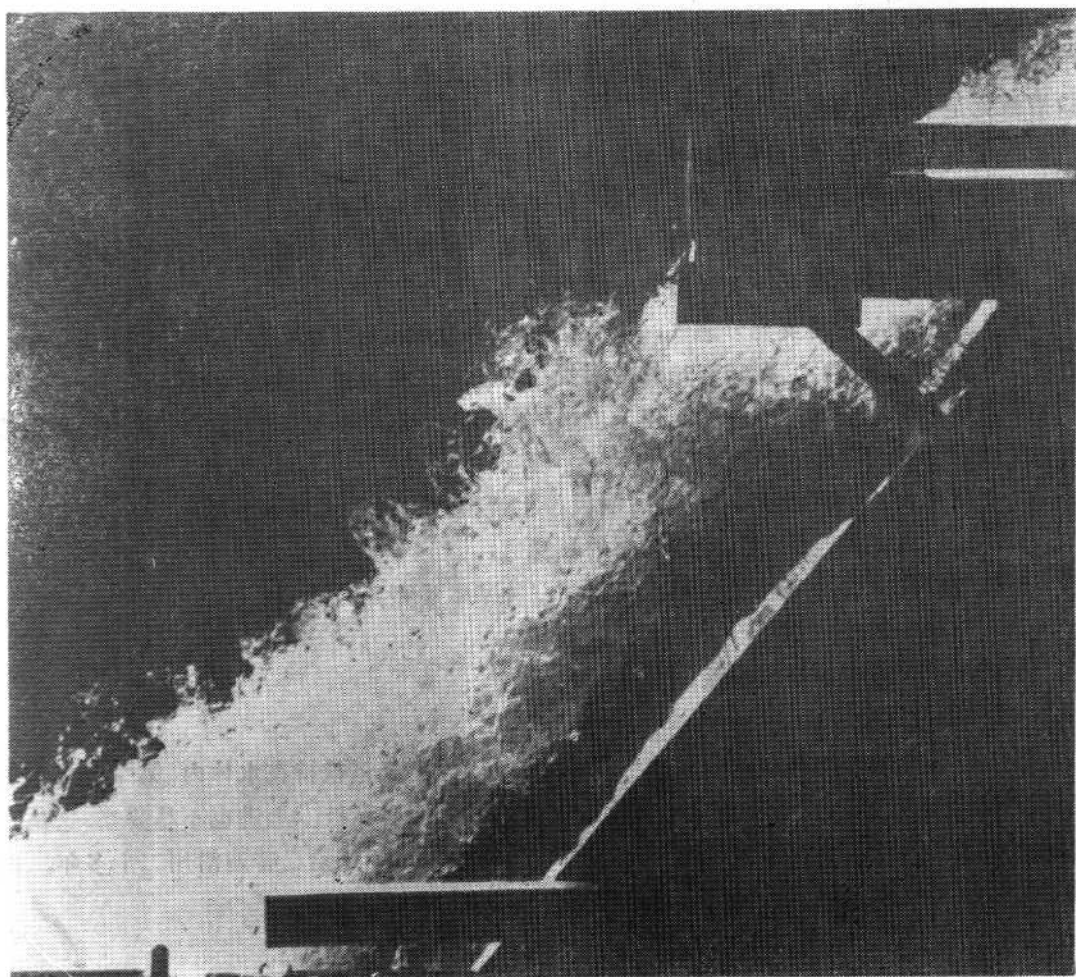
印数 0001—4690册 定价1.05元

书号 15143·5443

目 录

前 言	2
目的和应用	2
总结和结论	4
第一章 明渠水流	5
§ 1 导言	5
§ 2 气泡动力学	6
1. 静水中单个气泡的上升速度	6
2. 剪切流中气泡的尺寸	8
3. 紊流中气泡的上升速度	9
§ 3 水流的竖向结构和纵剖结构	10
§ 4 设计参数	12
1. 掺气起点的位置	12
2. 充分掺气水流的位置	15
3. 含气量纵剖	16
(1) 含气量定义	16
(2) 掺混区内的空气分布	17
(3) 下部区内的空气分布	18
(4) 平均含气量	19
4. 水面位置	24
5. 掺气水流对消力池运行的影响	29
第二章 封闭管道水流	30
§ 1 水流分类	30
§ 2 部分充水的管道水流	33
1. 模型试验	33
(1) 通气孔尚未设计好	34
(2) 通气孔已设计好	36
2. 解析计算	37
§ 3 水跃阻塞管道的水流	40
§ 4 控制设备的出流	43
1. 阀门出流	43
2. 闸门出流	47
§ 5 进水口闸门骤关时管道内的水流	47
§ 6 封闭管道的通气孔设计准则	50
1. 目的	50

2. 位置	50
3. 最大通气量	50
4. 结构方面的考虑	50
5. 生理方面的影响	50
6. 人员安全	51
7. 防冻	51
8. 气蚀破坏	51
9. 水流断裂	52
§ 7 管路通气孔设计准则	52
1. 导言	52
2. 自流管路	53
(1) 纵剖布置准则	53
(2) 平面布置准则	54
(3) 通气孔的位置	54
3. 抽水系统	54
4. 通气结构物设计方面的考虑	56
(1) 充水时排除空气	56
(2) 运行中排除空气	59
(3) 放空管路时防止管壁产生屈折	60
§ 8 竖井中气流	65
1. 气流分类	65
2. I区的气流量	67
3. II区的气流量	67
4. 竖井中的反向气流	68
5. 淹没	68
第三章 自由跌落水流	69
§ 1 水股特性	69
§ 2 水股周围的气流	71
§ 3 跌落水股进入水塘时的掺气特性	73
参考文献	73
附录	78
附录I 概率水位探测针	78
附录II 明流的平均含气量电算程序	79
附录III 进水口快速闸门突关时需气量电算程序	95
1. 导言	95
2. 接头处的能量方程	95
3. 水轮机特性	96
4. 原型的几何形状	98



首页照片（平板门下泄的高速水流）

前 言

在许多工程中，通过建筑物的水流会与附近的空气产生强烈的相互作用。这种相互作用有时能产生有益的后果，但更常遇到的情况非但无益，而且为消除这种坏作用所需的补救措施竟是十分昂贵的。

水流和空气产生相互作用的情况有：

- 1) 急流明渠，它需要足够的槽深来容纳掺有空气的水流；
- 2) 竖井式溢洪道，它须具有一定的宣泄能力来排泄设计洪水及其所挟持的空气；
- 3) 当流量较小时会挟持大量空气的竖井；
- 4) 量水堰，它需要充分通气，以免读数产生误差和消减水流的摆动；
- 5) 泄水孔闸门，它要求有足够的通气，以防止产生导致气蚀破坏的低压；
- 6) 压力管道进水口的快速闸门（或事故闸门），它要求足够的通气，以防止放空或快速关闭时管道内产生过低的负压；
- 7) 凹形管（倒虹吸管）*，它可能因产生“挟气回爆”而遭到破坏；
- 8) 需要设置排气阀和真空破坏阀的长管道。

从这些情况来看，可将挟气水流概括为三种基本类型：

- 1) 明渠中的挟气水流；
- 2) 封闭管道中的挟气水流；
- 3) 自由跌落水流。

第一种类型的水流通常就叫做挟气水流，这是因为空气系挟持在水体内。第二种基本类型通常指的是需气量。“需气量”一词既易导致误解，同时从技术上讲也不尽妥当。这是因为通气孔的通气量并不会大于一个全开阀门的流量。但这一术语已普遍沿用二十多年，再来改变它似无裨益。第三种类型指的也是挟气水流。

目 的 和 应 用

本书的目的系根据新近理论来总结对挟气和需气量所作的研究工作，并提出可供实用的成果范围。目的在于编写一本简明的参考资料，借以编制供专门用途的设计手册、诺谟图和计算图表。

* 倒虹吸管系指穿过低洼地或位于公路、铁路以及渠道下的管道。这一术语用得很普遍，但其含意并不确切。因其中并不产生虹吸作用。此处建议用凹形管比较达意，较为确切。参见1962年美国土木工程师学会“水力学分部”水工建筑物委员会所编的“水力学术语”。

虽然已有许多资料可以作出一般性结论，但实践中遇到的某些水流情况，仍只能借模型试验来进行个别研究。一旦出现这种情况时，在文中即予以指明。此外，在不少领域内仍须进行补充研究，其中迫切需要进一步研究的领域计有：

- 1) 紊动和含气量对气泡动力学的作用；
- 2) 自由水流正在发展掺气的流体动力学；
- 3) 水力特性和管道特性对用概率描述高速明流水面的影响；
- 4) 压力梯度对管道明流中气流的影响；
- 5) 管道坡度大于45度时管流中的气泡运动；
- 6) 泄水入管道的闸门和阀门，其周围压强对闸阀气蚀特性的影响；
- 7) 空气与自由跌落水流的相互作用。

总结和结论

对于明渠水流的平均含气量及其含气量分布,已获得预测方法。对于高速水流的自由水面,已提出一个新的描述方法,得以更为精确地阐明高速水流的实际情况。掺气对消力池工作的影响,可用“增胀水流”的概念来估计。一个电算程序已予提出,可用以估算陡槽及溢洪道的平均含气量(见附录II)。

除了进水口闸门骤关时管道内的水流情况外,其他封闭管道水流仍需进行模型研究。此时只要实验和分析恰当,模型实验可获得估算气流量的准确数据。试验方法已予讨论,并提出有估算进水口闸门骤关时的气流量的电算程序(见附录III)。对于管道上排气阀和真空破坏阀的尺寸,已提供有设计图表。

已发现竖井内的气流量与竖井进口的水流情况紧密相关。已提出估算各种不同竖井进水情况的气流量公式。

自由跌落水股四周气流量的影响因素已加以讨论,并指出这是一个仍待研究的课题。最后对抛射水股进入水塘时的掺气特性提出了关系式。

第一章 明渠水流

§1 导 言

当观察陡槽或溢洪道的水流时，人们通常会在水流进入陡槽或溢洪道的地方见到一段清澈的水流区。但再往下游某一距离，水流突然呈现乳白色。雷恩认为^[46]，当底面紊流

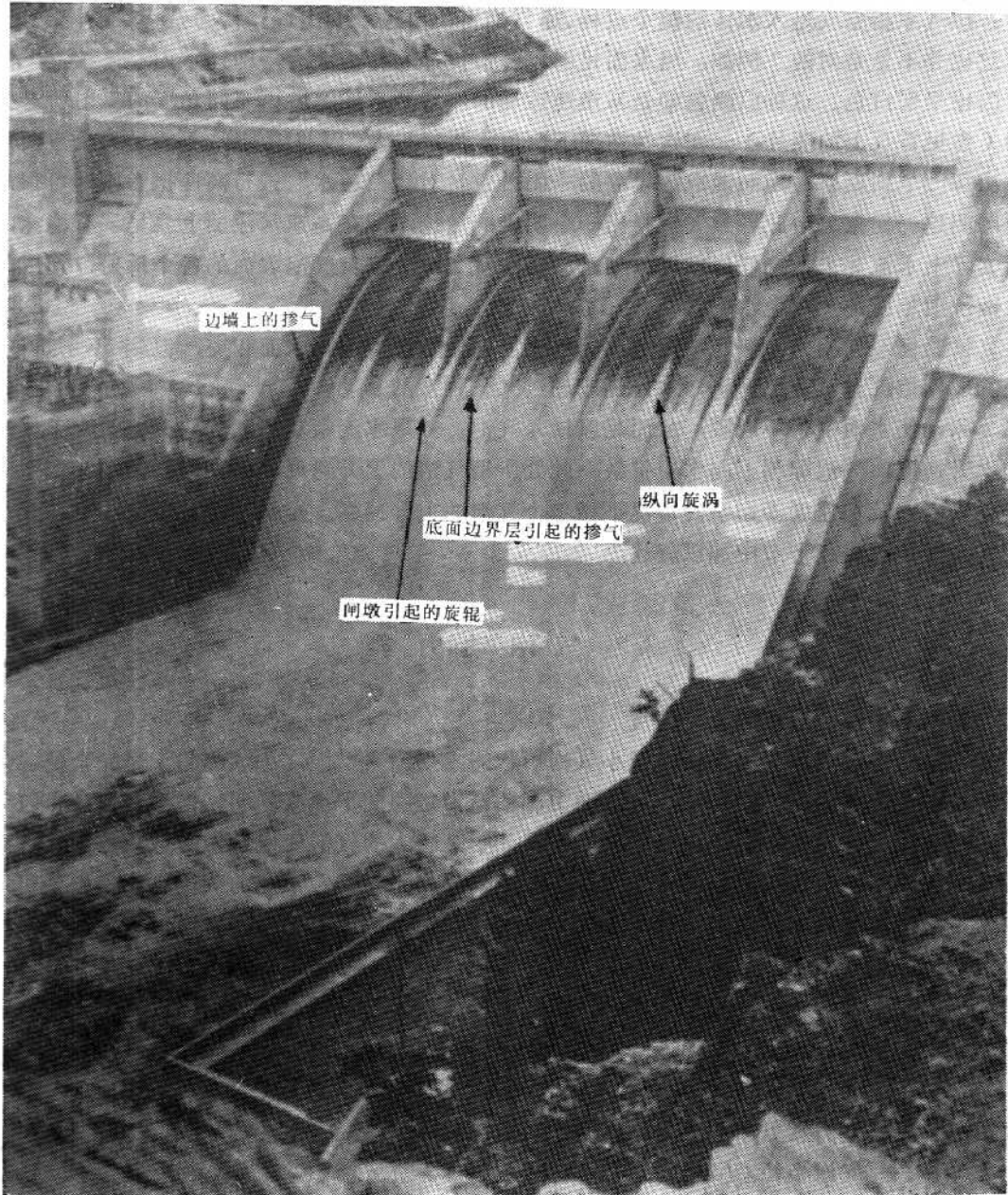


图 1 溢洪道中的掺气型式（美国蒙大拉州卡尼翁费里坝）

边界层与水面相交时即开始出现乳白色。这一假设的正确性曾为许多研究者所证实。这类由边界层引起的掺气情况,通常叫做自掺气水流。但这并不是陡槽和溢洪道内发生掺气的唯一方式。美国土木工程师学会明渠水流掺气课题委员会曾总结过陡槽侧墙的边界层引起水流掺气的试验。他们也报导过在溢洪道闸墩下游发生水流掺气的试验。后一掺气情况系由于水流通过闸墩孔口后水流扩散而本身产生旋涡所致。列威还报导过溢洪道水面上产生的纵向旋涡^[49]。这种旋涡一旦与水面相交即会产生掺气。所有这些水流掺气型式可从图1中明显看出。

掺气系指空气进入水体的整个过程,通常都将“白色水的出现”认为是掺气的同义语。但这也并不总是对的。例如,当水面足够粗糙而流速又相当大时,即使水内并未挟气,但水面也呈现白色。这种白颜色却是从迅速运动的不规则水面上,由不同角度的反射所产生的(参见首页上的照片)。在这种情况下,由于流速很大,人们的眼睛不能迅速反应而察觉出每一个别反射,因而混成为模糊的一团白色。对“白色水”进行高速摄影,即可很好地阐明这一现象。由此导致人们得出一个明确的结论,即在高速水流面上系呈现有泡沫,而实际上水流并未挟持任何空气。当水中存在空气时,来自气泡表面的各个反射,形成与水面反射相同的“白色水现象”。

试验已经证明,平缓底坡渠道内的水流,即使其边界层与水面相交,但并不挟持空气。要使掺气过程开始发生,水流还应超过某一程度的紊动。

紊动使水面变得不规则,从而足以挟入气泡。如果水流紊动引起的向下流速大于气泡的上升速度,气泡即朝下向水中扩散。此处所谓气泡的上升速度,系在略去紊动、侧壁、其他气泡以及加速度等影响的情况下指单个气泡的上升速度。至于气泡的上升速度与紊动的相互作用,将在下节中加以叙述。

§2 气泡动力学

1. 静水中单个气泡的上升速度

在静水中,表面张力是影响微小气泡形状的主要因素。因之小气泡趋于呈完全的球体状。这些气泡在水流中的运动,可用浮力和粘滞力之间的平衡来阐明。但当气泡变得较大时,表面张力作用较之剪切力就相对地小了。于是较大的气泡变成近似为包角约100度而接近平底的不稳定的瓜皮帽形(图2)。因不同的作用支配着不同的气泡直径,于是可以设想气泡尺寸与其上升速度之关系是随着气泡直径而异的。哈伯曼和摩通^[26]曾用试验得出上升速度是气泡尺寸的函数(图3)。

今假定气泡为一刚性气体,则小气泡的上升速度为

$$V_t = \frac{2}{9} \left\{ \frac{R^2 g [1 - (\rho_g / \rho_w)]}{\nu_t} \right\} \quad (1)$$

式中 g ——重力常数(即重力加速度),取为 9.81 m/s^2 ;

R ——气泡半径(mm);

ν_t ——水的运动粘滞系数, 10°C 时为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;

ρ_w ——水的密度, 10℃时为1000kg/m³;

ρ_g ——空气的密度, 10℃时为1.29kg/m³。

上式亦名斯托克斯公式*。现将空气、水及重力常数的相应值代入公式(1), 即得出小气泡的上升速度(m/s)为

$$V_t = 1.45R^2 \quad (2)$$

从理论上讲, 此式仅当气泡半径R小于0.068mm时才属正确。

对于半径为0.068~0.4mm的气泡, 下述经验公式与实验数据相吻合

$$V_t = 0.625R^2 \quad (3)$$

对于半径为0.4~10mm的气泡, 上升速度约为0.25m/s。当气泡直径从0.4mm增至10mm时, 气泡即由球状变为瓜皮帽状。当气泡直径约为2mm时, 气泡路径即出现不稳定性, 亦即气泡路径变得不规则或呈螺旋形。卡莫来特^[17]认为在此范围内, 浮力和表面张力大于惯性力的作用, 从而提出下式

$$V_t = \left(1.04gR_b + \frac{1.07\sigma}{\rho_w R_b} \right)^{1/2} \quad (\text{m/s}) \quad (4)$$

式中 R_b ——相当于气泡体积的球体的半径(mm), $R_b = \left(\frac{3\omega}{4\pi} \right)^{1/3}$;

g ——重力常数9.81m/s²;

σ ——界面的表面张力, 对于水-气界面, $\sigma = 0.0728\text{N/m}$;

ρ_w ——水的密度, 其值为988kg/m³;

ω ——气泡的体积(mm³)。

将上述各常数代入(4)式, 即得

$$V_t = [0.01R_b + (0.079/R_b)]^{1/2} \quad (5)$$

对于直径大于10mm的气泡, 其上升速度仅为浮力与惯性力比值的函数。戴维斯和泰勒^[18]指出其上升速度为

$$V_t = \frac{2}{3} (gR_c)^{1/2} \quad (6)$$

式中 R_c ——瓜皮帽形气泡的曲率半径。

利用此一关系式及图2中瓜皮帽的几何形状, 即可用一个当量半径来表示上升速度如下

$$V_t = (gR_b)^{1/2} \quad (7)$$

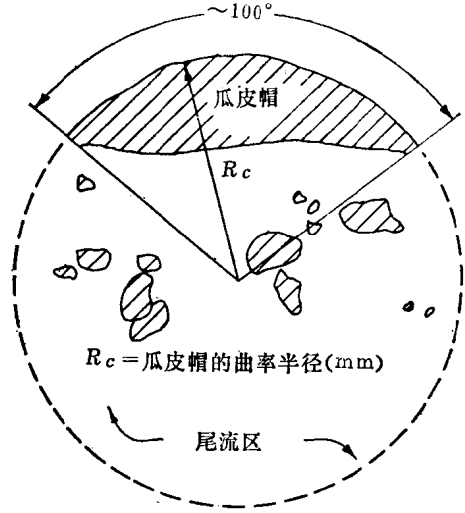


图2 液体中的大气泡

* G.G. 斯托克斯系第一个用解析法确定粘滞流体中缓慢运动的球体阻力的研究者。他认为球体质量系相对于流体质量而沉降。

$$\text{或 } V_t = 0.10 R_b^{1/2} \quad (8)$$

式中 R_b 的单位为 mm, 而 V_t 的单位为 m/s。

当气泡半径变大时, 此式与卡摩来特的公式 (4) 相渐近。

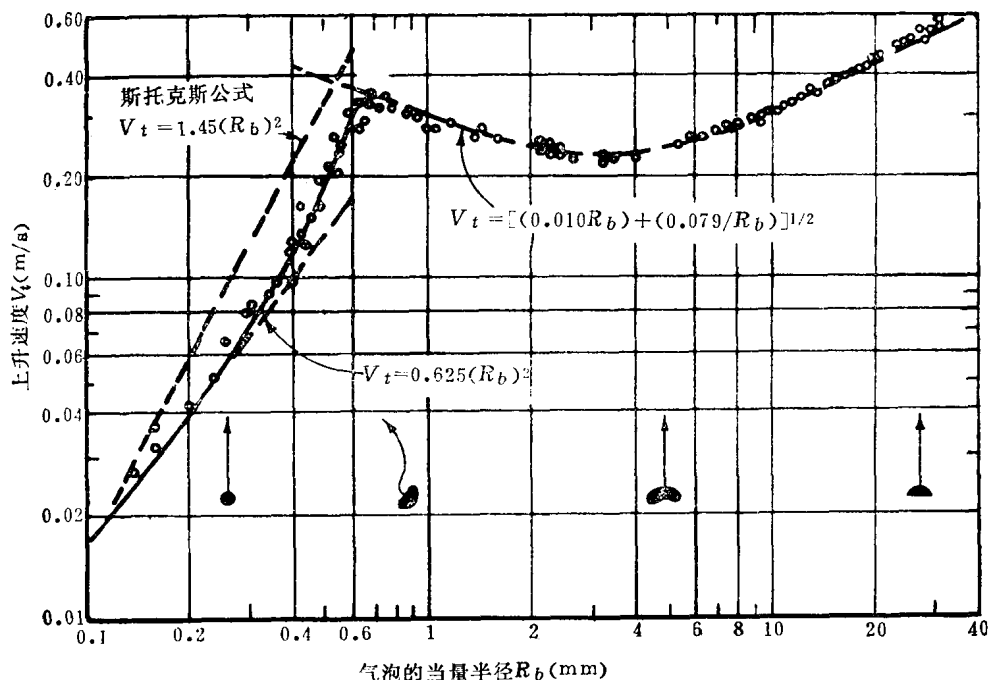


图 3 过滤水或蒸馏水中气泡的上升速度与尺寸的函数关系 (哈伯曼和摩通, 见[26])

2. 剪切流中气泡的尺寸

在流水中或机械扰动系统中的平均气泡尺寸, 主要取决于流体中的剪切应力。此一认识可从研究两种极端情况而想像得出。今设想紊流中有许多微小气泡。当气泡上升时, 由于各自的尾流间的相互卷吸而力图聚集成团或“结块”。各个气泡一旦接触, 即结合成为一个较大的气泡。这一过程一直持续到愈来愈大的气泡被形成。

另一个极端情况即设想紊流中有一个很大的气泡。流场中紊动引起的剪切应力, 力图将大气泡撕裂或破碎成愈来愈小的气泡。

由于“撕裂”和“聚结”的同时作用, 可以推断出存在有某一临界尺寸的气泡, 它相应于表面张力和流体剪切应力的平衡。此一平衡关系可用一适当定义的韦伯数 W 来表征。现今估算气泡临界尺寸的唯一公式是由欣兹^[35]提出的。此式为

$$d_{95} = 0.725 \left[\left(\frac{\sigma}{\rho_w} \right)^3 \left(\frac{M}{P} \right)^2 \right]^{1/5} \quad (9)$$

式中 d_{95} ——该直径或较小直径的气泡中挟持了全部空气的95%;

P/M ——单位质量的消能率;

ρ_w ——流体的密度;

σ ——界面的表面张力。

管道中水流的单位质量的消能率可按下述方法来估算。劳斯^[59]曾经指出, 长 L 的管

子中消能率为

$$P = Q\gamma h_i \quad (10)$$

式中 Q —— 流量;

h_i —— L 长管段的水头损失;

γ —— 流体的容重。

L 长管段内水的质量为

$$M = \rho_w AL = \frac{\rho_w QL}{V} \quad (11)$$

式中 A —— 管子的横断面面积;

V —— 平均流速。

因之, 对于管流, 单位质量的消能率为

$$P/M = \frac{gh_i V}{L} = gS_f V \quad (12)$$

式中 S_f —— 能头线比降, 其值为 h_i/L 。

将公式 (12) 中单位质量消能率代入 (9) 式, 即得

$$d_{95} = 0.725 \left[\left(\frac{\sigma}{\rho_w} \right)^3 \left(\frac{1}{gS_f V} \right)^2 \right]^{1/5} \quad (13)$$

公式 (13) 又可写成下述无因次式

$$\frac{d_{95}}{D} = 0.658 \left[\left(\frac{\sigma}{\gamma D^2} \right)^3 \left(\frac{D^5 g}{Q^2} \right) \left(\frac{1}{S_f} \right)^2 \right]^{1/5} \quad (14)$$

式中 D —— 管道直径。

第一个无因次数 $\gamma D^2/\sigma$ 叫做邦德数, 或叫做艾特沃斯数或拉普拉斯数。第二项 $\frac{D^5 g}{Q^2}$

是佛汝德数 $V/(gD)^{1/2}$ 的另一形式。至于气泡的分布以及非水平水流中气泡的运动方向, 将在本章 § 4 和第二章 § 2 中补充叙述。

3. 紊流中气泡的上升速度

即使可用公式 (14) 求出紊流中气泡的直径, 但气泡的上升速度并不能简单地由图 3 来确定。图 3 只可用来估算静水中单个气泡的上升速度。由于紊动以及其他气泡的存在, 故须对图 3 中的上升速度加以修正。

和对泥沙颗粒那样, 紊动也力图使气泡维持悬浮状态。因而紊动作用使得气泡的上升速度有所降低。如 V_t 为静水中气泡的上升速度, 而 V_f 为紊流中的上升速度, 则二者之关系为

$$V_f = aV_t \quad (15)$$

式中 a —— 由经验确定的变数。

海恩德^[28]曾经求得此变数与用于环形水跃的佛汝德数之间的关系。引入合适的假定后, 该佛汝德数被换算为无因次流量参数的当量值。现将变数 a 与此无因次流量参数的关系给出在图 4 内。

紊动对气泡的影响, 可从对气泡的浮力和紊扩散力所作的研究中看出。气泡因浮力作用而有向上运动的趋势, 而紊动则使气泡由浓聚区向稀疏区运动。这两种力形成的两种质量流之间的平衡 (垂直于渠底), 可用下式表示

$$CV_f = \varepsilon \frac{dC}{dy} \quad (16)$$

式中 C ——局部含气量；
 V_f ——紊流中气泡的上升速度；
 y ——渠底的法线方向；
 ε ——气泡的质量转换系数。

如能求得 V_f 与 ε 的函数关系，即可得到含气量与水深的关系式。

但在参考文献中，至今尚找不到有关含气量对气泡上升速度影响的资料。因之关于紊动和含气量对气泡动力学的作用，尚须作进一步的研究。

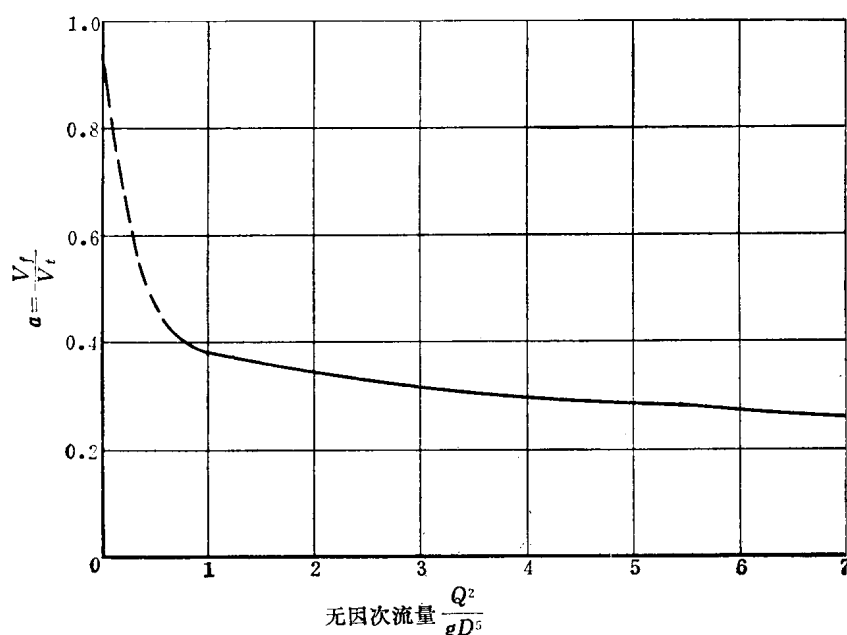


图 4 紊流中气泡的上升速度

§ 3 水流的竖向结构和纵剖结构

对于明渠中高度紊动的水流，按照契伦和安德生的意见（参见[41]及[42]），其竖向结构可以分为四个区（图 5）：

- 1) 水滴飞溅的上部区；
- 2) 水面呈连续面的掺混区；
- 3) 气泡在水体中扩散的下部区；
- 4) 无气区。

上部区是由掺混区抛射出的水质点所组成。这些水质点能自平均水面抛升相当大的高度。但由于这一区的质量很小，通常在工程中都不予考虑。

掺混区内的水面波动具有随机性的波幅和频率。但摄入水体的全部空气以及自水体逸出的空气都要通过这个区域。因之对掺混区特性的了解就显得特别重要。此外，当必须防

止水流翻越边墙时，明渠边墙的高度即取决于掺混区内的最大波高。

下部区是指波浪并未侵入的区域。但该区内任一水深的含气量均取决于气泡的数量和大小。影响含气量分布的主要因素是水流的紊动强度分布。利用紊流边界层理论，现今已有可能来建立该区内的含气量分布规律。但因气泡具有杀减紊动的趋势，故此一问题也并未获得彻底解决。含气量、气泡大小的分布和紊动强度三者之间的内在关系，也尚未获得。

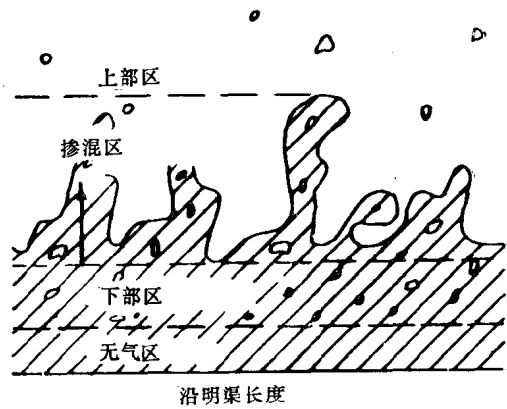


图 5 明渠水流的结构（见[42]）

无气区仅存在于掺气现象还正在发展的明渠断面内。在实际应用中，无气区与下部区的界面一般都不能准确定出。在此界面上，含气量具有很小的数值。同时含气量随水深的

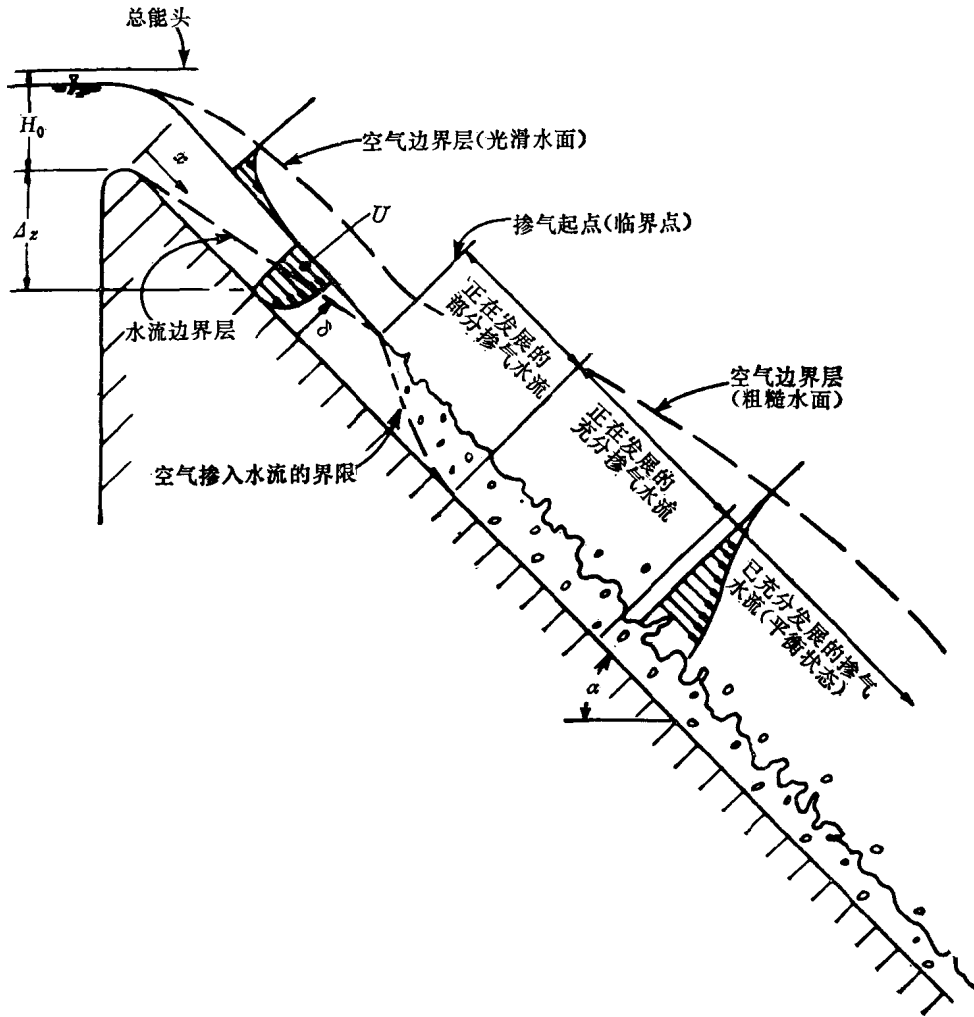


图 6 明渠中掺气水流的纵剖结构

变化率也很小。海尔布朗等人^[31]就曾特别提到过含气量测量设备不能测出渠底附近的极微小气泡。这就说明上述界面的位置，事实上取决于测量仪器的灵敏度。

除了定义水流的竖向结构外，也可能鉴别出宽阔明渠水流的纵剖结构。此处所说的宽阔明渠系指渠宽大于五倍水深。鲍曼^[11]认为宽阔明渠内的自掺气水流，在纵剖内具有三个明显的区域：

- 1) 无气区，其中紊流边界边尚未到达水面；
- 2) 掺气发展区，其中掺气现象正在发展，但含气量的纵剖结构沿长度并不恒定；
- 3) 掺气充分发展区，其中含气量的纵剖结构沿长度恒定。

喀勒、赖和伍德^[39]将鲍曼的第二区又分为两个副区。第一副区内掺气正在发展，但掺气并未到达槽底。第二副区内掺气已到达槽底，但含气量的纵剖结构仍沿长度继续在变化(图6)。

§4 设计参数

从工程观点来看，输水建筑物设计中的重要参数计有：

- 1) 掺气起点的位置；
- 2) 已充分发展的掺气水流的地点；
- 3) 水流的平均含气量；
- 4) 掺气水流的水深；
- 5) 掺气水流中水和空气的流速。

有关这些方面的研究成果，分别在下面各节中叙述。

1. 掺气起点的位置

在宽阔渠床中，“白色水”开始出现的地点，一般都同意就是渠底引起的紊动作用首先到达水面的地点。不少研究者曾提出过确定这一临界点位置的不同公式。但好些早期公式都比较粗糙。随着对光滑壁面和粗糙壁面边界层的深入了解，临界点位置的预测也有所改善。虽然涉及到理论上的某些问题依然存在，但现有方法求得的结果已足够工程实用所需的精度。

早期确定边界层厚度 δ 的一些典型公式计有：

安勒摩勒的公式^[4]

$$\frac{\delta}{x} = 0.01 \quad (17)$$

式中 x ——从边界层开始发生地点算起的距离。

希柯克斯的公式^[34]

$$L_c = 14.7q^{0.53} \quad (18)$$

式中 L_c ——从掺气起点算起的距离；

q ——单宽流量(立方英尺/秒·英尺)。

还有贝塔等人建议的公式^[10]