

(2)

6-10

清水及浑水高速流掺气和掺气抗磨的研究^①

王世夏

TV131.3

(河海大学水力发电工程系 南京 210098)

摘要 本文介绍对明流泄水建筑物高速水流自掺气、槽坎人工掺气以及含沙浑水掺气抗磨的系统研究。通过理论分析、室内试验和原型观测的综合探索,已取得一系列重要研究成果:明流自掺气、人工掺气的掺气量和掺气浓度分布、槽坎掺气减蚀设施的掺气保护长度、含沙水流掺气特性和掺气抗磨效果以及掺气水流的模型律和尺度效应等。

关键词 高速水流 掺气 含沙水流 掺气抗磨 掺气保护长度 掺气水流模型律 尺度效应

1 明渠水流自掺气及其模型律

对高速水流掺气的系统研究是从明渠水流自掺气研究开始的,并着重分析探讨了这一物理现象的影响因素。全面考查水流与空气、固体边界相对运动和相互作用的机理,可以认为,自掺气的发生根源于紊流边界层发展和水面波失稳破碎两方面,涉及众多因素。即使把问题限于无冲击波的明渠亚音速水流,水气混合流体视为不可压缩流体,按 π 定理进行因次分析,掺气浓度 c 仍需由包含5个无因次复合参数的一般函数表达^[1],即

$$c = f(Fr, Re, We, N, J) \quad (1)$$

式中 $Fr = V/\sqrt{gr}$ 为弗劳德数, V 为流速, r 为水力半径, g 为重力加速度; $Re = Vr/\nu$ 为雷诺数, ν 为运动粘滞系数; $We = V\sqrt{r}/\sqrt{\sigma/\rho}$ 为韦伯数, σ 为毛细管常数, ρ 为流体密度; $N = n\sqrt{g}/r^{1/6}$ 为无因次糙率, n 为曼宁糙率; J 为渠底纵坡降。

式(1)既是一个多参数的一般函数,必

须进一步分析各参数对 c 影响的主次,找出主要参数及其定量影响,才能建立 c 的具体表达式。从模型理论观点说,式(1)意味着自掺气水流的相似准数是 Fr, Re, We, N, J ,模型要与原型严格相似,必须使这5个准数在模型与原型之间同量。尽管在模型与原型几何相似前提下坡降的同量($J = idem$)是自动满足的,而要缩尺模型与原型包括 Re, We 在内的所有准数都同量,实际上是不可能的,故须要考查影响 c 的主要参数,寻求决定性相似准则。

为进行系统分析,筛选出140组原型观测(90组)和室内试验(50组)的明流自掺气实测样本数据。这些数据全测自渠槽的均匀等宽直段,排除了水流边界变化导致的附加紊动及冲击波影响,并具有各种不同的糙率 n 值。

根据样本数据,按断面平均值,就 c 对 Fr, Re, We, N 和 J 分别进行了相关分析。结果表明,其中 Fr, N 与 c 的相关关系最为显著,其余的都不够显著;并且发现,在 N 相

① 本文以国家自然科学基金资助项目“含沙高速水流掺气抗磨蚀的研究”为主,介绍有关高速水流掺气的系统研究成果,研究人员有袁根忠、王世夏、黄细彬、徐还等。

同情况下, c 与 Fr 成正比, Fr 相同情况下, 与 N 成正比。为此定义另一无量纲参数为 Fr 与 N 之积, 记为

$$A_v = Fr \cdot N = nV/r^{2/3} \quad (2)$$

并按 140 组资料, 考查 $c = f(A_v)$ 的相关性, 结果得线性相关系数达 0.98。回归分析给出直线方程^[1]

$$\begin{aligned} c &= 0.538(A_v - 0.02) \\ &= 0.538(nV/r^{2/3} - 0.02) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 V, r 分别指不计掺气的断面平均流速和水力半径, 以便实用求 c 。误差分析表明, 用此式估计 c 值的均方根标准差仅为 0.027。这表明新参数 A_v 既是定量表征 c 的主要参数, 又可视作模型研究水流自掺气现象的决定性相似准数。几何相似前提下, 明流自掺气相似准则可写为

$$\begin{aligned} A_{v_m} &= n_m V_m / r_m^{2/3} = A_{v_p} \\ &= n_p V_p / r_p^{2/3} = \text{idem} \end{aligned} \quad (4)$$

式中脚标“m”和“p”分别指模型和原型。

根据准则(4), 各水力因素的相似比尺甚易相应导出。例如设几何长度比尺为 λ , 则掺气浓度 c 、流速 V 、流量 Q 等物理量相似比尺依次为

$$\lambda_c = \lambda_v \lambda_1 / \lambda^{2/3} = 1 \quad (5)$$

$$\lambda_v = \lambda^{2/3} / \lambda_n \quad (6)$$

$$\lambda_Q = \lambda^{8/3} / \lambda_n \quad (7)$$

可以看出, 如模型糙率恰好满足 $\lambda_n = \lambda^{1/6}$, 则得熟知的弗劳德准则决定的一系列比尺关系 ($\lambda_v = \lambda^{1/2}$, $\lambda_Q = \lambda^{5/2}$ 等)。但新准则的优越性在于可用任一 λ_n 来控制模型糙率, 只要相应用关系式(5)~(7)等进行模型与原型物理量的相似换算即可。这使得模型的设计、制作简便多了。

但要注意, 以 $A_v = \text{idem}$ 作为水流自掺气的相似准则, 无法使式(1)中 Re 等准数在缩尺模型与原型间同量, 总难免有尺度效应。所以研究掺气水流的模型尺寸自然是越大越接近原型越好。重要课题的模型研究宜

用不同比尺的系列模型试验结果来校正尺度效应, 并可建议较简便的“双模型法”: 对原型建立两个比尺差异大的模型(例如 $\lambda_2 \geq 2\lambda_1$), 设自模型 1 测得的 c_1 不等于自模型 2 测得的 c_2 , 则意味着尺度效应的存在, 于是令

$$c_2/c_1 = (\lambda_2/\lambda_1)^a \quad (8)$$

则由试验中两模型实测数据的分析处理, 即可定出

$$a = (\lg c_2 - \lg c_1) / (\lg \lambda_2 - \lg \lambda_1) \quad (9)$$

由于原型可视作 $\lambda_2 = 1$ 的模型 2, 故可按下式求合理原型值:

$$c_p = c_1(1/\lambda_1)^a \quad (10)$$

2 清水及浑水急流过掺气坎时挟气能力和尺度效应

人工掺气设施虽有多种型式, 但就明槽的水流底部掺气而言, 都可大致概化为一种坎式设施, 利用过坎急流与坎下槽底的局部脱离形成空腔负压, 使空气自动被卷吸和掺入水流并随之输移, 只要通气孔有足够断面连通大气可向坎下充分供气就行。掺气坎的运行工效以水流过坎时挟气能力为定量标志, 挟气能力越大者坎下游槽底保护范围也越长。如何估计此挟气能力乃研究的焦点之一。对此以往已有不少基于模型试验或原型观测所得经验公式, 其共同点是以过坎水流弗劳德数作为决定挟气能力的水力参数。诚然, 表征惯性力与重力之比的弗氏数自属重要, 但仅此尚不能反映对挟气能力亦属重要的水流绝对紊动尺度的大小。这就使得各公式差异很大。大致上, 据雷诺数很大的原型观测所得公式计算挟气量较大, 而据雷诺数相对小得多的模型试验所得公式计算挟气量也就较小。可见, 标志紊流绝对尺度的雷诺数也是不可忽视的参数。

为此我们研究过掺气坎急流的挟气能力时, 收集、筛选和整理出具有宽广覆盖范围的所有有关参数的实测样本数据 84

组^[2],其中42组取自我校完成的各项清水水工模型试验,21组取自乌江渡枢纽各泄水建筑物的原型观测,还有21组取自我们为小浪底枢纽泄洪排沙隧洞进行的浑水水工模型试验。对这些数据进行数理统计和回归分析的结果,得到清水或浑水急流过掺气坎时挟气能力统一计算公式:

$$\beta_s = 0.002935(Fr - 1)^{0.935} Re^{0.174} \cdot (\Delta/h)^{0.363} (\sec\alpha)^{0.032} - 0.1219S_0 \quad (11)$$

式中 $\beta_s = Q_g/Q$, 即急流自坎下挟气流量与清水或含沙浑水流量之比的无因次挟气能力; $Fr = V/\sqrt{gh}$ 为过坎水流弗劳德数, V, h 分别为坎前断面平均流速和水深; $Re = Vh/\nu$ 为过坎水流雷诺数, ν 为清水或浑水运动粘滞系数; Δ/h 为相对坎高, 即坎顶到槽底面垂直距离 Δ 与坎上水深 h 之比; $\sec\alpha$ 为槽底纵坡角 α 的正割; S_0 为无因次含沙浓度, 即浑水的悬移质含沙量 (kg/m^3) 除以沙粒密度 ($\approx 2650 \text{ kg}/\text{m}^3$) 之值。

式(11)反映了我们分析大量人工掺气实测资料所形成的共识: 在 $(Fr - 1), Re, \Delta/h$ 及 σ 的可能取值范围内, β_s 随其中任一个加大而加大; $(Fr - 1), Re, \Delta/h$ 中任一个为零, β_s 随之为零, 但 α 取值为零 (槽底水平) 时 β_s 不应随之为零 (事实上这时 $\sec\alpha = 1$); 在牛顿流体范围内随 S_0 的加大, β_s 很缓慢地减小; $S_0 = 0$ 时即为常见的清水人工掺气情况, β_s 换用 β 表示, 式(11)成为

$$\beta = 0.002935(Fr - 1)^{0.935} Re^{0.174} \cdot (\Delta/h)^{0.363} (\sec\alpha)^{0.032} \quad (12)$$

式(11)或式(12)中各参数的指数显示, 就影响挟气能力的水力因素而言, 弗氏数影响最大, 这本在意料之中; 但要注意的是, 表征水流紊动强度绝对量的雷诺数影响也十分巨大, 因为不同几何尺度下 Re 的变幅很大。例如我们在本项研究中所用实测样本数据的 $Re = (0.143 \sim 226.7) \cdot 10^6$, 即原型观

测条件下 Re 值与室内试验条件下 Re 值相比竟超过1500倍。可见挟气能力公式中 Re 的指数虽仅为0.174, 影响之大却绝不能忽视。 Re 值的巨大影响意味着显著的尺度效应。从模型理论来说, 这使得重力相似缩尺模型上测得的无因次挟气能力 β_s 或 β 不能视同原型值。这也解释了前文所说以往各家公式估计挟气能力差异大的原因。

可庆幸的是, 挟气能力公式提供了校正尺度效应的可能性。设在雷诺数为 Re_m 的缩尺模型上测得挟气能力 β_m , 则据式(12)易知, 对于雷诺数为 Re_p 的原型, 相应 β_p 应为^[3]

$$\beta_p = \beta_m (Re_p/Re_m)^{0.174} \quad (13)$$

此式适用于清水急流人工掺气模型试验结果的校正。对于含沙浑水急流的人工掺气, 如模型与原型几何相似, 且 Fr, S_0 同量, 则由式(11)也易知, 模型测得的 β_{sm} 可用下式换算到原型含沙浑水急流实际挟气能力 β_{sp} :

$$\beta_{sp} = (\beta_{sm} + 0.1219S_0)(Re_p/Re_m)^{0.174} - 0.1219S_0 \quad (14)$$

关于过坎急流挟气能力的统一公式(11), 还可作一重要推论。为此不妨将该式改写为如下两式:

$$\beta_s = 0.1219x \quad (15)$$

$$x = 0.02408(Fr - 1)^{0.935} Re^{0.174} \cdot (\Delta/h)^{0.363} (\sec\alpha)^{0.032} - S_0 \quad (16)$$

从而可知, 浑水急流要实现有效掺气, 至少要满足 $x > 0$, 亦即含沙浓度要满足

$$S_0 < 0.02408(Fr - 1)^{0.935} Re^{0.174} \cdot (\Delta/h)^{0.363} (\sec\alpha)^{0.032} \quad (17)$$

所幸对 S_0 的这一限制条件一般不难满足。以我们的试验而言, 各工况浑水最大含沙量达 $200 \text{ kg}/\text{m}^3$, 即 $S_0 = 0.0755$, 而式(17)右边函数最小值为 $0.182 > 0.0755$, 故能有效掺气。只当 S_0 大到使流体成为宾汉体的量级 (以我们试验所用黄河花园口沙样为例,

中径 0.023 mm, 按其粒配作流变分析结果, 宾汉体的相应含沙浓度为 $S_0 \geq 0.1507$, 即含沙量要超过 399.39 kg/m^3 , 不等式(17)才可能不满足, 而如此大的 S_0 一般不会出现高水头泄水建筑物。但这说明我们将问题限于牛顿流体的必要性。

3 人工掺气坎的掺气保护长度

为研究人工掺气坎的掺气保护长度, 除认清过坎急流的挟气能力外, 我们对坎下游流场掺气浓度分布及其沿程变化规律进行了理论分析和数值计算^[4], 还进行了大量试验观测。众所周知, 由于气泡在水中上浮散逸特性, 急流自坎下空腔的挟气量由空腔末端处的最大值向下游渐减, 亦即槽底掺气浓度 C 沿程渐小。掺气保护长度 L 则与工程保护目的要求的最小 C 值相应。工程界过去在清水急流掺气减蚀问题上曾习以 $C \geq 7\%$ 为临界免蚀标准; 其后我国据冯家山、乌江渡等工程的原型观测资料发现这样的免蚀 C 值要求偏大, 有文献建议以 $C = 3\% \sim 4\%$ 为混凝土临界减蚀掺气浓度要求^[5]。至于含沙浑水情况下掺气减蚀和掺气抗磨, 则还无建议可考。

考虑到免蚀掺气浓度标准越高, 相应自坎顶起向下游计的保护长度 L 越小, 故应将不同要求的槽底掺气浓度值标为变量 C_L , 与其它参变量一起都作为 L 的影响因子进行研究, 才能得正确结论。由于对任一给定 C_L 值, L 显然与急流自坎下挟气量成正比, 注意式(15)、式(16)可知, L 必与 x 成正比。按照这一概念, 对 84 组坎下游槽底掺气浓度分布实测数据进行处理分析^[6], 最后得以 L 与坎上水深 h 之比表示的无因次掺气保护长度公式为

$$\beta_L = L/h = 4.171x/C_L^{0.375} \quad (18)$$

或展开写为

$$\beta_L = (0.10044(Fr - 1)^{0.935} Re^{0.174}$$

$$\cdot (\Delta/h)^{0.363} (\sec\alpha)^{0.032} - 4.171S_0]/C_L^{0.375} \quad (19)$$

此式是可适应不同掺气浓度要求估计清水或浑水急流人工掺气保护长度的统一公式, 清水情况无非取 $S_0 = 0$ 而已

4 含沙高速水流掺气抗磨

含沙高速水流掺气抗磨这一课题是我们首先提出, 并先后在水利水电科学基金、国家自然科学基金资助下首先进行研究的课题。此前还未见国内外有这方面研究的任何文献资料。所以试验研究所需的高速浑水循环系统、浑水掺气抗磨试验装置、各有关物理量的传感器和观测设备, 都在很大程度上是我们专门设计、建造和自制的^[7-9]。高速浑水循环系统可提供的流速最大可达 30 m/s , 掺气抗磨试验段实有断面平均流速 $V = 15.10 \sim 29.38 \text{ m/s}$ 。浑水用沙仍取自黄河花园口, 试验实用含沙浓度 $S_0 = 0.006865 \sim 0.038462$, 相应浑水密度 $\rho = 1011.0 \sim 1061.5 \text{ kg/m}^3$ 。磨蚀试件用水泥沙浆浇制, 并在放水试验时测定其抗压强度 R 及饱水面干容重; 据每次试验前后试件的天平称量差、放水历时及试件表面积可测得以单位时间磨蚀深度计的磨蚀率 W 。试验中掺气浓度变幅为 $C = 1\% \sim 65\%$; 测得的磨蚀率变幅为 $W = 4.60874 \cdot 10^{-10} \sim 70.12 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$; 相应各试件材料强度变幅为 $R = 2.2 \cdot 10^6 \sim 25.872 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ 。

考虑磨蚀率的主要影响因素, 可写为如下函数:

$$W = f(V, S_0, \rho, R, C) \quad (20)$$

并由 π 定理, 转换为下列无因次化等价函数:

$$\begin{aligned} \omega &= W/V \\ &= \varphi\left(\frac{\rho V^2}{R}, S_0, C\right) \end{aligned} \quad (21)$$

这里 ω 可称为无因次磨蚀率。按此函数模式, 对 35 组实测样本数据进行非线性回归

分析^[10]、整理得如下公式:

$$\omega = 64.3 \left(\frac{\rho V^2}{R} \right)^{1/2} S_0^{2/3} C^{-1/3} \cdot 10^{-10} \quad (22)$$

此无因次化公式可用于任何单位系统。用国际单位时,因 W, V 都以 m/s 计,故 ω 是十分小的数字。也可改写此式为便于直接求磨蚀率 W 的实用形式,并将 W 单位由 m/s 改为 mm/h , 而不变 ρ, v, R 等其它物理量单位,则得

$$W = 0.023148 \frac{\rho^{1/2} V^2 S_0^{2/3}}{R^{1/2} C^{1/3}} \quad (mm/h) \quad (23)$$

此式清楚显示, W 随 V, S_0, ρ 的加大而加大,随 R, C 的加大而减小。这就定量地证实了含沙水流掺气确可助边壁材料抗磨。

值得指出的是,掺气抗磨效果表现为 W 与 C 的立方根成反比,或当定义 $1/W$ 为抗磨度,则后者与 $C^{1/3}$ 成正比。此变率粗看虽不大,但由于工程上提高 C 较易,实用抗磨效果仍很显著。例如 C 从 0.01 变到 0.05, 0.10, 0.20, 则 $1/W$ 增至原值的 171.2%, 215.8%, 272.1%。可见对兼有排沙任务的高水头泄水建筑物,采用人工掺气抗磨,将取得显著效益。

参考文献

- 1 王世夏.明渠自掺气水流掺气浓度估算.水利学报,1984(7):44~48
- 2 王世夏,吴新.通过掺气坎的急流的挟气能力.河海大学学报(水电专刊),1990:21~30
- 3 Wang Shixia. Air entraining capacity of supercritical flow over an aeration ramp and the scale effect upon it. In: Proc of Int Symposium on Hydraulic Research in Nature and Laboratory, Wuhan, 1992, Vol 1: 132~137
- 4 袁银忠,向建军.掺气挑坎下游气泡输移的研究.河海大学学报,1988(1):26~33
- 5 邵英英,潘水波.泄水建筑物通气减蚀设施的设计与应用.水力发电,1987(10):13~16
- 6 王世夏.含沙高速水流掺气特性和掺气抗磨作

用.河海大学学报,1994(4):32~38

- 7 王世夏.高速含沙水流掺气抗磨作用的研究.人民黄河,1990(3):39~43
- 8 Wang Shixia. Possibilities for prevention of abrasion of material in sediment flow by aeration. In: Proc of 7th Congress of APD - IAHR, Beijing, 1990, Vol II: 303~308
- 9 袁银忠,黄细彬,傅宗甫.水流边界剪切力的量测及掺气水流固壁剪切力的特性.河海大学学报,1993(4):16~20
- 10 王世夏.含沙高速水流掺气和掺气抗磨特性.见:徐秉衡,栾力主编.泄水工程与高速水流论文集.成都:成都科技大学出版社,1994.167~173

(收稿日期:1995-06-28)

(上接第66页)

3 出版物

a. 《国际水简讯》(Newsletter - Water International). 季刊,负责把有关国际水资源协会及其成员的活动情况和一些国际水资源领域重要的信息通报给其读者。

b. 《国际水》(Water International), 季刊,刊登世界上重要的给水工程及其财务、规划、开发、设计、施工、运行和管理的报告;国际上所关心的水对社会、经济、生态和环境的影响;科技回顾与进展动态;具有专业特点的国际信息;专业与教育活动、机遇与援助信息;水资源领域的各种产品和业务的报告。

c. 水资源选集,刊登选自与水资源领域中国际资源有关的发表或尚未发表的重要的文章,其中有:为纪念周文德而出版的《水文学新领域》;周文德纪念卷《全球水·科学与工程》;《水资源系统规划》;《气候波动及水管理》;《持久开发 21 世纪水》。

d. 会议论文集,包括到目前为止该协会的 8 次会议论文集,以及非洲干旱与半干旱地区水文及水文地质发展动态国际学术讨论会论文集(1989);水权利转换性(water entitlements transferability)国际学术讨论会论文集(1990);水污染问题综合方法国际学术讨论会论文集(1991);亚马逊河流域水管理国际学术讨论会论文集(1991);补充灌溉及干旱水管理国际会议论文集(1992);中东水资源国际专题讨论会论文集(1993)。(元国江 供稿)