

文章编号: 1001-6791 (2000) 02-0144-04

# 掺气减蚀设施体型优化研究<sup>\*</sup>

杨永森<sup>1</sup>, 杨永全<sup>2</sup>

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 四川大学高速水力学国家重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 建立了计算掺气设施水力特性的数学模型和挑坎掺气槽坎高的优化目标函数, 对原型掺气槽的体型优化进行了研究。研究表明, 掺气设施的优化坎高主要与来流  $Fr$  数有关, 来流  $Fr$  数愈大, 所需坎高愈小; 来流  $Fr$  数愈小, 所需坎高愈大。

**关键词:** 挑坎掺气槽; 通气量; 体型优化

**中图分类号:** TV 131.34; TV 222.5      **文献标识码:** A

在高速过流的泄水建筑物过流面上设置掺气设施, 促使水流掺气, 以减免过流建筑物可能发生的严重空蚀破坏, 是水工中广泛采用的减蚀技术。试验研究表明, 当水中掺气浓度达  $C=1\% \sim 2\%$  时, 能大大减轻固壁面的空蚀破坏; 当掺气浓度达  $5\% \sim 7\%$  时, 空蚀破坏完全消失。

掺气设施体型的优化是设计中的重要问题, 由于掺气机理复杂, 对通气量等问题理论上研究尚不完善, 目前有关掺气槽体型优化方面研究成果很少, 尚未有成熟的理论方法。通过模型试验, 时启燧<sup>[5]</sup>, Vischer<sup>[4]</sup>等人对掺气槽的选型进行过较系统的研究, 并给出了有关掺气槽优化选型的一些定性意见; Rutschmann<sup>[2,3]</sup>曾对掺气槽的体型优化进行过理论上的探讨, 但从其通气量计算公式与原型实测资料的符合程度来看, 误差较大; 而且其中给出的以空腔下气流流速与水流流速之比作为挑坎坎高优化目标函数, 在物理机理上存在问题。

本文运用作者提出的关于通气量的数学模型, 并建立新的坎高优化目标函数, 来研究掺气设施体型尺寸的优化, 以期给出较为符合实际的结果。

## 1 水力计算公式

如图 1 所示为典型掺气槽过流。掺气槽空腔区的通气量是供气系统和射流挟气能力两方面作用的结果。为推求掺气槽的实际通气量、空腔负压、空腔长度等水力参数, 需给出供气系统特征曲线和射流挟气能力特征曲线。

1.1 供气能力曲线 根据气流的 Bernoulli 方程, 可求得供气系统曲线的方程。

$$Q_{a1} = CA \sqrt{\frac{2\Delta p_c}{\rho_a}} = DB \sqrt{\frac{2\rho_w}{\rho_a} p_N gh} \quad (1)$$

\* 收稿日期: 1999-01-22; 修订日期: 1999-06-11

基金项目: 四川大学高速水力学国家重点实验室基金资助项目。

作者简介: 杨永森 (1964-), 男, 贵州金沙人, 清华大学水利水电工程系副研究员, 主要从事水力学研究。

式中  $B$  为泄槽宽度;  $p_N$  为空腔负压指数, 且  $p_N = \Delta p_c / \rho_w g h$ ,  $\Delta p_c = p_a - p_c$ ,  $p_a$  为大气压力;  $p_c$  为空腔压力;  $h$  为挑坎末端断面水深;  $g$  为重力加速度;  $C$  为风速系数;  $A$  为通气孔断面总面积;  $D$  为掺气槽几何形状参数,  $D = CA / B$ , 表示单位宽度泄槽通气孔的有效面积;  $\rho_a$  和  $\rho_w$  分别为气和水的密度。

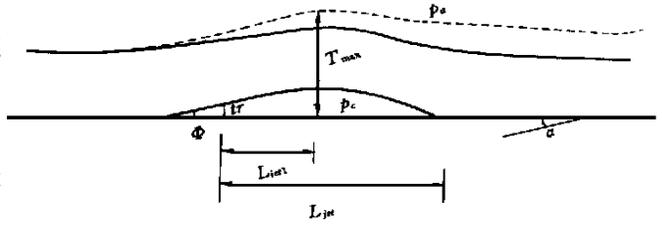


图 1 掺气设施过流示意

Fig. 1. Schematic description of flow above the aerator

1.2 射流挟气能力曲线 射流挟气能力曲线的理论公式为<sup>[6]</sup>

$$Q_{a2} = kVL_{je}B = n \quad gR^{-\frac{1}{6}} \left(1 - \frac{v_{nc}}{V_*}\right) VL_{je}B \quad (2)$$

式中  $k$  为掺气率系数,  $k = n \quad gR^{-\frac{1}{6}} \left(1 - \frac{v_{nc}}{V_*}\right)$ ;  $V$  为挑坎末端断面水舌平均流速;  $L_{jet}$  为空腔长度;  $R$  为水力半径,  $R = hB / (2h + B)$ ;  $V_*$  为摩阻流速,  $V_* = n \quad gR^{-\frac{1}{6}}V$ ;  $n$  为壁面糙率。根据文献<sup>[6]</sup>的研究, 掺气发生的临界掺气流速为

$$v_{nc} = \frac{8\sigma}{\rho_w d} + 2gp_N d \quad (3)$$

式中  $D$  为涡体的直径,  $d = \eta \quad vR / V_*$ ,  $\eta$  为系数, 其值为  $\eta = 25$ ;  $v$  为水的运动粘性系数;  $\sigma$  为水的表面张力系数。

1.3 空腔长度 根据作者对射流底缘运动轨迹的研究<sup>[8]</sup>, 导出了空腔长度的计算式为

$$L_{jet} = V_1 \cos \Phi_1 T + \frac{1}{2} g (\sin \alpha - 0.00625 F_r^2 r) T^2 \quad (4a)$$

$$T = \frac{V_1 \sin \Phi_1}{g (\cos \alpha + p_N)} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{2g(t_r - t_s) (\cos \alpha + p_N)}{(V_1 \sin \Phi_1)^2}} \right] \quad (4b)$$

式中  $F_r$  为弗劳德数, 且  $F_r = \frac{V}{\sqrt{gh}}$ ;  $V_1$  和  $\Phi_1$  为挑坎末端断面射流的实际出射流速和出射角, 且有

$$V_1 = 0.908V \quad (5)$$

$$\Phi_1 = \left[ \tan \left( \frac{t_r}{h\Phi} e^{-\frac{2.77725}{F_r - 1}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \Phi \quad (6)$$

水舌最高点到槽底的距离  $T_{max}$  的计算式为<sup>[8]</sup>

$$T_{max} = h + (t_r + t_s) + \frac{(V_1 \sin \Phi_1)^2}{2g (\cos \alpha + p_N)} + \frac{v \sqrt{g}}{R^{\frac{1}{6}}} L_{jet1} \quad (7)$$

$$L_{jet1} = V_1 \cos \Phi_1 T_1 + 1/2 g (\sin \alpha - 0.00625 F_r^2 r) T_1^2$$

$$T_1 = \frac{V_1 \sin \Phi_1}{g (\cos \alpha + p_N)}$$

式中  $\frac{u}{R} \sqrt{\frac{g}{L_{jet}}}$  项表示由于水舌紊动扩散导致水舌上表面的上升量;  $L_{jet}$  为水舌最大上升点至坎末端的距离。

根据以上计算式, 在给定设计参数和来流条件下, 通过数值计算, 可以很方便地求出通气量、空腔负压、空腔长度等水力参数, 从而定出掺气槽的实际工作状态。

## 2 优化模型及结果

掺气设施设计关心的问题包括: 掺气设施型式的选择, 掺气坎尺寸的选择和通气孔尺寸的选择。掺气设施型式的选择需结合工程布置方面的要求而定; 通气孔尺寸的选择一般以空腔容许负压来决定; 坎高的优化选择是设计中的重要内容。

在掺气坎尺寸的选择方面, 模型试验和工程经验表明, 挑坎挑角采用值一般为  $\Phi = 5 \sim 7^\circ$ ; 在小挑角范围内, 挑角的变化对流态的影响并不明显; 挑坎坎高采用值为  $t_r = 5.1 \sim 85 \text{ cm}$  之间; 一般单宽流量大时挑坎较高, 单宽流量小时挑坎较小。坎高尺寸的取值范围变幅较大, 而且受流动条件的影响。目前, 除依据工程经验和物理模型试验选取坎高值外, 尚未有理论予以说明采用多大的坎高值是比较合理的。

2.1 坎高优化 关于坎高尺寸的选择, 一般认为, 在各种运行条件下, 坎后必须保持稳定的空腔和满意的流态, 否则, 挑坎将成为人工突体, 在高速水流经过时将发生分离型空穴, 反而导致人为的破坏, 即要求选择的坎高不能太小。另外, 应使流经挑坎的射流与下游低板的交角尽量小, 以减轻射流对低板的额外冲击, 即要求坎高不能太大。

文献 [5] 给出了形成稳定空腔的临界条件

$$t_r/R \geq 23.5/X^3 \tag{8}$$

式中  $R$  为挑坎处水力半径;  $X$  为参数,  $X = \frac{V}{\sqrt{gR_1} \cos \alpha \cos \varphi}$

就泄洪洞和溢洪道中的掺气减蚀设施的设计而言, 还应使掺气保护范围尽量长, 而泄洪洞洞深和溢洪道边墙高度尽量小。基于水力学和经济两方面的考虑, 坎高的优化可以定义如下的优化目标函数。

$$\xi = T_{max}/L_{jet} = \min \tag{9}$$

其意义为水舌横向尺度与纵向空腔长度之比。  $T_{max}$  值可作为度量需开挖的明流泄洪洞洞深或明槽边墙高度的参量, 而  $L_{jet}$  可以作为度量掺气保护长度的参量。(9) 式表明,  $\xi$  值愈小, 则愈优, 即一定的泄洪洞洞深开挖量和边墙高度下, 获得最大的掺气保护范围; 或一定的掺气保护范围下, 泄洪洞洞深开挖量和边墙高度最小。

2.2 优化计算结果 以 Foz do A reia 溢洪道 1# 掺气槽为例进行优化计算。已知设计参数为:  $B = 70.6 \text{ m}$ ,  $\alpha = 14.5^\circ$ ,  $\Phi = 7.125^\circ$ ,  $t_r = 0.2 \text{ m}$ ,  $t_s = 0$ , 溢洪道壁面糙率  $n = 0.013$ , 来流条件

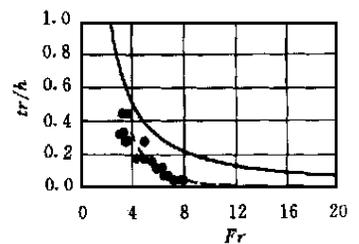


图 2 优化坎高与来流  $Fr$  的关系 (· 文献 [5] 试验稳定空腔临界条件; - - 文献 [5] 稳定空腔临界条件经验公式; — 本文优化坎高)

Fig. 2 Optimum ramp height vs approach Froude number

详见文献 [1]。

图2为优化坎高随来流 $Fr$ 数的变化特性。表明来流 $Fr$ 数愈大, 所需坎高愈小; 来流 $Fr$ 数愈小, 所需坎高愈大。

### 3 结 语

以上研究表明, 本文提出的掺气设施坎高优化模型所得结论, 定性上与人们的实际选型经验相符, 定量上也较为一致。

优化计算表明, 来流 $Fr$ 数愈大, 所需坎高愈小; 来流 $Fr$ 数愈小, 所需坎高愈大。

本文给出的掺气槽通气量计算模型和体型尺寸优化模型, 可作为设计参考。

#### 参考文献:

- [1] Pinto N L de S, Neidert S H, et al Aeration at High Velocity Flows [J]. Water Power & Dam Construction, Feb/March 1982, 34
- [2] Rutschmann P, Hager W H. Design and performance of spillway chute aerators [J], Water Power & Dam Construction, January 1990, 42
- [3] Rutschmann P. Calculation and optimum shape of spillway chute aerators. Int. Symp. on Model-Prototype Correlation of Hydr. Structures, P H Burgi, ed., ASCE, 1988
- [4] Vischer D, et al Hydraulic Modeling of Air Slots in Open Chute Spillway [J], Intl Conf on the Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structures, BHRA Fluid Engineering, Coventry, UK, 1982
- [5] 时启燧, 等 通气减蚀挑坎水力学问题的试验研究 [J] 水利学报, 1983, (3):
- [6] 杨永森, 等 掺气槽上自由射流挟气量的数学模型 [J] 水利学报, 1996, (3):
- [7] 邵瑛瑛, 潘水波 泄水建筑物通气减蚀设施的设计与应用 [J] 水力发电, 1987, (7):
- [8] 罗铭, 杨永森 掺气减蚀设施水力计算的改进 [J] 水利学报, 1998, (9):

## Optimum Shape of the Prototype Spillway Chute Aerator<sup>\*</sup>

YANG Yong-sen, YANG Yong-quan

(1. Dept of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. The State Key Laboratory for High Speed Hydraulics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In this paper, a mathematical model for calculating the air demand of the aerator is established, and the target mathematical function for optimizing the shape of the aerator is proposed. The aeration character and the optimum shape of a prototype aerator are investigated. The optimum area of the air slot and the optimum height of the ramp or step are calculated. The results are in good agreement with the measured data. The method proposed herein may be used for preliminary design purposes.

**Key words:** aerator; air demand; optimization shape

\* The project is supported by the State Key Laboratory for High Speed Hydraulics, Sichuan University.